



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO – PUC RIO

Eduardo Braga Câmara

Matheus Yuji Takita Barbosa

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE CHEIAS URBANAS NA BACIA
HIDROGRÁFICA DA LAGOA RODRIGO DE FREITAS, COM FOCO NO
BAIRRO DO JARDIM BOTÂNICO**

Rio de Janeiro

Dezembro de 2022

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

Rio de Janeiro

Dezembro de 2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer meus pais que sempre me apoiaram, tendo me ajudado com todos os recursos possíveis para que hoje eu pudesse atingir meus objetivos. Além disso sem eles, eu jamais, seria a pessoa que sou, me ensinando os valores que levarei para o resto da vida.

Gostaria de agradecer minha namorada, Daniela, sem ela eu, provavelmente, não teria completado meu curso de Engenharia Civil, ela sempre esteve muito presente ao meu lado me ajudando, principalmente nos momentos mais complicados, além de ser minha companheira para tudo.

Também gostaria de agradecer nosso orientador, Antonio por ter aceitado nos orientar neste trabalho e por ter ajudado tanto no desenvolvimento do mesmo, não importando a hora ou o dia, sempre estava disponível para nos auxiliar.

Ao Matheus, meu grande amigo, que conheci nos primeiros dias da faculdade e desde então foi meu companheiro dentro e fora da faculdade, sendo minha dupla em, praticamente, tudo. Obrigado e torço pelo seu melhor em sua carreira daqui para a frente.

Também não poderia deixar de agradecer meus amigos, Bruno Soares, Eduardo Grossmann, Leo Ribeiro, Lucas Cabral e Vitor Grund que estiveram comigo desde a época de escola, e que sem dúvida, eu não seria quem eu sou hoje sem eles na minha vida.

Por fim, obrigado a todo corpo docente da PUC-Rio que fez parte, de alguma forma, em minha formação como Engenheiro Civil.

AGRADECIMENTOS

Nesse momento de conquista pessoal, gostaria primeiramente de agradecer aos meus pais, que, em todas as etapas da minha jornada, sempre me incentivaram visando alcançar um objetivo final de me tornar Engenheiro Civil, me permitindo dar o primeiro passo para o início de uma longa carreira profissional. Além disso, sempre me ensinaram valores que as salas de aula não ensinam, no qual levarei para o resto da minha vida.

À minha namorada, que me apoia em tudo desde o ensino médio e sempre me ajudou nos momentos de angústia e ansiedade, me trazendo felicidade a cada instante ao seu lado.

Ao nosso orientador, Antonio que abraçou nossa ideia desde o início, sempre disposto a nos ajudar.

Ao irmão que universidade me deu, Eduardo, que esteve ao meu lado do início ao fim desta graduação, fosse para estudar, fazer trabalhos ou até mesmo para festejar. Tenho toda certeza de que vai ter uma carreira brilhante pela frente.

Aos meus avós, tias, tio, primo e primas, que sempre acreditaram em mim.

Por fim, gostaria também de agradecer a PUC-Rio e todo seu corpo docente.

RESUMO

Cada vez mais torna-se frequente o anúncio, por veículos de imprensa, de desastres naturais relacionados a inundações, enxurradas e alagamentos, que costumam provocar grandes danos materiais podendo até mesmo causar a perda de vidas. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo principal realizar um estudo de caso com diagnóstico das falhas do sistema de drenagem nas áreas críticas da zona urbana do bairro Jardim Botânico e seu entorno, na cidade do Rio de Janeiro. A metodologia utilizada correspondeu a um levantamento de dados pluviométricos, hidrografia e características físicas da região, no qual, com auxílio de ferramentas computacionais, foi possível produzir um modelo e realizar uma simulação hidrodinâmica do evento ocorrido em 9 de abril de 2019. Concluiu-se que, em diversas regiões destacadas, o acúmulo de água foi oriundo do extravasamento dos rios e/ou canais próximos devido a intensidade da chuva de 2019. Outros locais também sofreram com o mesmo transtorno, agravado pela topografia e o subdimensionamento da micro-drenagem local.

Palavras-chaves: Alagamentos Urbanos, Impactos Urbanos, Drenagem Urbana, Chuvas de Alta Intensidade, Modelagem Matemática, Jardim Botânico.

ABSTRACT

It is becoming more and more frequent for press vehicles to announce natural disasters related to floods, which usually cause great material damage and may even cause loss of life. Therefore, the main objective of this work is to perform a case study with the diagnosis of failures in the drainage system in the critical areas of the urban area of the Jardim Botânico and its surroundings, in the city of Rio de Janeiro. The methodology used corresponded to a survey of rainfall data, hydrography and physical characteristics of the region, in which, with the aid of computational tools, it was possible to produce a model and perform a hydrodynamic simulation of the event that occurred on April 9, 2019. It was concluded that, in several highlighted regions, the accumulation of water came from the overflow of nearby rivers and/or channels due to the intensity of the 2019 rain. Other locations also suffered from the same disorder, aggravated by the topography and the under-dimensioning of the local micro-drainage.

Keywords: *Urban Flooding, Urban Impacts, Urban Drainage, High Intensity Rainfall, Mathematical Modeling, Jardim Botânico.*

LISTA DE FIGURAS

- *Figura 1: Nomenclatura base para as falhas no sistema de drenagem urbana*
- *Figura 2: Influência da urbanização desordenada*
- *Figura 3: Número de ocorrência de enxurrada por país: 1974 - 2003*
- *Figura 4: Localização da bacia do Rio dos Macacos*
- *Figura 5: Bacia do Rio dos Macacos*
- *Figura 6: Hidrografia da região*
- *Figura 7: Mapa das isoietas das precipitações médias anuais do estado do Rio de Janeiro*
- *Figura 8: Localização das ruas Jardim Botânico, Lopes Quintas e Pacheco Leão*
- *Figura 9: Rua Pacheco Leão (05/04/2010)*
- *Figura 10: Margem da Lagoa Rodrigo de Freitas (05/04/2010)*
- *Figura 11: Rua Jardim Botânico (20/06/2017)*
- *Figura 12: Rua Jardim Botânico (09/04/2019)*
- *Figura 13: Rua Pacheco Leão (09/04/2019)*
- *Figura 14: Rua General Garzón (01/04/2022)*
- *Figura 15: Logo do QGIS*
- *Figura 16: Logo do ModCel*
- *Figura 17: Tela inicial do QGIS*
- *Figura 18: Tela inicial do ModCel*
- *Figura 19: Divisão da bacia do Rio dos Macacos em células*
- *Figura 20: Modelo da bacia do Rio dos Macacos em células no QGIS*
- *Figura 21: Modelo com o 'Google Satellite' ativo*

LISTA DE FIGURAS

- *Figura 22: Modelo com o arquivo Raster ativo*
- *Figura 23: Escala de cor do Raster*
- *Figura 24: Exemplo do perfil de um dos canais da região*
- *Figura 25: Modelos com as divisões por região*
- *Figura 26: Modelo importado para o programa ModCel*
- *Figura 27: Erros iniciais reportados*
- *Figura 28: Processamento de dados*
- *Figura 29: Resultado das 'manchas' de acúmulo de água na região*
- *Figura 30: Resultado com as regiões destacadas*
- *Figura 31: Inundação em frente ao Shopping da Gávea (1)*
- *Figura 32: Inundação em frente ao Shopping da Gávea (2)*
- *Figura 33: Inundação em frente ao Hospital Miguel Couto*
- *Figura 34: Água invadindo casa de morador da Comunidade do Horto (1)*
- *Figura 35: Água invadindo casa de morador da Comunidade do Horto (2)*
- *Figura 36: Nível de água na altura do peito de um homem na Rua Jardim Botânico*
- *Figura 37: Água quase encobrendo carros na Rua Jardim Botânico*
- *Figura 38: Inundação na Lagoa Rodrigo de Freitas em frente ao Jóquei*
- *Figura 39: Rua Jardim Botânico na altura do Parque Lage*
- *Figura 40: Localização da Região I*
- *Figura 41: Localização do Rio Rainha*
- *Figura 42: Localização da Região II*
- *Figura 43: Trecho analisado do Rio dos Macacos*

LISTA DE FIGURAS

- *Figura 44: Localização da Região III*
- *Figura 45: Localização da Rua Jardim Botânico*
- *Figura 46: Localização da Região IV*
- *Figura 47: Localização do Canal do Jockey*
- *Figura 48: Localização da Região V*
- *Figura 49: Localização do Parque Lage*

LISTA DE GRÁFICOS

- *Gráfico 1: Evolução taxa de urbanização do Brasil (1940-2000)*
- *Gráfico 2: Hietograma do evento de 2019*
- *Gráfico 3: Cotograma do Rio Rainha na Gávea*
- *Gráfico 4: Cotograma do Rio dos Macacos no Horto*
- *Gráfico 5: Cotograma da Rua Jardim Botânico*
- *Gráfico 6: Cotograma do Canal do Jóquei no Jóquei*
- *Gráfico 7: Cotograma do Parque Lage*

LISTA DE TABELAS

- *Tabela 1: Medidas preventivas não-estruturais*
- *Tabela 2: As dez maiores precipitações pluviométricas em 24 horas*
- *Tabela 3: Tabela de atributos das células*
- *Tabela 4: Tabela de atributos das ligações*
- *Tabela 5: Coeficiente de Manning de acordo com o tipo de contudo*
- *Tabela 6: Coeficiente de Manning de acordo com o revestimento do canal*
- *Tabela 7: Coeficiente de Manning de acordo com o tipo de canal*
- *Tabela 8: Coeficiente de Manning de acordo com o curso d'água*
- *Tabela 9: Coeficiente de Manning de acordo com o tipo de superfície*
- *Tabela 10: Estimativa de lâmina de água nas regiões destacadas*
- *Tabela 11: Lâmina de água nas regiões destacadas conforme ModCel*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1.MOTIVAÇÃO	15
1.2.OBJETIVOS	15
1.2.1. OBJETIVO PRINCIPAL	15
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1.O SISTEMA DE DRENAGEM URBANA E MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS	17
2.2. CONCEITOS SOBRE ENXURRADAS, INUNDAÇÕES E ALAGAMENTOS	19
2.3.EFEITOS DO PROCESSO DE URBANIZAÇÃO	21
2.4. IMPACTOS CAUSADOS PELAS ENXURRADAS E INUNDAÇÕES	24
2.5.AÇÕES NÃO-ESTRUTURAIS DE MITIGAÇÃO DE CHEIAS	25
3. ÁREA DE ESTUDO	29
3.1.BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOS MACACOS	29
3.2.CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	31
3.3.HIDROGRAFIA	33
3.4.REGIME PLUVIOMÉTRICO	34
3.5. HISTÓRICO RECENTE DE FALHAS DO SISTEMA DE DRENAGEM NO BAIRRO JARDIM BOTÂNICO	36

3.5.1.	5 DE ABRIL DE 2010	37
3.5.2.	20 DE JUNHO DE 2017	39
3.5.3.	9 DE ABRIL DE 2019	39
3.5.4.	1 DE ABRIL DE 2022	41
4.	METODOLOGIA	42
4.1.	SOFTWARES UTILIZADOS	43
4.1.1.	QGIS.....	43
4.1.2.	MODCEL.....	45
4.2.	DESENVOLVIMENTO DA BASE DE SIMULAÇÃO	46
4.3.	SIMULAÇÃO DO EVENTO	54
5.	ANÁLISE DE RESULTADOS	59
5.1.	DIAGNÓSTICO DO SISTEMA DE DRENAGEM DAS REGIÕES DURANTE O EVENTO DE 2019	66
5.1.1.	REGIÃO I.....	66
5.1.2.	REGIÃO II.....	68
5.1.3.	REGIÃO III	70
5.1.4.	REGIÃO IV	73
5.1.5.	REGIÃO V	75
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
7.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	80

1. INTRODUÇÃO

As enxurradas ou inundações bruscas são provocadas por chuvas intensas e concentradas, que fazem os canais naturais de drenagem transbordarem de forma rápida e, geralmente, provocam danos materiais e humanos mais intensos do que as enchentes ou inundações graduais (IBGE, 2014). De acordo com Poli (2013), um dos fatores que agrava a situação é a urbanização acelerada e mal planejada, com um aumento populacional frenético que causa uma impermeabilização excessiva no solo, o que acaba gerando um maior escoamento superficial da água. Portanto, ao analisar os atuais cenários brasileiros, a urbanização desordenada gerada pela ausência de planejamento traz como consequência, níveis abusivos de degradação ambiental evidentes no cotidiano urbano.

Dessa maneira, o acúmulo excessivo de água nas cidades tem sido intensificado, principalmente nas áreas urbanas densamente ocupadas. Muitas cidades desenvolveram suas malhas urbanas ao longo dos leitos dos rios. Este cenário coloca em risco às populações que, frequentemente, em consequência de chuvas intensas e concentradas, sofre com problemas de inundações e de acúmulo de águas pluviais nas vias urbanas, edificações e demais infraestruturas da cidade.

Há ainda outros fatores que pioram o cenário para centros urbanos densamente ocupados. O estado do Rio de Janeiro, por exemplo, está localizado na zona tropical da borda oriental da América do Sul, fazendo com que tenha uma alta frequência de chuvas durante todo o ano. Das regiões mais afetadas da cidade carioca, está o bairro no qual o presente trabalho visa estudar: o Jardim Botânico. Quase que de forma anual, o bairro da zona sul da cidade sofre com as fortes chuvas. Dentre as piores chuvas que afetaram o bairro está a de 9 de abril de 2019, a qual será analisada no contexto do presente trabalho.

1.1. MOTIVAÇÃO

Os eventos conhecidos popularmente como inundações e alagamentos são fenômenos no qual demandam a atenção de todos, devido aos possíveis impactos. Portanto, perante essa consideração, é de suma importância que as autoridades conheçam as áreas críticas vulneráveis a estas ocorrências, além de conhecer também os potenciais danos, pois somente mediante este reconhecimento é que poderão ser adotadas medidas de mitigação adequadas para cada região.

A motivação de abordar o tema tratado neste trabalho é pelo fato de que, atualmente, as redes de drenagem empregadas na região do bairro do Jardim Botânico se mostram insuficientes em responder adequadamente a eventos de chuva intensa, como foi o caso das chuvas de abril de 2019, no qual os autores do trabalho em questão foram afetados diretamente pelo evento.

Com isso, têm-se a necessidade de serem tomadas medidas por parte dos órgãos competentes, que visem adotar ações corretivas e preventivas, a fim de extinguir os transtornos causados pelas fortes chuvas, não só aos moradores do bairro, mas para toda a Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO PRINCIPAL

O presente trabalho visa realizar um diagnóstico de falhas do sistema de drenagem durante o evento ocorrido no dia 9 de abril de 2019, por meio da utilização de ferramentas computacionais, nas áreas críticas da zona urbana de alguns bairros da zona sul do Rio de

Janeiro, com foco no bairro Jardim Botânico, no qual foram passíveis à ocorrência de fenômenos como inundações e alagamentos.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo principal do trabalho propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- I. Levantar dados históricos recentes referentes a eventos de enxurradas, inundação e alagamento registrados nas áreas urbanas do bairro Jardim Botânico;
- II. Coletar dados da área de estudo, como por exemplo características físicas da bacia que compõe a região e seus índices pluviométricos;
- III. Utilizar dados coletados no item I e II para calibrar o modelo de estudo, com o propósito de se obter um modelo fidedigno a ser utilizado como ferramentas computacional de simulação hidrodinâmica;
- IV. Definir e qualificar todas as áreas críticas encontradas dentro do bairro, a partir dos dados históricos levantados e das simulações realizadas para o evento de referência, obtendo um diagnóstico preliminar do funcionamento do sistema de macrodrenagem da área de estudo;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Irá se discutir neste capítulo sobre conceitos básicos sobre o sistema de drenagem urbana e de enxurradas, inundações e alagamentos e as consequências trazidas por estes eventos. Além disso, será apresentado os possíveis efeitos causados pela urbanização acelerada e mal planejada. Por fim, será mostrado ações não-estruturais com o objetivo de mitigar cheias.

2.1. O SISTEMA DE DRENAGEM URBANA E MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS

Os ambientes urbanos consolidados necessitam de uma série de providências relacionadas ao controle de escoamento da água pluvial antes de desbocar em um corpo receptor (TUCCI, 2007).

Por um longo período, as ações nas linhas de escoamento pluvial urbano seguiram técnicas consideradas “tradicional”.

De acordo com Pompêo (2000), na década de 1960, passou-se a questionar a drenagem urbana realizada de forma tradicional que simplesmente transferia o problema para outras áreas a jusante ou para o futuro, por meio de obras dedicadas à remoção de água de regiões consideradas mais importantes. Diante disso, os projetos de sistemas de drenagem tradicional focam no controle da própria calha do curso d’água, destinadas à melhoria do fluxo em rios e canais, concretizadas através de cortes de meandros, retificações e mudanças de declividade de fundo, dando pouca importância às questões relacionadas ao escoamento gerado nas superfícies urbanizadas (POMPÊO, 2000).

De acordo com Nascimento *et al.* (1997), nas últimas décadas foram apresentadas diferentes formas de abordar o manejo de águas pluviais. As planícies de inundação

passaram a ser objeto de planejamento, sofrendo restrições quanto à ocupação e ao tipo de obras, visando principalmente garantir a área da seção de escoamento e minimizar as perdas de carga hidráulicas em decorrência de ações antrópicas nestas áreas. Foram então introduzidas as denominadas “medidas compensatórias” que buscam compensar os efeitos da urbanização, atuando sobre os processos hidrológicos e visando à redução de volumes ou vazões, em diferentes concepções quanto ao porte e localização das obras.

De acordo com Pompêo (2000), em relação a gestão de recursos hídricos, a gestão da água no meio urbano deve ser tratada como um caso particular. Além disso, o planejamento de atividades urbanas relacionadas à água deve estar integrado ao próprio planejamento urbano, incluindo-se aqui o desenho da malha urbana e sua expansão, o zoneamento de atividades, a rede viária e de transportes.

Em relação ao dimensionamento das estruturas de drenagem urbana, vale destacar que o sistema é calculado para funcionar à superfície livre, isto vale tanto para canalizações abertas como para galerias de drenagem fechadas, ou seja, o sistema manejo de águas pluviais não é dimensionado para trabalhar sob pressão (MIGUEZ *et al.*, 2015). Algumas considerações para o dimensionamento de drenagem podem ser utilizadas como premissas, como o fato de, em alguns casos, o regime ser permanente e uniforme.

O regime permanente se caracteriza por levar em conta um escoamento no qual as variações de tempo são desconsideradas, enquanto o regime uniforme desconsidera as variações no espaço. Estas ponderações são suficientes para grande parte do dimensionamento dos sistemas de drenagem, porém, em alguns casos contando o fator da declividade, da existência de obras a jusante ou até mesmo para regiões de baixada costeira sob influência da sobre-elevação do nível do mar ou de estuários é fundamental o dimensionamento dos sistemas de drenagem à não uniformidade dos escoamentos, uma vez que os cursos da água estarão sobre influência de remanso (TUCCI, 1995).

2.2. CONCEITOS SOBRE ENXURRADAS, INUNDAÇÕES E ALAGAMENTOS

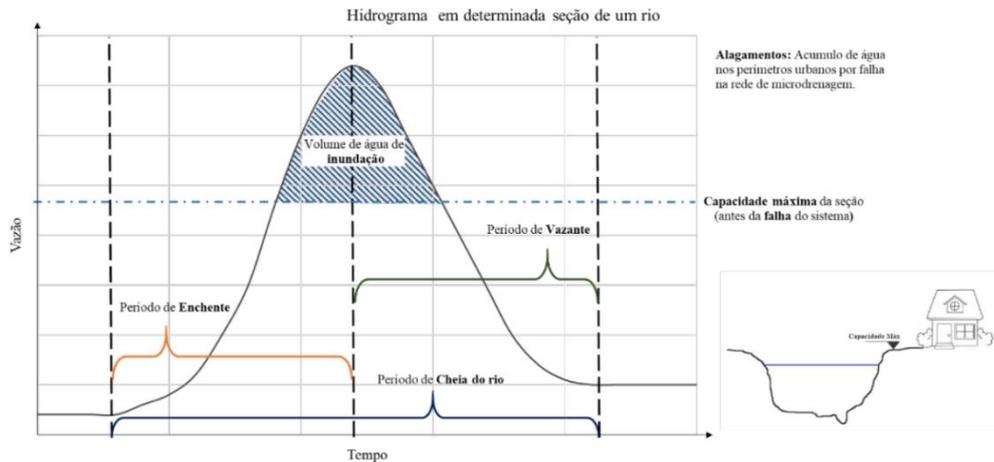
De acordo com Carvalho *et al.* (2007), enxurradas e inundações são eventos de natureza hidrometeorológica classificados como uns dos desastres naturais que mais consternam as comunidades, sendo elas rurais ou urbanas em diversas regiões do globo terrestre. Estes fenômenos podem ocorrer por diversas razões, sendo ainda possível serem acentuados ainda mais devido as alterações ambientais e intervenções urbanas produzidas pelo ser humano, entretanto são frequentemente ligados a chuvas intensas de longa duração, em bacias pequenas.

Os problemas relacionados a enxurradas e inundações no Brasil estão presentes na grande maioria das cidades brasileiras, sendo as regiões metropolitanas as mais vulneráveis. Isso se deve ao elevado número de núcleos habitacionais em regiões irregulares, ocupando terrenos marginais de cursos d'água (CARVALHO *et al.*, 2007).

As diferenças entre os conceitos de “inundação” e “enxurradas” podem ser estabelecidas a partir do grau de confinamento das águas de um corpo hídrico no seu canal de drenagem. Portanto, é necessário compreender que o regime hidrológico desses fenômenos é dinâmico, no qual em um mesmo curso d'água pode haver trechos tanto com enxurradas quanto inundações.

No Brasil, por questões regionais, é comum ter diferentes termos como “cheia” e “alagamento”, entre outros, para se referir a um evento de inundação. Porém, a utilização destas expressões muitas vezes é feita de forma equivocada. Pela Figura 1, pode-se entender de forma mais simples a diferença entre inundações, enxurradas e alagamento.

Figura 1: Nomenclatura base para as falhas no sistema de drenagem urbana



Fonte: Oliveira, 2018.

De acordo com Carvalho *et al.* (2007), é possível ter um melhor esclarecimento do que representa cada termo associado às inundações:

- Enxurrada: comumente conhecidas como “cheias”, ocorrem quando há um aumento da vazão ou descarga de um curso d’água, devido a períodos de grande incidência de chuva, ocasionando o aumento do nível d’água até suas margens, entretanto não transbordam para áreas marginais onde costuma se concentrar a maior parte da população ribeirinha.
- Inundações: trata-se de um processo de extravasamento das águas de um canal de drenagem para as áreas marginais, ou seja, a água atinge uma cota acima do nível máximo da calha principal do rio e transborda para áreas adjacentes.

- Alagamentos: acúmulo de água momentânea em determinados pontos devido a incompetência dos sistemas de drenagem, no qual pode ou não ter relação com processos de natureza fluvial. Portanto, em casos em que há a ocorrência de intensas precipitações, os sistemas de drenagem deficientes não dão conta de escoar toda água, gerando desta maneira o acúmulo de água chamado de alagamento.

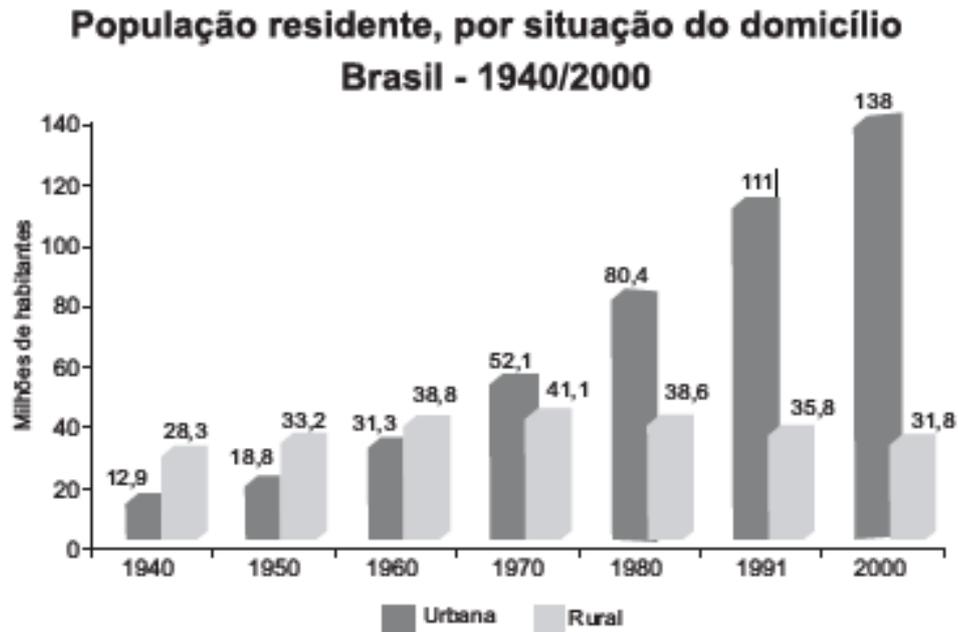
2.3. EFEITOS DO PROCESSO DE URBANIZAÇÃO

Dentre as representações mais expressivas e significativas de manifestações de atividades antropológicas, encontra-se o processo de urbanização. É possível dividir este processo em três grandes etapas: pré-industrial, industrial e atualmente o das comunicações. Por volta do século XIX, apenas 1% da população vivia nas cidades, onde então o efeito associado à revolução industrial se espalharia gerando o aumento global da urbanização em um ritmo acelerado (TUCCI *et al.*, 2003).

As construções de moradias, o desmatamento, a impermeabilização do solo advinda da construção de ruas e calçamentos, a poluição das águas causando o assoreamento dos rios, as canalizações dos cursos d'água, a obstrução dos sistemas de drenagem pelo lixo, são algumas das diversas alterações que ocorrem no meio natural resultado das atividades nas cidades. Todas essas ações são sentidas mais tarde pela própria população causadora de grande parte deste infortúnio, tais como o aumento da temperatura nos centros urbanos, o aumento de chuvas, e, por fim, resultando em enxurradas e inundações (POLI, 2013).

O Gráfico 1 ilustra a evolução da população urbana no Brasil desde a década de 40 até os anos 2000.

Gráfico 1: Evolução taxa de urbanização do Brasil (1940-2000)



Fonte: Tendências demográficas, 2000. IBGE, 2001.

De acordo com Miguez *et al.* (2012), uma bacia hidrográfica têm, por natureza, uma configuração equilibrada e harmônica com vários elementos, que quando combinados, estabelecem um determinado escoamento superficial. Entretanto, com a presença deste novo coeficiente (a urbanização) o desmatamento torna-se antagonista, acabando com a composição natural da bacia. As áreas planas, mais próximas aos rios são as primeiras a sofrerem ocupação. Em seguida o processo de urbanização amplia na direção das encostas.

De acordo com Enomoto (2004), por volta do início do século XX surgia a ideia de separar as águas pluviais dos esgotos por questões sanitárias, fazendo uso de modelos matemáticos, hidrológicos e hidráulicos em conceitos “herdados” do século passado sobre os sistemas de drenagem urbana. Porém, como resultado da intensa urbanização, após a década de 50, percebeu-se uma crise nesses sistemas e suas consequências repercutem até os dias de hoje.

Como o crescimento da densidade populacional de uma região acarreta problemas na quantidade de demanda de água para abastecimento público, geração de resíduos sólidos, poluição de rios e lençol freático, deterioração da qualidade do ar, da qualidade dos corpos d'água, gerando problemas de poluição ambiental. Por sua vez, o aumento de áreas construídas e edificadas, obras de infraestrutura viária trazem como consequência o aumento de áreas impermeáveis, alterando o sistema de drenagem que existia antes e incrementando a velocidade e o volume de escoamento superficial (ENOMOTO, 2004). A Figura 2 mostra um esquema resumido das influências e consequências de uma urbanização desordenada.

Figura 2: Influência da urbanização desordenada



Fonte: Costa (2012, p. 74).

Além disso, a urbanização acaba trazendo como consequência obras de infraestrutura, como as ruas e calçadas que acabam invadindo espaços que antes eram utilizados pela

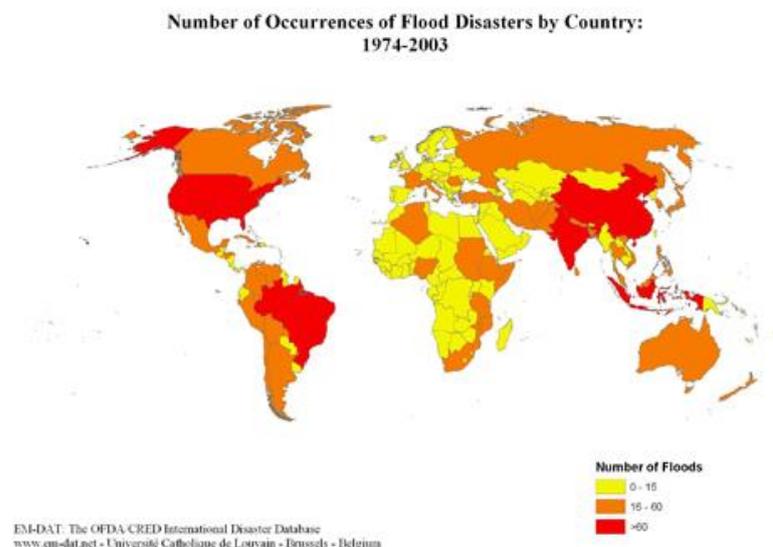
natureza para comportar a água em picos de cheias, que sem espaço para se acomodar, buscam outros caminhos para áreas que antes não eram alagáveis (MIGUEZ *et al.*, 2012).

2.4. IMPACTOS CAUSADOS PELAS ENXURRADAS E INUNDAÇÕES

Eventos como enxurradas e inundações podem acabar gerando inúmeros impactos sobre as áreas urbanizadas. Oliveira (2022) destaca que o processo de urbanização e o manejo de águas pluviais urbanas, quando não pensados de maneira sinérgica, criam um ciclo de degradação no qual a cidade cresce realizando modificações na bacia hidrográfica sem respeitar o espaço das águas, e isso acarreta frequentemente em inundações, que acabam impactando novamente a cidade ocasionando a ruptura de serviços urbanos e gerando perdas econômicas.

Os fenômenos de inundações costumam afetar com frequência não só o Brasil, mas vários locais do mundo, conforme ilustrado pela Figura 3, no qual destaca-se o território brasileiro por possuir mais de 60 ocorrências de enxurradas nos períodos entre 1974 e 2003.

Figura 3: Número de ocorrência de enxurradas por país: 1974 - 2003



Fonte: EM-DAT – *The International Disaster*

Os impactos estão associados a problemas em todas as esferas, sendo elas econômicas ou sociais. Os danos econômicos são muito perturbadores para a gestão urbana, já que interferem e dependem dos recursos provenientes dos cofres públicos que podem ou não ser destinados a este tipo de investimento. Já no âmbito social, a perda de bens dos habitantes é um infortúnio enorme, assim como a exposição a doenças ou até mesmo a perda de vidas.

De acordo com Carvalho *et al.* (2007), estes efeitos negativos causados por estes fenômenos podem ser classificados como diretos e indiretos. Os danos diretos englobam mortes por afogamento, destruição total ou parcial das moradias, danos materiais de patrimônio público e privado, gastos com recuperação, entre outros. Já os danos indiretos incluem as doenças que são transmitidas a população por meio de água contaminada, como por exemplo leptospirose, febre tifoide, hepatite e cólera.

2.5. AÇÕES NÃO-ESTRUTURAIS DE MITIGAÇÃO DE CHEIAS

As dificuldades causadas pelas enxurradas, inundações e alagamentos, são problemas crônicos que atingem muitas cidades brasileiras, com destaque para a cidade do Rio de Janeiro. Ano após ano, são tomadas medidas paliativas na tentativa de minimizar e combater estes eventos.

Kobiyama *et al.* (2006) dizem que não é possível evitar as catástrofes da natureza de agirem, porque está além da capacidade humana de controlá-la, porém, nada impede que a prevenção diminua os efeitos da mesma.

Kobiyama *et al.* (2006) afirmam que "as medidas não-estruturais geralmente envolvem ações de planejamento e gerenciamento, como sistemas de alerta e zoneamento ambiental." A infraestrutura necessária para a operosidade humana deve ser implantada de acordo com

um zoneamento ambiental, levando em conta a probabilidade de ocorrência de riscos ambientais através do mapeamento das áreas de risco. De acordo com o risco ao qual uma determinada região está submetida, são também definidas suas restrições de uso.

O controle de eventos como este consiste em um conjunto de medidas preventivas, no qual tem como meta a mitigação dos riscos impostos às populações, minimizando, desta maneira, os prejuízos causados e possibilitando o desenvolvimento urbano de maneira harmoniosa, estruturada e sustentável (ENOMOTO, 2004).

Conforme Enomoto (2004) descreve, como representado na Tabela 1, tem-se exemplos de medidas preventivas não-estruturais simplistas e seus respectivos objetivos com a aplicação de cada um dos métodos.

Tabela 1: Medidas preventivas não-estruturais

Medida	Características	Objetivos
Plano Diretor	Planejamento das áreas a serem desenvolvidas e a densificação das áreas atualmente loteadas	Evitar ocupação sem prevenção e previsão
Zoneamento	Conjunto de regras para a ocupação das áreas de maior risco de inundação. É incorporado ao Plano Diretor.	Visa à minimização futura de perdas materiais e humanas em face das grandes cheias.
Controle de desmatamento	Além do controle do desmatamento, o reflorestamento deve ser feito em todos locais possíveis.	Prevenir a erosão e o assoreamento.
Educação Ambiental	Para ser realizado junto à população. A conservação das margens dos arroios, sua vegetação típica e taludes são essenciais.	Conscientizar a população que sofre ou poderá sofrer com as inundações
Medidas de apoio à população	Lugares seguros para preservar a pessoa, a família e trabalhos. Construção de abrigos temporários, meios de evacuação, patrulhas de segurança.	Inserir nos possíveis atingidos pelas inundações um senso de proteção
Distribuição de informação sobre as enchentes	Programa de orientação da população sobre as previsões de enchentes para que ela aprenda a se prevenir contra as cheias.	Aprimorar a qualidade da assistência externa e a reduzir falhas como a falta de informações, a má avaliação das necessidades e formas inadequadas de ajuda.
Reassentamento	Reassentamento de residentes ilegais ocupantes das margens de rios, e de áreas de enchente.	Retirar a população dos locais de risco.
Soluções de mitigação	Promover o aumento das áreas de infiltração e percolação e armazenamento temporário.	Aumentar a eficiência do sistema de drenagem à jusante e da capacidade de controle de enchentes dos sistemas
Sistemas de alerta	Sistema utilizado para prevenir a população com antecedência de curto prazo, em eventos mais raros.	Ajudar no controle das estruturas hidráulicas no sistema do rio, e evitar o pânico.
Construções a prova de enchentes	Pequenas adaptações nas construções.	Reduzir as perdas em construções localizadas nas várzeas de inundação.
Seguro contra enchentes	Proteção econômica contra inundações.	Diminuir os prejuízos individuais causados pelas inundações
Sistemas hidrológicos	Histórico hidrológico da bacia e modelos que mostram o comportamento hidráulico e hidrológico do sistema do rio.	Fornecer subsídios para os estudos de comportamento da bacia, assim como previsão de cenários futuros.

Fonte: Enomoto (2004, p. 12).

De acordo com Poli (2013), as melhores alternativas preventivas para encontrar a saída para estes problemas são, principalmente, as institucionais, isto é, intensificar a fiscalização feita pelos órgãos municipais e estaduais quanto a ocupação do solo e a utilização dos recursos hídricos, dando enfoque a um planejamento urbano coerente que respeite as áreas de várzeas e encostas.

Tucci (2007) enfatizava que quando uma população sofre com inundações, acaba cobrando de seus representantes soluções estruturais como a construção de barragens, diques, canalizações. Entretanto, muitas vezes, o governo não tem como arcar com o alto custo de implementação destes projetos. Portanto, é possível que as administrações estaduais não estejam preparadas técnica e financeiramente para conseguir mitigar este problema.

Há muitos municípios que não compreendem aspectos de prevenção contra ocupação de áreas de risco de enxurradas e inundações nos seus Planos Diretores Urbanos e as consequências dessa falta de planejamento e regulamentação são sofridas em diversas cidades de médio e grande porte do país. Depois que as áreas estão todas ocupadas, as soluções ficam mais difíceis e caras. Logo, devido essa falha no controle da ocupação desses espaços, o poder público passa a destinar grande parte do orçamento à proteção de uma parcela da cidade que é atingida, fundos esses sustentados por impostos pagos por toda a população (TUCCI, 2007).

3. ÁREA DE ESTUDO

A área foco de estudo do presente trabalho é o bairro do Jardim Botânico. O presente capítulo apresenta a principal bacia hidrográfica da região, a bacia do Rio dos Macacos, trazendo elementos a respeito de sua localização, suas características físicas e hidrográficas, bem como informações a respeito do regime pluviométrico.

Adicionalmente, o último tópico deste capítulo apresenta um histórico dos principais eventos pluviométricos que ocasionaram falhas no sistema de drenagem da região de estudo.

3.1. BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOS MACACOS

De acordo com Miguez *et al.* (2012), a bacia hidrográfica do Rio dos Macacos se encontra na sub-bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, que faz parte da sub-bacia da Zona Sul, no município do Rio de Janeiro, como mostra a Figura 4. A bacia, engloba partes dos bairros Jardim Botânico, Lagoa, Alto da Boa Vista e Gávea, com um total de mais de 300 mil habitantes. Além disso, os bairros do Jardim Botânico e da Lagoa possuem uma das maiores rendas per capita do município do Rio de Janeiro.

Botânico também sofriam as influências da Bacia e Lagoa, considerou-se necessário incluí-las no estudo para entender melhor o problema que afeta o bairro do Jardim Botânico.

3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Com relação às características físicas da bacia, seu relevo é composto por maciços e baixadas litorâneas. A maior parte de sua área é ocupada pela encosta da serra que, ao longo de seu percurso, recebe diferentes nomes, como Maciço da Tijuca, Serra do Corcovado e Serra da Carioca. Na área onde engloba o morro do Sumaré, a elevação atinge mais de 70 metros, a serra decai rapidamente até a Lagoa Rodrigo de Freitas. Além disso, a encosta da bacia possui diversas florestas, situadas nas Paineiras, na estrada do Sumaré, no Vale do rio dos macacos e, a mais famosa de todas, a Floresta da Tijuca (MIGUEZ *et al.*, 2012).

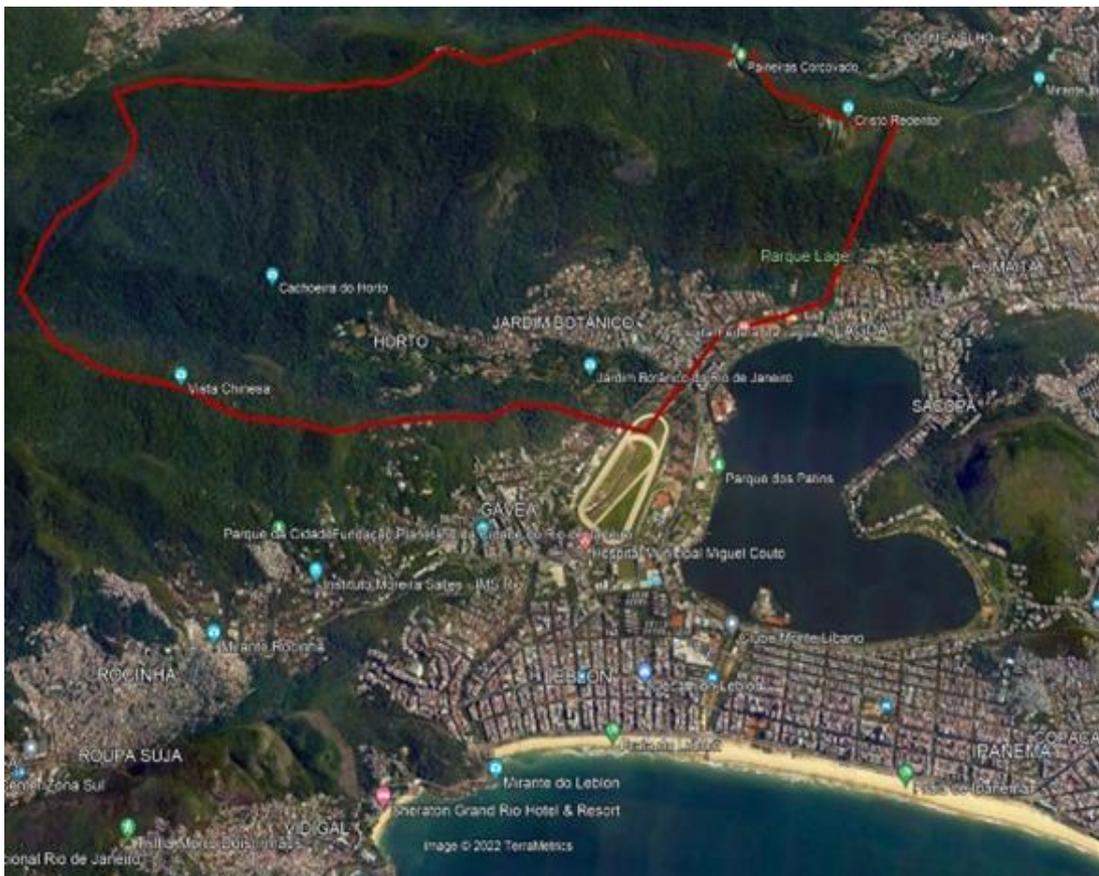
Conforme Miguez *et al.* (2012), a bacia do Rio dos Macacos (Figura 5) possui cerca de 9,07 km² de área de drenagem, declividade média de 0,05894 m/m e percentual de cobertura vegetal de 40%. O fato de estar próximo de encostas, além da transição brusca para áreas de baixada, intensificada por aterros, faz com que haja uma maior tendência de ocorrência de escoamentos rápidos chegando às planícies, podendo gerar alagamentos devido a mudança de declividade. O rio principal da bacia é o Rio dos Macacos, com cerca de 4,46 km. Sua nascente fica na região mais alta da encosta, enquanto seu exutório fica na Lagoa Rodrigo de Freitas. Vale ressaltar que o Rio dos Macacos recebe a contribuição de diversos córregos por sua margem esquerda, vindos das vertentes do maciço da Tijuca.

Segundo Miguez *et al.* (2012), outro fato importante é a contribuição de seu principal afluente, o Rio Cabeça, que na Rua General Garzón, aflui ao curso principal em confluência. Pela margem direita, próximo ao exutório, ocorre uma possível transposição de vazões entre a bacia do Rio dos Macacos e a bacia do Rio Rainha, pois o canal que chega

ao Jockey Clube Brasileiro liga as duas bacias e em condições de cheia e, dependendo da intensidade em cada bacia, as vazões do Rio Rainha podem chegar ao Rio dos Macacos, ou também o Rio dos Macacos pode desaguar na praia do Leblon.

A urbanização na área da bacia se desenvolve nas áreas mais baixas e planas, além de possuir uma extensa faixa de área impermeabilizada entre a Lagoa Rodrigo de Freitas e o maciço da Tijuca. Além disso, na ocorrência de chuvas intensas, essas áreas mais baixas costumam ficar alagadas, principalmente a Rua Jardim Botânico, pelo fato de sua rede de drenagem ser insuficiente (MIGUEZ *et al.*, 2012).

Figura 5: Bacia do Rio dos Macacos

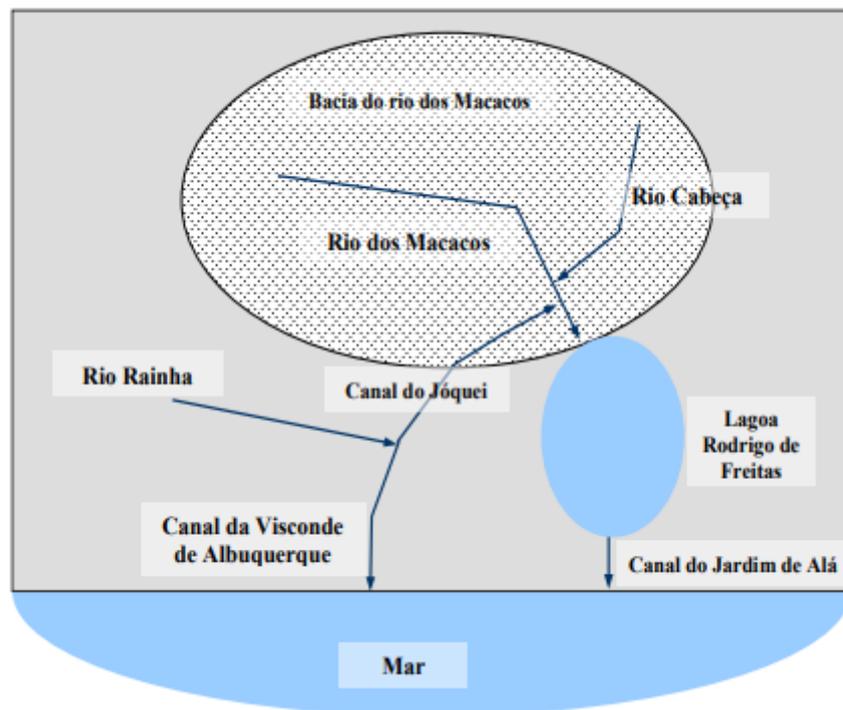


Fonte: Autores.

3.3. HIDROGRAFIA

A Figura 6, além da bacia do Rio dos Macacos, representa outros cursos d'água, que também serão estudados. A hidrografia da região engloba 7 sub-bacias, dentre essas as principais são as do Rio do Pai Ricardo e do Rio Cabeça, no qual ambas possuem áreas superiores a 1,4 km². Além disso, o escoamento superficial das duas sub-bacias é o mais significativo. Vale ressaltar que alguns dos rios que fazem parte dessas sub-bacias não deságuam diretamente no Rio dos Macacos, esse é o caso dos rios Algodão e Cabeça, que escoam por galerias e saem em outros canais para depois desaguar no principal rio da bacia (MIGUEZ *et al.*, 2012).

Figura 6: Hidrografia da região



Fonte: Miguez *et al.* (2012, p. 15).

3.4. REGIME PLUVIOMÉTRICO

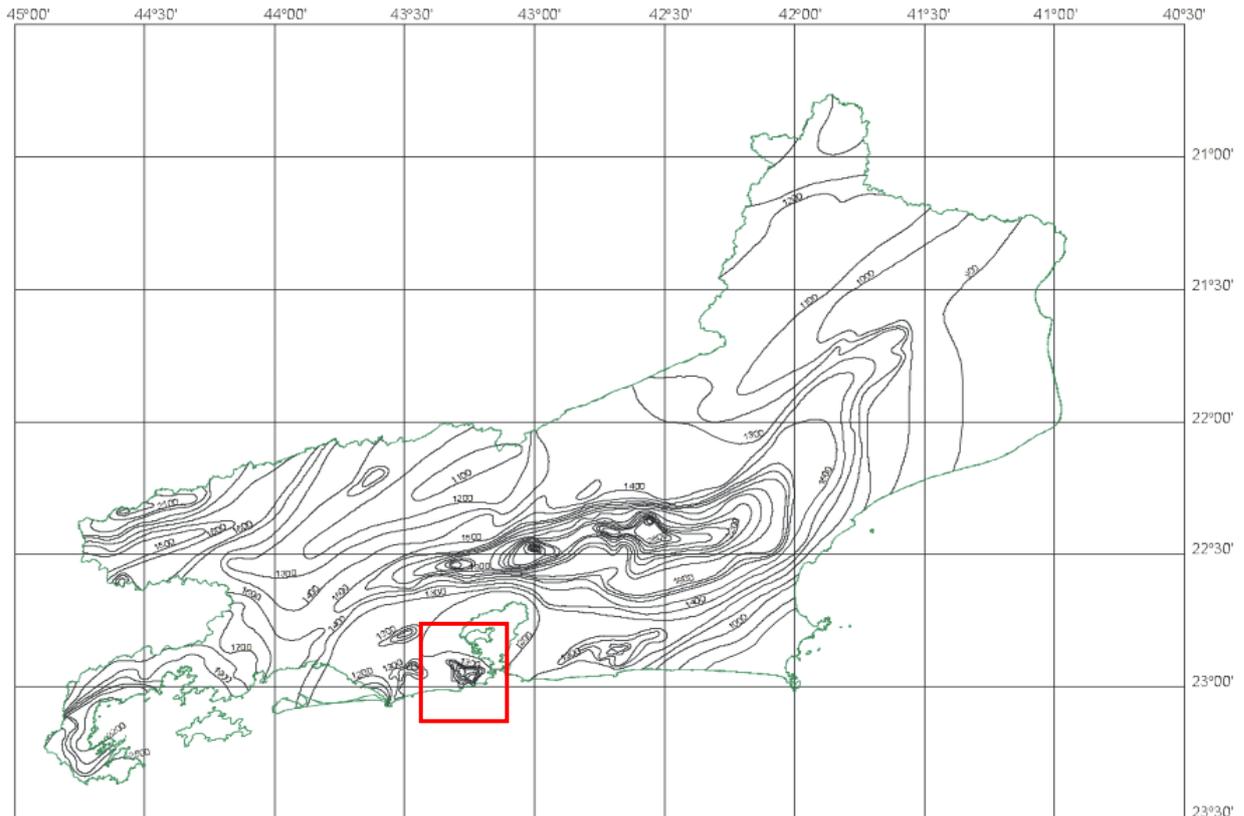
De acordo com Davis *et al.* (2000), por estar localizado na Região Sudeste do Brasil, o Estado do Rio de Janeiro está sobre domínio da massa Tropical Atlântica e os fatores responsáveis pelo comportamento pluviométrico da Região Sudeste são: estáticos, no qual inclui localização geográfica e topografia, e dinâmicos, no caso, a massas de ar.

Dentre os fatores estáticos está que a posição na borda oriental do continente sul-americano expõe a Região Sudeste ao fluxo meridional de ar frio oriundo do Polo Sul sobre as águas quentes do oceano, o que acaba fomentando uma maior frequência de invasões de frentes frias e de linhas de instabilidade tropicais. Sua posição marítima confere às camadas de ar que lhe estão superpostas maior densidade de núcleos de condensação. Já os fatores dinâmicos, a massa Tropical Atlântica, de divergência anticiclônica, possui elevada temperatura, causada pela intensa radiação solar das latitudes tropicais e pela forte umidade específica, proveniente da intensa evaporação marítima. Em condições normais, essa massa de ar atua na região com ventos geralmente de noroeste (NE) na superfície do solo, com inversão térmica superior, sobre a qual sopram ventos descendentes, ambos se dirigindo para as baixas subpolares. Nessas condições, o tempo permanece estável e com pouca nebulosidade. Entretanto, essa circulação zonal é frequentemente perturbada pela circulação meridiana dos anticiclones móveis de origem polar (DAVIS *et al.*, 2000).

Portanto, de acordo com Davis *et al.* (2000), dois fatores estáticos devem ser destacados: a posição latitudinal e a localização na borda do oceano. Essa posição confere ao estado do Rio de Janeiro fortes níveis de radiação solar. Já a localização do Estado do Rio de Janeiro, na zona tropical da borda oriental da América do Sul, sob a trajetória preferida das correntes perturbadas, confere uma boa frequência de chuvas ao longo do ano.

O mapa das isoietas das precipitações médias anuais apresentado na Figura 7 ilustra a distribuição da chuva ao longo do estado do Rio de Janeiro.

Figura 7: Mapa das isoietas das precipitações médias anuais do estado do Rio de Janeiro



Fonte: Davis et al. (2000, p. 8)

Com a Figura 7, é possível observar que um dos pontos com maior índice de precipitação está localizado na Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro, o que pode ser caracterizado como um dos locais com um regime pluviométrico mais intenso da região.

Em relação ao comportamento das chuvas intensas na região, vale destacar o trabalho publicado no manual de “INSTRUÇÕES TÉCNICAS PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS HIDROLÓGICOS E DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA” fornecido pela Fundação Rio-Águas. No documento é

possível obter a equação de chuvas intensas que relaciona intensidade, duração e frequência (IDF), válida para o bairro Jardim Botânico. A Equação 1 apresenta a equação IDF construída para representar as chuvas intensas da região.

$$i = \frac{1239 \cdot Tr^{0,15}}{(t + 20)^{0,740}}$$

Na qual:

i = intensidade pluviométrica em mm/h;

Tr = tempo de recorrência em anos;

t = tempo de duração da precipitação em minutos.

3.5. HISTÓRICO RECENTE DE FALHAS DO SISTEMA DE DRENAGEM NO BAIRRO JARDIM BOTÂNICO

Todos os anos, sobretudo na época do verão, as fortes chuvas que atingem o estado do Rio de Janeiro geram diversos transtornos à população devido à ocorrência de inundações. Dentre as áreas mais afetadas, está o bairro Jardim Botânico da Zona Sul, no qual, quase que de forma anual, a população e infraestrutura urbana são prejudicados pelo acúmulo de água em diversos pontos da região. Esta retenção de água é vista em maior proporção principalmente nas ruas Pacheco Leão, Jardim Botânico e Lopes Quintas (Figura 8).

Figura 8: Localização das ruas Jardim Botânico, Lopes Quintas e Pacheco Leão



- Rua Jardim Botânico
- Rua Lopes Quintas
- Rua Pacheco Leão

Fonte: Autores.

3.5.1. 5 DE ABRIL DE 2010

As chuvas do dia 5 de abril do ano de 2010 tiveram o início ainda de madrugada e se estendeu durante todo o dia, até o dia 6. As cidades do Rio de Janeiro e Niterói foram as mais afetadas. Niterói, chegou a ter 47 mortos e centenas de desabrigados por conta de um deslizamento ocorrido no Morro do Bumba. Entre os locais afetados, também estava o Jardim Botânico, como mostram a Figura 9 e 10, que chegou a registrar 303,0 mm de chuva no bairro em 24 horas, de acordo com o Alerta Rio.

Figura 9: Rua Pacheco Leão (05/04/2010)



Fonte: Memória Globo.

Figura 10: Margem da Lagoa Rodrigo de Freitas (05/04/2010)



Fonte: Memória Globo.

3.5.2. 20 DE JUNHO DE 2017

Apesar de ser uma das chuvas menos intensas do levantamento realizado, a chuva ocorrida no dia 20 de junho de 2017 deixou inúmeras ruas alagadas, como ilustrado na Figura 11, principalmente nos bairros da Zona Sul do Rio de Janeiro. Segundo o Alerta Rio, a chuva registrada de 2017 chegou a 188,6 mm no bairro do Jardim Botânico em 24 horas.

Figura 11: Rua Jardim Botânico (20/06/2017)



Fonte: G1.

3.5.3. 9 DE ABRIL DE 2019

As chuvas que caíram sobre a capital fluminense do dia 9 de abril de 2019, registraram recordes históricos em seis bairros do Rio de Janeiro, incluindo o Jardim botânico, conforme Tabela 2. O evento, ilustrado nas Figuras 12 e 13, deixou 10 pessoas mortas, sendo 7 delas na Zona Sul do Rio. De acordo com dados do sistema do Alerta Rio, o Jardim Botânico teve a pior chuva já registrada no bairro em 22 anos, alcançando 334,4 mm em 24 horas.

Tabela 2: As dez maiores precipitações pluviométricas em 24 horas

As Dez maiores precipitações pluviométricas em 24 horas.				
ID	Estação	mm/24h	Data	Hora
103	Sumaré	360,2	06/04/2010	17:35
3	Rocinha	343,4	09/04/2019	15:00
28	Alto da Boa Vista	341,2	09/04/2019	16:15
17	Barra/Barrinha	335,2	09/04/2019	15:00
16	Jardim Botânico	334,4	09/04/2019	15:00
6	Copacabana	329,4	09/04/2019	15:30
1	Vidigal	312,2	09/04/2019	14:45
19	Barra/Riocentro	311,4	09/04/2019	15:00
20	Guaratiba	310,6	01/04/2022	20:55
18	Jacarepaguá/Cidade de Deus	289,6	09/04/2019	16:00

Fonte: Alerta Rio.

Figura 12: Rua Jardim Botânico (09/04/2019)



Fonte: G1.

Figura 13: Rua Pacheco Leão (09/04/2019)



Fonte: G1.

3.5.4. 1 DE ABRIL DE 2022

A chuva mais recente a afetar o bairro até então, como mostra a Figura 14, ocorreu durante o primeiro dia de abril de 2022, no qual, segundo o Alerta Rio, houve uma precipitação de 217,8 mm em 24 horas. De acordo com o Eduardo Paes, responsável pela Prefeitura em 2022, estima-se que a altura da água na rua Jardim Botânico tenha chegado por volta de 1,1 metros.

Figura 14: Rua General Garzón (01/04/2022)



Fonte: G1.

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada para a elaboração do presente trabalho consistiu na execução de duas etapas principais. Na primeira etapa, realizada no *software* QGIS (Figura 15), constituiu-se no aprimoramento da base de dados elaborada para representação da bacia em modelo matemático da bacia hidrográfica da região em análise.

Figura 15: Logo do QGIS



Fonte: QGIS.

Já a segunda etapa, feita no *software* Modelo de Células de Escoamento (ModCel) (Figura 16), consistiu na simulação dos eventos de chuva no modelo em questão.

Figura 16: Logo do ModCel



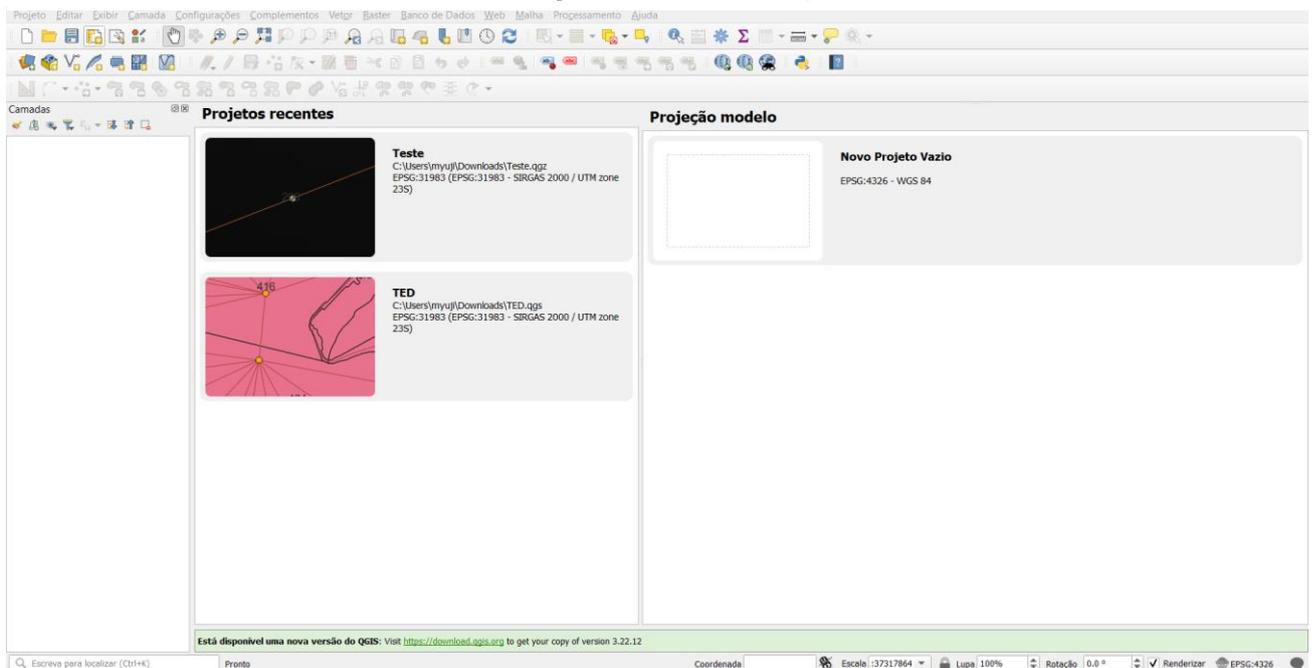
Fonte: UFRJ.

4.1. SOFTWARES UTILIZADOS

4.1.1. QGIS

O software “*Quantum Geographic Information System*” (QGIS), chamado inicialmente de *Quantum GIS*, foi criado no início do ano de 2002. Dentre as possíveis funções de se utilizar no *software* incluem: desenhar mapas de elevação, interpolação de dados, gerar curvas de nível e criar contornos de terreno que podem ser vistos na tela (Figura 17) (WING *et al.*, 2003).

Figura 17: Tela inicial do QGIS



Fonte: Autores.

Até a década de 1970, era comum no dia a dia de milhares de pesquisadores analisar dados representados por gráficos desenhados à mão. O interesse era agregar e armazenar várias informações e relatórios relacionados ao posicionamento geográfico para alcançar

uma melhor integração a e melhor acompanhamento do desenvolvimento de projetos de engenharia (PEJOVIĆ *et al.*, 2014).

Devido à atualização contínua de dados e desenhos, o processamento de dados se transformou em algo complicado, o que torna esse trabalho difícil e, em última análise, dispendioso. Na segunda metade do século XX, houve grandes avanços no campo da computação e dos sistemas de informação, que promoveram a expressão de elementos geográficos no ambiente computacional, criando assim a expressão de Sistema de Informação Geográfica (SIG) ou Geografia de Sistema de Informação (GIS) (LEE *et al.*, 2009).

Não há custo de instalação desse *software* no computador. Além disso, QGIS é um *software* distribuído sob a chamada licença de “código aberto”. Isso significa que o código fonte está aberto, portanto disponível para melhorias e criação de extensões ou aplicativos (TOMLINSON, 2013).

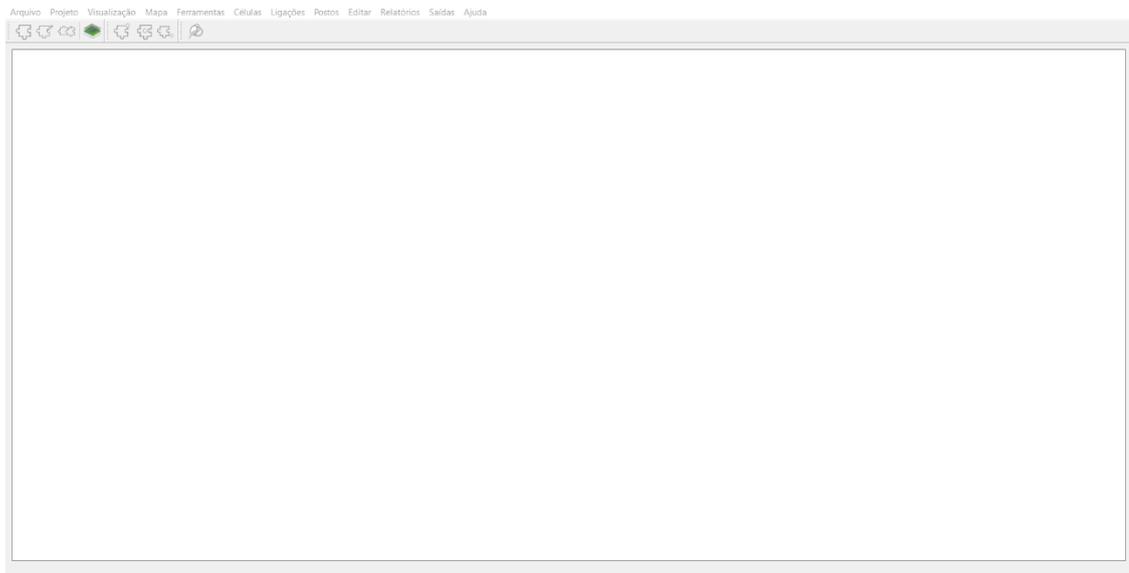
O termo “*software* GIS” se tornou comum para se referir a softwares como o QGIS. Também é possível gerenciar os dados através dele, incluindo, tudo o que é espacial, geográfico, georreferenciado e o que não possui coordenadas geográficas. O QGIS então permite que se visualize os dados na forma de “mapas” interativos e / ou planilhas de dados para dados sem coordenadas e para atributos anexados a entidades geográficas (FRIEDRICH, 2014).

Graças ao QGIS, também é possível modificar os dados, pode-se alterar as geometrias, modificar os sistemas de projeção dos dados ou salvá-los em outro formato. Originalmente, o QGIS visava ler dados contidos em bancos de dados *PostgreSQL / PostGIS*. Ao longo dos vários desenvolvimentos e melhorias de *software*, QGIS tornou-se capaz de ler e editar dados vetoriais e *raster* de diferentes formatos ou dados de planilhas (WING *et al.*, 2003).

4.1.2. MODCEL

ModCel (Figura 18) é um modelo *quasi*-bidimensional desenvolvido por Miguez (2001), que representa o espaço e suas interações bidimensionais, mas adota equações unidimensionais, sendo capaz de particularizar a representação de diferentes estruturas hidráulicas, complementares à rede de canais, formando uma rede multidirecional de escoamentos, além de realizar processos hidrológicos associados aos escoamentos superficiais sobre toda a bacia, particularizando esses caminhos (MIGUEZ *et al.*, 2012).

Figura 18: Tela inicial do ModCel



Fonte: Autores.

O programa foi desenvolvido em cima da premissa de que uma região pode ser modelada em células homogêneas e a ligação destas células pode ser representada através de relações hidráulicas, no qual simulam a troca de vazões entre elas.

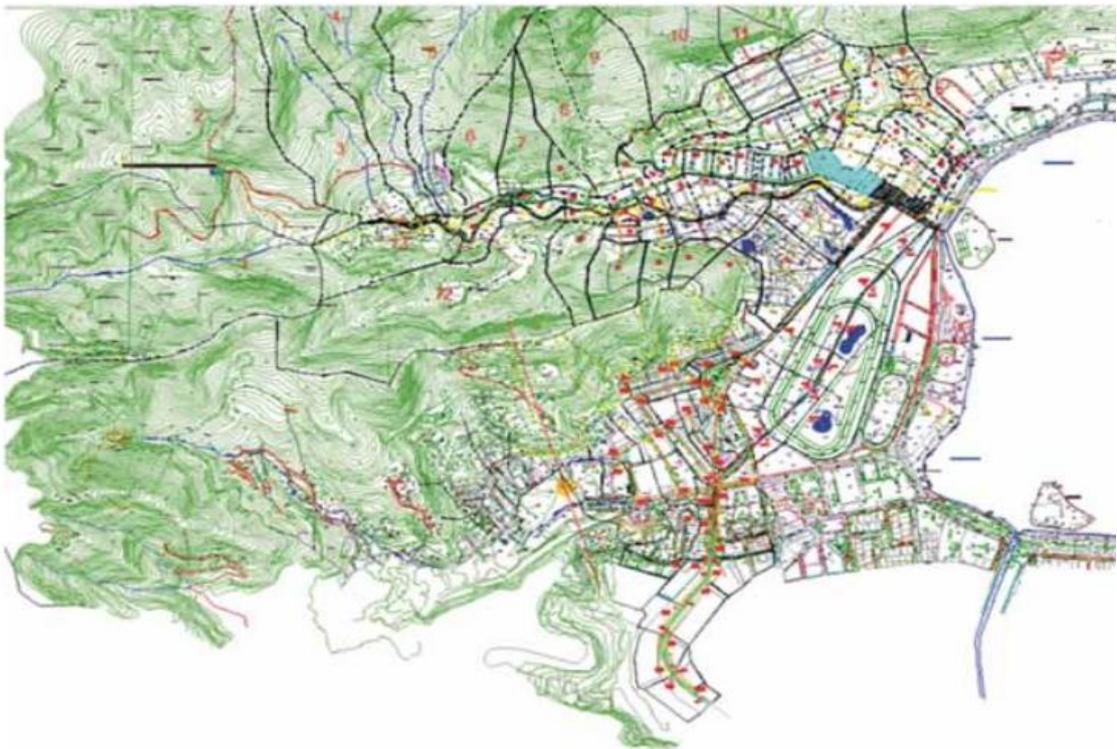
A ideia por trás do ModCel tem origem na década de 60, quando o primeiro modelo matemático bidimensional relevante que usa o conceito de dividir o espaço em células foi construído para o delta do rio Mekong pela -*Société Grenobloise d'Etudes et Applications*

Hydrauliques- (SOGREAH), a pedido da UNESCO, para estudar as fortes cheias que assolam a região onde habitam cerca de dez milhões de cambojanos e vietnamitas (MIGUEZ, 2001).

4.2. DESENVOLVIMENTO DA BASE DE SIMULAÇÃO

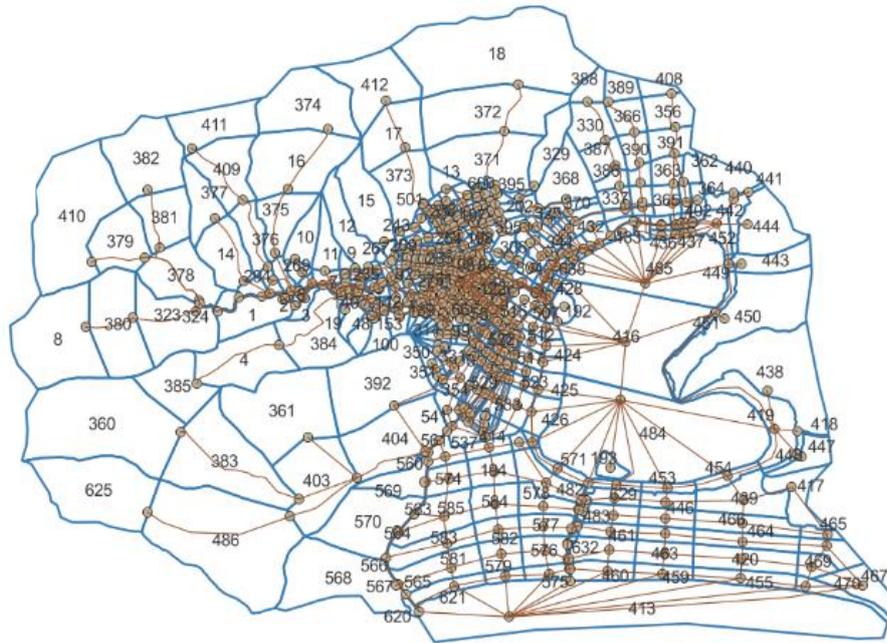
A partir de um modelo da divisão da bacia do Rio dos Macacos em células feita por Miguez *et al.* (2012), conforme mostra a Figura 19, que posteriormente foi importado para o *software* QGIS. A Figura 20 mostra a inserção das células de escoamento iniciais com a complementação para representação da bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas e a praia de Ipanema e Leblon. Foram desenvolvidas uma série de análises e complementações na base de simulação, a fim de obter-se um modelo que representasse o mais próximo possível a realidade do sistema de macrodrenagem.

Figura 19: Divisão da bacia do Rio dos Macacos em células



Fonte: Miguez *et al.* (2012, p. 16).

Figura 20: Modelo da bacia do Rio dos Macacos em células no QGIS



Fonte: Autores.

Com intuito de facilitar a análise do modelo, foi habilitado a opção de visualização a partir do serviço do *Google Satellite*, como mostra a Figura 21.

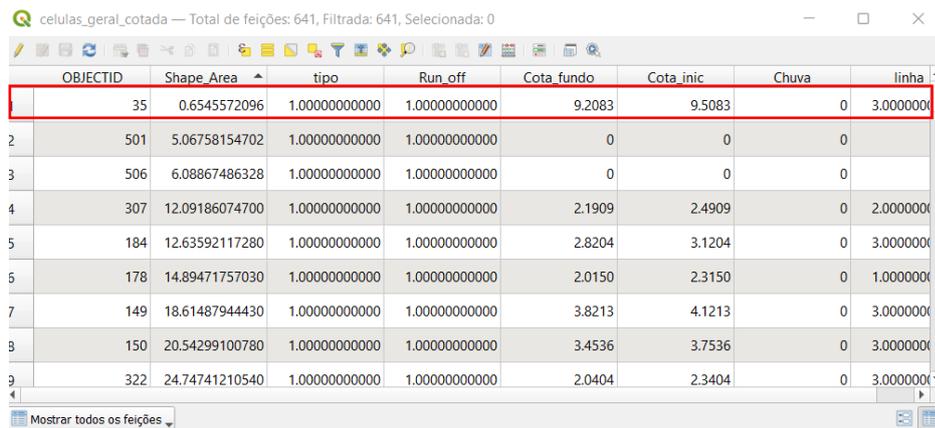
Figura 21: Modelo com o 'Google Satellite' ativo



Fonte: Autores.

Primeiramente, foi feita a análise de todas as células contidas no modelo, com o objetivo de identificar possíveis inconsistências ou até mesmo células traçadas de maneira não representativa. O principal critério para realizar esta investigação foi o de verificar as células que continham tamanhos muito abaixo das demais, como ilustrado no exemplo da **célula 35** na Tabela 3.

Tabela 3: Tabela de atributos das células



OBJECTID	Shape_Area	tipo	Run_off	Cota_fundo	Cota_inic	Chuva	linha
35	0.6545572096	1.000000000000	1.000000000000	9.2083	9.5083	0	3.0000000
501	5.06758154702	1.000000000000	1.000000000000	0	0	0	
506	6.08867486328	1.000000000000	1.000000000000	0	0	0	
307	12.09186074700	1.000000000000	1.000000000000	2.1909	2.4909	0	2.0000000
184	12.63592117280	1.000000000000	1.000000000000	2.8204	3.1204	0	3.0000000
178	14.89471757030	1.000000000000	1.000000000000	2.0150	2.3150	0	1.0000000
149	18.61487944430	1.000000000000	1.000000000000	3.8213	4.1213	0	3.0000000
150	20.54299100780	1.000000000000	1.000000000000	3.4536	3.7536	0	3.0000000
322	24.74741210540	1.000000000000	1.000000000000	2.0404	2.3404	0	3.0000000

Fonte: Autores.

Após isso, foi realizada a verificação dos valores dos coeficientes de *RunOff* (porcentagem de água que torna-se escoamento superficial) na tabela de atributos. Os seguintes valores de *RunOff* foram considerados para a região de interesse:

- **0,30** = Áreas com muita vegetação;
- **0,45** = Áreas edificadas contendo mais de 70% de vegetação;
- **0,70** = Áreas edificadas contendo aproximadamente 50% de vegetação;
- **0,75** = Áreas edificadas contendo aproximadamente 30% de vegetação;
- **0,85** = Áreas edificadas contendo menos de 10% de vegetação;
- **0,90** = Ruas e calçadas;
- **1,0** = Corpo hídrico.

A próxima etapa foi a de definir o tipo de cada célula, referente ao tipo de ocupação da região a ser representada. Para isso, utilizou-se as seguintes classificações:

- **Tipo 0** = Rios, canais e lagoa
- **Tipo 2** = Região urbana
- **Tipo 4** = Região não ocupada / encosta

Devido ao grau de representação do território, foi possível estimar que as células urbanas possuem área total igual à área na qual realmente é realizado o armazenamento de água. Assim para o **Tipo 0** e para o **Tipo 2** foram realizadas as seguintes considerações:

$$\textit{Área de armazenamento} = \textit{Área total da célula}$$

Vale destacar que o Tipo 2 já representa a região urbana de maneira escalonada, podendo acumular água em uma parcela que representa as ruas, outra as calçadas, e outra as edificações, além dos espaços livres.

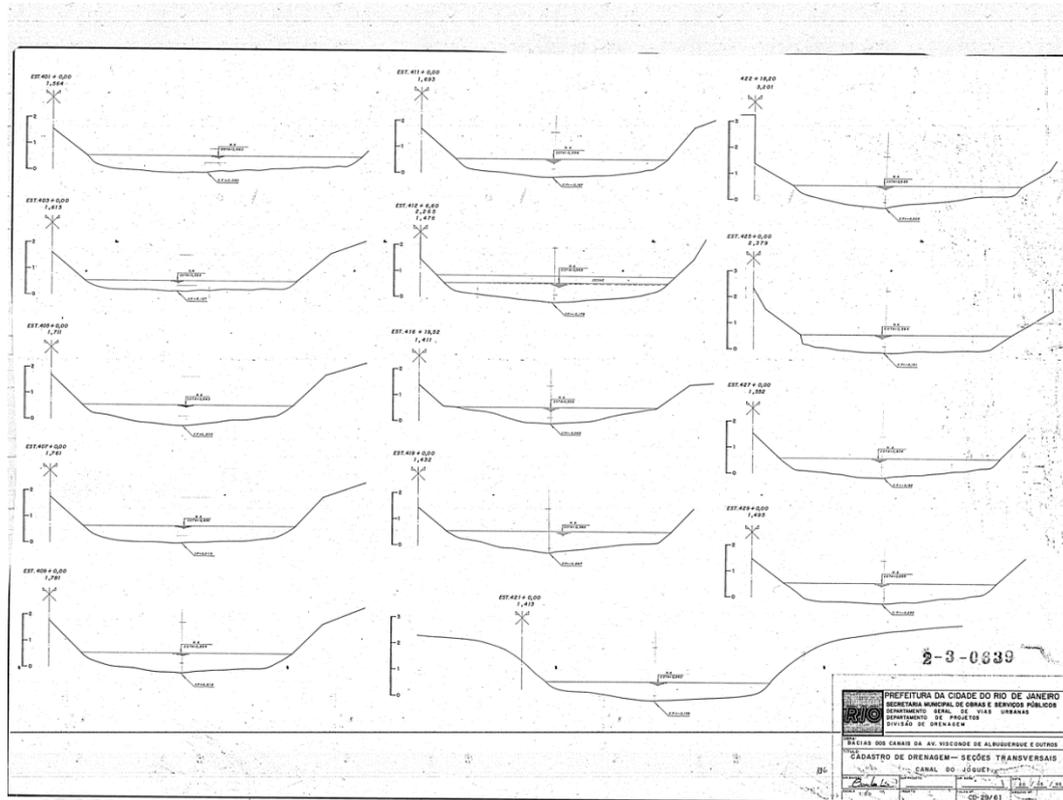
Para o **Tipo 4** foi realizada uma simplificação na qual:

$$\textit{Área de armazenamento} = 0,1 \times \textit{Área total da célula}$$

Esta simplificação é possível uma vez que as células das regiões não ocupadas, que representam as encostas, não têm o intuito de representar adequadamente os níveis de inundação, mas sim a contribuição de vazões para as regiões mais baixas. Este

No segundo método, para as células de canais, foi utilizado dados da Fundação Rio-Águas referentes às seções transversais dos canais da região, conforme o exemplo mostrado pela Figura 24.

Figura 24: Exemplo do perfil de um dos canais da região



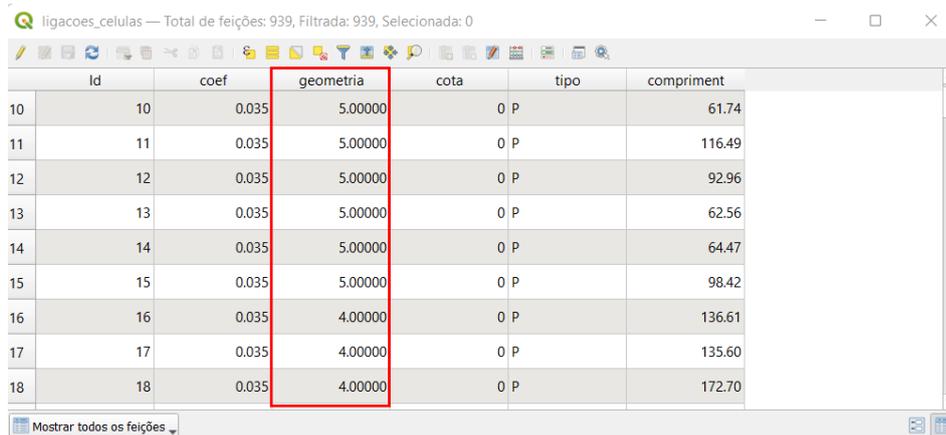
Fonte: Fundação Rio-Águas.

A partir destes documentos, foi admissível obter uma profundidade média ao longo dos canais, já que muitos dos documentos não tinham dados referentes as estacas, impossibilitando identificar onde ficavam os trechos dos canais/rios. Junto com a informação da cota de fundo das margens, foi possível obter a cota de fundo dos canais. Vale ressaltar que alguns canais não possuíam informação suficiente para se obter a profundidade média, portanto foi necessário ir até o local para fazer uma estimativa.

Fazendo uso do mesmo arquivo da Fundação Rio-Águas, foi possível realizar a próxima etapa de obter uma largura média de passagem de água dos canais para preencher

a coluna de geometria (Tabela 4) das ligações da célula de canal. Já para as células de ruas, foi necessário analisar uma por uma usando o *Google Satélite* para estimar uma largura de passagem de água pelas ruas e calçadas.

Tabela 4: Tabela de atributos das ligações



ld	coef	geometria	cota	tipo	compriment
10	10	0.035	5.00000	0 P	61.74
11	11	0.035	5.00000	0 P	116.49
12	12	0.035	5.00000	0 P	92.96
13	13	0.035	5.00000	0 P	62.56
14	14	0.035	5.00000	0 P	64.47
15	15	0.035	5.00000	0 P	98.42
16	16	0.035	4.00000	0 P	136.61
17	17	0.035	4.00000	0 P	135.60
18	18	0.035	4.00000	0 P	172.70

Fonte: Autores.

O próximo passo consistiu em aplicar os coeficientes de rugosidade (Coeficiente de *Manning*) das ligações, seguindo o manual de “INSTRUÇÕES TÉCNICAS PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS HIDROLÓGICOS E DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA” fornecido também pela Fundação Rio-Águas, conforme Tabelas 5, 6, 7, 8 e 9.

Tabela 5: Coeficiente de Manning de acordo com o tipo de conduto

Tipo de conduto	Mínimo	Máximo	Valor usual
Alvenaria de Tijolos	0,014	0,017	0,015
Tubos de concreto armado	0,011	0,015	0,013
Galeria celular de concreto – pré-moldada	0,012	0,014	0,013
Galeria celular de concreto – forma de madeira	0,015	0,017	0,015
Galeria celular de concreto – forma metálica	0,012	0,014	0,013
Tubos de ferro fundido	0,011	0,015	0,011
Tubos de aço	0,009	0,011	0,011
Tubos corrugados de metal			
68x13mm	0,019	0,021	0,021
76x25mm	0,021	0,025	0,025
152x51mm	0,024	0,028	0,028
Tubos corrugados polietileno	0,018	0,025	0,025
Tubos de PVC	0,009	0,011	0,011

Fonte: Fundação Rio-Águas.

Tabela 6: Coeficiente de Manning de acordo com o revestimento do canal

Revestimento do canal	Mínimo	Máximo	Valor usual
Concreto	0,013	0,016	0,015
Gabião manta	0,022	0,027	0,027
Gabião caixa	0,026	0,029	0,029
VSL	0,015	0,017	0,017
Rip-rap	0,035	0,040	0,040
Pedra argamassada	0,025	0,040	0,028
Gramma	0,150	0,410	0,240

Fonte: Fundação Rio-Águas.

Tabela 7: Coeficiente de Manning de acordo com o tipo de canal

Tipo de canal	Mínimo	Máximo	Valor usual
Terra, limpo, fundo regular	0,028	0,033	0,030
Terra com capim nos taludes	0,035	0,060	0,045
Sem manutenção	0,050	0,140	0,070

Fonte: Fundação Rio-Águas.

Tabela 8: Coeficiente de Manning de acordo com o curso d'água

Curso d'água	Mínimo	Máximo	Valor usual
Seção regular	0,030	0,070	0,045
Fundo de cascalho, seixos e poucos matacões	0,040	0,050	0,040
Fundo de seixos com matacões	0,050	0,070	0,050
Seção irregular com poços	0,040	0,100	0,070

Fonte: Fundação Rio-Águas.

Tabela 9: Coeficiente de Manning de acordo com o tipo de superfície

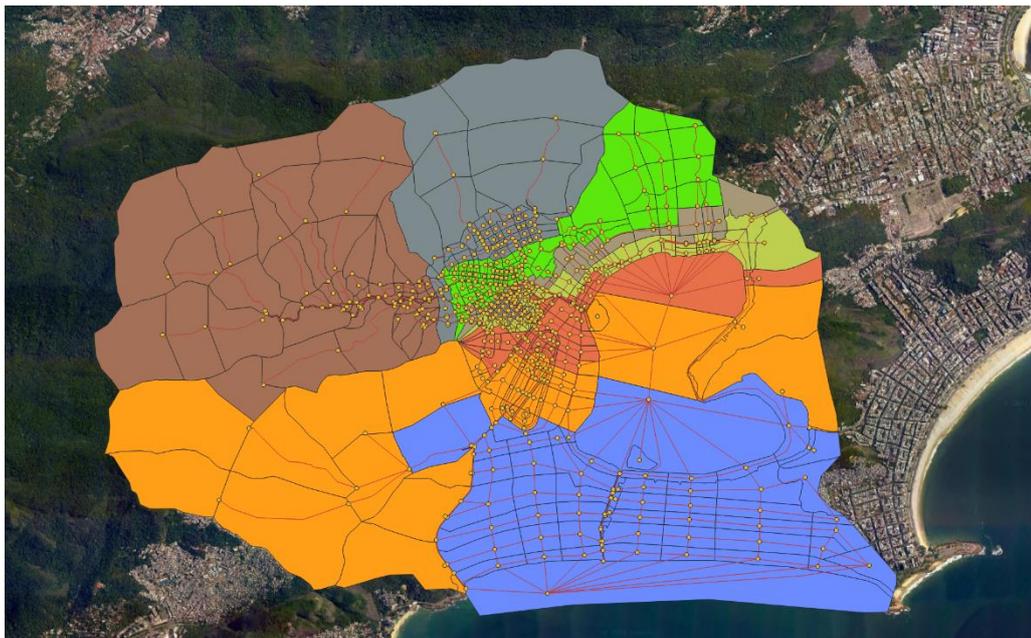
Tipo de superfície	η
Sarjeta de concreto	0,016
Asfalto liso	0,013
Asfalto áspero	0,016
Pavimento de concreto liso	0,013
Pavimento de concreto áspero	0,015

Fonte: Fundação Rio-Águas.

Por fim, a última etapa foi a de realizar uma divisão das células em grupos em ordem numérica, como mostrado na Figura 25, no qual foram seguidos dois critérios importantes para conseguir executar o modelo no próximo *software*.

O primeiro critério é que não deveriam ter mais de 100 células por grupo. Já o segundo critério, é que cada região só podia ter ligação com a respectiva região, a região antecessora e a sucessora, ou seja, a **Região 3** só pode ter ligação com a **Região 2**, com a **Região 4**, e com a própria **Região 3**. Assim como a **Região 5** só pode ter ligação com as **Regiões 4, 5 e 6**, mas a **Região 4** não poderia ter ligação com a **Região 1**, assim como a **Região 5** não podia ter ligação com a **Região 2**.

Figura 25: Modelos com as divisões por região



Fonte: Autores.

4.3. SIMULAÇÃO DO EVENTO

Com o modelo do QGIS já corrigido e pronto, foi possível fazer sua exportação para o *software* ModCel, como ilustrado na Figura 26, abaixo.

Esses erros eram de ligações que não existiam ou correções que o programa solicitava. Após feita as correções, também foi necessário consertar algumas ligações entre células de planície e de células de canais, alterando o tipo de ligação para “vertedouro”.

Além disso, também foi necessário realizar uma pesquisa no banco de dados no site “Alerta Rio”, para retirar os dados das chuvas que ocorreram no Jardim Botânico.

Conforme apresentado neste trabalho anteriormente, a chuva registrada de 2019 foi a chuva que assumiu o recorde histórico, portanto, foram utilizadas as informações de precipitação da mesma para simular o mesmo evento no ModCel.

As chuvas utilizadas para simulação do evento podem ser vistas no Gráfico 2. As informações foram obtidas no site “Alerta Rio”. Utilizando a equação IDF fornecida pela Rio-Águas para a região do Jardim Botânico e analisando as diferentes durações de chuva foi possível determinar os seguintes tempos de recorrência para o evento em questão:

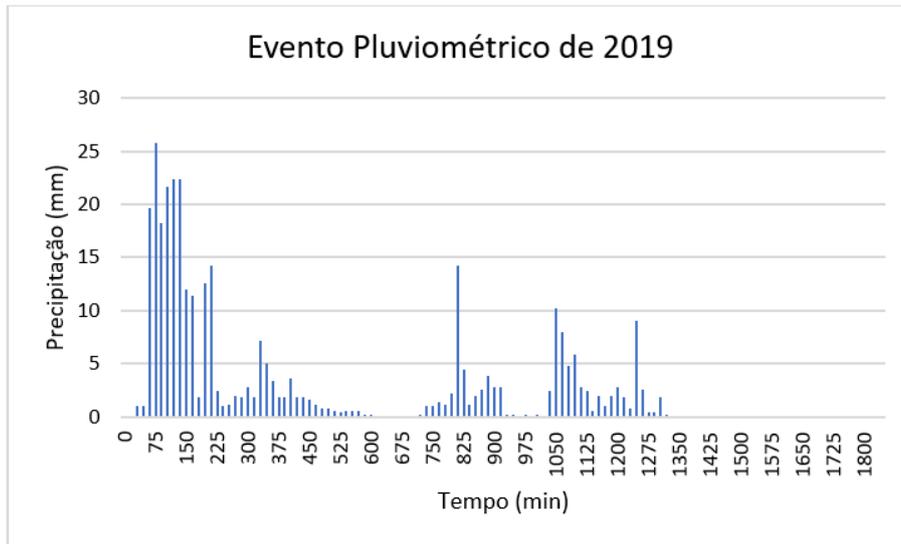
- 15 minutos → **TR 2,6 anos;**
- 30 minutos → **TR 6,5 anos;**
- 45 minutos → **TR 20,1 anos;**
- 60 minutos → **TR 53,9 anos;**
- 75 minutos → **TR 128,8 anos.**

Conforme apresentado por Miguez *et al.* (2012) a bacia do Rio dos Macacos apresenta tempo de concentração de cerca de 70 minutos. Isso quer dizer que a chuva crítica para a bacia em questão teve tempo de retorno de quase 130 anos, para o qual não é dimensionado o sistema de macrodrenagem.

Adicionalmente, foi considerado que o mar no momento do evento estava fixo na maré com cota zero. Esta consideração se deve a não terem sido observados em reportagem efeitos

significativos de elevação de maré no evento em questão e à falta de informações para simulação correta da variação do nível do mar.

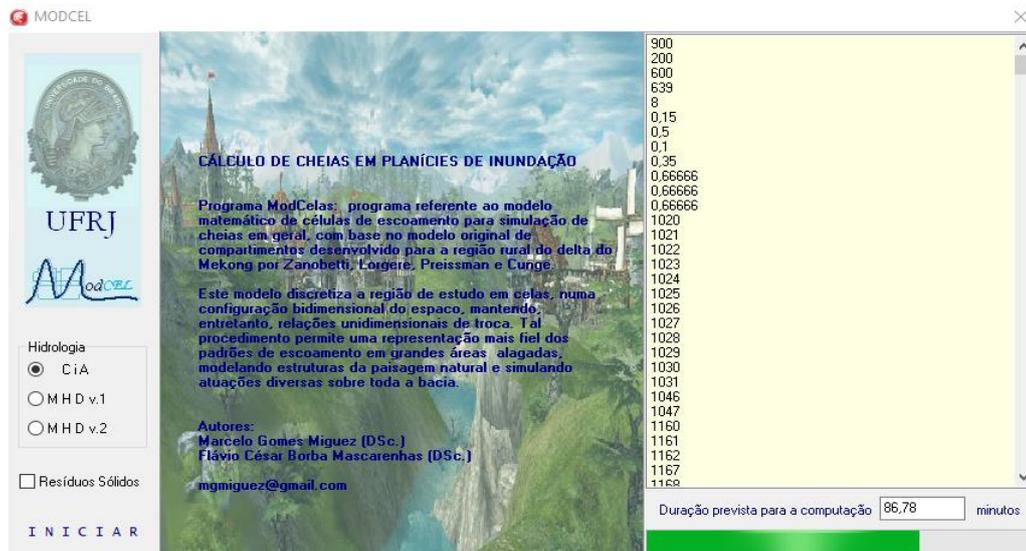
Gráfico 2: Hietograma do evento de 2019



Fonte: Autores.

Tendo esses dados em mãos, foi possível executar o programa para obter os dados de alagamento e inundação da região e compará-los com o real ocorrido na região, conforme a Figura 28.

Figura 28: Processamento de dados no ModCel

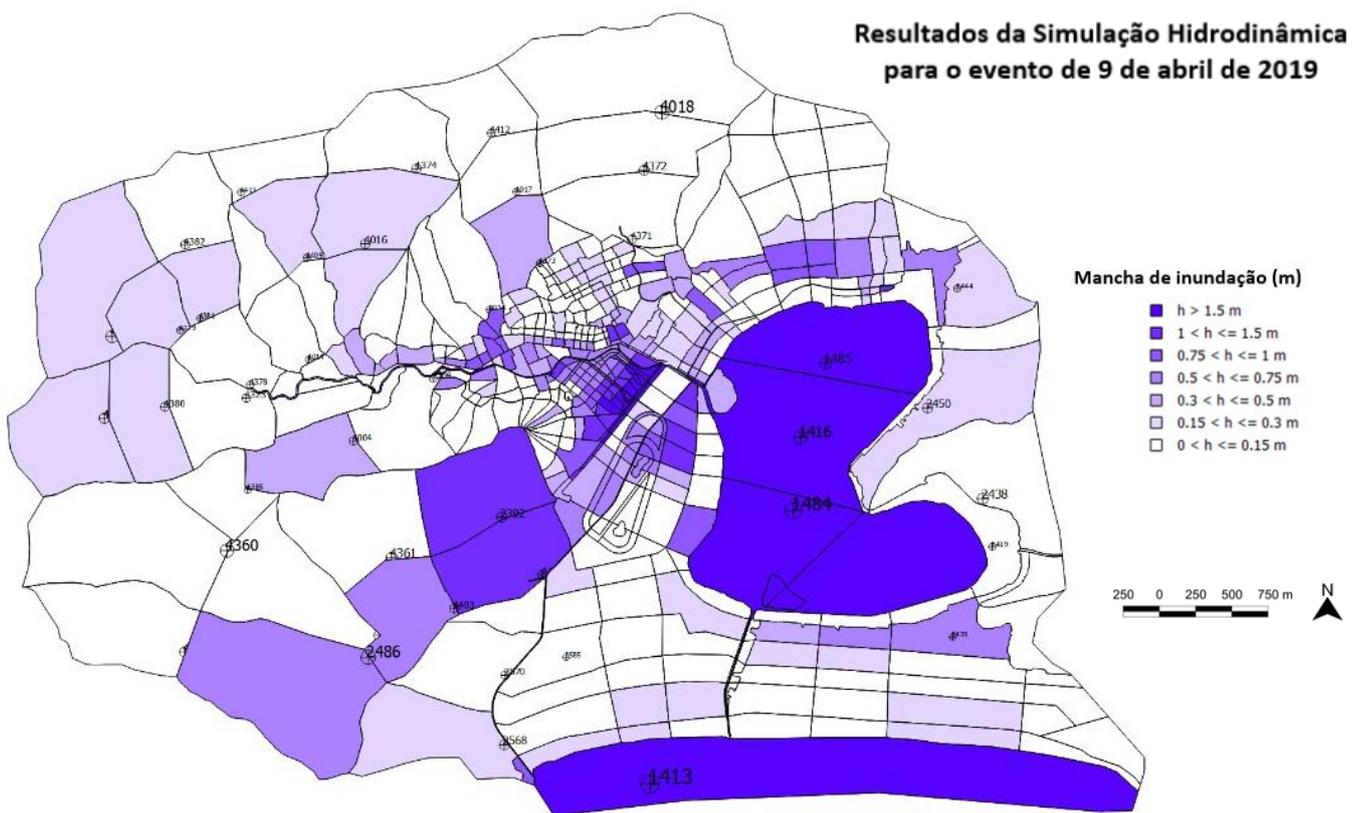


Fonte: Autores.

Os primeiros resultados apresentaram inconsistências quanto ao acúmulo de água em diversas regiões. Dessa maneira, correções de interpretações topográficas e de conexões entre células foram necessárias. Esta etapa corresponde ao processo de calibração do modelo na qual os resultados da simulação devem estar o mais próximo possível das inundações observadas na prática.

Após diversas correções, foi obtido o seguinte resultado, sendo as cores mais escuras as regiões onde mais acumularam água, conforme Figura 29.

Figura 29: Resultado das 'manchas' de acúmulo de água na região

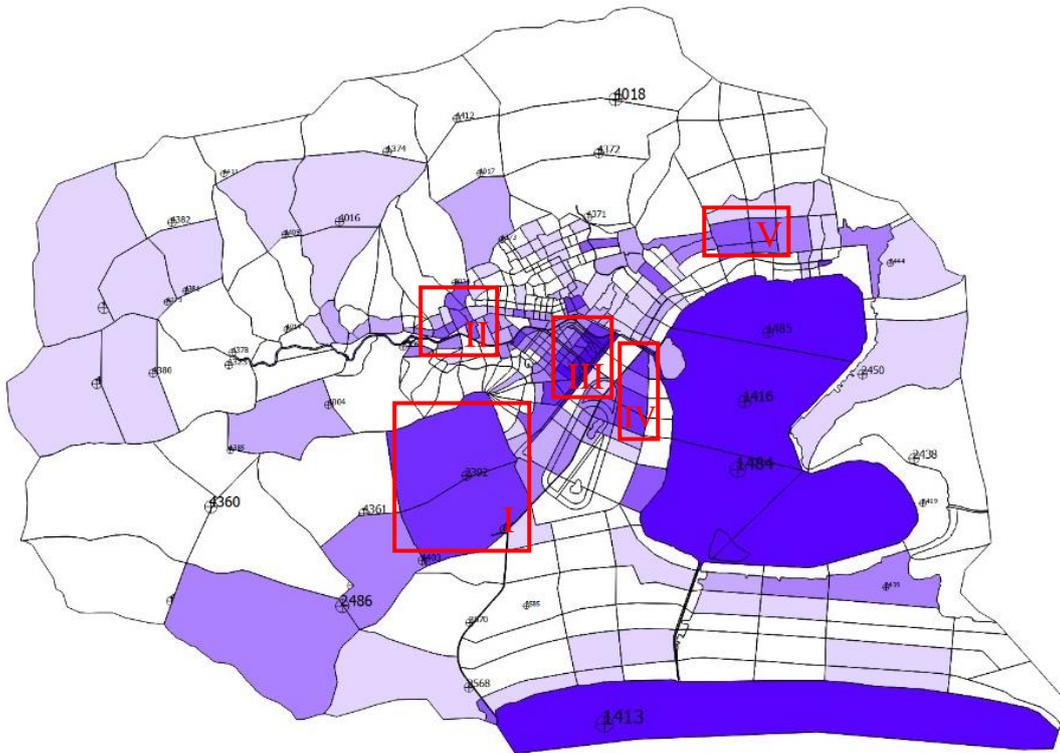


Fonte: Autores.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Com o intuito de facilitar a análise dos resultados fornecidos pelo software ModCel, foram destacadas 5 regiões com foco de acúmulo de água, conforme ilustrado na Figura 30. A **Região I** no bairro da Gávea, a **Região II** na comunidade do Horto, a **Região III** na Rua Jardim Botânico na altura da Rua Pacheco Leão, a **Região IV** na Lagoa Rodrigo de Freitas na altura do Jôquei e a **Região V** na Rua Jardim Botânico na altura do Parque Lage.

Figura 30: Resultado com as regiões destacadas



Fonte: Autores.

A seguir são apresentadas imagens de inundações e alagamentos nas regiões destacadas da figura acima.

- **Região I:** Gávea (Figuras 31, 32 e 33).

Figura 31: Inundação em frente ao Shopping da Gávea (1)



Fonte: Twitter.

Figura 32: Inundação em frente ao Shopping da Gávea (2)



Fonte: Twitter.

Figura 33: Inundação em frente ao Hospital Miguel Couto



Fonte: G1.

- **Região II: Horto** (Figuras 34, 35).

Figura 34: Água invadindo casa de morador da Comunidade do Horto (1)



Fonte: Frame da reportagem da emissora TV Globo.

Figura 35: Água invadindo casa de morador da Comunidade do Horto (2)



Fonte: Frame da reportagem da emissora TV Globo.

- **Região III:** Rua Jardim Botânico altura da Rua Pacheco Leão (Figuras 36, 37).

Figura 36: Nível de água na altura do peito de um homem na Rua Jardim Botânico



Fonte: O Globo.

Figura 37: Água quase encobrindo carros na Rua Jardim Botânico



Fonte: G1.

- **Região IV:** Lagoa Rodrigo de Freitas na altura do Jóquei (Figura 38).

Figura 38: Inundação na Lagoa Rodrigo de Freitas em frente ao Jóquei



Fonte: O Globo.

- **Região V:** Rua Jardim Botânico na altura do Parque Lage (Figuras 39).

Figura 39: Rua Jardim Botânico na altura do Parque Lage



Fonte: G1.

Utilizando as imagens do dia do evento de 2019 das regiões acima, é possível fazer uma estimativa da lâmina de água média de cada localidade destacada, conforme exibido na Tabela 10.

Tabela 10: Estimativa de lâmina de água nas regiões destacadas

ESTIMATIVAS		
Região	Local	Lâmina de água (m)
I	Gávea	0,90
II	Horto	0,30
III	Rua Jardim Botânico (Pacheco Leão)	1,50
IV	Lagoa (Jóquei)	0,50
V	Rua Jardim Botânico (Parque Lage)	1,00

Fonte: Autores.

Já para os resultados simulados utilizando o *software* ModCel é possível obter a altura da lâmina de água calculada para as células que representam as regiões críticas, como pode ser observado na Tabela 11.

Tabela 11: Lâmina de água nas regiões destacadas conforme ModCel

MODCEL		
Região	Local	Lâmina de água (m)
I	Gávea	1,16
II	Horto	0,51
III	Rua Jardim Botânico (Pacheco Leão)	1,80
IV	Lagoa (Jóquei)	1,05
V	Rua Jardim Botânico (Parque Lage)	0,96

Fonte: Autores.

Fazendo uma comparação entre as Tabelas 10 e 11 acima pode-se constatar uma discrepância entre os valores obtidos na maior parte dos casos. Quando isolados a maior diferença entre os dados das tabelas, temos a **Região IV**, com uma taxa de erro de, aproximadamente, 108 %, podendo constatar que o resultado do programa indica uma lâmina de água muito superior no que foi mostrado na Figuras 37.

Entretanto, também é possível verificar que a **Região III**, apesar de ter tido uma taxa de erro relativamente grande (cerca de 20%), é a região que ocorreu a maior lâmina de água tanto na estimativa das imagens do evento naquele ponto quanto no programa, o que pode ser considerado um resultado adequado, considerando que foi realmente a região mais afetada pela chuva de 2019 na Zona Sul do Rio de Janeiro. Vale destacar que o momento da fotografia pode não representar o momento mais crítico das inundações observadas, já o resultado modelado representa o pico de simulação dos eventos.

5.1. DIAGNÓSTICO DO SISTEMA DE DRENAGEM DAS REGIÕES DURANTE O EVENTO DE 2019

5.1.1. REGIÃO I

Figura 40 : Localização da Região I

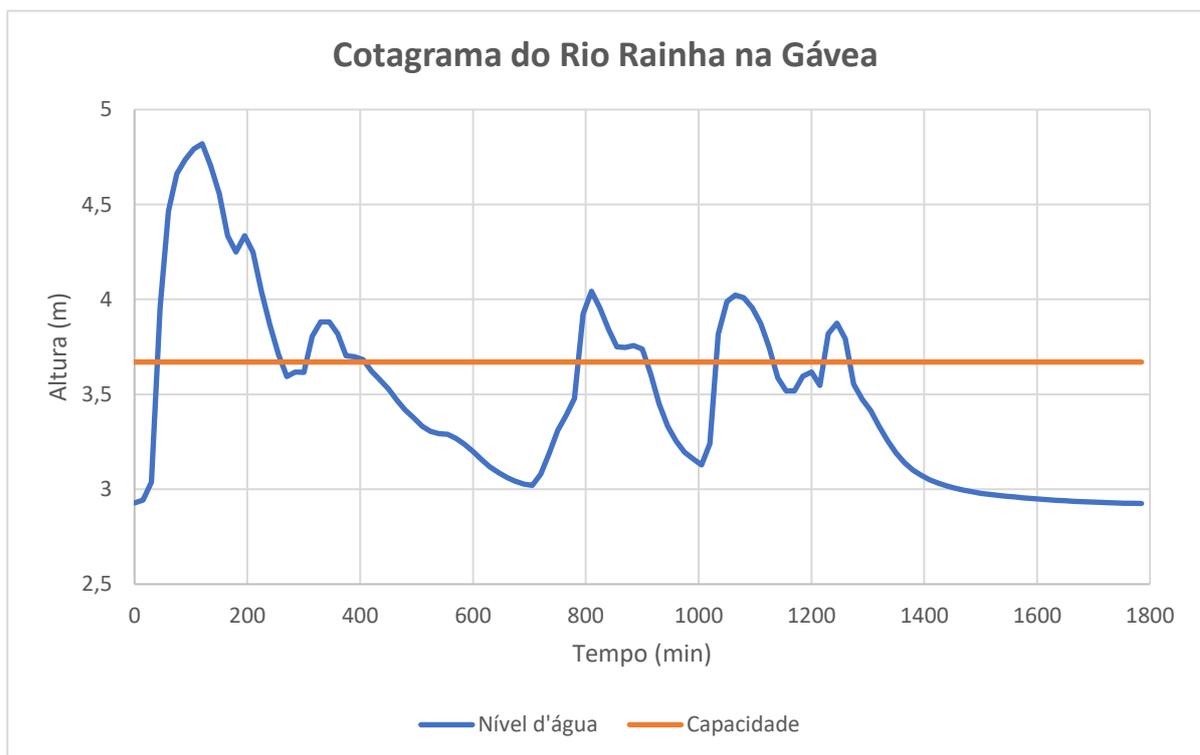


Fonte: Autores.

No caso da Gávea (Figura 40), a inundação desta região possivelmente pode ser explicada pelo extravasamento do Rio Rainha (Figura 41), no qual sua menor margem gira em torno de 3,67 m, sendo que o nível de águas ultrapassou esta margem diversas vezes durante a chuva, de acordo com o Gráfico 3. Este extravasamento ocorre pelo excesso de

volume de água no evento, porém, vale destacar que mesmo para intensidades menores entre os tempos de 800 e 1300 minutos do começo do evento, são observados extravasamentos, demonstrando a falta de capacidade hidráulica dos cursos d'água em captar as contribuições de águas pluviais ocasionadas por chuvas intensas.

Gráfico 3: Cotagrama do Rio Rainha na Gávea



Fonte: Autores.

Figura 41: Localização do Rio Rainha



Fonte: Autores.

5.1.2. REGIÃO II

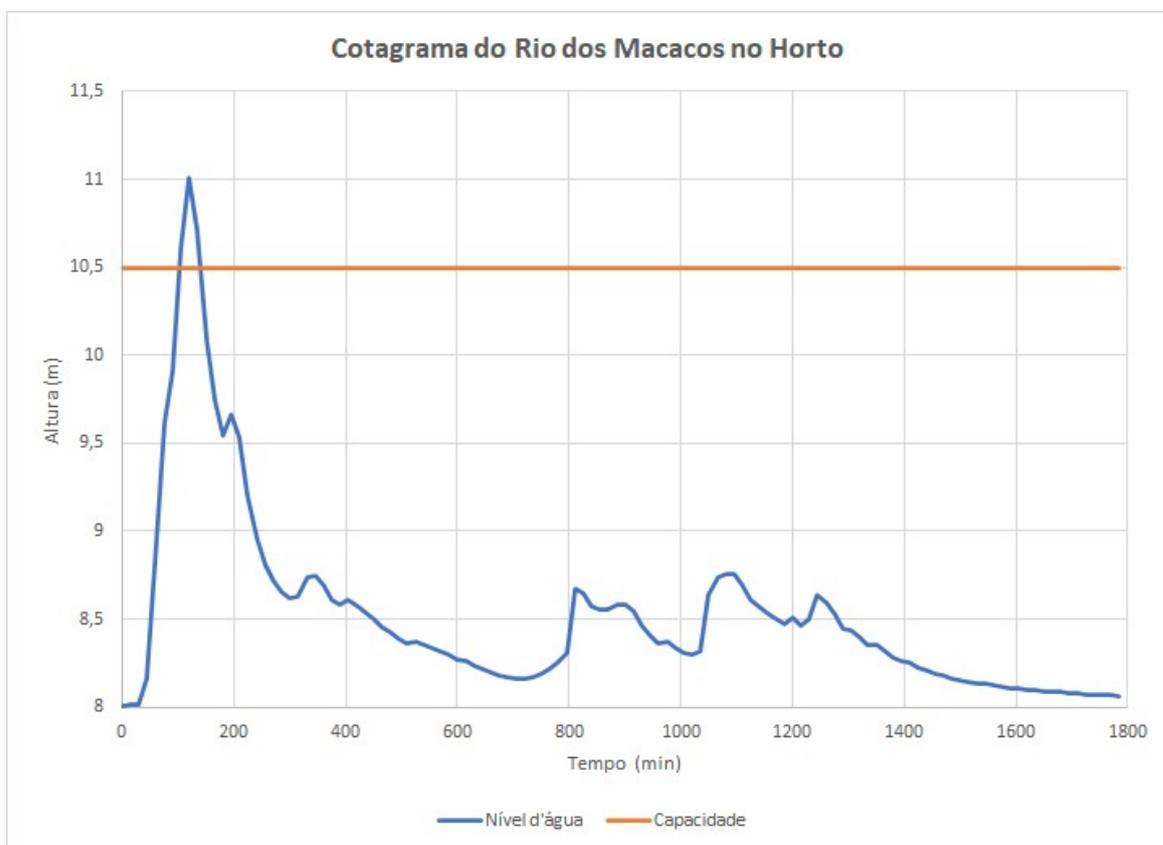
Figura 42: Localização da Região II



Fonte: Autores.

Mesmo estando em um ponto com declividade, a comunidade do Horto (Figura 42), localizada no Jardim Botânico sofreu com inundação, que foi causada pela elevação do nível de água de um trecho do Rio dos Macacos (Figura43), no qual superou a margem mais baixa do rio, como mostra o Gráfico 4. Infelizmente, a menor margem do rio em questão ficava do lado da comunidade e não do lado do Jardim Botânico, o que acabou desenvolvendo para o escoamento de água em direção ao Horto.

Gráfico 4: Cotograma do Rio dos Macacos no Horto



Fonte: Autores.

Figura 43: Trecho analisado do Rio dos Macacos



Fonte: Autores.

5.1.3. REGIÃO III

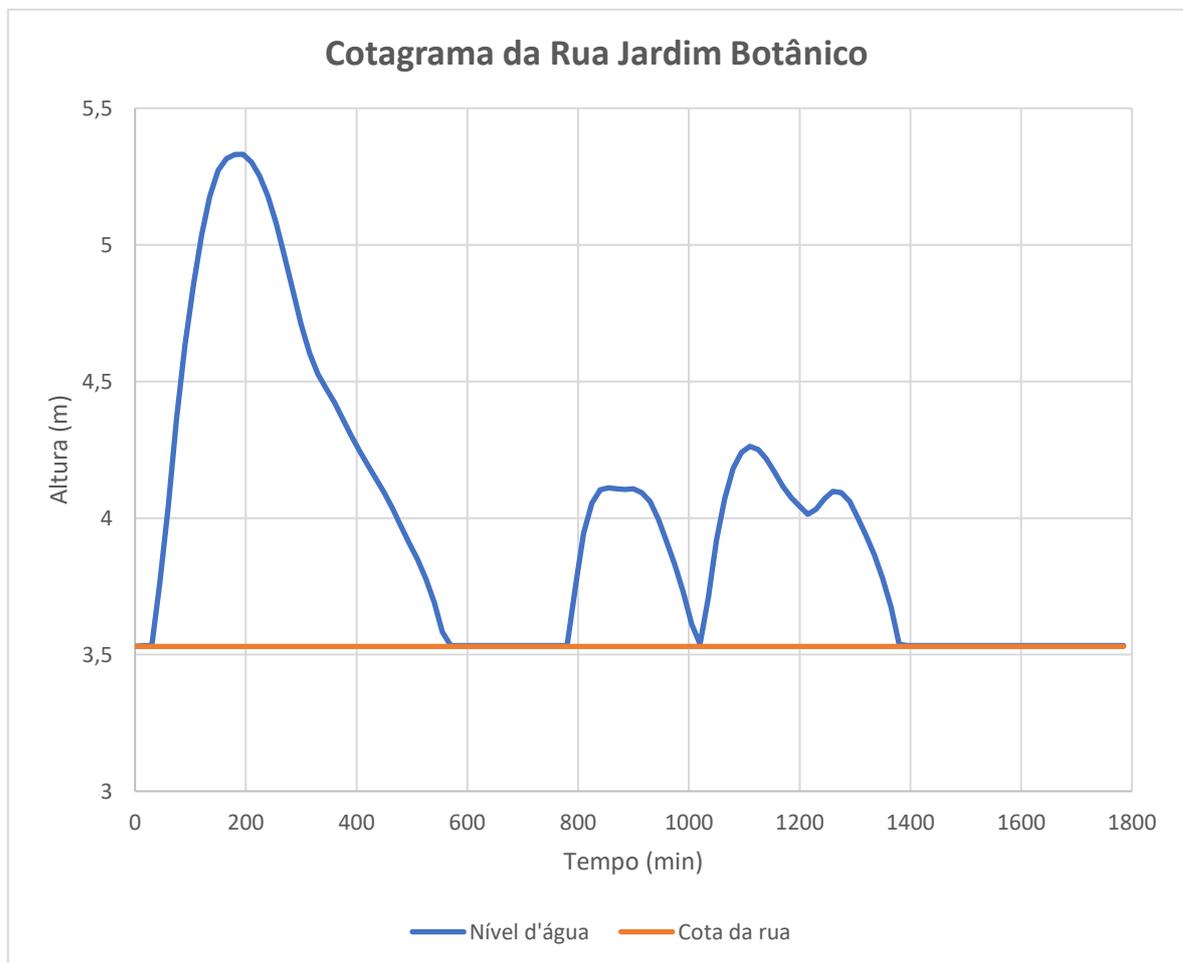
Figura 44: Localização da Região III



Fonte: Autores.

Como visto, a Rua Jardim Botânico na altura da Rua Pacheco Leão (Figura 44) foi o local crítico da Zona Sul da cidade, como pode ser visto no Gráfico 5 abaixo, no qual indica um acúmulo de água de 1,80 m aproximadamente na própria Rua Jardim Botânico (Figura 45). Há vários fatores que podem explicar este episódio, sendo um deles o fato de que a própria rua funciona como uma espécie de “recipiente” a partir do momento que as cotas das células em seu entorno são mais elevadas, desta maneira, toda água escoada é direcionado para o centro da rua, gerando o acúmulo de água.

Gráfico 5: Cotograma da Rua Jardim Botânico



Fonte: Autores.

Figura 45: Localização da Rua Jardim Botânico



Fonte: Autores.

Outro motivo agravante para a ocorrência de alagamento neste ponto foi o próprio extravasamento da água vinda do Rio dos Macacos que, mesmo tendo perdido boa parte do excesso de água pelo caminho, como ocorreu na comunidade do Horto, o restante acabou acumulado na região em destaque.

5.1.4. REGIÃO IV

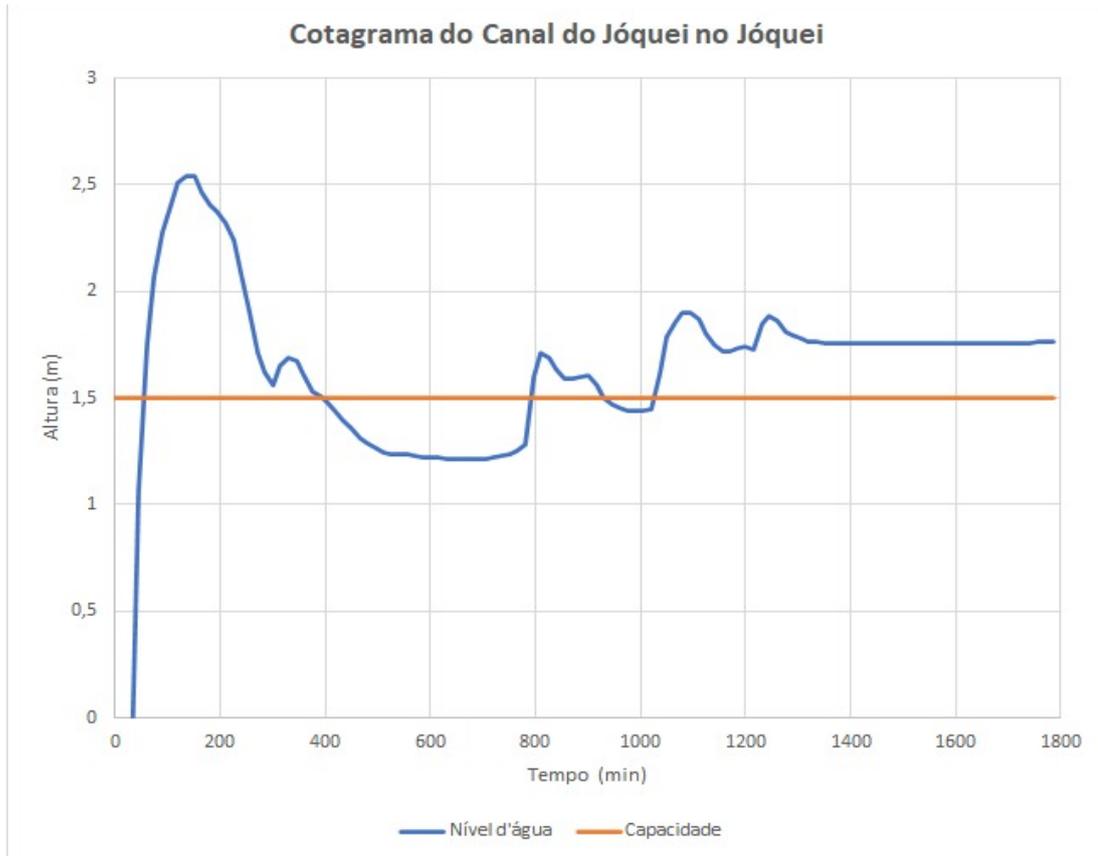
Figura 46: Localização da Região IV



Fonte: Autores.

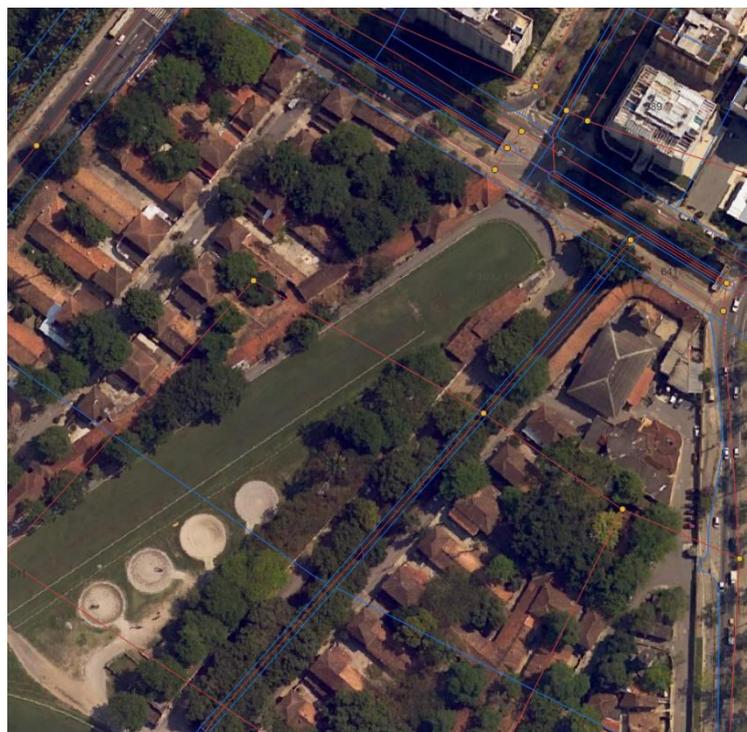
Similar a comunidade do Horto, a área da Lagoa Rodrigo de Freitas próximo ao Jóquei (Figura 46) sofreu com inundações causadas principalmente pelo extravasamento de água no canal do Jóquei (Figura 47), como demonstrado pelo Gráfico 6. Ou seja, o nível de água superou as margens, ocasionando a acumulação de água no local.

Gráfico 6: Cotograma do Canal do Jóquei no Jóquei



Fonte: Autores.

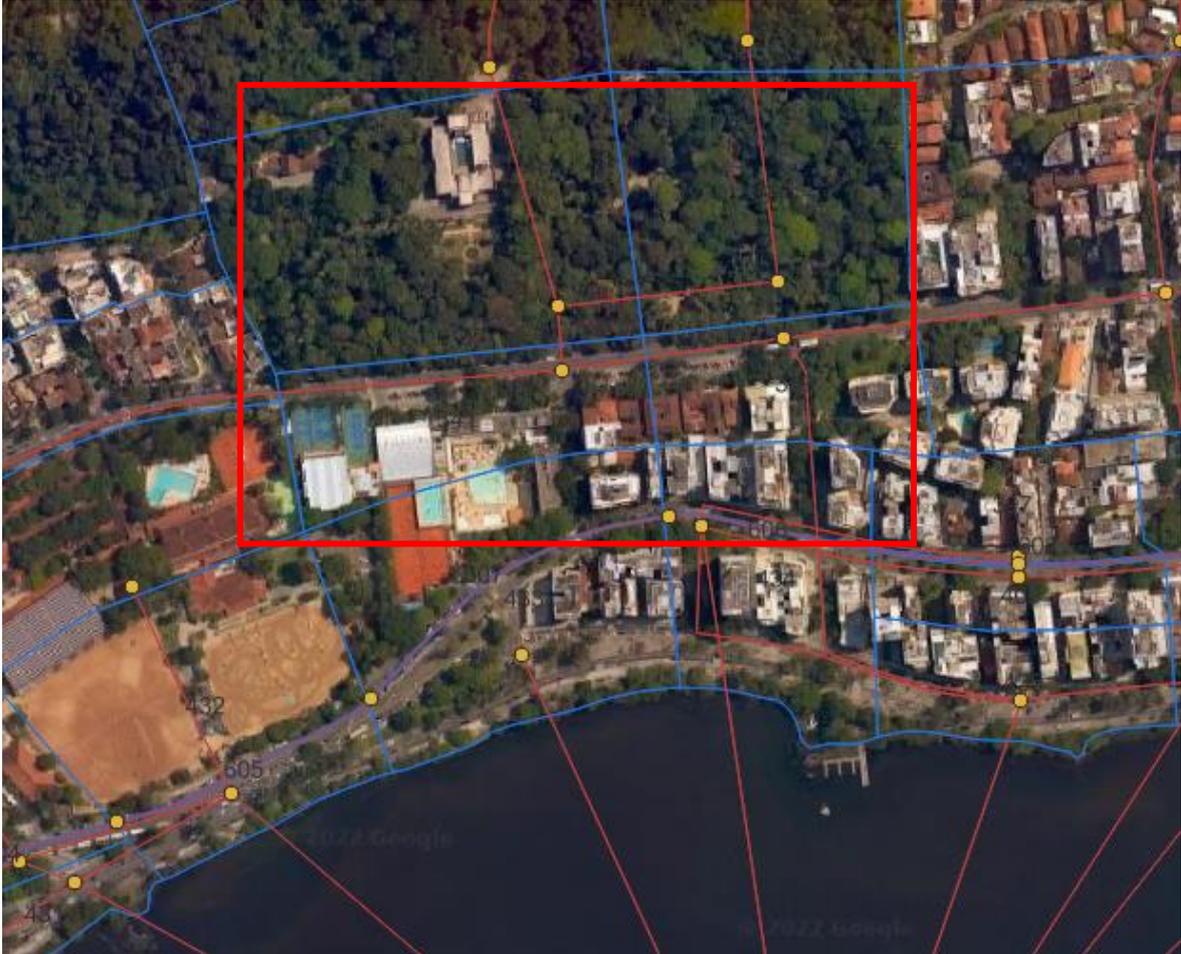
Figura 47: Localização do Canal do Jóquei



Fonte: Autores.

5.1.5. REGIÃO V

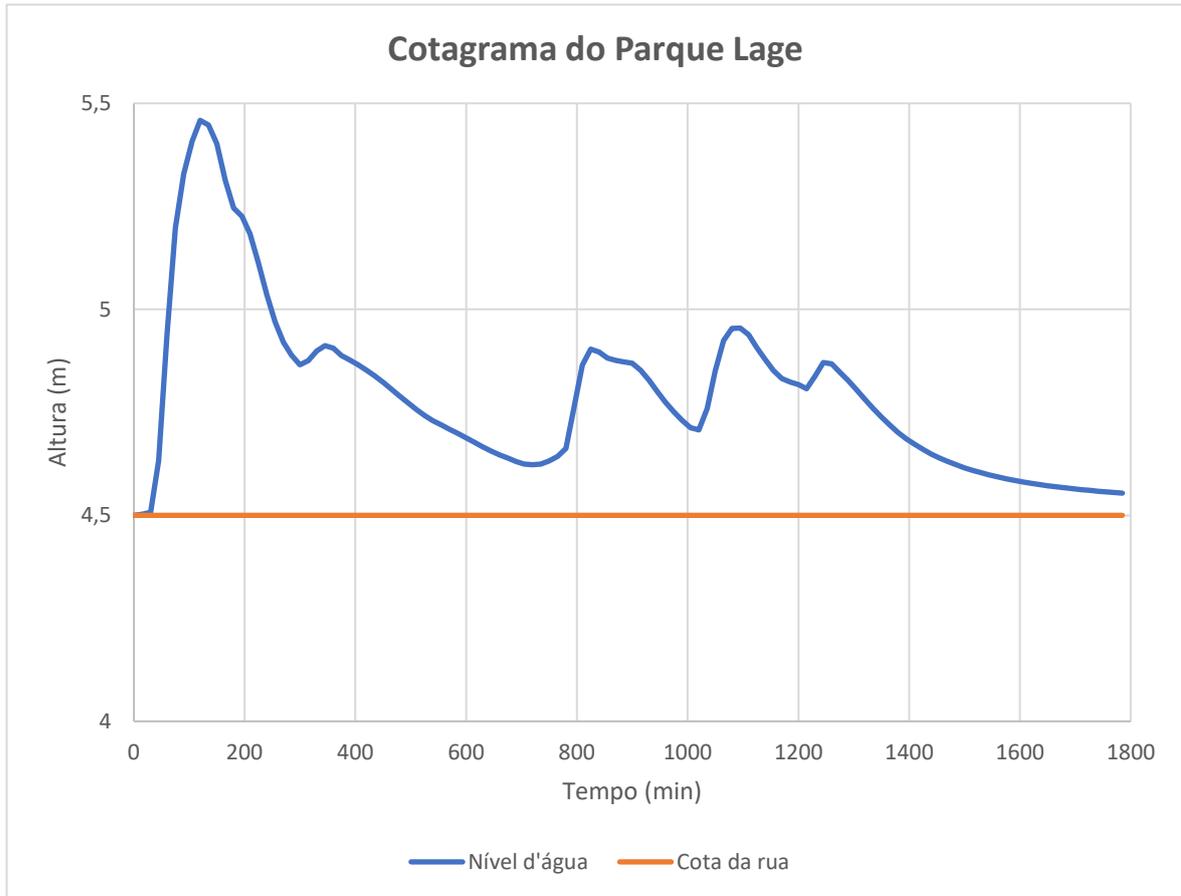
Figura 48: Localização da Região V



Fonte: Autores.

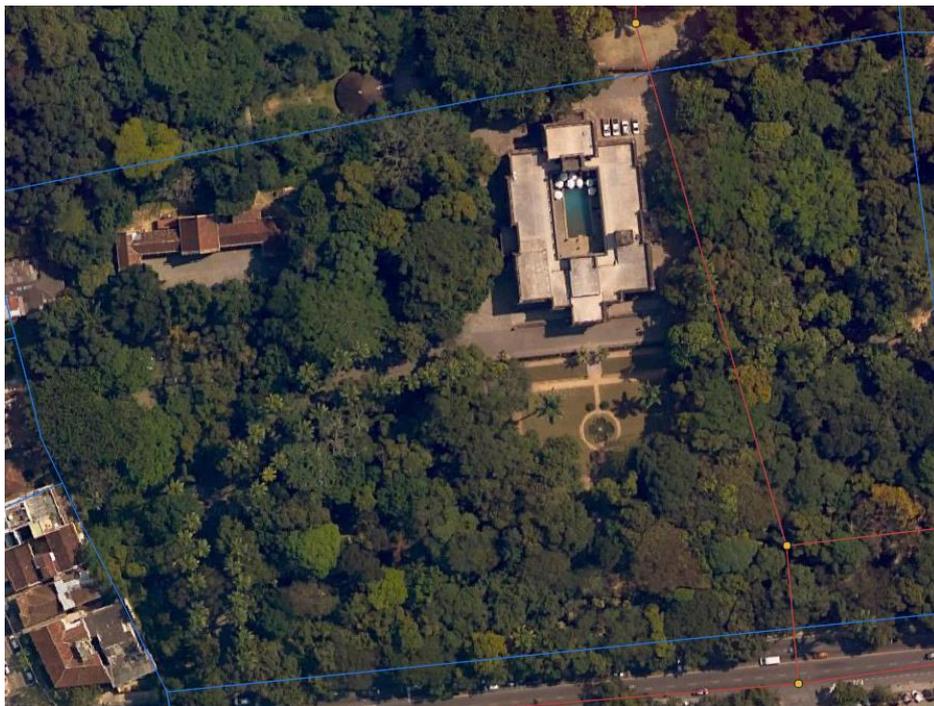
A quinta região listada também fica na Rua Jardim Botânico (Figura 48), porém em outro trecho, sendo ela na altura do Parque Lage (Figura 49). Apesar de não haver nenhum rio ou canal próximo o suficiente desta localidade, ela frequentemente sofre por alagamentos como o que foi visto em 2019, no qual chegou a registrar lâminas de água de quase 1 m, como mostra o Gráfico 7.

Gráfico 7: Cotograma do Parque Lage



Fonte: Autores.

Figura 49: Localização do Parque Lage



Fonte: Autores.

O que possivelmente explica o acúmulo de água neste ponto, seria por algo similar da Região III, no qual devido a cota elevada das células no seu entorno, faz com que este lugar vire um reservatório. Além disso, é provável que a rede de micro-drenagem deste local seja subdimensionada, o que agrava ainda mais a situação.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, com os resultados obtidos, é possível observar que o modelo está representando resultados próximos à realidade, uma vez que os resultados da simulação coincidem em grande parte com as regiões que enfrentaram o acúmulo excessivo de água durante o evento ocorrido em **2019**.

O modelo apresentou algumas diferenças do que foi observado em 2019, isso pode ter sido causado por diversos fatores, como por exemplo, o modelo não levar em conta os sistemas de micro-drenagem das ruas e calçadas, outro ponto é que as cotas do MDT utilizado possuem uma certa margem de erro.

Além disso o escoamento da água no modelo não é exatamente como ocorre na realidade. Esses fatores fazem com que os níveis e locais alagados apresentados possuam uma certa margem de erro se comparados com a realidade, ainda assim, os resultados foram satisfatórios o suficiente para mostrar que com o modelo utilizado foi possível demonstrar o que ocorreu no evento de 2019 e realçar os problemas dos sistemas de drenagem urbana do Jardim Botânico.

Adicionalmente, estes erros possivelmente são agravados pelo fato de que o momento em que as fotos tiradas do evento de 2019 nas regiões destacadas pode não ter sido o “pior momento”, logo há uma inexatidão nesta conferência, justamente por se tratar de uma estimativa.

Como recomendação a trabalhos futuros sugere-se que seja continuado o processo de calibração do modelo para obter resultados mais próximos aos observados. O processo de calibração pode ser melhorado com a obtenção de base de dados topográficos mais precisos a partir de levantamentos planialtimétricos e levantamentos topobatimétricos dos principais

cursos d'água da região. Medições da variação do nível do mar e da Lagoa Rodrigo de Freitas podem melhorar o processo de calibração.

Associado ao processo de calibração, recomenda-se que o modelo seja testado para outro evento de referência de maneira a validar os resultados para outra chuva que ocasionou inundações.

Após a calibração e validação do modelo, ele estará apto para realizar um diagnóstico mais preciso das inundações do sistema de macrodrenagem da área de estudo, bem como estará apto para simular intervenções de melhorias do sistema de drenagem para mitigação de alagamentos e inundações.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ALERTA RIO. Dados Pluviométricos. Rio de Janeiro, RJ, 2022. Disponível em: < <http://alertario.rio.rj.gov.br/download/dados-pluviometricos/> > Acessado em 06 nov. 2022.
- CARVALHO, C.; MACEDO, E; OGURA, A. Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios. Brasília, DF, 2007. p. 176.
- COSTA, J. Influência da falta de ordenamento urbano na aceleração do escoamento superficial. Belém, PA, 2012. p. 72.
- DAVIS, E. G.; NAGHETTINI, M. C. Estudo de chuvas intensas no Estado do Rio de Janeiro. 2000. p. 6-7.
- ENOMOTO, C. Método para elaboração de mapas de inundação: Estudo de caso na Bacia do Rio Palmital, Paraná. 2004. Curitiba, PR, 2004.
- FUNDAÇÃO RIO-ÁGUAS. Instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana. Rio de Janeiro, RJ, 2019. Disponível em: < <http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/8940582/4244719/InstrucaoTecnicaREVISA01.pdf> >. Acessado em 03 nov. 2022.

- FRIEDRICH, C. *Comparison of ArcGIS and QGIS for Applications in Sustainable Spatial Planning*. 2014.
- IBGE. Perfil dos Municípios Brasileiros. Rio de Janeiro, RJ, 2014. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv86302.pdf>>. Acessado em 22 nov. 2022.
- KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M; MORENO, D.; MARCELINO, I; MARCELINO, E.; GONÇALVES, E.; BRAZETTI, L; GOERL, L.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. *Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos*. 1 ed., Curitiba, PR, 2006.
- LEE, J.; BEDNARZ, R. *Effect of GIS learning on spatial thinking*. *Journal of Geography in Higher Education*. 2009. p. 183-198.
- MIGUEZ, M.G.; REZENDE, O.M. & VERÓL, A.P. *Interações entre o Rio dos Macacos e a Lagoa Rodrigo de Freitas sob a ótica dos problemas de drenagem urbana e ações integradas de revitalização ambiental*. Rio de Janeiro, RJ, 2012. p. 615-650.
- MIGUEZ, M.G.; REZENDE, O.M.; VERÓL, A.P. *Drenagem Urbana: Do Projeto Tradicional à Sustentabilidade*. Rio de Janeiro, RJ, 2015.
- NASCIMENTO, N.O.; BATISTA, M.B. e DE SOUZA, V.C.B. *Sistema Hidrourb para o pré-dimensionamento de soluções compensatórias em*

drenagem urbana. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, CD-Rom, art. 330. Vitória, ES, 1997.

- OLIVEIRA, A.K.B. O Sistema de Drenagem como Eixo Estruturante do Planejamento Urbano: Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Acari / Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira. Rio de Janeiro, RJ: UFRJ/COPPE, 2018.
- OLIVEIRA, A. K. B. *et al.* Evaluating the Role of Urban Drainage Flaws in Triggering Cascading Effects on Critical Infrastructure, Affecting Urban Resilience. *Infrastructures*, v. 7, n. 11, p. 153, 2022.
- PEJOVIĆ, M.; GOSPAVIĆ, Z.; MILOVANOVIĆ, B.; ARSIĆ, I. *Solving a surveying problem by using R and QGIS - Setting out of a land expropriation zone. Geonauka.* 2014. p. 12-18.
- POLI, C. As causas e as formas de prevenção sustentáveis das enchentes urbanas. In: 2º Seminário Nacional de Construções Sustentáveis. Porto Alegre, RS, 2013.
- POMPÊO, C. A. Drenagem Urbana Sustentável. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos / Associação Brasileira de Recursos Hídricos*, volume 5, no. 1. Porto Alegre, RS, 2000. p. 15-23.

- TOMLINSON, R. *Thinking about GIS: Geographic Information System Planning for Managers*. 2013.
- TUCCI, C.; GENZ, F. Controle do Impacto da Urbanização. In: TUCCI, C.; TOZZI, M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. *Drenagem Urbana*. Porto Alegre, RS, 1995.
- TUCCI, C.; BERTONI, J. Inundações Urbanas na América do Sul. Porto Alegre, RS, 2003. p. 1-6.
- TUCCI, C. Inundações urbanas: impactos da urbanização. Porto Alegre, RS, 2007. p. 87-124.
- WING, M.G.; BETTINGER, P. *GIS: An updated primer on a powerful management tool*, *Journal of forestry*. 2003. p. 4-8.