

Dimensionamento hidráulico de um sistema de microdrenagem com suporte de modelagem matemática *quasi-2D* aplicada à simulação de eventos hidrológicos

Luana Silva Gomes¹, Luiz Eduardo Siqueira Saraiva², Maria Eduarda Piumbini dos Santos³ & Osvaldo Moura Rezende⁴

Resumo: A cidade do Rio de Janeiro cresceu ocupando áreas naturalmente alagáveis, como baixadas e margens de rios, reduzindo a capacidade natural de drenagem da água. Adicionalmente, os sistemas de drenagem existentes foram projetados, em muitos casos, décadas atrás, associados ao aumento expressivo da impermeabilização do solo e utilizando métodos simplificados de dimensionamento. Este estudo apresenta o dimensionamento de uma rede de drenagem convencional, apoiado em ferramenta de modelagem computacional para simulação hidrodinâmica, com a utilização do software de modelagem hidrológico-hidrodinâmica MODCEL. O estudo de caso foi desenvolvido em uma área de microbacia urbana localizada no bairro de Campo Grande, caracterizada como região crítica de planície costeira suscetível a alagamentos e inundações. Os resultados do dimensionamento mostraram-se coerentes com o comportamento esperado, considerando as condições de contorno adotadas, evidenciando a importância do correto dimensionamento e da implementação de sistemas de drenagem eficientes, de modo a garantir maior funcionalidade e resiliência frente aos impactos da urbanização.

Abstract: The city of Rio de Janeiro has expanded into areas that are naturally prone to flooding, such as lowlands and riverbanks, which reduces the natural capacity for water drainage, and in addition many of the existing drainage systems were designed decades ago, alongside a significant increase in soil impermeabilization and based on simplified design methods; this study presents the design of a conventional drainage network supported by a computational modeling tool for hydrodynamic simulation using the hydrological-hydrodynamic modeling software MODCEL, and the case study was carried out in an urban micro-watershed located in the Campo Grande neighborhood, characterized as a critical coastal plain region susceptible to flooding and inundation, with the design results proving to be consistent with the expected behavior considering the adopted boundary conditions and highlighting the importance of proper design and the implementation of efficient drainage systems in order to ensure greater functionality and resilience in the face of the impacts of urbanization.

Palavras-Chave: rede de drenagem, MODCEL, dimensionamento hidráulico.

Keywords: drainage network, MODCEL, hydraulic design.

INTRODUÇÃO

As inundações urbanas têm se intensificado nas últimas décadas, refletindo não apenas o aumento da urbanização e da impermeabilização do solo, mas também limitações associadas ao dimensionamento dos sistemas de micro e macrodrenagem, à operação daqueles existentes e à deficiência no controle do uso e ocupação do solo. De acordo com Butler & Davies (2005), eventos de inundação urbana geram impactos significativos nas cidades, afetando a população, a infraestrutura e o funcionamento dos sistemas urbanos. No contexto do Rio de Janeiro, a ocupação

1) Escola Politécnica – POLI/UFRJ. luanagomes1484@poli.ufrj.br

2) Escola Politécnica – POLI/UFRJ. lessaraiva@poli.ufrj.br

3) Escola Politécnica – POLI/UFRJ. duda.piumbini@poli.ufrj.br

4) Escola Politécnica – POLI/UFRJ; PEA/POLI-UFRJ. omrezende@poli.ufrj.br

de áreas naturalmente suscetíveis agrava esse cenário, potencializando os efeitos das cheias e evidenciando a vulnerabilidade urbana frente a eventos hidrológicos mais intensos.

Nesse contexto, o dimensionamento hidráulico dos sistemas de drenagem assume papel central na mitigação dos impactos associados às inundações urbanas. Quando adequadamente realizado, permite a estimativa consistente das vazões de projeto, o dimensionamento correto das estruturas e a verificação do desempenho do sistema sob diferentes condições hidrológicas, o que atualmente é essencial diante das consequências advindas das mudanças climáticas. A utilização de ferramentas de modelagem hidrológica e hidrodinâmica possibilita a simulação de cenários distintos, a identificação de pontos críticos e a proposição de soluções mais eficientes e compatíveis com as condições reais de operação.

Para a realização do estudo, foi utilizada uma ferramenta de modelagem matemática quasi-2D em multicamadas, o Modelo de Células de Escoamento para Cheias Urbanas – MODCEL (Miguez, 2001), empregado na simulação do escoamento superficial resultante de uma chuva intensa sobre um microbacia urbana, permitindo analisar a propagação das cheias, a distribuição das lâminas d'água e a identificação de pontos críticos no sistema. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo apresentar o processo de dimensionamento de uma rede de drenagem urbana com uso de modelagem hidrológico-hidrodinâmica e analisar o comportamento do sistema sob diferentes condições hidrológicas, evidenciando as informações que um dimensionamento adequado pode fornecer para a mitigação de inundações. O estudo é aplicado a uma microbacia urbana situada na bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu, na Zona Oeste do município do Rio de Janeiro, destacando a importância da integração entre modelagem hidrológico-hidrodinâmica e o dimensionamento hidráulico para o desenvolvimento de soluções mais eficientes.

MÉTODOS

Estudo de Caso

A área de estudo possui aproximadamente 0,5 km² e corresponde a uma microbacia do rio Piraquê-Cabuçu, situada na margem do rio da Prata do Cabuçu, no bairro de Campo Grande, Zona Oeste do município do Rio de Janeiro, conforme apresenta a Figura 1. A região caracteriza-se por predomínio de áreas urbanas e é delimitada por afloramentos rochosos. Ademais, observa-se a presença de depressões internas, que contribuem para a suscetibilidade ao acúmulo de águas pluviais.

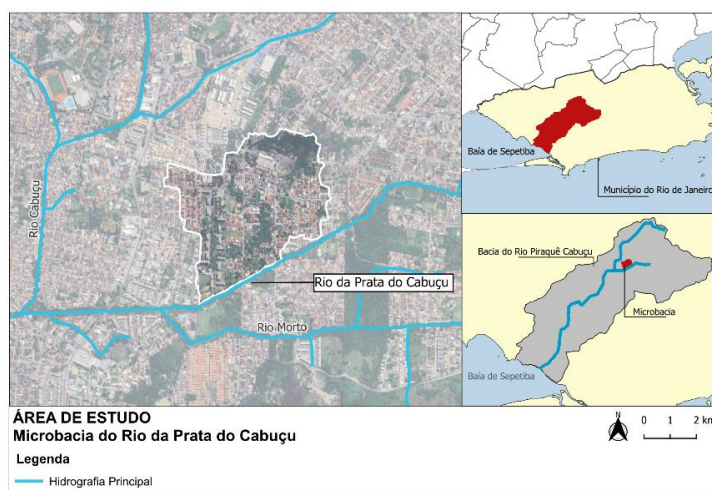


Figura 1 – Área de estudo.

Modelagem Hidrológico-Hidrodinâmica

O presente estudo utiliza como ponto de partida o modelo proposto por Barreto (2022). O Modelo de Células de Escoamento para Cheias Urbanas - MODCEL (MIGUEZ et al., 2017) consiste em uma abordagem *quasi-2D* (Cunge et al., 1980), na qual o território é representado por um conjunto de células homogêneas interconectadas por equações hidráulicas. Essa estrutura permite a simulação integrada do escoamento superficial e do comportamento hidráulico da rede de drenagem.

No modelo, as células são definidas conforme a função hidráulica e a ocupação do espaço, incluindo células representativas de poços de visita (PVs), galerias, ruas e áreas de planície. As células associadas aos PVs constituem os nós da rede de microdrenagem, sendo interligadas entre si por conexões que representam o escoamento nas galerias. As áreas superficiais, como ruas e planícies, são modeladas por células específicas, permitindo a simulação do escoamento superficial e sua interação com o sistema subterrâneo. A divisão de células da área de estudo foi feita a partir da topografia do terreno da microbacia e da ocupação do solo, respeitando o desenho urbano, de forma a considerar o caminho preferencial de escoamento da água para o poço de visita mais próximo. A comunicação entre as células é realizada por meio de ligações hidráulicas, definidas conforme as características físicas do escoamento e da infraestrutura existente. No presente estudo, destacam-se: (i) ligações do tipo G2, utilizadas para representar as galerias circulares que conectam os PVs, possibilitando a definição de diâmetro, declividade e cotas de fundo – calculam as vazões para as situações de escoamento com superfície livre e sob pressão; (ii) ligações do tipo M2, responsáveis pela conexão entre o escoamento superficial (células de rua) e a rede de microdrenagem, simulando o funcionamento das bocas de lobo – calculam as vazões que entram na rede de microdrenagem com uso das equações de vertedor e de orifício; (iii) ligações do tipo P, que representam o escoamento superficial entre células adjacentes sem obstruções significativas, como ocorre em áreas de planície – utilizam a equação de Saint Venant sem os termos de inércia; e (iv) ligações tipo vertedor, utilizada quando a água de uma célula tem que atingir certa cota para se comunicar com outra célula – utiliza a equação clássica do vertedor.

A discretização da microbacia foi realizada no *software* QGIS, permitindo a delimitação espacial das células e a atribuição de parâmetros hidrológicos e hidráulicos, como coeficientes de escoamento, cotas do terreno e níveis de vertimento. Os coeficientes de escoamento superficial foram definidos em função do uso e ocupação do solo, com base em referências técnicas (RIO-ÁGUAS, 2019), adotando-se valores entre 0,40 e 0,75 para áreas residenciais, conforme o grau de ocupação. Para células de ruas, considerou-se coeficiente de 0,95, representativo de superfícies asfaltadas, enquanto áreas naturais ou sem melhoramento receberam valores entre 0,20 e 0,30, compatíveis com maior capacidade de infiltração. O coeficiente de Manning utilizado para as células de galeria foi de 0,013. As simulações consideraram um tempo de retorno de 10 anos, padrão para projetos de microdrenagem (Ministério das Cidades, 2022).

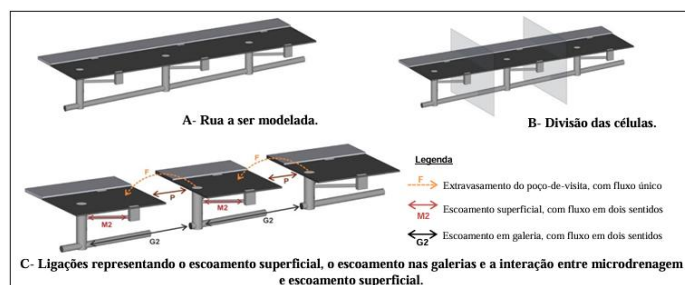


Figura 2: Representação de uma galeria e do escoamento em duas camadas. (Silva et al., 2017).

Ajustes no Modelo

Foram realizadas adequações nas ligações associadas às células de lotes, com o intuito de aprimorar a representação do comportamento hidráulico do sistema. Estas células passaram a se conectar às vias por meio de vertedores (tipo V) e ao sistema de microdrenagem por intermédio de ligações do tipo M2, direcionadas ao poço de visita de montante. Tal configuração prioriza o encaminhamento do escoamento para a rede subterrânea pela adoção de uma cota do vertedor elevada em 10 cm acima da cota do lote, com o objetivo de restringir o escoamento direto para a via e favorecer a condução pelas galerias. Essa configuração visa representar um sistema tradicional de drenagem urbana, no qual os lotes são conectados diretamente à rede pública de drenagem pluvial. Também foram realizados ajustes pontuais na delimitação de algumas células, visando maior coerência espacial e hidráulica do modelo.

Cenários de Simulação

Para o Cenário 1, considerou-se um evento de precipitação com duração total de 130 minutos, tempo de concentração da microbacia urbana, discretizado em intervalos de 5 minutos. A precipitação de projeto foi definida a partir da equação IDF da região, considerando um Tempo de Recorrência de 10 anos, sendo a distribuição temporal da chuva realizada pelo método dos blocos alternados. A simulação hidrodinâmica foi conduzida sem considerar a influência do escoamento fluvial. Essa configuração visa representar as condições previstas em um dimensionamento tradicional de rede de drenagem, uma vez que a utilização de planilhas eletrônicas com a fórmula de Manning não são capazes de avaliar efeitos de jusante sobre os escoamentos.

Já para o Cenário 2, por sua vez, adotou-se um evento de precipitação com duração total de 480 minutos, compatível com o tempo de concentração da bacia do rio, inicialmente discretizado em intervalos de 15 minutos, com posterior refinamento para 5 minutos na simulação hidrodinâmica. Esse cenário considera uma chuva crítica associada a bacias com maior tempo de resposta. Além disso, incorpora a influência do escoamento fluvial, contemplando a interação entre o curso d'água e a rede de drenagem urbana. Para isso, é introduzida uma condição de contorno na célula de rio mais de montante, representando o hidrograma de cheia da bacia do rio da Prata do Cabuçu resultante da chuva de projeto utilizada neste cenário, com vazão de pico de 41,90 m³/s. A condição de contorno de jusante no trecho de rio é imposta como escoamento crítico.

Dimensionamento Hidráulico

Os ajustes necessários para o dimensionamento da rede de microdrenagem foram realizados por meio de planilhas eletrônicas, com base na análise de resultados fornecidos pelo modelo, que retorna valores de nível d'água em cada célula e vazões entre pares de células, a cada passo de tempo adotado na simulação (5 minutos, neste caso). Dessa forma, a cada intervalo, é possível acompanhar o comportamento dos escoamentos ao longo do sistema. As planilhas foram estruturadas em colunas contendo variáveis como cota do terreno, cota de fundo dos poços de visita, diâmetro dos trechos, nível d'água e vazão, entre outras, permitindo a análise detalhada e o suporte às decisões de dimensionamento. Foram adotados os critérios estabelecidos pela RIO-ÁGUAS (2019), incluindo: diâmetro mínimo de 0,40 m; velocidade mínima de 0,75 m/s; recobrimento mínimo de $(0,40 \text{ m} + D/2)$; relação máxima de enchimento de $y/D < 0,85$; e espaçamento máximo entre poços de visita de 40 m.

A rede de drenagem foi subdividida em três sistemas independentes, cada qual com exutório definido no rio da Prata do Cabuçu, conforme ilustrado na Figura 3B.

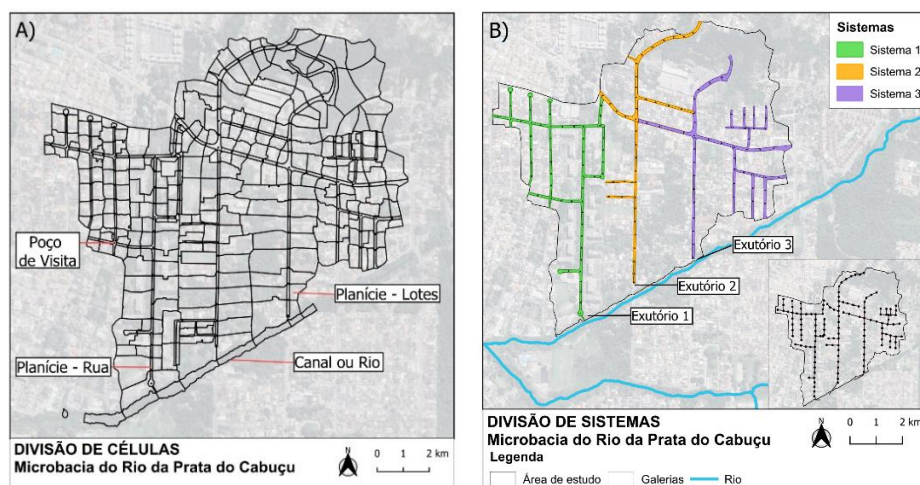


Figura 3 – Divisão de células e dos sistemas da rede de microdrenagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações do Cenário 1 apresentaram, de modo geral, resultados satisfatórios, indicando que o sistema opera dentro da sua capacidade hidráulica para o tempo de recorrência de 10 anos, mantendo o escoamento em superfície livre e sem ocorrência de afogamento. Observa-se que, o enchimento máximo das galerias apresentado na Figura 4B, mostra que toda a rede opera abaixo de 85% da capacidade, com predominância de trechos na faixa entre 25% e 85%. Esse comportamento indica que o sistema possui capacidade hidráulica suficiente, sem ocorrência de regime pressurizado ou extravasamentos, atendendo adequadamente às condições de projeto, considerando a chuva com tempo de recorrência de 10 anos e duração compatível com o tempo de concentração do sistema.

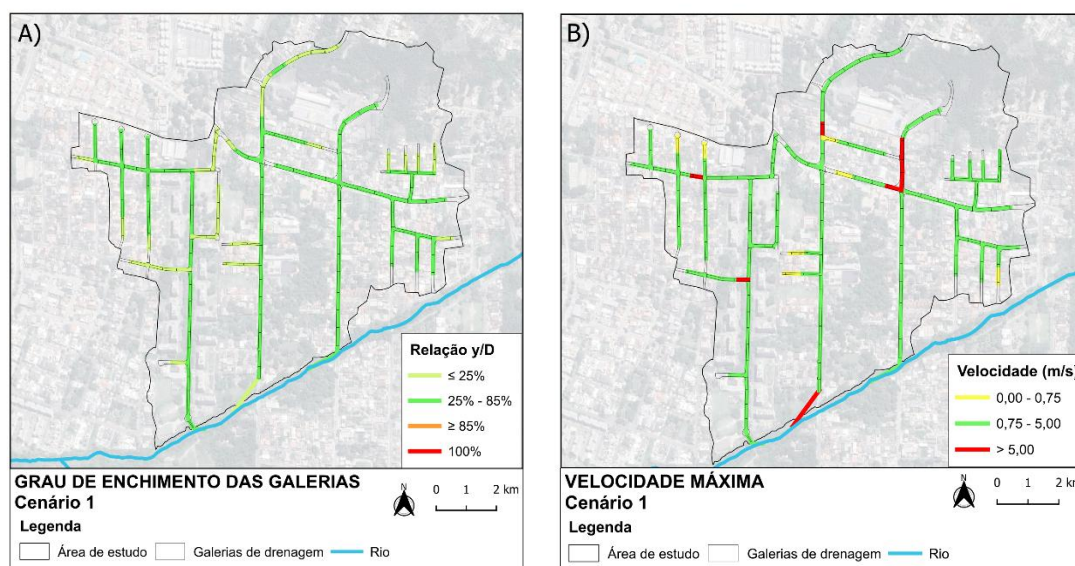


Figura 4: Enchimento e velocidade das galerias – Cenário 1

Em relação às velocidades máximas, observa-se que a maior parte da rede apresenta valores entre 0,75 m/s e 5,0 m/s, faixa adequada para o funcionamento hidráulico, favorecendo o transporte dos escoamentos e reduzindo a possibilidade de deposição de sedimentos. Trechos pontuais com velocidades superiores a 5,0 m/s são identificados, principalmente ao longo da rede principal,

associados possivelmente à maior declividade e concentração de vazões. A velocidade máxima encontrada foi de 6,13 m/s.

Destaca-se, especificamente na rede principal do Sistema 2, que a cota de fundo do PV de saída é significativamente superior à cota do leito do rio, configurando uma condição de descarga livre. Nessa situação, o nível d'água do corpo receptor não interfere no escoamento da galeria, não havendo efeito de remanso mesmo para o Cenário 2. Essa condição favorece o escoamento e contribui para o aumento das velocidades observadas nesse trecho, caracterizando um cenário hidráulicamente eficiente para a microdrenagem.

Os perfis longitudinais (Figura 5) confirmam que o nível d'água permanece abaixo da cota superior das galerias, sem sobrecarga hidráulica, com trechos de maior declividade favorecendo o aumento das velocidades.

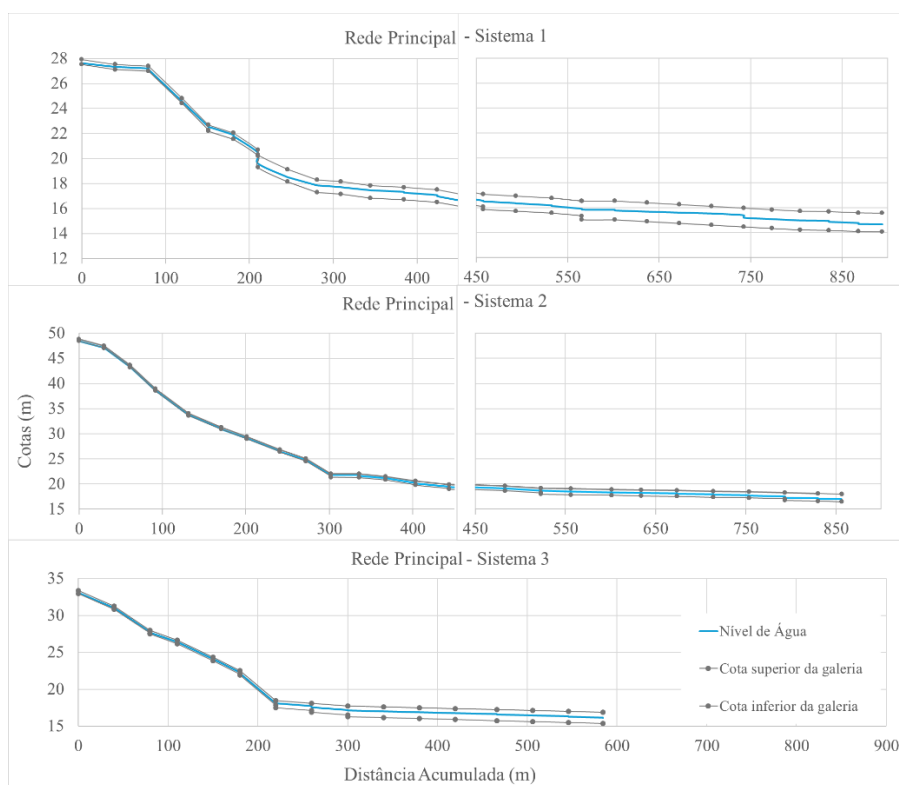


Figura 5: Perfil longitudinal de cada sistema - Cenário 1

No Cenário 2, a inclusão da influência do escoamento fluvial torna a análise mais realista, uma vez que simula o efeito do nível do rio interferindo diretamente na rede de drenagem. Embora a maior parte da rede opere de forma adequada, há pontos críticos (em vermelho) diretamente influenciados pela interação com o curso d'água, como pode-se observar na Figura 6.

O mapa de enchimento máximo (y/D) confirma esse comportamento: predominam trechos com ocupação entre 25% e 85%, mas há segmentos pontuais atingindo 100% concentrados próximos à descarga no rio. Já o mapa de velocidade mostra que a maior parte da rede opera em faixas adequadas (0,75 a 5,0 m/s), com poucos trechos apresentando velocidades elevadas. Esses pontos coincidem com regiões mais carregadas, possivelmente associada a declividades maiores concentrações de vazão.

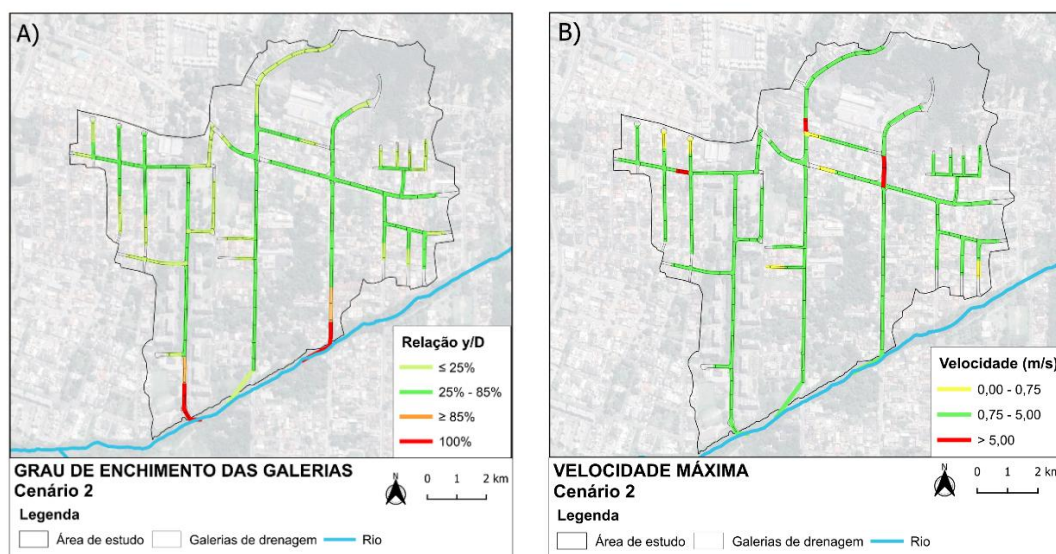


Figura 6: Enchimento e velocidade das galerias - Cenário 2

Os perfis longitudinais (Figura 7) mostram que o nível d'água se mantém próximo, mas geralmente abaixo da geratriz superior, indicando operação dentro da capacidade na maior parte dos trechos. No entanto, nos trechos finais – especialmente próximos ao exutório – observa-se uma redução da folga hidráulica, sugerindo efeito de remanso.

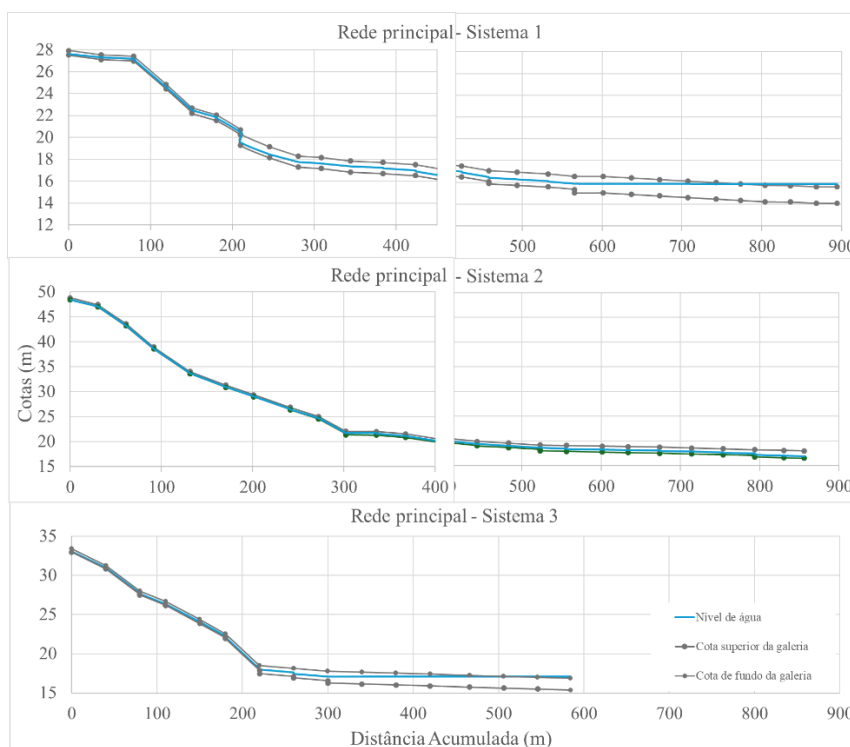


Figura 7: Perfil longitudinal de cada sistema - Cenário 2

Mesmo com desempenho global adequado, a rede está sujeita a interferências da dinâmica fluvial, o que demanda ajustes pontuais e a adoção de medidas complementares. O uso do modelo hidrodinâmico mostrou-se essencial para captar essas interações, ao representar a influência do nível

do rio receptor ao longo do sistema. Em contraste, métodos tradicionais baseados na equação de Manning não consideram tais efeitos, podendo levar ao subdimensionamento das galerias. Ainda assim, a metodologia empregada demonstra-se uma ferramenta robusta e promissora para a análise hidrodinâmica de sistemas urbanos de drenagem, por possibilitar uma abordagem integrada dos processos envolvidos, em consonância com o que aponta (REZENDE, 2018), ao destacar que as inundações urbanas devem ser compreendidas a partir da interação entre os diversos elementos da bacia hidrográfica, e não apenas como resposta isolada à precipitação

CONCLUSÃO

O dimensionamento da rede de drenagem apresentado, aliado à modelagem matemática e à avaliação sob diferentes condições hidrológicas, mostra-se relevante diante das crescentes mudanças climáticas. A análise em diferentes cenários permitiu compreender a resposta do sistema, evidenciando seu bom desempenho nas condições de projeto usuais, mas também sua sensibilidade frente a eventos mais críticos, especialmente sob influência do escoamento fluvial.

Os resultados reforçam a importância de abordagens que considerem a dinâmica integrada da bacia, indo além do dimensionamento convencional. Ainda que passível de aprimoramentos, o estudo já representa um avanço na busca por soluções mais eficientes, contribuindo para a redução da recorrência de alagamentos e dos riscos à população, sobretudo em áreas urbanas vulneráveis.

Como etapa futura do estudo, destaca-se a incorporação de tipologias como as Soluções baseadas na Natureza (SbN), de forma a ampliar a capacidade de resposta e a resiliência do sistema frente a cenários futuros mais extremos, atuando como estratégia para redução de picos de vazão e mitigação dos efeitos de sobrecarga observados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Cátedra UNESCO de Drenagem Urbana em Regiões de Baixada Costeira, sediada na UFRJ, à qual esta pesquisa está vinculada. Este trabalho foi financiado pela FAPERJ, por meio da concessão de bolsa de pesquisa, à qual os autores expressam seus agradecimentos.

REFERÊNCIAS

- Barreto, W. (2022). "DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE MICRODRENAGEM NA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU E AVALIAÇÃO DA SUA PERFORMANCE, ADOTANDO UMA ABORDAGEM DE INFRAESTRUTURA VERDE E AZUL, COM APOIO DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA" [Trabalho de Conclusão de Curso].
- Butler, D., & Davies, J. W. (2005). Urban Drainage (2o ed.).
- Cunge, J. A., Holly, F. M., & Verwey, A. (1980). "Practical Aspects of Computational River Hydraulics." Pitman Publishing.
- Miguez, M. G. (2001). "Modelo matemático de células de escoamento para simulação de inundações em áreas urbanas" [Doctoral Thesis].
- MIGUEZ, M. G., VERÓL, A. P., & REZENDE, O. M. (2017). "Modelagem Hidrodinâmica de Sistemas de Drenagem Urbana com o Modelo MODCEL." COPPE/UFRJ.
- Ministério das Cidades. (2022). "Diagnóstico Temático: Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas – Visão Geral." SNIS.
- REZENDE, O. M. (2018). "Análise quantitativa da resiliência a inundações para o planejamento urbano: Estudo de caso na bacia do Canal do Mangue (RJ)." [Tese (Doutorado em Engenharia Civil)].
- RIO-ÁGUAS. (2019). "Manual de drenagem urbana do município do Rio de Janeiro". Rio de Janeiro. Fundação Rio-Águas.
- Silva, B. M. G. da, Souza, M. M. de, & Osvaldo Moura Resende. (2017). "USO DO MODELO MULTICAMADAS PARA AVALIAÇÃO DE CHEIAS URBANAS".