

Ana Carolina de Oliveira Fonseca

# **Estudo hidrológico-hidrodinâmico para mitigação de inundações: estudo de caso do Centro Histórico do Município de Petrópolis-RJ e a bacia hidrográfica do Rio Quitandinha**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Trabalho apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Civil na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil**

Orientador: Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

Coorientadora: Marina Bellaver Corte

Rio de Janeiro

Dezembro de 2022



## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me abençoar com o dom da vida e me fortalecer todos os dias para alcançar os meus objetivos.

Agradeço à minha mãe e minha melhor amiga Marilene, que desde tão nova lutou com muita fé e amor para proporcionar uma vida confortável e educação de qualidade para mim e meus irmãos. Mãe, você é a minha maior inspiração e eu dedico todo esse trabalho a você.

Aos meus irmãos Rodrigo e Luiz, por sempre estarem ao meu lado e, junto a nossa mãe, trazendo união à nossa família, mesmo em todos os momentos difíceis que passamos.

Aos meus grandes amigos que adquiri nessa caminhada e que estiveram comigo nos momentos bons e ruins: Hanedi, Marcelle, Caroline, Ana Carolina, Camila, Rafael, Bruno, Caio, Marcos e Fernando. Um agradecimento especial a José Victor, meu grande amigo e companheiro. Obrigada pela sua amizade, desde o início da graduação, a todos os momentos felizes e por todo carinho nos momentos difíceis.

Aos professores Luiz Fernando Seibel e Welles Morgado que não apenas me ensinaram a programar em Python e entender as propriedades magnéticas e elétricas da matéria, mas que em diversos momentos difíceis da minha vida estiveram ao meu lado e acreditaram no meu potencial como aluna.

À professora Luciana Arruda por todo carinho e apoio durante minha graduação.

À professora Mady Pourbax, que foi um anjo de luz na minha vida.

À toda equipe do projeto TCBR 495 – “Desempenho de reparos em ambiente Salinos”, que me proporcionou uma experiência extremamente enriquecedora como aluna de iniciação científica e amigos que levarei para toda minha vida: Priscila, Bruno, Marcello, Victor, Geovane, Patrícia, Cíntia, Jessé e Felipe.

Um agradecimento especial ao professor Daniel Cardoso, que me orientou e acreditou no meu potencial durante toda mentoria no projeto de iniciação científica.



À equipe do Projeto de Extensão “Avaliação de riscos em comunidades atingidas por desastres naturais” em parceria da PUC-Rio e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), por todos os materiais cedidos para confecção desse trabalho.

À equipe do Aquafluxus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos, por todos os materiais cedidos para confecção desse trabalho.

À equipe do SOU Básico PUC-Rio e SPA PUC-Rio, em especial à Deborah e Manuella, que me acalentaram quando precisei e me ajudaram a me reestabelecer nos momentos difíceis.

À toda equipe da Chicago Advisory Partners, pela compreensão durante a elaboração deste trabalho e em especial ao meu grupo trabalho, que me proporcionou tantos momentos de aprendizado e alegria.

Agradeço a todos os professores que tive o prazer de ser aluna na Sociedade Brasileira de Cultura Inglesa.

Agradeço a todos as freiras, professores e funcionários do extinto Colégio Santo Amaro, que deram à mão a mim e a toda minha família por tantos anos.

Aos meus orientadores Antonio Krishnamurti e Marina Corte, que desde o início e acreditaram no meu potencial e me incentivaram a alcançar o meu melhor neste trabalho. Obrigada por todos os ensinamentos, incentivo, compreensão e parceria. Eu não teria escolhido melhores professores para fazer esse trabalho.

Um agradecimento especial a todos professores, colegas e funcionários que tive o prazer de conhecer na PUC-Rio.

À PUC-Rio, por ter acreditado no meu potencial desde o início, abriu os meus olhos para um leque de oportunidades e me proporcionou inúmeras experiências inesquecíveis.

Ana Carolina de Oliveira Fonseca



## RESUMO

No dia 15 de fevereiro de 2022, uma chuva extrema atingiu a cidade de Petrópolis. As consequências desse evento foram a ocorrência de inundações, deslizamentos de terra, destruição de moradias e lotes comerciais (RIBEIRO, 2022), desencadeando na morte de 233 pessoas (GANDRA, 2022) e 119 locais atingidos que necessitam de obras de recuperação (DIÁRIO DE PETRÓPOLIS, 2022). O 1º distrito de Petrópolis é uma das regiões mais atingidas por inundações, em decorrência das características topográficas e orográficas da região, bem como das intervenções urbanas realizada ao longo dos anos. Este trabalho tem como intuito realizar um estudo de caso do Centro Histórico do município de Petrópolis – RJ e da bacia hidrográfica do rio Quitandinha, analisar o sistema de drenagem das regiões e propor uma solução estrutural para mitigação das inundações, a partir de uma simulação hidrodinâmica no Modelo de Escoamento de Células (MODCEL). Os resultados apresentam uma melhoria de 97% da lâmina d'água precipitada na seção crítica da Avenida Koeler com a implementação de uma galeria extravasora de seção 3 x 8 m na rua Treze de Maio, bairro do Centro. A alternativa de melhoria da capacidade hidráulica do rio Quitandinha apresenta redução de 2,44 m do nível d'água entre a rua Coronel Veiga e a rua General Rondon, porém denota um acréscimo de 23% das inundações na seção crítica da Avenida Koeler, o que inviabiliza a adoção dessa alternativa. A combinação das alternativas de solução para o Centro Histórico de Petrópolis e a bacia hidrográfica do rio Quitandinha se trata do cenário mais otimista para mitigação de inundações no 1º distrito de Petrópolis, uma vez que registra uma redução de 50% da lâmina d'água precipitada na seção crítica da Avenida Koeler e redução de 2,44 m do nível d'água entre a rua Coronel Veiga e rua General Rondon.

**Palavras-chave:** Drenagem urbana; Inundações; MODCEL; Centro Histórico de Petrópolis; Rio Quitandinha;



## ABSTRACT

On February 15th, 2022, an extreme rain reached the city of Petrópolis. The consequences of these event were flood, landslides, destruction of residential and commercial buildings (RIBEIRO, 2022), leading into death of 233 people and 119 reached areas needing recovery works (DIÁRIO DE PETRÓPOLIS, 2022). The first district of Petrópolis is one of the most affected areas by flood, due to their topographic and orographic characteristics, as well the urban interventions occurred over the years. The aim of this work is to hold a study case of Historical Centre of Petrópolis and Quitandinha's hydrographic basin, analyze the drainage system of those areas and propose a structural solution for flood mitigation, through a hydrodynamic simulation in Flow Cells Modelling (MODCEL). The results have shown an improvement of 97% water blade in Koeler Avenue critical section, considering an implementation of a 3 x 8 m bypass channel in Treze de Maio St, Centro. The alternative of Quitandinha River hydraulic capacity improvement represents a water level reduction of 2,44 m between Coronel Veiga Street and General Rondon Street. However, represents a flood increase of 23% in Koeler Avenue critical section, which turns the alternative implementation unfeasible. The solutions alternatives combination for Historical Centre of Petrópolis and Quitandinha's hydrographic basin is most optimistic scenario for 1<sup>st</sup> district of Petrópolis flood mitigation, once represents a 50% water blade reduction in Koeler Avenue critical section and water level reduction of 2,44 m between Coronel Veiga Street and General Rondon Street.

**Keywords:** Urban drainage; Flood; MODCEL; Historical Centre of Petrópolis; Quitandinha River.



## SUMÁRIO

|          |                                                     |           |
|----------|-----------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                             | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivação .....                                     | 3         |
| 1.2      | Objetivo .....                                      | 4         |
| 1.2.1    | Objetivo geral .....                                | 4         |
| 1.2.2    | Objetivos específicos .....                         | 4         |
| 1.2.3    | Metodologia geral .....                             | 5         |
| 1.2.4    | Escopo do trabalho .....                            | 6         |
| <b>2</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                    | <b>7</b>  |
| 2.1.     | Falhas no sistema de drenagem .....                 | 9         |
| 2.2.     | Soluções estruturais e não estruturais .....        | 11        |
| 2.2.1    | Soluções estruturais .....                          | 11        |
| 2.2.2    | Soluções não estruturais .....                      | 16        |
| <b>3</b> | <b>ESTUDO DE CASO .....</b>                         | <b>18</b> |
| 3.1.     | Caracterização da área de estudo .....              | 18        |
| 3.1.1    | Localização .....                                   | 18        |
| 3.1.2    | Geologia e geomorfologia .....                      | 20        |
| 3.1.3    | Clima .....                                         | 20        |
| 3.1.4    | Vegetação .....                                     | 20        |
| 3.2.     | Histórico de ocupação da cidade de Petrópolis ..... | 21        |



|        |                                                                 |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.   | Eventos pluviométricos extremos no município de Petrópolis..... | 25 |
| 3.3.1. | Evento de fevereiro de 2022.....                                | 26 |
| 3.4.   | Sistema de drenagem do Centro Histórico de Petrópolis .....     | 28 |
| 3.5.   | Bacia Hidrográfica do Rio Quitandinha .....                     | 39 |
| 4      | METODOLOGIA .....                                               | 46 |
| 4.1.   | Levantamento de dados e estudos hidrológicos.....               | 46 |
| 4.2.   | Modelo hidrodinâmico de cheias urbanas .....                    | 49 |
| 4.3.   | Simulação de alternativas.....                                  | 57 |
| 4.3.1  | Centro Histórico de Petrópolis .....                            | 57 |
| 4.3.2  | Rio Quitandinha.....                                            | 61 |
| 4.3.3  | Alternativas de solução combinadas.....                         | 62 |
| 5      | RESULTADOS.....                                                 | 64 |
| 5.1.   | Centro Histórico de Petrópolis.....                             | 65 |
| 5.2.   | Rio Quitandinha .....                                           | 73 |
| 5.3.   | Alternativas de solução combinadas.....                         | 78 |
| 6      | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....                                      | 85 |
| 7      | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                | 89 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Elementos básicos de microdrenagem. Fonte: MIGUEZ <i>et al.</i> (2016) .....                                                                             | 8  |
| Figura 2 - Hidrograma hipotético. Fonte: TUCCI (2007) .....                                                                                                         | 10 |
| Figura 3 – Bacias de detenção. Fonte: Acervo pessoal de Erika Tominaga/FCTH .....                                                                                   | 12 |
| Figura 4 – Bacia de retenção. Fonte: EMATER (2006) .....                                                                                                            | 12 |
| Figura 5 - Perfil esquemático de uma vala de infiltração. Fonte: NASCIMENTO &<br>KOIDE (1999) .....                                                                 | 13 |
| Figura 6 - Esquema de um telhado verde básico. Fonte: GERADO <i>et al.</i> (2021) .....                                                                             | 14 |
| Figura 7 - Mapa das estações hidrometeorológicas do Sistema de Alerta de Cheias do<br>Estado do Rio de Janeiro. Fonte: Sistema de Alerta de Cheias (INEA).....      | 17 |
| Figura 8 - Mapa da região metropolitana do estado do Rio de Janeiro. Fonte: Estado do<br>Rio de Janeiro .....                                                       | 19 |
| Figura 9 - Petrópolis e seus 5 distritos: Petrópolis, Cascatinha, Itaipava, Pedro do Rio e<br>Posse. Fonte: HABITAT ECOLÓGICA (2014).....                           | 19 |
| Figura 10 - Localização da APA Petrópolis. Fonte: IBAMA (2007) <i>apud</i> IBGE (2000)<br>.....                                                                     | 21 |
| Figura 11 - Plano urbanístico desenvolvido por Köeler em 1846. Fonte: Drach <i>et al.</i><br>(2020) <i>apud</i> Biblioteca do Museu Imperial – Petrópolis, RJ ..... | 22 |
| Figura 12 - População residente no município de Petrópolis: 1940 a 2010. Adaptado de<br>Fundação CEPERJ (2019).....                                                 | 23 |
| Figura 13 - Avanço da ocupação irregular em Petrópolis entre 1985 e 2020. Adaptado<br>de MapBiomas e IBGE (2022) .....                                              | 24 |



|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 14 - Deslizamento no Morro da Oficina, no bairro de Alto da Serra (Petrópolis, RJ). Fonte: PLAUCHEUER, AFP, METSUL METEOROLOGIA (2022) .....    | 27 |
| Figura 15 - Deslizamento no bairro de Castelânea, Petrópolis (RJ, Brasil). Fonte: REGO, AGÊNCIA BRASIL, EBC, METSUL METEOROLOGIA (2022).....           | 27 |
| Figura 16 - Lama e destroços no Centro Histórico de Petrópolis (RJ, Brasil). Fonte: FRAZÃO, AGÊNCIA BRASIL, EBC, METSUL METEOROLOGIA (2022).....       | 28 |
| Figura 17 - Limites da bacia hidrográfica que compreende o Centro Histórico de Petrópolis. Fonte: Aquafluxus (2022) .....                              | 29 |
| Figura 18 - Encontro dos rios Quitandinha e Palatinato, formando o Canal do Centro e o Rio Piabanha. ....                                              | 30 |
| Figura 19 - Seção do encontro dos rios Quitandinha e Palatinato. Fonte: HABITAT ECOLÓGICA (2014) .....                                                 | 31 |
| Figura 20 - Esquema de funcionamento de um <i>bypass channel</i> . Fonte: WMO (2009) .                                                                 | 32 |
| Figura 21 - Abertura de crateras no trajeto do túnel extravasor do rio Palatino, no bairro de Quissamã. Fonte: Diário de Petrópolis (2020).....        | 36 |
| Figura 22 - Tomada do Túnel Extravasor do rio Palatino Obstruída. Fonte: INEA (2022) .....                                                             | 37 |
| Figura 23 - Condições do túnel extravasor do Palatino após desastre de fevereiro de 2022. Adaptado de OSÓRIO, G1 Rio (2022).....                       | 37 |
| Figura 24 - Obras do túnel extravasor em Petrópolis. Fonte: Ferreira (2022).....                                                                       | 39 |
| Figura 25 - Seção do rio Quitandinha na rua Coronel Veiga. Fonte: HABITAT ECOLÓGICA (2014) .....                                                       | 40 |
| Figura 26 - Pontes na margem direita do rio Quitandinha, no nº 771 da rua Coronel Veiga, bairro de Valparaíso, Petrópolis, RJ. Fonte: Google Maps..... | 45 |



|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 27 - Pontes na margem direita do rio Quitandinha, no nº 630 da rua Coronel Veiga, bairro de Valparaíso, Petrópolis, RJ. Fonte: Google Maps.....                                     | 45 |
| Figura 28 - Hietograma de projeto para a chuva de TR 25 anos. Fonte: Aquafluxus (2022) .....                                                                                               | 47 |
| Figura 29 - Hietograma de projeto para a chuva de TR 50 anos. Fonte: Aquafluxus (2022) .....                                                                                               | 48 |
| Figura 30 - Hietograma de projeto para a chuva de TR 100 anos. Fonte: Aquafluxus (2022) .....                                                                                              | 49 |
| Figura 31 - Nível registrado e simulado no posto Coronel Veiga do Rio Quitandinha. Fonte: INEA (2022).....                                                                                 | 51 |
| Figura 32 - Nível registrado e nível simulado no posto Alto da Serra do Rio Palatino. Fonte: INEA (2022).....                                                                              | 51 |
| Figura 33 - Nível registrado e nível simulado no posto Centro do rio Quitandinha. Fonte: INEA (2022).....                                                                                  | 52 |
| Figura 34 - Perfil de níveis máximos obtidos na modelagem hidrodinâmica do Canal do Centro, a partir de dados do evento de fevereiro de 2022. Fonte: INEA (2022).....                      | 53 |
| Figura 35 - Modelo hidrodinâmico de cheias desenvolvido pelo Projeto de Extensão “Avaliação de riscos em comunidades atingidas por desastres naturais” em parceria da PUC-Rio e UFRJ ..... | 54 |
| Figura 36 – Perfil de níveis máximos para a situação atual no rio Quitandinha para o TR 50. Fonte: INEA (2022).....                                                                        | 55 |
| Figura 37 – Perfil de níveis máximos para a situação atual no Canal do Centro para o TR 50. Fonte: INEA (2022).....                                                                        | 56 |
| Figura 38 - Esquema da solução da galeria extravasora da rua Treze de Maio. ....                                                                                                           | 58 |



|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 39 - Simulação da implementação da galeria extravasora da rua Treze de Maio no MODCEL. ....                                                                     | 60 |
| Figura 40 - Área de estudo da simulação de melhorias da capacidade hidráulica do rio Quitandinha. ....                                                                 | 62 |
| Figura 41 - Mancha de inundação da situação atual do Centro Histórico de Petrópolis. Fonte: INEA (2022). ....                                                          | 65 |
| Figura 42 - Mancha de inundação do Centro Histórico de Petrópolis para a alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio. Fonte: INEA (2022). ....        | 66 |
| Figura 43 - Lâmina mais crítica de extravasamento d'água na Avenida Koeler para alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio. ....                     | 68 |
| Figura 44 - Lâmina mais crítica de extravasamento d'água na Avenida Koeler por área da seção para a alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio. .... | 69 |
| Figura 45 - Medição do desnível entre a rua e a calçada. Fonte: Autora ....                                                                                            | 70 |
| Figura 46 - Medição do desnível entre a calçada e edificações nível da mureta externa da edificação. Fonte: Autora. ....                                               | 70 |
| Figura 47 - Perfil de níveis máximos no Canal do Centro para a alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio. ....                                      | 72 |
| Figura 48 - Níveis d'água simulados no bairro de Corrêas para o TR 50. ....                                                                                            | 73 |
| Figura 49 - Perfil de níveis máximos no rio Piabanha para a alternativa de melhoria da capacidade hidráulica do rio Quitandinha. ....                                  | 75 |
| Figura 50 - Perfil de níveis máximos no Canal do Centro para a alternativa de melhoria da capacidade hidráulica do rio Quitandinha. ....                               | 76 |
| Figura 51 - Perfil de níveis máximos no rio Piabanha para a alternativa de melhoria da capacidade hidráulica do rio Quitandinha. ....                                  | 77 |



|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 52 - Perfil de níveis máximos no Rio Piabanha para as alternativas de solução combinadas. ....                                       | 80 |
| Figura 53 - Perfil de níveis máximos no Canal do Centro para as alternativas de solução combinadas. ....                                    | 81 |
| Figura 54 - Perfil de níveis máximos no Rio Piabanha para as alternativas de solução combinadas. ....                                       | 82 |
| Figura 55 - Lâmina mais crítica de extravasamento d'água na Avenida Koeler comparando as três alternativas simuladas ao cenário atual. .... | 83 |



## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Principais intervenções no Centro Histórico de Petrópolis no Projeto Mitigação de Cheias: Proteção do Centro Histórico de Petrópolis” elaborado em 2011 pelo Professor Paulo Canedo (COPPE/ UFRJ). Adaptado de INEA (2022)..... | 33 |
| Tabela 2 - Evidências de degradação no túnel extravasor do Palatinato. Adaptado de HABITAT ECOLÓGICA (2014).....                                                                                                                           | 35 |
| Tabela 3 – Acervo histórico de eventos pluviométricos extremos nos anos de 2013 à 2022 na rua Coronel Veiga, bairro de Valparaíso, Petrópolis, RJ. Fonte: Autora .....                                                                     | 41 |
| Tabela 4 - Dados dos 5 cenários simulados para a galeria da rua Treze de Maio.....                                                                                                                                                         | 60 |
| Tabela 5 - Alternativas de solução propostas. ....                                                                                                                                                                                         | 63 |
| Tabela 6 - Resultados da modelagem de 5 cenários para a alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio para o TR 50. ....                                                                                                    | 67 |
| Tabela 7 - Alternativas propostas e seus respectivos resultados. ....                                                                                                                                                                      | 83 |



## 1 INTRODUÇÃO

As inundações urbanas são um problema cada vez mais recorrentes em grandes metrópoles. O aumento desse fenômeno é atribuído a diversas causas, como o acelerado processo de urbanização, a má gestão do uso do solo, e a falta de normas para dimensionamento de um sistema de drenagem urbana funcional. De acordo com Tucci (2007), as inundações em áreas urbanas são provocadas pelos processos de inundações em áreas ribeirinhas e em razão da urbanização.

No caso do município de Petrópolis, localizado no estado do Rio de Janeiro, o primeiro plano de urbanização da cidade (Plano Koeler), durante o período do Império, previa o crescimento da cidade de forma que respeitasse as limitações ambientais locais (GUERRA *et al*, 2007). No entanto, a falta de um sistema de drenagem adequado e de legislações de uso e ocupação do solo, alinhado à elevada quantidade de construções irregulares em encostas e nos entornos dos corpos hídricos, em uma região de relevo extremamente acidentado, clima tropical e altitudes elevadas desencadearam em uma série de interferências no ciclo hidrológico da região, facilitando a ocorrência de eventos pluviométricos intensos.

Em sua história, a cidade Petrópolis é marcada pela ocorrência de desastres ocasionados por inundações, principalmente na região do 1º distrito de Petrópolis (Petrópolis – SEDE), que acontecem, conforme relatos, anteriormente a fundação da cidade até os dias atuais. O acidente ocorrido no dia 15 de fevereiro de 2022 é considerado o pior desastre da história da região, acarretando a morte de 233 pessoas e 119 locais atingidos que hoje apresentam necessidades de obras para sua reparação (GANDRA, 2022; DIÁRIO DE PETRÓPOLIS, 2022).

Dentre as regiões do 1º distrito normalmente afetadas pelas chuvas extremas, nota-se que o Centro Histórico de Petrópolis (bairro do Centro) e a rua Coronel Veiga, localizada no bairro de Quitandinha, apresentam a maior quantidade de ocorrências. No caso do Centro Histórico de Petrópolis, as limitações do Canal do Centro, como a sobrelevação de nível d'água no encontro dos rios Quitandinha e Palatinato, o assoreamento exacerbado, acabam por prejudicar o escoamento da região à jusante do Rio Piabanha (CANEDO,



2011; PLACIDO, CUNHA, 2008; INEA, 2022). O rio Quitandinha, por sua vez, corre paralelamente à rua Coronel Veiga. A região da rua Coronel Veiga apresenta intenso tráfego de pessoas e veículos, além da existência de inúmeras pontes que obstruem o canal. Há estudos que, inclusive, denotam que a proposição de medidas de mitigação de inundações na bacia do rio Quitandinha devem ser analisadas com cautela, pois podem elevar o extravasamento d'água no Centro Histórico (INEA, 2022; GONZALEZ, 2014).

Este trabalho tem como finalidade propor um projeto de mitigação de inundações, a nível conceitual, no Centro Histórico de Petrópolis e na bacia do rio Quitandinha, através de estudos hidrológicos e hidrodinâmicos da região, discussão sobre elementos básicos de drenagem urbana e manejo de águas pluviais, medidas estruturais e não estruturais para controle de inundações e a simulação de alternativas através do Modelo de Células de Escoamento (MODCEL), levando em consideração os dados pluviométricos do evento de 15 de fevereiro de 2022. Esse estudo foi elaborado em paralelo com o Projeto de Extensão “Avaliação de riscos em comunidades atingidas por desastres naturais” em parceria da PUC-Rio e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Vale destacar que o modelo inicial, que compreendia, detalhadamente, a bacia do rio Quitandinha e do Canal do Centro, foi desenvolvido por Machado *et al.* (2022) e estendido e detalhado para a bacia do Alto Piabanha, até o bairro de Corrêas, no âmbito do Estudo de Alternativas e Elaboração de Projetos Básicos e Executivos para Controle de Inundações do Centro Histórico do Município de Petrópolis-RJ pela Aquafluxus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos. (AQUAFLUXUS, 2022).



## 1.1 Motivação

O município de Petrópolis faz parte da região metropolitana do Rio de Janeiro (desde 2018) e possui grande importância histórica, uma vez que era neste território que a família imperial brasileira residia nos intensos períodos de verão da capital – explicando o porquê de a cidade ser denominada como “Cidade Imperial”. No ano de 1843, Dom Pedro II assinou um acordo com o engenheiro Julio Frederico Köeler, com objetivo de expandir o território da Fazenda do Córrego Seco. A partir disso, o engenheiro deu início ao primeiro plano urbanístico da cidade de Petrópolis, o plano Koeler (ASSUMPÇÃO, 2014).

O objetivo de Koeler era desenvolver um plano urbanístico que contemplasse a preservação das matas e do manancial d’água, para proveito de cultivo agrícola, paralelamente ao crescimento urbano (GUERRA *et al*, 2007). Aos poucos, o crescimento urbano superou o rural, o que desencadeou no processo de desmatamento devido a ocupação desordenada, que foi facilitada pela não existência de uma legislação de obras que levasse em consideração a preservação do meio ambiente (GUERRA *et al*, 2007). A expansão urbanística de Petrópolis, aliada aos intensos eventos pluviométricos, levaram à ocorrência de desastres, trazendo grandes prejuízos à população residente.

Desde a fundação da cidade de Petrópolis, foram encontrados registros de chuvas nos seguintes anos 1855, 1873, 1875, 1882, 1883, 1886, 1899, 1930, 1945, 1952, 1964, 1965, 1966, 1988, 2011, 2013 e 2022 (ASSUMPÇÃO, 2014; INEA, 2022).

A enchente ocorrida no ano 1988 é considerado o segundo pior desastre da história, com 171 mortos e cerca de 1000 pessoas desabrigadas. No desastre da Região Serrana, em 2011, a chuva ocorrida no município de Teresópolis, atingiu 2º distrito de Petrópolis, Itaipava, levando a morte de 73 pessoas,, além de atingir regiões vizinhas, como Nova Friburgo, totalizando a morte de 918 pessoas na Região Serrana. O acidente foi marcado pela destruição em grandes proporções de todo patrimônio público, como o soterramento de casas, destruição de veículos e danos extremos às vias públicas. O desastre ocorrido em 2022, por fim, é considerado o pior de toda história da cidade de Petrópolis, com cerca de 233 mortes e 119 locais atingidos com necessidade de obras.



Percebe-se que, embora às questões relacionadas à drenagem urbana no território petropolitano tenham sido consideradas, levando a construção de novas estruturas de drenagem (por exemplo, a construção do túnel extravasor do rio Palatinato em 1945), a elaboração de novas diretrizes para o uso e ocupação do solo (com a criação da Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo, a LUPOS) e a criação do Plano Diretor da cidade em 1991 (que se encontra atualizado desde 2014 e em revisão desde 2018), é possível visualizar uma manutenção na magnitude das inundações que ocorrem desde sua fundação até os dias atuais, e nos impactos sofridos pela população.

Desta forma, este trabalho realizará o estudo de caso de duas regiões cuja população encontra-se susceptível à ocorrência de grandes inundações – o Centro Histórico de Petrópolis e a bacia hidrográfica do rio Quitandinha, localizadas no 1º distrito de Petrópolis (Petrópolis – SEDE).

## **1.2 Objetivo**

Esta seção apresenta os objetivos gerais e específicos do presente trabalho de conclusão de curso.

### **1.2.1 Objetivo geral**

Propor um projeto, a nível conceitual, para mitigação das inundações no Centro Histórico do Município de Petrópolis e para a bacia hidrográfica do rio Quitandinha, localizados na bacia hidrográfica do Rio Piabanha.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Desenvolver uma revisão teórica de conceitos relacionados a drenagem urbana, necessários para o desenvolvimento do projeto, como: microdrenagem, macrodrenagem, soluções estruturais e não estruturais; obras geotécnicas para auxílio do controle de inundações;



- Levantar, a partir de notícias, publicações e trabalhos técnicos e acadêmicos pregressos, os principais eventos de inundação na região de estudo de caso;
- Realizar estudos hidrológicos na bacia hidrográfica que contribuí para o Centro Histórico e bacia do rio Quitandinha;
- Desenvolver, a partir de Modelagem hidrodinâmica computacional o diagnóstico das inundações na bacia hidrográfica que contribui para o Centro Histórico e a bacia do rio Quitandinha, bem como proposições para mitigação das inundações;
- Discutir e comparar os resultados dos projetos de mitigação de inundações propostos.

### 1.2.3 Metodologia geral

Neste tópico será apresentado de forma geral a metodologia que guiará o desenvolvimento do trabalho. Optou-se por apresentar no capítulo principal de Metodologia, exibido posteriormente, a aplicação metodológica no estudo de caso, de maneira a facilitar o seu entendimento.

A metodologia parte de uma revisão teórica dos principais temas que serão tratados no projeto final, sendo eles o manejo de águas pluviais, o sistema de drenagem urbana e a proposição de soluções para o controle de inundações.

Após a revisão teórica serão guiados os estudos hidrológicos que visam o levantamento das principais características fisiográficas da área de estudo, pertinentes ao processo de formação de enchentes (topografia, hidrografia, uso e ocupação do solo). Além disso, será realizado o estudo das chuvas da região, a partir do qual será verificado o regime pluviométrico local e identificada a equação de chuvas intensas que rege o local.

Após os estudos preliminares de hidrologia será iniciada a análise das inundações da bacia utilizando a base de simulação construída e desenvolvida no âmbito de diversos trabalhos (Machado *et al.*, 2022). Além disso, a equipe de alunos e professores do Projeto de Extensão “Avaliação de riscos em comunidades atingidas por desastres naturais” em



parceria da PUC-Rio e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), auxiliou na elaboração da base de simulação e de cenários propositivos. A base de simulação utiliza o Modelo de Células de Escoamento (MODCEL) desenvolvido pelo Professor Marcelo Gomes Miguez (Miguez, 2001; Miguez *et al.*, 2017) no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da UFRJ (COPPE/UFRJ).

Após o diagnóstico da situação atual das inundações, serão estudadas alternativas para mitigação de inundações. Estas soluções serão verificadas a partir do modelo hidrodinâmico utilizado na etapa de diagnóstico das inundações.

Finalmente, serão apresentados os resultados de melhorias após a simulação das intervenções para verificação da melhor alternativa sob o ponto de vista de redução das inundações. Adicionalmente, será verificada a dificuldade de execução das alternativas propostas sob o ponto de vista da escavação e o alívio nas inundações para determinação do cenário mais eficiente que equilibre estes dois fatores.

#### **1.2.4 Escopo do trabalho**

Além da introdução, apresentada neste capítulo 1, que apresenta a motivação, objetivos e metodologia geral do trabalho, serão apresentados a seguir os demais capítulos que compõem o presente trabalho final de conclusão de curso.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos conceitos relacionados ao manejo de águas pluviais, falhas no sistema de drenagem urbana e medidas de controle de inundações.

O capítulo 3 apresenta o estudo de caso que será desenvolvido a partir do que foi descrito no capítulo de metodologia geral. Nesse tópico, serão apresentadas as características físicas do Centro Histórico de Petrópolis e da bacia hidrográfica do Rio Quintandinha, o histórico de ocupação do município de Petrópolis, os principais eventos pluviométricos que afetaram a cidade e a descrição do sistema de drenagem de ambas as áreas.

O capítulo 4 evidencia as etapas necessária para modelagem das alternativas de mitigação das inundações no Centro Histórico de Petrópolis e na bacia hidrográfica do Rio



Quitandinha, desde o levantamento de dados, confecção do modelo hidrodinâmico de cheias à simulação das alternativas elaboradas.

O capítulo 5 apresenta os resultados da simulação das alternativas de mitigação de inundações na área de estudo e, por fim, o capítulo 6 apresenta uma avaliação das alternativas propostas no trabalho e considerações finais a respeito do trabalho desenvolvido.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica dos temas relacionados ao manejo de águas pluviais e sistema de drenagem urbana.

No Brasil, a lei nº 14.026/2020 (BRASIL, 2020) determina que o manejo de águas pluviais é o conjunto de atividades e infraestruturas para condução, retenção, transporte e tratamento de águas pluviais, que tem como objetivo prevenir impactos humanos, sociais, ambientais e econômicos na ocorrência eventos pluviométricos extremos (SNIS, 2019). O sistema de drenagem urbana, por sua vez, é constituído de dois tipos de infraestrutura: a rede de microdrenagem e macrodrenagem.

A microdrenagem urbana é definida como um sistema que recebe e conduz águas das chuvas vindas de construções, lotes, ruas etc. (MIGUEZ *et al*, 2016; TUCCI, 2012). A rede de microdrenagem é implementada com finalidade de permitir a circulação da população em períodos de chuva (FUNASA, UFF, 2016) e devem tender vazões de 2 a 10 anos de período de retorno (TOMINAGA, 2013) que, por sua vez, é definido como o tempo necessário para que uma vazão ou precipitação possa ocorrer ou seja superada (MIGUEZ *et al*, 2016), sendo assim, é inversamente relacionado a probabilidade de um evento acontecer (TUCCI, BERTONI, 2003).

De acordo com Miguez *et al*. (2016), a rede de microdrenagem é composta dos seguintes elementos: meio-fio, sarjetas, sarjetões, bocas de lobo, condutores, caixas de ligação, poços de visita e galerias. O meio-fio e sarjetas recebem as águas pluviais das ruas e de lotes não conectados a ramais prediais (MIGUEZ *et al*, 2016). Os sarjetões são calhas que auxiliam as sarjetas, desviando o fluxo da água de um lado para outro da rua (BIDONE,

TUCCI, 1995). As bocas de lobo ou caixas ralo captam as águas da sarjeta e conduzem para as galerias (LEONARDI, 2017). Os poços de visita realizam a inspeção das águas das bocas de lobo até as canalizações (LEONARDI, 2017). Por fim, as galerias são os principais elementos da drenagem, por onde ocorrerá o escoamento até o exultório do sistema. A Figura 1 indica os elementos básicos o sistema de microdrenagem urbana.

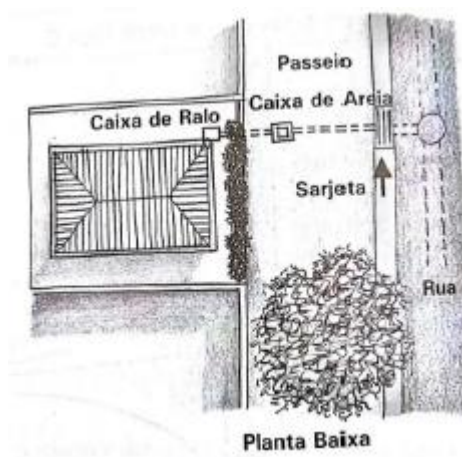


Figura 1 - Elementos básicos de microdrenagem. Fonte: MIGUEZ *et al.* (2016)

O sistema de macrodrenagem é formado pela hidrografia da bacia, isto é, rios e córregos (REZENDE, 2010) e define a seção de escoamento necessária para condução final dos efluentes provenientes do sistema de microdrenagem (MIGUEZ *et al.*, 2016). As estruturas que compõe esse sistema são canais, galerias, reservatórios de detenção e retenção com grandes dimensões (TOMINAGA, 2013), dimensionados para tempos de retorno entre 10 e 100 anos (REZENDE, 2010). Vale destacar que, diante das graves falhas apresentadas na bacia do estudo de caso, o sistema de macrodrenagem será o principal elemento de infraestrutura urbana a ser estudado. A seguir serão representadas as falhas do sistema de drenagem e suas consequências, bem como soluções estruturais e não estruturais para mitigação de efeitos dos fenômenos pluviométricos.



## 2.1. Falhas no sistema de drenagem

As falhas nas redes de drenagem podem ser associadas à diversas razões. Segundo Miguez *et al.* (2016), problemas como mau dimensionamento de estruturas de microdrenagem e/ou macrodrenagem, falta de manutenção, envelhecimento da rede, a perda de capacidade devido crescimento urbano e a ocorrência de chuvas com lâmina d'água precipitada maior que a de projeto são alguns dos motivos que levam ao não funcionamento do sistema de drenagem. Além disso dispersão de resíduos sólidos gera entupimento dos elementos de drenagem, alterando a qualidade da água (JACINTO *et al.*, 2020; RIGHETTO, 2009).

Segundo a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), as falhas do sistema de drenagem podem ser definidas em três tipologias (CENAD, 2014):

Inundações: ocorre quando o volume de água da cheia ultrapassa a capacidade de rios e canais (OLIVEIRA, 2018; MIGUEZ *et al.*, 2016); geralmente ocorre devido chuvas prolongadas em áreas planas (CENAD, 2014) e estão associadas às falhas na rede de macrodrenagem.

Enxurradas: segundo a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), as enxurradas são caracterizadas pelo rápido escoamento superficial de alta velocidade, provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente em pequenas bacias de relevo acidentado. São associadas às falhas na rede de macrodrenagem e são caracterizadas pelo alto poder destrutivo (MIGUEZ *et al.*, 2016).

Alagamentos: trata-se do acúmulo de água nas vias públicas (CENAD, 2014), devido à incapacidade de funcionamento da rede de microdrenagem durante a captação e transporte de águas pluviais (OLIVEIRA, 2018; MIGUEZ *et al.*, 2016).

Em suma, Miguez *et al.* (2016) define que os problemas de drenagem ocorrem devido uma incompatibilidade entre o projeto do sistema e o seu funcionamento. Para Tucci (2007), as enchentes em áreas urbanas são causadas devido dois processos: as enchentes em áreas ribeirinhas e devido o processo de urbanização.



De acordo com Tucci (2008), as inundações em áreas ribeirinhas ocorrem em bacias hidrográficas médias e grandes ( $> 100 \text{ km}^2$ ), quando o escoamento das águas atinge níveis acima do leito menor do rio, atingindo o leito maior. Normalmente, esse tipo de evento é uma consequência da ocupação de áreas de risco, como amplamente discutido em Assumpção (2015), sobre o município de Petrópolis (que será abordado nesse trabalho) e a invasão em áreas ribeirinhas, que pertencem ao poder público (TUCCI, 2008). Para evitar a ocorrência desses eventos, é necessária a mobilização dos órgãos públicos para implementar medidas de educação da população, bem como obras nas áreas de risco (TUCCI, 2008). Essas medidas serão detalhadas no capítulo 2.2 a seguir.

As inundações devido à urbanização ocorrem em função da impermeabilização do solo, que gera uma sobrecarga no sistema de drenagem (SANTOS; RUFINO; FILHO, 2017). Além disso, geram aumento da produção de resíduos sólidos, desmatamento, aumento do número de pessoas vivendo em áreas de risco, contaminação da qualidade do ar e água (LIMA, FILGUEIRA, 2018; TUCCI, 2008). A Figura 2 representa um hidrograma genérico das vazões das cheias, comparando o processo de urbanização, onde há um aumento da vazão máxima, às áreas não urbanizadas.

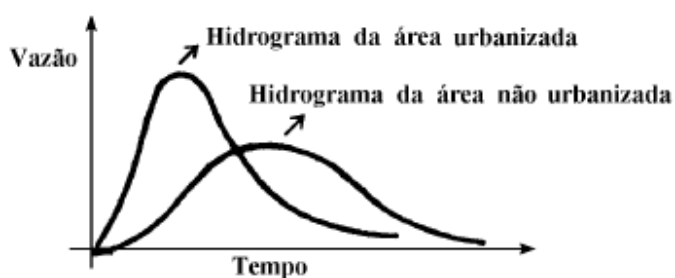


Figura 2 - Hidrograma hipotético. Fonte: TUCCI (2007)

Após apresentar as principais falhas dos sistemas de drenagem, o capítulo a seguir serão apresentadas as principais medidas estruturais e não estruturais para controle de inundações.



## 2.2. Soluções estruturais e não estruturais

O processo de urbanização, a ocorrência de desastres relacionados aos recursos hídricos e o crescente impacto na sociedade e no meio ambiente tem gerado falhas no sistema de drenagem urbana (TUCCI, 2002). Com isso, a necessidade de mitigar os efeitos dos eventos pluviométricos fez com que desenvolvessem as soluções de drenagem, que são classificadas como medidas de caráter construtivo, as soluções estruturais (FILHO; SZÉLIGA; ENOMOTO, 2000) e medidas que conscientizam a população a respeito do uso e ocupação do solo, as soluções não estruturais (MACHADO; POLEZA, 2012).

### 2.2.1 Soluções estruturais

As medidas estruturais realizam intervenções diretas no meio ambiente, com objetivo de realizar o transporte e contenção de águas pluviais. Dentre as medidas, podemos citar as bacias de detenção, ilustrada na Figura 3, que são reservatórios de armazenamento de curtos períodos utilizados para atenuação dos picos das cheias (MIGUEZ *et al*, 2016), devido aumento da impermeabilização. Esse tipo de construção é realizado, não apenas para contenção de enchentes, mas também podem ser atrelados a atividades de lazer da população, como construção de quadras de esporte, praças e estacionamentos (ABCP, 2013), agregando valor paisagístico, urbanístico e ambiental ao local (MIGUEZ *et al*, 2016). As bacias de retenção, ou bacias de contenção, exemplificadas na Figura 4, são reservatórios utilizados para armazenamento e tratamento da água chuva e são normalmente utilizadas em propriedades rurais (RIGHETTO, 2009; MIGUEZ *et al*, 2016). As bacias de retenção são capazes de reduzir a erosão do solo (EMATER, 2006), reabastecer o lençol freático (EMBRAPA, 2022) e melhorar a qualidade da água (RIGHETTO, 2009).



Figura 3 – Bacias de retenção. Fonte: Acervo pessoal de Erika Tominaga/FCTH



Figura 4 – Bacia de retenção. Fonte: EMATER (2006)

Os sistemas de infiltração têm objetivo de reter as águas provenientes do processo de infiltração no solo (MIGUEZ *et al*, 2016), controlando o fluxo da água (RIGHETTO, 2009) e reduzindo a proliferação de poluentes (MOURA; BARRAUD, 2009). A

implantação de medidas de infiltração consiste na criação de dispositivos para facilitar o escoamento da água. Dentre essas medidas, (PRADO; REIS, 2008) estudou as medidas necessárias para a implantação de poços de infiltração de águas fluviais e impacto no sistema de drenagem como as valas de infiltração, que são valas escavadas no solo, responsáveis pela depuração e disposição final do esgoto em condição aeróbia na subsuperfície do solo (ABNT, 1997), podendo auxiliar na redução da velocidade do escoamento superficial (MIGUEZ *et al*, 2016), reter e armazenar água pluvial temporariamente, sendo amplamente utilizadas em ruas e estradas (TOMINAGA, 2013). O perfil esquemático de uma vala de infiltração é exemplificado na Figura 5.

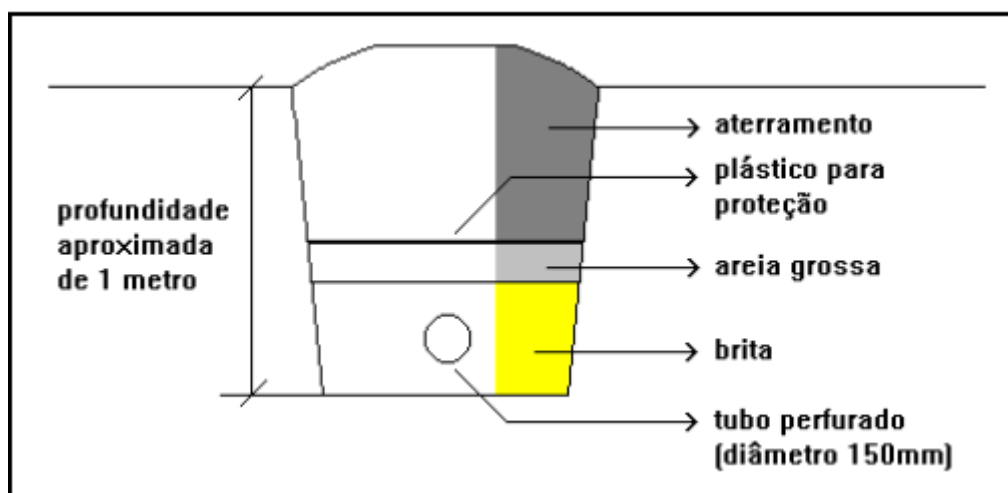


Figura 5 - Perfil esquemático de uma vala de infiltração. Fonte: NASCIMENTO & KOIDE (1999)

Os telhados verdes consistem em coberturas vegetais instaladas em lajes ou telhados de resistências e outros tipos de edificações (SANTOS, LIMA, ROLEMBERG & GONZAGA, 2017), que retem temporariamente volumes provenientes de eventos extremos (RIGHETTO, 2009; TOMINAGA, 2013), além de reduzir impactos ambientais (GERALDO *et al.*, 2021). O esquema básico de um telhado verde é mostrado na Figura 6.

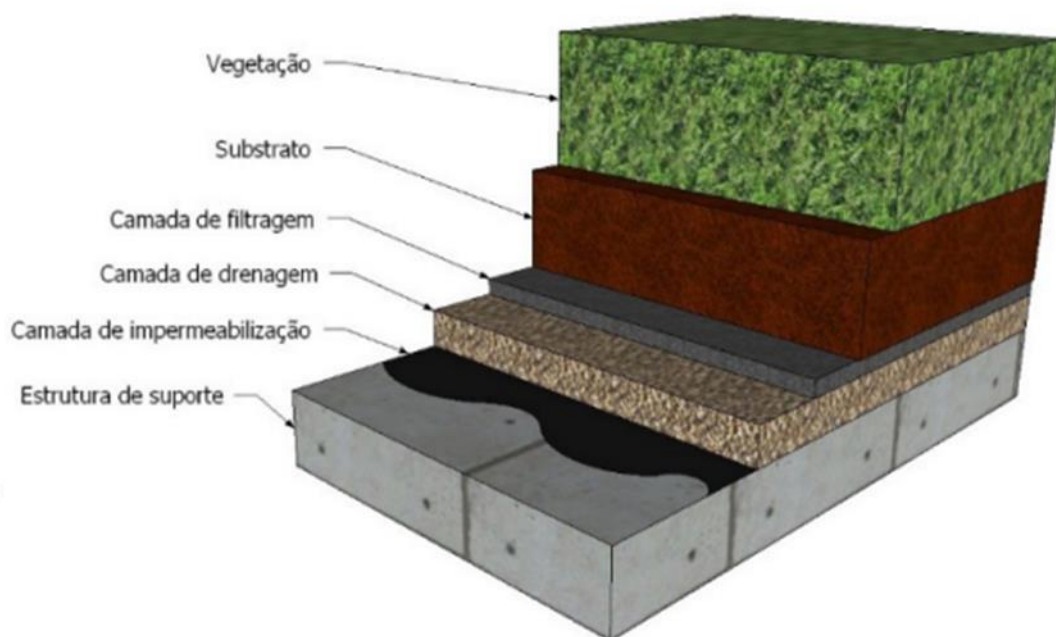


Figura 6 - Esquema de um telhado verde básico. Fonte: GERADO *et al.* (2021)

Em algumas situações, principalmente em bacias mais degradadas, que sofrem com graves problemas de inundações, faz-se necessário o uso de maiores infraestruturas de drenagem para mitigação de inundações.

O uso de túneis para integrar o sistema de drenagem urbana se tornou uma solução amplamente utilizada (PALMITESSA *et al.*, 2021). Wu *et al.* (2016) aborda a implementação de um *deep tunnel*<sup>1</sup> na cidade de Guangzhou (China), com objetivo de amortecer as vazões das cheias, mitigar os problemas relacionados a inundações na bacia hidrográfica de DongHaoChong a jusante e reduzir a poluição causada pelo despejo de resíduos nos cursos d'água em períodos de cheias, quando a capacidade de uma estação de tratamento de água/esgoto é excedida (*Combined Sewer Overflow Pollution*). Na

---

<sup>1</sup> De acordo com Li *et al.* (2016), entende-se como *deep tunnel* um reservatório e túnel de drenagem subterrâneo com profundidade superior a 20 m.



cidade de Chicago (EUA), em 1975 foi criado o *Tunnel and Reservoir Plan (TRAP)*, que consiste em um grande projeto de controle de inundações e poluições devido o despejo de esgoto nos cursos d'água – como no Lago Michigan - através da construção de largos túneis e reservatórios (MWRD, 2019).

Silva *et al.* (2005), Silva (2007), Silva *et al.* (2009) e Silva (2010) retratam um caso de instabilidade de encostas em Camaragibe, no estado de Pernambuco (Brasil). Para esse caso, foram identificadas rupturas após precipitações intensas na região, que acarretaram desnível de cerca de 2 m no terreno. Além disso, Silva (2007) observou um volume de águas residuárias descartado diretamente na encosta, devido a inexistência de um sistema de drenagem para condução estas águas, bem como acúmulo de lixo nas encostas, desconhecimento ou não utilização de aspectos técnicos para construção de moradias, como consequência da ocupação desordenada (SILVA, 2010). O acúmulo de todos esses fatores levou à ocorrência de movimentos de massa na região, o que tem se tornado uma realidade em áreas de morros.

A drenagem superficial é um dos procedimentos mais eficientes na estabilização de taludes, pois reduz a infiltração da água no solo e evita a erosão superficial, através de canais superficiais que direcionam a água do talude até a sua base, reduzindo assim as pressões de percolação no solo (SILVA, 2010; MATIAS *et al*, 2022).

Abaixo são relatadas as principais medidas de microdrenagem e macrodrenagem realizadas para estabilização da encosta no estudo de caso de Silva (2010):

- Uso de calhas responsáveis por conduzir água até as canaletas mais próximas dos telhados das casas, com finalidade de reduzir o escoamento superficial;
- Limpeza e desobstrução dos dispositivos de drenagem;
- Execução de drenos horizontais profundos, para rebaixar o nível d'água e, consequentemente, promover a estabilização da encosta;
- Obras de retaludamento nos taludes;
- Implementação de muros de contenção (pedra rachão argamassada e solo-cimento ensacado) para suporte das áreas instáveis.

É importante ressaltar que para a implementação de quaisquer soluções estruturais, é necessário realizar estudo geológico-geotécnico da região, através de investigações geotécnicas de campo e ensaios de laboratório para caracterização do solo e identificação agentes que levaram à situação de instabilidade. Para os casos de estabilidade de taludes, a ABNT NBR 11682:2009 apresenta as diretrizes para estudo e controle de estabilidade de encostas e de taludes resultantes de cortes e aterros realizados em encostas. Além das análises geotécnicas, é necessário conhecer o regime hidrográfico da bacia que compõe a área de estudo, levantamento de obras anteriores no âmbito de drenagem urbana, coleta de dados ambientais (por exemplo, a existência de uma APA ou UC), bem como dados de órgãos de fiscalização e monitoramento das regiões de risco.

### 2.2.2 Soluções não estruturais

As medidas não estruturais correspondem as soluções que visam auxiliar a população em eventos de enchentes e/ou na previsão dos mesmos (MIGUEZ *et al*, 2016; RIGHETTO, 2009; TUCCI, 2005). As soluções não estruturantes podem integrar mudanças legislativas de drenagem urbana, como a reavaliação do Plano Diretor de Águas Pluviais do local (TUCCI, 2005), zoneando áreas de ocupação urbana que apresentam risco de enchente, de acordo com as características topográficas e geológicas do solo do local. Segundo (TUCCI, 2007), esse zonamento é baseado em um mapeamento das chuvas para um TR (tempo de retorno) de 100 anos. Os sistemas de alerta auxiliam a população ao emitirem avisos de risco de inundações (SANTA; VISSIRINI; WERNER, 2018), assegurando que a população possa se deslocar do local com antecedência. No Estado do Rio de Janeiro, por exemplo, o Sistema de Alerta de Cheias foi implantado pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA), para mapeamento para acompanhamento das áreas com risco de inundação (VIANA; JÚNIOR; OLIVEIRA, 2009) além de informar a população e autoridades sobre eventos pluviométricos extremos (INEA, 2022). A Figura 7 mostra o mapa das estações hidrometeorológicas do Sistema de Alerta de Cheias do Estado do Rio de Janeiro.

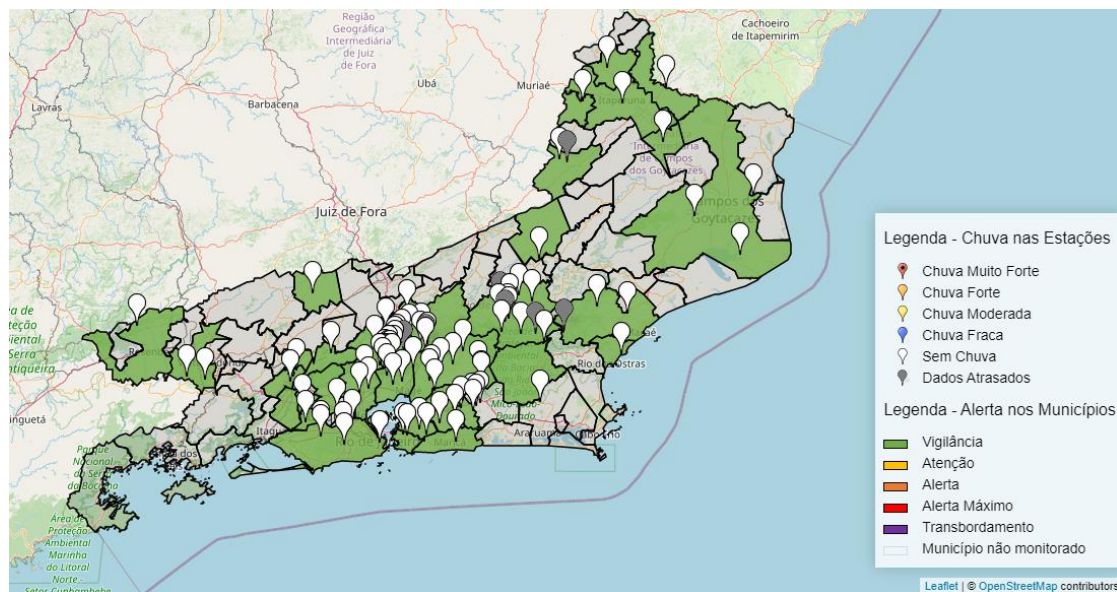


Figura 7 - Mapa das estações hidrometeorológicas do Sistema de Alerta de Cheias do Estado do Rio de Janeiro. Fonte: Sistema de Alerta de Cheias (INEA)

A implementação de programas educacionais da população são fundamentais como forma de prevenção de acidentes (PMRR, 2011) e estimulam a preocupação da sociedade com questões ambientais (RIGHETTO, 2009), como o uso da água, a poluição de túneis e canais, etc. Para Tucci (1997), as medidas não estruturais podem diminuir os prejuízos de possíveis enchentes com menor custo do que as medidas estruturais. Righetto (2009) cita a urbanização de pequeno impacto, através da implantação de dispositivos de retenção e infiltração de pequeno porte em áreas de lazer, parques, etc. A limpeza das vias e rede de drenagem existente é essencial para que as galerias e valetas não sejam obstruídas pela entrada de resíduos durante a chuva (RIGHETTO, 2009).

É importante ressaltar que, para quaisquer soluções estruturantes ou não estruturantes, ou a combinação das duas, é necessário que o Plano Diretor do local contemple a ocorrência de enchentes (TUCCI, 2007).



### 3 ESTUDO DE CASO

Nesse capítulo será apresentada a caracterização do município de Petrópolis, o histórico de ocupação da cidade, a descrição do sistema de drenagem, os motivos que culminam na propensão de inundações, relato de eventos pluviométricos extremos antecedentes, bem como o evento pluviométrico que foi estudado no modelo hidrodinâmico, como evento de validação das simulações.

#### 3.1. Caracterização da área de estudo

##### 3.1.1 Localização

O município de Petrópolis, presente na região Metropolitana do Rio de Janeiro desde 2018, conforme ilustrado na Figura 8, possui como limites os municípios de Guapimirim, Magé, Teresópolis, São José do Vale do Rio Preto, Duque de Caxias, Miguel Pereira, Paty de Alferes, Paraíba do Sul e Areal. Petrópolis está localizado entre a Serra do Mar e a Serra dos Órgãos, nas coordenadas geográficas 22°30'18'' de latitude sul e 43°10'44' de longitude oeste, compondo uma área de aproximadamente 791,144 km<sup>2</sup> e população estimada de 307.144 pessoas (IBGE, 2021). O município é dividido em 5 distritos, como é mostrado na Figura 9: Petrópolis (1° distrito), Cascatinha (2° distrito), Itaipava (3° distrito), Pedro do Rio (4° distrito) e Posse (5° distrito).

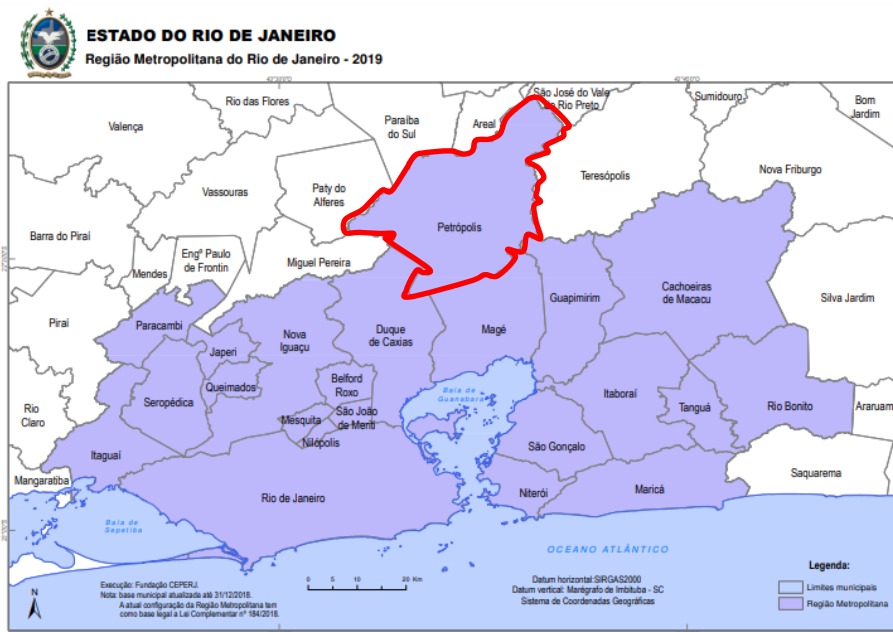


Figura 8 - Mapa da região metropolitana do estado do Rio de Janeiro. Fonte: Estado do Rio de Janeiro

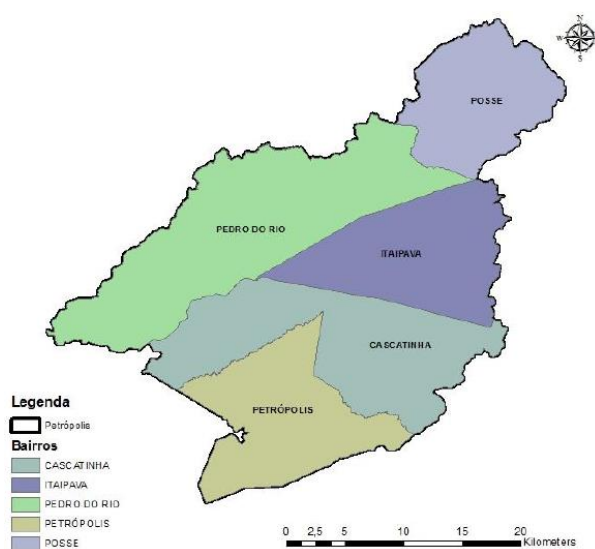


Figura 9 - Petrópolis e seus 5 distritos: Petrópolis, Cascatinha, Itaipava, Pedro do Rio e Posse. Fonte: HABITAT ECOLÓGICA (2014)



### 3.1.2 Geologia e geomorfologia

O município de Petrópolis faz parte da Região das Escarpas e Reversos da Serra do Mar, que por sua vez faz parte da Unidade Geomorfológica da Serra dos Órgãos. Esta região apresenta relevo extremamente acidentado, com rochas do complexo granítico-gnáissico-migmatítico da era Pré-Cambriana, que apresentam traços de dobramentos, fraturas e falhas decorrentes de eventos tectônicos (GUERRA *et al.*, 2007; PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2014). Essas características são refletidas na topografia da região e, de acordo com Guerra *et al.* (2007), a região apresenta “(...) vales alongados, segmentos de drenagem retilíneos, maciços graníticos, linhas de cristas e cumeadas paralelas, relevos com grandes desníveis altimétricos, escarpas íngremes e alvéolos intermontanos”.

### 3.1.3 Clima

O clima de Petrópolis, conforme a classificação apresentada por Nimer (1989), é definido como mesotérmico brando superúmido, isto é, predomínio de temperaturas amenas durante todo ano, concentração de chuvas nos meses de outubro a março, devido a elevada topografia local e redução durante a estação de inverno (GUERRA *et al.*, 2007). A precipitação anual média é superior a 2200 mm (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2014).

### 3.1.4 Vegetação

A vegetação remanescente na região é a Floresta da Mata Atlântica. Os quatros distritos do município de Petrópolis fazem parte da Área de Proteção Ambiental (APA) Petrópolis, que também abrange parte dos municípios de Duque de Caxias, Magé e Guapimirim (IBAMA, 2007), apresentado na Figura 10. De acordo com Ibama (2007), uma APA é definida como “área em geral extensa, com um certo grau de ocupação humana, dotada de atributos abióticos, bióticos, estéticos ou culturais especialmente importantes para a qualidade de vida e bem-estar das populações humanas, e tem como objetivos básicos proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais”.



Além da APA, o território é composto pelas seguintes Unidades de Conservação: Parque Nacional da Serra dos Órgãos, Reserva Biológica do Tinguá, Zona da Vida Silvestre da Maria Comprida, Reserva Biológica de Araras, Parque da Serra da Estrela, Reserva Ecológica da Alcobaça e Zona de Vida Silvestre de Araras.

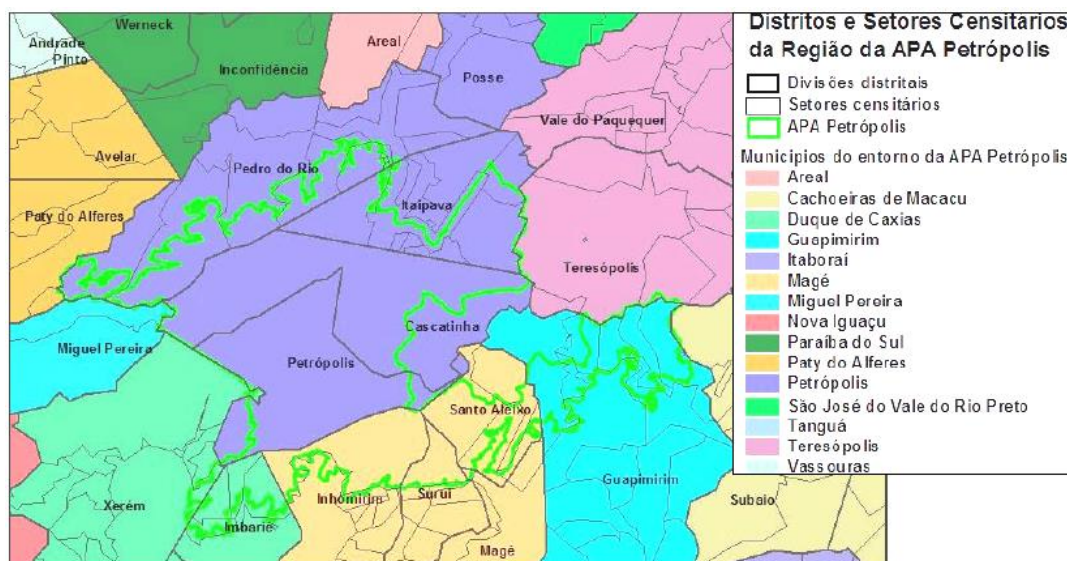


Figura 10 - Localização da APA Petrópolis. Fonte: IBAMA (2007) *apud* IBGE (2000)

### 3.2. Histórico de ocupação da cidade de Petrópolis

O processo ocupação de Petrópolis sucedeu-se a partir de um projeto de urbanização do Centro Histórico de Petrópolis (localizado no 1º distrito da região) nomeado Plano Köeler, uma vez que foi executado pelo engenheiro Julio Frederico Köeler. O projeto iniciou-se com objetivo de expandir o território imperial de posse de Dom Pedro II, a Fazenda do Córrego Seco. O plano Köeler fundamentou-se no desenvolvimento da cidade de Petrópolis no entorno dos rios e córregos existentes na região, conforme ilustrado na Figura 11; no entanto, não houve planejamento de uma rede de drenagem adequada. Ao longo dos anos, diversos problemas relacionados à falta de fiscalização em construções sem licença e ocupação desordenada em encostas ocorreram, violando o plano definido

por Köeler. Alguns exemplos de obras que violaram o plano urbanístico de Köeler são: a implantação do Palácio do Imperador, que gerou obras de desmonte de terra; a abertura de acessos, caminhos ou ruas a meia encosta; a instalação das fábricas Imperial Fábrica de Tecidos da Rhenânia e Imperial Fábrica de Tecidos São Pedro de Alcântara em 1873, que até hoje impede o controle de cheias do rio Quitandinha, dentre outros (ASSUMPÇÃO, 2014).

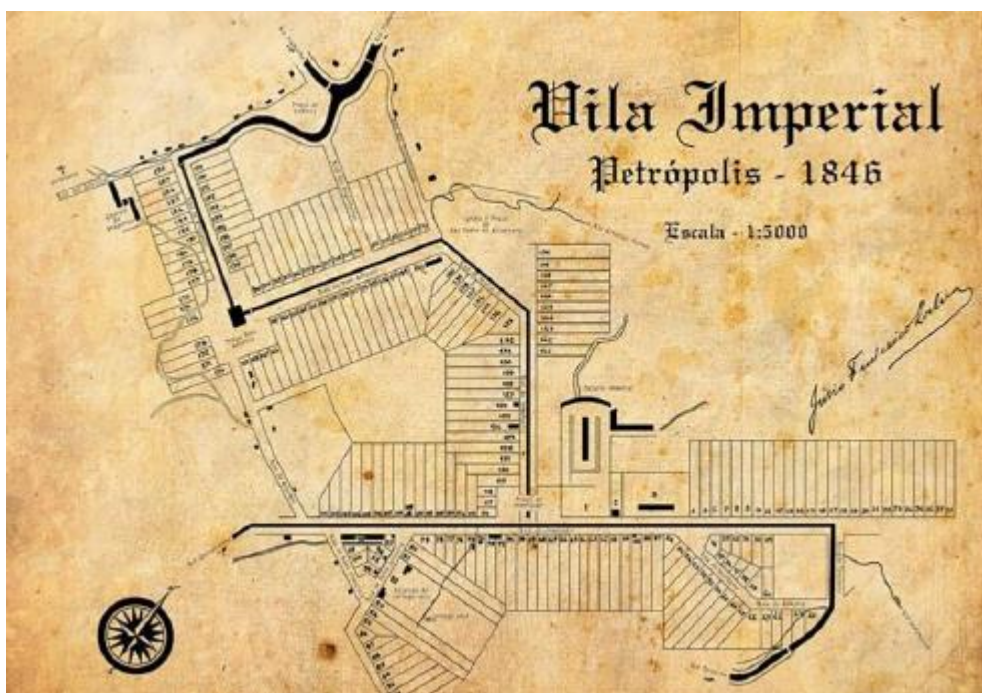


Figura 11 - Plano urbanístico desenvolvido por Köeler em 1846. Fonte: Drach *et al.* (2020) *apud* Biblioteca do Museu Imperial – Petrópolis, RJ

Embora Köeler previsse um plano urbanístico que equilibrasse o crescimento urbano e a preservação do meio ambiente para proveito do manancial d'água da região em cultivos agrícolas (GUERRA *et al.*, 2007), a crescente ocupação de áreas de topos de morro e fundos de vale levaram à ocorrência de deslizamentos e aumento do processo de assoreamento dos rios da região (SILVA *et al.*, 2012). Guerra *et al.* (2007) pontua que a intensificação do processo de urbanização influi no processo de infiltração das águas no solo, favorecendo o escoamento superficial e a ocorrência do fenômeno de enxurradas.



Desta forma, a ocupação desordenada em encostas, somada às condições topográficas e orográficas do município de Petrópolis, favorecem o agravamento dos eventos meteorológicos, desencadeando em danos severos à população e ao meio ambiente.

De acordo com a Tabela 8.1.2.170 – “População Residente total - Série Histórica - Estado do Rio de Janeiro e seus municípios – 1940 a 2010” da Fundação CEPERJ (2019), entre 1940 e 2010 a população do município de Petrópolis obteve um crescimento expressivo de cerca de 75.418 habitantes (1940) para 295.917 (2010), conforme mostrado na Figura 12.

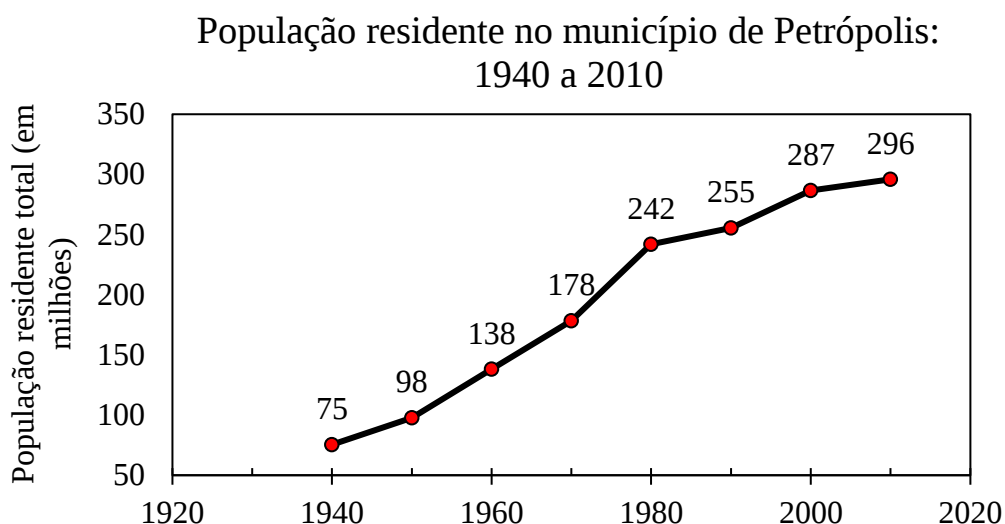


Figura 12 - População residente no município de Petrópolis: 1940 a 2010. Adaptado de Fundação CEPERJ (2019)

Entre os anos 1985 e 2020, houve um crescimento de 108,81% no espaço ocupado da cidade por favelas, invasões e loteamentos irregulares (FEITOSA, 2022). A Figura 13 mostra o avanço da ocupação irregular em Petrópolis entre os anos 1985 e 2020, através do mapeamento de 48 “aglomerados subnormais” (identificação utilizada pelo IBGE de áreas ocupadas de forma irregular). De acordo com o IBGE e o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), cerca de 70 mil pessoas moravam em áreas de risco de desastres naturais em Petrópolis em 2018 (FEITOSA, 2022), o que equivale a 24,4% da população de Petrópolis.

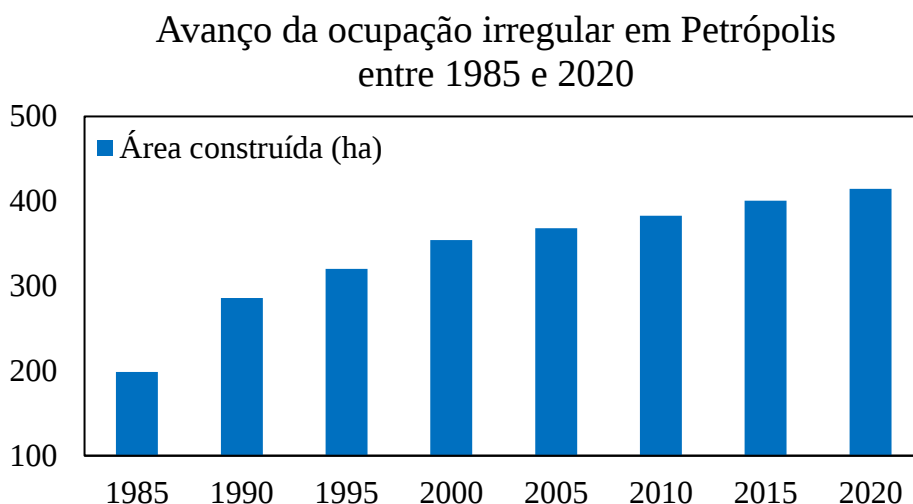


Figura 13 - Avanço da ocupação irregular em Petrópolis entre 1985 e 2020. Adaptado de MapBiomias e IBGE (2022)

Apesar da sequência de desastres desde a fundação de Petrópolis, apenas em 1991 foi criado o primeiro Plano Diretor da cidade, responsável por apresentar os direcionamentos legais para o desenvolvimento urbano. Em 1998, foi criada a Lei de Uso, Parcelamento e Ocupação do Solo do Município de Petrópolis (lei municipal nº 5.393 de 28/05/1998), comumente conhecida como LUPOS, que determina diretrizes para construções no município de acordo com parâmetros econômicos, sociais e ambientais. Assim como o Plano Diretor do município de Petrópolis, a LUPOS se encontra em revisão desde 2018 pela Coordenadoria de Planejamento e Gestão Estratégica e pelo Departamento de Planejamento Urbano da prefeitura de Petrópolis, objetivando readaptá-la às condições atuais da cidade: aumento da população, mapeamento de regiões suscetíveis a inundações e deslizamentos, dentre outras características pertinentes (DIÁRIO DE PETRÓPOLIS, 2022).

O subcapítulo a seguir aborda os principais eventos pluviométricos que ocorreram na cidade de Petrópolis e as suas consequências na região.



### 3.3. Eventos pluviométricos extremos no município de Petrópolis

As enchentes na cidade de Petrópolis ocorrem desde antes da própria fundação da cidade. Segundo Freitas (2022), o primeiro registro de enchente é do ano de 1834. Após as inundações ocorridas em 1850, os canais da cidade foram alargados, transferindo a vazão de cheia para jusante da bacia. No entanto, essa medida não impediu que as próximas chuvas inundassem a região (ASSUMPÇÃO, 2014).

De acordo com Assumpção (2014) foram registradas ocorrências nos anos de 1855, 1873, 1875, 1882, 1883, 1886 e 1899, porém nenhum desses eventos apresentam um registro oficial, bem como a medição da quantidade de chuva, embora os relatos citassem que os eventos apresentaram grande impacto. Recentemente, outras grandes enchentes foram registradas nos anos de 1930, 1945, 1952, 1964, 1965 e 1966. Destaca-se que o evento de 1945 desencadeou na construção do túnel extravasor do rio Palatino, responsável por conectar as águas do rio Palatinato ao rio Itamarati (INEA, 2022).

Outras enchentes marcaram o município de Petrópolis, como a 1988 considerado o pior desastre da história, com 171 mortos, até a ocorrência do evento de fevereiro de 2022, que será relatado no próximo capítulo; o desastre da região Serrana em 2011, com cerca 73 mortos em Petrópolis; 2013, com 33 mortos e o evento de fevereiro de 2022, com 232 mortos.

De acordo com INEA (2022), existem dois problemas de magnitudes diferenciadas no município de Petrópolis: “As pequenas inundações dos diversos afluentes do rio Piabanha, que nem sempre atingem o Centro Histórico e as grandes inundações, com o alagamento do Centro Histórico e movimentos de massa nas áreas de risco.”.

O Centro Histórico de Petrópolis é uma das regiões do 1º distrito que mais sofre com as inundações da região. No caso da bacia hidrográfica do rio Quitandinha, a rua Coronel Veiga é destacada como uma das principais vias que sofrem com alagamentos da região. Os registros de inundações estão relacionados a diversas razões, como a ocupação desordenada devido o processo de urbanização, o assoreamento dos rios, a topografia acidentada, dentre outros, que serão explorados nos capítulos 3.4 e 3.5 deste trabalho.



O capítulo a seguir relata o desastre ocorrido no dia 15 de fevereiro de 2022, considerado o pior desastre da história e que será utilizado como base de dados para confecção do modelo hidrodinâmica de cheias deste estudo.

### **3.3.1. Evento de fevereiro de 2022**

No dia 15 de fevereiro uma chuva intensa atingiu a cidade Petrópolis (Rio de Janeiro, Brasil). De acordo com Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), a lâmina de água precipitada foi de, aproximadamente 259,8 mm em 6 horas no 1º distrito Petrópolis (RIBEIRO, 2022).

As consequências desse evento, apresentadas nas Figuras 14 a 16, foram: inundações em vias públicas, deslizamentos de encostas, destruição de casas, lotes comerciais, veículos foram arrastados (RIBEIRO, 2022; G1 Rio, 2022) e a morte de 233 pessoas (GANDRA, 2022). Segundo Gandra (2022) as regiões mais afetadas pelo evento foram: Alto da Serra, Castelânea, Chácara Flora, Centro, Quitandinha, Caxambu, São Sebastião, Valparaíso, Vila Militar, Floresta, Saldanha Marinho, Mosela, Coronel Veiga, Morin, Independência, Estrada da Saudade, Corrêas, Retiro, Siméria, Bingen, Duarte da Silveira, Meio da Serra, Bataillard, Nogueira, Quarteirão Brasileiro, Quarteirão Ingelhein, Cascatinha, Quissamã, Itamarati e Carangola.



Figura 14 - Deslizamento no Morro da Oficina, no bairro de Alto da Serra (Petrópolis, RJ). Fonte: PLAUCHEUER, AFP, METSUL METEOROLOGIA (2022)



Figura 15 - Deslizamento no bairro de Castelânea, Petrópolis (RJ, Brasil). Fonte: REGO, AGÊNCIA BRASIL, EBC, METSUL METEOROLOGIA (2022)



Figura 16 - Lama e destroços no Centro Histórico de Petrópolis (RJ, Brasil). Fonte: FRAZÃO, AGÊNCIA BRASIL, EBC, METSUL METEOROLOGIA (2022)

De acordo com o relatório final da Comissão Especial de Finanças, Infraestrutura e Retomada Econômica, 119 locais atingidos pelo evento de fevereiro necessitam de obras, sendo 14 de responsabilidade do município, 10 do Estado do Rio de Janeiro e 95 sem responsável definido (TRIBUNA DE PETRÓPOLIS, 2022).

Vale destacar que devido aos impactos deste evento, ele foi utilizado por Aquafluxus(2022) como evento de referência de validação do modelo hidrodinâmico.

### **3.4. Sistema de drenagem do Centro Histórico de Petrópolis**

O Centro Histórico de Petrópolis sofre com inundações a décadas, como mencionado no capítulo 3.3, trazendo danos ao patrimônio público e promovendo risco à população residente. O sistema de drenagem do Centro Histórico é formado pela bacia do Alto Piabanha, que por sua vez abrange as bacias do rio Quitandinha, rio Palatinato e rio Itamarati, conforme a Figura 17.

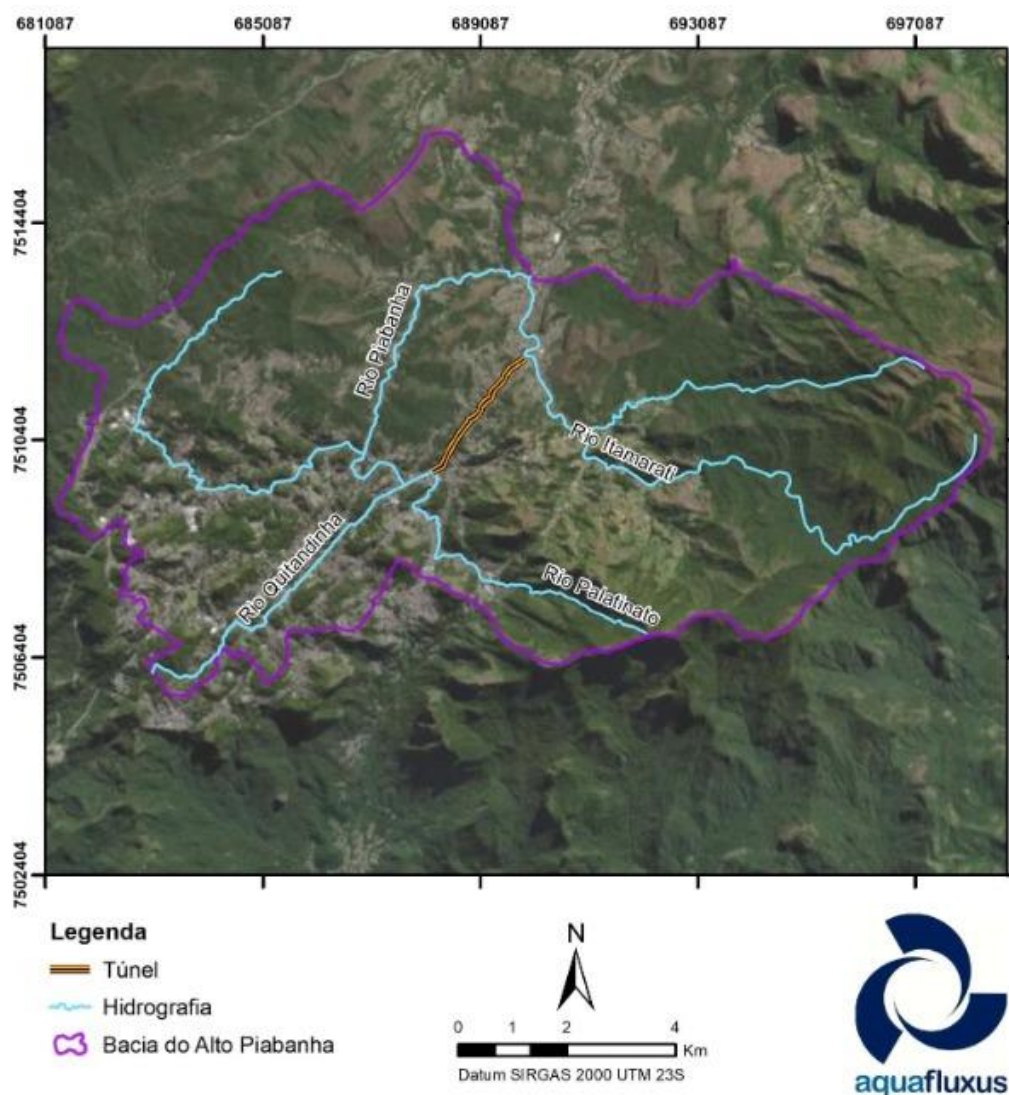


Figura 17 - Limites da bacia hidrográfica que compreende o Centro Histórico de Petrópolis. Fonte: Aquafluxus (2022)

O rio Piabanha é afluente pela margem direita do rio Paraíba do Sul e seus principais afluentes são os rios Fagundes e Paquequer/Preto. Possui 80 km de extensão, área de drenagem de cerca de 2065 km<sup>2</sup> e abrange 4 municípios do estado do Rio de Janeiro: Areal, Petrópolis, Teresópolis e São José do Vale do Rio Preto (AGEVAP, 2007).

Em relação à sua contribuição para o município de Petrópolis, o rio Piabanha é o principal canal de macrodrenagem, pois recebe a contribuição das águas pluviais dos cinco distritos de Petrópolis (INEA, 2022). No 1º distrito de Petrópolis (Sede), o rio Piabanha recebe

uma contribuição do Canal do Centro e, portanto, também é um afluente do rio Piabanha. O Canal do Centro possui cerca de 2,5 km de extensão e se inicia no encontro dos rios Quitandinha e Palatinato (também chamado de Palatino), na rua do Imperador, próximo ao Obelisco de Petrópolis e termina entre a rua Imperatriz e Avenida Tiradentes, como mostrado na Figura 18. A seção do encontro do rio Quitandinha e rio Palatinato é apresentada na Figura 19.



Figura 18 - Encontro dos rios Quitandinha e Palatinato, formando o Canal do Centro e o Rio Piabanha.

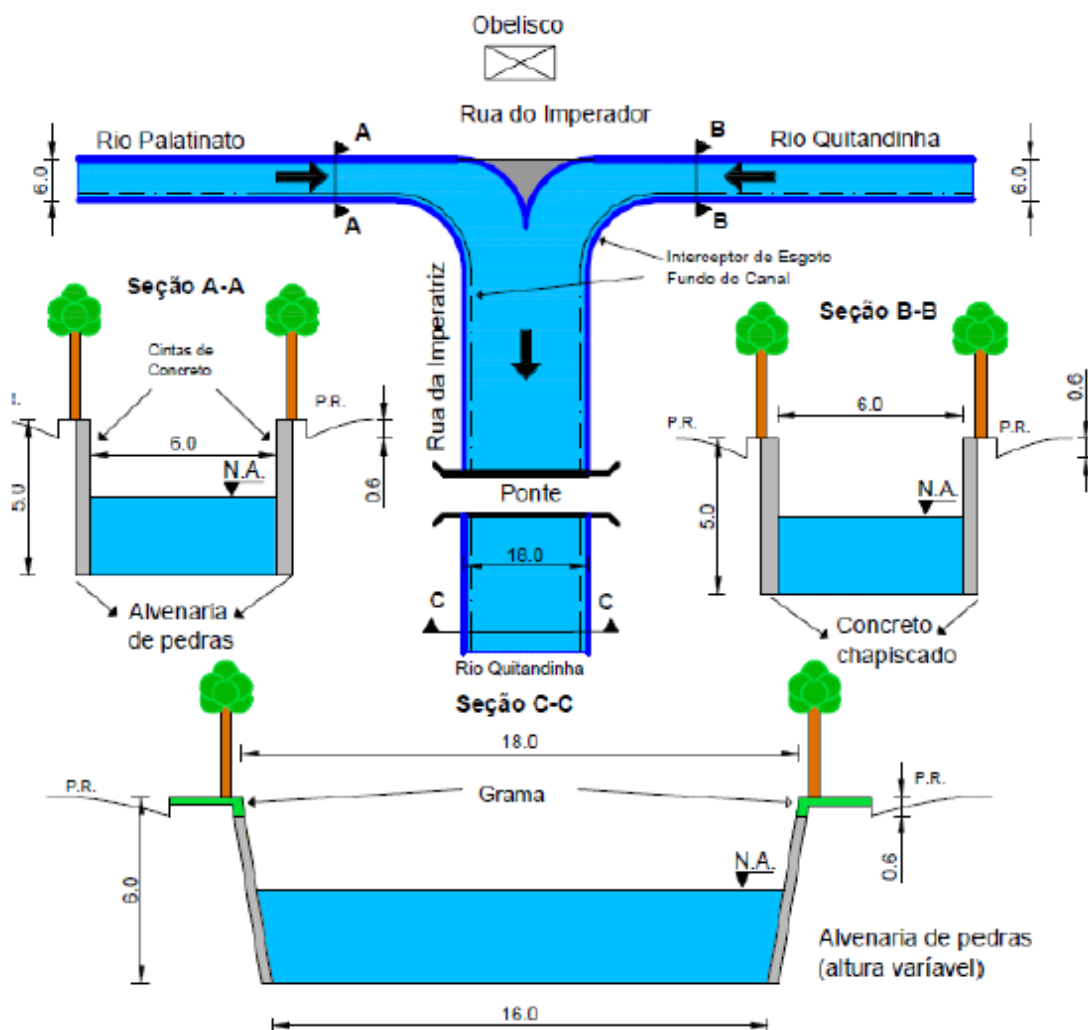


Figura 19 - Seção do encontro dos rios Quitandinha e Palatinato. Fonte: HABITAT ECOLÓGICA (2014)

No encontro dos rios Quitandinha e Palatinato, ocorre uma sobrelevação de nível e como consequência, leva a perda de carga localizada na calha fluvial, contribuindo para a ocorrência de inundações no Centro Histórico (INEA, 2022). Além disso, as curvas no encontro dos rios Quitandinha e Palatinato, e na confluência do Canal do Centro e o rio Piabanha dificultam o escoamento superficial.

Como citado anteriormente neste trabalho, em 1945 uma enchente de grande magnitude ocorreu, ensejando na construção de um túnel extravasor no bairro de Quissamã, por volta de 1970, pelo extinto DNOS (Departamento Nacional de Obras e Saneamento), com

objetivo de levar água até o 2º distrito de Petrópolis (Cascatinha). O túnel extravasor possui 3,2 km de comprimento, sendo um trecho dele composto por um túnel em concreto e outro por um canal coberto. O túnel conecta o rio Palatinato, na rua Souza Franco ao rio Itamarati, na rua Pedro Elmer. O túnel extravasor do Palatinato corresponde a um *bypass channel*, ilustrado na Figura 20, que tem como função realizar o desvio de um rio a partir de um ponto à montante para uma área à jusante que necessita de proteção (FREIE UNIVERSITÄT BERLIN, 2022). De acordo com WMO (2007), é necessário ter cuidado para avaliar a superposição de inundações no rio que receberá o curso desviado, devido ao remanso hidráulico, isto é, uma sobrelevação do nível d'água na superfície, que pode aumentar o risco de inundações à montante à medida que a água corre pelo túnel de desvio.

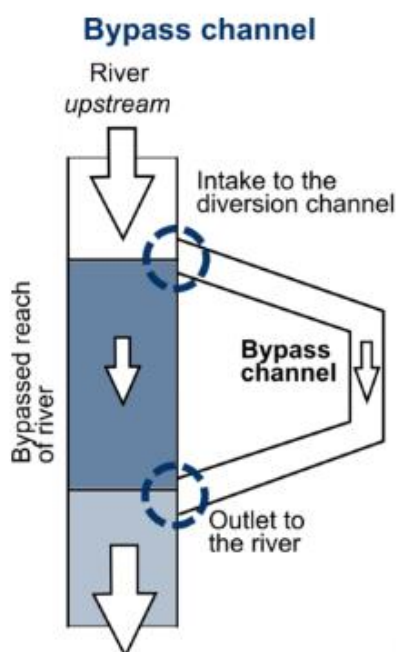


Figura 20 - Esquema de funcionamento de um *bypass channel*. Fonte: WMO (2009)

Em 2011, durante a reunião do Comitê Piabanha, o professor Paulo Canedo (COPPE/UFRJ) elaborou um estudo conceitual intitulado de “Mitigação de Cheias: Proteção do Centro Histórico de Petrópolis”, teve como objetivo entender os motivos que culminaram nas inundações do Centro Histórico e propor soluções para sua mitigação.



Esse estudo foi utilizado, inclusive, como parte das soluções propostas no Plano Municipal de Saneamento Básico de Petrópolis (2014) e nos Estudos de Alternativas e Elaboração de Projetos Básicos e Executivos para Controle de Inundações do Centro Histórico do Município de Petrópolis-RJ. Relatório de Estudos Hidrológicos de 2014 e 2022.

Os pontos de melhoria e soluções mencionadas nesse estudo são apresentadas na Tabela 1, de acordo com CANEDO (2011) e INEA (2022):

Tabela 1 - Principais intervenções no Centro Histórico de Petrópolis no Projeto “Mitigação de Cheias: Proteção do Centro Histórico de Petrópolis” elaborado em 2011 pelo Professor Paulo Canedo (COPPE/ UFRJ). Adaptado de INEA (2022)

|                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Túnel extravasor do rio Palatinato | Redimensionamento completo do sistema de tomada d’água para o túnel em rocha                                                                                                                                                                                                 |
|                                    | Recuperação estrutural das paredes e piso (forração com lençol de polietileno)                                                                                                                                                                                               |
|                                    | Redimensionamento completo do sistema de deságue da galeria/túnel do Palatino no rio Itamarati, incluindo a construção de paredes de concreto.                                                                                                                               |
| Rio Quitandinha                    | Limpeza do Canal do Centro, do Obelisco ao Palácio de Cristal                                                                                                                                                                                                                |
|                                    | Construção de uma galeria sob a rua Treze de Maio, capaz de aliviar o volume do Canal do Centro em sua confluência com o rio Piabanha. Essa galeria terá seu sistema de tomada d’água e de desemboque em galeria subterrânea, sendo o trecho central feito em túnel em rocha |



|              |                                                                                                                                             |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | Construção de uma parede de concreto para orientar os fluxos de água de ambos os rios na região de confluência Canal do Centro/rio Piabanha |
| Rio Piabanha | Alargamento e aprofundamento da calha do rio Piabanha, por 4 km, desde a rua Treze de Maio até a barragem existente no rio Piabanha         |
|              | Retirada das grandes pedras derrubadas no leito                                                                                             |
|              | Recuperação de trechos de paredes laterais erodidos/derrubados                                                                              |
|              | Construção de bueiros para macrodrenagem da estrada marginal                                                                                |
|              | Derrocagem da barragem localizada ao fim do trecho, bem a montante do trecho em corredeira                                                  |

Embora no ano de 2013 já houvesse uma verba liberada para realização de obras de melhorias no extravasor do rio Palatinato, esse valor foi perdido, uma vez que as obras não foram iniciadas dentro do prazo estabelecido (DIÁRIO DE PETRÓPOLIS, 2017).

No ano de 2014, o extravasor do Palatinato já apresentava condições de extrema degradação e segundo INEA (2014), "(...) apresenta grandes restrições para entrada d'água na tomada d'água e fortes restrições ao escoamento, devido à rugosidade efetiva de toda estrutura". Dessa forma, o túnel extravasor passou a desviar pequenas vazões do rio Palatinato e apresenta assoreamento exacerbado, desgaste nas paredes internas e risco de desabamento nas vias públicas. As condições de funcionamento do túnel extravasor do rio Palatinato no ano de 2014 são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2 - Evidências de degradação no túnel extravasor do Palatinato. Adaptado de HABITAT ECOLÓGICA (2014)



Em 2017, moradores da região, inclusive, relataram ouvir enxurradas descendo pelo túnel e apontam o transporte de lixo, que é despejado nas ruas, provenientes do Centro Histórico, quando há chuvas intensas (DIÁRIO DE PETRÓPOLIS, 2017). Ainda no ano de 2017, foi solicitado uma nova verba para realizar obras de manutenção no túnel extravasor.

No ano de 2020, diversas ocorrências de aberturas de crateras foram relatadas por moradores, como mostradas na Figura 21, nas ruas que fazem parte do trajeto do túnel extravasor do rio Palatino. O caso relatado pelo Diário de Petrópolis (2020), aborda a abertura de crateras na rua Francisco Scali, que já haviam sido fechados duas vezes pelo INEA, no entanto, segundo moradores, sempre que chove esses buracos reabrem. Neste ano, as obras emergências no extravasor já estavam ocorrendo, no entanto, estas não

impediam a abertura de buracos nas ruas do bairro de Quissamã (DIÁRIO DE PETRÓPOLIS, 2020).



Figura 21 - Abertura de crateras no trajeto do túnel extravasor do rio Palatino, no bairro de Quissamã. Fonte: Diário de Petrópolis (2020)

Dentre os anos de 2020 e 2021, apesar das notificações de obras emergenciais terem iniciado, não houve atualizações sobre a continuidade delas. Após o desastre do dia 15 de fevereiro de 2022, foi apontado que as más condições do túnel extravasor do Palatino podem ter agravado a enchente ocorrida (OSÓRIO, 2022). As Figuras 22 e 23 apresentam a tomada d'água no túnel, evidenciando a degradação e assoreamento; e as condições do túnel após a grande enchente de fevereiro de 2022, respectivamente.



Figura 22 - Tomada do Túnel Extravasor do rio Palatino Obstruída. Fonte: INEA (2022)



Figura 23 - Condições do túnel extravasor do Palatino após desastre de fevereiro de 2022. Adaptado de OSÓRIO, G1 Rio (2022)



Um mês após o desastre de fevereiro, foi anunciado o início de novas obras do túnel extravasor do Palatinato previstas para abril de 2022 (MORGADO, 2022). A execução das obras, exemplificadas na Figura 24, no entanto, iniciaram-se em agosto de 2022 e preveem as seguintes melhorias, de acordo com G1 Rio (2022):

- Recuperação da tomada d'água;
- Desassoreamento do rio Palatinato no deságue do extravasor e no rio Itamaraty;
- Limpeza e desobstrução em toda extensão do túnel;
- Ajuste da confluência do extravasor com o rio Itamaraty;
- Reforma e recuperação da estrutura e execução de galerias para o ordenamento da drenagem e esgotamento sanitário.



Figura 24 - Obras do túnel extravasor em Petrópolis. Fonte: Ferreira (2022)

Até o momento de elaboração deste trabalho, o último relato a respeito de obras no túnel foi feito pelo jornal Diário de Petrópolis, anunciando a continuidade desta (DIÁRIO DE PETRÓPOLIS, 2022).

### 3.5. Bacia Hidrográfica do Rio Quitandinha

O rio Quitandinha é um dos afluentes do rio Piabanha e é uma sub-bacia do rio Paraíba do Sul. Seus afluentes são: o rio Cremerie, com o lago do Parque Cremerie e córrego canalizado que desemboca no rio Cremerie; rio Aureliano e seu afluente rio Verna; rio Palatino (antigo Córrego Seco) e seus afluentes: córrego Limpo, rio que acompanha a rua Pedro Ivo e córrego Gusmão (INEA, 2022). A bacia do rio Quitandinha é localizada no 1º distrito de Petrópolis, como mostrado na Figura 17, possui área de 11,2 km<sup>2</sup> (INEA, 2022), cotas altimétricas variando entre 800 m à 900 m (PELECH; PEIXOTO, 2022) e abrange os bairros Valparaíso, Quitandinha e parte do bairro Centro. A nascente do rio Quitandinha encontra-se na Serra da Estrela e à montante, na rua do Imperador (próximo ao Obelisco de Petrópolis), se encontra com rio Palatinato, formando o canal do Centro, como anteriormente mostrado na Figura 19. O rio Quitandinha, inclusive, é um dos 71

corpos hídricos que atravessam a APA Petrópolis (IBAMA, 2007) e foi altamente modificado com o passar do tempo, apresentando concentração de áreas residenciais e intenso tráfego de veículos, mesclados com vegetação (COSTA *et al.*, 2021).

O rio Quitandinha corre paralelamente à rua Coronel Veiga, no bairro de Valparaíso, que é uma das regiões mais prejudicadas pelas inundações do Centro Histórico de Petrópolis. A seção transversal do rio Quitandinha na rua Coronel Veiga é retangular, com largura variada, fundo em solo e muros laterais de pedra e de concreto armado, como mostrado na Figura 25.

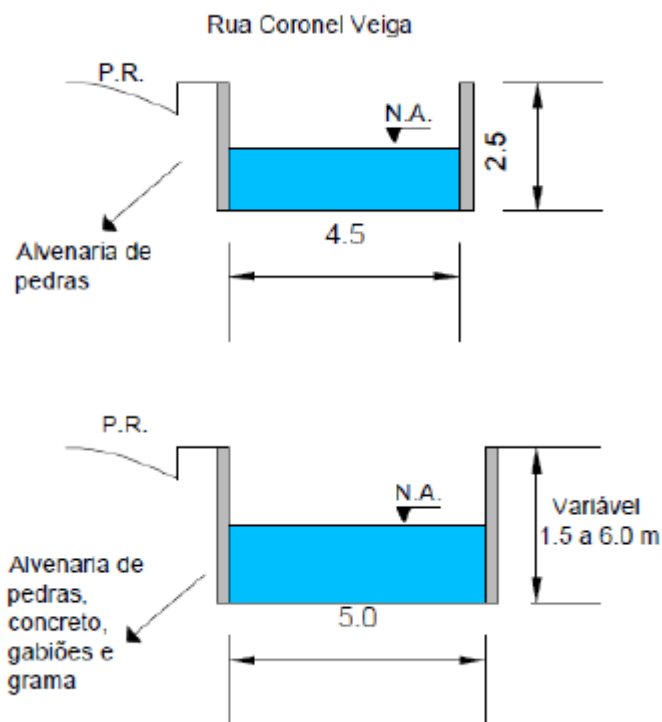


Figura 25 - Seção do rio Quitandinha na rua Coronel Veiga. Fonte: HABITAT ECOLÓGICA (2014)

A Tabela 3 apresenta um acervo histórico das inundações ocorridas na rua Coronel Veiga nos anos de 2013 a 2022. Através do acervo apresentado, percebem-se duas semelhanças:



- A gravidade dos eventos; a frequência da ocorrência dos fenômenos de enxurradas e alagamentos, que acabam por fechar ruas, destruir o patrimônio público e expor a vida da população ao risco.
- O local de ocorrência do transbordamento do rio Quitandinha, que por sua vez teve seu nível d'água extravasado próximo ao número 1276 da rua Coronel Veiga (em frente à concessionária Volkswagen) diversas vezes. Esse é um dos pontos de alagamento citados por Placido e Cunha (2008), onde há o registro de 96 casos de inundações no local entre 1996 à 2008, sendo o ponto de maior ocorrência de transbordamento.

Tabela 3 – Acervo histórico de eventos pluviométricos extremos nos anos de 2013 à 2022 na rua Coronel Veiga, bairro de Valparaíso, Petrópolis, RJ. Fonte: Autora

|                                                                                     |                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p>“Com ruas alagadas, Defesa Civil de Petrópolis aciona sirenes e bloqueia tráfego na Coronel Veiga.”</p> <p>Fonte: Mesquita (2022)</p>           |
|  | <p>“Mais um dia normal na Coronel Veiga: via é interditada por possibilidade de alagamento”</p> <p>Fonte: Redação/Tribuna de Petrópolis (2021)</p> |



|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p>“Forte chuva desta tarde alaga diferentes pontos da cidade.”</p> <p>Fonte: Tribuna de Petrópolis (2020)</p>                                                                                                                                                              |
|    | <p>“Rio Quitandinha transborda em Petrópolis, após temporal”</p> <p>Fonte: Gusmão (2019)</p>                                                                                                                                                                                |
|   | <p>“Parte da rua desmorona com a chuva e Coronel Veiga tem trecho em meia pista em Petrópolis, no RJ”</p> <p>Fonte: G1 Região Serrana (2018)</p>                                                                                                                            |
|  | <p>“Carros são engolidos por enchente e ocupantes resgatados na Serra do Rio. Oito pessoas que ficaram ilhadas em Petrópolis foram salvas na Cel. Veiga. Duas estavam em ponto de ônibus quando funcionários de empresa agiram.”</p> <p>Fonte: G1 Região Serrana (2017)</p> |



“Queda de barreira na garagem da Pedro  
Ita danifica 10 ônibus”

Fonte: Acontece em Petrópolis (2016)



“Temporal deixa ruas alagadas e trânsito  
caótico em Petrópolis, no RJ. Rios  
transbordaram e lojas ficaram alagadas na  
Rua Coronel Veiga.”

Fonte: G1 Região Serrana (2015)



“Coronel Veiga, em Petrópolis, RJ, fica  
alagada pelo 2º dia consecutivo”

Fonte: G1 Região Serrana (2014)



“Rio Quitandinha transborda e fecha a  
Rua Coronel Veiga em Petrópolis, RJ.  
INEA emitiu alerta máximo para o Rio  
Quitandinha. Índice pluviométrico chega a  
135 mm no Centro da cidade.”

Fonte: SOARES (2013)



Segundo Costa *et. al* (2021), as alterações realizadas no rio Quitandinha durante o processo de urbanização do Centro Histórico de Petrópolis levaram à uma perda de carga brusca no escoamento, favorecendo o processo de sedimentação e o acúmulo de resíduos sólidos. Durante esse processo, o rio Quitandinha foi desviado para a construção de avenidas e hoje em dia a rua Coronel Veiga apresenta grande número de pontes que atravessam o rio Quitandinha – de acordo com Placido e Cunha (2008), cerca de 100 apenas no canal principal – que foram construídas para viabilizar o tráfego de pessoas e veículos. Essas pontes encontram-se atualmente danificadas e acabam obstruindo o canal e, conseqüentemente, diminuindo a capacidade de escoamento do rio Quitandinha (PLACIDO; CUNHA, 2008). As Figuras 26, 27 e 28 ilustram a seção do rio Quitandinha na rua Coronel Veiga e algumas das pontes da rua Coronel Veiga, respectivamente.

Habitat Ecológica (2014) complementa que é possível encontrar o despejo de esgoto primário no leito do rio, sem o tratamento adequado. Na região da bacia hidrográfica do rio Quitandinha há diversas regiões que ocorrem o processo de assoreamento, ou seja, a alteração dos cursos d'água em função do acúmulo de resíduos. Essas condições que, em um período de chuvas intensas, levam ao extravasamento do rio nas vias públicas.



Figura 26 - Pontes na margem direita do rio Quitandinha, no nº 771 da rua Coronel Veiga, bairro de Valparaíso, Petrópolis, RJ. Fonte: Google Maps



Figura 27 - Pontes na margem direita do rio Quitandinha, no nº 630 da rua Coronel Veiga, bairro de Valparaíso, Petrópolis, RJ. Fonte: Google Maps



## 4 METODOLOGIA

Desenvolver o que foi colocado em metodologia geral já apresentando os resultados das etapas intermediárias como mapas de topografia, de uso e ocupação do solo de tipo do solo (pedológico) etc.

### 4.1. Levantamento de dados e estudos hidrológicos

Preliminarmente à confecção do modelo hidrodinâmico, foram realizados estudos hidrológicos da área de estudo, que compreende a bacia hidrográfica dos rios Quitandinha, Palatino e Itamarati, que foram elaborados pela Aquafluxus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos (AQUAFLUXUS, 2022). Os estudos hidrológicos têm como objetivo elaborar as chuvas de projeto que serão utilizadas no dimensionamento de dispositivos de drenagem. A realização dos estudos hidrológicos ocorre após o levantamento de dados que caracterizam a bacia hidrográfica de estudo, isto, é, relevo, vegetação e uso do solo, características hidráulicas e dados hidrológicos existentes.

Para o cálculo da chuva de projeto foi utilizado o Posto Pluviométrico Petrópolis, localizado aproximadamente nas coordenadas 22°30'42.0" Sul e 43°10'15.0" Oeste, operada pela Agência Nacional de Águas (ANA) e o Posto Pluviométrico Alto da Serra, localizado aproximadamente nas coordenadas 22°30'49.7" Sul e 43°10'22.1" Oeste, operado pelo Sistema de Alerta de Cheias do INEA.

O método utilizado para determinação da curva e equação intensidade-duração-frequência (IDF) é a distribuição de Gumbel, que por sua vez estima as precipitações máximas de acordo com um tempo de recorrência. Neste caso, para definição dos parâmetros da equação IDF, foram calculadas as intensidades de chuvas para os TRs de 25, 50 e 100 anos, obtendo a equação IDF abaixo:

$$i = \frac{1.322,77 \cdot TR^{0,058}}{(t + 5,5)^{0,716}}$$

Após a definição da equação IDF, foram calculadas as chuvas de projetos para os TRs de 25, 50 e 100 anos. Para isso, foram estimados seguintes tempos de concentração para as



bacias hidrográficas: 151 minutos para a bacia do rio Palatinato, 189 minutos para o Alto Piabanha (Centro Histórico), 104 minutos para o rio Quitandinha, 217 minutos para o rio Itamarati e 297 minutos para toda a bacia do Piabanha até o encontro com o rio Itamarati. O tempo de duração da chuva será o tempo de concentração da bacia.

Por fim, o estudo utilizou o Método dos Blocos Alternados para o cálculo das vazões máximas. O resultado da distribuição temporal pelo Método dos Blocos Alternados pode ser visto nas Figuras 28, 29 e 30.

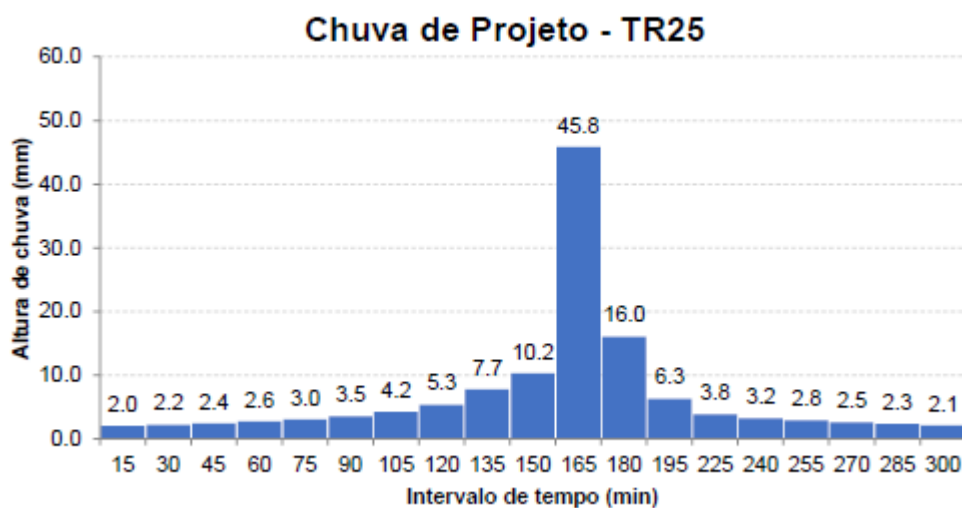


Figura 28 - Hietograma de projeto para a chuva de TR 25 anos. Fonte: Aquafluxus (2022)

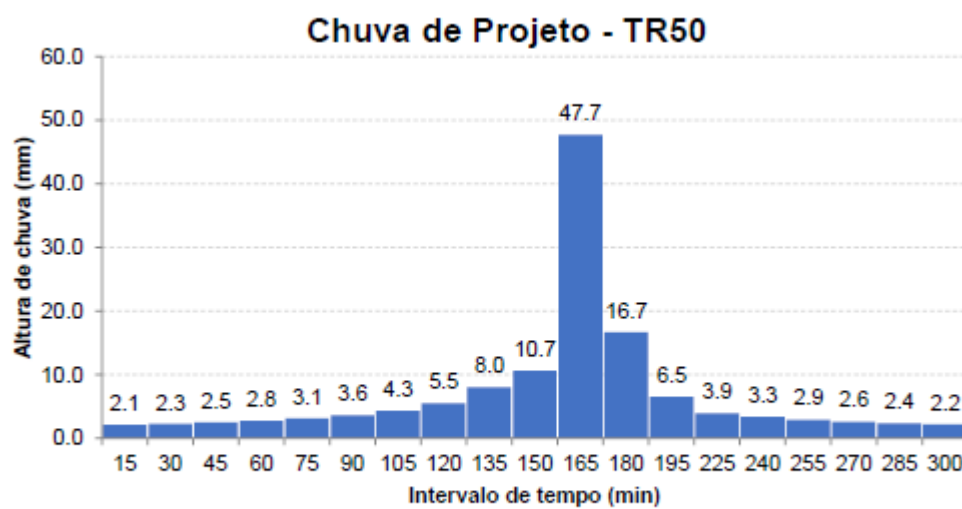


Figura 11-5 - Hietograma de Projeto da Chuva de TR de 50 anos.

Figura 29 - Hietograma de projeto para a chuva de TR 50 anos. Fonte: Aquafluxus (2022)

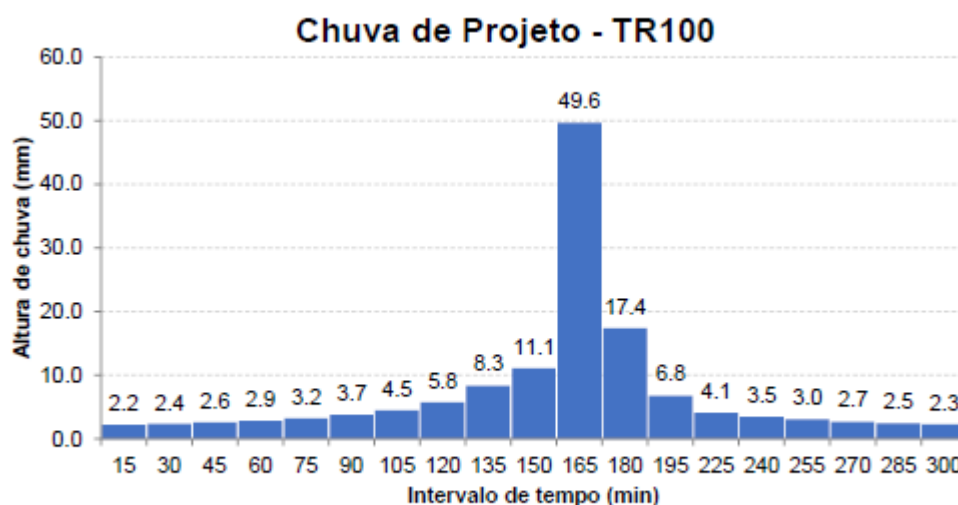


Figura 11-6 - Hietograma de Projeto da Chuva de TR de 100 anos.

Figura 30 - Hietograma de projeto para a chuva de TR 100 anos. Fonte: Aquafluxus (2022)

#### 4.2. Modelo hidrodinâmico de cheias urbanas

A partir dos estudos hidrológicos da bacia do Rio Piabanha, será realizada uma análise das inundações da bacia através de uma simulação desenvolvida por Machado *et al.* (2022) no Modelo de Células de Escoamento (MODCEL) desenvolvido pelo Professor Marcelo Gomes Miguez (MIGUEZ, 2001; MIGUEZ *et al.*, 2017) e ampliado pela Aquafluxus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos para o “Estudo de Alternativas e Elaboração de Projetos Básicos e Executivos para Controle de Inundações do Centro Histórico do Município de Petrópolis-RJ” em conjunto com o Projeto de Extensão “Avaliação de riscos em comunidades atingidas por desastres naturais” em parceria da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

O MODCEL é um modelo do tipo *Quasi-2D* que, segundo Sousa (2017), “são modelos que reproduzem o escoamento de uma onda de cheia ao longo de um rio, suas planícies

de inundação e/ou por ambientes urbanos através de teias de ligações unidimensionais". Dessa forma, o MODCEL representa regiões modeladas por células que, de acordo com Oliveira (2018), representam tanto estruturas hidráulicas como paisagens naturais ou urbanas e a ligação destas células ocorre através de relações hidráulicas capazes de representar a troca de vazões entre elas. As ligações mais utilizadas de escoamento entre células são listadas por Sousa (2017): ligação tipo canal, planície, vertedouro, orifício, entrada de galeria, saída de galeria, galeria, descarga de galeria em rio, bueiro, bombeamento, comporta flap e equação cota x descarga.

Com base na topografia da região, seções topobatimétricas e outros elementos, o modelo hidrológico a ser utilizado neste trabalho possui 1395 células que representam encostas, planícies, margens, canais e galerias; 1395 centros de células (centro de escoamento de cada célula) e 1721 ligações que definem a relação hidráulica utilizada para simular o escoamento.

A fim de garantir a funcionalidade do modelo e a representação adequada do comportamento hidrodinâmico da bacia hidrográfica local, foi realizado o processo de calibração e validação (INEA, 2022), a partir dos eventos pluviométricos extremos ocorridos no 1º distrito de Petrópolis entre 01 e 02 de abril 2021 (para verificação da representatividade das calhas da rede de drenagem no modelo), e o evento de 15 de fevereiro de 2022 (para a verificação da adequada simulação da ocupação das margens urbanas pelas cheias fluviais), respectivamente.

As Figuras 31, 32 e 33 ilustram as precipitações e níveis simulados para o posto pluviométrico e fluviométricos Alto da Serra, Coronel Veiga e Centro. A calibração do modelo registrou apenas 0,028%, 0,005% e -0,004% de erro para os postos pluviométricos do Alto da Serra, Coronel Veiga e do Centro, respectivamente (INEA, 2022).

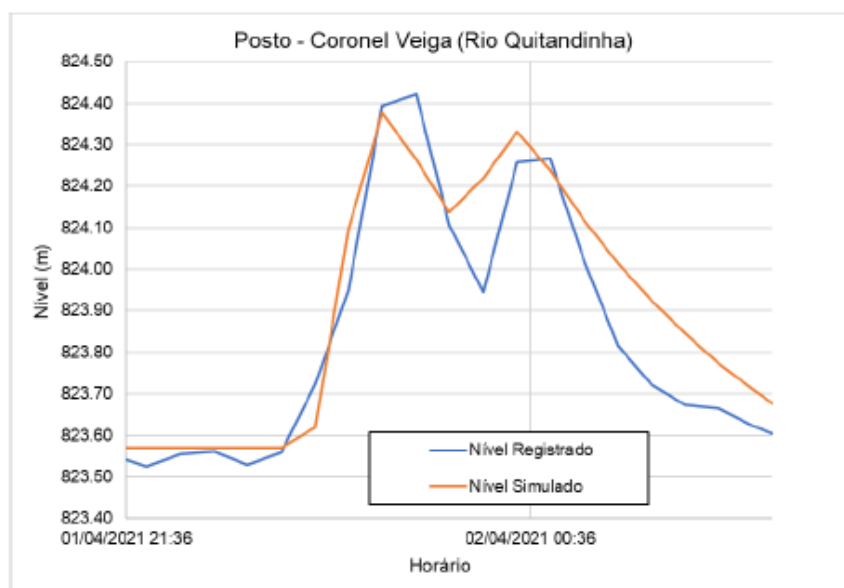


Figura 31 - Nível registrado e simulado no posto Coronel Veiga do Rio Quitandinha.  
Fonte: INEA (2022)

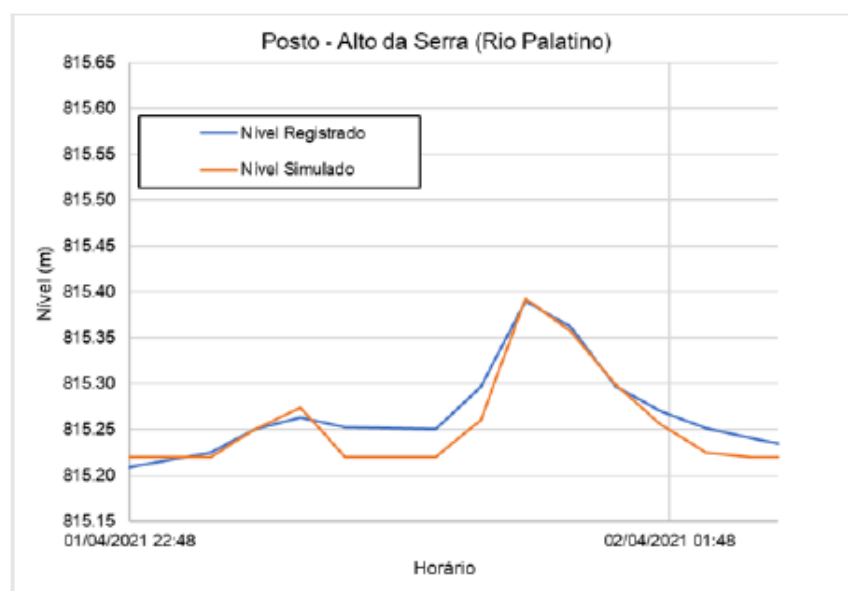


Figura 32 - Nível registrado e nível simulado no posto Alto da Serra do Rio Palatino.  
Fonte: INEA (2022)

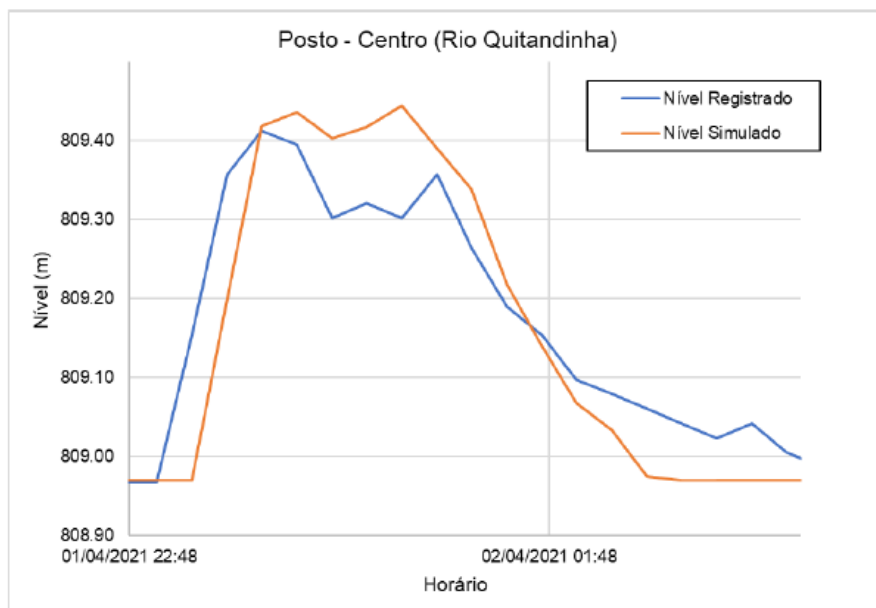


Figura 33 - Nível registrado e nível simulado no posto Centro do rio Quitandinha.  
Fonte: INEA (2022)

A Figura 34 mostra os níveis simulados e pontos de extravasamentos no rio Quitandinha (evento de 2022). Para esse modelo, foram realizados registros no dia do evento na Praça da Água e na Rua do Imperador. Na Praça da Água estima-se uma lâmina d'água de 1,30 m e a simulação apresentou uma lâmina d'água de 1,26 m nessa região. Nos registros da rua do Imperador são mostrados carros cobertos de água; dessa forma, estima-se a lâmina d'água como a altura de um carro popular, cerca de 1,50 m. Nesses pontos, a simulação apresentou níveis d'água de 1,47 a 1,60 m (INEA, 2022).

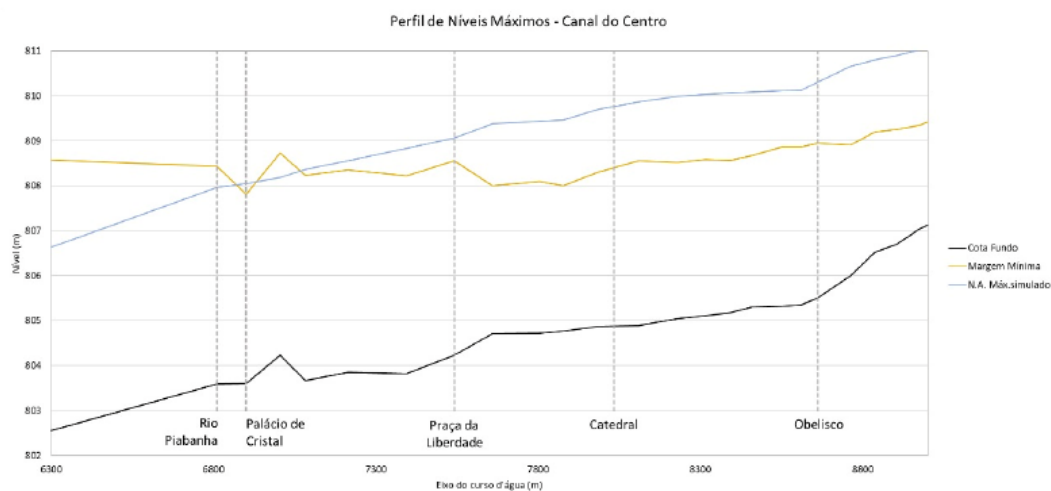


Figura 34 - Perfil de níveis máximos obtidos na modelagem hidrodinâmica do Canal do Centro, a partir de dados do evento de fevereiro de 2022. Fonte: INEA (2022)

A partir das informações apresentadas acima, confirma-se que o modelo a ser utilizado nesse estudo de caso foi calibrado e validado de forma satisfatória, apresentando confiabilidade na representação de cheias e possíveis intervenções relacionadas ao controle de inundações. A Figura 35 apresenta a visão final do modelo hidrodinâmico de cheias desenvolvido para estudo do município de Petrópolis (MACHADO *et al.* 2022; INEA, 2022).

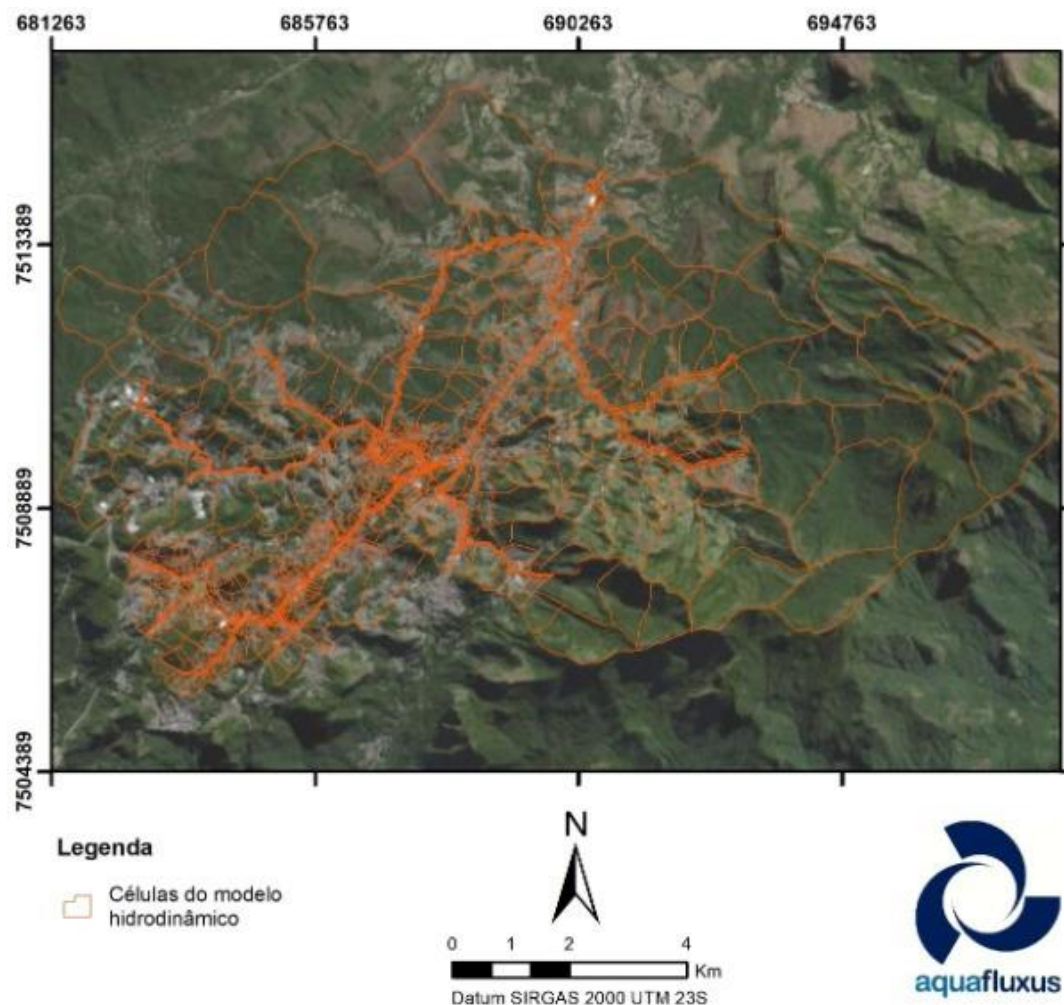


Figura 35 - Modelo hidrodinâmico de cheias desenvolvido pelo Projeto de Extensão “Avaliação de riscos em comunidades atingidas por desastres naturais” em parceria da PUC-Rio e UFRJ

Os resultados para o cenário da situação atual para o TR 50 anos, frequentemente utilizado para verificação do funcionamento do sistema de macrodrenagem, obtidos pelo trabalho de INEA (2022) podem ser vistos na Figura 36 para o perfil do rio Quitandinha e na Figura 37 para o Canal do Centro. Os resultados corroboram com o levantamento realizado nos quais são observados extravasamentos em praticamente todo o rio Quitandinha e em diversos trechos do Canal do Centro. Apesar dos extravasamentos serem críticos em grande parte do Canal do Centro, é na Avenida Koeler, entre a Praça da Liberdade e a Catedral, que são verificadas as inundações mais extremas.

Perfil de Níveis Máximos - Rio Piabanha (situação atual TR 50)

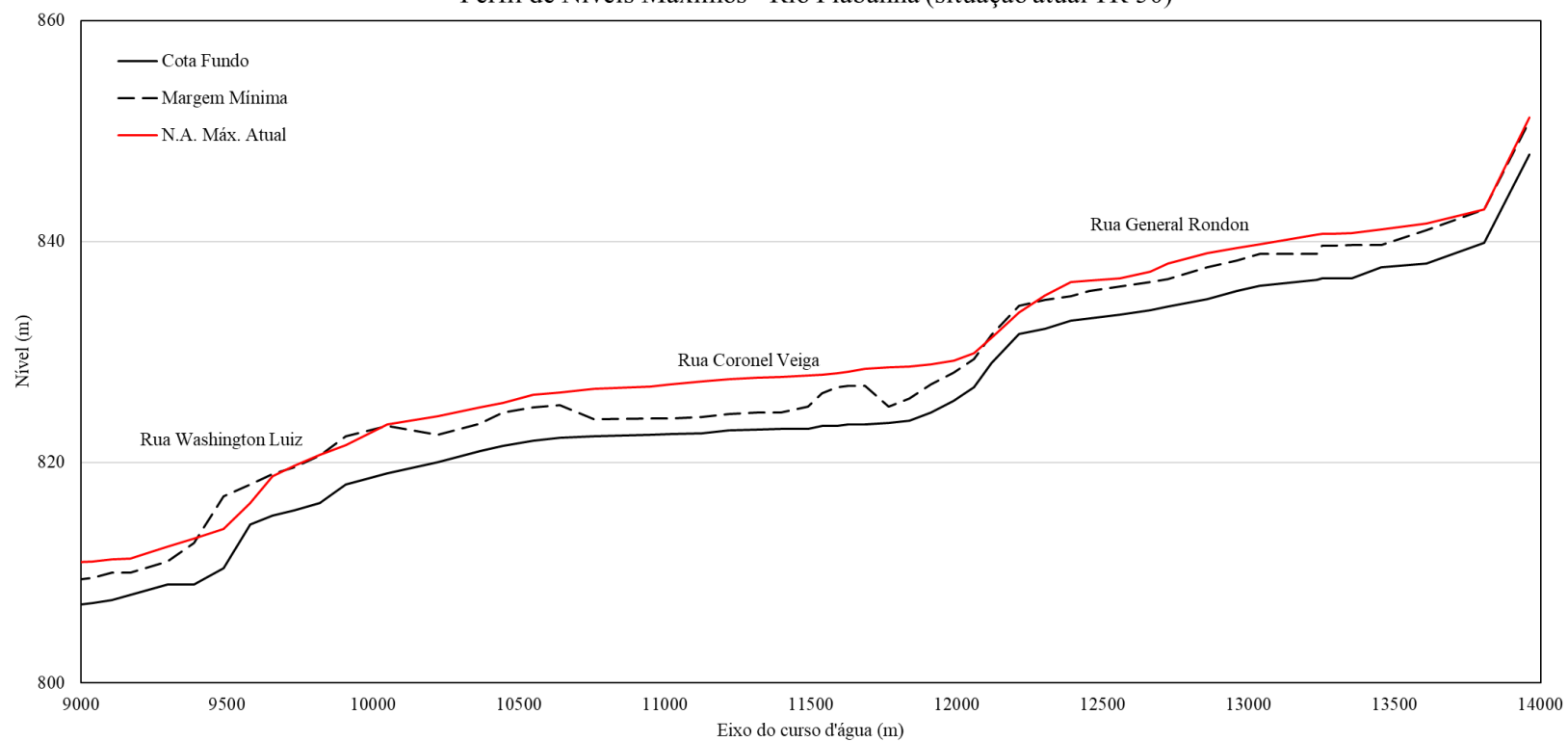


Figura 36 – Perfil de níveis máximos para a situação atual no rio Quitandinha para o TR 50. Fonte: INEA (2022)

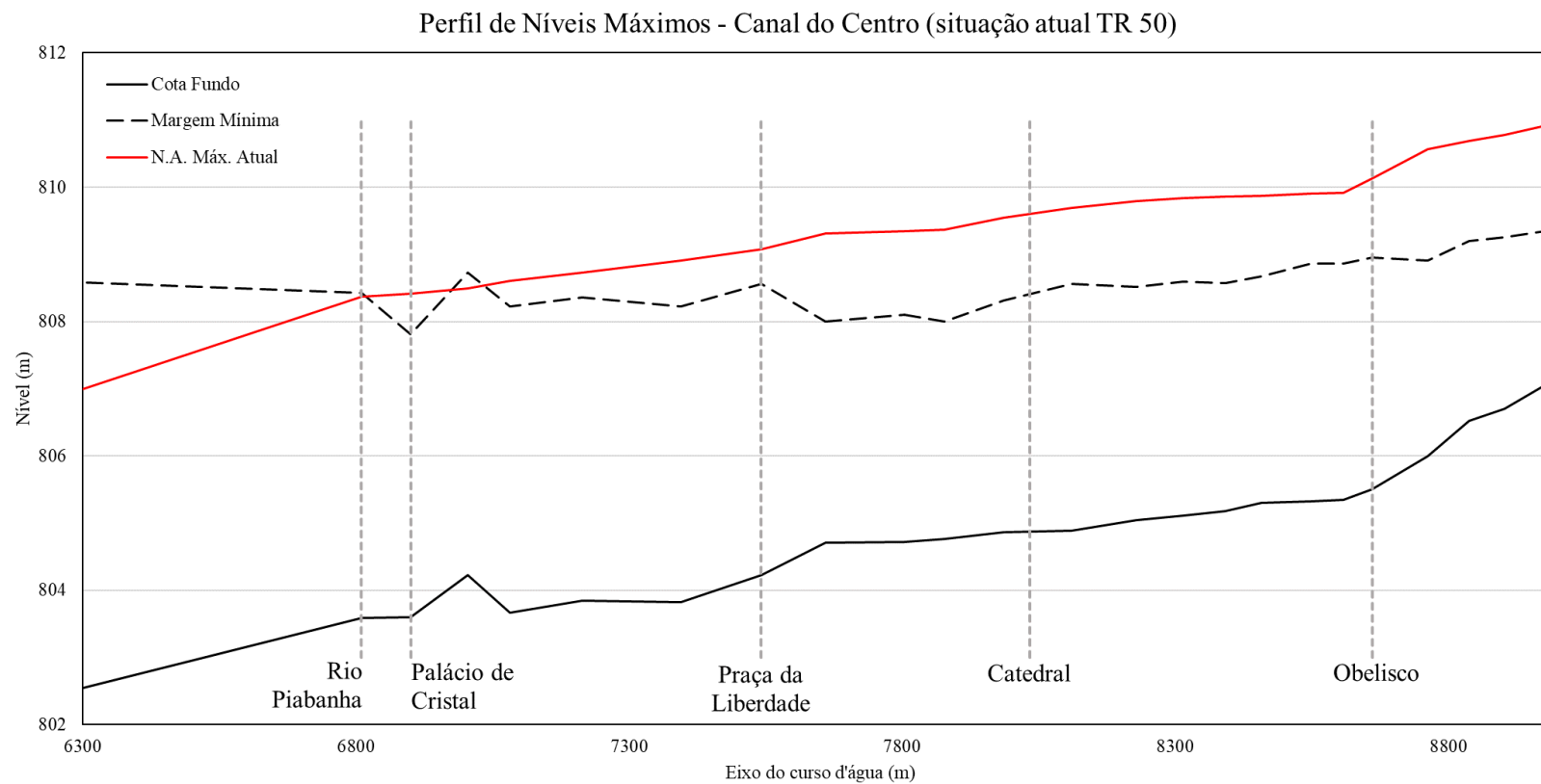


Figura 37 – Perfil de níveis máximos para a situação atual no Canal do Centro para o TR 50. Fonte: INEA (2022)



### **4.3. Simulação de alternativas**

#### **4.3.1 Centro Histórico de Petrópolis**

A alternativa para melhorias no Centro Histórico é mostrada na Figura 38. Essa solução trata-se da construção de uma galeria subterrânea extravasora (*bypass*) na rua Treze de Maio que extravasará as águas de cheia do Canal do Centro para o rio Piabanha, por um caminho mais curto que o existente. A proposta é que a galeria seja construída desde a altura do nº30 da rua Treze de Maio, em frente à Catedral de São Pedro de Alcantara, até as redondezas do nº 311 da rua Treze de Maio, após o encontro do Canal do Centro e com o rio Piabanha.

Como citado anteriormente no capítulo 3.4, essa solução foi apresentada pelo professor Paulo Canedo em 2011 durante a reunião do Comitê Piabanha, como parte do projeto “Mitigação de Cheias: Proteção do Centro Histórico de Petrópolis”, e foi integrada no Plano Municipal de Saneamento Básico de Petrópolis (2014) e nos Estudos de Alternativas e Elaboração de Projetos Básicos e Executivos para Controle de Inundações do Centro Histórico do Município de Petrópolis-RJ pelo INEA em 2014 e 2022.



Figura 38 - Esquema da solução da galeria extravasora da rua Treze de Maio.

No trabalho de Assumpção (2014) foi resgatada a transcrição do documento nº 5.808 – maço 117 de 5 de março de 1852 do Museu Imperial de Petrópolis, publicado pelo cronista Ricardo Martins. Esse documento relatava um projeto de um túnel extravasor (entendido no presente trabalho como galeria de drenagem) a ser construído na rua Treze de Maio (antiga rua dos Protestantes) para transferir águas do Centro para o rio Piabanha. Na época, esse projeto foi negado pela área possuir um afloramento rochoso, o que poderia encarecer as intervenções. Além disso, o projeto do túnel extravasor na rua Treze de Maio foi citado em 1952 e em 1966 pela Comissão Municipal de Defesa contra Enchentes de Petrópolis. No entanto, não foi encontrado nenhum estudo até o momento que comprovasse a ineficácia dessa solução no que diz respeito às inundações no Centro Histórico de Petrópolis, bem como a inviabilidade econômica para a sua implementação.

É importante mencionar que este trabalho não abordará um estudo de viabilidade econômica das soluções de mitigação de inundações aqui propostas, mas pontua as



possíveis diferenças financeiras dentre as alternativas simuladas e enfatiza a necessidade deste estudo para continuidade do projeto.

Através do modelo hidrodinâmico desenvolvido pelos trabalhos de Machado *et al.* (2022), AQUAFLUXUS (2022) e o Projeto de Extensão “Avaliação de riscos em comunidades atingidas por desastres naturais”, a simulação da galeria da rua Treze de Maio foi realizada, a partir da proposição de 5 cenários para o dimensionamento da galeria, onde cada cenário equivale a uma determinada área de seção. Para essa simulação, foi aplicada uma chuva de projeto de TR de 50 anos. A Figura 39 apresenta a região de implementação do túnel extravasor na rua Treze de Maio no MODCEL, com destaque para as células que foram colocadas as ligações do tipo túnel.



Figura 39 - Simulação da implementação da galeria extravasora da rua Treze de Maio no MODCEL.

Uma vez calculadas as áreas de seção das galerias, calcula-se o volume de solo escavado, que por sua vez é o produto da área da seção da galeria pelo comprimento das células, que foram medidas no próprio modelo de escoamento. Os dados dos 5 cenários simulados para a galeria da rua Treze de Maio são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados dos 5 cenários simulados para a galeria da rua Treze de Maio.

| Cenários | Largura (m) | Altura (m) | Área da seção da galeria (m <sup>2</sup> ) | Volume de solo escavado (m <sup>3</sup> ) |
|----------|-------------|------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|
| C1       | 3.00        | 8.00       | 24.00                                      | 10262.40                                  |
| C2       | 2.75        | 8.00       | 22.00                                      | 9407.20                                   |



|    |      |      |       |         |
|----|------|------|-------|---------|
| C3 | 2.75 | 7.50 | 20.63 | 8819.25 |
| C4 | 2.50 | 6.50 | 16.25 | 6948.50 |
| C5 | 2.50 | 6.00 | 15.00 | 6414.00 |

#### 4.3.2 Rio Quitandinha

A alternativa de melhoria na bacia do rio Quitandinha trata-se do aumento da capacidade hidráulica em  $\pm 1$  m, dada pela limpeza de fundo, dragagem e desobstrução da calha fluvial. No modelo de escoamento essa mudança é refletida na redução das cotas de fundo, nível d'água inicial e do coeficiente de Manning. Será utilizada para simulação do modelo uma chuva de TR 50, típica da verificação do funcionamento de sistemas de macrodrenagem. O coeficiente de Manning ou coeficiente de rugosidade, por sua vez, é definido como a resistência ao escoamento superficial. Quanto menor a profundidade d'água, maiores os efeitos das irregularidades do fundo do canal e, portanto, maior o seu valor (MATOS *et al*, 2011).

O estudo dos resultados da modelagem limita-se a região mais impactada pelas intervenções, que se inicia no Lago Quitandinha (na Avenida Joaquim Rolla, nº 2, no bairro de Quitandinha) e estende-se até ao Canal do Centro (aproximadamente, Avenida Piabanha, nº1), conforme ilustrado na Figura 40.

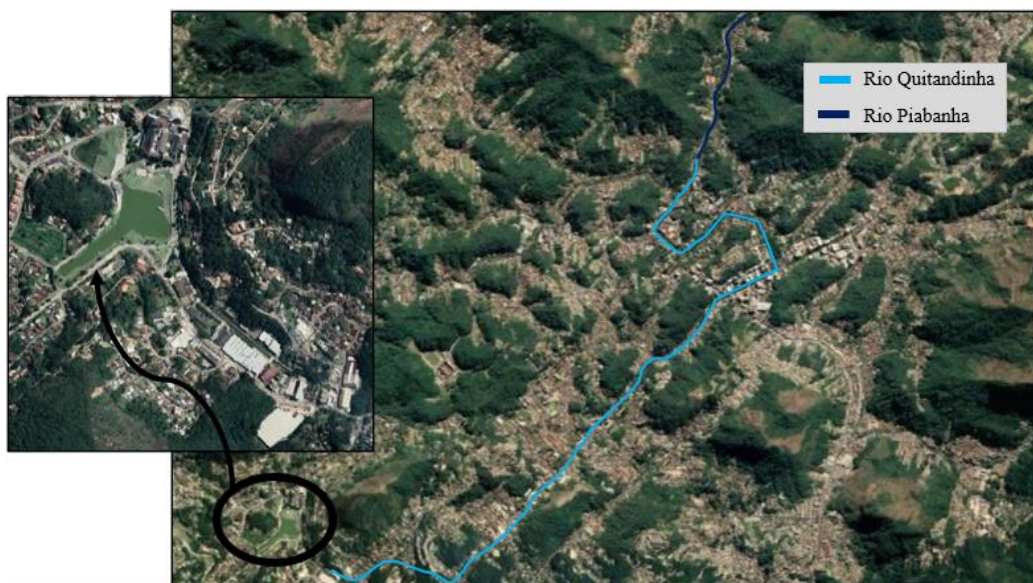


Figura 40 - Área de estudo da simulação de melhorias da capacidade hidráulica do rio Quitandinha.

#### 4.3.3 Alternativas de solução combinadas

A terceira alternativa deste trabalho consiste na combinação das alternativas de melhoria no Centro Histórico de Petrópolis e na bacia do rio Quitandinha. Para essa simulação, é adotado o uso da seção ótima para a galeria da rua Treze de Maio, isto é, o cenário que apresentou os melhores resultados para lâmina de extravasamento d'água crítica.

Neste caso, busca-se analisar os impactos, não apenas no Centro Histórico e na extensão da rua Coronel Veiga, mas comparar os resultados desta solução com as soluções aplicadas individualmente.



A Tabela 5 apresenta o resumo das três alternativas de mitigação de inundações para o Centro Histórico de Petrópolis e bacia hidrográfica do Rio Quitandinha apresentadas neste trabalho.

Tabela 5 - Alternativas de solução propostas.

| Alternativa                                                             | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Percurso (aproximado)                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alternativa 1 –<br>Centro Histórico<br>do Município de<br>Petrópolis-RJ | <p>Construção de galeria extravasora.<br/>Análise de 5 cenários de área de seção da galeria:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cenário 1: galeria de seção 3,00 x 8,00 m</li> <li>• Cenário 2: galeria de seção 2,75 x 8,00 m</li> <li>• Cenário 3: galeria de seção 2,75 x 7,50 m</li> <li>• Cenário 4: galeria de seção 2,50 x 6,50 m</li> <li>• Cenário 5: galeria de seção 2,50 x 6,00 m</li> </ul> | Rua Treze de Maio, bairro Centro, Petrópolis: n°30 da rua Treze de Maio (em frente à Catedral de São Pedro de Alcantara) ao n° 311 da rua Treze de Maio |



|                                                                         |                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alternativa 2 –<br>Bacia hidrográfica<br>do Rio Quitandinha             | Aumento da capacidade hidráulica<br>do Rio Quitandinha em $\pm 1$ m,<br>através dos processos de<br>desassoreamento e dragagem                                                          | Lago Quitandinha (na<br>Avenida Joaquim Rolla, nº<br>2, bairro de Quitandinha)<br>ao Canal do Centro<br>(aproximadamente,<br>Avenida Piabanha, nº1,<br>bairro Centro) |
| Alternativa 3 –<br>Combinação das<br>alternativas 1 e 2<br>de melhorias | Construção de galeria extravasora<br>(considerando a seção ótima<br>obtida nos resultados da<br>alternativa 1) e aumento da<br>capacidade hidráulica do Rio<br>Quitandinha em $\pm 1$ m | Lago Quitandinha (na<br>Avenida Joaquim Rolla, nº<br>2, bairro de Quitandinha),<br>Canal do Centro, até o nº<br>311 da rua Treze de Maio,<br>bairro Centro            |

## 5 RESULTADOS

O presente capítulo apresentará os resultados do processo de simulação hidrodinâmica para os 3 cenários de projeto estudados. Serão utilizadas as chuvas com tempo de recorrência de 50 anos para verificação do resultado das alternativas de mitigação de inundações, sempre em comparação ao cenário atual, para a resposta à mesma chuva de projeto.

### 5.1. Centro Histórico de Petrópolis

Os resultados da simulação de implementação galeria retangular subterrânea de águas pluviais na rua Treze de Maio (com as dimensões 3 m de altura x 8 de largura m) são apresentados através da comparação do nível d'água, lâmina de extravasamento d'água, volume de solo escoado e análise da planta mancha de inundação para as situações atuais e de projeto. As Figuras 41 e 42 apresentam a mancha de inundação da situação atual e da situação de projeto, respectivamente.

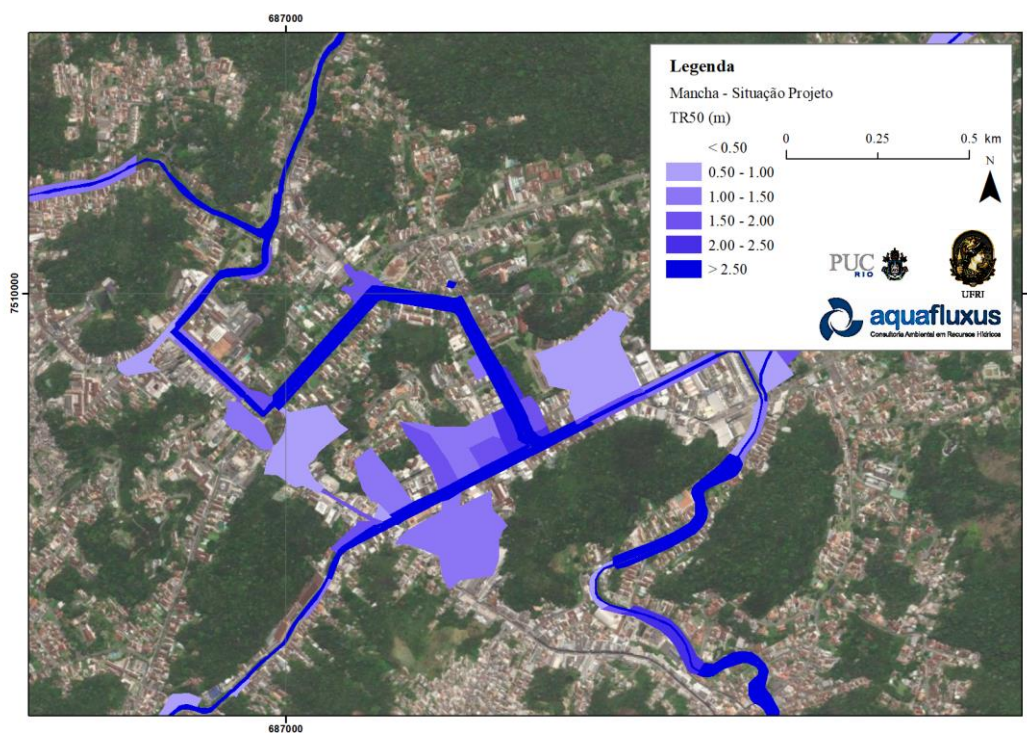


Figura 41 - Mancha de inundação da situação atual do Centro Histórico de Petrópolis.  
Fonte: INEA (2022)

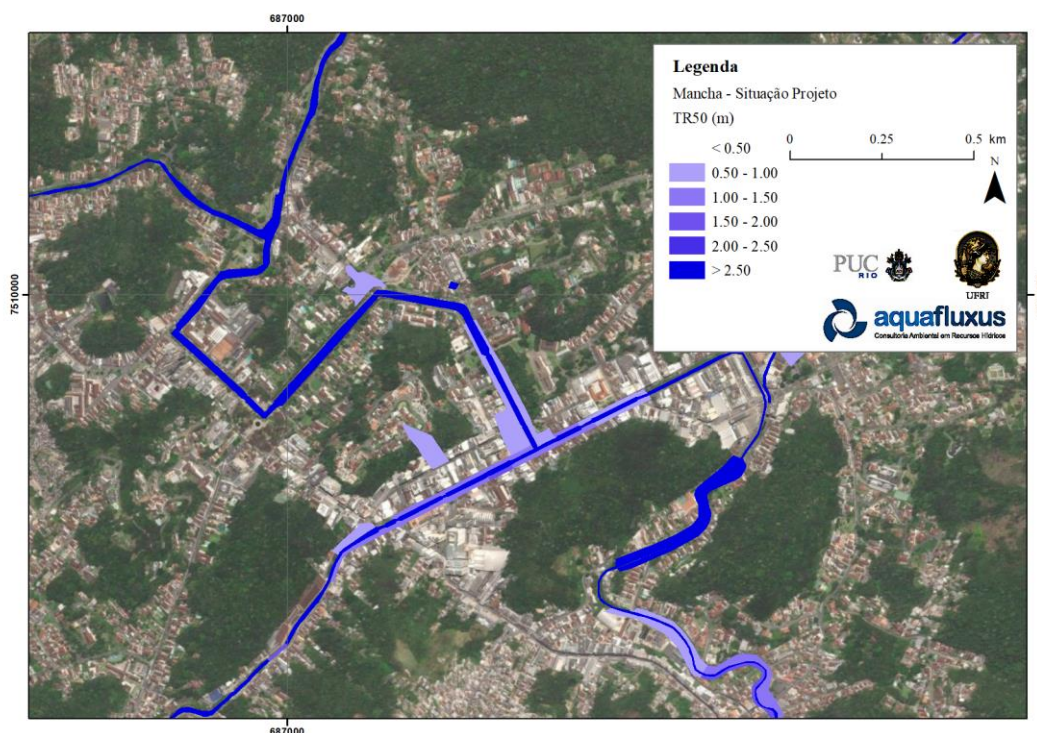


Figura 42 - Mancha de inundação do Centro Histórico de Petrópolis para a alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio. Fonte: INEA (2022)

A mancha de inundação da situação de projeto aponta uma redução expressiva na lâmina d'água extravasada na rua do Imperador e no Obelisco de Petrópolis (encontro dos rios Quitandinha e Palatino), que por sua vez apresentaram um alívio no Canal do Centro e, conseqüentemente, no Centro Histórico de Petrópolis. Na altura do Obelisco observa-se uma redução da lâmina d'água de uma faixa acima 2 m para a faixa de 0,50 e 1,00 m. No entorno da célula 853 do modelo, entre a rua Treze de Maio e a Avenida Koeler, que apresenta maior variação do nível d'água entre a situação atual e a de projeto, percebe-se um estreitamento da mancha de inundação, o que indica uma melhoria no escoamento superficial desta área. Este mesmo comportamento pode ser visto para a célula 854, que é a célula que possui a lâmina de extravasamento d'água mais crítica da simulação. Nota-se também que à jusante do Obelisco de Petrópolis, há uma diminuição das inundações na confluência do Rio Palatinato.



Como principal contribuição do trabalho, foram simuladas diversas alterações de dimensões da galeria para verificação dos efeitos sobre os extravasamentos. A Tabela 6 apresenta os resultados simulados dos 5 cenários de galerias na rua Treze de Maio para as seções do modelo que apresentaram a variação do nível d'água entre a situação do atual e do projeto mais significativa (célula 853 – na qual é implementada a galeria) e lâmina de extravasamento d'água mais crítica na situação atual (célula 854 – célula a jusante da 853).

Tabela 6 - Resultados da modelagem de 5 cenários para a alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio para o TR 50.

| Cenários | Largura (m) | Altura (m) | Área da seção da galeria (m <sup>2</sup> ) | Volume de solo escavado (m <sup>3</sup> ) | Delta N.A. crítico (m)<br>- Célula 853 | Extravasamento crítico (m)<br>- Célula 854 |
|----------|-------------|------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| C1       | 3.00        | 8.00       | 24.00                                      | 10262.40                                  | 1.44                                   | 0.04                                       |
| C2       | 2.75        | 8.00       | 22.00                                      | 9407.20                                   | 1.17                                   | 0.28                                       |
| C3       | 2.75        | 7.50       | 20.63                                      | 8819.25                                   | 1.11                                   | 0.34                                       |
| C4       | 2.50        | 6.50       | 16.25                                      | 6948.50                                   | 0.85                                   | 0.57                                       |
| C5       | 2.50        | 6.00       | 15.00                                      | 6414.00                                   | 0.78                                   | 0.63                                       |
| Atual    | -           | -          | -                                          | -                                         | 0                                      | 1,37                                       |

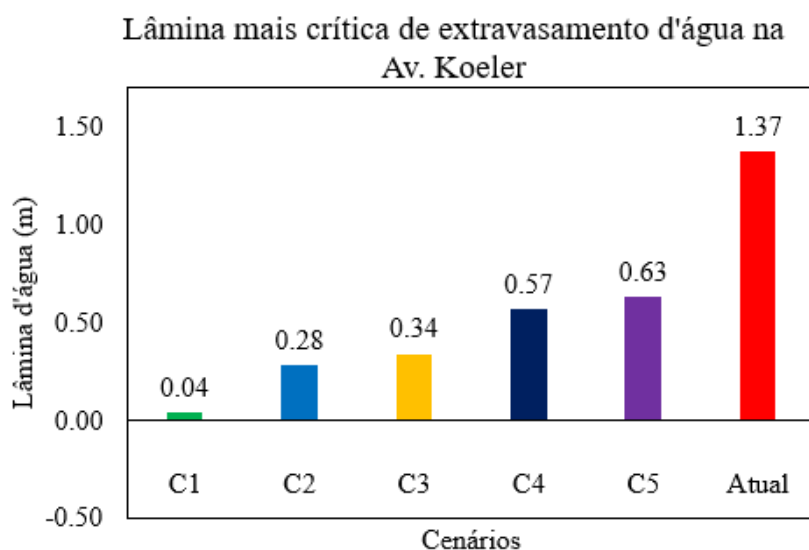


Figura 43 - Lâmina mais crítica de extravasamento d'água na Avenida Koeler para alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio.

Os resultados apresentados na Tabela 5 e Figura 43 explicitam que o cenário C1 é o que apresenta maior volume de solo escavado com a sua implementação e o mais otimista quanto a lâmina de extravasamento d'água nessa seção - redução da lâmina d'água de 97% em relação a situação atual. Os cenários C2 e C3 apresentaram semelhança na lâmina escoada, com redução média de 77,5 %, e em contrapartida, C2 apresenta maior volume de solo escavado. Os cenários C4 e C5 apresentam semelhança no volume de solo escavado e os menores valores comparados às demais soluções – diminuição de 42% e 46% ao menos 46% da lâmina d'água em relação à situação atual, respectivamente

A Figura 44 apresenta a lâmina de extravasamento d'água na seção mais crítica da Avenida Koeler, relacionando-a ao extravasamento ocorrido no evento do dia 15 de fevereiro e o desnível entre a rua e as edificações padrão da região, estimado em cerca de 75 centímetros, conforme mostrado a seguir.

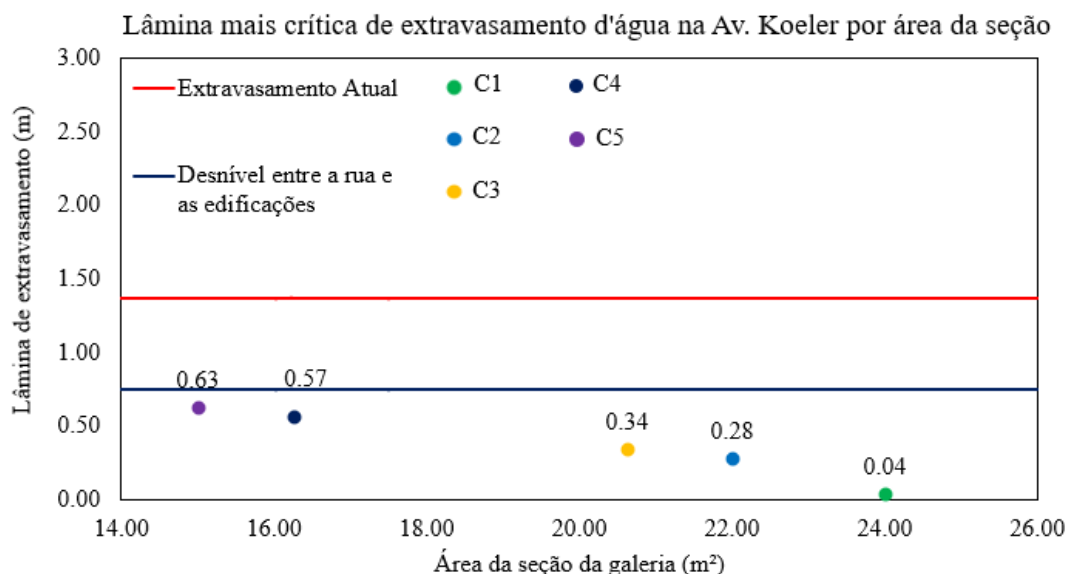


Figura 44 - Lâmina mais crítica de extravasamento d'água na Avenida Koeler por área da seção para a alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio.

Vale destacar que as construções na região apresentam um desnível significativo entre a rua e o nível do piso da parte interna da edificação. Isto ocorre devido à tentativa de proteção das edificações diante dos eventos de cheia que ocasionam extravasamentos. O desnível entre a rua e as edificações foi medido em campo pela autora em uma edificação padrão que representa a realidade geral observada nas edificações nas margens do Canal do Centro. As Figuras 45 e 46 apresentam a medição do desnível, de acordo com a distância da rua para a calçada e da calçada para o nível da primeira mureta das edificações. Esta distância foi estimada em 55 cm. Além disso foi considerado um desnível entre a mureta e o piso da edificação de cerca de 20 centímetros. Dessa maneira, considera-se que o extravasamento na rua precisa ultrapassar os 75 centímetros para invadir as edificações.



Figura 45 - Medição do desnível entre a rua e a calçada. Fonte: Autora

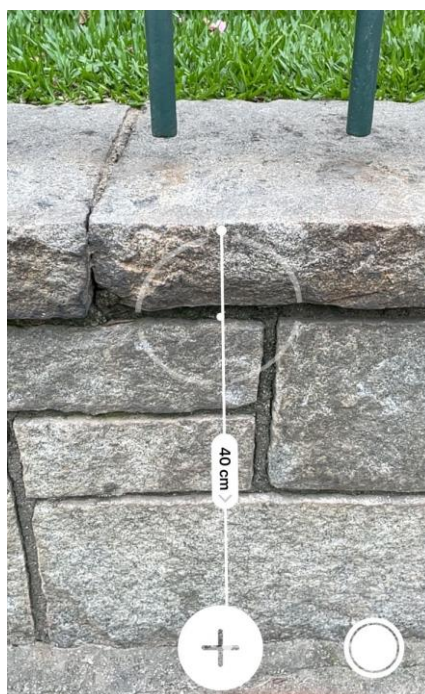


Figura 46 - Medição do desnível entre a calçada e edificações nível da mureta externa da edificação. Fonte: Autora

Os resultados da Figura 44 mostram que os cenários C5 e C4 apresentam proximidade da lâmina escoada ao desnível entre a rua e as edificações e, portanto, maior possibilidade de transbordamento d'água nas vias. Por outro lado, as soluções C3, C2 e C1 apresentam uma distância segura, com menor chance de extravasamento d'água nas ruas e edificações.

Por fim, a Figura 47 apresenta o perfil de níveis d'água máximos no Canal do Centro da situação atual e dos três cenários com resultados mais otimistas da simulação: C1, C2 e C3. O perfil de níveis máximos evidencia uma redução do nível d'água entre o Canal do Centro até o encontro dos rios Quitandinha e Piabanha, à jusante.

Perfil de Níveis Máximos - Canal do Centro (situação atual e de projeto)

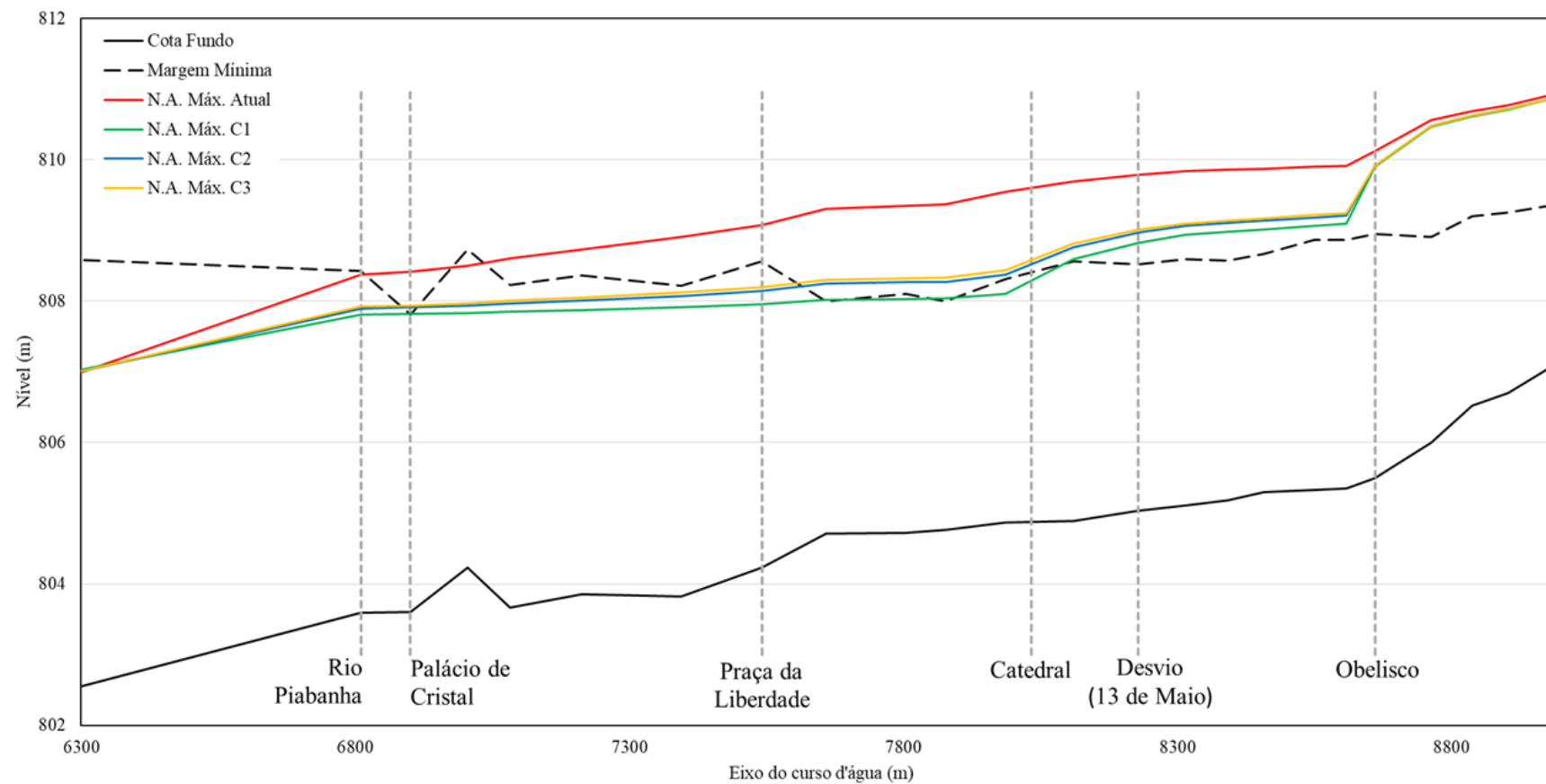


Figura 47 - Perfil de níveis máximos no Canal do Centro para a alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio.



Uma das principais preocupações desta alternativa é a possibilidade de impactar negativamente a região a jusante do Canal do Centro, principalmente agravando as inundações vistas nas proximidades do bairro de Corrêas. As simulações hidrodinâmicas, porém, demonstram que não há efeito significativo dos níveis a jusante em Corrêas pela implementação da galeria proposta. A Figura 48 apresenta os níveis simulados para TR 50 na região em questão, considerando o cenário atual e o de projeto (implementação da galeria).

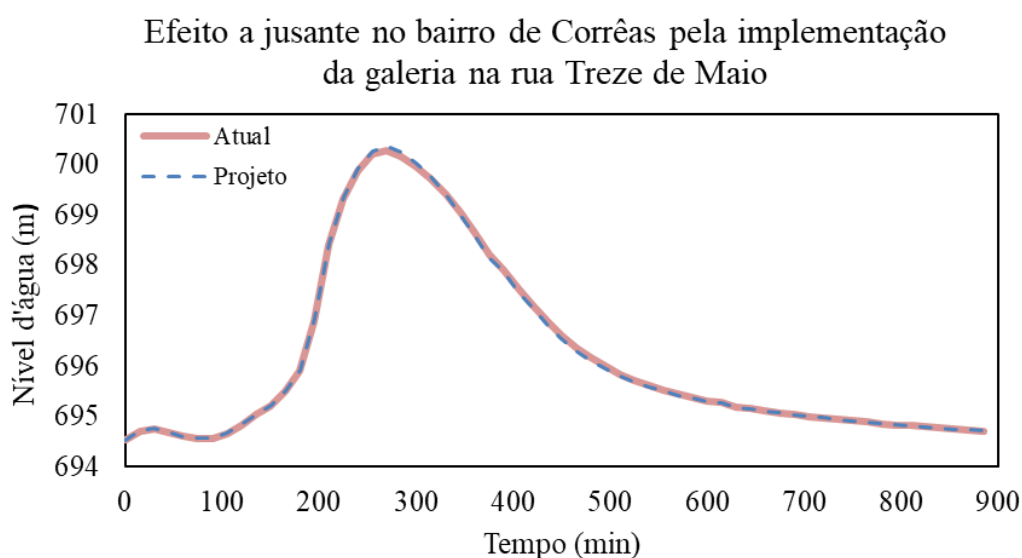


Figura 48 - Níveis d'água simulados no bairro de Corrêas para o TR 50.

## 5.2. Rio Quitandinha

Os resultados da simulação de melhoria da capacidade hidráulica do rio Quitandinha são apresentadas nas Figuras 49, 50 e 51. Na Figura 49 é apresentada a região delimitada pelo modelo, localizado entre rio Piabanha (cota inicial) até o Lago Quitandinha (cota final).

A Figura 50 traz uma visão aproximada do modelo no Centro Histórico (cotas entre 6300 m à 9000 m). Para este trecho, a partir da cota de 6300 m, percebe-se um aumento do nível d'água na região do Centro Histórico de Petrópolis. Na seção crítica considerada na alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio (célula 854 do modelo), a situação atual apresentava uma lâmina d'água de 1,37 m, enquanto a simulada 1,79 m –



aumento de aproximadamente 23%. Desta forma, não são observadas melhorias no escoamento superficial dessa região.

A Figura 51 apresenta resultados entre a rua Washington Luiz (cota aproximada de 9000 m) e a rua General Rondon, próximo ao Lago Quitandinha (cota aproximada de 14000). Neste trecho da análise nota-se uma atenuação do nível d'água ao compararmos as situações atual e de projeto. A maior variação ocorre no trecho entre a rua Coronel Veiga e a rua General Rondon – a situação atual apresentava N.A de 836,31 m, enquanto a situação simulada apresentou N.A de 833,38 m – uma redução de 2,44 m de lâmina d'água.



Perfil de Níveis Máximos - Rio Piabanha (situação atual e de projeto)

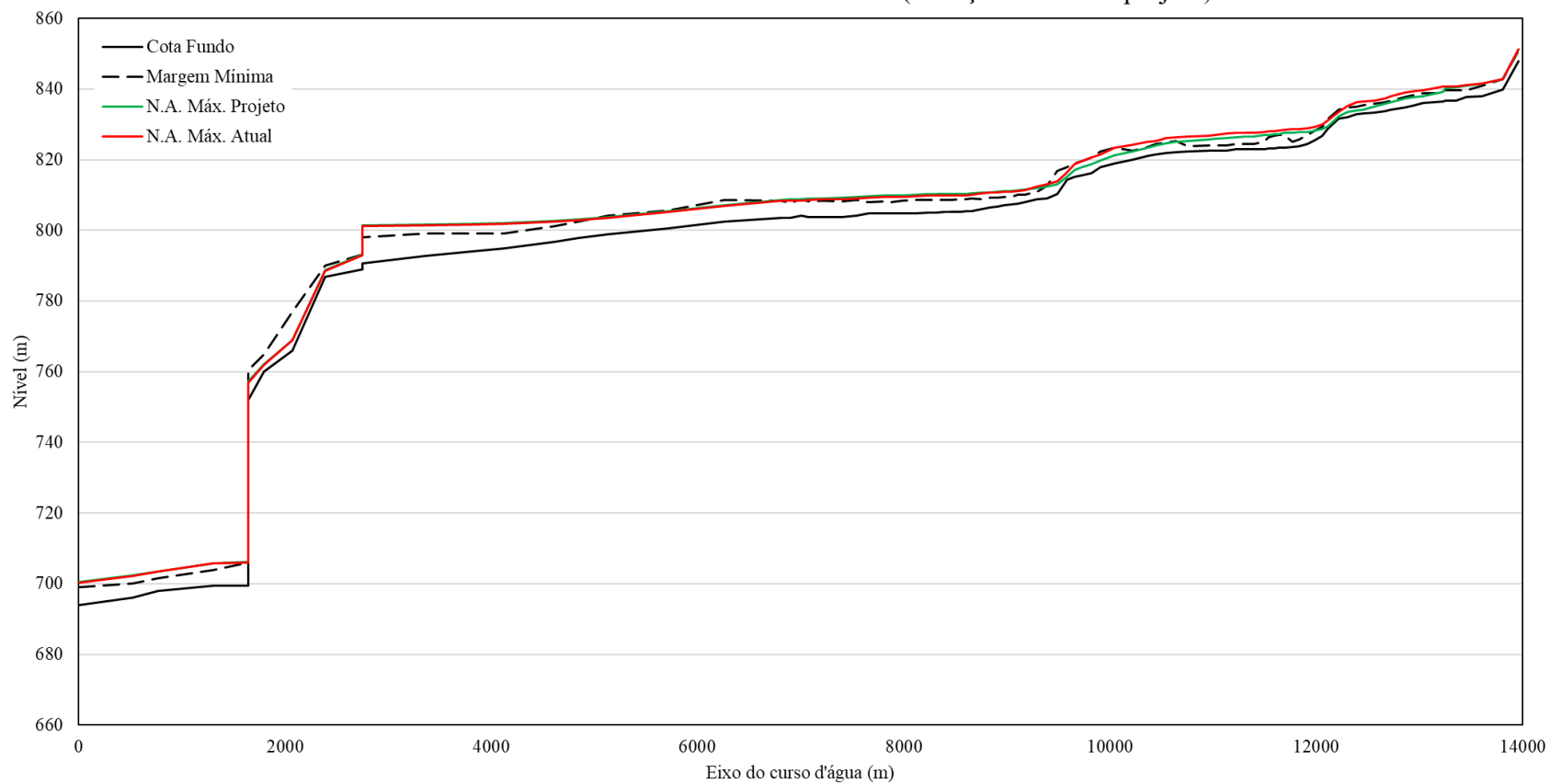


Figura 49 - Perfil de níveis máximos no rio Piabanha para a alternativa de melhoria da capacidade hidráulica do rio Quitandinha.

Perfil de Níveis Máximos - Canal do Centro (situação atual e de projeto)

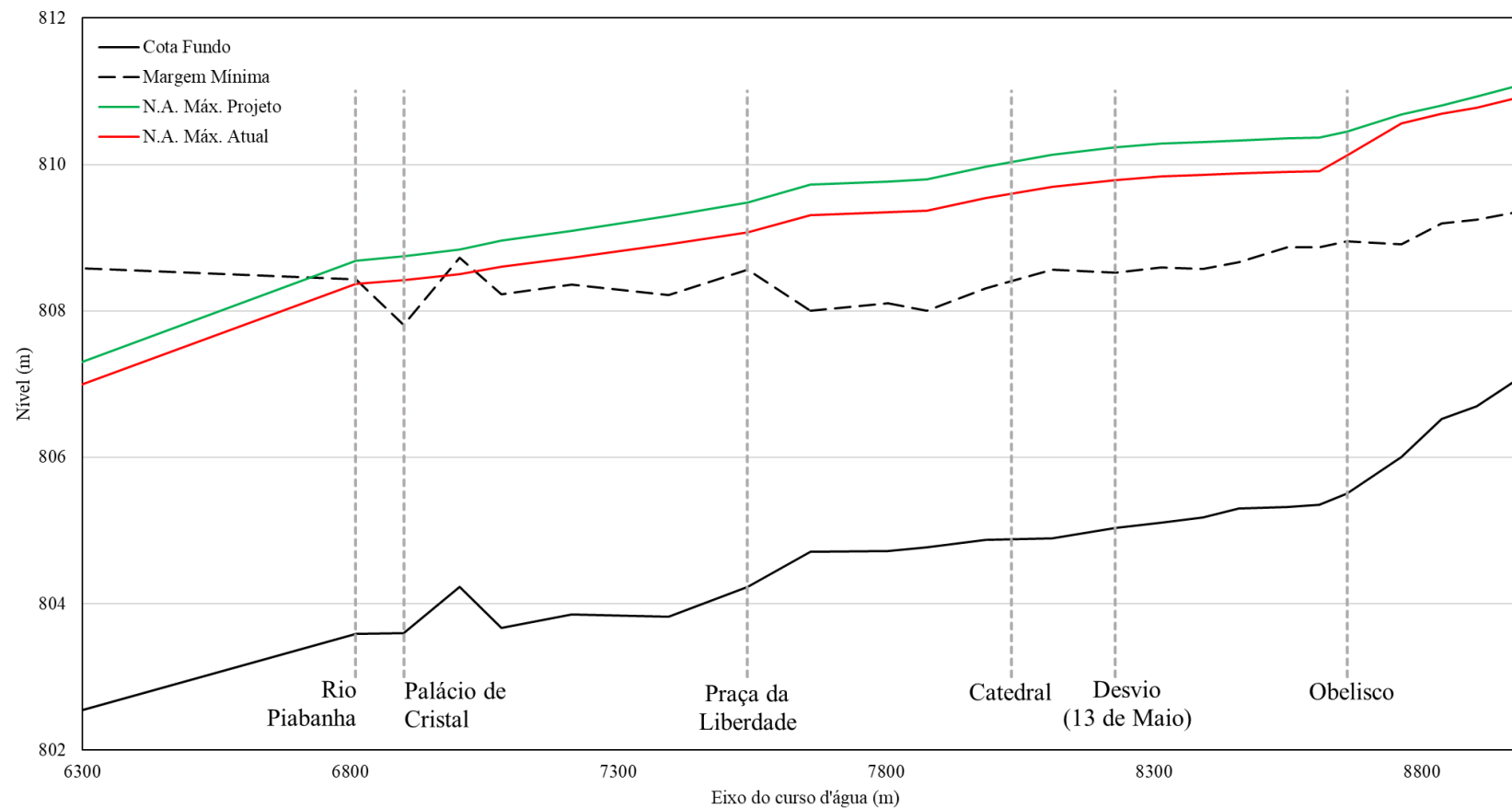


Figura 50 - Perfil de níveis máximos no Canal do Centro para a alternativa de melhoria da capacidade hidráulica do rio Quitandinha.

Perfil de Níveis Máximos - Rio Piabanha (situação atual e de projeto)

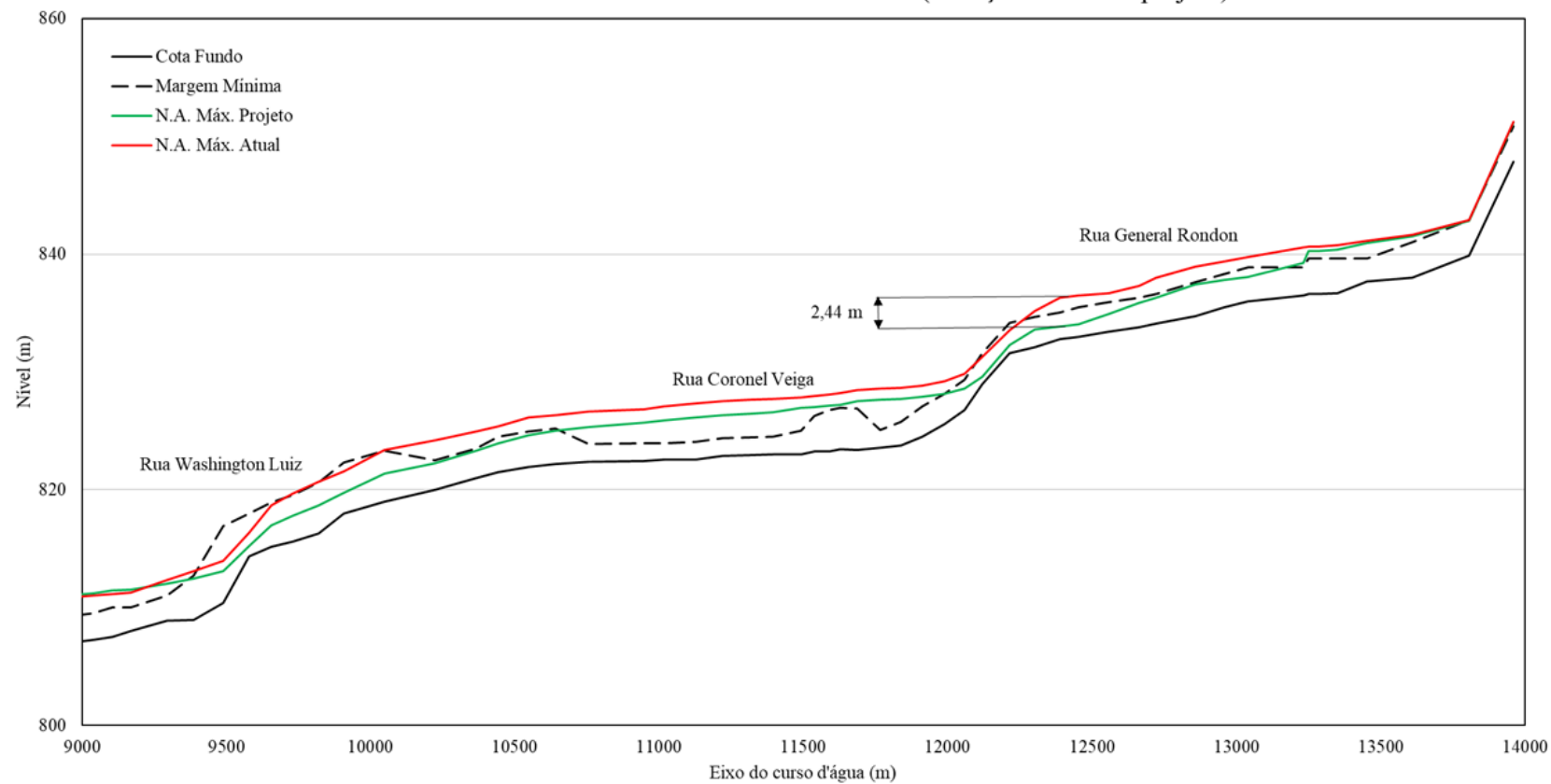


Figura 51 - Perfil de níveis máximos no rio Piabanha para a alternativa de melhoria da capacidade hidráulica do rio Quitandinha.



### 5.3. Alternativas de solução combinadas

Os resultados da simulação das alternativas de solução combinadas são apresentados nas Figuras 52, 53, 54 e 55. A Figura 52 apresenta a região simulada para essa alternativa, entre o rio Piabanha (cota inicial) até o Lago Quitandinha (cota final).

A Figura 53 traz uma visão aproximada do modelo no Centro Histórico (cotas entre 6300 m à 9000 m). Na altura do Palácio de Cristal (cota aproximada de 7000 m), nota-se uma do nível d'água na região do Centro Histórico de Petrópolis até Canal do Centro, próximo ao Obelisco de Petrópolis. Destacam-se duas melhorias nesta região:

- Redução da lâmina de extravasamento d'água, na seção mais crítica apontada na alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio (célula 854) – a lâmina de extravasamento da situação atual é 1,37 m, enquanto a desta simulação apresentou 0,69 m - uma redução de 50%.
- Redução do nível d'água, no ponto de maior variação do N.A na alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio (célula 853), entre a Avenida Koeler e a rua Treze de Maio - a situação atual apresentava N.A de 809,55 m, enquanto a situação simulada apresentou N.A de 808,80 m – uma redução de 0,74 m de lâmina d'água.

A Figura 54 apresenta resultados entre a rua Washington Luiz (cota aproximada de 9000 m) e a rua General Rondon, próximo ao Lago Quitandinha (cota aproximada de 14000). Assim como na solução de melhoria da capacidade hidráulica das galerias de águas pluviais no rio Quitandinha, observa-se uma diminuição do nível d'água ao compararmos as situações atual e de projeto, apresentando a mesma variação do N.A entre a rua Coronel Veiga e a rua General Rondon – uma redução de 2,44 m de lâmina d'água.

A Figura 55 apresenta o gráfico da lâmina mais crítica de extravasamento d'água na Avenida Koeler (célula 854 do modelo utilizado), comparando as três alternativas simuladas a situação atual. Nessa representação, verifica-se que a alternativa de implementação da galeria na rua Treze de Maio é a que apresenta o cenário mais otimista para essa seção, com redução de cerca de 97% da lâmina escoada. A solução de melhoria



da capacidade hidráulica das galerias no rio Quitandinha apresentaram um agravamento, como já evidenciado na Figura 44. A alternativa de soluções combinadas apresenta uma melhoria de 50% da lâmina escoada em relação ao cenário atual.

A Tabela 7 apresenta um quadro resumo das três alternativas de solução para mitigação de inundações no Centro Histórico de Petrópolis e a bacia hidrográfica do Rio Quitandinha e seus respectivos resultados.

Perfil de Níveis Máximos - Rio Piabanha (situação atual e de projeto)

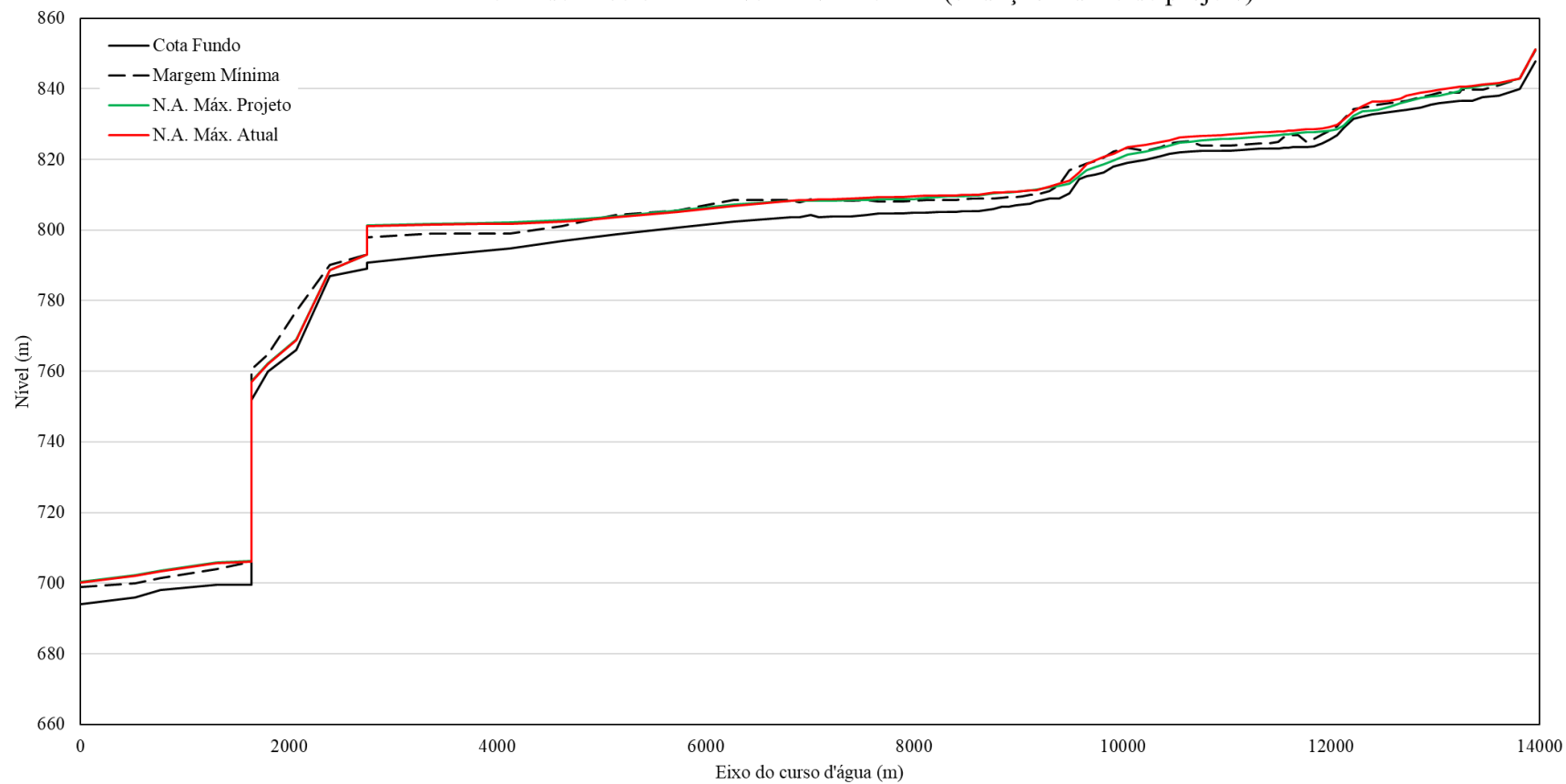


Figura 52 - Perfil de níveis máximos no Rio Piabanha para as alternativas de solução combinadas.

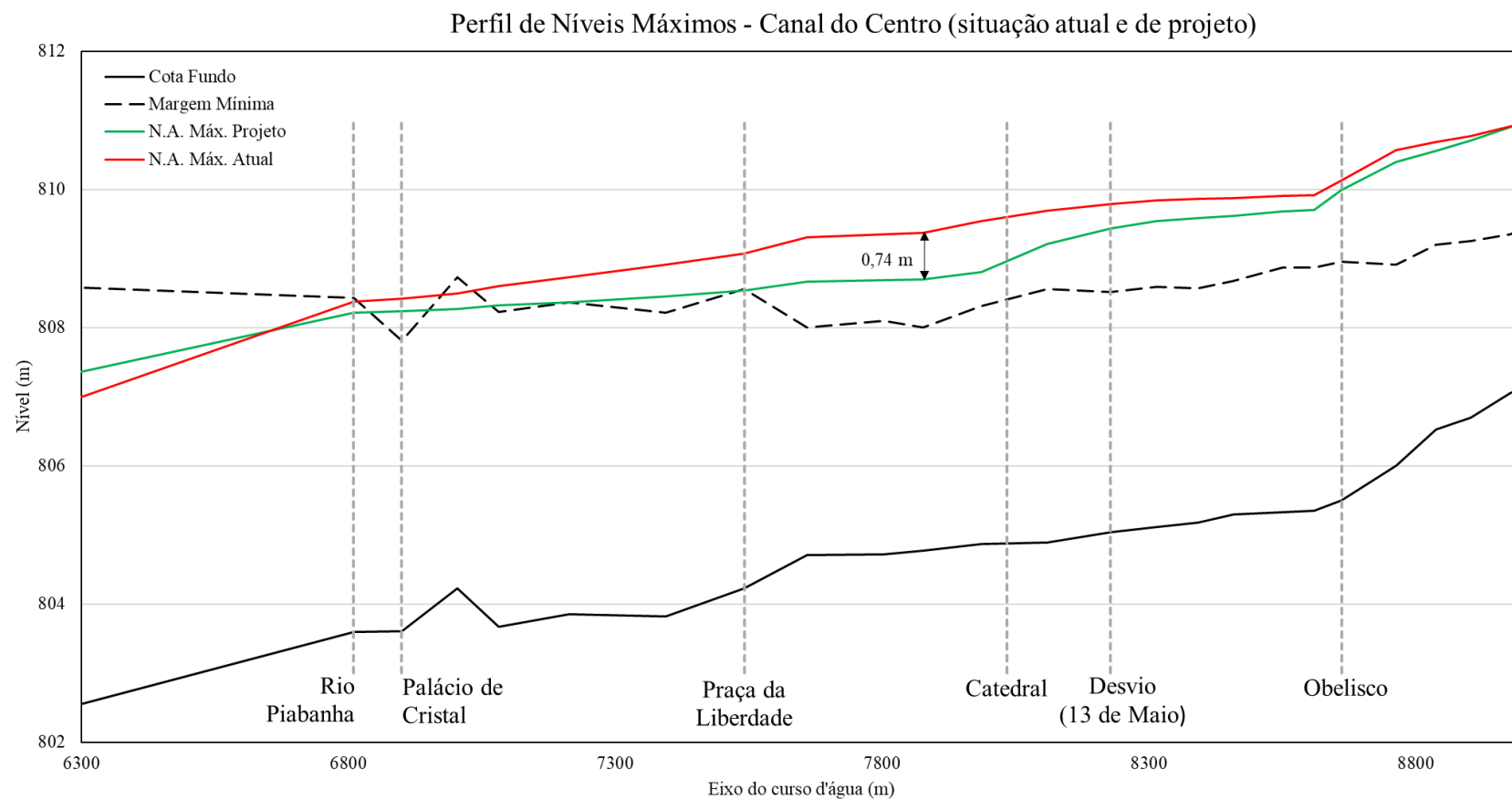


Figura 53 - Perfil de níveis máximos no Canal do Centro para as alternativas de solução combinadas.

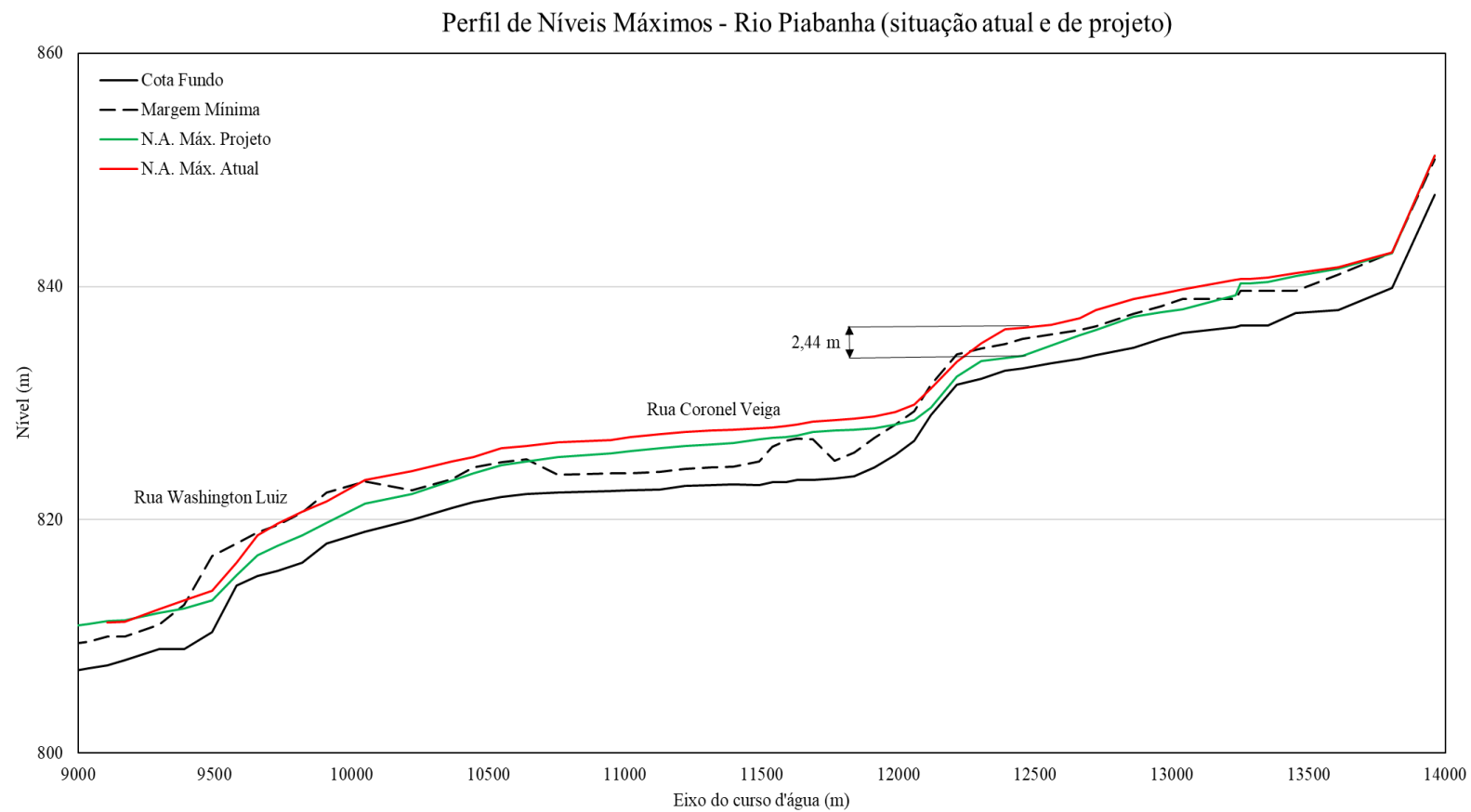


Figura 54 - Perfil de níveis máximos no Rio Piabanha para as alternativas de solução combinadas.

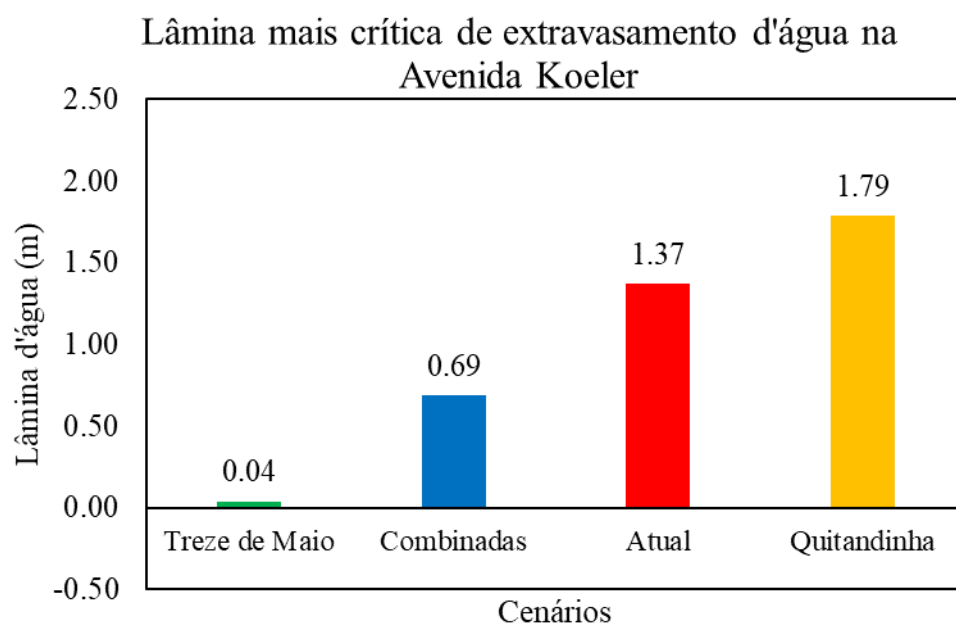


Figura 55 - Lâmina mais crítica de extravasamento d'água na Avenida Koeler comparando as três alternativas simuladas ao cenário atual.

Tabela 7 - Alternativas propostas e seus respectivos resultados.

| Alternativa                                                    | Descrição                                                                                                                                                                                                                                              | Resultados                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alternativa 1 – Centro Histórico do Município de Petrópolis-RJ | <p>Construção de galeria extravasora.</p> <p>Análise de 5 cenários de área de seção da galeria:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cenário 1: galeria de seção 3,00 x 8,00 m</li> <li>• Cenário 2: galeria de seção 2,75 x 8,00 m</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cenários C1: redução de 97% da lâmina d'água extravasada na seção mais crítica</li> <li>• Cenário C2: redução de 80% da lâmina d'água extravasada na seção mais crítica</li> </ul> |



|                                                                         |                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cenário 3: galeria de seção 2,75 x 7,50 m</li> <li>• Cenário 4: galeria de seção 2,50 x 6,50 m</li> <li>• Cenário 5: galeria de seção 2,50 x 6,00 m</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cenário C3: redução de 75% da lâmina d'água extravasada</li> <li>• Cenários C4 e C5: redução de aproximadamente 45% da lâmina extravasada; maior risco de extravasamento</li> </ul> |
| Alternativa 2 –<br>Bacia<br>hidrográfica do<br>Rio Quitandinha          | Aumento da capacidade hidráulica do Rio Quitandinha em $\pm 1$ m, através dos processos de desassoreamento e dragagem                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento das inundações no Centro Histórico – cerca de 23% na seção mais crítica</li> <li>• Redução de 2,44 m do N.A (entre as ruas Coronel Veiga e a rua General Rondon)</li> </ul> |
| Alternativa 3 –<br>Combinação das<br>alternativas 1 e 2<br>de melhorias | Construção de galeria extravasora (considerando a seção ótima obtida nos resultados da alternativa 1) e aumento da capacidade hidráulica do Rio Quitandinha em $\pm 1$ m                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução de 50% da lâmina d'água na seção crítica do Centro Histórico</li> <li>• Redução de 2,44 m do N.A (entre as ruas Coronel Veiga e a rua General Rondon)</li> </ul>            |



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo propor um projeto de mitigação de inundações no Centro Histórico do município de Petrópolis e na bacia hidrográfica do rio Quitandinha, a partir de três alternativas de solução estruturais, respondendo a uma chuva intensa de TR 50 anos, usado para verificação do funcionamento do sistema de macrodrenagem. Neste contexto, busca-se avaliar os pontos favoráveis e contrários à implementação dessas soluções, bem como a necessidade de implementação de medidas não estruturais.

A alternativa de implementação de uma galeria extravasora na rua Treze de Maio apresentou um resultado positivo para a redução do nível máximo das cheias no Centro Histórico. Dentre os cinco cenários propostos, os cenários C1, C2 e C3 se destacam por apresentarem os menores valores de lâminas de extravasamento d'água na Avenida Koeler. O cenário C1 denota a maior redução da lâmina d'água de extravasamento na seção mais crítica do modelo – cerca de 97%. Em contrapartida, é o que propõe o maior volume de solo escavado, o que pode desencadear a necessidade de uma investigação técnica especial e consequentemente, maior investimento financeiro para execução dessa etapa. Os cenários C2 e C3 apresentam menor volume de solo escavado, no entanto, para ambos os casos a amplitude dos extravasamentos d'água é maior que no cenário C1.

A alternativa de melhoria da capacidade hidráulica da calha principal do rio Quitandinha evidencia melhorias no escoamento superficial no trecho paralelo à rua Coronel Veiga, que apresenta os casos mais críticos de inundações da bacia hidrográfica do rio Quitandinha. No trecho entre as ruas Coronel Veiga e a rua General Rondon, próximo ao Lago Quitandinha, há uma diminuição de 2,44 m de lâmina d'água escoada. Contudo, a implementação dessa solução desencadeia no aumento das inundações no Centro Histórico de Petrópolis – cerca 23% de incremento de inundação na seção mais crítica da região.

É importante ressaltar que, como essa solução visa uma melhoria em todo trajeto da rua Coronel Veiga, é necessário levar em consideração a dificuldade de mobilidade que essa obra traria para a população, uma vez que se trata de uma das vias principais do bairro de Quitandinha, com a presença de comércio e demais edificações. O impacto na mobilidade



urbana, a presença de diversas pontes na margem direita do rio Quitandinha e o tipo de material a ser utilizado para sua execução devem ser considerados para o estudo de viabilidade econômica dessa obra.

Finalmente, a alternativa de solução combinada visa o aprimoramento do escoamento superficial na bacia do rio Quitandinha e do Canal do Centro, considerando intervenções desde a região a jusante do Lago Quitandinha, passando pela rua Coronel Veiga e o Centro Histórico, até o desemboque no rio Piabanha. Nesta alternativa, portanto, considera-se a implantação do cenário C1 do túnel na rua Treze de Maio (seção ótima) e as melhorias na calha principal do rio Quitandinha. Para essa solução, nota-se uma melhoria no escoamento superficial de toda extensão do Centro Histórico – cerca de 50% de atenuação da lâmina de extravasamento d'água na seção crítica. Apesar do cenário combinado apresentar melhorias inferiores no centro histórico do que o cenário de apenas implementar a galeria, é observada uma redução desde montante, conseguindo aliviar também as inundações do rio Quitandinha. No perfil situado na rua Coronel Veiga, o comportamento permaneceu o mesmo da solução abordada anteriormente – redução de 2,44 m da lâmina d'água extravasada.

Considerando o aspecto econômico, assim como abordado na alternativa anterior, a implementação de melhorias em toda extensão da rua Coronel Veiga deve ser analisada com cautela, principalmente no caso desta acontecer paralelamente à construção da galeria na rua Treze de Maio. Entende-se que as soluções combinadas gerariam um grande impacto no planejamento urbano, pois englobam toda região do 1º distrito de Petrópolis.

Outra questão a se considerar para execução das soluções propostas é a existência das obras de melhorias no Túnel Extravasador do rio Palatino. Conforme abordado neste trabalho, entende-se que a obstrução desse túnel pode ter sido um dos fatores agravantes para as inundações no Centro Histórico nos últimos anos. Atualmente, essa galeria encontra-se em obras (sem previsão de término até o momento de elaboração desse trabalho) e é importante atentar-se ao impacto dessas mudanças no regime hidrológico local. Essas mudanças podem ser constatadas através de um estudo hidrológico e hidrodinâmico da região, similar ao realizado no presente trabalho.

Além destas obras, o relatório final da Comissão Especial de Finanças, Infraestrutura e Retomada Econômica constatou a existência de 119 locais atingidos pelo evento de fevereiro que necessitam de obras, sendo 14 de responsabilidade do município de Petrópolis, 10 do Estado do Rio de Janeiro e 95 sem responsável definido (DIÁRIO DE PETRÓPOLIS, 2022). Portanto, destaca-se a importância do acompanhamento dessas obras, uma vez que a execução destas pode inviabilizar (a curto ou longo prazo) o desenvolvimento das alternativas propostas nesse trabalho, tanto devido o aspecto econômico, como devido à possíveis mudanças do regime de cheias da região (caso as obras sejam realizadas).

Em suma, a elaboração de soluções estruturais para controle de inundações é uma grande ferramenta para controle de inundações. No entanto, o uso de tais medidas não inviabiliza a necessidade de implementação de medidas não estruturais. É indispensável o trabalho desempenhado pelos órgãos de monitoramento de regiões suscetíveis a inundações, o uso de sistemas de alertas de chuvas (principalmente em comunidades), a criação de programas voltados à educação ambiental da população residente, o monitoramento de uso e ocupação do solo, bem como a continuidade dos estudos relacionados a manejo de águas pluviais e drenagem urbana.

Como recomendações para trabalhos futuros e prosseguimento da pesquisa, sugere-se o aprofundamento nos seguintes temas:

- Avaliação das alternativas propostas para os TRs de 25 anos e 100 anos;
- Avaliação geotécnica e ambiental das soluções propostas;
- Estudo de viabilidade econômica das soluções propostas;
- O estudo do efeito das alternativas com diferentes dimensões da galeria para o cenário combinado;
- Estudo do tempo de inundação da bacia hidrográfica;



- Desenvolvimento de soluções complementares para mitigar inundações remanescentes na bacia hidrográfica;



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

574 PESSOAS nos pontos de apoio. Brasil, mar. 2022. **Diário de Petrópolis**. Disponível em: <<https://www.diariodepetropolis.com.br/integra/574-pessoas-nos-pontos-de-apoio-207862>> Acesso em: 5 set. 2022.

861 petropolitanos já apresentaram sugestões à revisão da LUPOS. Brasil, jul. 2018. **Diário de Petrópolis**. Disponível em: <<https://diariodepetropolis.com.br/integra/861-petropolitanos-ja-apresentaram-sugestoes-a-revisao-da-lupos-152355>> Acesso em: 21 nov. 2022.

A CATÁSTROFE em Petrópolis em imagens. Brasil, fev. 2022. **MetSul Meteorologia**. Disponível em: <<https://metsul.com/a-catastrofe-em-petropolis-em-imagens/>> Acesso em: 01 set. 2022

ABCP. Projeto Técnico: Reservatórios de Detenção. **AB-CP — Associação Brasileira de Cimento Portland**, p. 1–13, 2013.

ACERVO TV GLOBO. Com 178 mortos, tragédia em Petrópolis é a maior já registrada na história do município. 1 fotografia, color. Rio de Janeiro, Brasil, fev. 2022. **G1 Rio**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2022/02/20/tragedia-em-petropolis-maior-registrada-na-historia-o-municipio.ghml>> Acesso em: 28 set. 2022.

AGEVAP. Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul – Resumo. Caderno de Ações – Bacia do Rio Piabanha** 2007.

AQUAFLUXUS Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos. **Estudos Hidrodinâmicos das Bacias dos rios Palatino e Itamarati e do Túnel do Palatino, Petrópolis –RJ**. 2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSUMPÇÃO, R. DOS S. F. V. **Petrópolis - um histórico de desastres sem solução? Do Plano Köeller ao Programa Cidades Resilientes**. Tese (Doutorado) – Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro, 2015.

BIDONE, F.; TUCCI, C E M. (1995). “Microdrenagem”, in **Drenagem Urbana**. Org. por Tucci, C.E.M.; Porto, R.L. e Barros, M.T., ABRH ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, pp. 77-105.

BRASIL. Decreto-lei nº14.026, de 15 de julho de 2020. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 14 jul. 2020. Seção 1

Bypass and diversion channels. **Freie Universität Berlin**. Disponível em: <[https://www.geo.fu-berlin.de/en/v/iwrm/Implementation/technical\\_measures/Flood-protection-measures/structural\\_measures/bypass\\_diversion\\_channels/index.html](https://www.geo.fu-berlin.de/en/v/iwrm/Implementation/technical_measures/Flood-protection-measures/structural_measures/bypass_diversion_channels/index.html)> Acesso em: 21 nov. 2022.

CANEDO, P.M. 2011. **Mitigação das Cheias: Proteção do Centro Histórico de Petrópolis**. Palestra apresentada na 5ª Reunião Extraordinária do Comitê Piabanha em 22/09/ 2011.

CARIUS, Andrea. Arquivo pessoal. Brasil, mar. 2022.

CARROS são engolidos por enchente e ocupantes resgatados na Serra do Rio. Rio de Janeiro, mar. 2017. **G1 Região Serrana**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2017/03/carros-sao-engolidos-por-enchente-e-ocupantes-resgatados-na-serra-do-rio.html>> Acesso em: 06 nov. 2022.

CENAD. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastre. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2013**. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. – Brasília: 2014.

CHUVA de domingo em Petrópolis teve o maior volume da história num período de 24h. Petrópolis, Brasil, mar. 2022. **G1 Rio**. Disponível em: < <https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2022/03/21/chuva-de-domingo-em-petropolis-teve-o-maior-volume-da-historia-num-periodo-de-24h.ghtml>> Acesso em: 10 set. 2022.



COMISSÃO da Câmara aponta que 119 locais atingidos pela tragédia de fevereiro ainda necessitam de obras; 95 não têm responsável definido. Rio de Janeiro, nov. 2022.

**Tribuna de Petrópolis.** Disponível em: <  
[https://tribunadepetropolis.com.br/noticias/comissao-da-camara-aponta-que-119-locais-atingidos-pela-tragedia-de-fevereiro-ainda-necessitam-de-obras-9apos5-nao-tem-responsavel-definido/#goog\\_rewarded](https://tribunadepetropolis.com.br/noticias/comissao-da-camara-aponta-que-119-locais-atingidos-pela-tragedia-de-fevereiro-ainda-necessitam-de-obras-9apos5-nao-tem-responsavel-definido/#goog_rewarded)> Acesso em: 21 nov. 2022.

CORONEL VEIGA, em Petrópolis, RJ, fica alagada pelo 2º dia consecutivo. Rio de Janeiro, abr. 2014. **G1 Região Serrana.** Disponível em: <  
<https://g1.globo.com/r91eriódj/regiao-serrana/noticia/2014/04/coronel-veiga-em-petropolis-rj-fica-alagada-pelo-2-dia-consecutivo.html>> Acesso em: 06 nov. 2022.

COSTA, A. et al. Análise De Mancha De Alagamento No Centro Urbano Do Município De Petrópolis/RJ , Utilizando O Modelo Modcel. p. 1–10, 2021.

DRACH, P.; SILVA BARBOSA, G.; ALVES BARCELLOS, F. .; DOS SANTOS MARTINS, T. .; MELO ARAÚJO, J. .; FREITAS, L. Evolução urbana do centro histórico de Petrópolis: processo de arqueologia da paisagem 1860-2020. **Revista de Morfologia Urbana**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. e00150, 2020. DOI: 10.47235/rmu.v8i2.150. Disponível em: <http://pnum.org/rmu/index.php/rmu/article/view/150>. Acesso em: 01 dez. 2022.

EMATER, MG. **Bacias de captação de enxurradas.** Série Meio Ambiente, 2006. Disponível em:  
<[https://www.emater.mg.gov.br/doc/intranet/upload/resp\\_ambiental/folders/bacias%20de%20capta%C3%A7%C3%A3o%20de%20enxurradass.pdf](https://www.emater.mg.gov.br/doc/intranet/upload/resp_ambiental/folders/bacias%20de%20capta%C3%A7%C3%A3o%20de%20enxurradass.pdf)>. Acesso em: 10 ago. 2022.

FEITOSA, A. Ocupação irregular de áreas em Petrópolis mais do que dobrou entre 1985 e 2020. **G1 Rio.** Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: < <https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2022/02/23/ocupacao-irregular-de-areas-em-petropolis-mais-do-que-dobrou-entre-1985-e-2020.ghtml>> Acesso em: 21 nov. 2022.



FERREIRA, Vinicius. Obras emergenciais do Túnel extravasor começaram em Petrópolis. 1 fotografia, color. Brasil, jul. 2022. **G1 Região Serrana**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2022/07/26/obras-emergenciais-do-tunel-extravasor-comecam-em-petropolis.ghtml>> Acesso em: 03 ago. 2022.

FILHO, A. G. A.; SZÉLIGA, M. R.; ENOMOTO, C. F. Estudo de medidas não estruturais para controle de inundações urbanas. **Publicatio Uepg**, v. 6, n. 1, p. 69–90, 2000.

FORTE chuva desta tarde alaga diferentes pontos da cidade. Rio de Janeiro, jan. 2020. **Tribuna de Petrópolis**. Disponível em: <<https://tribunadepetropolis.com.br/noticias/forte-chuva-desta-tarde-alaga-diferentes-pontos-da-cidade/>> Acesso em: 06 nov. 2022.

FRAZÃO, Fernando. A catástrofe em Petrópolis em imagens. 1 fotografia, color. Brasil, fev. 2022. **Agência Brasil. EBC. MetSul Meteorologia** Disponível em: <<https://metsul.com/a-catastrofe-em-petropolis-em-imagens/>> Acesso em: 01 set. 2022

FREITAS, Carolina. Um passado que se repete: histórico de enchentes em Petrópolis revela urgência na adoção de providências. Rio de Janeiro, fev. 2022. **Sou Petrópolis**. Disponível em: <<https://soupetropolis.com/2022/02/22/um-passado-que-se-repete-historico-de-enchentes-em-petropolis-revela-urgencia-na-adocao-de-providencias/>>. Acesso em: 05 mai. 2022.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE. **Cadernos temáticos — Drenagem e manejo de águas pluviais urbanas**. 23 p. Brasil, 2016.

GANDRA, Alana. Sobe para 233 número de mortos pelas chuvas de fevereiro em Petrópolis. Rio de Janeiro, mar. 2022. **Diário de Petrópolis**. Disponível em: <<https://www.diariodepetropolis.com.br/integra/temporal-caoa-deslizamentos-morte-inundacoes-arrasta-carros-e-deixa-caoa-em-petropolis-205053>> Acesso em: 27 set. 2022.

GERALDO, E. et al. Artigos telhado verde: **Alternativa sustentável para a drenagem do escoamento superficial Green Roof**.v. 0899, p. 125–136, 2021.



GONZALEZ, F.C.G. **Probabilidade de ocorrência de movimentos de massa em função da pluviometria na bacia do rio Quintandinha, Petrópolis, RJ.** Dissertação (Mestrado). UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

GONZALEZ, F.C.G. **Projeto de Drenagem Sustentável para Mitigação de Cheias na Bacia do Rio Quitandinha, em Petrópolis, RJ.** Projeto de graduação. Escola Politécnica/Curso de Engenharia Ambiental/ UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

GUERRA, A. J. T; GONÇALVES, L.F.H; LOPES, P.B.M. **Características geográficas e geomorfológicas da APA Petrópolis, RJ.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v.8, n.1, p.77-86, 2007.

GUERRA, A. J. T; GONÇALVES, L.F.H; LOPES, P.B.M. **Evolução histórico-geográfica da ocupação desordenada e movimentos de massa no município de Petrópolis, nas últimas décadas.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v.8, n.1, p.35-43, 2007.

GUSMÃO, Fábio. Rio Quitandinha transborda em Petrópolis, após temporal. Rio de Janeiro, fev. 2019. **Extra.** Disponível em: < <https://extra.globo.com/noticias/rio/rio-quitandinha-transborda-em-petropoapóslis-apos-temporal-23449436.html> > Acesso em: 06 nov. 2022.

IBAMA; MMA. Área de Proteção Ambiental da Região Serrana de Petrópolis. 2007.

IBGE, 2021. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados.

INEA. Ar, Água e Solo. **Alerta de Cheias.** Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/ar-agua-e-solo/alerta-de-cheias/>>. Acesso em: 20 set, 2022.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. **Estudo de Alternativas e Elaboração de Projetos Básicos e Executivos para Controle de Inundações do Centro Histórico do Município de Petrópolis-RJ. Relatório de Estudos Hidrológicos (RT-03).** 2022.



INEA. Instituto Estadual do Ambiente. **Estudo de Alternativas e Elaboração de Projetos Básicos e Executivos para Controle de Inundações do Centro Histórico do Município de Petrópolis-RJ. Relatório de Estudos Hidrológicos.** 2014.

INEA. Sistema de Alerta de Cheias. Disponível em: <<https://alertadecheias.inea.rj.gov.br/radar.php>>. Acesso em: 20 set, 2022.

JACINTO, M.A.S et al. **Análise da problemática em macrodrenagem. Estudo de casaco do canal Cohab-Cohatrac na Ilha de São Luís – MA.** Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer – Jandaia-GO, v.17 n.33, 2020.

LEONARDI, R.R. **Manual de drenagem urbana.** Volume I. n. 45, 2017.

LI et al. **Study on auxiliary operation control of machine learning in multiobjective complex drainage system.** Water Science & Technology Vol 85 No 8, 2278. 2022.

LIMA, L.C.; FILGUEIRA, H.J.A. A microdrenagem urbana e o risco de desastres por alagamento na cidade de João Pessoa, Paraíba, Brasil. **I Encontro Nacional de Desastres.** Porto Alegre, RS, Brasil. 2018.

MACHADO, A.C.M; SOUSA, M.M; FERNANDÉZ, M.A.F; MIGUEZ, M.G. Análise de mancha de alagamento no centro urbano no município de Petrópolis/RJ, utilizando o modelo MODCEL. **XVV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, n. January, p. 10, 2022.

MACHADO, Lucas. Chuva de domingo em Petrópolis teve o maior volume da história num período de 24h.1 fotografia, color. Brasil, mar. 2022. **G1 Rio.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2022/03/21/chuva-de-domingo-em-petropolis-teve-o-maior-volume-da-historia-num-periodo-de-24h.ghtml>> Acesso em: 08 set. 2022.

MACHADO, O. J.; POLEZA, M. M. Medidas Estruturais E Não Estruturais Implementadas Para Minimizar Impactos Com As Inundações No Município De Taió. **Psychology Applied to Work: An Introduction to Industrial and Organizational Psychology, Tenth Edition Paul**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2012.



MAIS um dia normal na Coronel Veiga: via é interditada por possibilidade de alagamento. Rio de Janeiro, ago. 2021. **Tribuna de Petrópolis**. Disponível em: <[https://tribunadepetropolis.com.br/noticias/mais-um-dia-normal-na-coronel-veiga-via-e-interditada-por-possibilidade-de-alagamento/#goog\\_rewarded](https://tribunadepetropolis.com.br/noticias/mais-um-dia-normal-na-coronel-veiga-via-e-interditada-por-possibilidade-de-alagamento/#goog_rewarded)> Acesso em: 06 nov. 2022.

MATIAS et al. **Contenção de obras rodoviárias: restrições e estabilização de taludes e encostas**. 2022.

MATOS, A. J.S; PIOLTINE, A; MAUAD, F.F.; BARBOSA, A.A. **Metodologia para a caracterização do Coeficiente de Manning variando na seção transversal e ao longo do canal - Estudo de caso bacia do Alto Sapucaí-MG**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 16, n. 4. 2011.

MESQUITA, Marianny. Com ruas alagadas, Defesa Civil de Petrópolis aciona sirenes e bloqueia tráfego na Coronel Veiga. 1 fotografia, color. Rio de Janeiro, Brasil, mar. 2022. **Sou Petrópolis**. Disponível em: <<https://soupetropolis.com/2022/03/20/com-ruas-alagadas-defesa-civil-de-petropolis-aciona-sirenes-e-bloqueia-trafego-na-coronel-veiga/>> Acesso em: 07 nov. 2022.

MIGUEZ, M. G. et al. **Urban flood simulation using MODCEL—an alternative quasi-2D conceptual model**. Water, v. 9, n. 6, p. 445, 2017.

MIGUEZ, M. G. Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas. 2001. 410 f. Tese (–Doutorado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

MIGUEZ, M. G., VERÓL, A. P., REZENDE, O. M., 2016, **Drenagem Urbana: Do Projeto Tradicional à Sustentabilidade**, 1ª edição, Elsevier, ISBN 978-85-352-7746-3, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIRANDA, Eduardo; DEISTER, Jaqueline. Petrópolis tem em 2 horas chuva para o mês inteiro; cinco pessoas morreram no domingo. Rio de Janeiro, Brasil, mar. 2022. **Brasil de fato**. Disponível em: <<https://www.brasildefatorj.com.br/2022/03/21/petropolis-tem->



em-2-horas-chuva-para-o-mesmês-inteiro-cinco-pessoas-morreram-no-domingo>

Acesso em: 5 set. 2022.

MORGADO, Gabriela. Petrópolis: obras no Túnel Extravasador do Rio Palatino começam semana que vem. Mar, 2022. **Bandeirantes**. Disponível em: <<https://www.band.uol.com.br/bandnews-fm/rio-de-janeiro/noticias/petropolis-obras-no-tunel-extravasador-do-rio-palatino-comecam-semana-que-vem-16502458>> Acesso em: 02 mai. 2022.

MOURA, P. M. BARRAUD, S. BAPTISTA, M. B. **O funcionamento dos sistemas de infiltração de águas pluviais urbanas**. p. 1-20, 2009.

MWRD. **Tunnel and Reservoir Plan (TARP)**, Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago Fact Sheet, 2019.

NASCIMENTO, C.; KOIDE, S. Coleta de Amostras e Monitoramento da Água da Zona não Saturada do Subsolo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n. 2, p. 31–39, 1999.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE - Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2 ed., 421p, 1989.

OBRAS do INEA no túnel extravasador não impedem abertura de novas crateras no Quissamã. Rio de Janeiro, fev. 2020. **Diário de Petrópolis**. Disponível em: <[https://tribunadepetropolis.com.br/noticias/obras-do-inea-no-tunel-extravasador-nao-impedem-abertura-de-novas-crateras-no-quissama/#goog\\_rewarded](https://tribunadepetropolis.com.br/noticias/obras-do-inea-no-tunel-extravasador-nao-impedem-abertura-de-novas-crateras-no-quissama/#goog_rewarded)> Acesso em: 02 mai. 2022.

OBRAS emergenciais do Túnel extravasador começaram em Petrópolis. Rio de Janeiro, jul. 2022. **G1 Região Serrana**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2022/07/26/obras-emergenciais-do-tunel-extravasador-comecam-em-petropolis.ghtml>> Acesso em: 03 ago. 2022.



OLIVEIRA, A.K.B. **O Sistema de Drenagem como Eixo Estruturante do Planejamento Urbano: Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Acari**. Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

OSÓRIO, Luciana. Más condições de túnel do Rio Palatinato, em Petrópolis, podem ter agravado enxurrada. Rio de Janeiro, fev. 2022. **G1 Rio**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2022/02/21/mas-condicoes-de-tunel-do-rio-palatinato-em-petropolis-podem-ter-agravado-enxurrada.ghtml>> Acesso em: 02 mai. 2022.

PALMITESSA et al. **Data assimilation in hydrodynamic models for system-wide soft sensing and sensor validation for urban drainage tunnels**. Journal of Hydroinformatics. 2021.

PARTE da rua desmorona com a chuva e Coronel Veiga tem trecho em meia pista em Petrópolis, no RJ. Rio de Janeiro, jan. 2018. **G1 Região Serrana**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/parte-da-rua-desmorona-com-a-chuva-e-coronel-veiga-tem-trecho-em-meia-pista-em-petropolis-no-rj.ghtml>> Acesso em: 06 nov. 2022.

PELECH, A. S.; PEIXOTO, M. N. DE O. Estilos fluviais da bacia hidrográfica do Rio Quitandinha (Petrópolis, RJ). **Revista Brasileira de Geografia**, v. 66, n. 2, p. 35–74, 2022.

PEREZ, Beatriz. Chuva de Petrópolis surpreende por intensidade: foram 256 mm em três horas sobre apenas um município. Rio de Janeiro, fev. 2022. **O Dia**. Disponível em: <<https://odia.ig.com.br/rio-de-janeiro/2022/02/6339869-chuva-surpreende-por-intensidade-e-localidade-foram-256-mm-em-tres-horas-sobre-apenas-um-municipio.html>> Acesso em: 27 set. 2022.

PETRÓPOLIS busca recursos para recuperação do túnel extravasor. Rio de Janeiro, ago. 2017. **Diário de Petrópolis**. Disponível em: <<https://www.diariodepetropolis.com.br/integra/petropolis-busca-recursos-para-recuperacao-do-tunel-extravasor-132432>> Acesso em: 02 mai. 2022.



PLACIDO, D.T; CUNHA, S. B. **Enchentes na bacia do rio Quitandinha (Petrópolis, RJ): 1966 a 2010**. VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia. III Encontro Latino Americano de Geomorfologia. I Encontro Íbero-Americano de Geomorfologia I Encontro Íbero-Americano do Quaternário. p. 1–17, 2008.

Plano Municipal de Redução de Risco, PMRR. 1º (revisão), 2º, 3º, 4º e 5º Distritos – Petrópolis, RJ. **Reflexão e Proposição de Estratégias de Intervenções Não Estruturais para a Redução do Risco**, p. 162, 2011.

PLAUCHEUER, Florian. A catástrofe em Petrópolis em imagens. 1 fotografia, color. Brasil, fev. 2022. **AFP. MetSul Meteorologia** Disponível em: <<https://metsul.com/a-catastrofe-em-petropolis-em-imagens/>> Acesso em: 01 set. 2022

PRADO, R.; REIS, A. **Sistemas de drenagem na fonte por poços de infiltração de águas pluviais**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande, Mato Grosso do Sul. p. 99–117, 2008.

Prefeitura Municipal de Petrópolis, 2022. Mapas e Cartografia. Núcleo Gestor de Dados Georreferenciados.

QUEDA de barreira na garagem da Pedro Ita danifica 10 ônibus. Rio de Janeiro, dez. 2016. **Acontece em Petrópolis**. Disponível em: <<https://www.aconteceempetropolis.com.br/2016/12/15/queda-de-barreira-na-garagem-da-petro-ita-danifica-10-onibus/>> Acesso em: 06 nov. 2022.

REGO, Tânia. A catástrofe em Petrópolis em imagens. 1 fotografia, color. Brasil, fev. 2022. **Agência Brasil. EBC. MetSul Meteorologia** Disponível em: <<https://metsul.com/a-catastrofe-em-petropolis-em-imagens/>> Acesso em: 01 set. 2022

REZENDE, O. M. Avaliação De Medidas De Controle De Inundações Em Um Plano De Manejo Sustentável De Águas Pluviais Aplicado À Baixada Fluminense. **Dados**, 2010.

RIBEIRO, Jaqueline. Temporal causa deslizamentos, morte, inundações, arrasta carros e deixa caos em Petrópolis. Rio de Janeiro, fev. 2022. **Diário de Petrópolis**. Disponível em: <<https://www.diariodepetropolis.com.br/integra/temporal-causa-deslizamentos->



morte-inundacoes-arrasta-carros-e-deixa-caos-em-petropolis-205053> Acesso em: 27 set. 2022.

RIGHETTO, A. M. Manejo De Águas Pluviais Urbanas. **Abes**, p. 396, 2009.

RODRIGUES, Jéssica. Em Petrópolis (RJ), comerciantes relatam prejuízos incontáveis: "A gente quer se reerguer". Rio de Janeiro, Brasil, mar. 2022. **Brasil de fato**. Disponível: <<https://www.brasildefato.com.br/2022/03/29/em-petropolis-rj-comerciantes-relatam-prejuizos-incontaveis-a-gente-quer-se-reerguer>> Acesso em: 08 set. 2022.

SANTA, F.; VISSIRINI, B.; WERNER, R. **Sistema de alerta de cheias: uma ferramenta para o desenvolvimento**. 2018.SNIS. **Informações para Drenagem e o Manejo das Águas Pluviais Urbanas Drenagem e o Manejo das Águas Pluviais Urbanas**. 2019.

Santos, L. R. L. dos, Lima, J. V. F. de, Neto, L. T., Rolemberg, R. R., & Gonzaga, G. B. M. (2018). **TELHADO VERDE: UMA PROPOSTA SUSTENTÁVEL PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL**. Caderno De— Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas - UNIT – ALAGOAS,4(2), 195. Recuperado de: <<https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/5213>>.

Seguem as obras emergenciais do túnel extravasor do Rio Palatino. Rio de Janeiro, ago. 2022. **Diário de Petrópolis**. Disponível em: <<https://www.diariodepetropolis.com.br/integra/seguem-as-obras-emergenciais-do-tunel-extravasor-do-rio-palatino-215814>> Acesso em: 02 ago. 2022.

Séries Históricas. Tabela 8.1.2.170 - População Residente Total - Série histórica. Estado do Rio de Janeiro e seus municípios - 1940 a 2010. **Fundação Ceperj**. 2009. Disponível em: <[http://arquivos.proderj.rj.gov.br/sefaz\\_ceperj\\_imagens/Arquivos\\_Ceperj/ceep/dados-estatisticos/series-historicas/excel/copos/8.1%20Demografia%20-%20Popula%C3%A7%C3%A3o%20Residente/Tab%208.1.2.170.html](http://arquivos.proderj.rj.gov.br/sefaz_ceperj_imagens/Arquivos_Ceperj/ceep/dados-estatisticos/series-historicas/excel/copos/8.1%20Demografia%20-%20Popula%C3%A7%C3%A3o%20Residente/Tab%208.1.2.170.html)> Acesso em: 02 nov. 2022.



SILVA et al. **Caracterização Geológica – Geotécnica numa Encosta em Camaragibe, Pernambuco**. IV COBRAE. Anais. Salvador, BA, 2005.

SILVA et al. **Estudo de um movimento de massa ocorrida numa encosta em Camaragibe, Pernambuco**. V COBRAE, Anais. São Paulo, SP, 2009.

SILVA, L. H. A. MELLO, E. V.; BARBOSA, D. R. **Risco ambiental de enchentes nos rios formadores da bacia do rio Piabanha (Região Serrana Fluminense)**. Anuário do Instituto de Geociências. UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, R.R. **Proposta para estabilização de uma encosta ocupada em Camaragibe – PE com a consideração de um tratamento global**. Dissertação (Mestrado). UFP/CTG, Recife, fev. 2010.

SOARES, Fernanda. Rio Quitandinha transborda e fecha a Rua Coronel Veiga em Petrópolis, RJ. Rio de Janeiro, nov. 2013. **G1 Região Serrana**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2013/11/rio-quitandinha-transborda-e-fecha-rua-coronel-veiga-em-petropolis-rj.html>> Acesso em: 06 nov. 2022.

SOUSA, M.M. . **Avaliação comparativa de metodologias de modelagem hidráulica 2D e seu impacto na interpretação e avaliação de ondas de cheias**. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

Temporal deixa ruas alagadas e trânsito caótico em Petrópolis, no RJ. Rio de Janeiro, nov. 2015. **G1 Região Serrana**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2015/11/temporal-deixa-ruas-alagadas-e-transito-caotico-em-petropolis-no-rj.html>> Acesso em: 06 nov. 2022.

TOMINAGA, E. **Bacias de retenção**. FCTH. Projeto Técnico: Reservatórios de Detenção. ABC-P - Associação Brasileira de Cimento Portland, p. 1–13, 201

TOMINAGA, E. N. S. Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte. **Dissertação –(Mestrado) - Universidade de São Paulo, Escola Politécnica**, p. 128, 2013.

TUCCI, C. E. M. Água No Meio Urbano. **Livro água doce**, p. 1–40, 1997.

TUCCI, C. E. M. Águas Urbanas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 97–112, 2008.

TUCCI, C. E. M. Gestão de águas pluviais urbanas - **Saneamento Para Todos**. v. 4, p. 270, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. p. 15, 2007.

TUCCI, C. E. M., BERTONI, J.C. **Inundações Urbanas na América do Sul**, 1ª edição, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, ISBN 85-88686-07-4, Porto Alegre, RS, Brasil.

TUCCI, C. Gerenciamento da Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 5–27, 2002.

VIANA, L. P.; JÚNIOR, J. E. F. DE F.; OLIVEIRA, C. L. DE. Sistema de Alerta de Cheias do Estado do Rio de Janeiro. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, n. January, p. 18, 2009.

WMO. World Meteorological Organization. **Guide to Hydrological Practices. Volume II – Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices**. n. 168, 2009.

WU et al. **Deep Tunnel for Regulating Combined Sewer Overflow Pollution and Flood Disaster: A Case Study in Guangzhou City, China**. MDPI journal. *Water*, 8, 3. June, p. 14, 2016.