



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO - UFRJ  
ESCOLA POLITÉCNICA – POLI/ UFRJ  
DEPTO. DE RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE – DRHIMA  
ENGENHARIA CIVIL



## PROJETO FINAL DE CURSO

Avaliação dos Impactos Gerados por Intervenções Estruturais  
em um Sistema de Drenagem Urbano e o seu Comportamento  
Perante a Elevação do Nível do Mar

*FELIPE FERREIRA DE ARAÚJO*

*Junho de 2010*

*Orientador*

*MARCELO GOMES MIGUEZ*

*Co-orientador*

*FLÁVIO CESAR BORBA MASCARENHAS*

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS GERADOS POR INTERVENÇÕES  
ESTRUTURAIS EM UM SISTEMA DE DRENAGEM URBANO E O SEU  
COMPORTAMENTO PERANTE A ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR**

Felipe Ferreira de Araújo

PROJETO FINAL DE CURSO SUBMETIDO AO CORPO  
DOCENTE DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UFRJ, COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A GRADUAÇÃO NO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL.

Aprovado por:

---

Prof. Marcelo Gomes Miguez, D.Sc.  
(ORIENTADOR)

---

Prof. Flávio Cesar Borba Mascarenhas, D.Sc.  
(CO-ORIENTADOR)

---

Prof. Theóphilo Benedicto Ottoni Filho, Ph.D.

---

Prof. Jorge Henrique Alves Prodanoff, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
JUNHO DE 2010

Dedico este trabalho

aos meus pais, Marcus Antônio e Maria do Carmo, e ao meu irmão, Júnior, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e incentivando, e que são também merecedores de todas as homenagens a serem aqui prestadas;

à minha amada, Tatiana, por ser companheira e aliviar as minhas angústias, tornando a caminhada mais amena;

e às pessoas que passaram pela minha vida, mesmo as que já estejam meio borradas pelo tempo, pois, por mais que não se dêem conta, constituíram o que sou.

## **Agradecimentos**

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, por estarem ao meu lado durante toda a minha vida, auxiliando a minha formação de caráter, ora criticando, ora incentivando, ora mostrando a dura realidade do mundo, ora mostrando a importância de acreditar e sonhar com grandes objetivos, e sempre me tratando com um amor incondicional, que tento atrapalhadamente retribuir a cada dia. Pelo que sou, serei e pelo que tentarei fazer com que meus filhos sejam: eu os agradeço. Agradeço também ao meu prezado irmão, que, assim como meus pais, sempre foi uma referência na minha vida e que nunca deixou de retribuir todo o apreço e amizade que tenho por ele.

Agradeço à Tatiana, o amor que tive a sorte de reconhecer tão cedo em minha vida, por toda a compreensão, o carinho, as conversas, os sorrisos, o incentivo e exemplo de disciplina e perseverança. Obrigado pela vida que sempre quis, sem ainda saber e pela vida que ainda teremos, e que sempre tivemos.

Agradeço aos meus amigos do LHC, do antigo testamento, Guilherme Vanni, Rodrigo Campos e Rafael Duarte, por me proporcionarem o conhecimento dos eventos pretéritos do Laboratório, passados por tradição oral a cada encontro no Siri ou eventual visita ao Laboratório.

Agradeço aos meus contemporâneos amigos do LHC, Magali Mattos, Bruno Colonese, Eduardo Bastos, Cáren Cristine, Viviane Saião e Renata Mentzingen, por terem vivenciado comigo um período único de aprendizado e por terem mantido e aprimorado o ambiente aparentemente sisudo de um laboratório como um dos melhores ambientes de trabalho que se pode imaginar.

Agradeço aos amigos do LHC, do novo testamento, Patrícia Nick, Nathália Oliveira, Vinícius Moutinho, Raphael Barbosa, Cássio Pacheco, Tiago Eller e Bruna Amaral, por cultivarem o ótimo ambiente de trabalho com companheirismo, amizade, bom humor, profissionalismo e comprometimento com a equipe. Faço votos de que continuem assim e que aumentem mais tomos às escrituras.

Agradeço aos meus amigos do LHC que não se enquadram nas categorias temporais do laboratório, Luiz Paulo Magalhães e Marcelo Miguez, por todo o conhecimento passado, reconhecimento, oportunidades de crescimento, conselhos,

advertências, amizade franca e companhia durante os eventuais, laboriosos e saudosos serões de projeto.

Agradeço aos meus amigos e colegas de curso de graduação, Rafael Vilella, Paulo Maçulo, Hugo Cardeal (companheiro desde o CEFET), Renan Setubal, Marina Melino, Rafael da Costa, Filipe Telles, Sergio Brandão, André Tavares, André Bione, Daniel Runkel e Carlos Vieira, pelas ótimas reuniões no Anjinho, por estarem lado a lado, entrincheirados comigo, batalhando por um bom desempenho nas disciplinas do DME, pela companhia e por tornarem o curso também numa agradável reunião entre amigos. Estendo esse agradecimento aos meus outros amigos e amigas de turma, com quem tive menos contato, mas em vários momentos foram igualmente importantes.

Agradeço especialmente ao professor Marcelo Gomes Miguez, pela orientação acadêmica, de iniciação científica, de estágio, pessoal e, por último, neste projeto final de curso, bem como pelas ótimas aulas de drenagem, hidráulica, hidrologia e modelagem computacional a que tive o prazer de assistir.

Agradeço também ao professor Theóphilo Ottoni, pelo método pedagógico menos ortodoxo e altamente eficiente; ao professor Paulo Rosman, pelo brilhantismo e maneira única de passar o conhecimento; e ao professor Cláudio Neves, por ser simples em vez de simplório, e por não achar que  $\frac{1}{2}$  professor +  $\frac{1}{2}$  engenheiro constitui a soma de um profissional íntegro, como muitos crêem, enfim, por ser 1 ótimo professor e 1 ótimo engenheiro.

Finalmente, agradeço a todos os meus familiares, colegas de turma, e amigos que por acaso tenha me esquecido de citar, mas que de forma alguma foram menos importantes durante essa caminhada.

# Índice

1) Introdução.....	3
2) As Cheias Urbanas.....	5
3) Mudanças Climáticas e a Drenagem Urbana.....	10
3.1) Contextualização .....	10
3.2) Mudanças no Regime de Chuvas .....	13
3.2) Elevação do nível do mar .....	16
4) O Projeto de Recuperação Ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas .....	18
4.1) Visão Geral.....	18
4.1.1) Articulação Institucional.....	18
4.1.2) Levantamento e Avaliação das Necessidades.....	18
4.1.3) Formalização dos Convênios e Termos de Cooperação.....	19
4.1.4) Implementação das Ações Estruturantes.....	19
4.1.5) Implementação de Soluções Técnicas de Recuperação.....	19
4.2) Intervenções .....	20
4.2.1) Coleta e gestão de resíduos.....	20
4.2.2) Filmagem das Galerias de Águas Pluviais .....	21
4.2.3) Limpeza da Rede de Esgotamento Sanitário .....	22
4.2.4) Obras de Melhoria do Sistema de Esgoto.....	23
4.2.5) Construção do Centro de Controle Operacional de Esgotos – CCO.....	24
4.2.6) Instalação de comporta no Canal do Jockey.....	25
4.2.7) Dragagem.....	28
4.2.8) Instalação dos Dutos Afogados .....	30
5) Caracterização da Bacia do Rio dos Macacos.....	31
5.1) Breve Contexto Histórico de Ocupação da Bacia .....	31
5.3) Pluviometria .....	38
6) Modelação Matemática .....	39
6.1) Modelação Topográfica e Hidráulica .....	40
6.2) Hidrologia .....	43
6.3) Premissas Básicas de Trabalho, Avaliação Preliminar do Comportamento da Bacia e Configuração da Modelação Proposta .....	46
6.4) Calibração do Modelo Proposto .....	54
7) Análise Hidrodinâmica e Diagnóstico de Cheias na Bacia.....	57
7.1) Considerações feitas a partir da análise hidrodinâmica .....	59
8) Obras propostas para a Recuperação Ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas.....	60

9) Avaliação dos Efeitos do projeto de Recuperação Ambiental da Lagoa sobre as Cheias na Bacia do Rio dos Macacos .....	62
9.1) Efeito das Obras Propostas sobre as Cheias na Bacia do Rio dos Macacos ...	62
9.2) Complementação das Obras Propostas com a Correção da Galeria do Rio dos Macacos a Montante do Canal da rua General Garzón .....	67
9.3) Complementação das Obras Propostas com a Implantação de um Reservatório de Detenção no Jardim Botânico.....	71
10) Avaliação da disponibilidade hidráulica da calha do Rio dos Macacos em seu exutório, considerando elevações do nível do mar .....	75
11) Conclusões.....	80
Referências Bibliográficas .....	82
ANEXOS.....	84
Anexo 1 – MODCEL .....	85
Anexo 2 – HIDROFLU .....	99

# 1) Introdução

O século XXI trouxe consigo uma gama de novos desafios para a drenagem urbana. Analisando os registros de inundações, já é possível verificar um aumento na magnitude, na frequência, na extensão das áreas atingidas, no tempo de permanência dos alagamentos e nos prejuízos decorrentes. O grande crescimento populacional, a desordem na ocupação do solo, a influência local da urbanização sobre as chuvas intensas e as mudanças climáticas formam o rol das principais questões do setor a serem tratadas na atualidade.

Considerando países em desenvolvimento, como o Brasil, verifica-se, em geral, uma grande influência de todos estes fatores supracitados. O aumento da atividade antrópica, decorrente de melhores condições econômicas e do melhor posicionamento no cenário global apresentado recentemente pelo país, tem provocado alterações e impactos no ambiente em que se realiza, tornando os eventos de cheias cada vez mais frequentes e catastróficos.

Os sistemas de drenagem de águas pluviais, dentro de uma visão tradicional, devem ater-se à captura e à condução rápida das águas de chuva para um corpo d'água receptor mais próximo, de forma a não permitir que as atividades a serem realizadas na superfície sejam prejudicadas. Atualmente, este ponto de vista está se tornando ultrapassado e inconveniente em certas situações, por exemplo, quando se pretende atualizar sistemas que servem ambientes ultra-urbanos. A abordagem tradicionalmente adotada geralmente gera mais danos do que benefícios ao ambiente, não impedindo a ocorrência de inundações e, em muitos casos, transferindo-as para jusante, gerando prejuízos em cascata para a população e para os cofres públicos. Além disso, termina por ocasionar a degradação do corpo d'água receptor através, principalmente, de alterações do seu regime sedimentológico.

Nos últimos anos, a sociedade brasileira evoluiu bastante na questão ambiental e tem exigido cada vez mais que projetos de engenharia incorporem conceitos de sustentabilidade. Assim sendo, abordagens alternativas à tradicional vêm ganhando força no campo da drenagem urbana de maneira a suprir a “demanda ecológica” nos projetos e na reabilitação mais adequada de sistemas pré-existentes.



Este consenso atinge fortemente os gestores públicos e empresários que optam por projetos e investimentos com considerável viés ecológico, algumas vezes além do exigido pela legislação vigente.

Dentro deste contexto, na cidade do Rio de Janeiro, foi viabilizado o Projeto de Recuperação Ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas. Este projeto demanda a atuação em três áreas prioritárias: o controle das fontes de poluição que contribuem para a Lagoa; o aumento da capacidade de troca de água entre este corpo hídrico e o mar; e o tratamento do problema de poluentes acumulados na Lagoa, seja em suas águas ou no lodo presente no fundo.

A concepção de um conjunto de ações estruturais, voltado para a recuperação ambiental da Lagoa, deve levar em consideração aspectos relacionados com a drenagem de águas pluviais das bacias que contribuem para este corpo hídrico. Há uma relação entre qualidade e quantidade de água que não pode ser desconsiderada. A implantação de ações de melhoria da qualidade depende, inicialmente, do controle da quantidade, garantindo a ordenação dos escoamentos. Além disso, é importante garantir que as obras/estruturas propostas para o sistema de drenagem, mais especificamente as ligadas à melhoria da qualidade da água que chega à Lagoa, não provoquem o agravamento dos problemas de cheias existentes no entorno desta. Neste contexto, uma das áreas circunvizinhas à Lagoa mais críticas em termos de enchentes é o bairro do Jardim Botânico.

O primeiro objeto deste projeto consiste em avaliar os impactos das obras de engenharia propostas no âmbito do “Projeto de Recuperação Ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas” sobre as enchentes na bacia do rio dos Macacos, no bairro do Jardim Botânico, Rio de Janeiro, bem como avaliar a eficiência do sistema de drenagem diante da adoção de um reservatório de detenção em vez da intervenção direta na macrodrenagem da bacia.

Outra importante questão, ainda que controversa, é a ameaça gerada pelas mudanças climáticas. O impacto antropogênico no clima global foi demonstrado recentemente de forma conclusiva, embora as implicações geradas ainda não tenham sido completamente compreendidas. As previsões feitas por especialistas, no entanto, indicam que haverá mudança significativa no ciclo hidrológico, acarretando alterações no regime de chuvas, no nível médio do mar e na frequência de eventos extremos, por exemplo. Essas mudanças, por sua vez, deverão ser de alguma maneira levadas em

consideração ao se projetar novos sistemas de drenagem e também quando se pretender analisar sistemas de drenagem já existentes. [1]

Nesse contexto, também é objeto deste projeto a análise do impacto gerado pela possível elevação do nível do mar na eficiência do sistema de drenagem da bacia do rio dos Macacos, considerando, ou não, a implantação das intervenções estruturais propostas. Dessa forma, pretende-se destacar a importância da contextualização global de projetos de drenagem de grande porte em cidades costeiras e, além disso, salientar que, dada a natureza estocástica dos eventos hidrológicos e o potencial para a ocorrência de eventos extremos mais frequentes no futuro, esta é uma área de atuação que provavelmente exigirá atenção cuidadosa por parte de pesquisadores e técnicos em engenharia de drenagem urbana.

Neste projeto, portanto, para cumprir os objetivos de compreender e diagnosticar o comportamento de cheias na bacia do rio dos Macacos, analisar as intervenções propostas e a perda de eficiência hidráulica do sistema perante cenários de elevação do nível do mar, propõe-se a modelação matemática da bacia, com base no modelo MODCEL e no sistema HIDRO-FLU, ambos desenvolvidos na COPPE/UFRJ e apresentados em linhas gerais como anexos a este projeto.

## **2) As Cheias Urbanas**

As cheias naturais são fenômenos provocados por precipitações intensas que, ao atingirem a bacia, interagem com esta, iniciando o processo de escoamento superficial, sendo esta a parcela mais significativa nas cheias em pequenas bacias, em geral associadas a ambientes urbanos. A urbanização de uma bacia tende a agravar as cheias na medida em que promove a remoção da cobertura vegetal original, o aumento da impermeabilização, a canalização e a ocupação das planícies ribeirinhas. Assim, maiores volumes de água escoam mais rapidamente sobre a bacia, carreando sedimentos e acumulando-se nas áreas baixas, muitas vezes já ocupadas. Quando a urbanização não é adequadamente planejada, mais severas e críticas são as consequências deste processo, podendo gerar graves perdas materiais e problemas sociais de diversas magnitudes.

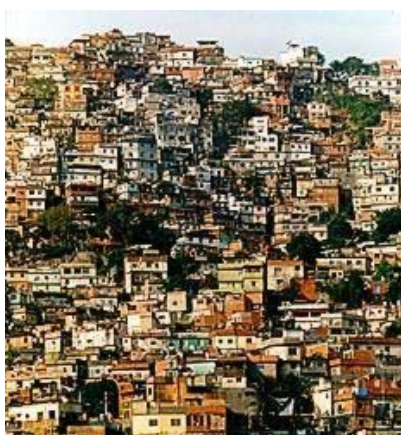
A compreensão da maneira como a urbanização interfere nas cheias é muito importante para que o planejamento e o controle de enchentes urbanas sejam feitos

de forma adequada. De modo geral, pode-se dizer que o controle de cheias urbanas passa pela adoção de medidas estruturais, que modificam a paisagem da bacia introduzindo intervenções diversas, dentro e fora da rede de drenagem, para minoração do problema, e de medidas não estruturais, associadas a ações de educação ambiental e a medidas diversas, que permitem uma convivência mais harmônica com o fenômeno das enchentes.[7]

O grande crescimento populacional, a desordem na ocupação do solo, a influência local da urbanização sobre as chuvas intensas e as mudanças climáticas são atualmente as grandes questões a se considerar quanto ao agravamento das cheias urbanas.

O crescimento populacional ocorre em ritmo acelerado, principalmente em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento, como o Brasil. Além disso, a população brasileira apresenta um agravante: a taxa de crescimento populacional nos centros urbanos se apresenta maior do que esta mesma taxa no meio rural.

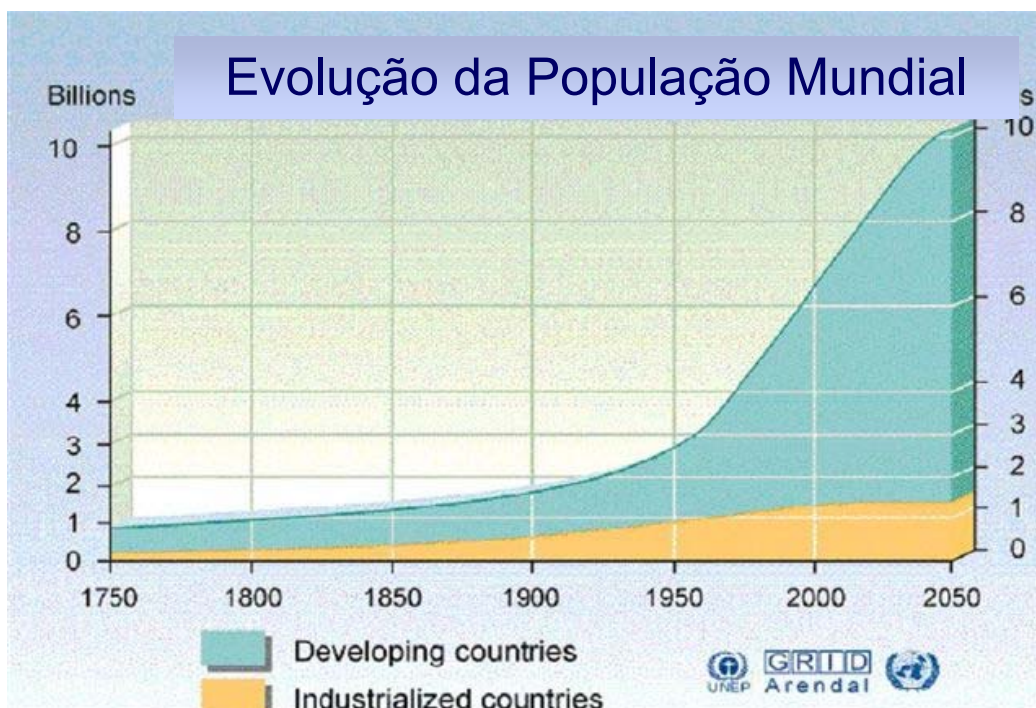
Em 2000, o Brasil possuía cerca de 170,4 milhões de habitantes e, segundo previsões da ONU, haverá 244,2 milhões de habitantes em 2050, como ilustrado na Figura 2. Este crescimento, juntamente à característica particular da taxa de crescimento populacional brasileira, tende a gerar uma grande pressão sobre os sistemas infra-estruturais dos grandes centros urbanos. Isto provoca não somente o agravamento das inundações, devido ao aumento da área urbana, mas também um aumento do número de habitantes, benfeitorias e atividades produtivas expostas ao risco.



A desordem na ocupação do solo traz consigo vários problemas que geram o aumento das vazões superficiais de pico durante eventos chuvosos, tais como altas taxas de impermeabilização, de desmatamento e de ocupação de encostas, ocupação de planícies de inundação, obstruções ao escoamento das águas por estruturas e resíduos sólidos etc.

**Figura 1: Ocupação irregular de encostas**

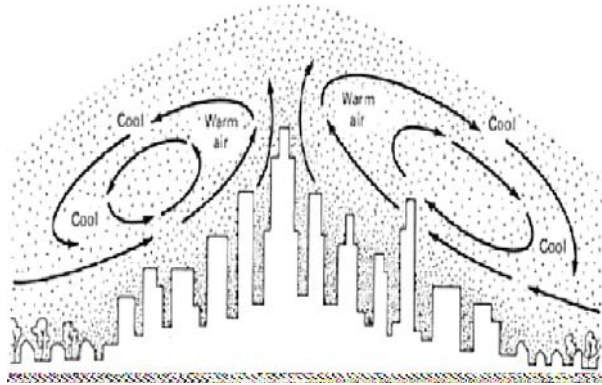
(fonte: <http://mbjopuc.wordpress.com/2007/10/>,  
acessado em 08/06/2010)



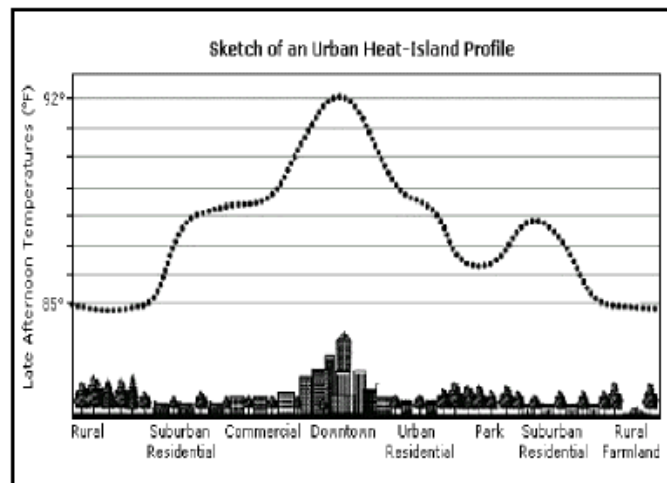
<http://forumpolitics.com/pics/world-population->

**Figura 2: Crescimento populacional mundial, até o ano 2000, e previsão até 2050 (fonte: TAC da Lagoa [22])**

A influência de efeitos locais de urbanização sobre as chuvas é um fator muitas vezes ignorado no cálculo de chuvas intensas utilizadas em estudos hidrológicos no Brasil. Estudos científicos mostram que a existência de centros urbanos modifica o padrão natural das chuvas convectivas. Segundo os autores destas pesquisas, este efeito se deve aos fenômenos das ilhas de calor e da maior produção e concentração de material particulado, formando os chamados núcleos higroscópicos. As Figuras 3 e 4 mostram um perfil esquemático das ilhas de calor e da circulação de ar, respectivamente.

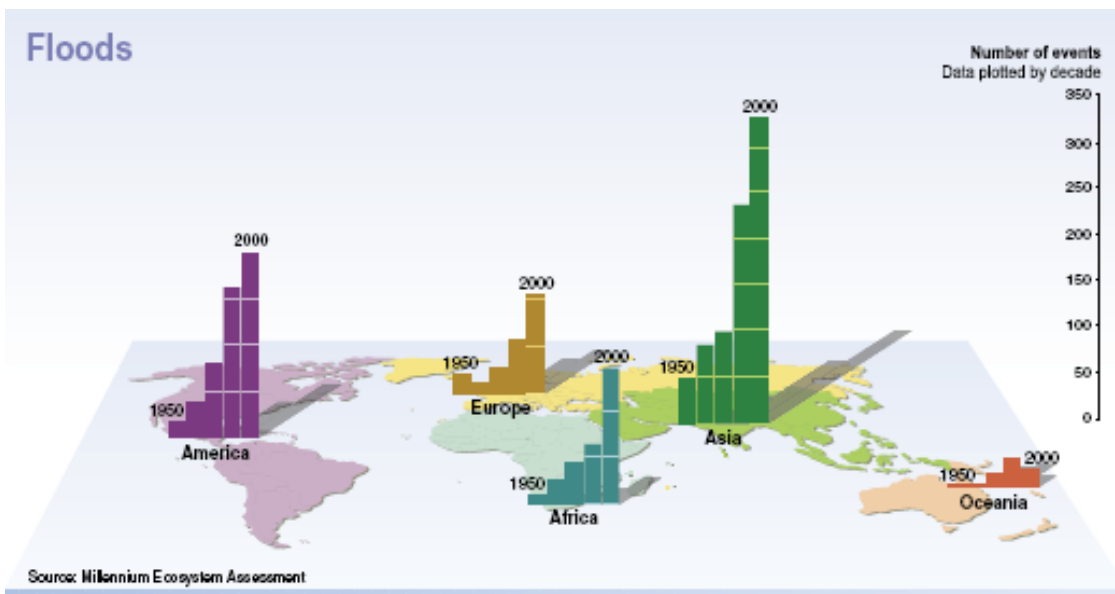


**Figura 3: Circulação de ar acima das ilhas de calor (fonte: Urban Modification of Rainfall [16])**

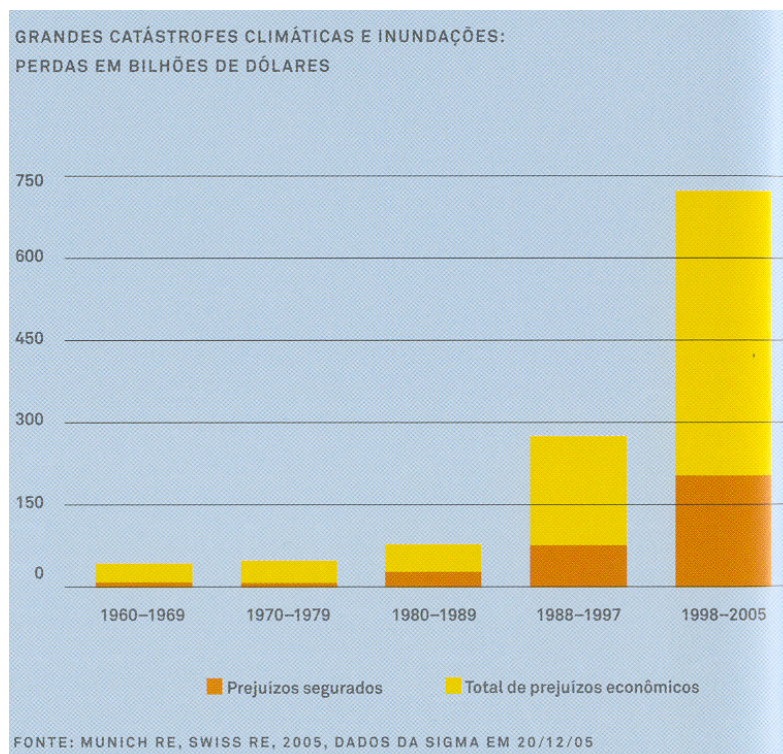


**Figura 4: perfil esquemático do comportamento observado em ilhas de calor (fonte: Urban Modification of Rainfall [16])**

Analisando os registros de inundações, já é possível verificar um aumento na magnitude, na frequência e na extensão das áreas atingidas, nos tempos de permanência dos alagamentos e nos prejuízos decorrentes, como demonstram as figuras 5 e 6 a seguir.



**Figura 5: número de grandes inundações por continente e por década (fonte: Millenium Ecosystem Assesment. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis, pg.:119, disponível em: <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>)**



**Figura 6: perdas seguradas e não seguradas, provocadas por inundações (fonte: Munich RE, Swiss RE, 2005, adaptado do livro “Uma Verdade Inconveniente”)**

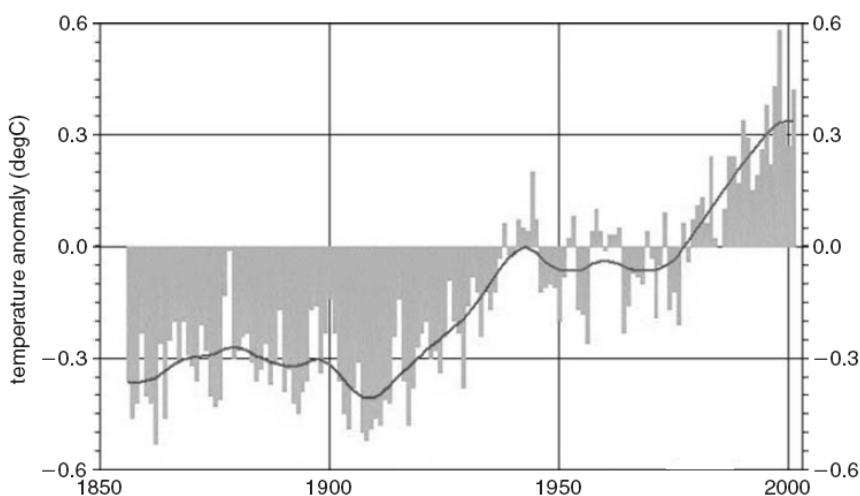
Isto se deve, além dos fatores anteriormente mencionados, às mudanças climáticas, que apontam a tendência de ocorrência de eventos extremos com maior

magnitude e frequência. As consequências sobre a drenagem urbana são muitas, ressaltando-se alterações nos regimes pluviométricos e no nível do mar.

### 3) Mudanças Climáticas e a Drenagem Urbana

#### 3.1) Contextualização

Um novo desafio para a drenagem urbana se configura pela constatação do fenômeno do aquecimento global, potencialmente levando a mudanças climáticas. As provas existentes sobre o aquecimento global são bastante convincentes, com registros mostrando que a média global da temperatura do ar próximo à superfície terrestre aumentou cerca de 0,6 °C, desde o início o século XX, sendo que cerca de 0,4 °C deste aquecimento ocorreu desde 1970, como pode ser visto na Figura 7.



**Figura 7: Mudança anômala na temperatura média global, em relação à média do período 1961-1990 (fonte:United Kingdom Climate Impacts Programme - Climate Change Scenarios for the United Kingdom: the UKCIP02 briefing report, abril de 2002)**

Imagina-se que estas mudanças sejam decorrentes de uma combinação entre causas naturais e antrópicas. Estes aumentos observados na temperatura global são provavelmente motivados pela elevada emissão de gases de efeito estufa (dióxido de carbono, metano etc) na atmosfera.

O dióxido de carbono é o mais importante gás estufa antropogênico e a sua concentração tem crescido desde a época pré-industrial, passando de cerca de 280

ppm (partes por milhão) para 379 ppm em 2005. A concentração de dióxido de carbono na atmosfera excedeu em muito a faixa natural durante os últimos 650.000 anos (180 à 300ppm), determinada através de núcleos de gelo. A taxa anual de crescimento da concentração de dióxido de carbono foi maior nos últimos dez anos (1995-2005 média: 1,9 ppm por ano) do que foi desde o começo da medição contínua e direta da atmosfera (1960-2005 média: 1,4 ppm por ano), apesar de existirem variações de crescimento de um ano para o outro. [9]

Segundo a definição estabelecida pelo Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC), o termo mudança climática refere-se a qualquer mudança do clima que ocorra ao longo do tempo em decorrência da variabilidade natural ou da atividade humana. Esse uso difere da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima, em que “mudança do clima” se refere a uma alteração que possa ser atribuída direta ou indiretamente à atividade humana e que modifique a composição da atmosfera global, sendo adicional à variabilidade climática natural observada ao longo dos períodos comparáveis de tempo. [8]

A partir da repercussão mundial do quarto Relatório de Avaliação do IPCC (AR4), publicado no ano de 2007, também o Brasil passou a se preocupar com esta questão ambiental sem precedentes na história da humanidade, estando em curso uma série de iniciativas nacionais. No terreno científico, destaca-se a criação pelo Ministério da Ciência e Tecnologia da “Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas” (Rede Clima), voltada a gerar informações científicas que ajudem o país a responder aos desafios das mudanças ambientais globais. No âmbito das políticas públicas, encontra-se em processo de elaboração e aprovação a Política e o Plano Nacional de Mudanças Climáticas, idealmente constituindo-se em marcos legais para guiar as ações brasileiras, com o fim de mitigar impactos negativos e de aumentar a capacidade adaptativa do País aos novos desafios.[8]

Programas de pesquisa e grupos de trabalho para tratar do tema florescem em vários estados e municípios da nação. Dentre estes, cito o pioneirismo do Município do Rio de Janeiro, cuja história contém importantes momentos de crescimento de consciência ambiental da sociedade. Ainda capital do Império, existiam em seu parlamento vozes contrárias à destruição da então imensa Floresta Atlântica. Mais recentemente, destaca-se a realização da conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, a “Cúpula da Terra”, ocorrida na cidade em junho



de 1992, ocasião em que foi firmada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

Pioneira entre as cidades da América Latina na contabilização de seu inventário de emissão de gases de efeito estufa, que data de 1998, a cidade do Rio decidiu, em 2007, dar caráter permanente e estrutural a esse esforço, pela iniciativa denominada “Protocolo de Intenções do Rio”. São objetivos deste protocolo: [11]

- Apoiar e participar da mobilização da sociedade carioca na luta contra o aquecimento global;
- Promover a consciência cidadã e a difusão do conhecimento sobre o aquecimento global, com ênfase na rede escolar das crianças e em debates comunitários;
- Ampliar o conhecimento dos impactos e conseqüências do aquecimento global sobre a cidade do Rio de Janeiro;
- Iniciar o planejamento de ações necessárias para enfrentar essas conseqüências de forma a preservar a cidade e proteger as populações em situação mais vulnerável;
- Inserir em todo o planejamento municipal, geral ou setorial, a variável mudança climática;
- Promover ações para reduzir as emissões de gases de efeito estufa que ocorrem na cidade e para contribuir com o seqüestro de carbono da atmosfera;
- Apoiar iniciativas e projetos, públicos ou privados, que favoreçam a obtenção de recursos pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), conforme artigo 12 do Protocolo de Kioto;

Dando continuidade a esta trajetória, realizou-se, em 2008, o seminário Rio: Próximos 100 anos, promovido pela Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro com o apoio da comunidade acadêmica, a fim de iniciar o processo de análise dos efeitos das mudanças climáticas em escala local.

Dentro deste contexto, este trabalho visa contribuir para esta base de conhecimento científico que se iniciou recentemente. Para tanto, deve-se ressaltar os dois principais aspectos de mudança aos quais o Rio de Janeiro se apresenta particularmente vulnerável, por ser uma cidade costeira e ter uma composição

topográfica favorável às tormentas: as mudanças no regime de chuvas e o aumento do nível do mar.

### 3.2) *Mudanças no Regime de Chuvas*

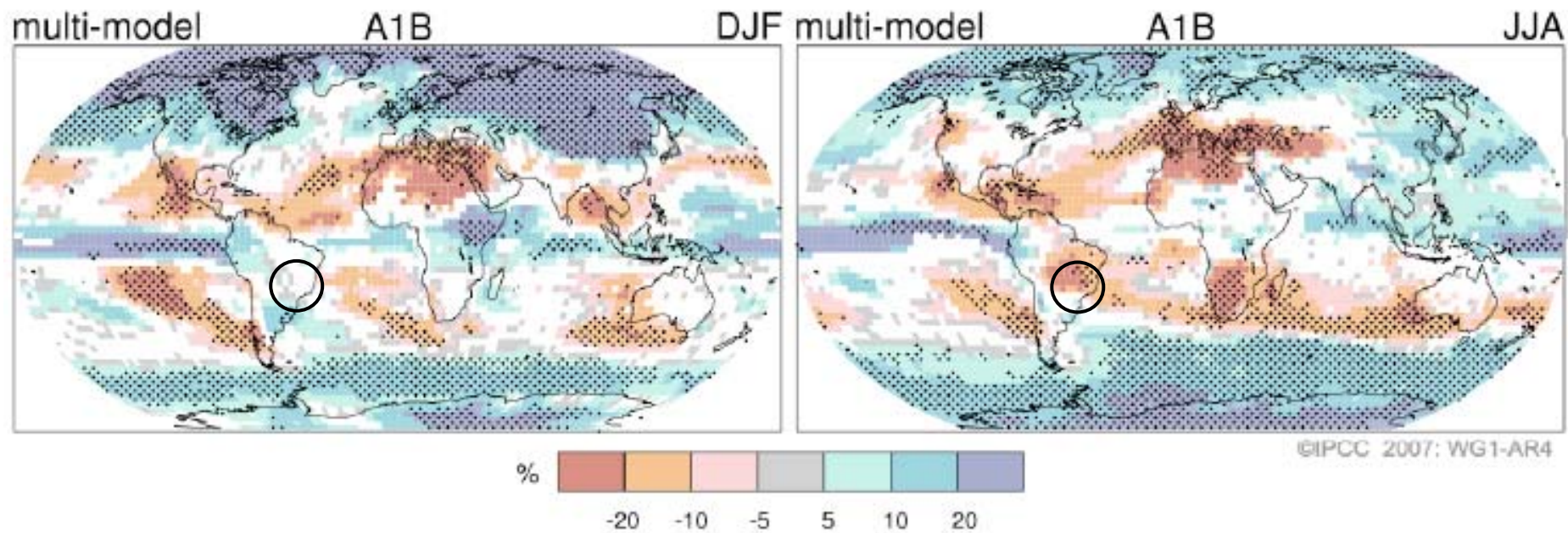
Estudos do AR4 do IPCC fazem previsões sobre alguns fenômenos e apontam o direcionamento tendencioso de cada um deles. No caso de mudanças no regime pluviométrico, aponta-se para o século XXI uma alta probabilidade de que eventos chuvosos intensos apresentem aumento na frequência de ocorrência, na maioria das áreas estudadas, assim como será provável também a ocorrência de períodos de secas. [10]

Os aumentos de precipitação total e de intensidade trazem algumas potenciais implicações sobre os sistemas de drenagem pluvial:

- Aumento na frequência de eventos em que ocorre a sobrecarga do sistema, aumentando as ocorrências de cheias;
- maior deterioração do sistema, dada a maior sobrecarga do mesmo;
- maior deterioração ambiental devido às maiores enxurradas com grande carga de sedimentos e poluentes e maior capacidade erosiva; etc.

Infelizmente, dada a complexa natureza fenomenológica da chuva, os modelos computacionais utilizados para a realização das previsões não chegam a um consenso quanto a sua variabilidade futura para a cidade do Rio de Janeiro. [10] Pode-se observar este problema na figura 8, onde o Rio de Janeiro se encontra, para o período chuvoso anual, dentro de uma área branca, que aponta divergência nos resultados encontrados pelos modelos globais utilizados pelo IPCC.

Considerando que, apesar da grande probabilidade do aumento de precipitações intensas, as previsões realizadas não entram em consenso para a área de estudo, a majoração da chuva de projeto modelada não será considerada no estudo de caso.



**Figura 8: exemplificação dos padrões previstos por modelos matemáticos de alteração de precipitação, observa-se em destaque, para o Rio de Janeiro, a estação chuvosa (DJF) e a estação de estiagem (JJA)**

(fonte: AR4 – IPCC [10])

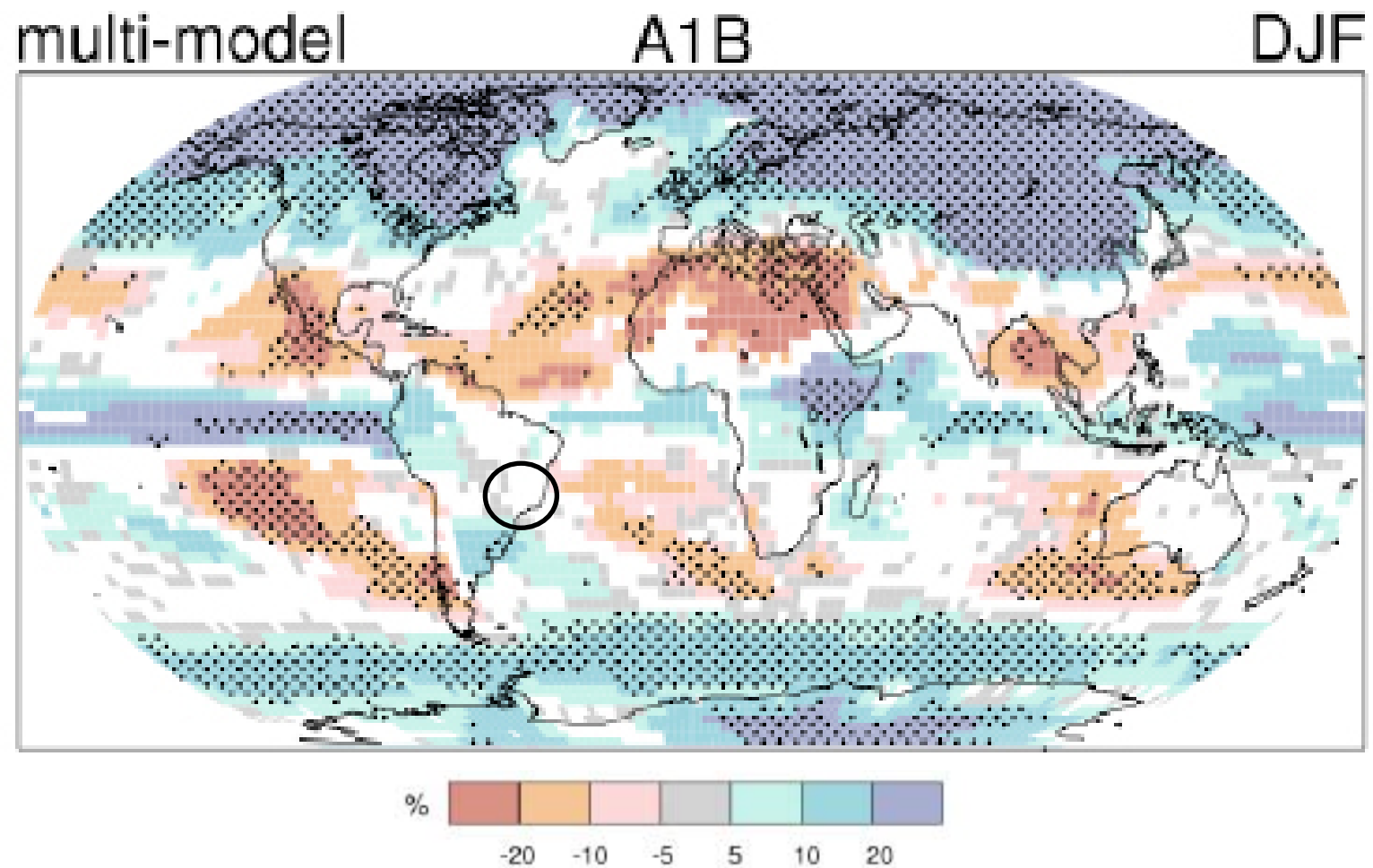


Figura 9: em detalhe observa-se, para a estação chuvosa (DJF), que o Rio de Janeiro encontra-se numa área branca do mapa, apontando uma ausência de consenso entre as previsões climáticas realizadas pelos modelos matemáticos (fonte: AR4 – IPCC [10])

### *3.2) Elevação do nível do mar*

Atualmente, a falta de informações históricas sobre o nível do mar constitui a grande vulnerabilidade do Brasil a mudanças do nível relativo do mar, tendo em vista que sequer se pode garantir se a variabilidade observada é um fenômeno local, regional ou global. Comparativamente a outros países com a mesma extensão de costa, pouca importância se tem dado às observações do nível do mar no Brasil.

A questão da elevação do nível do mar e das mudanças climáticas é bastante complexa, pois possui várias ramificações e somente pode ser abordada de forma multidisciplinar. As principais causas da elevação do nível do mar são a expansão térmica da água dos oceanos e o derretimento das geleiras continentais (elevação eustática). Em seguida, outra questão a esclarecer diz respeito à natural variabilidade de nível anual que o mar apresenta, compreendendo ciclos, aproximadamente, de 20 a 30 anos, com oscilações de 10 a 50 cm de amplitude, dependendo do local e da época. Não se deve, portanto, atribuir às mudanças climáticas elevações de nível observadas em períodos relativamente curtos, dada a escala de tempo dos fenômenos envolvidos.

Existem outros fatores que influenciam na variabilidade do nível do mar, além da elevação eustática e do aspecto cíclico, quais sejam: a maré astronômica, a maré meteorológica, ondas e variáveis climáticas, como precipitação e temperatura. Para o Rio de Janeiro, podem-se observar as seguintes causas e efeitos: [11]

**Tabela 1: fatores intervenientes na elevação do nível do mar (fonte: Rio Próximos 100 anos [11])**

<b>Elevação eustática e termoestérica do nível médio do mar</b>
0,40; 0,60 e 1,0 m, porém, é necessário definir a partir de qual cota IBGE
<b>Maré astronômica</b>
Na Ilha Fiscal observa-se amplitude total de aproximadamente 1,3 m(+/-0,65m em relação ao nível médio local do mar)
<b>Ocorrência de maré meteorológica</b>
Atualmente observam-se fenômenos na faixa de 0,40 a 0,60 m, a previsão futura é incerta, preferível considerar o evento meteorológico mais extremo já registrado.
<b>Ondas</b>
A mudança no regime (altura, período e direção) é possível, porém, incerta. As ondas causam sobrelevação adicional do nível do mar da ordem de 20% da altura na arrebentação.
<b>Variáveis climáticas</b>
Precipitação e temperatura. As elevações no nível do mar devem ser computados através de modelação hidrodinâmica, para cada evento.

Como prováveis futuros problemas a serem enfrentados pelas cidades costeiras frente a uma elevação significativa do nível do mar pode-se citar:

- Perda de ecossistemas costeiros sensíveis, como os manguezais;
- Erosão da linha costeira;
- Elevação do lençol freático;
- Maior dificuldade de escoamento no exutório dos sistemas de drenagem posicionados próximo ao mar, provocando inundações e maior tempo de permanência destas;
- Maior intrusão salina;
- Alta desvalorização imobiliária de terrenos costeiros; etc.

## **4) O Projeto de Recuperação Ambiental da Lagoa**

### **Rodrigo de Freitas**

#### *4.1) Visão Geral*

Lagoa Limpa, como também é conhecido, é um projeto idealizado pelo grupo EBX e executado em parceria com o Governo do Estado e a Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro. Tem como objetivo contribuir para a recuperação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas, um dos principais cartões postais da cidade, buscando desenvolver soluções para reverter o seu atual processo de degradação ambiental.

Apesar de ter seu foco na despoluição do corpo lagunar, o Projeto é abrangente, pois também visa a implementação de ações que resultem em uma melhoria de todo o sistema hídrico que deságua na Lagoa. Para isso, conta com a ação integrada e simultânea dos órgãos públicos gestores responsáveis pela sua manutenção.

Deste modo, o Projeto Lagoa Limpa é constituído por cinco fases:

##### **4.1.1) Articulação Institucional**

Considerando o papel desempenhado pelos órgãos públicos responsáveis pela gestão da Lagoa, esta fase tem como objetivo a articulação institucional com estes. Desta forma, foram levantadas as possibilidades e os meios existentes para formalizar as parcerias, seja através da celebração de Termos de Cooperação Técnica ou de Convênios.

##### **4.1.2) Levantamento e Avaliação das Necessidades**

A segunda fase consiste no levantamento e avaliação das necessidades atuais de cada órgão gestor envolvido, consideradas fundamentais para a melhoria dos sistemas de infra-estrutura (esgotamento sanitário, drenagem e resíduos).

Esta fase contempla, ainda, a contratação dos consultores especialistas nos temas afins. A avaliação das demandas vem utilizando uma metodologia (desenvolvida caso a caso) para a hierarquização das intervenções propostas em função do seu grau de importância e eficiência no processo de despoluição.

#### **4.1.3) Formalização dos Convênios e Termos de Cooperação**

Esta fase consiste na formalização dos Convênios e Termos de Cooperação Técnica com os órgãos públicos envolvidos. Estes termos de cooperação são a base norteadora dos trabalhos a serem realizados em parceria com os órgãos públicos gestores da Lagoa. Durante esta fase as propostas de ação são apresentadas aos órgãos para fins de análise, avaliação e autorização.

#### **4.1.4) Implementação das Ações Estruturantes**

Corresponde à etapa de implementação das intervenções/ações selecionadas e avaliadas como as mais relevantes para contribuir com o objetivo do presente Projeto. São elas:

- a) Gestão de Resíduos Sólidos;
- b) Dragagem do Canal do Piraquê e outros pontos críticos de assoreamento;
- c) Instalação de comporta no Canal do Jockey;
- d) Revisão do sistema de esgotamento sanitário;
- e) Revitalização dos rios dos Macacos e Cabeça;
- f) Investigação e eliminação de ligações clandestinas na rede de drenagem pluvial;
- g) Monitoramento da qualidade de água para verificação dos resultados obtidos.

#### **4.1.5) Implementação de Soluções Técnicas de Recuperação**

Esta fase consiste no levantamento de possíveis soluções técnicas para estimular a reversão do atual processo de degradação da Lagoa através do aumento da troca de água entre esta e o mar.

Deste modo, estão sendo desenvolvidos estudos no sentido de se verificar a viabilidade técnica e ambiental da instalação de tubulações sob a faixa de areia da praia, que irão conectar o canal do Jardim de Alah ao oceano; solucionando, assim, o problema de assoreamento da barra do canal por ação das ondas.



## 4.2) Intervenções

### **4.2.1) Coleta e gestão de resíduos**

O material coletado na Lagoa, algas e lixo, basicamente, é pesado, separado (lixo/algas) e encaminhado para um centro de reciclagem e compostagem da Comlurb. O objetivo desta ação é dar tratamento e permitir a gestão dos resíduos coletados. Neste centro de reciclagem, as algas são transformadas em adubo orgânico, que é utilizado pela Prefeitura nas hortas municipais e canteiros da cidade. Com isso, o Projeto Lagoa Limpa garante destinação e assegura o reaproveitamento das algas da Lagoa.

A partir de setembro de 2008, com a entrada em operação do projeto Lagoa Limpa, esse trabalho de coleta, que já vinha sendo desenvolvido pela Comlurb, foi dinamizado ainda mais, aumentando em 60% o volume coletado.

Para o trabalho de coleta, a equipe do Projeto utiliza uma lancha de apoio e um barco do tipo catamarã, feito sob encomenda para facilitar o acesso às áreas de margens rasas, além de permitir a coleta e estocagem de uma grande quantidade de resíduos.

Esta atividade, além de contribuir para uma considerável melhora estética do espelho d'água, impede que estas algas se decomponham dentro da Lagoa, produzindo gases tóxicos (metano CH<sub>4</sub> e sulfídrico H<sub>2</sub>S) nocivos à saúde dos peixes e causadores de mal-cheiro.

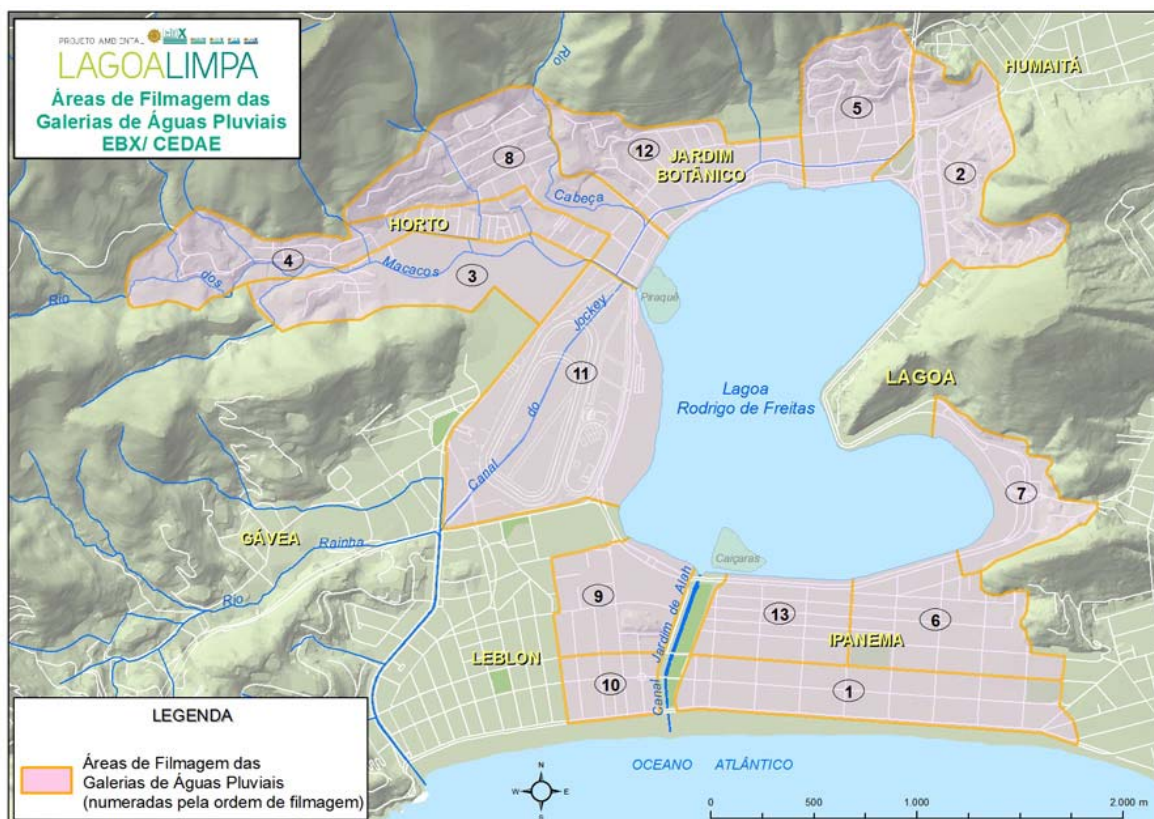


**Figura 10: operação de limpeza na Lagoa (fonte: Projeto Lagoa Limpa [19])**

#### **4.2.2) Filmagem das Galerias de Águas Pluviais**

Com o objetivo de identificar as ligações irregulares de esgoto nas galerias de águas pluviais que deságuam na Lagoa, o Projeto LAGOALIMPA contratou uma firma especializada que, utilizando quatro caminhões (2 sewer-jet e 2 vácuo-flex) e um robô com câmera de vídeo acoplada, vem percorrendo estas galerias identificando, através de filmagem, os pontos de contaminação.

No total, serão vistoriados 10 km de rede, ficando a cargo da CEDAE os reparos necessários.



**Figura 11: área de filmagem das galerias de águas pluviais (fonte: Projeto Lagoa Limpa [19])**

Na Lagoa Rodrigo de Freitas e no Canal do Jardim de Alah, existem 26 pontos de chegada de galerias de águas pluviais (ver figura 11), responsáveis por transportar a água das chuvas que entra pelos bueiros das ruas até a Lagoa ou o Canal.



**Figura 12: identificação de exutórios de sistemas de drenagem ao redor da Lagoa e de galerias de cintura (fonte: Projeto Lagoa Limpa [19])**

Entretanto, existem ligações irregulares de esgoto nestas galerias, fazendo com que não só a água das chuvas entre na Lagoa, mas também um grande volume de efluentes (esgoto), provocando a contaminação do espelho d'água, além de mal cheiro e comprometimento da saúde dos peixes e aves da região.

#### **4.2.3) Limpeza da Rede de Esgotamento Sanitário**

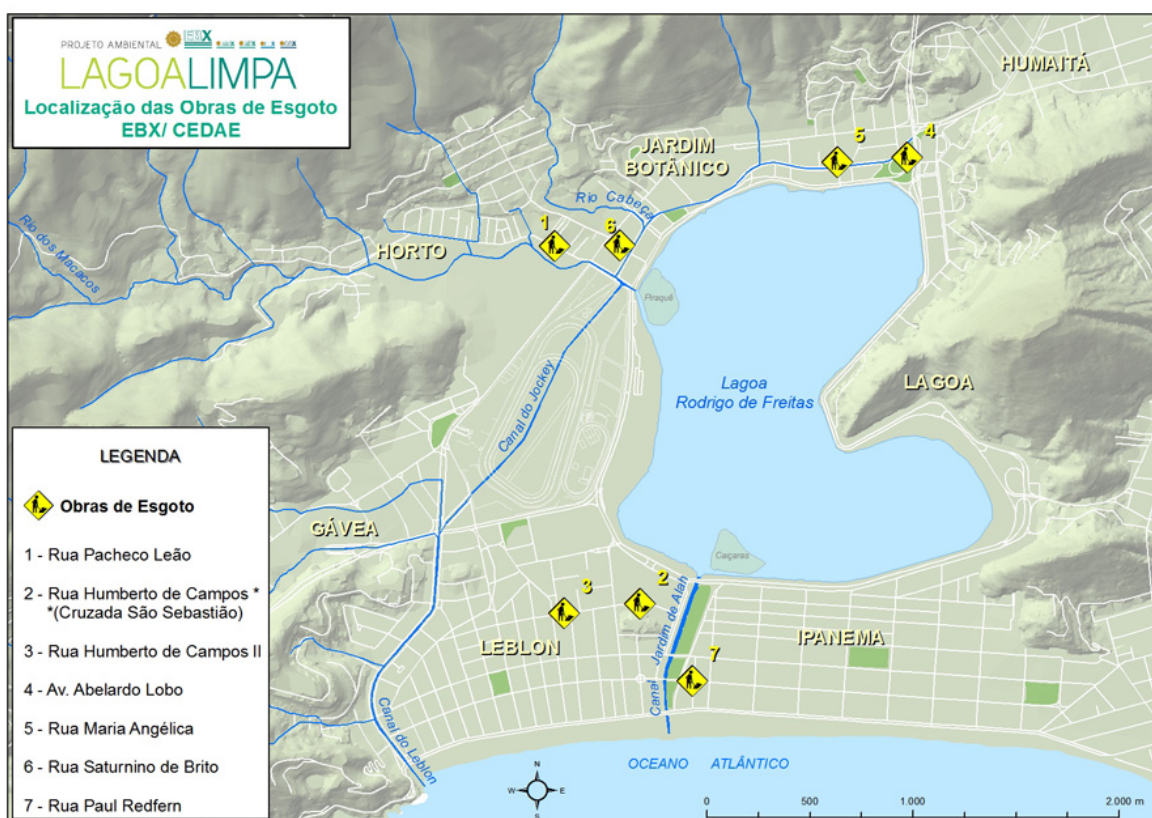
Além da filmagem das galerias de águas pluviais, o Projeto Lagoa Limpa realiza também a limpeza dos trechos da rede de esgoto que estão obstruídos por sedimentos e lixo, prejudicando o funcionamento de todo o sistema.

Os quatro caminhões que realizam as filmagens das galerias de águas pluviais, também são utilizados para a limpeza da rede de esgoto, desobstruindo as tubulações e garantindo assim o melhor funcionamento do sistema.

#### **4.2.4) Obras de Melhoria do Sistema de Esgoto**

São obras de recuperação dos trechos mais críticos da rede de esgoto, onde as tubulações se encontram subdimensionadas (com diâmetro insuficiente) ou danificadas. Isto otimizará o funcionamento do sistema de esgoto e evitará possíveis extravasamentos de efluentes para as galerias de águas pluviais que deságuam na Lagoa.

Ao todo, serão realizadas sete obras, representadas na figura 12.



**Figura 13: Localização das obras de esgotamento sanitário (fonte: Projeto Lagoa Limpa [19])**

#### **4.2.5) Construção do Centro de Controle Operacional de Esgotos – CCO**

Esta ação prevê a automatização do sistema de esgotamento sanitário do entorno da Lagoa Rodrigo de Freitas, prevenindo eventuais descargas de efluentes no espelho d'água que acontecem devido a problemas de funcionamento das elevatórias de esgoto.

Apesar de o projeto Lagoa Limpa ter sua área de abrangência restrita à bacia hidrográfica da Lagoa, esta ação beneficiará também toda a zona Sul carioca, já que este sistema é interligado ao emissário submarino. Por esta razão, as elevatórias de André Azevedo e Parafuso, que ficam fora da bacia hidrográfica da Lagoa, também foram incluídas.

O trabalho de monitoramento será realizado por um sistema de automação que controlará, em tempo real, o funcionamento das elevatórias de esgoto, das elevatórias de tempo seco (águas pluviais) e as chegadas das galerias de águas pluviais na Lagoa Rodrigo de Freitas. A automatização do sistema, hoje operado por funcionários da CEDAE, permitirá identificar, imediatamente, qualquer defeito ou falha no funcionamento da rede de esgoto. Os dados coletados, além de servirem de ferramenta de apoio para a equipe da CEDAE, vão integrar relatórios gerenciais, gerados automaticamente pelo sistema.

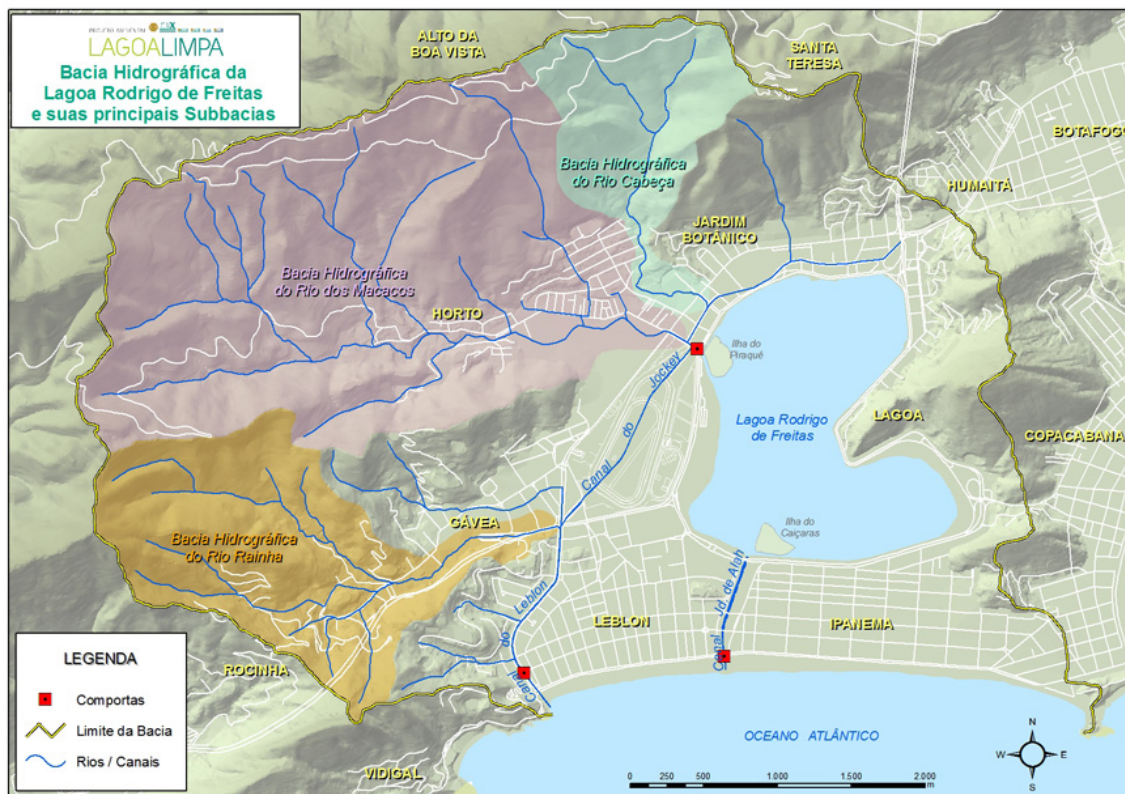
A figura 13 mostra os locais das obras de instalação dos sensores nas elevatórias:



**Figura 14: Localização das obras de instalação do CCO - Centro de Controle Operacional de Esgoto (fonte: Projeto Lagoa Limpa [19])**

#### **4.2.6) Instalação de comporta no Canal do Jockey**

O Canal do Jockey, além de receber as águas de chuvas de parte dos bairros da Gávea e Jardim Botânico, serve como um canal de ligação entre a bacia hidrográfica do Rio Rainha e as bacias dos Rios Macacos e Cabeça. Estes três rios drenam as encostas da Serra Carioca voltadas para o Sul e, com exceção do Rio Rainha, chegam à Lagoa Rodrigo de Freitas.



**Figura 15: Bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas e suas principais sub-bacias (fonte: Projeto Lagoa Limpa [19])**

Para melhorar a circulação e a qualidade de água da Lagoa, além contribuir com a drenagem destes três rios e reduzir os alagamentos da Rua Jardim Botânico, será instalada uma comporta no Canal do Jockey, no ponto onde este de encontra com o canal da Rua General Garzon.



**Figura 16: indicação do local onde será implantada a comporta no canal do Jockey Club (fonte: Projeto Lagoa Limpa [19])**

O canal da rua General Garzon é o local onde se juntam os fluxos provenientes tanto dos rios Cabeça e Macacos, já limpos, como do Canal do Jockey, que traz parte da água poluída do rio Rainha.

A instalação da comporta impedirá a contaminação do trecho final dos rios Cabeça e Macacos (Canal da Rua General Garzon), que já estão praticamente limpos, isolando o Canal do Jockey e invertendo o sentido de seu fluxo em direção ao Canal da Rua Visconde de Albuquerque, no Leblon.

Isto permitirá ainda a abertura de uma antiga comporta que hoje evita a chegada das águas dos rios dos Macacos e Cabeça, já limpos, na Lagoa Rodrigo de Freitas, contribuindo para a revitalização do ecossistema.



#### 4.2.7) Dragagem

O objetivo desta ação é melhorar a circulação interna da água na Lagoa, além de facilitar a chegada das águas que vem dos rios - via Canal do Piraquê - e do mar - via Canal do Jardim de Alah.

Na prática, o fundo da lagoa é desnivelado, havendo partes com pouca profundidade que dificultam a circulação da água e também cavas profundas, de onde, no passado, foram retirados sedimentos para aterros de suas margens.

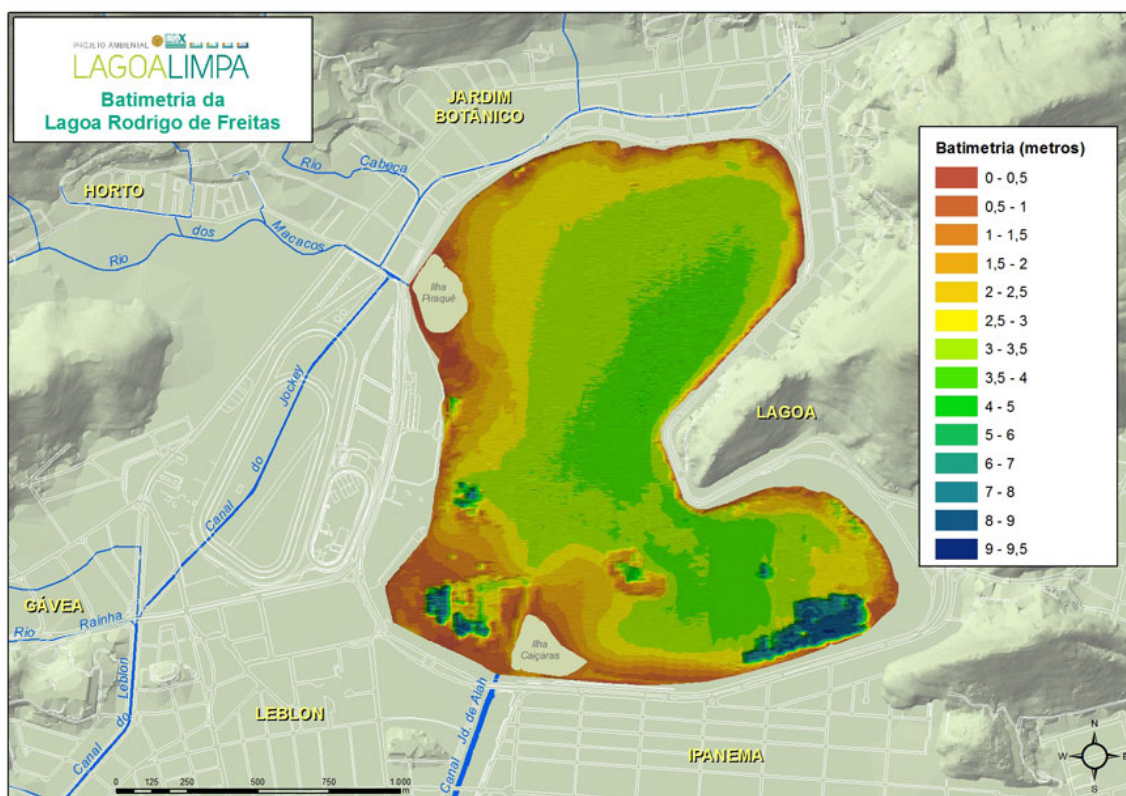


Figura 17: batimetria da Lagoa Rodrigo de Freitas (fonte: Projeto Lagoa Limpa [19])

De maneira simplificada, os sedimentos da parte rasa serão dragados e cuidadosamente recolocados no interior destas cavas, onde atualmente são produzidos gases metano (CH<sub>4</sub>) e sulfídrico (H<sub>2</sub>S), entre outros que geram efeitos negativos para o ecossistema da Lagoa.

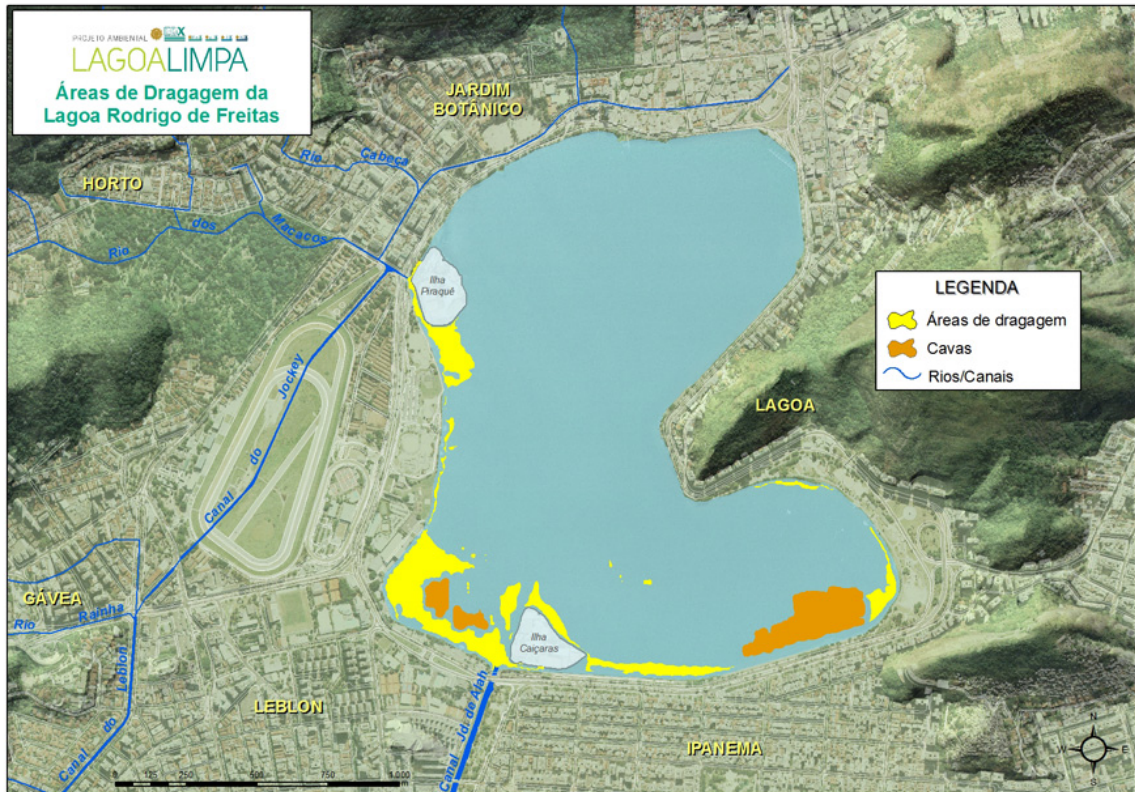


Figura 18: áreas da Lagoa Rodrigo de Freitas a serem dragadas (fonte: Projeto Lagoa Limpa [19])

O lixo encontrado no processo de dragagem será separado dos sedimentos promovendo, em paralelo, a limpeza do fundo da Lagoa. Tanto a retirada dos sedimentos quanto a disposição do material nas cavas serão monitorados pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA).

A dragagem contemplará um volume de 95.357 m<sup>3</sup> e será a primeira realizada na Lagoa dentro de um programa integrado de despoluição ambiental. A primeira etapa, no Canal do Piraquê, envolve um volume de 21.545 m<sup>3</sup>. Em seguida, o plano de dragagem avançará pelo Parque dos Patins com um volume a ser dragado de 3.377 m<sup>3</sup>, Jardim de Alah (44.445 m<sup>3</sup>), Caiçaras Sul (14,674 m<sup>3</sup>) e Parque do Cantagalo (11.316 m<sup>3</sup>).

#### **4.2.8) Instalação dos Dutos Afogados (sifão)**

Uma das principais características naturais das lagoas costeiras é a sua comunicação com o mar. Na Lagoa Rodrigo de Freitas, esta comunicação é feita pelo Canal do Jardim de Alah. Estudos comprovam, no entanto, que este canal não é ideal para a troca de água com o oceano. Além de ter a sua largura reduzida em aproximadamente 45% quando se aproxima do mar, o Canal desemboca na praia, onde há ação constante das ondas, o que faz com que sua saída fique constantemente bloqueada por areia, impedindo o fluxo d'água.

Para ampliar a troca de água entre a Lagoa e o mar, e melhorar a circulação de água na Lagoa Rodrigo de Freitas, está em estudo a instalação de tubulações subterrâneas que conectariam o Canal do Jardim de Alah ao oceano.

Por esse sistema, o fluxo de troca acontece em função da dinâmica de marés: quando a maré enche, a água do mar entra na Lagoa. Nos períodos de maré baixa, a água da Lagoa extravasa para o mar. As tubulações começariam no Canal do Jardim de Alah, próximo à praia, e aflorariam no fundo do mar, a 200 metros da costa, a aproximadamente 10 metros de profundidade.

Esta ação, associada à abertura da comporta do Canal do Piraquê, garantirá que as águas dos rios e do mar cheguem à Lagoa Rodrigo de Freitas.



**Figura 19: corte longitudinal dos dutos afogados (fonte: Projeto Lagoa Limpa [19])**

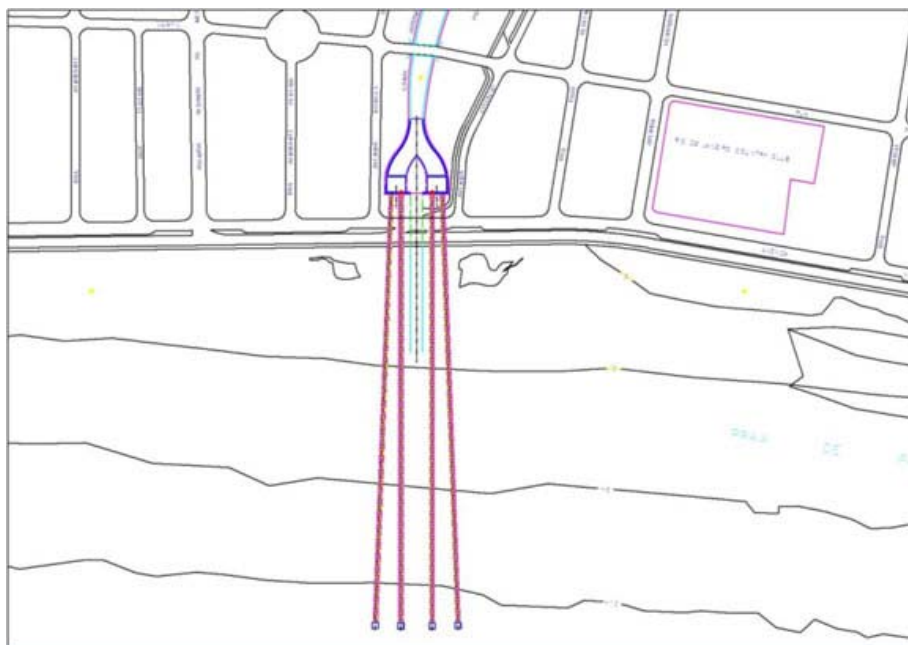


Figura 20: situação do projeto dos dutos afogados (fonte: Projeto Lagoa Limpa [19])

## 5) Caracterização da Bacia do Rio dos Macacos

### 5.1) Breve Contexto Histórico de Ocupação da Bacia

A bacia do rio dos Macacos contém em sua área de drenagem parte dos bairros do Jardim Botânico, Lagoa, Gávea e Alto da Boa Vista. Uma grande parte desta bacia é composta por trechos de encosta com alta declividade, onde se encontra parte do Parque Nacional da Tijuca. A bacia apresenta uma grande área verde, com predominância de florestas em suas vertentes, contrastando com uma ocupação urbana intensa nas áreas baixas, junto à Lagoa Rodrigo de Freitas, onde o rio deságua. O Jardim Botânico e o Jockey Club Brasileiro se destacam na paisagem atual da bacia.

Entretanto, a ocupação e o uso do solo na bacia evoluíram, ao longo do tempo, passando por várias fases bastante distintas. O texto a seguir é uma adaptação do material disponível no Instituto Pereira Passos, acerca da evolução e ocupação urbana das bacias da Zona Sul do Rio de Janeiro.

No século XVI, marcando a primeira fase de ocupação, a área onde atualmente se encontram os bairros da bacia era ocupada por diversas fazendas e engenhos, devido ao solo favorável para o plantio de cana-de-açúcar.

A chegada da família real, no início do século XIX, levou à implantação da Fabrica Real de Pólvora, nas margens da Lagoa e à criação do Horto Imperial, precursor do atual Jardim Botânico. A fábrica incendiou-se ainda na primeira metade do século XIX e acabou transferida para Raiz da Serra, no caminho de Petrópolis

A partir da 2ª metade do século XIX, com o declínio da produção de cana-de-açúcar, os diversos engenhos foram desativados e as fazendas se fragmentaram em chácaras de menores dimensões.

A chegada dos trilhos do bonde, em 1871 - inicialmente à tração animal, depois substituídos por elétricos, em 1902 - trouxe grande valorização aos terrenos das chácaras remanescentes. No final do século XIX, tem início a ocupação da área por indústrias têxteis, com suas vilas operárias. Essa ação transforma os bairros da Gávea e do Jardim Botânico em uma das regiões mais industrializadas do Rio de Janeiro, no final do século XIX.

Nos primeiros anos do século XX, o então prefeito Pereira Passos iniciou um plano de reforma urbana que incluía o saneamento da Lagoa Rodrigo de Freitas. No ano de 1920, parte da Lagoa já havia sido aterrada. Mesmo assim, ela ainda chegava às ruas Humaitá e Marquês de São Vicente

Na administração do prefeito Carlos Sampaio (1920-1922), são realizadas importantes obras pelo sanitarista Saturnino de Brito, referentes ao aterramento e saneamento na orla da Lagoa, que muda mais fortemente de fisionomia. A Avenida Epitácio Pessoa é inaugurada e são regularizados o canal de escoamento do Jardim de Alah e o canal no eixo da Avenida Visconde de Albuquerque, no Leblon. Em 1926, foi fundado o Jockey Club Brasileiro.

Na década de 1940, foram fechadas as fábricas têxteis, encerrando a fase industrial do bairro do Jardim Botânico. Com o retalhamento das antigas chácaras ao longo da primeira metade do século XX e a saída das fábricas da região, os terrenos locais foram loteados, reforçando a nova vocação residencial do bairro. É nas áreas que circundam a Lagoa Rodrigo de Freitas, especialmente na orla do Jardim Botânico, que surgem os primeiros núcleos residenciais dos bairros. A expansão do Jardim Botânico se faz mediante aterramentos realizados em direção ao Vale dos Macacos e

ao talude do Corcovado. Esses novos lotes são inicialmente tomados por casarões e, posteriormente, ocupados por edifícios de apartamentos de alto luxo.

O governador Carlos Lacerda, por sua vez, retirou algumas favelas da região e inaugurou, em 1967, o Túnel Rebouças, que permanece ainda como uma das principais ligações entre as zonas Norte e Sul da cidade.

Em 1975, o prefeito Marcos Tamoyo, promulgou um decreto que proibia qualquer alteração adicional no espelho d'água. No mesmo ano, o prefeito estabelece o alinhamento das margens e a sua utilização para fins recreativos, sendo em seguida criado o Parque da Catacumba, após a remoção da favela que ali existia.

A partir da década de 1980, as atenções se voltaram para a recuperação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas, com preocupações que se mantêm até os dias atuais.

A figura 20 mostra a evolução da ocupação da região da Lagoa Rodrigo de Freitas ao longo do tempo, marcando a redução de sua área superficial e a urbanização do entorno.

Nesse contexto, a intensificação da urbanização, a redução do espelho d'água da Lagoa, o lançamento de esgotos sanitários em suas águas e a sua restrição de comunicação com o mar, como resultado de sua ocupação ao longo do tempo, levaram a um quadro de problemas ambientais diversos, em que se destacam as enchentes na bacia e a deterioração ambiental do sistema. A rede de drenagem urbana tem na Lagoa o fator condicionante de sua capacidade de descarga. As deficiências do sistema de drenagem e o não planejamento da urbanização, que seguiu tendências espontâneas e respondeu às necessidades de cada momento histórico, em particular, produziu um quadro de graves alagamentos nas áreas planas e ocupadas da bacia. A busca de soluções integradas para os problemas de cheia e recuperação ambiental da bacia, incluindo sistemas fluviais, lagoa e interação com o mar, devem caminhar conjuntamente, pois geram influências recíprocas.



**Figura 21: Evolução da ocupação urbana na região da Lagoa Rodrigo de Freitas**  
(fonte: <http://portalgeo.rio.rj.gov.br/EOUrbana/EOUrbana.swf>).

## 5.2) *Características Físicas*

A bacia hidrográfica do rio dos Macacos apresenta cerca de 9,07 km<sup>2</sup> de área de drenagem. A proximidade de suas encostas, aliada a transição brusca destas para áreas de baixada, resultantes de aterros, indica a tendência de ocorrência de escoamentos velozes chegando às planícies, onde podem produzir alagamentos em função da mudança de declividade.

A urbanização se desenvolve principalmente nas áreas mais baixas e planas, espalhando-se em uma estreita, porém extensa faixa de área impermeabilizada, entre a Lagoa Rodrigo de Freitas e o maciço da Tijuca.

O principal rio da bacia é o próprio rio dos Macacos, que lhe empresta o nome. O rio dos Macacos recebe a contribuição de vários córregos pela margem esquerda, vindos das vertentes do maciço da Tijuca. Destaca-se especialmente a contribuição do rio Cabeça, seu principal tributário, que aflui ao curso principal em confluência na Rua General Garzón.

Pela margem direita, também em região próxima a sua foz, ocorre uma situação de possível transposição de vazões entre a bacia do rio dos Macacos e a bacia do rio Rainha. O canal que chega pelo Jóquei Clube Brasileiro tem um ponto alto, que divide vazões entre as duas bacias. Entretanto, em condições de cheia, dependendo da intensidade do fenômeno em cada bacia, as vazões do rio Rainha podem chegar ao rio dos Macacos, ou, ao contrário, o rio dos Macacos pode passar a desaguar também na praia do Leblon, a partir do canal da rua Visconde de Albuquerque.

O exutório da bacia ocorre na Lagoa Rodrigo de Freitas, junto ao Clube Naval Piraquê, através de um canal artificial que segue pela rua General Garzón. Junto a sua foz existe uma comporta, que permanece fechada durante a maior parte do tempo. Em condições de marés mais elevadas, essa comporta pode se encontrar submersa.

Em eventos de chuva intensa, é usual o alagamento das ruas mais baixas da bacia, em especial da própria rua Jardim Botânico, onde a rede de drenagem mostra-se insuficiente.

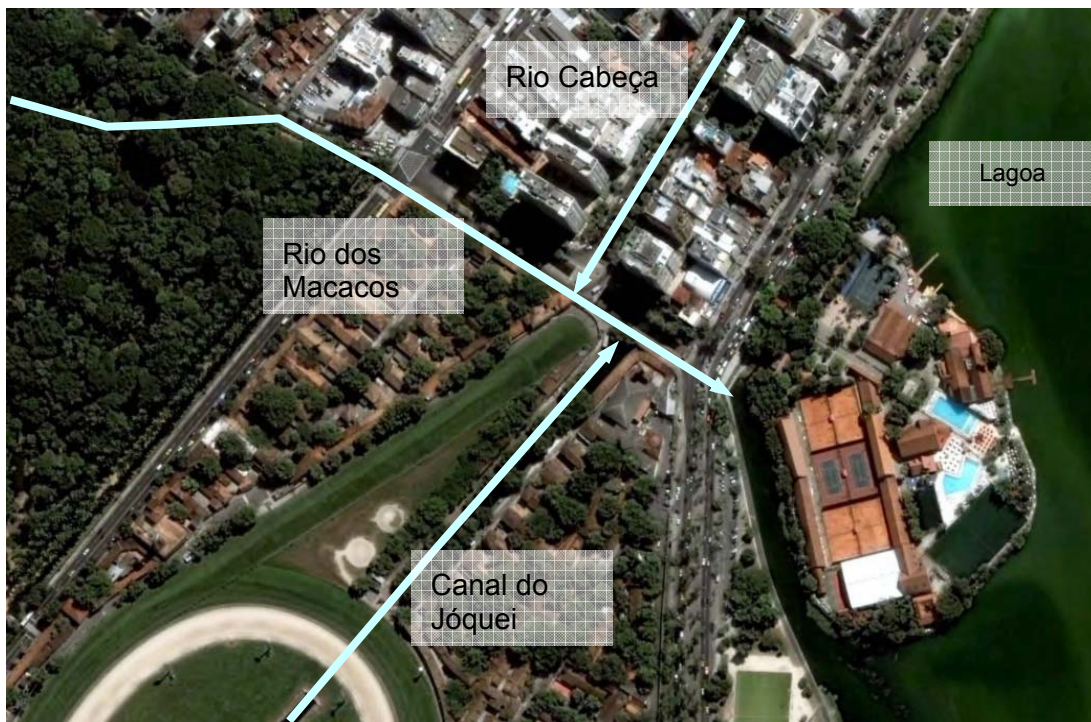
A figura 21 mostra uma foto da bacia, obtida a partir do aplicativo *Google Earth*, mostrando seu posicionamento em relação a alguns pontos importantes da cidade.





**Figura 22: Foto de satélite da bacia do rio dos Macacos, com a Lagoa Rodrigo de Freitas como limite de jusante. Destaques para o rio dos Macacos, em trecho dentro do Jardim Botânico (à esquerda, embaixo), e para o canal do Jóquei (à direita). Fonte: Google Earth e acervo pessoal do professor Marcelo G. Miguez.**

A figura 22 mostra um detalhe da região da foz do rio dos Macacos, com as confluências do rio Cabeça e do canal do Jóquei.



**Figura 23: Detalhe da foz do rio dos Macacos, na Lagoa Rodrigo de Freitas. (fonte: Google Earth)**

A hidrografia da bacia, tomando o rio dos Macacos e o rio Cabeça como principais, pode ser complementada pelos rios perenes que definem 6 sub-bacias de encosta, conforme tabela 2:

**Tabela 2: Detalhe da foz do rio dos Macacos, na Lagoa Rodrigo de Freitas.**

Rio	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento (km)	Cota do Rio (m)
Dos Macacos (parte alta)	979.883,40	1,64	100 a 500
do Pai Ricardo	1.400.899,85	1,55	100 a 525
Xaxim	302.764,88	1,10	65 a 400
Ouriço	502.399,42	1,60	60 a 535
Sete Quedas	828.357,94	1,54	55 a 500
Algodão	647.174,25	1,00	65 a 470
do Grotão	496.863,40	1,42	25 a 230

Por fim, fazendo um apanhado geral sobre as características de toda a bacia do rio dos Macacos, pode-se definir que: ela apresenta uma declividade média de

0,05894 m/m; seu trecho urbanizado faz com que o percentual de cobertura vegetal seja da ordem de 40%; o rio principal possui cerca de 4,46 km, desde a região mais alta de encosta, onde nasce, passando por um trecho em galeria sob a rua Jardim Botânico e chegando, por fim, até a Lagoa.

### 5.3) *Pluviometria*

Na área em estudo, são encontradas diversas estações pluviométricas, de onde podem ser obtidos dados de medições de precipitações. A administração desses postos era dividida entre dois órgãos, SERLA e Geo-Rio.

Os postos administrados pela SERLA são os do Horto Florestal, do Clube Caiçaras, da Lagoa Rodrigo de Freitas e o da Chácara do Cabeça. Os administrados pela Geo-Rio são o do Jardim Botânico e o do Sumaré.

Pela facilidade de obtenção de dados junto à Subsecretaria de Águas Municipais e pelo posicionamento geográfico, os postos do Jardim Botânico e do Sumaré foram os escolhidos para representar o regime de chuvas intensas da bacia.

O posto do Jardim Botânico se encontra no Jôquei Clube Brasileiro, na rua Jardim Botânico, nº 1003. Ela é uma estação remota, com leitura e transmissão automáticas de dados. Está posicionada em uma cota próxima à do nível do mar. Sua Equação de Chuvas Intensas do tipo IDF está escrita na equação 1:

$$i = \frac{1239.T_R^{0,15}}{(t + 20)^{0,74}} \quad (1)$$

A estação pluviométrica do Sumaré está posicionada na torre de transmissão da Rede Globo, na Estrada do Sumaré, s/nº. Ela é uma estação concentradora, ou seja, com leitura e transmissão automática de dados, que ainda valida e retransmite os dados recebidos de estações remotas para a estação central, e está posicionada na cota 768 m. De acordo com os dados observados no Sistema Alerta Rio, esse é o posto que apresenta as maiores medições de precipitações dentre aqueles administrados pela Geo-Rio e que integram este sistema. Esse dado indica que a região apresenta uma grande influência de chuvas orográficas.

Infelizmente, porém, não está disponível uma Equação IDF para o posto do Sumaré. Com isso, foi necessária a utilização de dados de outra região com características hidrológicas semelhantes, para que o objetivo pretendido de representar o efeito orográfico fosse alcançado.

No caso, o posto pluviométrico escolhido foi o da Capela Mayrink. Essa estação é administrada pela SERLA e sua equação IDF foi atualizada (por técnicos da Subsecretaria de Águas Municipais) de forma bastante apurada, com uma série histórica de cerca de 30 anos, e disponibilizada em 2004. Ela está localizada no bairro do Alto da Boa Vista, também conhecido por ser uma região muito úmida e situado próximo às montanhas onde se encontra o posto do Sumaré. O posto está posicionado a uma altitude de 460 m. A equação disponibilizada está apresentada na equação 2.

$$i = \frac{921,39 \cdot T_R^{0,162}}{(t + 15,46)^{0,673}} \quad (2)$$

A partir dessas informações, estabeleceram-se as áreas de influência dos respectivos postos, a fim de definir a abrangência destes em relação aos estudos hidrológicos desenvolvidos na seqüência deste trabalho. De um modo geral, para a planície foi usada a equação do posto do Jardim Botânico; para as encostas, foi usada a equação do posto da Capela Mayrink, que representou os dados não disponíveis do Sumaré.

## 6) Modelação Matemática

A bacia do rio dos Macacos é composta por uma complexa rede de escoamentos, que combina trechos de canal natural e artificial com galerias de drenagem. A parte mais baixa e plana da bacia conta com várias áreas que permitem armazenamentos temporários e escoamentos superficiais, formando redes secundárias e complementares ao próprio sistema de drenagem. Outro fator que aumenta a complexidade de funcionamento da rede de drenagem refere-se à possibilidade de transposição de parte da vazão entre os rios dos Macacos e Rainha. Além disso, há interferência de maré na foz do sistema, agindo sobre a Lagoa Rodrigo de Freitas. Nestas circunstâncias, o uso de abordagens tradicionais de modelação de rios, com foco na rede de canais, a partir de considerações unidimensionais de escoamento, fica bastante limitado, dificultando a avaliação do comportamento integrado do sistema. Esse contexto levou à necessidade de configuração da modelação matemática para a representação de um sistema hídrico complexo, englobando duas ferramentas de simulação desenvolvidas na UFRJ. A primeira destas

ferramentas é o MODCEL, um modelo de simulação hidrodinâmica, capaz de representar as interações entre redes de canais e planícies de forma integrada. A outra ferramenta é o Sistema HIDRO-FLU, que integra e automatiza uma série de estudos hidrológicos relacionados à simulação de cheias em bacias de pequeno e médio porte, permitindo a definição da chuva de projeto e de vazões de projeto para a alimentação do MODCEL. Ambas estão descritas no anexo a este relatório de projeto.

A seguir são destacadas algumas considerações de ordem geral sobre a modelação da área de interesse:

- o modelo MODCEL foi utilizado para a simulação hidrodinâmica do sistema de drenagem da bacia do rio dos Macacos, bem como seus escoamentos superficiais, especialmente nas partes média e baixa da bacia;
- o sistema HIDRO-FLU foi utilizado para elaboração dos estudos hidrológicos complementares à simulação hidrodinâmica, entre os quais, o cálculo do tempo de concentração da bacia e de seus afluentes, a determinação da chuva de projeto, a determinação dos parâmetros de separação do escoamento superficial; e o cálculo dos hidrogramas de projeto relativos a diversas áreas de contribuição e que serão representados através de condições de contorno na modelagem com o MODCEL.

### *6.1) Modelação Topográfica e Hidráulica*

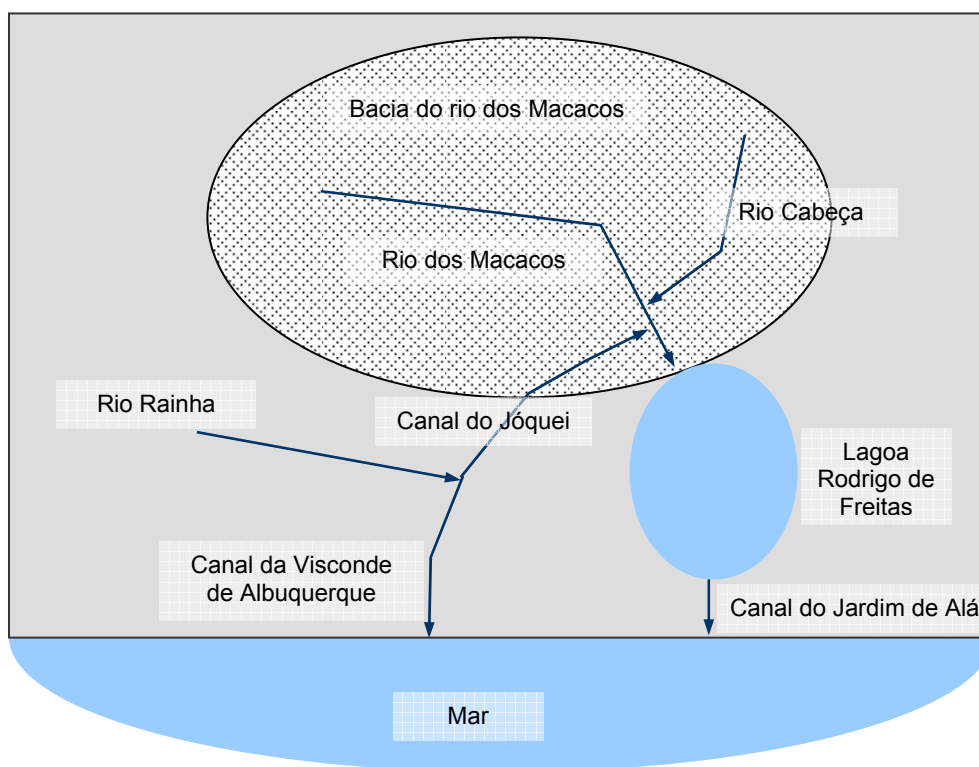
A utilização do MODCEL pressupõe a construção de uma rede bidimensional de escoamentos, conservando relações unidimensionais, escritas nas diversas direções em que estes escoamentos podem ocorrer.

A definição da rede de escoamentos que se forma, pela ação combinada da rede de drenagem com a sua interação com a paisagem da bacia, é de fundamental importância para a modelação e engloba as atividades de modelação topográfica, hidráulico-hidrológica e topológica.

Diferentes tipos de células são utilizados para representar a superfície da bacia, integrando canais, galerias e áreas de armazenagem, levando em conta o padrão de urbanização. A interação entre as células, a partir da definição de leis hidráulicas adequadas, materializa, então, a rede de escoamentos representativa da região modelada.

No caso do rio dos Macacos, foi criado um conjunto de 193 células, que representam em detalhes a bacia, cobrindo sua superfície desde as encostas onde nascem o rio principal e seus tributários, descendo para as áreas planas urbanizadas, chegando até à Lagoa Rodrigo de Freitas, através do canal da rua General Gárzon, e até o mar, a partir da transposição que chega ao canal da rua Visconde de Albuquerque.

A figura 23 mostra esquematicamente a rede modelada, enquanto a figura 24 mostra a divisão da bacia em células.



**Figura 24: Representação esquemática da área estudada.**

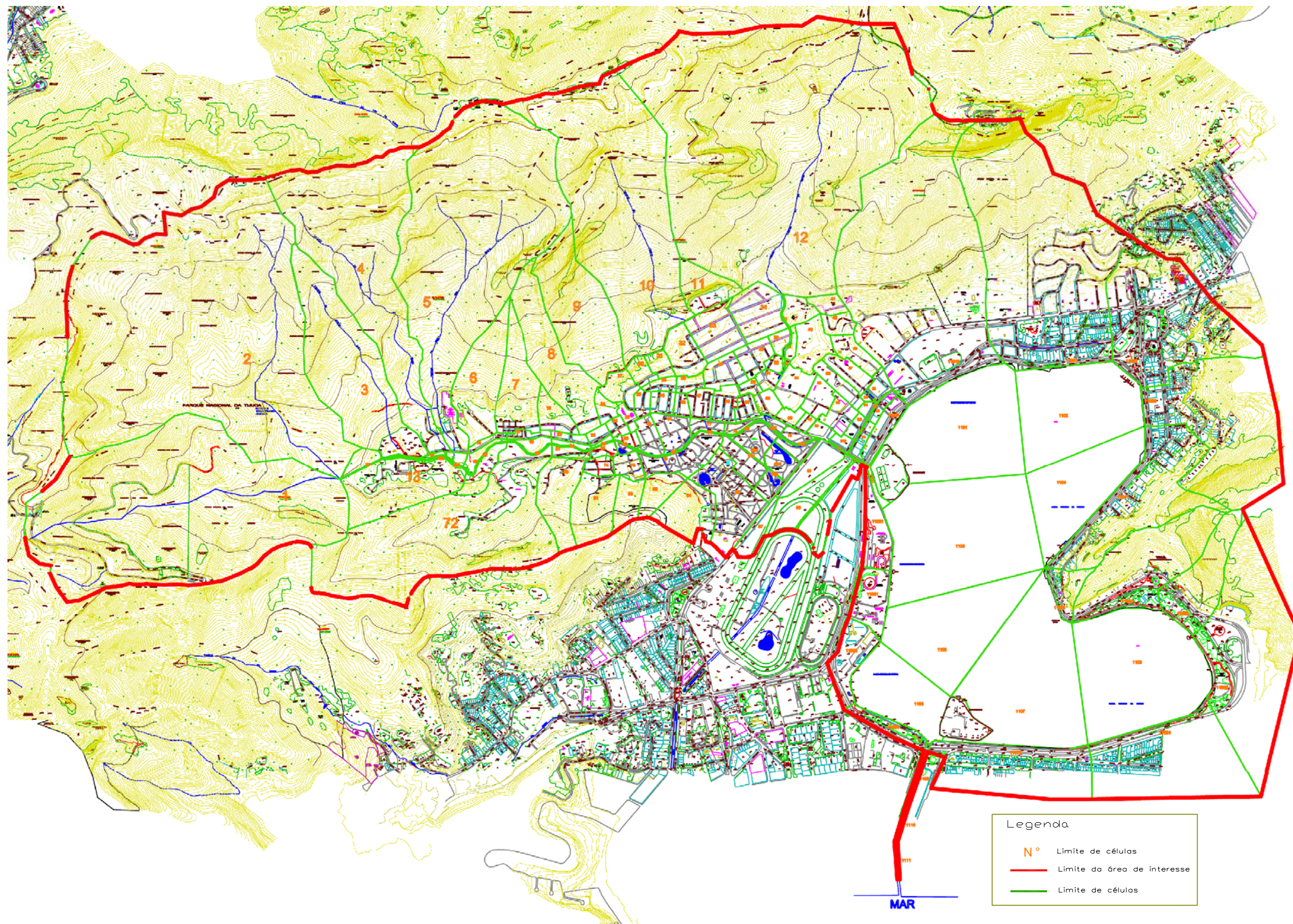


Figura 25: Divisão da bacia do rio dos Macacos em células.

## 6.2) Hidrologia

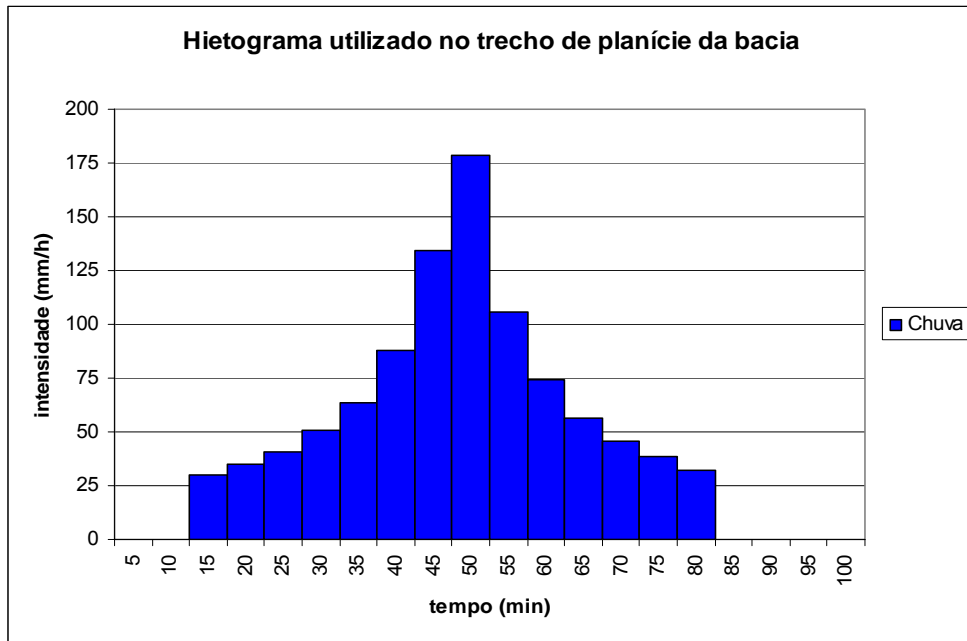
As áreas de encosta representam uma grande porção da bacia. Essas áreas, entretanto, em sua maior parte vegetadas, e com grandes declividades, são geradoras de escoamento para as áreas mais baixas, mas não representam uma preocupação, sob o ponto de vista de alagamentos. Nesse contexto, a modelação proposta neste estudo não precisa detalhar estas áreas, mas precisa calcular adequadamente as transformações de chuva em vazão que lá ocorrem.

Nesse contexto, para calcular as vazões de projeto com maior acurácia, sem sobrecarregar a necessidade de detalhamento das áreas de encosta em células, foi utilizado o Sistema Hidro-Flu na modelação das sub-bacias que afluem ao rio dos Macacos, especialmente nas vertentes de sua margem esquerda.

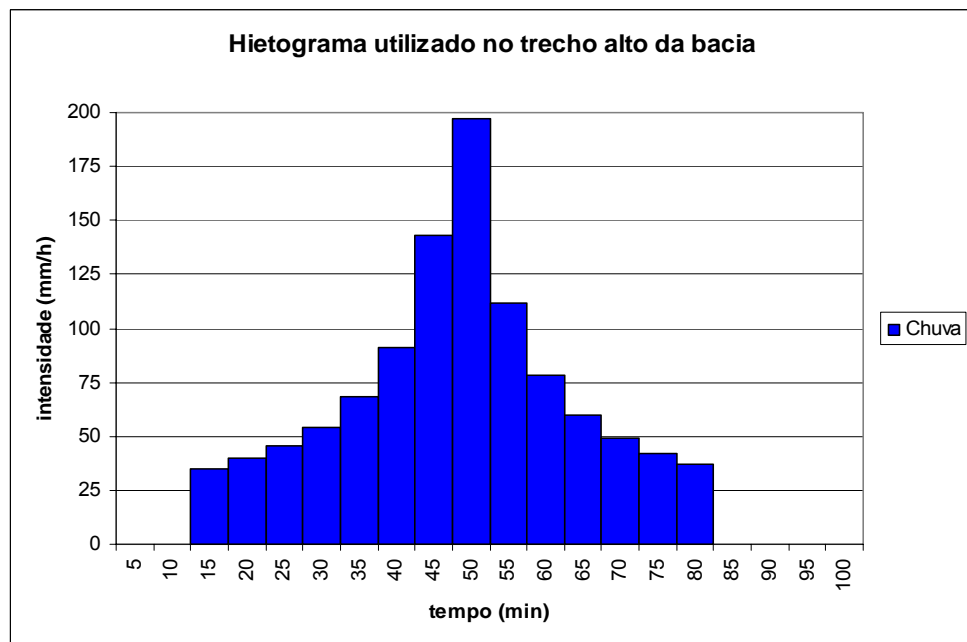
O tempo de concentração da bacia foi estimado através da fórmula de George Ribeiro em cerca de 70 minutos e este período foi utilizado como igual ao da duração da chuva crítica para a bacia. O tempo de recorrência para avaliação do funcionamento da rede de macrodrenagem foi adotado como 20 anos. Os hietogramas, então, foram calculados para 14 intervalos de tempo de 5 minutos, para alimentação do modelo. Os totais das chuvas calculados, em milímetros, com base no posto do Jardim Botânico e no posto da capela Mayrink, foram de 81,1 mm e 87,6 mm, respectivamente.

Como foram considerados dois postos na modelação, dois hietogramas foram gerados. Os hietogramas usados na modelação das vazões de projeto são mostrados nas figuras 25 e 26. As vazões máximas dos hidrogramas obtidos para cada bacia de encosta estão apresentadas na tabela 3 e, a título de ilustração, a forma de um dos hidrogramas, no caso o daquele obtido para a parte alta da própria bacia dos Macacos, é mostrada na figura 27.

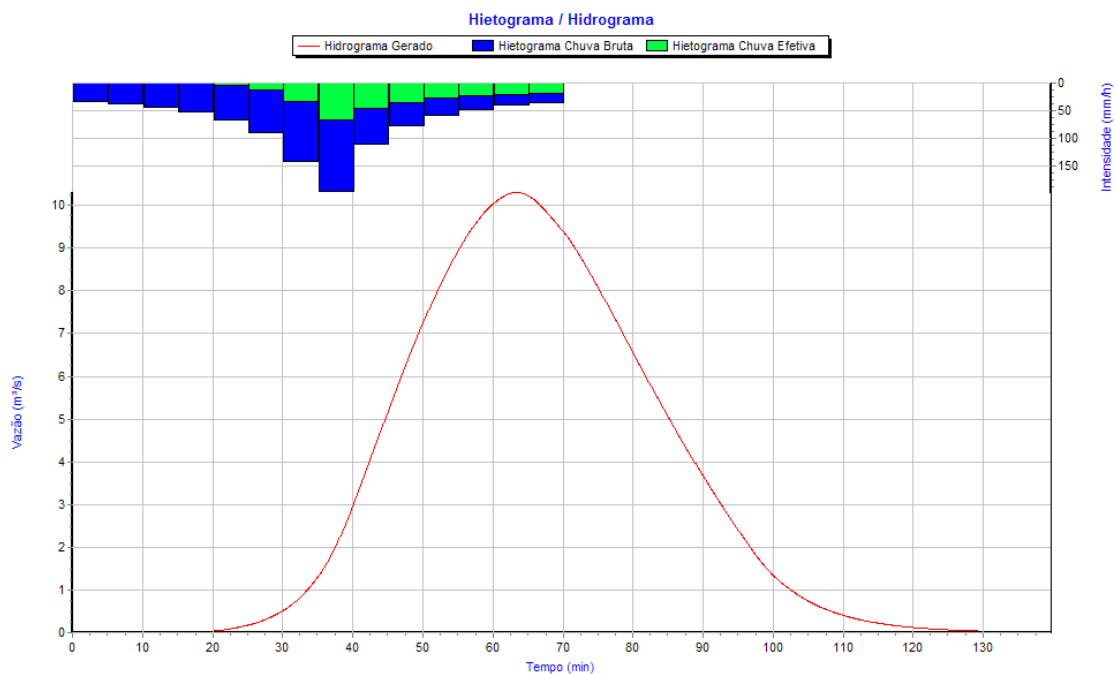




**Figura 26: Hietograma obtido a partir da equação IDF do posto do Jardim Botânico.**



**Figura 27: Hietograma obtido a partir da equação IDF do posto da capela Mayrink.**

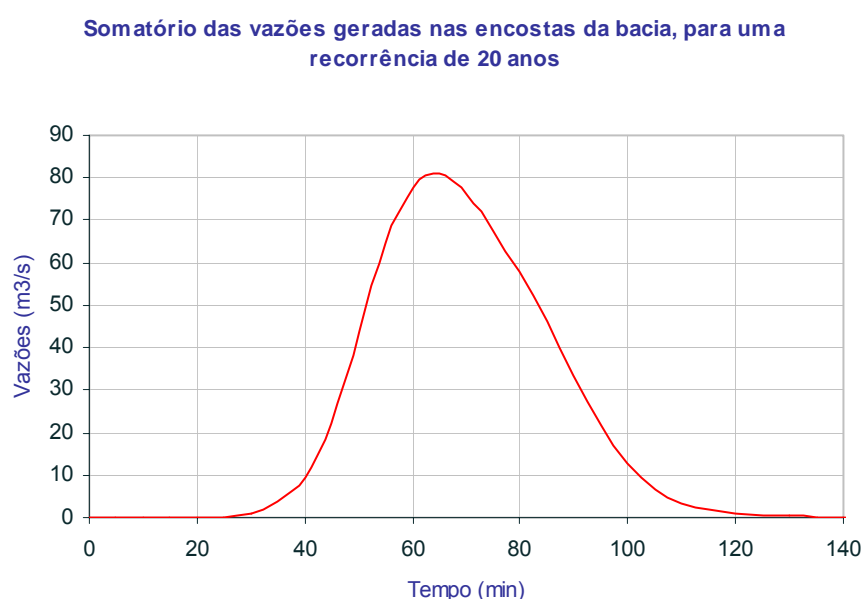


**Figura 28: Hidrograma calculado, pelo Sistema Hidro-Flu, para a parte alta da bacia do rio dos Macacos.**

**Tabela 3: Vazões máximas das sub-bacias de encosta.**

Célula	Rio	Q max (m³/s)
1	Alto rio dos Macacos	10,30
2	Rio do Pai Ricardo	14,74
3	Rio Xaxim	3,17
4	Rio Ouriço	5,07
5	Rio Sete Quedas	8,86
6	Bacia Incremental 1	1,94
7	Bacia Incremental 2	1,60
8	Bacia Incremental 3	2,13
9	Bacia Incremental 4	3,24
10	Rio Algodão	8,01
12	Alto rio Cabeça	22,33
72	Rio do Grotão	5,85

Como forma de quantificação das vazões aportadas à bacia, ainda sem considerar as vazões que são geradas pela transformação da chuva em escoamento superficial nas áreas mais baixas e urbanizadas, a figura 28 mostra a soma dos hidrogramas resultantes nas encostas, que serão introduzidos no modelo matemático para representação hidrodinâmica da cheia.



**Figura 29: Soma das vazões de projeto, obtidas para as encostas da bacia.**

### ***6.3) Premissas Básicas de Trabalho, Avaliação Preliminar do Comportamento da Bacia e Configuração da Modelação Proposta***

A definição da configuração final do modelo depende de algumas premissas assumidas a partir de duas linhas distintas de interpretação:

- o comportamento hidráulico da bacia deve ser pré-avaliado, a fim de se articular o modelo para gerar padrões de escoamento próximos do real e que possam ser ajustados e verificados a partir de medições de campo (no processo de calibração);
- a representação topográfica e de ocupação urbana precisa ser pré-definida, a fim de gerar informações médias representativas da bacia.

Assim, sob o ponto de vista do comportamento hidráulico, a partir da avaliação do histórico de cheias na região, percebe-se que as áreas baixas são as mais afetadas, destacando-se a própria rua Jardim Botânico, especialmente no cruzamento com a rua Pacheco Leão. As imediações desta área registram níveis observados de alagamento da ordem de 0,80m a 1,00m, em situações de chuvas intensas. Há também registro de extravasamento do rio dos Macacos a partir do canal na rua General Garzón; entretanto, este extravasamento parece ser de menor monta do que as lâminas que se acumulam sobre as ruas de montante. Essa situação indica que a rede de drenagem parece ser insuficiente. Problemas de insuficiência da rede advêm basicamente de 3 fatores: subdimensionamento (seja por falha de planejamento, falta de controle da ocupação urbana ou obsolescência); falta de manutenção (com o acúmulo de sedimentos e resíduos sólidos diversos, que diminuem a capacidade de descarga da rede); e obstruções na foz (com restrições geradas pelo corpo receptor) ou em transições do escoamento (de canal aberto para galeria, por exemplo). O caso da bacia do rio dos Macacos parece sofrer com um pouco de cada um destes 3 fatores: a falta de planejamento de ocupação, como pode ser evidenciado pelo próprio histórico breve relatado no item 5.1; a presença de assoreamento na calha e de trechos com singularidades ao escoamento; e a comporta de comunicação com a Lagoa Rodrigo de Freitas, no canal da rua General Gárzon. As figuras 29 a 36, com imagens da bacia, ilustram estas restrições citadas.

Pode-se citar ainda que as áreas mais altas, ainda com vegetação de floresta, têm um papel fundamental na atenuação das vazões que chegam às planícies da bacia. Estas áreas não apresentam inundações, mas são capazes de reter uma grande quantidade de água. Além disso, o próprio Jardim Botânico, no coração da bacia, é responsável pelo armazenamento temporário de parte das vazões geradas.

Sob o ponto de vista de representação topográfica e de ocupação urbana, a inspeção local e a avaliação de fotos aéreas permitiu definir alguns parâmetros fundamentais de modelação, a saber:

- a particularização de coeficientes de escoamento superficial para cada uma das células consideradas que, individualmente, representam pequenas áreas da bacia, com características homogêneas, e que irão participar do processo de transformação de chuva em vazão, através da aplicação do método Racional;

- a caracterização de um padrão de urbanização médio para a parte baixa da bacia, definindo alturas de meio fio, altura média do piso das edificações, percentagem de ruas, áreas livres e áreas edificadas.

A partir desta avaliação preliminar, que levou a uma série de premissas norteadoras e ao detalhamento das configurações internas do modelo, passou-se a dispor do conjunto básico de suporte ao estudo em questão.



**Figura 30: Vista do rio dos Macacos pouco antes de entrar em galeria, sob a rua Jardim Botânico (fonte: acervo pessoal do professor Marcelo G. Miguez).**



**Figura 31: Vista da entrada em galeria do rio dos Macacos, dentro do Jardim Botânico, junto ao muro que define seu limite externo – percebe-se, nitidamente, o estrangulamento do escoamento, que sai de uma seção com largura superior a 6m para outra de cerca de 2,0 (fonte: acervo pessoal do professor Marcelo G. Miguez)**



**Figura 32: Detalhes de assoreamento do rio dos Macacos, dentro do Jardim Botânico (fonte: acervo pessoal do professor Marcelo G. Miguez)**



**Figura 33: Vista da saída do rio dos Macacos no canal da rua General Garzón (fonte: acervo pessoal do professor Marcelo G. Miguez).**



**Figura 34: Detalhe do rio dos Macacos no canal da rua General Garzón – baixa lâmina d'água e assoreamento(fonte: acervo pessoal do professor Marcelo G. Miguez).**





**Figura 35: Vista da comporta que liga o rio dos Macacos com a Lagoa Rodrigo de Freitas (na ocasião fechada). Comunicação franca do rio dos Macacos com o canal do Jóquei, por baixo da rua, na margem direita (fonte: acervo pessoal do professor Marcelo G. Miguez).**



**Figura 36: Detalhe da comporta - rua General Garzon (fonte: acervo pessoal do professor Marcelo G. Miguez).**



**Figura 37: Vista do canal do Jóquei e detalhe da sua entrada no canal da rua Gal. Garzón (fonte: acervo pessoal do professor Marcelo G. Miguez).**

#### *6.4) Calibração do Modelo Proposto*

A calibração de um modelo matemático qualquer se refere ao processo de ajuste de parâmetros deste modelo para que ele seja capaz de representar a área em estudo de uma forma adequada, coerente com a realidade observada. Nesse processo, em geral, necessita-se dispor de um conjunto de dados medidos, correlacionando eventos de chuvas observadas com alagamentos ocorridos, decorrentes destas chuvas. A partir do ajuste que leva à reprodução de um evento, o modelo passa a ser testado para outros eventos e seu comportamento avaliado de forma a verificar a adequação do ajustes, para situações diversas daquela para a qual os parâmetros foram definidos.

No caso em estudo, porém, não se dispõe de um conjunto de dados capaz de permitir o processo de calibração usual. Não há dados fluviométricos, nem registros de alagamentos coincidentes com registros de chuva na bacia. Há, entretanto, a indicação de uma mancha freqüente de alagamentos, com uma faixa de alagamentos associados a chuvas intensas (como citado no item anterior, na casa de 0,80 a 1,00m de lâmina d'água, na região baixa da bacia, próxima à foz).

A partir desta informação, os parâmetros de modelo foram ajustados para que a própria chuva de projeto (que é uma chuva intensa, com tempo de recorrência de 20 anos) fosse capaz de produzir estes alagamentos observados em eventos similares.

Assim, a figura 37 mostra o cotograma obtido para a rua Jardim Botânico, no cruzamento com a rua Pacheco Leão, considerado como resultado final da calibração. O nível de alagamento na rua chegou a 0,93m. A figura 38 apresenta o perfil longitudinal do rio dos Macacos, com a indicação de seu perfil de linha d'água, que mostra claramente o efeito do estrangulamento da seção do rio em galeria, sob a rua Jardim Botânico, onde ocorre afogamento. Complementarmente, dado que a inundação é um efeito espacial, avaliou-se também a mancha de alagamentos resultante da modelação do cenário equivalente à situação atual, sendo esta mancha está apresentada na figura 39. Considerado fechado o ajuste do modelo, este fica, então, disponível para simulações de cenários de projeto.

### Alagamento na esquina das ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão

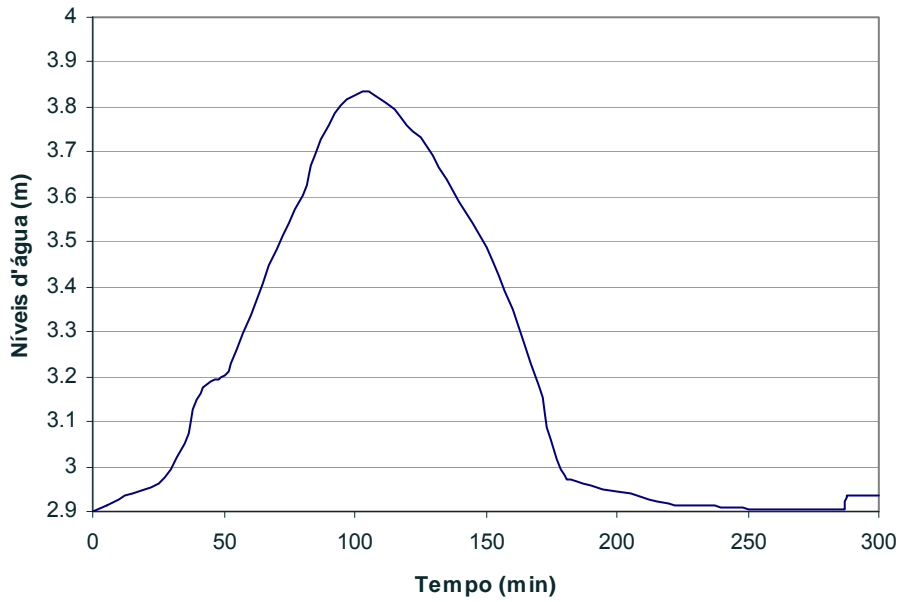


Figura 38: Resultado da calibração do modelo no ponto de controle da bacia.

### Perfil de NA no trecho modelado

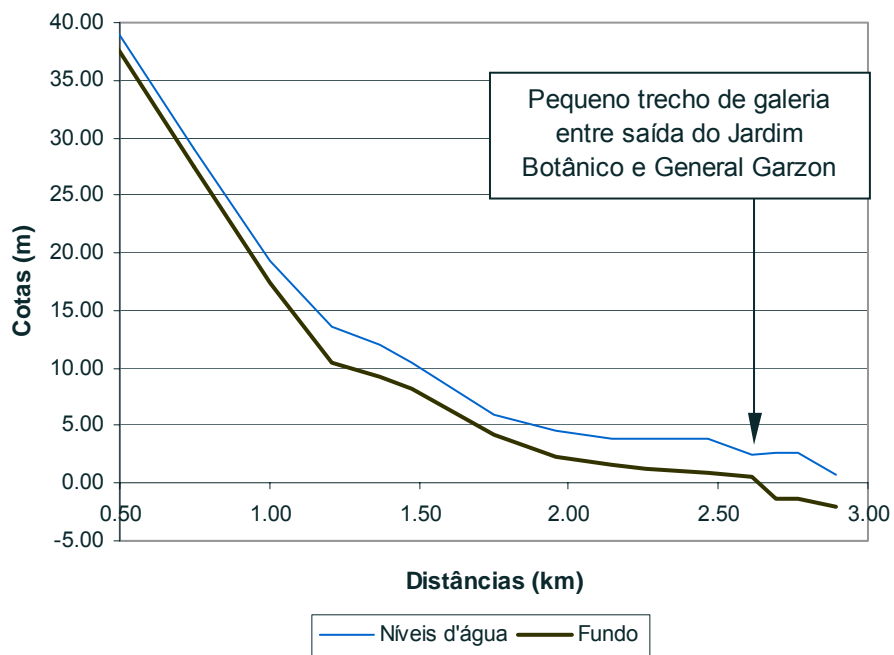


Figura 39: Perfil de linha d'água ao longo do rio dos Macacos.

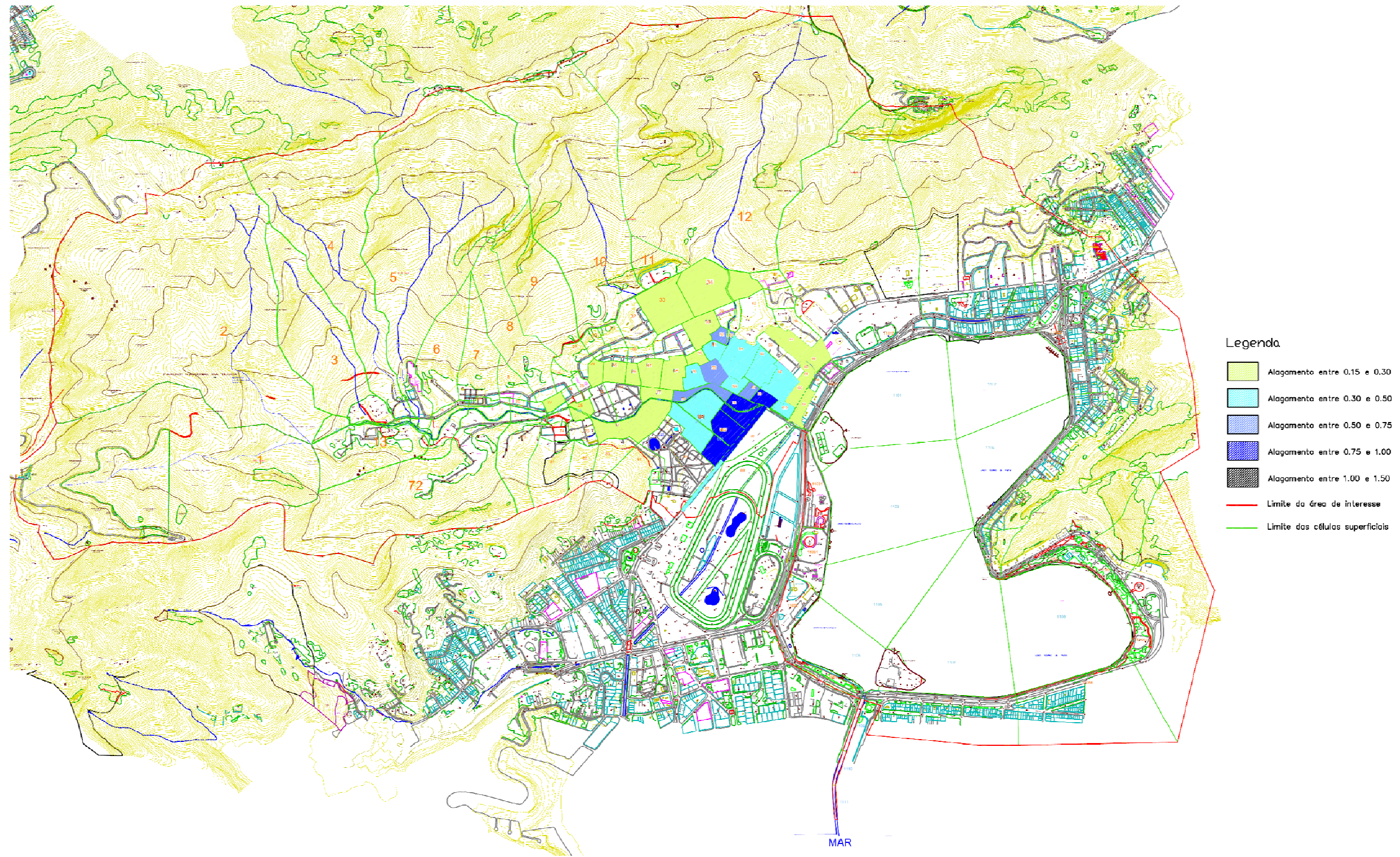


Figura 40: Mancha de inundações máximas observada na simulação da cheia para as condições atuais da bacia, base de comparação.

## **7) Análise Hidrodinâmica e Diagnóstico de Cheias na Bacia**

A urbanização do trecho inferior da bacia também merece destaque. As principais vias de trânsito e áreas de lazer e comércio estão localizadas em áreas com cotas baixas, em uma faixa de urbanização muito estreita entre o principal corpo receptor, que é a Lagoa Rodrigo de Freitas, e as encostas mencionadas. Com isso, a exceção do parque do Jardim Botânico, que ainda exerce uma ação de amortecimento, existe pouco espaço para acomodar inundações, sem provocar transtornos e prejuízos para a população. A alta movimentação no comércio e no tráfego local torna, também, difíceis as obras de escavação e recuperação do atual sistema de drenagem.

No trecho superior, a alta declividade das encostas e a grande área ocupada por afloramentos rochosos fazem com que a geração de escoamento superficial para o trecho inferior seja muito significativa, apesar de haver uma grande área de cobertura vegetal que compensa parte dos efeitos.

No trecho inferior, os dois principais rios da bacia, que são o rio dos Macacos e o rio Cabeça, tiveram suas seções regularizadas e interligadas, através de canais de concreto. Neles, observa-se uma acentuada elevação do nível d'água durante as chuvas mais intensas, chegando ao transbordamento para as ruas. Na foz do rio dos Macacos, na Lagoa, há uma comporta, para controle de descarga, mas que não opera adequadamente.

Através deste primeiro estudo desenvolvido, pôde-se perceber que as cheias na região são provocadas, principalmente, por deficiências nas galerias de águas pluviais, pelo assoreamento dos canais e pela obstrução do exutório da bacia.

A figura 40 mostra as vazões na região de jusante do rio dos Macacos. A vazão na foz mostra-se bastante reduzida, quando comparada com as vazões que entram no modelo pelas encostas de montante. Esta constatação leva à conclusão que parte significativa dos escoamentos encontra-se retida na bacia, alagando áreas urbanas. A figura 41 mostra o alagamento nas ruas baixas, no entorno da região de controle, ou seja, nas proximidades do cruzamento das ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão. A figura 42 mostra as variações de nível d'água no trecho final do canal da rua General Garzón, na Lagoa Rodrigo de Freitas e no mar.

### Vazões no trecho final do rio dos Macacos até sua foz

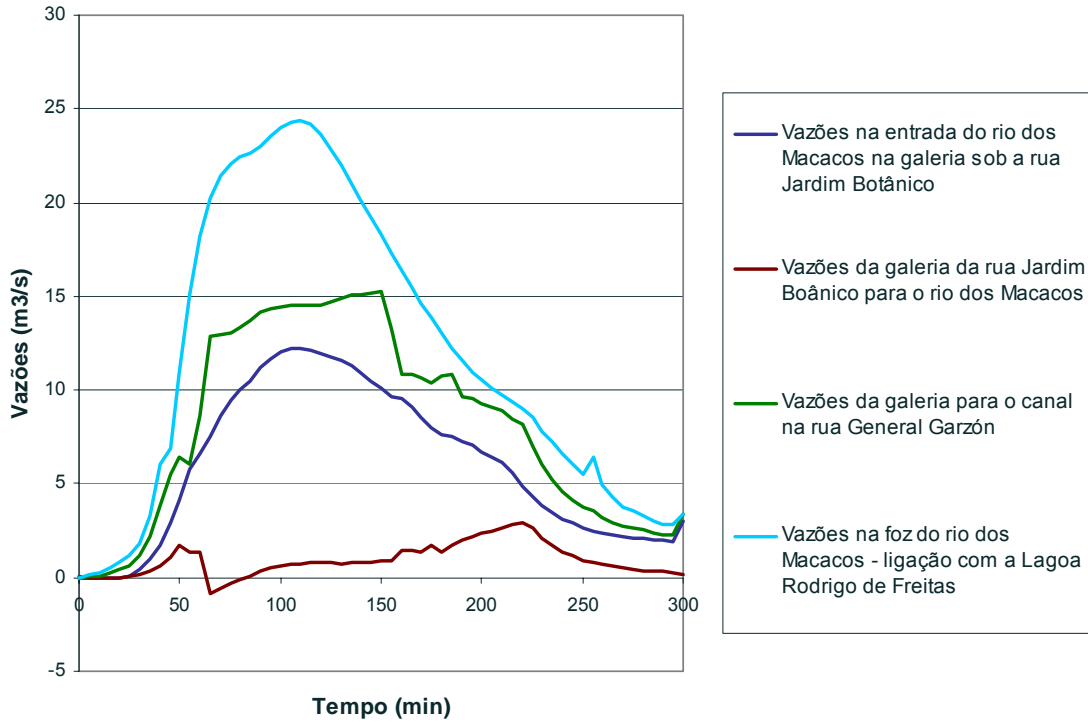


Figura 41: Vazões no exutório da bacia.

### Níveis de alagamento nas imediações do Jardim Botânico

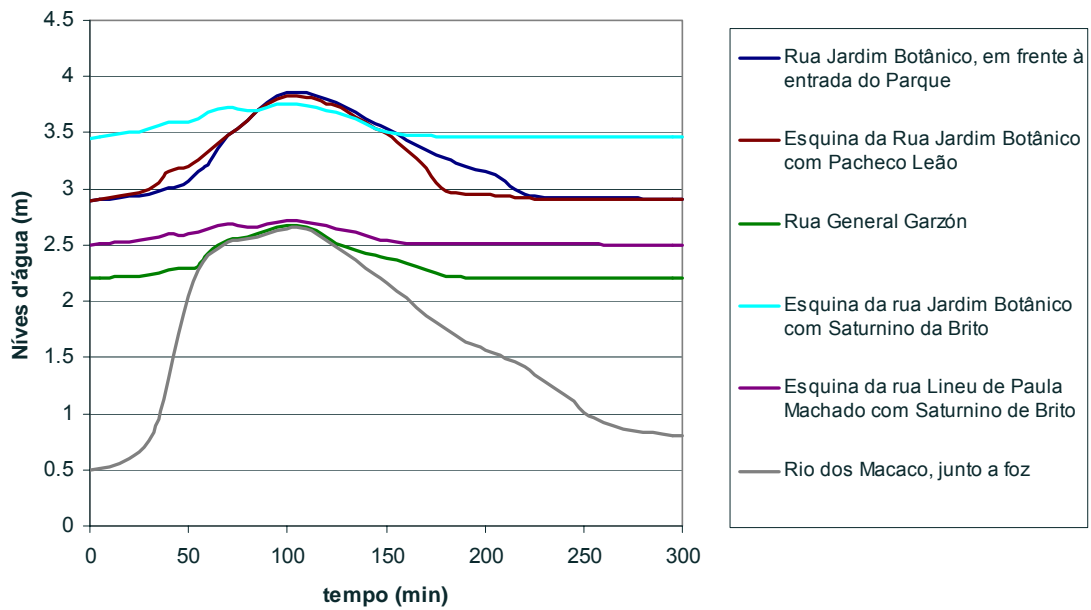
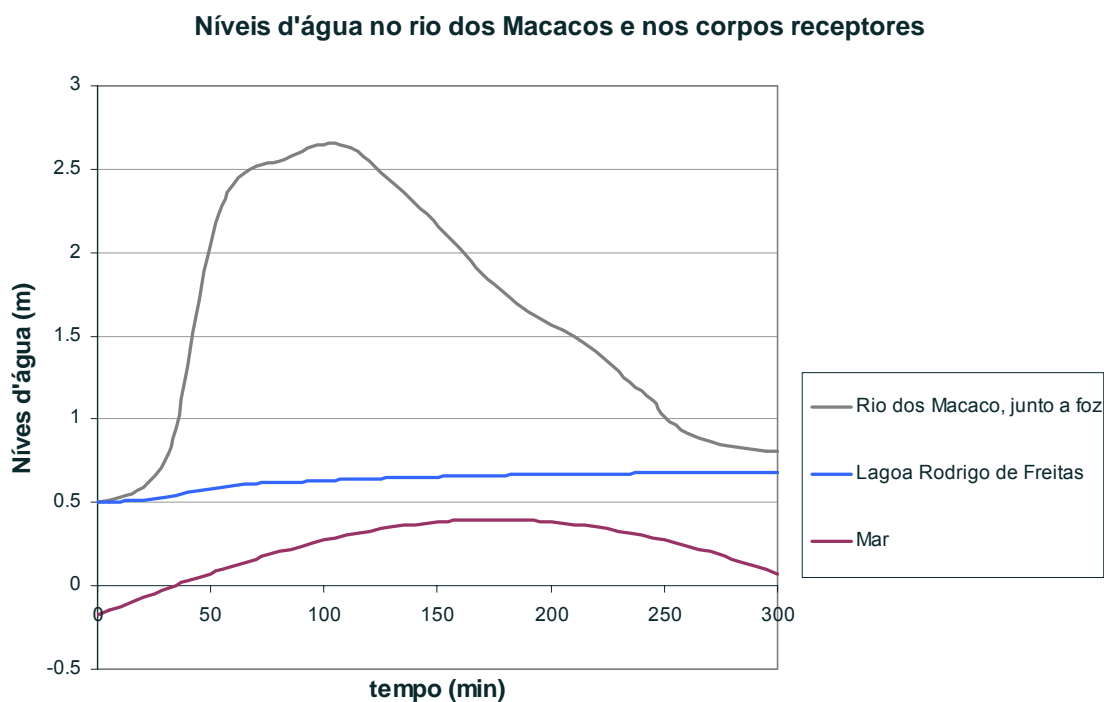


Figura 42: Níveis d'água na região de maior alagamento.



**Figura 43: Variações de NA no rio dos Macacos, Lagoa Rodrigo de Freitas e mar.**

### *7.1) Considerações feitas a partir da análise hidrodinâmica*

A abertura do rio dos Macacos na sua foz, bem como a redução de níveis d'água na Lagoa, através de medidas específicas para este fim, podem ser importantes fatores para iniciar o processo de controle de cheias na bacia. Pelos resultados obtidos, estas medidas provavelmente liberariam a descarga no canal da rua General Garzón, permitindo desafogar as restrições de descarga da galeria que passa sob a rua Jardim Botânico, bem como do próprio rio dos Macacos, em seu trecho de canal fechado. Entretanto, dada a criticidade do problema de enchentes no local, estas não seriam as únicas medidas necessárias. A correção de pontos obstrutivos da própria rede de drenagem e, se possível, a combinação destas medidas, objetivando aumentar a condutância das seções, com medidas de amortecimento em reservatórios provavelmente gerariam maiores reduções dos níveis de alagamento. Medidas de amortecimento combinadas com medidas de canalização tendem a dar soluções de cunho mais sustentável ao longo do tempo ao tratarem o problema de geração descontrolada de escoamento e não apenas a necessidade de



conduzir tais escoamentos. Estas atuações configurariam complementos adequados para as ações de desobstrução da foz.

Na próxima etapa será avaliada, nos cenários de projeto, a funcionalidade destas medidas, no controle de inundações na bacia do rio dos Macacos, e não somente as medidas propostas no âmbito do projeto Lagoa Limpa.

## **8) Obras propostas para a Recuperação Ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas**

A proposta de trabalho básica para recuperação da Lagoa Rodrigo de Freitas prevê a ampliação de sua comunicação com o mar, permitindo uma melhor troca de vazões entre ambos, com possibilidade de renovação freqüente das águas da Lagoa. Nestes termos, basicamente três ações estão sendo previstas. A primeira delas e, talvez, a mais fundamental, refere-se à implantação de um sifão no canal do Jardim de Alá, permitindo a comunicação com o mar de forma contínua, independentemente da manutenção do canal ou da operação de sua comporta. De fato, prevê-se o fechamento do canal, tal como é concebido hoje, permitindo a continuidade da linha de costa e, portanto, da praia. O sifão, com 18m<sup>2</sup> de área de seção transversal de escoamento, passaria a ter a responsabilidade pela ligação da Lagoa Rodrigo de Freitas com o mar. Duas intervenções complementares têm caráter combinado: uma delas prevê o fechamento da saída do canal do Jóquei para o rio dos Macacos, impedindo que uma possível contribuição de carga poluente chegue à Lagoa a partir do próprio Jóquei Clube ou advinda de uma transposição de vazões do rio Rainha; a outra intervenção prevê a abertura da comporta do canal da rua General Garzón, a partir de medidas de saneamento do rio dos Macacos, que passaria a contribuir diretamente para a Lagoa, com águas mais limpas. Estas medidas estão esquematicamente mostradas na figura 43.

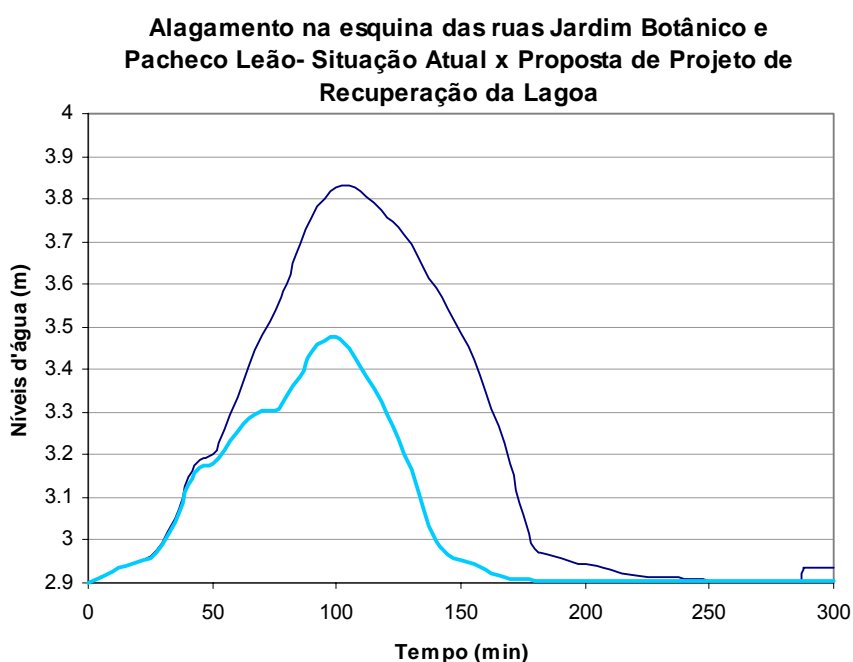


**Figura 44: Localização esquemática das três principais intervenções propostas para recuperação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas – sifão no Jardim de Alá, implantação de comporta no canal do Jockey e abertura da comporta do rio dos Macacos na rua General Garzón (fonte: imagem editada do Google Earth)**

## 9) Avaliação dos Efeitos do projeto de Recuperação Ambiental da Lagoa sobre as Cheias na Bacia do Rio dos Macacos

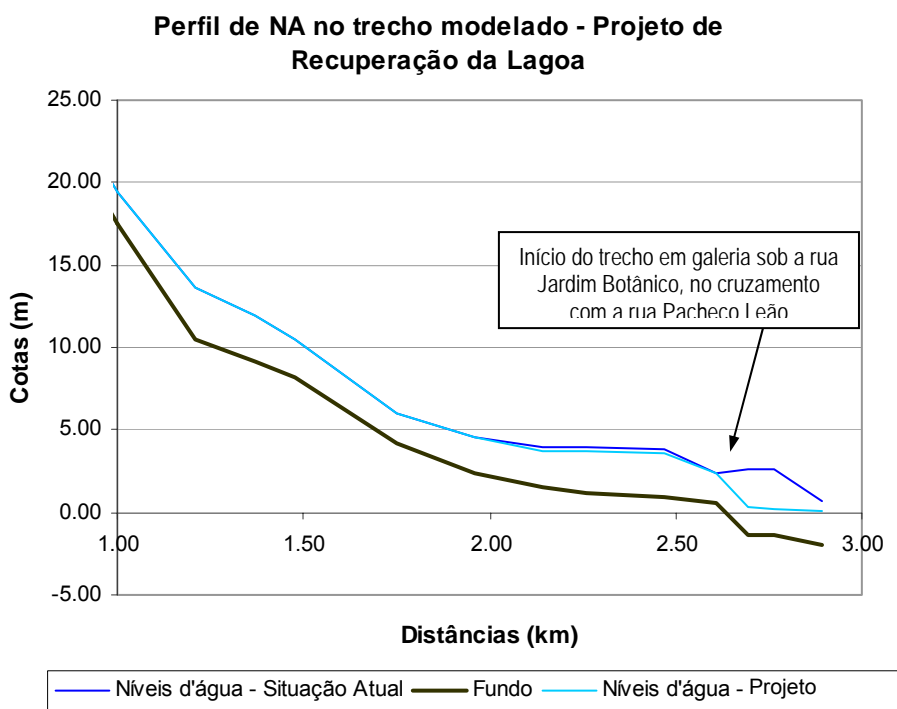
### 9.1) Efeito das Obras Propostas sobre as Cheias na Bacia do Rio dos Macacos

A partir da implantação das medidas propostas em modelo, pode-se avaliar comparativamente a situação atual de alagamentos na bacia com este novo cenário. De uma forma geral, verifica-se que as propostas atenuam bastante os níveis d'água no canal da rua General Garzón, diminuindo os alagamentos nas áreas mais críticas, a saber, ao longo da rua Jardim Botânico e no cruzamento desta com a rua Pacheco Leão. Esta redução, em termos de pico de alagamento, chega a valores de cerca de 38%, com a redução do tempo de permanência dos alagamentos em cerca de 40 minutos. Mais especificamente, as lâminas se reduzem, na esquina da rua Jardim Botânico com a Pacheco Leão, de 0,93m para 0,58m, e o tempo em que a rua fica alagada com mais de 15cm de lâmina d'água reduz-se de 140 minutos para 100 minutos. A figura 44 ilustra esta comparação.



**Figura 45:** Comparação de alagamentos na esquina das ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão, tomada como ponto de controle para comparação de resultados.

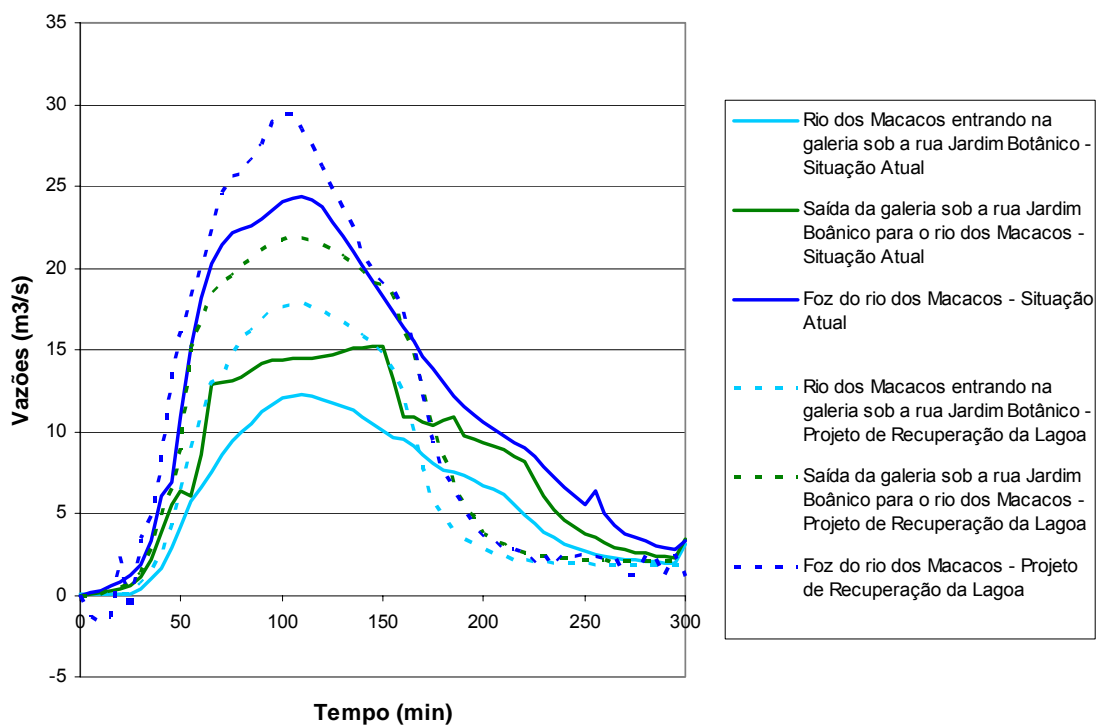
A observação da envoltória máxima de níveis d'água, vista em perfil, na figura 45, mostra a redução acentuada de profundidades no canal da rua General Garzón. Entretanto, dadas as restrições encontradas na rede de macro-drenagem da região, o benefício desta acentuada redução, que desobstrui a foz, acaba não se propagando muito para montante. As obras propostas para recuperação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas, tomadas de modo isolado, são capazes de diminuir os alagamentos a jusante, mas ainda não são suficientes para controlá-los de forma efetiva, ou seja, as obras propostas são positivas, mas para que os problemas específicos de drenagem sejam adequadamente tratados, são necessárias ações complementares.



**Figura 46: Envoltória máxima do perfil de linha d'água no trecho médio-baixo do rio dos Macacos.**

A figura 46 mostra o efeito das obras propostas sobre as vazões junto ao exutório do rio dos Macacos. O resultado é um aumento destas vazões, exatamente como consequência da diminuição dos níveis d'água na Lagoa e da abertura da comporta.

### Vazões no trecho final do rio dos Macacos até sua foz



**Figura 47: Comparação de vazões no trecho final do rio dos Macacos, considerando a situação atual e a situação modificada pelas obras propostas de recuperação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas.**

A figura 47 mostra o mapa da situação atual com foco na região próxima ao exutório da bacia, como intuito de se realizarem comparações mais claras com os mapas de alagamentos dos demais cenários. A figura 48 mostra o mapa de alagamentos para a situação modificada pelas obras de recuperação da Lagoa Rodrigo de Freitas.

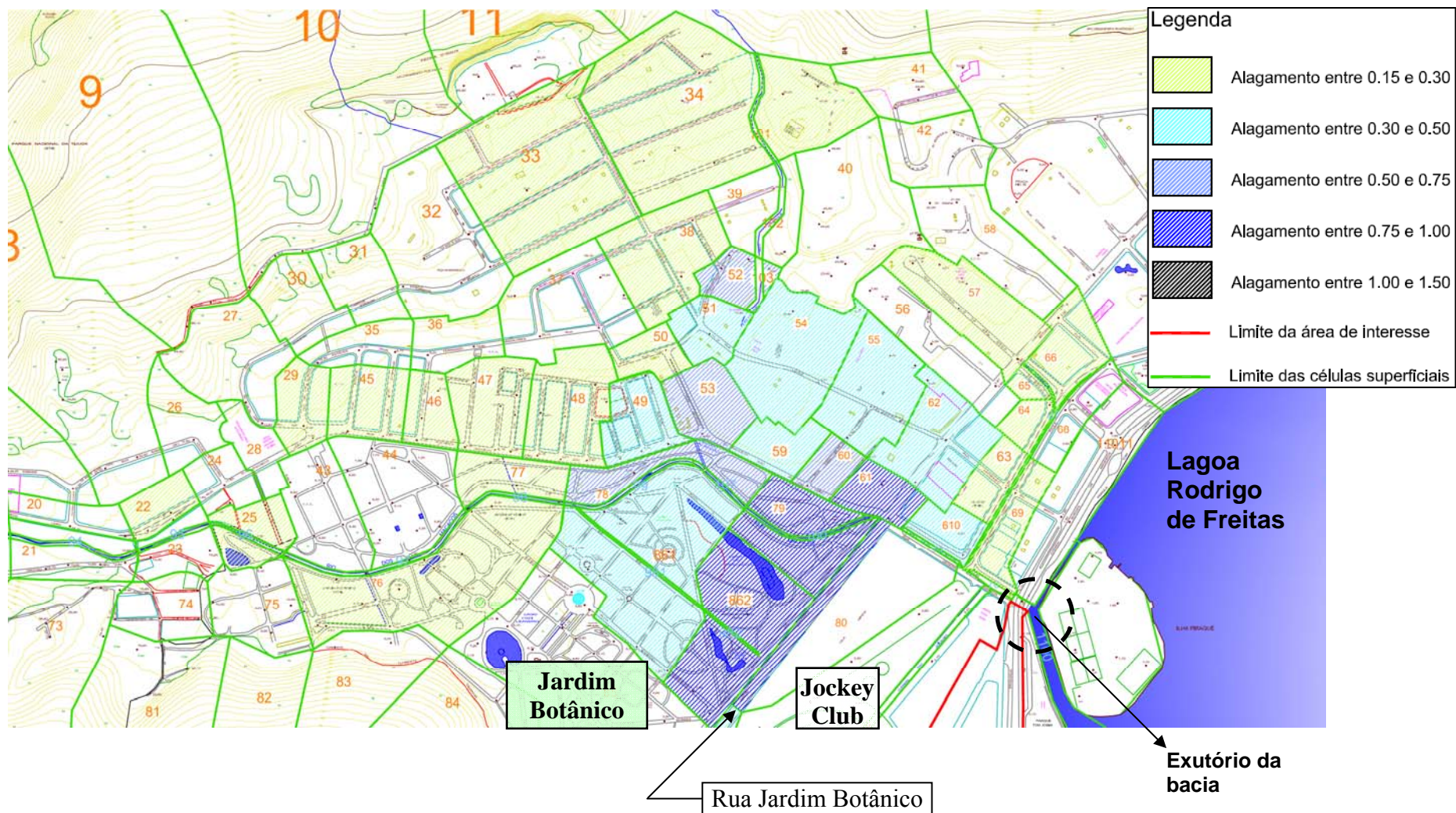


Figura 48: mancha de inundação da situação atual com foco na região mais crítica da bacia, para fins comparativos com os demais cenários.

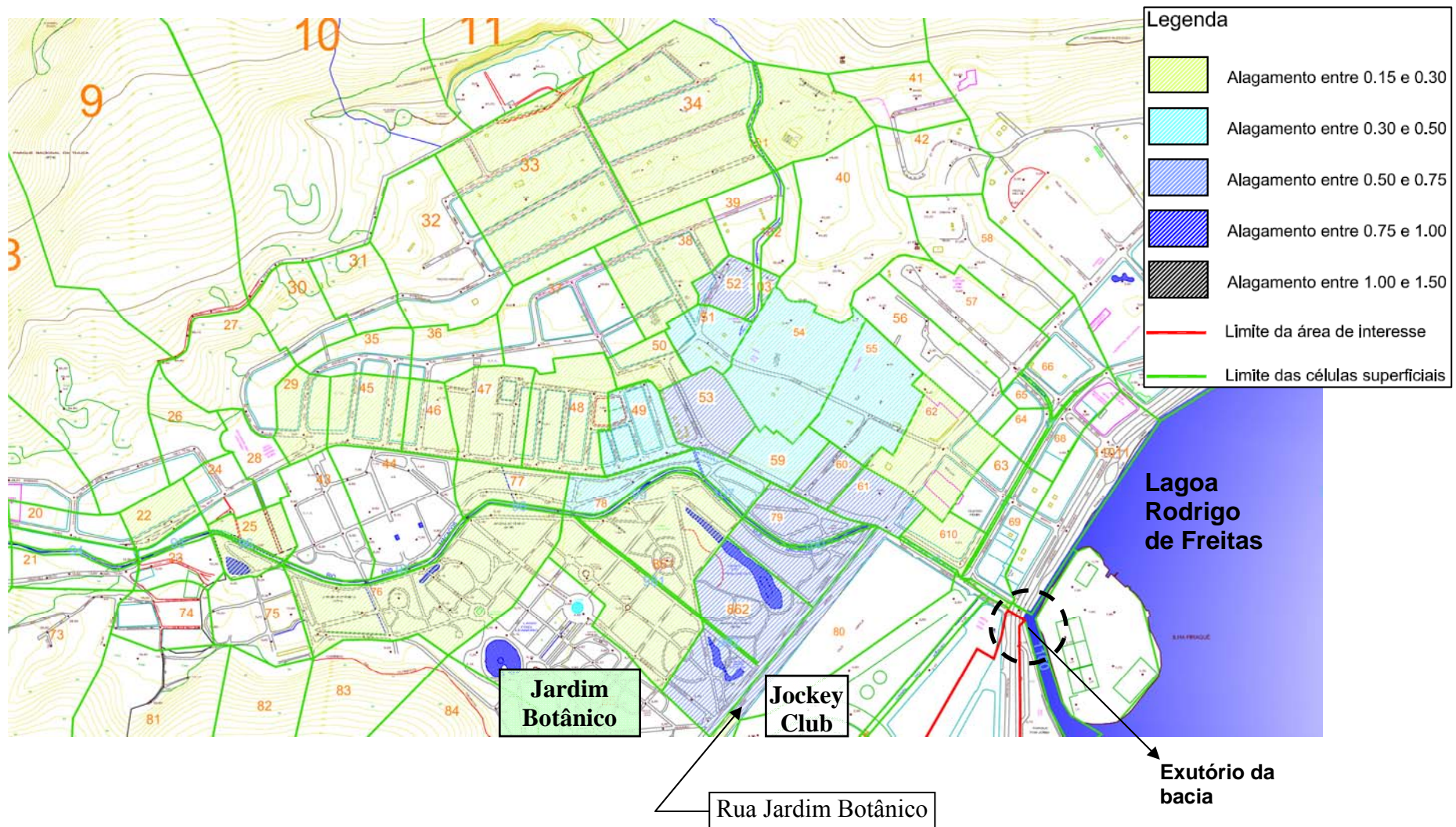
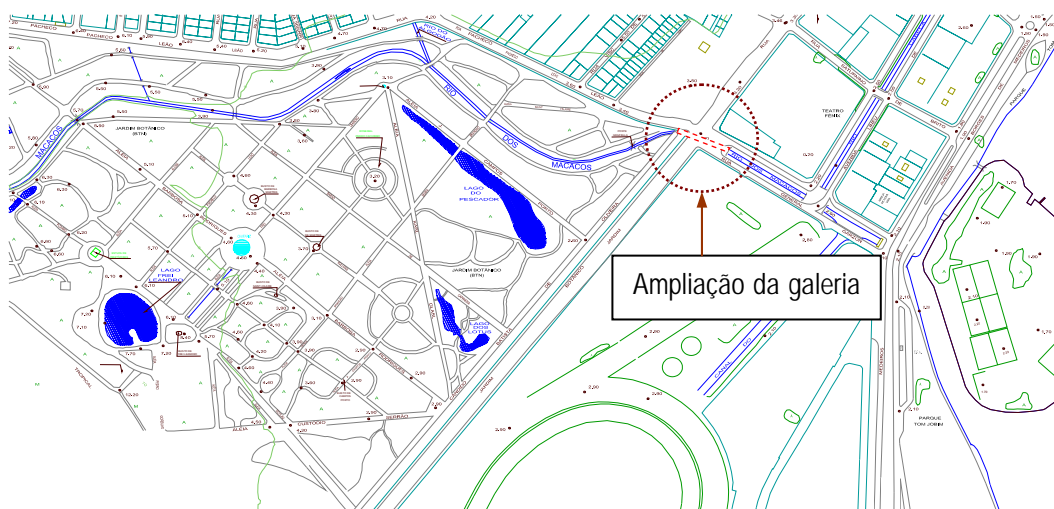


Figura 49: Mancha de alagamentos para a situação de implantação do projeto de recuperação da Lagoa Rodrigo de Freitas.

## 9.2) Complementação das Obras Propostas com a Correção da Galeria do Rio dos Macacos a Montante do Canal da rua General Garzón

Considerando a situação obtida no cenário mostrado no item 9.1, discute-se agora a possibilidade de complementar o projeto proposto, sob o ponto de vista de minimização de cheias e adequação do sistema de drenagem do rio dos Macacos, extrapolando a proposta original de recuperação da Lagoa Rodrigo de Freitas. O objetivo desta proposta de complementação vai ao encontro da confirmação da hipótese de que o projeto de recuperação da Lagoa pode contribuir e eficazmente fazer parte da solução do problema de alagamentos na região do Jardim Botânico.

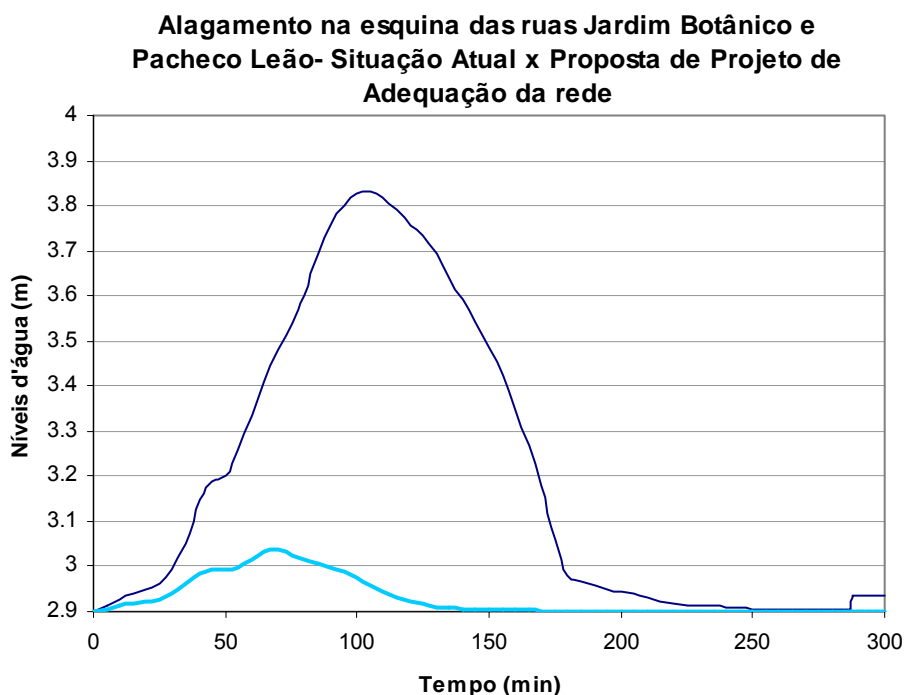
Como primeira abordagem, tendo em vista a notória insuficiência da rede no seu trecho final, propõe-se considerar como obra complementar a ampliação da galeria do rio dos Macacos sob o cruzamento das ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão. Esta ampliação aqui proposta visa aumentar a galeria local para as mesmas dimensões do canal na rua General Garzón, com largura de 6,5m e altura de 2,4m. A figura 49 indica o trecho de galeria a ser corrigido. Destaca-se que obras de canalização e/ou ampliação de galerias são medidas que tendem a transferir problemas de cheias. Entretanto, nesta situação, a conjugação de medidas tradicionais de canalização com as medidas de recuperação da Lagoa, que tendem a reduzir os níveis d'água desta, permite evitar este tipo de problema



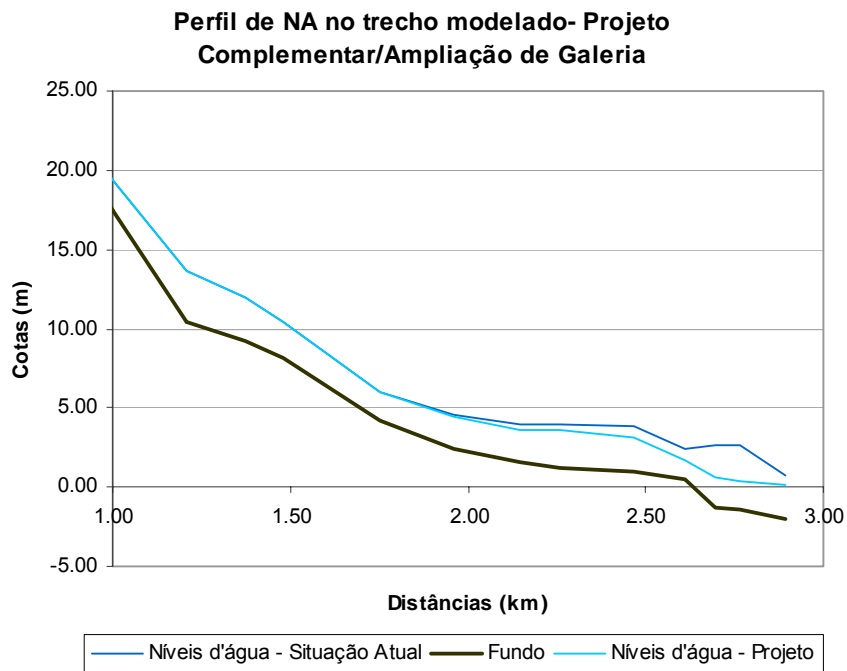
**Figura 50: Indicação do trecho crítico da galeria do rio dos Macacos.**



Esta configuração de projeto, complementando as obras de recuperação da Lagoa, reduz os alagamentos na rua Jardim Botânico, na esquina com a Pacheco Leão, em 85%, deixando apenas alagamentos que podem ser considerados residuais, para todos os fins práticos. Este cenário foi simulado considerando também uma triplicação do número de bocas de lobo na região próxima da ampliação, de modo a potencializar a captação superficial pela micro-drenagem local. O gráfico que mostra esta redução aparece na figura 50. O efeito desta obra sobre o perfil de níveis d'água do rio é mostrado na figura 51. Agora, nesta nova configuração, percebe-se o efeito da redução de níveis se propagando para montante da galeria. A figura 52 mostra, por sua vez, o efeito sobre as vazões do rio dos Macacos, na região de sua foz. Por fim, para completar a observação dos resultados obtidos com a ampliação das seções transversais da galeria tratada no trecho final do rio dos Macacos, a figura 53 mostra o mapa de alagamentos para este cenário complementar.

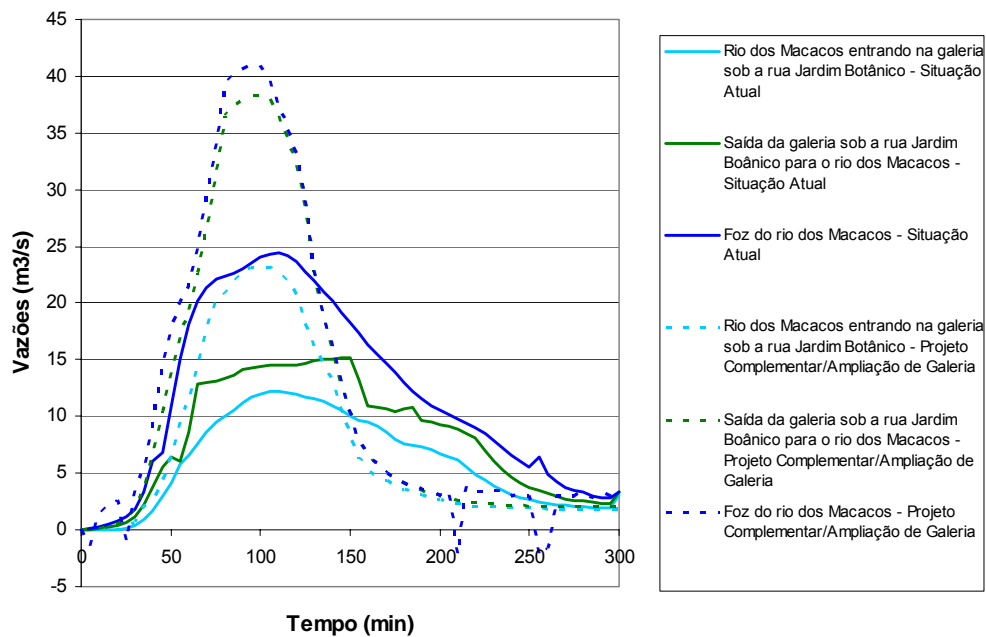


**Figura 51: Comparação de alagamentos na esquina das ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão, considerando o projeto de recuperação da Lagoa, complementado por uma ampliação da rede em seu trecho final, em relação à situação atual.**



**Figura 52: envoltória máxima do perfil de linha d'água no trecho médio-baixo do rio dos Macacos – cenário complementar com ampliação de galeria.**

#### Vazões no trecho final do rio dos Macacos até sua foz



**Figura 53: Comparação de vazões no trecho final do rio dos Macacos - situação atual x cenário com obras complementares de ampliação da rede de drenagem.**

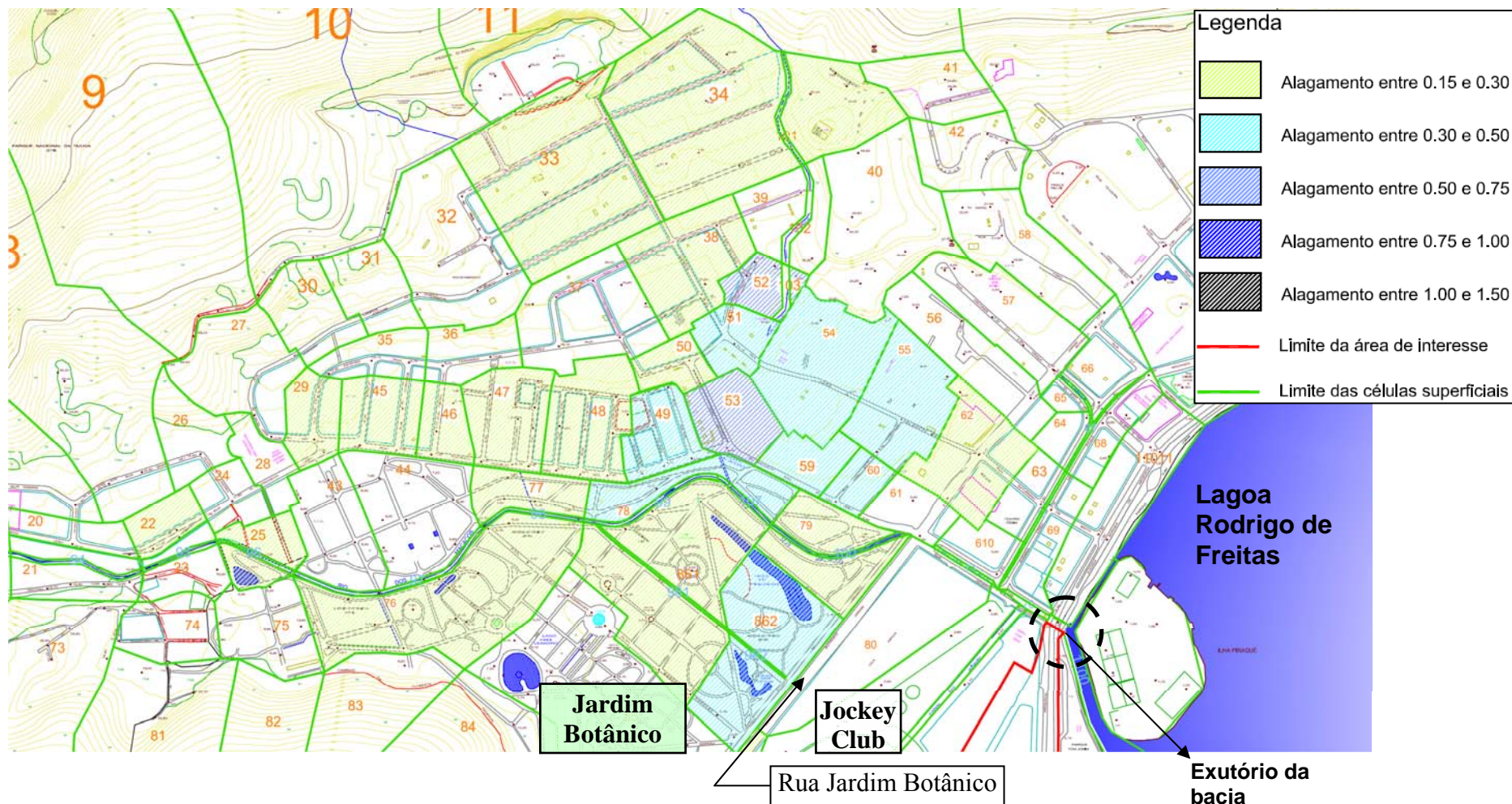
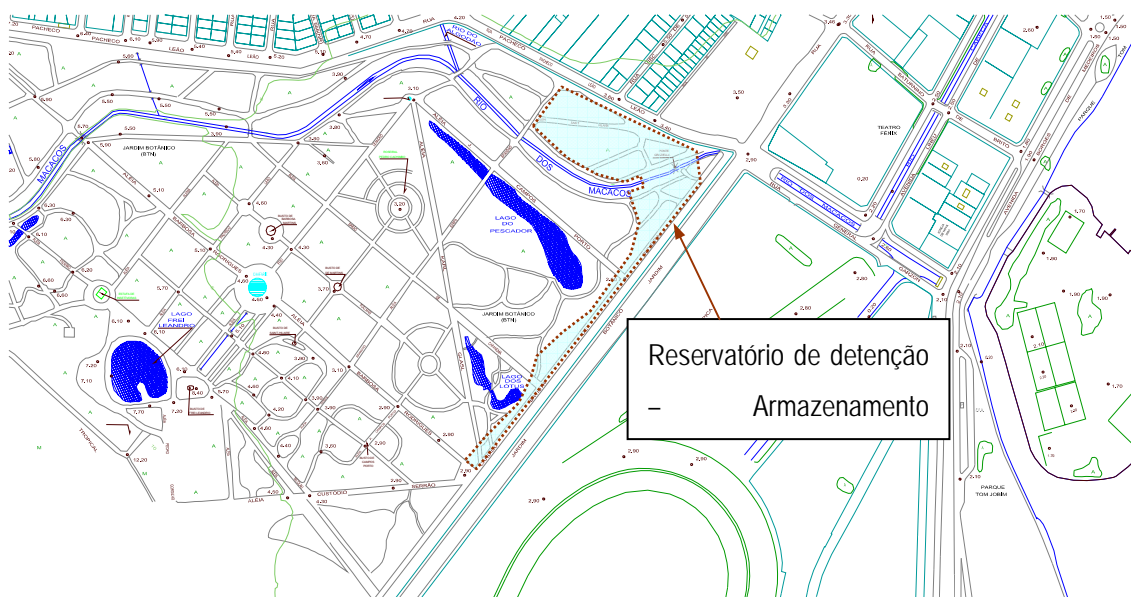


Figura 54: Mancha de alagamentos para a situação de implantação do projeto de recuperação da Lagoa Rodrigo de Freitas, com ampliação da galeria do rio dos Macacos sob a rua Jardim Botânico, esquina com rua Pacheco Leão.

### 9.3) Complementação das Obras Propostas com a Implantação de um Reservatório de Detenção no Jardim Botânico

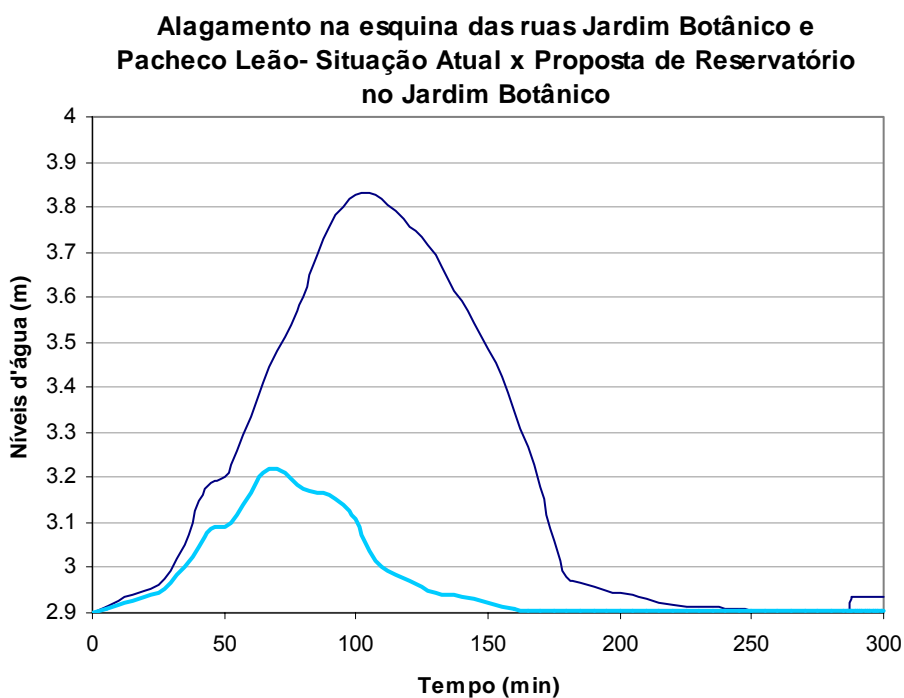
Alternativamente, mas também de forma complementar ao projeto de recuperação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas e atendendo a conceitos mais modernos de drenagem sustentável, propõe-se considerar a implantação de um reservatório de retenção no Jardim Botânico, junto à margem esquerda do rio dos Macacos e ao passeio que corre ao longo da entrada do parque, totalizando uma área de cerca de 20.000 m<sup>2</sup> e um volume de cerca de 30.000 m<sup>3</sup>. A figura 54 mostra esquematicamente as áreas para implantação do reservatório. Este reservatório, em princípio, está sendo proposto como ponto de partida para a discussão do conceito envolvido e não necessariamente como configuração final a ser adotada. De fato, seria recomendável a procura por locais de armazenagem distribuídos, com as menores interferências possíveis.



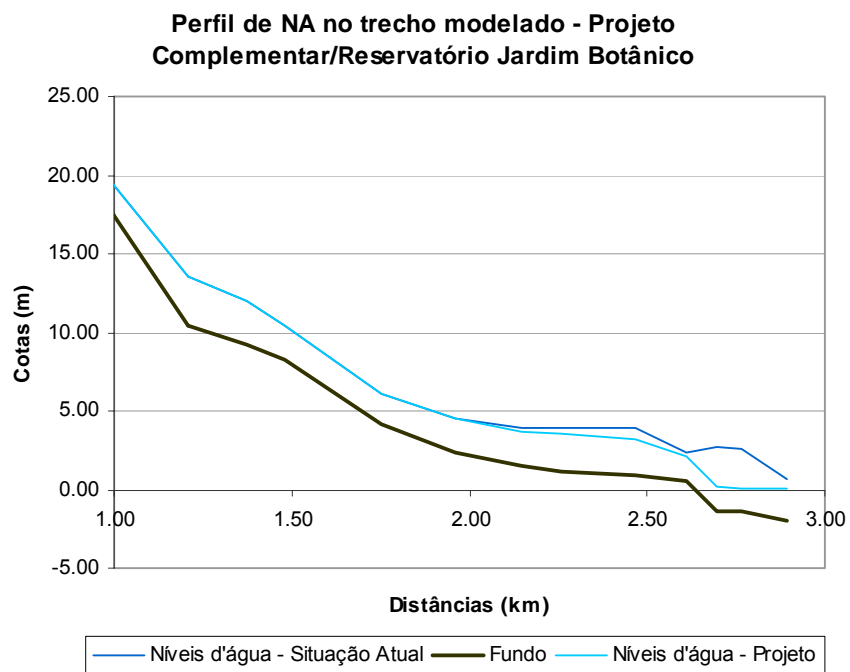
**Figura 55: Indicação das áreas de armazenagem temporárias no Jardim Botânico, como proposta complementar ao projeto de recuperação ambiental da Lagoa.**

Esta configuração complementar de projeto, somando-se às obras de recuperação da Lagoa, reduz os alagamentos na rua Jardim Botânico, na esquina com a rua Pacheco Leão, em cerca de 66%, deixando pequenos alagamentos, mas em situação que pode ser considerada como aceitável, embora no limite extremo, gerando ainda interferência sobre o tráfego na região. O gráfico que mostra esta redução aparece na figura 55. O efeito desta obra sobre o perfil de níveis d'água do rio é

mostrado na figura 56, também sendo perceptível o efeito da redução de níveis se propagando para montante da região crítica. A figura 57 mostra o efeito sobre as vazões do rio dos Macacos, na região de sua foz. Por fim, a figura 58 mostra o mapa de alagamentos para este cenário complementar.

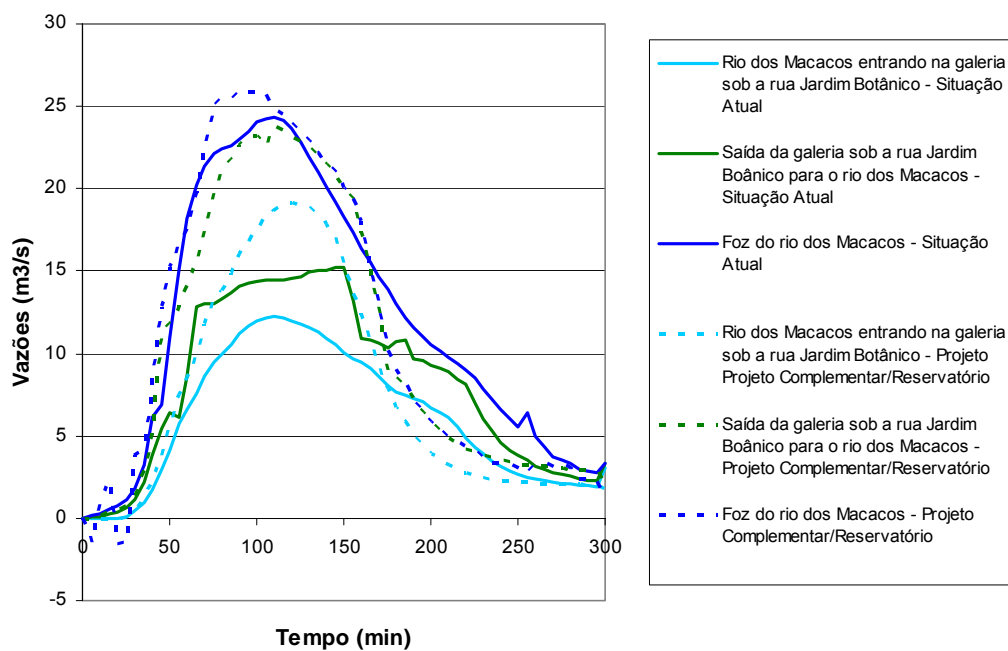


**Figura 56: Comparação de alagamentos na esquina das ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão, considerando o projeto de recuperação da Lagoa, complementado por um reservatório no Jardim Botânico, em relação à situação atual.**



**Figura 57: envoltória máxima do perfil de linha d'água no trecho médio-baixo do rio dos Macacos – cenário complementar com reservatório no Jardim Botânico.**

**Vazões no trecho final do rio dos Macacos até sua foz**



**Figura 58: Comparação de vazões no trecho final do rio dos Macacos - situação atual x cenário com complemento de reservatório de detenção.**

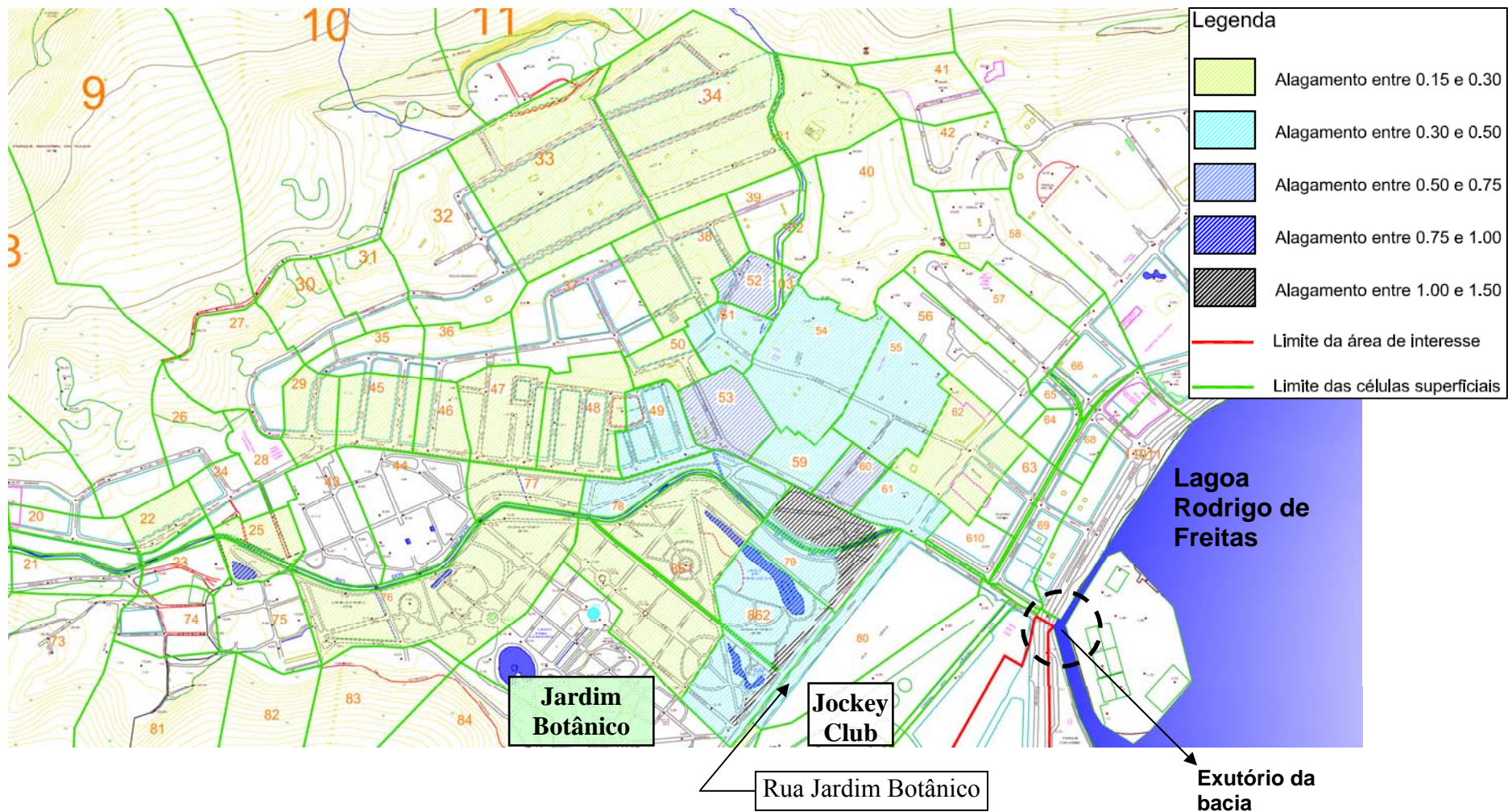


Figura 59: Mancha de alagamentos para a situação de implantação do projeto de recuperação da Lagoa Rodrigo de Freitas, com implantação de reservatório de detenção no Jardim Botânico.

## **10) Avaliação da disponibilidade hidráulica da calha do Rio dos Macacos em seu exutório, considerando elevações do nível do mar**

É considerado nesta análise o cenário referente às obras no âmbito do Projeto de Recuperação Ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas e toda a discussão inicial sobre as mudanças climáticas. Propõe-se que o sistema de drenagem da bacia em estudo seja submetido aos mesmos cenários de elevação eustática do nível do mar adotados no seminário “Rio Próximos 100 Anos – O Aquecimento Global e a Cidade”, quais sejam, os acréscimos de 0,40m, 0,60m e 1,00 m. Devido ao alto grau de imprecisão inerente à previsão de futuras marés meteorológicas e de futuras precipitações totais, estas possíveis mudanças climáticas não foram adotadas nestes cenários.

Para efeito da modelação matemática, estas elevações foram aplicadas, em cada cenário, à condição de contorno adotada para a célula representativa do mar, de forma a viabilizar os efeitos hidrodinâmicos da maré mais alta sobre o exutório do sistema drenante.

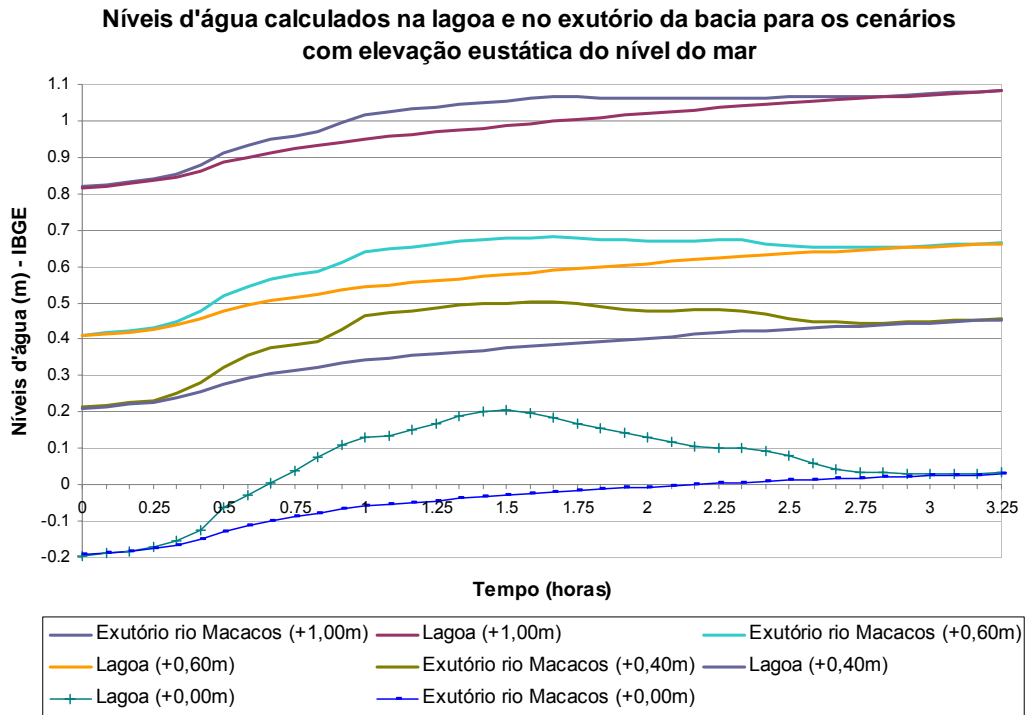
Como os efeitos negativos das marés majoradas perdem sua importância à montante da bacia, foi escolhido como critério de análise destes impactos a perda de condutância de uma seção de escoamento, localizada próxima ao exutório do rio dos Macacos, nos cenários modelados com elevação eustática da maré em relação ao cenário de obras, modelado com a maré atual. Dessa maneira pretende-se evidenciar a menor disponibilidade hidráulica da calha do Rio dos Macacos frente aos escoamentos gerados pela sua bacia hidrográfica.

Foi escolhida a condutância como o fator para a realização das comparações entre cenários, pois representa a capacidade da calha fluvial transportar uma dada vazão para uma certa perda de carga. Ressalta-se que a condutância depende somente de dois fatores: da rugosidade do fundo e da forma geométrica da seção, sendo independente da declividade da linha d'água, que se apresenta variável ao longo dos cenários modelados e que dificultaria a análise pretendida.

Nas figuras 59 e 60, encontram-se os gráficos comparativos dos resultados dos níveis d'água, no exutório da bacia e na Lagoa Rodrigo de Freitas junto ao mesmo exutório, e das vazões no exutório da bacia do rio dos Macacos, respectivamente, obtidos nos três cenários modelados com elevação eustática do nível do mar e no cenário com a maré atual.

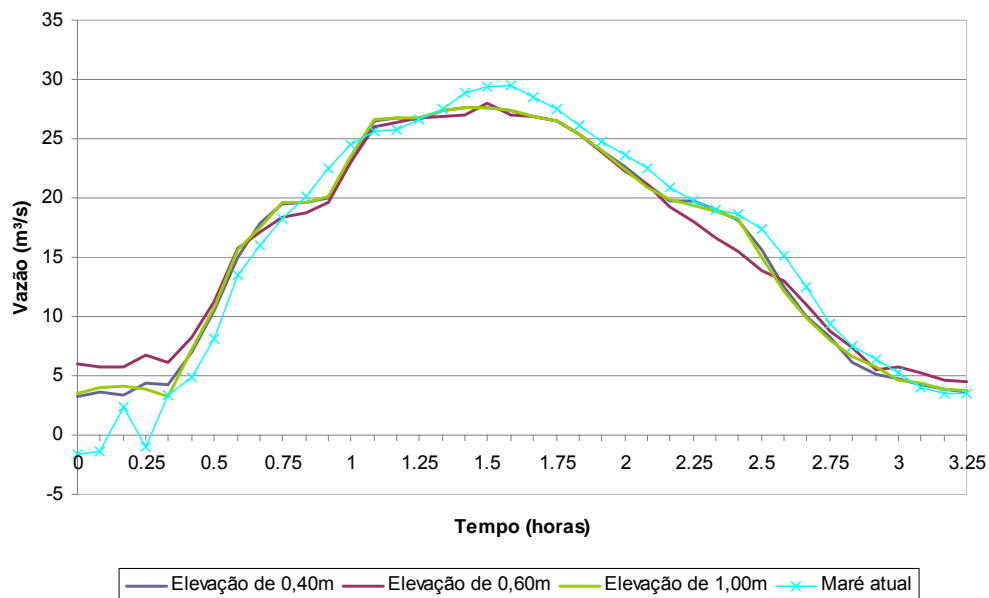


Nota-se, pela figura 59, que o tirante hidráulico no exutório da bacia torna-se cada vez menor, de forma não linear, à medida que se caminha para um cenário com restrições hidráulicas maiores e se observa o efeito de remanso provocado neste local, devido às elevações eustáticas do mar, através dos níveis d'água calculados.



**Figura 60:** gráfico comparativo do níveis d'água calculados na lagoa e no exutório da bacia

**Vazões calculadas no exutório da bacia do rio dos Macacos considerando os cenários com elevação eustática do nível do mar**



**Figura 61: gráfico comparativo das vazões calculadas no exutório da bacia para a lagoa**

Conclui-se da figura 60 que, apesar de ter sido constatada uma perda gradativa na magnitude do tirante hidráulico através dos cenários modelados, esta perda é praticamente compensada pelo ganho de área molhada da seção de escoamento, advinda do efeito de remanso no exutório do rio dos Macacos. Ressalte-se também a natureza não linear desta compensação hidráulica, haja vista a diferença entre as vazões do cenário com maré atual e as dos cenários com elevações eustáticas dos níveis do mar e a diferença entre as vazões dos cenários com elevações eustáticas dos níveis da maré.

Utilizando o critério de análise adotado, construíram-se duas tabelas comparativas (tabelas 4 e 5) entre os cenários modelados que evidencia a perda na capacidade de condução da calha do rio dos Macacos devido aos possíveis aumentos eustáticos do nível do mar.

**Tabela 4: Resumo das condutâncias da calha em cada cenário e o cálculo da utilização da calha**

<b>Geometria da Seção</b>					
Largura = 6.5 m		Cota de Fundo (IBGE) = -1.9 m			
Altura Total = 4.40 m		Área Transversal seção plena = 28.6 m <sup>2</sup>			
Perímetro Molhado seção plena = 15.3m		Raio hidráulico seção plena = 1.87m			
Coeficiente de Manning = 0.03		Condutância seção plena (Kmax) = 1446.64			
<b>N.A. Máximo Calculado em cada Cenário Durante o Pico da Cheia (m)</b>		<b>Condutância (K) Relativa ao N.A. Máximo Calculado em cada Cenário Durante o Pico da Cheia (m<sup>2</sup>)</b>		<b>Utilização da Calha (K/Kmax)</b>	
<i>Elevação +0.00m</i>	0.21	<i>Elevação +0.00m</i>	538.78	<i>Elevação +0.00m</i>	37.2%
<i>Elevação +0.40m</i>	0.50	<i>Elevação +0.40m</i>	644.71	<i>Elevação +0.40m</i>	44.6%
<i>Elevação +0.60m</i>	0.68	<i>Elevação +0.60m</i>	712.25	<i>Elevação +0.60m</i>	49.2%
<i>Elevação +1.00m</i>	1.06	<i>Elevação +1.00m</i>	858.63	<i>Elevação +1.00m</i>	59.4%

**Tabela 5: resumo das perdas de capacidade de condução e dos percentuais de calha livre, em cada cenário**

Utilização da Calha (K/Kmax)		Perda de capacidade de condução em relação a capacidade original da calha [(K+Kref)/Kmax]		Percentual de calha livre	
<i>Elevação +0.00m</i>	37.2%	<i>Elevação +0.00m</i>	Kref	<i>Elevação +0.00m</i>	62.8%
<i>Elevação +0.40m</i>	44.6%	<i>Elevação +0.40m</i>	7.3%	<i>Elevação +0.40m</i>	55.4%
<i>Elevação +0.60m</i>	49.2%	<i>Elevação +0.60m</i>	12.0%	<i>Elevação +0.60m</i>	50.8%
<i>Elevação +1.00m</i>	59.4%	<i>Elevação +1.00m</i>	22.1%	<i>Elevação +1.00m</i>	40.6%

Constata-se que, à medida que venha a ocorrer o cenário de mudança climática mais catastrófica, considerando somente as elevações eustáticas do nível do mar, a perda na capacidade de condução da seção de escoamento pode chegar a 22,1%, ou seja, quando observada uma chuva com tempo de recorrência maior do que a chuva de projeto considerada (TR 20 anos), a calha do rio dos Macacos terá 22,1% a menos de área de seção livre “em espera” para receber a vazão adicional gerada pela sua bacia.

## 11) Conclusões

As obras propostas para a Lagoa Rodrigo de Freitas, considerando a abertura da comporta da rua General Garzón, o fechamento do canal do Jóquei, também através de comportas, evitando o aporte da cheia do rio Rainha, e a implantação de um sifão invertido no canal do Jardim de Alá, permitindo uma comunicação contínua entre lagoa e mar, mostraram resultados muito positivos sob a ótica da drenagem urbana. O efeito observado no canal do rio dos Macacos, na rua General Garzón, mostra uma significativa redução dos níveis de alagamento, mesmo no pico da cheia, abrindo espaço no canal para receber maiores vazões do sistema. A simples implementação das obras de recuperação ambiental da Lagoa geram uma redução de cerca de 38% nos níveis de cheia no principal ponto de controle da bacia, situado na esquina das ruas Jardim Botânico e Pacheco Leão.

Cenários complementares de análise mostram que a implantação de uma galeria maior no trecho final do rio dos Macacos, sob a rua Jardim Botânico, praticamente eliminaria os alagamentos na região, sobrando uma lâmina residual associada à própria passagem da cheia. Outra possibilidade considerada, referente à implantação de um reservatório de detenção, em princípio proposto para o próprio parque do Jardim Botânico, mostra também eficácia no controle de cheias, com reduções de níveis d'água de quase 66%. Estes cenários complementares se propõem a ilustrar as possibilidades de controle de cheia que se abrem a partir da melhoria da capacidade de descarga da foz do sistema. Ambas as propostas demandam detalhamento e a questão de um reservatório no Jardim Botânico demandaria certamente, discussão complementar, em função da importância do parque. Além disso, outras possibilidades de detenção poderiam ser abordadas, com a proposição de reservatórios menores, distribuídos nas vertentes de encostas, nas áreas ainda desocupadas, de modo a suprir a mesma capacidade de amortecimento.

Desta forma, observando o conjunto de cenários modelados, percebe-se que as obras de recuperação ambiental propostas para a Lagoa têm efeito positivo também sobre o sistema de drenagem urbano da bacia do rio dos Macacos, abrindo portas para ações complementares mais eficazes no controle de cheias.

Através do estudo de possíveis configurações futuras de elevação do nível do mar, pôde-se constatar que, nos cenários considerados, a calha fluvial do rio dos Macacos poderá sofrer perdas significativas da sua capacidade de condução dos escoamentos superficiais gerados pela sua bacia hidrográfica, evidenciando, pois, a necessidade de se considerar os

fatores advindos de futuras mudanças climáticas em projetos de drenagem com grande vida útil.

Recomenda-se que, à medida que as previsões se tornem mais precisas, sejam analisados outros impactos decorrentes das mudanças climáticas, tais como:

- chuvas mais intensas e freqüentes;
- marés meteorológicas mais intensas e freqüentes;
- em caso de projetos localados na linha costeira, deve-se levar em consideração o novo regime dos ventos levando a maiores alturas de ondas na zona de arrebentação e mudanças na hidrodinâmica das correntes marítimas;
- o aumento do nível do lençol freático;
- o aumento da intrusão salina em regiões estuarinas;
- saturação urbana e desmatamento de encostas devido ao êxodo das regiões costeiras etc.

Para que tais previsões mais precisas sejam de fato alcançadas, recomenda-se também que os entes federativos se mobilizem no sentido de fomentar pesquisas e iniciativas voltadas para o entendimento dos impactos gerados pelas mudanças climáticas sobre os diversos aspectos intervenientes na vida dos cidadãos brasileiros e, principalmente, que viabilizem o mais rápido possível o início de uma campanha de monitoramento, de caráter permanente, de diversos fatores ambientais, tais como o comportamento do nível do mar, os regimes de ventos e precipitações etc. Somente dessa forma o país será capaz de minimizar o atual grau de vulnerabilidade em que se encontra frente aos cenários de mudança climática.

Finalmente, pode-se dizer que o projeto alcançou seus objetivos principais, realizando a análise de um projeto de drenagem atual, ainda em fase de implantação e desenvolvimento, com grande importância ambiental e para a cidade como um todo, por envolver a Lagoa Rodrigo de Freitas, um dos pontos turísticos mais notáveis do Rio de Janeiro, rodeada por importante infra-estrutura viária, áreas de lazer, bairros nobres, e detentora de um ecossistema já muito degradado. Além disso, o projeto foi capaz de evidenciar a atual necessidade de se inserir fatores relativos às futuras mudanças climáticas globais em projetos infra-estruturais de drenagem urbana de grande vida útil, não só na cidade do Rio de Janeiro, como também em qualquer cidade brasileira locada na linha costeira.

## Referências Bibliográficas

1. BUTLER, David; DAVIES, John W., **Urban Drainage**, Spon Press, 2ª edição, Nova York, NY, EUA, 2004.
2. PROJETO PLANAGUA - SEMADS/GTZ, **Enchentes no Estado do Rio de Janeiro - Uma abordagem geral**, Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – Estado do Rio de Janeiro, Agosto/ 2001.
3. ZAMPRONIO, Gustavo B., **Avaliação do Desempenho de Algumas Medidas de Controle de Cheias na Bacia do Rio dos Macacos**, projeto final de curso em engenharia civil, Escola Politécnica, DRHIMA/ UFRJ, RJ, 2007.
4. BOAS, M.D.V, **Paisagens Multifuncionais: Conceito e Aplicação aos Programas Urbanísticos da Cidade do Rio de Janeiro como Medida de Controle de Cheias Urbanas**. projeto final de curso em engenharia civil, Escola Politécnica, DRHIMA/ UFRJ, RJ, 2005.
5. MIGUEZ, M.G., **Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas**. Tese de doutorado em Eng. Civil, COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro/ RJ, Brasil, 2001.
6. TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.LA LAINA; BARROS, M.T. DE, **Drenagem Urbana**. ABRH, Editora da Universidade/ UFRGS, Porto Alegre – RS, 1995.
7. MIGUEZ, M.G.; MASCARENHAS, F.C.B.; PRODANOFF, J.H.A.; MAGALHÃES, L.P.C.; BOAS, M.D.V; ARAÚJO, F.F., **Paisagens Multifuncionais – concepções alternativas para controle de cheias urbanas**, artigo publicado no Encontro Nacional de Águas Urbanas (ENAU), 2007.
8. CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos), **Mudança do Clima no Brasil: vulnerabilidades, impactos e adaptação**, Revista Parcerias Estratégicas, n°27, edição especial; Centro de Gestão e Estudos estratégicos, Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, dezembro de 2008.
9. PARRY, M.L.; CANZIANI, O.F.; PALUTIKOF, J.P.; VAN DER LINDEN, P.J. e HANSON, C.E., (editores), **IPCC 2007: Climate change 2007: Impacts, Adaptation and vulnerability. Contributions of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 976pp., 2007.
10. SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; e MILLER, H.I., (editores), **IPCC 2007: Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contributions of Working Group I to the**

**Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 996pp., 2007.

11. GUSMÃO, P.P.; CARMO, P.S.; e VIANNA, S.B., **Rio Próximos 100 anos – O Aquecimento Global e a Cidade**, Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos – IPP/ SMU – Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
12. TUCCI, C. E. M., **Hidrologia – Ciência e Aplicação**, Terceira Edição. ABRH / UFRGS Editora, Porto Alegre, 2004.
13. MAGALHÃES, L. P. C., MAGALHÃES, P. C., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G., COLONESE, B. L., BASTOS, E. T., **Sistema Hidro-Flu para Apoio a Projetos de Drenagem**, XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, João Pessoa, 2005.
14. CHOW, V. T., **Open Channel Hydraulics**, International Student Edition. McGraw-Hill, New York, 1955.
15. DE BONIS, A. **Gestão Ambiental de Drenagem Urbana no Município do Rio de Janeiro: Apresentação do Caso do Rio dos Macacos**. Tese de Mestrado, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
16. URBAN MODIFICATION OF RAINFALL – new perspectives from TRMM. Disponível em: <http://rsd.gsfc.nasa.gov/912/urban/> - Acesso em 10/ 06/ 2010;
17. INTERGOVERNMENTAL PAINEL ON CLIMATE CHANGE. Disponível em: <http://www.ipcc.ch> – Acesso em 07/ 06/ 2010;
18. GRUPO EBX. Disponível em: <http://www.ebx.com.br> – Acesso em 09/06/2010;
19. PROJETO AMBIENTAL LAGOA LIMPA – uma nova Lagoa para o Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.lagoalimpa.com.br/default.aspx> - Acesso em 10/ 06/ 2010;
20. ECOLATINA – consultora en economia y empresas. Disponível em: <http://www.ecolatina.com> – Acesso em 09/ 06/ 2010
21. JARDIM BOTÂNICO. História do Bairro – Jardim Botânico. Disponível em: <http://www.marcellio.com/rio/enjarbot.html>. - Acesso em 05/ 06/ 2010.
22. TAC DA LAGOA RODRIGO DE FREITAS. Disponível em: <http://www.cedae.com.br/raiz/002018.asp> - Acesso em 11/ 06/ 2010.
23. FORUM POLITICS. Disponível em: <http://www.forumpolitics.com> - Acesso em 09/06/2010.
24. MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Disponível em: <http://www.millenniumassessment.org/> - Acesso em 17/06/2010



## *ANEXOS*

**Anexo 1 – MODCEL**

## *Histórico de Desenvolvimento do Modelo de Células de Escoamento - MODCEL*

### *Experiências Internacionais – Bases do Desenvolvimento*

Na década de 1960, foi proposto e construído o primeiro modelo matemático bidimensional relevante. Este modelo foi construído para o delta do rio Mekong pela Société Grenobleise d'Etudes et Applications Hydrauliques (SOGREAH), a pedido da UNESCO. Os trabalhos iniciados em 1962 tiveram que ser interrompidos em 1967, devido à guerra do Vietnã, e Zanobetti e Lorgeré apresentaram este modelo em artigo na revista *La Houille Blanche* (1968). O modelo desenvolvido tinha por princípio a divisão da bacia do rio em células de armazenamento, que representavam trechos de rio e de planície. Em linhas gerais, este modelo reproduzia a área alagada de todo o delta, considerando as cheias naturais e as cheias modificadas pela construção de uma barragem, que atenuaria as mesmas e ainda favoreceria a regularização do rio, para a navegação e a irrigação, na época da estiagem. A área da modelação, para esse estudo do delta do rio Mekong, abrangeu cerca de cinqüenta mil quilômetros quadrados e esta região era habitada por cerca de dez milhões de cambojanos e vietnamitas. Os termos de inércia não eram considerados na equação dinâmica, na representação das grandes áreas alagáveis, que eram representadas por células de escoamento, moldadas ao terreno conforme regência da topografia local, formando uma grande malha bidimensional de escoamento, utilizando-se relações de descarga unidimensionais.

Outras aplicações deste tipo de modelação, a partir desta data, podem ser encontradas no estudo dos seguintes casos: pantanal de Mopipi (HUTCHISON E MIDGLEY, 1973); bacia do rio Mono (CUNGE, 1975); bacia do rio Senegal (CUNGE, 1975; CUNGE, HOLLY E VERWEY, 1980); rio Mfolozi/Estuário Santa Lúcia (WEISS E MIDGLEY, 1978); bacia superior do rio Rhône (CUNGE, HOLLY E VERWEY, 1980); bacia do rio Paraná em Yacyreta/Apipe (MAJOR, LARA, CUNGE, 1985).

Em 1990, um modelo matemático de células de escoamento, de concepção diferente do modelo desenvolvido para o Delta do Mekong, foi desenvolvido para simulação de pesadas cheias em vastas áreas de topografia complexa, por Gallatti, Braschi, Fillipo e Rossi. Este modelo foi desenvolvido com o objetivo principal de abordar o problema da avaliação de pesadas cheias, especialmente as causadas por ruptura de barragem. Neste caso, as características da planície de inundação são, em geral, muito diferentes nas proximidades da barragem rompida e longe desta. Na região próxima da barragem, de escala típica do comprimento de ruptura, o escoamento é essencialmente dominado por efeitos de inércia: ele pode tornar-se supercrítico e depois reverter para a típica condição subcrítica, através de um ressalto móvel com formação de onda de choque. Por outro lado, em uma região distante da barragem, caracterizada pelas escalas típicas da planície, a topografia do terreno, a sua rugosidade, a presença de diques, entre outros, são os fatores mais importantes na determinação das características de escoamento. Nessa região admite-se que eventuais ondas de choques tenham sofrido dissipação.

Neste modelo, a planície de inundação era aproximada por um sistema de células retangulares não homogêneas e contíguas, para simulação da chamada região distante, sobre as quais o nível d'água e a cota do fundo são identificados pelo valor do centróide e considerados para toda a célula. A descrição matemática do escoamento baseou-se nas equações de águas rasas, desprezando-se o termo referente à variação da carga cinética

no espaço, na equação dinâmica. O problema diferencial, então hiperbólico, permite o desenvolvimento das equações deste modelo de modo que todos os termos do sistema são função do nível d'água, tal como no modelo de Zanobetti e Lorgeré.

### *Experiências no Brasil – Modelo MODCEL*

O conceito de modelação por células encontrou par, no Brasil, na Tese de Mestrado defendida por Miguez (MIGUEZ E MASCARENHAS, 1994), com aplicação ao Pantanal Mato-Grossense, também uma grande planície rural alagável. Em seguida, a partir de 1996, Miguez e Mascarenhas resgataram este trabalho, adaptando os conceitos envolvidos na modelação por células para aplicação a uma bacia urbana, modificando o foco inicial do modelo, buscando a adaptação do modelo de células ao contexto urbano, ou seja, verificando o comportamento do modelo em termos de pertinência de representação do escoamento sobre o espaço de uma cidade. Este novo estudo visava complementar o modelo inicialmente construído, procurando contemplar o máximo possível da diversidade apresentada em um movimento de cheia em uma área urbana, dando maior consistência matemática e física ao modelo proposto, a fim de tornar maior a sua confiabilidade e capacidade de representação da situação real.

O modelo de células modificado para aplicação urbana foi utilizado para representar os padrões de escoamento tendo como área de estudo a cidade de Joinville, em Santa Catarina, no sul do Brasil, em um projeto coordenado pelo professor pesquisador Rui Carlos Vieira da Silva (COPPETEC ET150693), contratado junto à Universidade Federal do Rio de Janeiro, que pretendia verificar a funcionalidade de medidas estruturais propostas pela Prefeitura Municipal, com vistas à obtenção de financiamento do Banco Mundial. Os resultados atingidos foram considerados qualitativamente satisfatórios, demonstrando o acerto de se utilizar esta concepção de modelagem para a verificação do padrão de escoamento de cheias em planícies urbanas.

Posteriormente, a partir de 1998, uma nova versão do modelo de células foi construída com a finalidade de realizar novas implementações de conceitos físicos, visando incrementar, uma vez mais, o seu grau de representatividade para as cheias urbanas, definindo-se novos tipos de células e de ligações. O modelo mostrou-se sempre versátil para a implementação de novos tipos de células e de ligações, permitindo incrementar a sua capacidade de representação em um processo continuado. Esta nova versão do modelo de células foi aplicada na bacia do Canal do Mangue, na cidade do Rio de Janeiro/RJ, em um projeto de atenuação de enchentes desenvolvido pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, com acompanhamento da Fundação Rio-Águas, órgão da Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro (COPPETEC ET500090).

Em 2001, foi defendida a tese de Doutorado de Miguez, orientada pelos professores Flávio Cesar Borba Mascarenhas e Rui Carlos Vieira da Silva, consolidando uma versão avançada do modelo de células para bacias urbanas, que, posteriormente obteve registro de obra intelectual junto ao CONFEA, sob nº 1463.

Ainda em aplicações na bacia do Canal do Mangue, em particular, realizaram-se estudos sobre o funcionamento hidráulico de galeria de drenagem do projeto Rio-Cidade para a rua Haddock Lobo, no bairro da Tijuca; o funcionamento de um reservatório temporário de acumulação no parque Recanto do Trovador; o efeito da implantação de soleiras ao longo do trecho alto do rio Maracanã; a simulação de reservatórios em lote no bairro do Grajaú; o efeito da incorporação de lixo e resíduos sólidos ao escoamento,

interferindo na capacidade de vazão dos dispositivos de descarga de modo dinâmico, durante a passagem da cheia; a incorporação de rotinas hidrológicas básicas como opção para a transformação de chuva em vazão, no interior de cada célula.

Em agosto de 2002, foi concluído o estudo META 21 - Programa CT-Hidro/FINEP 2001 (no 3459), Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), para um estudo preliminar de cheias na cidade de Volta Redonda.

Em junho de 2003 encerrou-se um estudo de desenvolvimento de modelos para previsão de vazões nas bacias dos rios Manso e Cuiabá (MT) após a implantação do Aproveitamento Hidrelétrico de Manso, em um convênio entre Furnas Centrais Elétricas S.A. e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (PEC-2685), sob coordenação do Professor José Paulo Soares de Azevedo, mesclando uma aplicação rural em larga escala com a avaliação de enchentes sobre a cidade de Cuiabá.

Foram estudados também problemas de enchentes na Baixada Fluminense, em áreas de polders marginais ao rio Sarapuí (PEC-3850 e PEC-5088), ambos sob coordenação do professor Flávio Cesar Borba Mascarenhas, bem como na Baixada do rio Macaé (PEC-5414), este sob coordenação do professor Paulo Canedo de Magalhães..

Em outubro de 2004 encerrou-se o Projeto FINEP CT-Hidro/GBH (no 520093/2003-8), 2002, intitulado "Modelagem Matemática de Cheias Urbanas, Através de Células de Escoamento, como Ferramenta na Concepção de Projetos Integrados de Combates Enchentes", com aplicação para a bacia do rio Joana, sob coordenação do proponente (Marcelo Gomes Miguez).

Entre fins de 2006 e fins de 2007, o Modelo de Células MODCEL foi utilizado em dois projetos contratados pela Sub-Secretária de Águas do Município do Rio de Janeiro, a saber: Projeto POLI- 8488, Estudos Integrados para Avaliação de Projeto de Intervenção na Calha do Rio Acari/RJ, e projeto POLI 8498, Estudo para Recuperação Ambiental e Controle Integrado de Enchentes e da Poluição Hídrica na Bacia do Rio Guerengê/Arroio Pavuna, Jacarepaguá/RJ, nos quais o professor Marcelo Gomes Miguez foi responsável técnico e coordenador destes projetos.

Além destas referências, neste íterim, uma série de trabalhos de pesquisa vêm sendo desenvolvidos, em âmbito acadêmico, com alunos de graduação, iniciação científica e de pós-graduação, no Laboratório de Hidráulica Computacional – COPPE/UFRJ, dentre os quais destacam-se: a análise da influência da urbanização na geração de cheias e avaliação de tendências futuras; modelação matemática como ferramenta para planejamento e na concepção de projetos integrados de combates às enchentes; utilização de reservatórios de lotes como solução complementar para o sistema de drenagem urbana; avaliação da importância do tempo de concentração para compatibilização das áreas dos compartimentos de escoamento na modelação topográfica pertinente ao modelo de células; incorporação de resíduos sólidos ao escoamento, entre outros.

## *A Modelação Matemática como Ferramenta para o Estudo, Planeamento e Projeto Integrado de Controle de Cheias Urbanas e Qualidade da Água*

A modelação matemática de um dado fenómeno físico procura traduzi-lo em formulações a partir de hipóteses simplificadoras, consideradas aceitáveis conforme os objetivos estabelecidos. A representação de um fenómeno físico não é, em geral, uma atividade simples. Pelo contrário, normalmente a complexidade associada é grande e tanto mais difícil quanto maior a escala espacial de ocorrência do fenómeno e sua variabilidade nessa escala. Uma maior variabilidade, em geral, limita as possibilidades de simplificação da modelação. Em uma bacia urbana, a quantidade de estruturas hidráulicas envolvidas, bem como a grande ramificação das redes de drenagem, a possibilidade de transição de escoamentos à superfície livre para escoamentos sob pressão, a formação de áreas de reservação, o fato prático de que as ruas passam a atuar como uma rede de canais complementares, tornam ainda mais diversificada a modelação de uma cheia urbana.

A escolha de um modelo adequado para uma dada aplicação é uma decisão fundamental dentro do próprio processo de modelação. Nesse contexto, afiguram-se, então, como necessidades básicas do processo de modelação, a identificação e caracterização do problema, com diagnóstico de suas principais causas, a caracterização dos principais processos intervenientes no problema em estudo e a identificação das possíveis hipóteses simplificadoras para, por fim, chegar a uma formulação coerente para o modelo mais adequado aos objetivos propostos.

É comum tratar-se o problema de cheias em rios e canais de forma unidimensional, extrapolando-se os resultados de calha para as regiões próximas que sofrem alagamento. Nas enchentes urbanas, em grande parte das abordagens de modelação, o problema é tratado da mesma forma, porém considerando uma rede de drenagem ramificada, eventualmente aceitando galerias fechadas e escoamento sob pressão. Esta ótica, porém, refere-se à consideração de que o extravasamento do rio, ou da rede de drenagem, é que gera os alagamentos. Conceitualmente, esta consideração é pertinente, pois as enchentes são definidas como o resultado do extravasamento da calha, provocando inundações. Este tipo de abordagem, entretanto, melhor se enquadra ao caso de cheias urbanas em países desenvolvidos, onde, realmente, a infra-estrutura disponível garante o funcionamento da drenagem conforme previsão de projeto, com a micro-drenagem adequadamente dimensionada interagindo com a macro-drenagem de forma harmônica, não sendo as ruas alagadas senão residualmente ou, em caso extremos, pelo extravasamento dos rios e canais.

No caso de cheias urbanas onde as condições da rede não são as ideais, porém, esta consideração pode se revelar menos abrangente do que o que seria necessário para a representação do fenómeno. Há uma diversidade ainda maior neste caso, com inúmeras possibilidades de escoamento, não só pela rede de drenagem, mas também sobre a própria bacia urbana, que dispõe de estruturas diversas do cenário cotidiano que podem revelar-se verdadeiras estruturas hidráulicas, na passagem das cheias. Pode-se dizer, por exemplo, que uma rua que tenha captação de micro-drenagem insuficiente, seja por sub-dimensionamento, por obsolescência, por entupimento das bocas de lobo com lixo, ou por qualquer outro motivo, funciona como um verdadeiro canal para o escoamento superficial, de forma independente da rede de drenagem principal, podendo levar a água da chuva a alagar áreas quaisquer, mesmo sem que a própria rede tenha ainda

extravasado. Onde ocorrem afogamentos, as ruas passam a interagir com as galerias subterrâneas, podendo receber de volta parte da água destas. Assim, ruas se tornam canais, muros de parques se tornam vertedouros, os próprios parques, praças e quadras, em geral, se tornam reservatórios. Tudo isso acaba por complementar a rede de macro-drenagem e se integrar a esta em termos de funcionamento.

Estes fatos tornam difícil a aplicação dos conceitos de modelação mais tradicionais ao problema de cheias urbanas, demandando uma abordagem sistêmica para a bacia, ou seja, é necessária a modelação da bacia com as interações de todas as suas diversas partes e a integração entre as várias estruturas hidráulicas e da paisagem urbana.

## **O Modelo Matemático MODCEL Aplicado a Estudos de Cheias Urbanas**

### ***Concepção do Modelo***

As bacias de rios naturais, ou canalizados, em áreas urbanas, geralmente em áreas aproximadamente planas, têm potencial para formar grandes áreas alagáveis. Ao sair da rede de drenagem, o caminho da água pode ser qualquer, ditado pelos padrões de urbanização. Calçadas marginais tornam-se vertedouros para os rios, cujas águas extravasadas ao chegarem às ruas fazem destas verdadeiros canais, podendo alagar construções, parques ou praças, que então passam a funcionar como reservatórios, indesejavelmente, concentrando águas que não retornarão à rede de drenagem.

Nessa situação, pode-se perceber que as águas extravasadas podem ter comportamento independente da rede de drenagem, gerando seus próprios padrões de escoamento, especialmente, quando a micro-drenagem não corresponde à função que dela se espera. Em um caso extremo, onde a micro-drenagem não funcione, o que não é incomum, por falhas de manutenção e entupimentos, por resíduos sólidos por exemplo, ou onde ela estiver sub-dimensionada, alagamentos em áreas urbanas podem-se iniciar mesmo sem extravasamento da rede de macro-drenagem, gerando também um padrão de escoamento particular e distinto daquele dos canais.

Nesse contexto, percebe-se que há indicações para o uso de um modelo de características sistêmicas, capaz de representar a hidráulica e hidrologicamente, de forma distribuída, a superfície da bacia. Esta necessidade encontra acolhida na concepção de células de escoamento. A representação do espaço urbano através de células, que atuam como compartimentos homogêneos que integram o espaço da bacia e a faz interagir em função do escoamento que sobre ela ocorre, caminha ao encontro dos objetivos da modelação das enchentes urbanas.

### ***Hipóteses do Modelo de Células para Cheias Urbanas***

- A natureza pode ser representada por compartimentos homogêneos, interligados, chamados células de escoamento. A cidade e sua rede de drenagem são subdivididas em células, formando uma rede de escoamento bi-dimensional, com possibilidade de escoamento em várias direções nas zonas de inundação, a partir de relações unidimensionais de troca.

▪ Na célula, a área da superfície livre líquida depende da elevação do nível d'água no interior da mesma e o volume de água contido em cada célula está diretamente relacionado com o nível d'água no centro da mesma, ou seja:

$$V_i = V(Z_i) \quad (1)$$

$$V_i = A_{si} \times (Z_i - Z_{0i}) \quad (2)$$

Onde:

$Z_{0i}$  é a cota do fundo da célula;

$A_{si}$  é a área superficial da célula.

▪ O modelo proposto articula as células em "loop" (modelo anelado), com possibilidade de escoamento em várias direções na bacia modelada.

▪ Cada célula comunica-se hidráulicamente com células vizinhas.

▪ Cada célula recebe a contribuição de precipitações e realiza processos hidrológicos internos para transformação de chuva em vazão.

▪ Às vazões trocadas com as células vizinhas somam-se as vazões resultantes da transformação da chuva.

▪ O escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas conhecidas, como, por exemplo, a equação dinâmica de Saint-Venant, completa ou simplificada, a equação de escoamento sobre vertedouros, livres ou afogados, a equação de escoamento através de orifícios, equações de escoamento através de bueiros, entre outras várias, sendo, neste estudo, considerados os efeitos de inércia no escoamento que ocorre nos cursos d'água principais.

▪ 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. Nas galerias, o escoamento é considerado inicialmente à superfície livre, mas pode vir a sofrer afogamento, passando a ser considerado sob pressão.

▪ A vazão entre duas células adjacentes, em qualquer tempo, é apenas função dos níveis d'água no centro dessas células, ou seja:

$$Q_{i,k} = Q(Z_i, Z_k); \quad (3)$$

As seções transversais de escoamento são tomadas como seções retangulares equivalentes, simples ou compostas.

▪ aplica-se o princípio da conservação de massa a cada célula.

▪ 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, permitindo a solução numérica pelo método da dupla varredura.



## **Modelação de uma Bacia Urbana através da Representação por Células de Escoamento**

As células podem representar a natureza isoladamente ou em conjuntos, formando estruturas mais complexas. A definição do conjunto de tipos de ligação, que são representativas de leis hidráulicas que traduzem determinados escoamentos, permite reproduzir uma multiplicidade de padrões de escoamento que ocorrem em um cenário urbano. A atividade de modelação topográfica e hidráulica depende de um conjunto pré-definido de tipos de célula e de tipos possíveis de ligações entre células. A figura 1 mostra, esquematicamente, o funcionamento de uma dada célula.

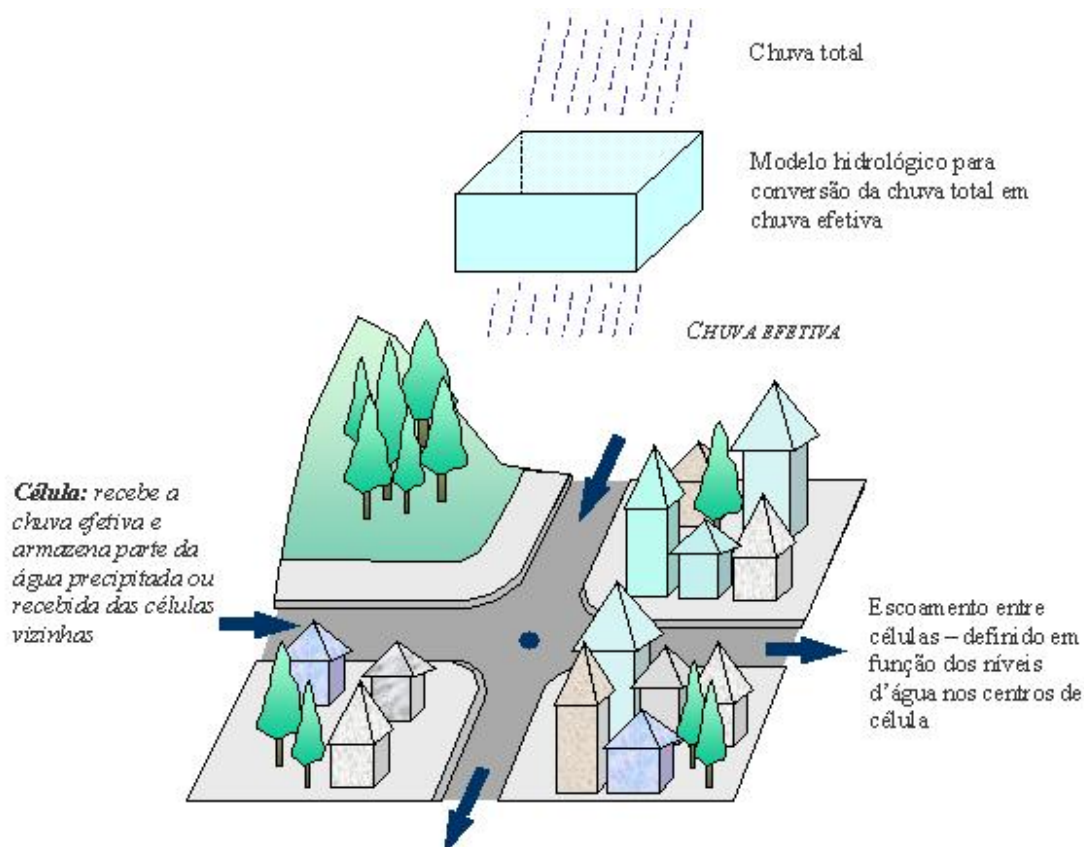


Figura 1: Funcionamento esquemático de uma célula de escoamento.

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 urbanizada, para a representação de escoamentos a superfície livre em planícies alagáveis, bem como áreas de armazenamento, ligadas umas às outras por ruas, também representando áreas de vertimento de água de um rio para ruas vizinhas e vice-versa e áreas de transposição de margens, quando é preciso integrar as

ruas marginais a um rio e que se comunicam através de uma ponte, considerando um padrão de urbanização pré-definido, como mostrado na figura 2;

- de planície natural, não urbanizada, análoga ao tipo anterior, porém prismática, sem sustentar nenhum tipo de urbanização
- de reservatório, simulando o armazenamento d'água em um reservatório temporário de armazenamento, dispondo de uma curva cota x área superficial, a partir da qual, conhecendo-se a variação de profundidades, pode-se também conhecer a variação de volume armazenado. A célula tipo-reservatório cumpre o papel de amortecimento de uma vazão afluente.

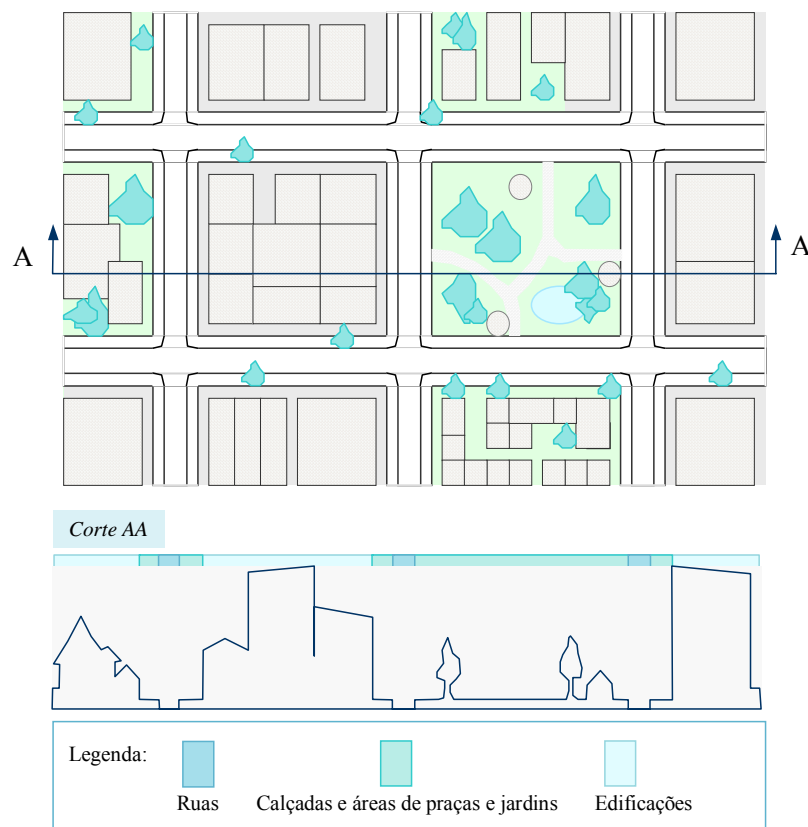


Figura 2: Escalonamento de níveis na superfície de uma célula urbanizada.

A figura 3 mostra um corte em uma bacia, mostrando esquematicamente a modelação do espaço urbano através de células de escoamento.

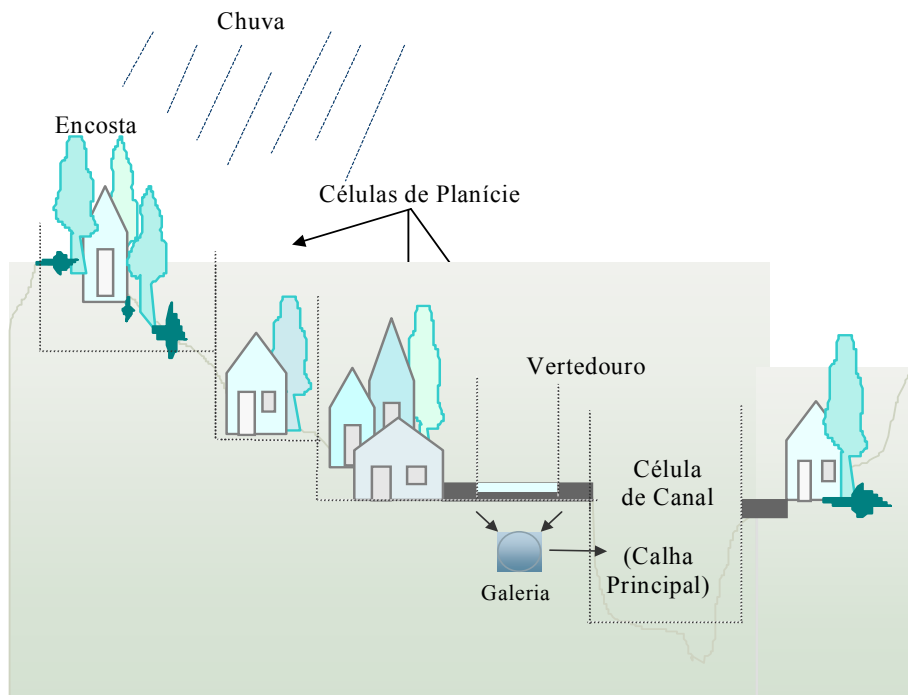


Figura 3: Representação esquemática de uma região dividida em células, mostrando interfaces dos escoamentos superficiais.

### ***O Modelo Hidrológico***

A separação do escoamento superficial era originalmente representada no Modelo de Células através do coeficiente de *run-off*, definido conforme características de cada célula. Assim, num dado passo de tempo, a lâmina de chuva efetiva, numa célula qualquer, podia ser obtida através do produto do seu coeficiente de *run-off* pela precipitação referente ao mesmo período.

Com o intuito de melhorar a capacidade de representação dos fenômenos hidrológicos envolvidos na geração das cheias no Modelo de Células, foi desenvolvido um modelo hidrológico simples, representando a infiltração, a interceptação vegetal e a retenção em depressões, sendo estes dois últimos considerados de modo combinado em uma parcela de abstração. A abstração se manifesta enquanto se enche um reservatório que modela a sua capacidade, enquanto a infiltração pode ocorrer enquanto houver uma lâmina d'água sobre a superfície da célula modelada. Num passo de tempo qualquer, os cálculos referentes às rotinas hidrológicas são realizados em primeiro lugar, e, em seguida, a propagação dos escoamentos é feita através das rotinas hidrodinâmicas.

### ***O Modelo Matemático Hidrodinâmico***

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 a seguir:

$$A_{S_i} \frac{dZ_i}{dt} = P_i + \sum_k Q_{i,k}$$

(4)

onde,

$Q_{i,k}$  - vazão entre as células i e k, vizinhas entre si;

$Z_i$  - cota do nível d'água no centro da célula i;

$A_{S_i}$  - área superficial do espelho d'água na célula i;

$P_i$  - vazão relativa à parcela de chuva ocorrida sobre a célula i e disponível para escoamento;

As ligações típicas de escoamento entre células, que podem ser escritas em função de leis hidráulicas, são listadas a seguir:

- ligação tipo rio, para escoamento à superfície livre, considerando a equação dinâmica de Saint-Venant, incluindo seus termos de inércia;
- ligação tipo planície, para escoamento à superfície livre, considerando a equação dinâmica de Saint-Venant, sem os termos de inércia;
- ligação tipo vertedouro de soleira espessa, considerando a equação clássica, para escoamento livre ou afogado;
  - ligação tipo orifício, também clássica;
  - ligação tipo entrada de galeria, com contração do escoamento;
  - ligação tipo saída de galeria, com expansão do escoamento;
  - ligação tipo galeria, com escoamento à superfície livre ou sob pressão;
  - ligação tipo curva cota x descarga, correspondentes a estruturas especiais calibradas em laboratório físico (modelos reduzidos);
  - ligação tipo descarga de galeria em rio, funcionando como vertedouro, livre ou afogado, ou orifício, para galerias que chegam a um rio em cota superior ao fundo deste, por uma das margens;
- ligação tipo bueiro, como interface das células superficiais com as células de galeria;
- ligação tipo bombeamento, com descarga de uma célula para outra a partir de uma cota de partida;
- ligação tipo comporta flap, funcionando como este tipo de comporta de sentido único de escoamento.

## *O Modelo Numérico*

A formulação numérica do modelo proposto inicia-se com o processo de discretização da equação diferencial que, originalmente contínua, passa a ser considerada em termos de incrementos finitos. A discretização temporal da equação diferencial representativa da conservação da massa é feita procurando-se linearizar numericamente todos os termos que apresentam não-linearidades, para que não haja a necessidade de um procedimento iterativo de solução, a fim de simplificar o modelo numérico.

O esquema utilizado para marcha no tempo é o totalmente implícito. O sistema resultante possui uma matriz de coeficientes esparsa, com muitos elementos iguais a zero. A solução deste sistema, por métodos convencionais de solução de matrizes, que trabalham com a matriz cheia, envolve uma série de operações desnecessárias com valores nulos, o que, na prática, significa desperdício de tempo.

Com base na esparsidade da matriz de coeficientes, utiliza-se um método de solução de sistemas do tipo dupla varredura, sobre o modelo topológico de células. O procedimento básico, ponto de partida do método de dupla varredura, consiste em se arranjar topologicamente as células que formam o modelo em uma certa quantidade de grupos numerados, a partir de jusante, de tal forma que, cada célula de um grupo  $j$ , central, esteja ligada apenas a células deste mesmo grupo, a células do grupo anterior  $j-1$  ou a células do grupo posterior  $j+1$ . A primeira varredura, de jusante para montante, tem o objetivo de agrupar o sistema em sub-matrizes; a segunda varredura, de montante para jusante, resolve os sub-sistemas resultantes do agrupamento da primeira varredura.

## *Bibliografia*

- AMEC, Earth and Environmental Center for Watershed Protection. **Georgia Stormwater Management Manual**, Volume 2: Technical Handbook. Atlanta, 2001.
- BEATLEY, T., **Green Urbanism: Learning from European Cities**. Washington, D.C., Island Press, 2000.
- BENEVOLO, L. . **História da Cidade**. Editora Perpectiva, 2001
- CAMPOS, R.O.G. **Inundações Urbanas: Considerações Gerais e Modelação Matemática com Incorporação da Obstrução por Resíduos Sólidos**. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- COFFMAN, L.S., CHENG, M., WEINSTEIN, N., CLAR, M.. "Low-Impact Development Hydrologic Analysis and Design". In: Loucks, E.D. (editor), **Water Resources and The Urban Environment – Proceedings of the 25<sup>th</sup> Annual Conference on Water Resources Planning and Management, Chicago-Illinois**. American Society of Civil Engineering, Nova Iorque, pp. 1-8, 1998.
- CUNGE, J.A.. "Two-Dimensional Modelling of Flood Plains". In: Mahmood, K., Yevjevich, V. (eds.), **Unsteady Flow in Open Channels**, cap. 17. Colorado, Estados Unidos, Water Resources Publications, 1975.
- CUNGE, J.A.; HOLLY Jr., F.M.; VERWEY, A.. **Practical Aspects of Computational River Hydraulics**. Inglaterra, Pitman Advanced Publishing Program, 1980.

- GALLATI, M., BRASCHI, G., DI FILLIPO, A. , ROSSI, U.. "Simulation of the Inundation of Large Areas of Complex Topography Caused by Heavy Floods". In: **Hydraulic Engineering Software Applications, Proceedings of the Third International Conference on Hydraulic Engineering Software**, Massachusetts, Computational Mechanics Publications, Southampton, Inglaterra, 1990.
- HALL, K. B. , PORTERFIELD, G. A.. **Community by Design**. McGraw Hill, USA, 2001
- HUTCHISON, I.P.G. , MIDGLEY, D.C.. "Mathematical Model to Aid Management of Outflow from the Okavango Swamp, Botswana", **Journal of Hydrology**, vol. 19, pp. 93-113, 1973.
- MAGALHÃES, L.P.C. **Modelo Hidráulico-Hidrológico Distribuído, Estudo de Caso: Bacia do Rio Joana**. Trabalho de Final de Curso, DRHIMA, Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- MAGALHÃES, L.P.C.; MIGUEZ, M.G.; MASCARENHAS, F.C.B.; MAGALHÃES, P.C.; BASTOS, E.T. ; COLONESE, B.L. . Sistema Hidro-Flu para Apoio a Projetos de Drenagem. In: **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, João Pessoa. Anais do XVI SBRH. Porto Alegre : ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.
- MAJOR, T.F., LARA, A., CUNGE, J.A.. "Mathematical Modelling of Yacyreta-Apipe Scheme of the Rio Parana", **La Houille Blanche**, n. 6 e 7, 1985.
- MARYLAND DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT AND CENTER FOR WATERSHED PROTECTION, **Maryland Stormwater Design Manual – volume I e II**, Maryland, 2000;
- MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G.; CAMPOS, R.O.G.. "Simulação do Escoamento Superficial em Uma Área Urbana: Proposta de um Reservatório de Amortecimento de Cheia no Parque Recanto do Trovador, Bairro do Grajaú, Bacia do Rio Joana/RJ". In: **Anais do Primeiro Congresso Sobre Aproveitamento e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Idioma Português**; Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2000.
- MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G.; CAMPOS, R.O.G.. "Modelo Matemático de Células de Escoamento para Cheias Urbanas". In: **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5**, Brasil. Editor: Rui Carlos Vieira da Silva. Editora: ABRH/Fundação COPPETEC , 2001.
- MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G. *Urban Flood Control through a Mathematical Cell*. In: **Water International**, vol. 27, Nº 2, págs. 208-218; Illinois, E.U.A, junho 2002.
- MASCARENHAS, F.C.B.; TODA, K.; MIGUEZ, M.G.; INOUE, K. **Flood Risk Simulation**. WIT PRESS, Southampton and Boston, 2005
- MESSNER, F.; PENNING-ROUSELL, E.; GREEN, C.; MEYER, V.; TUNSTALL, S.; VAN DER VEEEN, A.. **Guidelines for Socio-Economic Flood Damage Evaluation**, FLOODsite Project Report T9-06-01, 2006.
- 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, pp. 119-140, janeiro a março, 1999.
- MIGUEZ, M. G.. **Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2001.

- MIGUEZ, M.G. ; MASCARENHAS, F.C.B.; MAGALHÃES, L.P.C. . "Multifunctional Landscapes For Urban Flood Control In Developing Countries". **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 2, p. Issue 2, 2007.
- OSTROWSKI, M. W.. "The Management of Urban Catchments". In: Maksimovic, C. (editor), **New Technologies in Urban Drainage –UDT '91, Drubovnik-Yugoslavia**. Elsevier Science Publishers, Londres, pp. 489-496, 1991.
- SAYERS P.B., HALL J.W., MEADOWCROFT I.C.. Towards risk-based flood hazards management in the UK, Proc. of ICE, Civil Engineering 150, pp. 36-42, 2002.
- TUCCI, C.E.M.; PORTO, R. LA LAINA; BARROS, M.T. DE. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre, ABRH, Editora da Universidade/UFRGS, Brasil, 1995.
- WEISS, H.W.; MIDGLEY, D.C.. "Suite of the Mathematical Flood Plain Models". **Journal of the Hydraulics Division** , ASCE, v.104, n.HY3, pp.361-376, 1978.
- ZANOBETTI, D., LORGERÉ, H.. "Le Modele Mathématique du Delta du Mékong", **La Houille Blanche**, n. 1, 4 e 5, 1968.
- ZANOBETTI, D.; LORGERÉ, H.; PREISSMAN, A.; CUNGE, J.A.. "Mekong Delta Mathematical Program Construction". **Journal of the Waterways and Harbours Division, ASCE**, v.96, n.WW2, pp. 181-199, 1970.

**Anexo 2 – HIDROFLU**



## **Sistema Hidro-Flu para Apoio a Projetos de Drenagem**

### **Introdução**

Enchentes compreendem um dos grandes problemas, relacionados à água, que a humanidade precisa enfrentar. Apesar de serem processos naturais e que podem vir a ocorrer independente da presença do homem na bacia, inegavelmente a ação antrópica vem agravando muito as cheias. O aumento da quantidade de conhecimento sobre o processo de formação e a dinâmica de propagação das cheias é fundamental para que se possa conviver de uma forma mais harmônica com esse fenômeno e também para avaliar alternativas de intervenções para o controle de enchentes. Deste modo, fica evidente que o emprego de ferramentas para a simulação de cheias pode auxiliar as análises associadas.

Nos problemas da engenharia de recursos hídricos, é freqüente a necessidade de cálculo de vazões a partir de uma determinada chuva. Alguns problemas, como por exemplo, o cálculo de seções de escoamento para projetos de drenagem, requerem a determinação de uma vazão máxima de projeto. Outros, como a avaliação do funcionamento de um reservatório de detenção quando submetido a uma cheia, demandam o cálculo de um hidrograma.

Em quaisquer destes casos, as vazões a serem calculadas dependem de uma dada chuva. Portanto, a elaboração de uma chuva de projeto ou a representação de uma chuva real consiste numa tarefa básica para esta análise. A transformação desta chuva em vazão também compreende uma etapa fundamental nos estudos hidrológicos, sendo feita em duas etapas: primeiro, é necessário separar a parcela de precipitação que está disponível para formar o escoamento superficial, e, posteriormente, este volume d'água deve ser distribuído temporalmente, definindo um hidrograma. O cálculo deste hidrograma pode ser feito a partir de diversas técnicas, e utilizando o apoio de dados medidos confiáveis a tendência é que o ajuste desta representação seja melhor. Entretanto, nem sempre existem medições de vazão que permitam o estabelecimento de relações confiáveis para o processo de transformação de chuva em vazão. Deste modo, é usual recorrer-se a parâmetros físicos da bacia e a relações empíricas para sintetizar hidrogramas. Este processo, porém, dependendo das relações empíricas utilizadas, pode levar a resultados com variações significativas para um mesmo local. Cada relação empírica obtida para uma determinada bacia tem características particulares, sendo possível estendê-la a outras bacias semelhantes. Esta avaliação, entretanto, nem sempre é realizada adequadamente e muitas vezes as relações apropriadas não são conhecidas pelo modelador e nem estão disponíveis para utilização.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema computacional de geração de hidrogramas, a partir de uma chuva medida ou de projeto, de características físicas e critérios de ocupação e uso do solo em bacias hidrográficas de pequeno e médio porte, funcionando assim, como uma ferramenta de apoio a projetos hidráulicos. As principais aplicações disponíveis nesta primeira versão do sistema são: determinação de chuvas de projeto, simulação do escoamento superficial, dimensionamento de seções transversais de rios e canais e cálculo de hidrogramas afluentes a reservatórios de controle de cheias.

Este sistema possibilita o uso de diferentes técnicas de transformação de chuva em vazão e disponibiliza para o modelador diversas opções de trabalho. Nesse contexto,

o sistema também mostra potencial para o uso em aplicações diversas, podendo ser utilizado como parte integrante de modelos hidrológicos (simulação de escoamento superficial), ou na previsão de vazões de curto prazo afluentes a reservatórios, para simulação da operação dos mesmos, ou na previsão de vazões de cheia, para subsidiar projetos de controle de enchentes, entre outras aplicações.

### **Estrutura do Sistema**

O Sistema Hidro-Flu tem sua estrutura de cálculo baseada na representação dos seguintes processos:

- Cálculo do Tempo de Concentração;
- Elaboração da Chuva de Projeto;
- Separação da Chuva Efetiva;
- Determinação do Hidrograma de Projeto;
- Dimensionamento Hidráulico de Canalizações e Reservatórios de Detenção.

A figura A3.1 ilustra o esquema de funcionamento deste sistema. Basicamente, a primeira etapa é o cálculo do tempo de concentração, que é feito a partir de características fisiográficas da bacia. O tempo de concentração será utilizado no cálculo do hidrograma unitário sintético e também como duração da chuva para a elaboração da chuva de projeto, que é uma prática usual em projetos de drenagem. O cálculo de uma chuva de projeto demanda a escolha de um tempo de recorrência para este evento, sendo este último definido em função do risco admitido. Uma vez calculada a chuva de projeto, o passo seguinte é a separação da parcela desta que escoar superficialmente, considerando o padrão de uso e ocupação do solo na bacia. Sendo um modelo voltado para a simulação de pequenas e médias bacias, considera-se desprezível a influência dos escoamentos sub-superficiais e subterrâneos no hidrograma de cheia, sendo, portanto, desprezados estes últimos. A partir da chuva efetiva torna-se possível o cálculo do hidrograma superficial, o que é feito através da combinação do uso de um hidrograma unitário sintético e de um reservatório linear. Por fim, o sistema permite que seja efetuado o dimensionamento hidráulico de algumas intervenções como o cálculo de canalizações e de reservatórios de detenção.

O funcionamento deste sistema em relação aos cálculos hidrológicos é tipicamente o de um modelo concentrado. Os cálculos hidráulicos, por sua vez, são considerados para uma estrutura localizada no exutório da bacia em questão. Na fase presente de desenvolvimento, o sistema ainda não permite a divisão da bacia em células homogêneas, onde será feita a simulação hidrológica, e a articulação destas através da propagação com modelos hidrodinâmicos. Este tipo de simulação deverá ser implementado oportunamente. Os itens a seguir descrevem em detalhes o funcionamento de cada um destes processos representados no sistema

### Cálculo do Tempo de Concentração da Bacia

A avaliação de uma enchente de projeto demanda a escolha de uma duração para a chuva. O procedimento mais usual consiste em adotar a duração da precipitação como igual ao tempo de concentração ( $t_c$ ) da bacia.

O tempo de concentração pode ser definido como o tempo necessário para que toda a bacia hidrográfica esteja contribuindo para o escoamento superficial numa determinada seção, ou o tempo transcorrido entre o final da chuva e a passagem das últimas gotas d'água pela seção considerada. Este tempo pode ser representado como a soma de duas parcelas, tempo de equilíbrio e tempo de viagem. O tempo de equilíbrio é igual ao tempo necessário para a estabilização da produção de escoamento superficial e o ordenamento do escoamento em canais bem definidos.

O tempo de viagem pode ser definido como o tempo que o escoamento leva para se deslocar na calha fluvial, a partir do ponto em que o escoamento passa a ocorrer em canais bem definidos, indo até o seu exutório (ou a seção considerada).

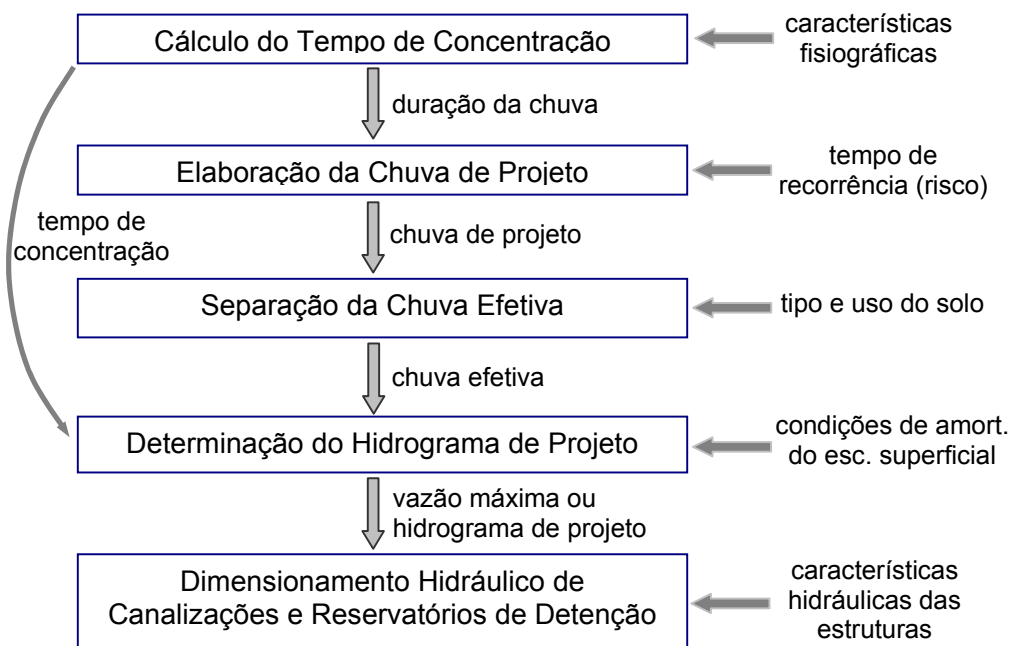


Figura 1: Esquema da estrutura de cálculos do Hidro-Flu.

O tempo de concentração pode ser definido como o tempo necessário para que toda a bacia hidrográfica esteja contribuindo para o escoamento superficial numa determinada seção, ou o tempo transcorrido entre o final da chuva e a passagem das últimas gotas d'água pela seção considerada. Este tempo pode ser representado como a soma de duas parcelas, tempo de equilíbrio e tempo de viagem. O tempo de equilíbrio é igual ao tempo necessário para a estabilização da produção de escoamento superficial e o ordenamento do escoamento em canais bem definidos. O tempo de viagem pode ser definido como o tempo que o escoamento leva para se deslocar na calha fluvial, a partir do ponto em que o escoamento passa a ocorrer em canais bem definidos, indo até o seu exutório (ou a seção considerada).

Alguns fatores influenciam o  $t_c$  de uma dada bacia, e dentre eles pode-se citar: a forma da bacia; declividade média da bacia; comprimento e desnível topográfico ao longo do curso d'água principal; intensidade da chuva considerada; rugosidade da superfície da bacia e de canais; e outros.

Diversas formulações empíricas podem ser empregadas para estimar o tempo de concentração, no entanto, o valor de  $t_c$  pode variar muito de acordo com a fórmula utilizada, portanto, é preciso ter muito critério nesta escolha, além de conhecer bem os limites de aplicabilidade de cada uma dessas metodologias. O modelo aqui apresentado possibilita ao usuário o cálculo do tempo de concentração através de diferentes fórmulas. A maioria delas pode ser considerada como adequada para a estimativa do  $t_c$  em bacias de pequeno porte, que são fortemente influenciadas pelo tempo de equilíbrio. A seguir são citadas estas equações:

- Fórmula Califórnia Culverts Practice

$$t_c = 57 \cdot \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

onde:

L – comprimento do rio principal da bacia (km);

H – desnível entre o ponto mais elevado da bacia e o exutório (m).

- Fórmula de Dooge

$$t_c = 21,88 \cdot \frac{A^{0,41}}{S^{0,17}}$$

onde:

A – área de drenagem da bacia (km<sup>2</sup>);

S – declividade média da bacia (m/m).

- Fórmula de Kirpich

$$t_c = 3,989 \cdot \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}}$$

onde:

L – comprimento do rio principal da bacia (km);

S – declividade média da bacia (m/m).

- SCS – Método Cinemático

$$t_c = \sum \frac{L}{v}$$

onde:

L – comprimento do rio principal da bacia (m);

v – velocidade média do rio principal da bacia no estirão (m/s).

- Ribeiro

$$t_c = \frac{16 \cdot L}{(1,05 - 0,2 \cdot p) \cdot (100 \cdot S)^{0,04}}$$

onde:

L – comprimento do rio principal da bacia (km);

p – percentagem da bacia com cobertura vegetal (entre 0 e 1);

S – declividade média da bacia (m/m).

Discussões sobre a aplicabilidade destas equações e a apresentação de outras metodologias para o cálculo do tempo de concentração podem ser encontradas em Magalhães (1989), Tucci (1993), Wanielista *et al.* (1997), Esteves e Mendiondo (2003), e outros

### **Elaboração da Chuva de Projeto**

A chuva é o principal dado de entrada do sistema, e, portanto, uma das etapas mais importantes compreende a elaboração da chuva de projeto. O sistema permite que sejam consideradas três possibilidades distintas para a representação da chuva de projeto, podendo ser utilizadas: a equação elaborada pelo hidrólogo Otto Pfafstetter (1982), ou a equação IDF em sua forma clássica, ou ainda uma chuva qualquer. Este último procedimento permite que o modelador utilize uma outra equação de chuvas intensas não disponível na base do modelo, ou ainda a representação de uma chuva real em etapas de calibração e/ou validação do modelo.

A seguir são mostradas as duas formas de equações de chuvas intensas citadas acima.

- Equação do tipo Otto Pfafstetter (PDF)

$$P = T_r^{\left( \alpha + \frac{\beta}{T_r^\gamma} \right)} \cdot [a \cdot t + b \cdot \log(1 + c \cdot t)] \text{ onde:}$$

P – altura de chuva (mm);  
Tr – tempo de recorrência (anos);  
t – duração (horas);  
 $\alpha$ ,  $\beta$  - valores que dependem da duração da precipitação;  
 $\gamma$ , a, b, c - parâmetros constantes para cada posto

- Forma clássica da Equação de Chuvas Intensas (IDF)

$$i = \frac{k \cdot T_R^a}{(t + c)^b}$$

onde:

i – intensidade de chuva (mm/h);  
Tr – tempo de recorrência (anos);  
t – duração (minutos);  
k, a, b, c - parâmetros constantes para cada posto

A aplicação pura e simples da equação de chuvas intensas conduz a uma precipitação com intensidade constante (obviamente igual à intensidade média). No entanto, as chuvas reais não são constantes ao longo do tempo e à medida que aumenta o tamanho da bacia esta hipótese de chuva constante também vai se tornando menos adequada. Diversos procedimentos podem ser aplicados para que se obtenha uma precipitação variável no tempo, como por exemplo, SCS, Chicago, Huff e Bureau of Reclamation (Tucci, 1993). Dentre estes, foi escolhido o Método do Bureau of Reclamation para a redistribuição temporal da chuva de projeto. Este método se destaca pela simplicidade e a possibilidade de aplicação, mesmo em bacias com carência de medições hidrológicas.

O método consiste na divisão da duração da chuva em intervalos iguais, calculando-se o total precipitado para cada um destes intervalos. Neste cálculo a duração utilizada equivale ao tempo acumulado até o referido intervalo. Se a equação de chuvas intensas utilizada for a de Otto Pfafstetter, deve-se observar que os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  variam conforme a duração da chuva, sendo necessário corrigi-los para o cálculo da precipitação acumulada referente a cada intervalo de tempo. Em seguida, calcula-se, então, o incremento de precipitação referente a cada um dos intervalos e, finalmente, para que se obtenha o hietograma de projeto basta reordenar os incrementos. O método indica uma reordenação padrão para a divisão da duração em 6 intervalos e sugere ainda que para um número mais elevado de intervalos seja colocado o incremento de maior intensidade no intervalo de tempo central da chuva que está sendo elaborada, e em seguida os próximos incrementos em ordem decrescente sejam distribuídos à direita e à esquerda do núcleo central da chuva.

À medida em que o tamanho da bacia hidrográfica vai aumentando a hipótese de que a precipitação média sobre toda esta área de drenagem é igual a precipitação média pontual se torna menos verdadeira. Assim, o modelo permite a aplicação de redutores do

volume precipitado em função do tamanho da bacia. Esta correção é feita através das equações estabelecidas pelo Weather Bureau (1946, apud Tucci, 1993) para bacias americanas.

### Separação da Chuva Efetiva

A chuva efetiva é a parcela da precipitação que escoar superficialmente, dando origem às cheias em bacias de pequeno e médio porte. Os principais fenômenos que atuam na separação do escoamento superficial são a interceptação vegetal, a retenção em depressões do terreno e a infiltração. Dentre estes, a infiltração é quem desempenha papel mais relevante. O sistema desenvolvido permite a separação da chuva efetiva segundo três métodos distintos, sendo a escolha do método condicionada à disponibilidade de dados e à experiência ou preferência do usuário do modelo.

Os métodos considerados são os seguintes:

- Método Racional

Considera a chuva efetiva como um percentual da chuva total definido por um parâmetro denominado coeficiente de runoff. Deste modo, a cada instante de tempo, a chuva efetiva é calculada como:  $P_t \text{ (efetiva)} = P_t \cdot C$

onde:

P – precipitação;

C – coeficiente de runoff.

Este método é muito utilizado para o cálculo de vazões de projeto, especialmente em bacias de pequeno porte. Apresenta como pontos positivos o fato de ser facilmente utilizado e compreendido, além de dispor de muita documentação referente ao ajuste do coeficiente de runoff, em função do tipo, uso e ocupação do solo, da declividade da região, ou mesmo da intensidade ou da recorrência da precipitação. O método tem a desvantagem de focar apenas na quantificação da chuva efetiva, representando mal e distorcendo o fenômeno da infiltração. Método do SCS (Soil Conservation Service, EUA)

Este método é muito usado no Brasil e no exterior, tendo sido desenvolvido pelo Soil Conservation Service (USDA, EUA). Apresenta a vantagem de dispor de grande quantidade de trabalhos relativos ao ajuste do seu principal parâmetro, denominado *Curve Number* (CN). Este parâmetro é ajustado em função de quatro tipos diferentes de solo e de diversos padrões de uso e ocupação, e também pode ser corrigido de acordo com as condições de umidade do solo anteriores à ocorrência da chuva.

A desvantagem deste método também reside na falta de uma base física mais consistente para a representação da infiltração. As equações utilizadas neste método são as seguintes:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

$$I_a = K \cdot S \text{ onde:}$$

Q – chuva efetiva acumulada (mm);

P – precipitação acumulada (mm);

la – lâmina de abstração inicial (mm);

S – armazenamento máximo de água na camada superficial do solo (mm);

K – percentual de S definido como abstração inicial (em geral assumido como igual a 0,2).

- Índice  $\phi$  c/ abstração inicial

Dentre os métodos aqui descritos, este é o que melhor representa os fenômenos hidrológicos que interferem na separação do escoamento superficial, tendo parâmetros de ajuste dotados de significado físico.

A infiltração é representada através de uma taxa de infiltração potencial constante (índice  $\phi$ ), e as perdas em virtude da interceptação vegetal e da retenção em depressões do terreno são representadas de modo combinado através de um reservatório com uma capacidade limitada de retenção.

Assim, o cálculo do escoamento superficial é feito da seguinte forma: primeiramente, o reservatório de abstração é totalmente preenchido e, em seguida, é feita a comparação da intensidade da chuva com a taxa de infiltração potencial. Caso a intensidade de chuva esteja abaixo da infiltração potencial, toda a precipitação infiltra e o escoamento superficial é nulo. Por sua vez, caso a intensidade de chuva esteja acima da taxa de infiltração potencial constante, a lâmina de escoamento superficial é definida a partir desta diferença e a infiltração real é igual à potencial.

A desvantagem deste método reside na limitada quantidade de estudos sobre o ajuste de seus parâmetros e na falta de medições de campo de curvas de capacidade de infiltração.

### **Cálculo do Hidrograma**

A transformação da chuva efetiva em vazão pode ser obtida através de diversas técnicas de engenharia hidrológica. Uma técnica muito comum é a aplicação do conceito do hidrograma unitário, que representa a resposta da bacia para uma precipitação efetiva unitária.



O hidrograma unitário pode ser obtido a partir de medições simultâneas do par chuva e vazão. No entanto, estes dados dificilmente encontram-se disponíveis simultaneamente, o que leva à utilização dos hidrogramas unitários sintéticos.

Na utilização do hidrograma unitário, são consideradas algumas hipóteses fundamentais:

- chuvas efetivas distribuídas uniformemente pela bacia;
- chuvas efetivas com intensidade constante ao longo de cada intervalo de tempo;
- princípio da linearidade, isto é, duas chuvas com a mesma duração, têm o mesmo tempo de base, independente de sua intensidade; e o
- princípio da invariância com o tempo (sem considerar efeitos de sazonalidade e diferentes condições antecedentes).

Neste trabalho, o cálculo do hidrograma unitário foi feito tendo por base o Hidrograma Unitário Sintético Triangular do Método Racional. Este método pode ser descrito da seguinte forma: considera-se que uma chuva efetiva de 1mm e duração igual ao tempo de concentração ( $t_c$ ) produz um hidrograma triangular com tempo de ascensão igual ao tempo de concentração e tempo de recessão também igual ao tempo de concentração. A vazão de pico do hidrograma triangular pode ser obtida através de um cálculo de equivalência de volumes, ou seja, o volume disponível para o escoamento superficial é igual ao produto da lâmina de 1mm de chuva efetiva pela área da bacia. Este deflúvio deve ser necessariamente igual ao volume do hidrograma resultante, definido pela sua integral ao longo do tempo, e equivalente à área do triângulo. Assim, temos que:

Volume definido pela integral do hidrograma triangular:

$$V = Q_p \cdot (t_c + t_c) / 2$$

Considerando a equivalência entre o volume de chuva efetiva e o do hidrograma, temos que:

$$1\text{mm} \cdot A = Q_p \cdot (t_c + t_c) / 2$$

Reorganizando esta equação, chega-se a:

$$Q_p = \frac{2 \cdot 1\text{mm} \cdot A}{(t_c + t_c)} = \frac{1\text{mm} \cdot A}{t_c}$$

onde:

$Q_p$  – vazão de pico do hidrograma triangular ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$t_c$  – tempo de concentração (s);

$A$  – área da bacia ( $\text{m}^2$ ).

Este método foi generalizado de modo a permitir a representação de chuvas com distribuição temporal complexa, o que foi alcançado através da decomposição do hidrograma triangular em sub-hidrogramas trapezoidais (Magalhães, 1989). Estes hidrogramas trapezoidais representam a resposta da bacia para a precipitação efetiva referente a cada um dos passos de tempo, admitindo um histograma tempo-área uniformemente distribuído.

No entanto, é evidente que a aplicação deste método não pode se limitar aos casos nos quais a duração da chuva é igual ao tempo de concentração da bacia. Torna-se necessário definir um procedimento mais geral onde o cálculo do hidrograma possa ser feito para chuvas com distribuição temporal complexa, variável no tempo, embora assumida constante ao longo de um passo de tempo, e com duração qualquer. Uma vez que a informação de dados de precipitação e o cálculo da chuva efetiva são considerados a cada passo de tempo, definido pelo modelador, é necessário que o hidrograma unitário seja calculado não para um tempo de duração equivalente ao tempo de concentração, e sim para um passo de tempo qualquer. Deste modo, pode-se multiplicar este HU pelo valor de chuva efetiva calculada a cada passo de tempo (princípio da linearidade), para, posteriormente, através da convolução do hidrograma, calcular o hidrograma resultante (princípio da superposição). O hidrograma a ser considerado, a partir da adoção do hidrograma triangular como referência, para ser aplicado a um passo de tempo qualquer assume a forma de um trapézio (Magalhães, 1989). A Figura 2 ilustra a decomposição do hidrograma triangular em hidrogramas parciais trapezoidais.

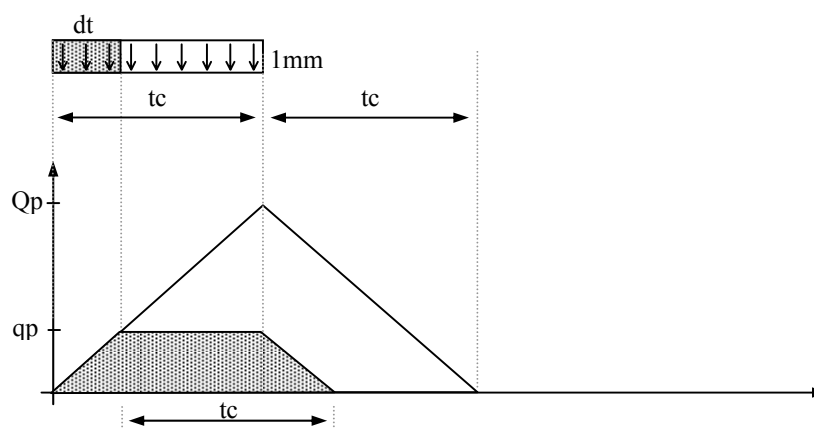


Figura 2: Hidrograma unitário triangular e decomposição em sub-hidrogramas trapezoidais.

O hidrograma triangular tomado como base apresenta intensidade de chuva igual a  $1\text{mm}/t_c$ . Ao generalizar a aplicação deste método a um passo de tempo qualquer, é preciso que se corrija a intensidade de precipitação considerada. Neste caso, assumindo que uma precipitação unitária ( $1\text{mm}$ ) ocorre em um passo de tempo com duração igual a  $\Delta t$ , pode-se definir esta intensidade como igual a  $1\text{mm}/\Delta t$ , que é  $t_c/\Delta t$  vezes maior que a intensidade de precipitação admitida no hidrograma triangular original. Assim, uma forma de calcular o valor de vazão esperado para o patamar do hidrograma unitário trapezoidal considera a correção do hidrograma triangular original para o valor da intensidade de precipitação para o  $\Delta t$  considerado, e em seguida a divisão deste valor pelo percentual da bacia que de fato poderia vir a concentrar neste período, ou seja,  $\Delta t/t_c$ . Deste modo, o valor do patamar do hidrograma unitário trapezoidal assume valor igual ao observado para o hidrograma triangular original, o que também pode ser demonstrado através do cálculo de equivalência de volumes, que define que a área do trapézio é igual ao produto da lâmina unitária de  $1\text{mm}$  pela área total da bacia.

Para o cálculo da contribuição do escoamento superficial relativo aos diversos passos de tempo da simulação, é preciso transladar o hidrograma trapezoidal para o início do passo de tempo considerado e então, multiplicar todas as ordenadas deste hidrograma pela lâmina de chuva efetiva neste momento (uma vez que a elaboração do hidrograma trapezoidal considera uma lâmina unitária). O cálculo do hidrograma é feito através da soma das contribuições individuais de cada passo de tempo (convolução).

O cálculo de vazões através da aplicação do Hidrograma Unitário do Método Racional frequentemente superestima as vazões de projeto, o que pode levar ao desperdício de recursos públicos gastos em obras de controle de cheias superdimensionadas.

Deste modo, propõe-se a correção das vazões calculadas através da passagem deste hidrograma por um reservatório linear. Este procedimento não só corrige as vazões de projeto, como também reflete o amortecimento do escoamento superficial decorrente do fluxo e do armazenamento deste sobre a superfície da bacia e na calha fluvial. Assim, para a aplicação do reservatório linear tem-se que:

Equação da Continuidade aplicada a um volume de controle (reservatório):

$$1.1.1.1.1.1 \quad I - O = dS / dt$$

Princípio do Reservatório Linear:

$$S = KO$$

onde:

I – vazão de entrada no reservatório;

O – vazão de saída do reservatório;

S – armazenamento no reservatório;

K – coeficiente de depleção do reservatório linear;

A equação da continuidade pode ser resolvida através do Método das Diferenças Finitas,

considerando um esquema explícito e progressivo no tempo:

$$\frac{I^t + I^{t+1}}{2} - \frac{O^t + O^{t+1}}{2} = \frac{S^{t+1} - S^t}{\Delta t}$$

Substituindo S por KO, tem-se que:

$$O^{t+1} = \left( \frac{\Delta t / K}{2 + \Delta t / K} \right) I^{t+1} + \left( \frac{\Delta t / K}{2 + \Delta t / K} \right) I^t + \left( \frac{2 - \Delta t / K}{2 + \Delta t / K} \right) O^t$$

Reorganizando esta equação e explicitando a incógnita  $O^{t+1}$ :

O reservatório linear promove o amortecimento do hidrograma e tem seu funcionamento definido pelo valor do coeficiente de depleção. De fato, a atuação do reservatório linear é dependente tanto da relação  $\Delta t/K$  quanto do próprio  $\Delta t$ . Na etapa de calibração do modelo este parâmetro pode ser utilizado para o ajuste da resposta do sistema ao registro observado. No entanto, em algumas aplicações não se dispõe de dados para a calibração, sendo necessário a definição de algum procedimento que elimine a subjetividade do ajuste deste parâmetro.

O procedimento adotado busca respaldo no Hidrograma Unitário Triangular (HUT) do SCS. Neste método a recessão apresenta duração igual ao produto da ascensão por um fator  $\beta$ , usualmente igual a 1,67. Este método não tende a superestimar as vazões de pico, apesar de não ter a mesma versatilidade do método que foi adotado em trabalhar com chuvas variáveis no tempo. Assim, para este método de definição de hidrogramas triangulares a expressão que define a vazão de pico é igual a:

$$Q_p = \frac{2 \cdot I_{mm} \cdot A}{(t_c + \beta \cdot t_c)}$$

Deste modo, pode-se perceber que a relação entre a vazão de pico do HUT do SCS e a do HUT do Método Racional é igual a:

$$\frac{Q_p \text{ HUT SCS}}{Q_p \text{ HUT Met. Racional}} = \frac{2}{(1 + \beta)}$$

Assim, define-se uma razão de amortecimento. Deste modo, a passagem através do reservatório linear poderia promover o amortecimento do hidrograma calculado pelo HUT do Método Racional de modo que a vazão de pico da saída do mesmo seja numericamente igual àquela que seria calculada com o HUT do SCS. Com isso torna-se possível aliar as vantagens dos dois métodos: representação adequada de chuvas variáveis com o tempo (HUT do Mét. Racional) e vazões de pico não superestimadas (HUT do SCS). Este procedimento foi utilizado na rotina de calibração automática do modelo, sendo feitas simulações sucessivas e comparadas a razão de amortecimento real ( $Q_p$  com amortecimento /  $Q_p$  sem amortecimento) com a razão de amortecimento meta; o coeficiente de depleção é ajustado de modo que as razões de amortecimento meta e real tornem-se iguais. Wanielista et al. (1997) lista alguns valores de  $\beta$  (utilizado na definição da razão de amort. meta) em função de características das bacias.

Tabela 1: Valores de  $\beta$  em função de características da bacia

Descrição da bacia	beta	razão de amortecimento
Fórmula do Método Racional	1.00	1.00
Área urbana, alta declividade	1.25	0.89
Valor típico SCS	1.67	0.75
Ocupação mista (urbana e rural)	2.25	0.62
Área rural, alta declividade	3.33	0.46
Área rural, declividade suave	5.50	0.31
Área rural, declividade muito baixa	12.00	0.15

(Wanielista et al., 1997)

### Dimensionamento Hidráulico

Uma vez calculado o hidrograma de projeto, pode-se prosseguir com a etapa seguinte que é o dimensionamento hidráulico de estruturas para o controle de cheias. O sistema permite o cálculo de seções transversais

de canalizações com as seguintes formas: retangulares, trapezoidais e circulares. Este dimensionamento é feito com base na Fórmula de Manning, sendo consideradas a vazão máxima do hidrograma de projeto e as características geométricas e de rugosidade da seção escolhida.

O dimensionamento hidráulico de canalizações pode ser feito de duas formas:

- ou define-se a cota de fundo e a largura do canal, e calcula-se a cota que o nível d'água atingirá;
- ou fixa-se uma cota de restrição (que deverá ser protegida) e uma cota de fundo, e calcula-se a largura do canal.

O sistema também permite o cálculo de reservatórios de detenção. Este dimensionamento deve considerar o hidrograma como um todo e não apenas a vazão de pico. O método de Puls modificado (Chow, 1964) foi utilizado como base para este dimensionamento, sendo necessário que sejam informadas características (área, largura, coeficiente de descarga, etc) dos elementos de descarga do reservatório, descarregador de fundo e vertedor, e uma curva cota-área do mesmo. O modelo informa o percentual de amortecimento da vazão de pico na saída do reservatório em relação à vazão de pico do hidrograma de entrada. Esta razão pode ser utilizada para modificar os elementos hidráulicos deste reservatório de modo que seja atinjada uma determinada eficiência de amortecimento requerida para o projeto.

### **Estudo de caso – bacia do rio joana/RJ**

A bacia do rio Joana, na cidade do Rio de Janeiro, foi utilizada como estudo de caso elaborado a partir da ferramenta desenvolvida. O rio Joana é um dos principais corpos d'água da bacia do Canal do Mangue, apresentando área de drenagem de 12,02 km<sup>2</sup>. A ocupação da bacia é bem diversificada apresentando 50,3% de sua área em encosta, a maior parte com cobertura florestal, e 49,7% em regiões de planície densamente urbanizadas.

O modelo foi calibrado para cada um dos três métodos de separação de chuva efetiva. Dentre estes procedimentos, o que apresentou melhor resultado foi o Método Racional. A Figura 3 mostra a comparação entre a curva ajustada com o modelo e o registro fluviométrico medido durante uam enchente ocorrida em Fevereiro de 2000. Neste gráfico podemos verificar a curva medida (em verde), a curva simulada (em vermelho), e, no alto, o hietograma medido (azul) e a chuva efetiva (em verde claro). Os parâmetros de calibração utilizados foram: tempo de concentração = 50min; coeficiente de depleção = 9000s; e coeficiente de runoff = 0,42; a descarga de base (considerada constante ao longo da simulação) foi estimada em 0,95m<sup>3</sup>/s.

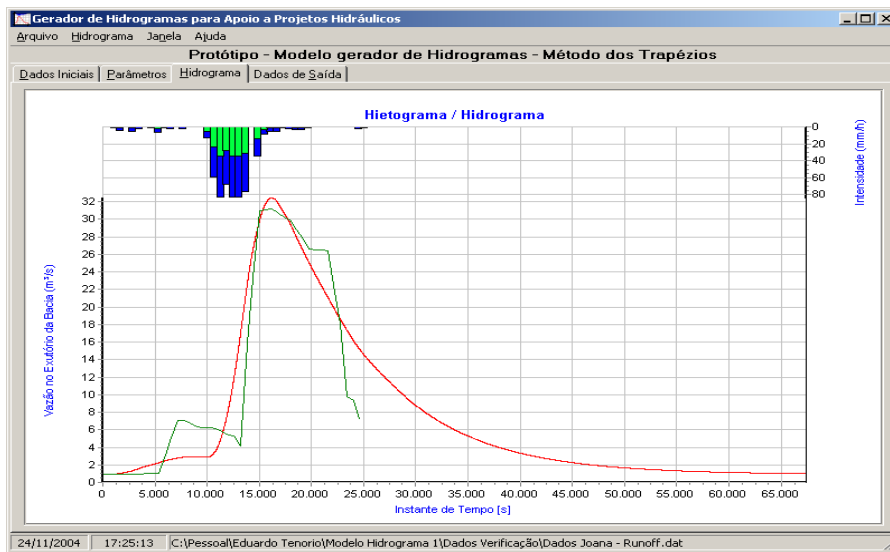


Figura 3: Calibração do modelo considerando a separação da chuva efetiva através do método racional.

Considerando o modelo calibrado foi feita uma simulação para uma chuva de projeto com 20 anos de tempo de recorrência e duração igual ao tempo de concentração da bacia. A Figura 4 mostra o resultado desta simulação.

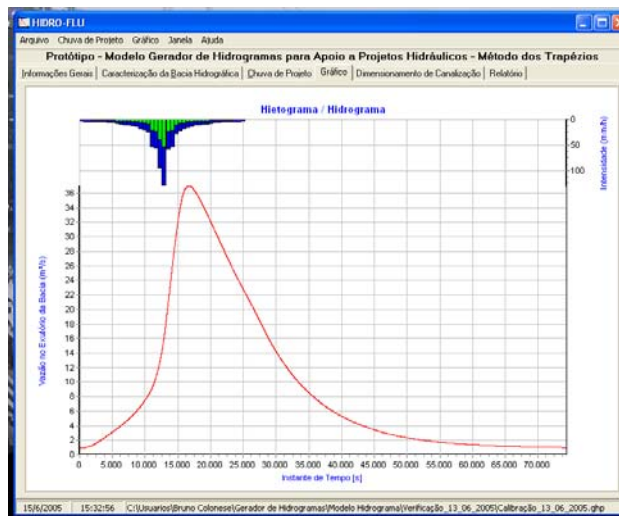


Figura 4: Simulação de uma chuva de 20 anos de tempo de recorrência e duração igual ao  $t_c$  da bacia.

### **Bibliografia**

- CHOW, V. T. (1964). *Handbook of applied Hydrology*. New York. MacGraw-Hill.
- WANIELISTA, M.; KERSTEN, R.; EAGLIN R. (1997). *Hydrology – Water Quantity and Quality Control*. New York. John Wiley & Sons. 567p.
- MAGALHÃES, P. C. (1989). “*Hidrologia Superficial*”, In: *Engenharia Hidrológica*. Rio de Janeiro. Editora da UFRJ. 404p.
- TUCCI, C. E. M. (1993). *Hidrologia – Ciência e Aplicação*. Porto Alegre. Editora da Universidade/UFRGS. 943p.
- ESTEVES, R. L.; MENDIONDO, E. M. (2003). “*Análise Comparativa entre Equações e Observações do Tempo de Concentração em uma Bacia Urbana de São Carlos, Sp*” in Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, Nov. 2003.
- 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, Illinois, E.U.A.
- MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G., (2005), “*Mathematical Modelling of Rural and Urban Floods: a hydraulic approach*”. In: *Flood Risk Simulation*. WIT PRESS, Gateshead.
- PPAFSTETTER, O. (1982). *Chuvas Intensas no Brasil*. Ministério do Interior – Departamento Nacional de Obras de Saneamento. 426p.