

Dinâmica Hidrológica e Limitações Hidráulicas em Bacia Urbana Costeira:

Estudo da Vala do Cesarão, Zona Oeste do Rio de Janeiro

Antônio de Aquino Luz Ribeiro¹, Antonio Krishnamurti de Oliveira² & Monique de Faria Marins³

Resumo: O presente trabalho analisou o comportamento hidrológico e hidráulico da bacia da Vala do Cesarão, localizada na Zona Oeste do Rio de Janeiro, caracterizada por elevada urbanização e recorrentes problemas de inundação e alagamento. O estudo envolveu a caracterização física da bacia, com delimitação em AutoCAD, e a análise do uso e ocupação do solo em ambiente SIG (QGIS), utilizando dados do INEA. A vazão de projeto para tempo de recorrência de 25 anos foi estimada pelo Método Racional, com apoio do software HIDRO-FLU, incorporando parâmetros como coeficiente de runoff ponderado, intensidade de chuva obtida por equação IDF e tempo de concentração. A bacia apresenta elevado coeficiente de escoamento ($C = 0,62$), o que intensifica picos de cheia e reduz a infiltração, resultando no valor de vazão de $36,49 \text{ m}^3/\text{s}$. Adicionalmente, avaliou-se o efeito de remanso gerado por um cenário de alagamento a jusante (nível fixado em 2,80 m a partir de cheias históricas), utilizando o *Direct Step Method*. Verificou-se que a alteração do perfil da linha d'água se dissipa aproximadamente 2,1 km antes de atingir a bacia da Vala do Cesarão, indicando que o represamento no exutório não constitui o principal fator associado às inundações e alagamentos observados, mas sim a própria capacidade hidráulica da calha, que exige profundidade superior à disponível para escoar a vazão de projeto. Diante do alto risco de inundações na região, recomendam-se intervenções estruturais preventivas, como o aprofundamento e alargamento da seção do canal, além de dragagem regular.

Abstract: The present study analyzed the hydrological and hydraulic behavior of the Vala do Cesarão basin, located in the West Zone of Rio de Janeiro, which is characterized by high urbanization and recurrent flooding issues. The study involved the physical characterization of the basin, delineated using AutoCAD, and the analysis of land use and land cover in a GIS environment (QGIS) using data from INEA. The design flow for a 25-year Return Period was estimated using the Rational Method with the support of the HIDRO-FLU software, incorporating parameters such as the weighted runoff coefficient, rainfall intensity obtained from an IDF equation, and time of concentration. The basin presents a high runoff coefficient ($C = 0.62$), which intensifies flood peaks and reduces infiltration, resulting in a design flow of $36.49 \text{ m}^3/\text{s}$. Additionally, the backwater effect generated by a downstream flooding scenario (water level fixed at 2.80 m based on historical floods) was evaluated using the Direct Step Method. It was verified that the alteration in the water surface profile dissipates approximately 2.1 km before reaching the Vala do Cesarão basin, indicating that the backwater effect at the outfall is not the main factor associated with the observed flooding. Instead, the primary limitation is the hydraulic capacity of the channel itself, which requires a depth greater than the available one to convey the design flow. Given the high risk of flooding in the region, preventive structural interventions are recommended, such as deepening and widening the channel cross-section, in addition to regular dredging.

Palavras-Chave: Hidrologia urbana; Capacidade hidráulica; Inundações; Curva de remanso.

Keywords: Urban hydrology; Hydraulic capacity; Flooding; Backwater curve.

¹) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - PUC-Rio, antoniodeaquino402@gmail.com

²) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - PUC-Rio, krishnamurti@puc-rio.br

³) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - PUC-Rio, mfmarrins@gmail.com

1) INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica da Vala do Cesarão, localizada no bairro Santa Cruz, na Zona Oeste do Rio de Janeiro e com deságue final na Baía de Sepetiba, caracteriza-se por ser uma planície de baixada com elevado grau de ocupação urbana. Essa configuração, somada a outros fatores como o assoreamento do canal e o elevado grau de impermeabilização do terreno, torna a região historicamente vulnerável a inundações e alagamentos frente a eventos de chuvas intensas.

Neste contexto, este artigo tem como foco principal avaliar comportamentos hidrológicos e hidráulicos da bacia. Para isso, foram utilizados conceitos capazes de estimar valores como a vazão do rio para um tempo de recorrência (TR) de 25 anos e analisar a sua capacidade de suporte a partir de condições impostas pelo ambiente, como o represamento causado pela elevação do nível d'água a jusante durante eventos de cheia. Para ilustrar a região analisada ao longo do trabalho, a **Figura 1** exibe a dinâmica do escoamento da Vala do Cesarão até a baía de Sepetiba.



Figura 1 - Deságue bacia Vala do Cesarão

2) MÉTODOS

2.1) Caracterização Física

Para a obtenção dos parâmetros físicos da bacia da Vala do Cesarão, a partir das curvas de nível da região e da sua hidrografia, foi feita a delimitação da bacia no *software* AutoCAD. Foram estimados os seguintes parâmetros: Comprimento e declividade do curso d'água principal; Área e perímetro da bacia; Comprimento total dos cursos d'água; e Densidade de drenagem.

Para a determinação da declividade, se trabalhou com uma declividade média, utilizando o método da Declividade Ponderada. Sendo assim, se dividiu o perfil longitudinal do rio em 4 áreas, calculando então suas medidas a partir da cota mínima. Com os seus valores somados se consegue obter um valor de declividade média a partir da seguinte fórmula:

$$S_0 = \frac{2 \cdot A_p}{L^2}$$

Onde S_0 = declividade (m/m), A_p = área entre o perfil longitudinal do curso d'água e a linha de referência horizontal do gráfico (m²) e L = comprimento horizontal do curso d'água (m).

2.2) Obtenção da vazão

Para a estimativa da vazão máxima de projeto, foi selecionado o Método Racional, cuja fórmula é expressa por:

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (2)$$

Onde Q = vazão (m^3/s), C = Coeficiente de *Run Off*, i = valor da intensidade de precipitação (mm/h); e A = área da bacia (km^2). A escolha deste método é justificada por sua ampla aceitação e adequação para bacias hidrográficas de pequeno porte. Em que para valores de áreas até $4 km^2$ se recomenda o uso do Método Racional e para valores entre 4 e $10 km^2$, o Racional Modificado (DNIT, 2006).

2.2.1) Uso e Ocupação do Solo

Para a modelagem chuva-vazão, caracterizou-se o uso e ocupação do solo da bacia da Vala do Cesarão, pois a permeabilidade e a rugosidade da superfície influenciam diretamente a capacidade de infiltração e a velocidade do escoamento superficial. A análise espacial foi desenvolvida no software QGIS, utilizando o 'Mapeamento de Uso e Cobertura do Solo 2018' (escala 1:100.000) disponibilizado pelo INEA. O procedimento consistiu no recorte da camada vetorial pelos limites da bacia, seguido do cálculo das áreas para quantificar as diferentes classes de uso do solo.

2.2.2) Tempo de Concentração

A determinação do tempo de concentração (t_c) foi realizada através do Método de George Ribeiro, selecionado por sua adequação ao cálculo do escoamento superficial em áreas urbanas. Sua fórmula se encontra abaixo:

$$t_c = \frac{16 \cdot L}{(1,05 - 0,2 \cdot p)(100S)^{0,04}} \quad (3)$$

Onde: t_c = tempo de concentração (minutos); L = comprimento dos cursos de água da bacia (km); p = porcentagem de cobertura vegetada (decimal) e S = declividade (m/m).

Para a obtenção do percentual de cobertura vegetal, foi inserida a imagem satélite da bacia no software AutoCAD e calculada as regiões com vegetação, conseguindo assim o valor de área total dessas regiões.

2.2.3) Coeficiente de Runoff

Considerando a heterogeneidade do uso do solo na bacia da Vala do Cesarão, não é adequado utilizar um valor único de C . Portanto, optou-se pelo cálculo do Coeficiente de Runoff Médio Ponderado. Sua estimativa se deu a partir dos grupos de uso e cobertura do solo, obtidos conforme metodologia descrita no item 2.2.1.

2.2.4) Intensidade de Chuva

A seleção do posto de referência foi realizada no QGIS, utilizando a base de dados vetoriais (*shapefile*) das estações da Fundação Rio-Águas. Após importar esses postos, localizou-se o Posto Pluviométrico de Santa Cruz como o mais próximo da bacia (cerca de 600 metros do exutório). Devido a essa proximidade geográfica e à similaridade climática da região da Zona Oeste, este posto foi adotado como referência para os cálculos. Os parâmetros da equação IDF (a, b, c, d) foram obtidos a partir do "Relatório Síntese do Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais (PDMAP)" da Prefeitura do Rio de Janeiro (2011). A equação geral utilizada é do tipo:

$$i = \frac{K \cdot TR^a}{(t + b)^c} = \frac{711,3 \cdot TR^{0,18}}{(t + 7,0)^{0,687}} \quad (4)$$

Onde i = intensidade de chuva (mm/h); TR = tempo de recorrência (anos); t = duração da chuva (min).

2.2.5) Cálculo Vazão

Para a transformação da chuva de projeto em vazão e a consequente geração dos hidrogramas de cheia para TR de 25 anos, foi adotado o Método Racional, conforme mencionado anteriormente, com auxílio do software HIDRO-FLU. Tal ferramenta computacional auxilia na automatização dos cálculos hidrológicos, permitindo a integração dos parâmetros fisiográficos da bacia com os dados pluviométricos.

2.3) Curva de Remanso

Para se obter uma visão mais realista em cenários de chuvas extremas e enchentes, deve-se considerar as restrições hidráulicas do sistema. Como a Vala do Cesarão é considerada um corpo hídrico com diversos “pontos críticos” (Rio de Janeiro, 2019), se analisará a existência da curva sob a condição de um cenário de enchente a jusante, ocasionando um possível obstáculo para o fluxo hidráulico do rio.

2.3.1) Extensão da Curva

O objetivo desta análise é utilizar o Método de Integração por Passos Diretos (*Direct Step Method*) para estimar a extensão e o perfil da curva de remanso. Com isso, busca-se quantificar até que ponto o efeito de represamento (causado por um estrangulamento no sistema de drenagem ou elevação do nível d'água a jusante durante um evento de cheia) se propaga ao longo do curso d'água, oferecendo um melhor entendimento da dinâmica hidráulica da Vala do Cesarão. Esse método é um procedimento iterativo para o cálculo do perfil da linha d'água em um escoamento gradualmente variado. O método baseia-se no rearranjo da Equação de Bernoulli, trabalhando com a variação da cota topográfica em função da declividade de fundo (S_0) e a perda de energia em função da declividade da linha de energia (S_f). Para isso, assume-se a premissa de que a perda de carga em um trecho curto é igual àquela obtida em um escoamento uniforme, o que torna a Equação de Manning possível para encontrar o valor de S_f .

O cálculo se inicia em uma seção de controle onde a profundidade da água é conhecida, neste caso, o exutório do sistema. A partir deste ponto, o processo segue os seguintes passos:

- 1) Arbitra-se um novo valor para a profundidade (y_2) em uma seção adjacente, a montante.
- 2) Calculam-se as energias específicas (E) de ambas as seções:

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Onde: E = energia específica (m); y = profundidade (m); v = velocidade (m/s); g = aceleração da gravidade (m/s^2)

3) A perda de carga por atrito (hf) ao longo do trecho é estimada através da declividade da linha de energia (S_f), calculada pela Equação de Manning utilizando as características hidráulicas médias (velocidade e raio hidráulico) entre as duas seções:

$$hf = S_f \cdot \Delta x \quad ; \quad S_f = \frac{n^2 \cdot v^2}{R_h^{4/3}} \quad (6)$$

Onde: hf = perda de carga (m); S_f = declividade da linha de energia (m/m); Δx = distância entre duas seções (m); n = Coeficiente de Manning; R_h = Raio Hidráulico do canal (m) = A / P ; A = área molhada (m^2) = $b \cdot y_n$; y_n = profundidade normal (m); P = Perímetro molhado (m) = $2 \cdot y_n + \text{base do canal}$.

4) Calcula-se a distância Δx entre essas duas seções:

$$\Delta x = \frac{\Delta E}{S_0 - S_f} \quad (7)$$

Onde: Δx = distância entre seções (m); ΔE = diferença de energia específica entre as seções (m); S_0 = declividade do canal (m/m); e S_f = declividade média da linha de energia (m/m).

Para início, deve-se achar a profundidade normal (y_n) e a crítica (y_c). A primeira seria a altura de equilíbrio que o rio teria para uma determinada vazão, declividade e rugosidade, se não houvesse nenhuma perturbação. Ela depende da vazão, da geometria do canal, da rugosidade e da declividade de fundo. Já a segunda é a profundidade na qual a energia específica do escoamento é mínima para uma dada vazão, representando a transição entre o regime onde a água escorre de uma maneira mais lenta e profunda (subcrítico) e o regime onde a água escorre de uma maneira mais rápida e rasa (supercrítico).

Para achar os valores da altura normal (y_n), foi considerada a equação de Manning, na qual é utilizada para escoamentos uniformes, em que são característicos de regimes subcríticos. Como ela não possui solução analítica direta, seu valor foi determinado com a ajuda de um processo iterativo computacional. Já para o cálculo da altura crítica (y_c), se utilizou de informações acerca da geometria da base do canal (B) e valores de gravidade e de vazão, seguindo a Equação 9.

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R h^{2/3} \cdot \sqrt{S_0} \quad (8)$$

Onde: Q = Vazão (m^3/s); A = Área molhada do canal (m^2); S_0 = Declividade média do canal (m/m)

$$y_c = \left(\frac{Q^2}{g \cdot B^2} \right)^{1/3} \quad (9)$$

Onde: y_c = profundidade crítica (m); B = base do canal (m).

Após a obtenção dos valores de altura crítica e normal, foi identificado o tipo de curva trabalhado e em seguida aplicado o *Direct Step Method*. Os valores arbitrários de y utilizados foram entre a altura máxima de jusante e a altura normal.

2.3.2) Seleção valores das variáveis

2.3.2.1) Coeficiente de Manning e Parâmetros Geométricos

Tanto para a obtenção do Coeficiente de Manning, quanto para a obtenção da medida da base do canal, foi utilizado a ferramenta *Street View* do *software* Google Earth Pro. Para o coeficiente foi comparado valores de acordo com as características observadas no canal, seguindo a tabela de Pimenta (1981) que foi citada em Silva et al (2023).

2.3.2.2) Condição de Contorno (Jusante)

A partir de dados históricos de alagamento da região (IPP, 1997, apud Pinto, 2019), o nível da água no exutório foi fixado em 2,8 metros, correspondendo à cota atingida pela água em um evento extremo de chuva no ano de 2019. Tal ponto, corresponde a uma localização próxima da bacia (aproximadamente dois quilômetros) e como não há grande variação de declividades nessa área, se considerou toda essa região como alagada, obtendo assim um possível obstáculo para o fluxo do rio. Para essa aproximação, teve-se que levar em consideração um ponto mais a frente do exutório da bacia da Vala do Cesarão (mais precisamente a jusante do rio Cação Vermelho), obtendo um total de 6,93 km de corpo hídrico no sistema.

2.3.3) Verificação capacidade hidráulica

A verificação da capacidade hidráulica da calha fluvial referente somente à Vala do Cesarão, foi realizada com o objetivo de determinar a Profundidade Normal (y_n) exigida para o transporte das vazões máximas de projeto, especificamente para TR de 25 anos. Para isso se utilizou novamente a equação (8), se mantendo os parâmetros já calculados. A metodologia consistiu em agrupar os termos constantes da equação e aplicar um processo matemático iterativo. Arbitraram-se sucessivos valores de profundidade (y_n) até que a vazão calculada igualasse a vazão de projeto encontrada.

3) RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1) Caracterização Física

Os resultados da caracterização física se encontram resumidos na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Resumo da caracterização física da bacia

Parâmetro	Valor
Comprimento curso d'água principal (L)	3,19 Km
Área de drenagem (A)	2,8 Km ²
Perímetro	8,17 Km
Comprimento total dos cursos d'água	5,87 Km
Densidade de Drenagem	2,09 Km/Km ²
Declividade Média (S)	0,00338 m/m

3.2) Vazão

Os principais parâmetros utilizados no cálculo da vazão de projeto no *software* HIDRO-FLU, se encontram resumidos na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Valores para cálculo da vazão de projeto

Parâmetro	Valor
Cobertura Vegetal	27,50%
Coefficiente de <i>Runoff</i> (C)	0,62
Tempo de Concentração (t_c)	53,57 min
Tempo de Recorrência	25 anos
Intensidade da Chuva (TR 25)	75,72 mm/h
Vazão de projeto (TR 25)	36,49 m ³ /s

3.3) Curva de Remanso

Os valores utilizados para o cálculo da curva de remanso estão reunidos na **Tabela 3**.

Tabela 3 - Valores de entrada para cálculo do remanso

Parâmetro	Valor
Vazão de Projeto (TR 25)	36,49 m ³ /s
Largura da Base	4,0 m
Coefficiente de Manning (n)	0,035 (canais e rios em mau estado)
Declividade média	0,0013 m/m
Nível de Jusante	2,80 m
Aceleração Gravidade	9,81 m/s ²

3.3.1) Extensão da Curva

Para a avaliação do sistema de drenagem, adotou-se a vazão de projeto de 36,49 m³/s. Com o objetivo de aumentar a precisão geométrica do modelo, a declividade longitudinal utilizada no cálculo foi alterada. Com a junção entre o Rio Cação Vermelho, parte do Boi Branco e a Vala do Cesarão, para o cálculo da declividade ponderada, se considerou áreas mais próximas da foz do sistema, em que por ser uma região mais plana, resultou em um valor de 0,0013 m/m (0,13%). Essa adoção representa com maior fidelidade as características do trecho onde o fenômeno acontece.

A partir desse valor de vazão, da declividade ajustada e das demais características físicas estipuladas para a calha, se obteve uma altura normal (y_n) de 6,55 m e uma altura crítica (y_c) de 2,04 m. Com isso, a partir do nível de jusante definido, se verifica uma condição $y_n > y > y_c$, configurando um perfil de linha d'água do tipo M2. Nessa situação, a lâmina d'água necessária para transportar a vazão de projeto é superior a condição de cheia a jusante, fazendo com que a profundidade caia aos poucos em direção à foz.

Com a aplicação do *Direct Step Method* realizado de jusante a montante, se obteve um valor de 2,1 km para que o perfil de linha d'água se aproxime do valor da altura normal. Ao considerar essa distância no sistema como um todo, se chega à conclusão de que, para o cenário de cheia proposto, a Vala do Cesarão não sofrerá interferência direta da condição de jusante estabelecida.

Ressalta-se que a profundidade normal obtida nesta etapa ($y_n = 6,55$ m) refere-se exclusivamente ao sistema hidráulico ampliado adotado para a análise da curva de remanso, composto pela Vala do Cesarão, Rio Cação Vermelho e parte do Rio Boi Branco, utilizando a declividade média recalculada de 0,0013 m/m. Este valor não deve ser confundido com a profundidade normal apresentada posteriormente na análise de capacidade hidráulica da Vala do Cesarão, a qual é calculada considerando apenas o canal principal.

3.4) Verificação capacidade hidráulica

Diferentemente da análise de remanso apresentada anteriormente, a verificação da capacidade hidráulica foi realizada considerando exclusivamente o trecho da Vala do Cesarão. Dessa forma, a profundidade normal calculada nesta etapa corresponde à condição necessária para que a própria calha da Vala do Cesarão transporte a vazão de projeto, e não o sistema ampliado.

Ao aplicar a metodologia, se encontrou um valor de profundidade normal (y_n) necessária para o escoamento da vazão de projeto, sendo este valor igual a 4,43 m. Tal valor de altura normal encontrado mostra que, para chuvas com TR de cerca de 25 anos, a altura da calha que suportará tal valor de vazão, para um canal retangular com base igual a 4 metros, será de cerca de 4,43 metros. Destaca-se que, para chuva com tempos de recorrência maiores, tal valor de altura pode subir consideravelmente. Esse valor encontrado mostra que algumas regiões ao longo da extensão do rio da Vala do Cesarão podem sofrer com inundações em suas margens, devido principalmente à ausência de altura necessária para escoar a água vinda ao longo da bacia.

4) CONCLUSÃO

A análise espacial da bacia da Vala do Cesarão revelou um cenário crítico de uso do solo, com elevada urbanização e alto escoamento superficial. Como resultado, há baixa capacidade de infiltração, rápida resposta hidrológica e intensificação dos picos de cheia.

Outro ponto abordado foi a discussão de possíveis causas de inundações e alagamentos na região. A partir dos cálculos, se notou que uma alteração da linha d'água provocada pela condição de jusante do sistema, se dissipa antes de chegar na bacia da Vala do Cesarão. Com isso, um dos fatores

que pode levar ao alagamento de algumas regiões ao longo do rio se deve à própria capacidade hidráulica do corpo hídrico, uma vez que o trecho analisado não atendeu à profundidade mínima necessária para conter e escoar adequadamente a vazão de projeto.

Conclui-se, portanto, que um dos principais fatores associados às inundações na região é a insuficiente capacidade hidráulica do canal para escoar a vazão de projeto. Diante deste cenário, recomendam-se as seguintes medidas de engenharia na Vala do Cesarão: 1. Aprofundamento e alargamento da calha: necessário para aumentar a capacidade de vazão, embora possa ser limitado pela ocupação urbana nas margens; 2. Dragagem Regular: para manter a seção hidráulica livre de sedimentos e vegetação, tentando assim reduzir o coeficiente de Manning e, consequentemente, melhorar o escoamento.

Esse estudo reforça que, se medidas preventivas, como as mencionadas acima, não forem implementadas, a região da Vala do Cesarão continuará sendo impactada com episódios de inundação e alagamentos, que tendem a se agravar diante dos efeitos das mudanças climáticas.

5) REFERÊNCIAS

DNIT, 2006. *Manual de Drenagem de Rodovias*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. - 2. ed. – Rio de Janeiro, 2006. 333p. (IPR. Publ., 724).

PINTO, C. H. de M., 2019 *Alagamentos no bairro de Santa Cruz: uma contribuição à drenagem urbana carioca 2020*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.bdtd.uerj.br:8443/bitstream/1/16409/2/Dissertação%20-%20Carlos%20Henrique%20de%20Mello%20Pinto%20-%202020%20-%20Completa.pdf>

RIO DE JANEIRO (Município), 2019. *Câmara Municipal do Rio de Janeiro. Comissão Parlamentar de Inquérito. Relatório final da Comissão Parlamentar de Inquérito instituída pela Resolução nº 1.450/2019: "CPI das Enchentes"*. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://rfinal-cpienchentes.s3-sa-east-1.amazonaws.com/Relatório-Final.pdf>

RIO DE JANEIRO (Município), 2013. *Fundação Rio-Águas. Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro – PDMAP: relatório síntese*. v. 1. Rio de Janeiro.

SILVA, et al (2023). “*Estudo do Coeficiente de Rugosidade de um canal de laboratório utilizando placas de Rugosidade*. Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)” *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, v. 23, n. 1, pp. 76–99.