

***INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
AERONÁUTICA***



Bruno Bezerra Bluhm

Estudo de impactos hidráulicos e urbanísticos mediante
implantação de um parque linear marginal ao rio
Granjeiro, Crato, Ceará

*Trabalho de Graduação
2015*

***Engenharia Civil-
Aeronáutica***

Bruno Bezerra Bluhm

**Estudo de impactos hidráulicos e urbanísticos mediante
implantação de um parque linear marginal ao rio Granjeiro,
Crato, Ceará**

Orientadora
Profa. Dra. Nadiane Smaha Kruk (ITA)

Engenharia Civil-Aeronáutica

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Bluhm, Bruno Bezerra

Estudo de impactos hidráulicos e urbanísticos mediante implantação de um parque linear marginal ao rio Granjeiro, Crato, Ceará / Bruno Bezerra Bluhm.

São José dos Campos, 2015.

Número de folhas no formato: 107f.

Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica –
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2015. Orientadora: Profa. Dra. Nadiane Smaha Kruk.

1. Parques lineares. 2. Hidráulica de canais. 3. Modelagem hidráulica. I. II. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. III. Estudo de impactos hidráulicos e urbanísticos mediante implantação de um parque linear marginal ao rio Granjeiro, Crato, Ceará.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BLUHM, Bruno Bezerra. **Estudo de impactos hidráulicos e urbanísticos mediante implantação de um parque linear marginal ao rio Granjeiro, Crato, Ceará.** 2015. 107f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Bruno Bezerra Bluhm

TÍTULO DO TRABALHO: Estudo de impactos hidráulicos e urbanísticos mediante implantação de um parque linear marginal ao rio Granjeiro, Crato, Ceará

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2015

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



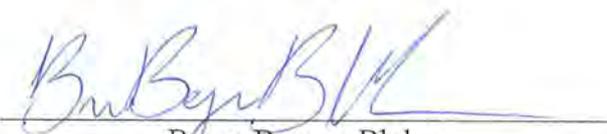
Bruno Bezerra Bluhm

Rua H8A, 116 – Campus CTA

12.228-460 – São José dos Campos, SP

Estudo de impactos hidráulicos e urbanísticos mediante implantação de um parque linear marginal ao rio Granjeiro, Crato, Ceará

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Bruno Bezerra Bluhm
Autor



Prof. Dra. Nadiane Smaha Kruk (ITA)
Orientadora



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto (ITA)
Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 24 de novembro de 2015

Às raízes,

Agradecimentos

À família, pela inspiração e coautoria,

Às mestras, Nadiane e Íria, pela sabedoria e dedicação,

*Aos mestres, Yarley, Paulo Roberto e Luiz Alberto, e amigos da
COGERH, pela acessibilidade e afinho em melhorar o Crato.*

*“No matter how cold the winter,
there’s a springtime ahead.”*

Eddie Vedder

Resumo

Como proposta de solução de engenharia para a problemática das enchentes no canal urbano do rio Granjeiro, em Crato, Ceará, este trabalho apresenta uma discussão aprofundada do cenário de implantação de um parque linear, substituindo o atual canal de concreto e, parcialmente, sua avenida marginal. Com o crescimento urbano, a impermeabilização e a retificação do seu leito, tal rio sofre com recorrentes eventos de cheias destrutivas, caracterizadas por escoamentos torrenciais com altas velocidades e transbordamento. Inspirado no conceito de urbanismo sustentável, o qual prioriza a relação de respeito entre as ecologias humana e biofísica, este trabalho propõe a implantação de um parque linear marginal, solução internacionalmente estabelecida, mas de caráter ainda vanguardista no Brasil. Para tanto, realizou-se uma modelagem hidráulica e uma análise dos impactos urbanísticos. O cenário de parque, se comparado com o atual, de canal de concreto, apresenta reduções significativas nos valores médios de velocidade e número de Froude: 46% e 56%, respectivamente. Entretanto, há um aumento de 34% na altura da lâmina d'água, piorando a situação de transbordamento. Esta pode ser solucionada com estudos de implantação de uma bacia de retenção a montante do canal, viabilizando o parque linear como solução de engenharia para a problemática do rio Granjeiro. Além disso, a presente proposta tende a somar à cidade um novo espaço público democrático, com melhorias sociais, ambientais, econômicas e de mobilidade, se agregando a recentes grandes projetos de revitalização urbana, coroando este momento em que Crato se reinventa como cidade sustentável.

Palavras-chave: parques lineares, hidráulica de canais, modelagem hidráulica, urbanismo sustentável.

Abstract

The Granjeiro river urban channel found in Crato, Ceará, currently experiences flooding issues on a semi-regular basis. This is in part due to the current concrete channel which it runs through and the avenues at its margins. This project presents an engineering solution to these issues by using a linear park approach. Urbanisation, with the rectification of the river bed and the increase of waterproof surfaces, has created a scenario where the Granjeiro river repeatedly suffers from destructive flood events, which present high values for water velocity, torrential regime and overflow level. Inspired by sustainable urbanism, a concept that highlights the respect between human and biophysical ecologies, this work proposes the implantation of a linear park, a solution that is well established internationally, but is still considered as avant-gard in Brazil. In order to justify such a proposal, a hydraulic model was adapted for the park scenario and the urban impacts were evaluated. When contrasted with the concrete channel environment currently in place, the linear park scenario presents significant reductions in water velocity and Froud Numbers: 46% and 56% respectively. However, this is accompanied by a 34% increase in water surface level, worsening overflow problems. This can be addressed by constructing a retention basin further upstream, thus making this a viable engineering solution. In addition, this proposal also creates a new dimension to the city - the development of a new accessible public space that contributes to urban revitalisation. The social, environmental, economical and mobility improvements that accompany the linear park implementation contribute to Crato's current push for reinvention as a sustainable city.

Key-words: *linear parks, channel hydraulics, hydraulic modelling, sustainable urbanism.*

Lista de Figuras

1. Transbordamento e destruição parcial da estrutura do canal do rio Granjeiro e da sua avenida marginal. (Fonte: SILVA, T., 2013)	20
2. Destruição da estrutura de parte do canal do rio Granjeiro, com invasão da avenida marginal. (Fonte: SILVA, T., 2013)	20
3. Centro da cidade de Crato após enchente do canal. (Fonte: SILVA, T., 2013).....	21
4. Fluxograma das etapas de elaboração do presente trabalho. (Fonte: Autor).....	22
5. Modelo ilustrativo do ciclo hidrológico. (Fonte: Ministério do Meio Ambiente, 2015)	25
6. Plano da cidade de Adelaide, 1837, mostrando a importância do rio Torrens, ao centro, para a ocupação urbana de tal cidade. (Fonte: MUGAVIN, 2004 <i>apud</i> LIGHT 1837)	31
7. Parque linear do rio Torrens, 2002, mostrando áreas que são submergidas em casos de cheias, sem danos às comunidades locais. Ao fundo, é mostrado um corredor de ônibus. (Fonte: MUGAVIN, 2004).....	32
8. Fotografia aérea da cidade de Rahway, com a área destinada ao parque destacada dentro das linhas brancas. Área amarela representa planícies de cheias e os pontos amarelos os picos de cheias no rio Rahway. (Fonte: OBROPTA; KALLIN, 2003) ..	33
9. Conceito arquitetônico do parque marginal do rio Rahway. (Fonte: OBROPTA; KALLIN, 2003)	33
10. Opções antagônicas de modelos de drenagem urbana. (Fonte: BOTELHO, 2011)	35
11. Efeito da urbanização sobre a vazão máxima. (Fonte: PORTO <i>et al</i> , 2000, <i>apud</i> LEOPOLD, 1965).....	36
12. Esquema da linha de energia com relação à superfície da água e ao fundo do canal, mostrando os termos da equação da energia. (Fonte: SILVA, T., 2013)	39
13. Localização da bacia hidrográfica do rio Granjeiro. (Fonte: MOREIRA, 2013) .	42
14. Mapa de uso e ocupação do solo, bacia do rio Granjeiro. (Fonte: MOREIRA, 2013)	43
15. Frequências de chuvas totais anuais, no município de Crato, dados da série histórica de 1974 a 2011. (Fonte: MOREIRA, 2013).....	44
16. Mapa de declividades, bacia do rio Granjeiro. (Fonte: MOREIRA, 2013).....	45

17. Mapa hipsométrico, bacia do rio Granjeiro. (Fonte: MOREIRA, 2013).....	46
18. Mapa pedológico, bacia do rio Granjeiro. (Fonte: MOREIRA, 2013)	47
19. Seção a montante, reconstruída, canal do rio Granjeiro. (Fonte: SÁ, 2015)	48
20. Seção a jusante, não reconstruída, canal do rio Granjeiro. (Fonte: SILVA, T., 2013)	49
21. Trecho intermediário do canal, reconstruído, ilustrando a retificação do curso do rio Granjeiro. (Fonte: Autor).....	49
22. Trecho intermediário, reconstruído, do canal do rio Granjeiro, ilustrando seções transversais com diferentes dimensões. (Fonte: Autor).....	50
23. Transição entre o trecho reconstruído, superior, e não reconstruído, inferior, do canal do rio Granjeiro, mostrando estreitamento do leito. (Fonte: SÁ, 2015).....	50
24. Trecho intermediário, não reconstruído, do canal do rio Granjeiro, apresentando maior desgaste das paredes e sedimentação no fundo. (Fonte: SÁ, 2015)	51
25. Seção transversal do canal do rio Granjeiro, tipo 1. (Fonte: SÁ, 2015)	52
26. Seção transversal do canal do rio Granjeiro, tipo 2. (Fonte: SÁ, 2015)	52
27. Seção transversal do canal do rio Granjeiro, tipo 3. (Fonte: SÁ, 2015)	53
28. Seção transversal do canal do rio Granjeiro, tipo 4. (Fonte: SÁ, 2015)	53
29. Seção transversal, canal do rio Granjeiro, localizada a 205 m de distância longitudinal da montante, representação do HEC-RAS, com coeficientes de Manning na parte superior. (Fonte: SÁ, 2015).....	56
30. Seção transversal, canal do rio Granjeiro, localizada a 205 m de distância longitudinal da montante, representação do HEC-RAS, com coeficientes de Manning na parte superior. (Fonte: Autor)	56
31. Gráfico das velocidades para a simulação do parque do rio Granjeiro, tempos de retorno de 5, 10 e 20 anos. (Fonte: Autor).....	60
32. Gráfico das velocidades para a simulação do parque do rio Granjeiro, tempos de retorno de 50 e 100 anos. (Fonte: Autor).....	61
33. Gráfico dos números de Froude para a simulação do parque do rio Granjeiro, tempos de retorno de 5, 10 e 20 anos. (Fonte: Autor)	62
34. Gráfico dos números de Froude para a simulação do parque do rio Granjeiro, tempos de retorno de 50 e 100 anos. (Fonte: Autor).....	63
35. Gráfico das alturas da lâmina d'água para a simulação do parque do rio Granjeiro, tempos de retorno de 5, 10 e 20 anos. (Fonte: Autor).....	65

36. Gráfico das alturas da lâmina d'água para a simulação do parque do rio Granjeiro, tempos de retorno de 50 e 100 anos. (Fonte: Autor).....	65
37. Gráfico comparativo das velocidades para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor).....	68
38. Gráfico comparativo dos números de Froude para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)	70
39. Gráfico comparativo das alturas da lâmina d'água, incluindo elevação do nível de fundo, para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor).....	71
40. Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, influência da rugosidade, comparação da velocidade, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)	74
41. Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, influência da rugosidade, comparação do número de Froude, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor).....	74
42. Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, influência da rugosidade, comparação da altura da lâmina d'água, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)	75
43. Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, cenário de leito híbrido, comparação da velocidade, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)....	76
44. Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, cenário de leito híbrido, comparação do número de Froude, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor).....	77
45. Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, cenário de leito híbrido, comparação da altura da lâmina d'água, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor).....	77
46. Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, velocidades laterais, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)	79
47. Praça Siqueira Campos no município de Crato, exemplo de ambiente com microclima de temperaturas mais amenas. (Fonte: Autor)	83
48. Ciclista no canal do rio Granjeiro, onde atualmente não há infraestrutura adequada para transporte cicloviário. (Fonte: Autor)	86
49. Praça da Sé reconstruída, Crato, exemplo de ambiente público sustentável, com presença de coleta seletiva e abundante vegetação. (Fonte: Autor).....	89

50. Centro de Crato, após revitalização, com ambiente urbano mais adequado, com calçadas alargadas, presença de bancos, canteiros e lixeiras, nova pavimentação das ruas e travessias elevadas para pedestres. (Fonte: Autor).....	90
51. Exemplo de novo canteiro, no centro de Crato. A revitalização providenciou ambiente mais amigável para pedestres, ocorrendo, assim, reocupação do espaço público urbano. (Fonte: Autor)	90
52. Centro histórico de Crato, recentemente reconstruído, com aumento da arborização urbana. (Fonte: Autor).....	91
53. Calçada no topo da encosta do Seminário, Crato, com vista para a cidade e ambiente adequado para pedestres. (Fonte: Autor).....	92
54. Rua no topo da encosta do Seminário, Crato, exemplo de via de uso compartilhado entre veículos, ciclistas e pedestres. (Fonte: Autor)	92
55. Novo espaço urbano, no Seminário, Crato, com bancos e recreios. Espaço atrativo aos moradores e visitantes. (Fonte: Autor)	93
56. Estabilização da encosta do Seminário, Crato, espaço antes ocupado por voçoroca. Pode-se observar, parcialmente, o canal do rio Granjeiro, n canto direito da imagem. (Fonte: Autor)	93
57. Gráfico comparativo dos números de Froude para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 5 anos. (Fonte: Autor)	102
58. Gráfico comparativo dos números de Froude para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 10 anos. (Fonte: Autor)	102
59. Gráfico comparativo dos números de Froude para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 20 anos. (Fonte: Autor)	103
60. Gráfico comparativo dos números de Froude para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 100 anos. (Fonte: Autor)	103
61. Gráfico comparativo das velocidades para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 5 anos. (Fonte: Autor).....	104
62. Gráfico comparativo das velocidades para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 10 anos. (Fonte: Autor).....	104
63. Gráfico comparativo das velocidades para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 20 anos. (Fonte: Autor).....	105
64. Gráfico comparativo das velocidades para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 100 anos. (Fonte: Autor).....	105

65. Gráfico comparativo das alturas da lâmina d'água para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 5 anos. (Fonte: Autor).....	106
66. Gráfico comparativo das alturas da lâmina d'água para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 10 anos. (Fonte: Autor).....	106
67. Gráfico comparativo das alturas da lâmina d'água para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 20 anos. (Fonte: Autor).....	107
68. Gráfico comparativo das alturas da lâmina d'água para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 100 anos. (Fonte: Autor).....	107

Lista de Tabelas

1. Efeitos de diversas mudanças ocasionadas pelo processo de urbanização. (Fonte: PORTO <i>et al</i> , 2000)	36
2. Vazões para chuvas de diferentes tempos de retorno, bacia do rio Granjeiro. (Fonte: MOREIRA, 2013).....	54
3. Valores do coeficiente de Manning (Fonte: VEN TE CHOW, 1988, tradução nossa)	58
4. Velocidades máximas e médias no cenário de simulação do parque do rio Granjeiro. (Fonte: Autor).....	62
5. Números de Froude máximos e médios no cenário de simulação do parque do rio Granjeiro, incluindo porcentagens de seções com escoamento supercrítico. (Fonte: Autor).....	64
6. Alturas da lâmina d'água máximas e médias no cenário de simulação do parque do rio Granjeiro, incluindo porcentagens das seções que apresentam transbordamento. (Fonte: Autor)	66
7. Análise comparativa de valores médios e máximos de velocidades, com variação percentual. (Fonte: Autor).....	69
8. Análise comparativa de valores médios e máximos dos números de Froude, com variação percentual e análise de seções com escoamento supercrítico. (Fonte: Autor)	70
9. Análise comparativa das alturas da lâmina d'água, considerando casos de transbordamento e seus impactos. (Fonte: Autor)	72
10. Análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, influência da rugosidade, dados compilados para o tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)	75
11. Análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, cenário de leito híbrido, dados compilados para o tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)	78

Sumário

1. Introdução	17
1.1. Contextualização da problemática	17
1.2. Contextualização local	18
1.3. Objetivos do trabalho	21
1.4. Metodologia	21
2. Revisão da literatura	24
2.1. Hidrologia	24
2.1.1. Ciclo hidrológico	24
2.1.2. Tipos de chuvas.....	25
2.1.3. Intensidade, duração e frequência.....	26
2.2. Hidráulica fluvial	27
2.2.1. Definições	27
2.2.2. Tipos de escoamento.....	27
2.3. Parques lineares	29
2.3.1. Conceituação.....	29
2.3.2. Estudos de caso	29
2.3.2.1. Rio Torrens	30
2.3.2.2. Rio Rahway.....	32
2.3.3. Integração com o espaço urbano.....	34
2.4. Drenagem urbana	34
2.5. Modelagem hidráulica	37
2.5.1. HEC-RAS	37
2.5.1.1. Dados de entrada.....	38
2.5.1.2. Métodos de cálculo	38
2.5.1.3. Dados de saída	39
3. Rio Granjeiro	41
3.1. Caracterização da bacia do rio Granjeiro.....	41
3.1.1. Geografia.....	41
3.1.2. Regime de chuvas	43
3.1.3. Geomorfologia	44
3.1.4. Canal urbano	47

3.2. Modelagem hidráulica do canal do rio Granjeiro	51
3.2.1. Seções transversais: canal	51
3.2.2. Coeficientes de Manning: canal	53
3.2.3. Dados hidrológicos: canal	54
3.3. Modelagem hidráulica do parque do rio Granjeiro	54
3.3.1. Seções transversais: parque	55
3.3.2. Coeficientes de Manning: parque	57
3.3.3. Dados hidrológicos: parque	58
4. Resultados e discussões	59
4.1. Resultados da modelagem hidráulica do parque do rio Granjeiro	59
4.1.1. Apresentação e análise dos resultados	59
4.1.1.1. Velocidade: parque	60
4.1.1.2. Número de Froude: parque	62
4.1.1.3. Altura da lâmina d'água: parque	64
4.1.2. Análise comparativa: parque e canal	67
4.1.2.1. Velocidade: análise comparativa	68
4.1.2.2. Número de Froude: análise comparativa	69
4.1.2.3. Altura da lâmina d'água: análise comparativa	71
4.1.3. Análise de sensibilidade	73
4.1.3.1. Influência da rugosidade	73
4.1.3.2. Proposta de cenário híbrido	76
4.1.3.3. Velocidades laterais	78
4.1.4. Discussões e recomendações	79
4.2. Impactos urbanísticos	80
4.2.1. Impactos socioambientais	81
4.2.2. Impactos sobre a mobilidade urbana	85
4.2.3. Impactos econômicos	87
4.2.4. Contexto urbanístico atual: Crato, um novo projeto de cidade	88
5. Conclusões	95
6. Bibliografia	97
Apêndice A. Análise comparativa, parque e canal, para diferentes tempos de retorno	102

1. Introdução

1.1. *Contextualização da problemática*

O cerne do presente trabalho é a relação de coabitação entre pessoas e águas quanto à importância do entendimento e do respeito das condições hídricas naturais de uma cidade.

A urbanização mal planejada transforma drasticamente a natureza dos cursos d'água locais. Ocorrem alterações em diversas esferas, sendo exemplos disso o desmatamento de matas ciliares, a retificação de rios, a impermeabilização de bacias e a poluição de ecossistemas aquáticos. Tais mudanças trazem impactos negativos não apenas para as águas, mas também para os habitantes. Um dos principais exemplos disso são as enchentes urbanas (BOTELHO, 2011).

Dada a natureza de regime de chuvas heterogêneo no tempo, leitos de rios podem receber vazões superiores às suas capacidades, acarretando num avanço da água sobre as adjacências, ocorrendo as enchentes. Devido ao ciclo hidrológico, em termos de escoamento, infiltração e evaporação, o sistema tende a retornar à sua configuração original, caracterizando tal fenômeno como natural e temporário (VENTE CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

Entretanto, devido à ação humana, o perfil das enchentes pode variar drasticamente. A área de inundação e a velocidade das águas são exemplos de características sensíveis aos processos de urbanização, os quais tendem a intensificá-las. Com a ocupação indevida de áreas próximas a cursos d'água, ocorrem conflitos espaciais entre pessoas e águas, e, na ocorrência de enchentes, as consequências podem ser desastrosas.

A hidrologia de engenharia serve para responder a questões-chaves neste âmbito, como determinar a capacidade do curso de água, o mapa de cheias e propor soluções para evitar que tais conflitos, e, principalmente, suas consequências, ocorram (LINSLEY; KOHLER; PAULHUS, 1982).

O primeiro passo na busca por tais propostas se dá no entendimento da relação das águas com o ambiente urbano, em termos de ocupação espacial e formação de um sistema de equilíbrio. Para tanto, uma noção de escala temporal se mostra como ferramenta importante em tal compreensão.

A Terra se encontra no período antropoceno, no qual a atividade humana tem se tornado um fator crítico em mudanças ambientais, devido à alta velocidade com a qual a humanidade altera o espaço natural (SACHS, 2014).

Ainda segundo esse autor, o ciclo hidrológico, sistema de equilíbrio no qual as águas se encontram e se relacionam com o meio ambiente, se apresenta em uma escala temporal bastante distinta da escala de existência da espécie humana e, ainda mais, daquela de intensificação exponencial da atividade antrópica. O desenvolvimento de tal período antropoceno se dá paralelamente ao crescimento histórico da urbanização em massa, a partir do pós revolução industrial.

A noção da diferença de escala temporal fundamenta a hidrologia de engenharia quanto ao respeito à água necessário para que as comunidades urbanas se desenvolvam sustentavelmente. Porém, o cenário histórico brasileiro mostra uma inversão de valores e prioridades, na qual avenidas e especulações imobiliárias tomam os espaços dos rios urbanos.

Como o contexto histórico, explicitado nas ações de uso e ocupação do solo já realizadas, não pode ser ignorado, as soluções de engenharia no âmbito de águas urbanas têm forte correlação com programas de recuperação. Entre tais programas, a implantação de parques lineares marginais como substitutos de avenidas de beira de canal se mostra uma solução de interesse público, já que abrange ambas as questões hídrica, como controle de enchentes (SANTOS *et al*, 2012), e urbanística, como melhoria de qualidade de vida (GOBSTER; WESTPHAL, 2012).

A principal contribuição de tal proposta se dá na reinversão de valores, por retornar os rios a uma posição prioritária, em termos de planejamento urbano. O reconhecimento da importância das propriedades naturais dos cursos d'água, como matas ciliares, áreas próprias para cheias e índices de infiltração compatíveis, é o alicerce fundamental desta solução de engenharia.

1.2. Contextualização local

A bacia do rio Granjeiro, localizada no município de Crato, Ceará, apresenta um processo de urbanização na região central da cidade, cujo principal elemento é um canal de alvenaria, margeado pela avenida José Alves de Figueiredo. Devido a tal processo, a cidade sofre frequentemente com problemas de enchente, os quais são

agravados por dois fatores principais quanto às águas: altas velocidades, causando enxurradas; e poluição, devido às condições precárias de saneamento.

Com a intensificação da urbanização nas margens do rio, principalmente na última década, os problemas de cheias se agravaram. De acordo com Moreira (2013) e Thiago da Silva (2013), as cheias dos anos de 2004, 2009, 2010 e 2011 foram particularmente problemáticas. As Figuras 1, 2 e 3 ilustram os impactos dos fenômenos de enchentes, tanto sobre a estrutura do canal como sobre a comunidade cratense.

Dada a magnitude da questão das enchentes, a academia, a sociedade civil e o poder público têm estudado a fundo a situação do canal do rio Granjeiro, a fim de entender o problema e propor alternativas. Com a cheia de janeiro de 2011, o conceito de canal de alvenaria como solução devidamente adotada para tal rio passou a ser repensado. Segundo Francisco da Silva (2011, p. 13):

O canal do rio Granjeiro deve ser reprojetoado considerando os aspectos hidrológicos e hidráulicos inerentes à singularidade de sua bacia, quer do ponto de vista da forma; quer do ponto de vista do relevo; quer do ponto de vista topográfico; quer do ponto de vista geotécnico e, quer do ponto de vista estrutural. Em outras palavras, não adianta reconstruir o canal nas condições originais atuais, pois seria apenas gastar dinheiro público sem nenhuma garantia de sustentabilidade e, muito pior, com a certeza de que o problema das enxurradas e consequentes rupturas estruturais voltarão a ocorrer mais cedo ou mais tarde.

Desde a cheia de 2011, o canal continua sendo a solução adotada pelo poder público. Mesmo com a implantação de gabiões nas reconstruções, a alvenaria ainda predomina sobre o leito urbano do rio Granjeiro, com a permanência da impermeável avenida marginal. Tal situação evidencia a importância do presente trabalho, como proposta de discussão de uma alternativa ecológica de retirada do canal, dada a diagnosticada situação crítica da bacia estudada e necessidade pública de mudança.



Figura 1: Transbordamento e destruição parcial da estrutura do canal do rio Granjeiro e da sua avenida marginal. (Fonte: SILVA, T., 2013)



Figura 2: Destruição da estrutura de parte do canal do rio Granjeiro, com invasão da avenida marginal. (Fonte: SILVA, T., 2013)



Figura 3: Centro da cidade de Crato após enchente do canal.

(Fonte: SILVA, T., 2013)

1.3. *Objetivos do trabalho*

O presente trabalho tem como objetivo criar uma discussão aprofundada da implantação de um parque linear marginal como proposta de solução de engenharia para a problemática das recorrentes enchentes no rio Granjeiro.

Como objetivos secundários são estabelecidos: uma compreensão do estágio em que se encontram os estudos acerca da bacia do rio Granjeiro e assim fazer com que o presente trabalho se agregue às discussões existentes de modo a melhor fundamentar os respectivos agentes de mudança; e uma introdução e fortalecimento da ideia de utilização de parques lineares marginais para controle de enchentes. A importância de tais objetivos secundários é acentuada se considerado que, embora tenha consolidação internacional crescente, tal solução apresenta caráter ainda vanguardista no Brasil, dada a predominância de rios canalizados e de avenidas de beira de canal.

1.4. *Metodologia*

Para que os objetivos do trabalho sejam atingidos, adotam-se as seguintes etapas sequenciais: formulação do problema; coleta de dados geográficos,

hidrológicos e hidráulicos; modelagem fluvial utilizando o *Hydrologic Engineering Center River Analysis System* (HEC-RAS); discussões e emissão de relatório final. Tais etapas são ilustradas na Figura 4. A interface com os órgãos públicos, com destaque à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, COGERH, se mostra crítica, tanto na coleta de dados como na importância do trabalho em si, em termos de fortalecer a discussão da viabilidade da introdução de um parque linear marginal na cidade de Crato. Os dados necessários incluem informações de vazões, topografia do rio e seções transversais, atualizadas, do canal.



Figura 4: Fluxograma das etapas de elaboração do presente trabalho. (Fonte: Autor)

Tanto as etapas de formulação do problema como coleta de dados têm uma interface com a literatura específica existente quanto à problemática do canal do rio Granjeiro. Dessa forma, o presente trabalho se formula com base nos estudos já realizados de modo a acrescentar a tal literatura nova proposta e abordagem, segundo a filosofia ambientalista de retornar o rio à sua condição natural, conscientizando-se das consequências hidráulicas de tal mudança.

Para tal conscientização, a modelagem em HEC-RAS se mostra crítica, pois trata a implantação do parque linear marginal como uma solução de engenharia, apresentando dados fundamentais, como velocidade da água, altura da sua lâmina e número de Froude, os quais permitem embasamento técnico no processo decisório de adoção desta proposta.

As discussões e fundamentações teóricas do presente trabalho se dão em três linhas principais: primeira quanto à filosofia de ocupação dos espaços urbanos, em termos de conflito espacial entre homem e águas e da necessidade de respeito em tal relação; segunda quanto à viabilidade técnica da proposta, ou seja, como a

implantação do parque altera o escoamento no canal sob diferentes regimes de chuva e quais as consequências, positivas e negativas, de tais alterações; e terceira quanto ao impacto urbanístico desta proposta e sua conexão com os ambientes urbanos já instalados, compreendendo-se o enriquecimento social da cidade com o parque.

O presente trabalho, além de se agregar à literatura existente, tem interface direta com os órgãos governamentais referentes à problemática e com a academia local, tanto na sua elaboração como na sua apresentação. Dessa forma, sua contribuição se mostra relevante ao acrescentar às partes interessadas um estudo de tal solução ainda vanguardista no Brasil.

2. Revisão da literatura

A discussão aprofundada da proposta de implantação de parque linear marginal no rio Granjeiro requer um estudo prévio da literatura que fundamenta a análise hídrica de tal rio e o impacto urbanístico de tal proposta.

Dessa forma, são analisados: os princípios hidrológicos para melhor compreensão dos perfis de chuva utilizados no presente trabalho e do sistema de equilíbrio natural a ser visado; a hidráulica de canais, através dos tipos de escoamento em um fluxo de superfície aberta; a literatura atual sobre parques lineares, através de qual estabelecida é tal solução internacionalmente e de estudos de caso; e modelagem hidráulica, aprofundando-se na utilização do HEC-RAS.

2.1. Hidrologia

2.1.1. Ciclo hidrológico

Define-se como ciclo hidrológico a circulação fechada da água, entre a atmosfera e a superfície terrestre, incluindo oceanos. Os principais fatores ativos em tal circulação são a energia solar e a gravidade, influenciadas pela rotação terrestre. Considera-se o ciclo hidrológico como o sistema de equilíbrio no qual a água se encontra neste planeta (SILVEIRA, 2000).

A partir da evaporação dos oceanos, massas de vapor de água são deslocadas no ar. Sua condensação forma nuvens que originam precipitações. A chuva se dispersa de diversas maneiras, podendo se infiltrar no solo ou escoar pela superfície. A água, através da evaporação e transpiração, principalmente das plantas, retorna à forma de vapor, mas também pode fluir, tanto superficial como subterraneamente de volta aos oceanos. Parte dessa água fica armazenada, seja na forma de lagos, seja na forma de aquíferos. De maneira simplificada, compreende-se a existência de quatro pontos fundamentais em tal ciclo: precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e águas subterrâneas. Além disso, o ciclo engloba outros elementos como o degelo em montanhas e regiões polares (LINSLEY; KOHLER; PAULHUS, 1982).

O ciclo hidrológico é ilustrado na Figura 5.

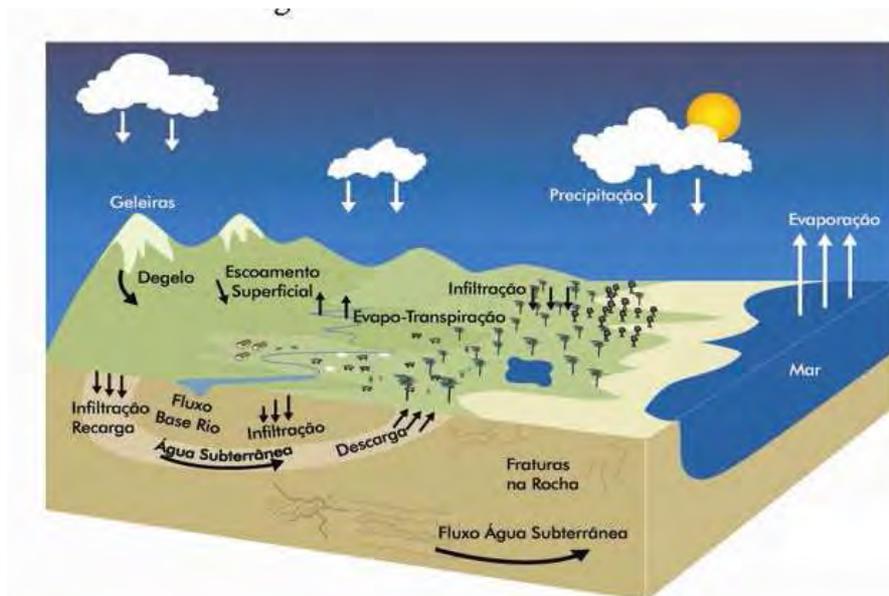


Figura 5: Modelo ilustrativo do ciclo hidrológico.

(Fonte: Ministério do Meio Ambiente, 2015)

2.1.2. Tipos de chuvas

As chuvas são comumente classificadas de acordo com seu perfil de origem, em termos de ascensão do ar úmido. As classificações para o tipo de precipitação são: convectivas, orográficas e frontais. Chuvas convectivas ocasionam-se devido a perturbações no equilíbrio instável das camadas de ar quente e úmido nas proximidades do solo. São típicas de climas equatoriais e normalmente intensas e de curta duração. As orográficas são ocasionadas pelo encontro de ventos quentes e úmidos com barreiras montanhosas. São usualmente pouco intensas e longas. As frontais, também chamadas ciclônicas, provém da interação de massas de ar quentes e frias, em zonas de convergência atmosférica. São chuvas de intensidade média e longas (BERTONI; TUCCI, 2000).

Dado o perfil da bacia estudada, observa-se a importância da Chapada do Araripe sobre a formação do microclima local, principalmente devido à presença de chuvas orográficas. Assim, tais chuvas se mostram como ponto focal do presente trabalho.

Seu principal agente causador são os ventos, normalmente na direção dos oceanos ao continente. Em geral, a precipitação em situação orográfica é proporcional à velocidade dos ventos na região de barreira e à umidade do ar em tal área. Tais

chuvas tendem a atingir o mesmo lugar recorrentemente por longos períodos, limitando-se a áreas relativamente pequenas. Além disso, seu perfil é fortemente associado às épocas do ano, dadas as diferentes características dos ventos em diferentes períodos (VEN TE CHOW, 1964).

Tais características apresentam-se como de acordo com a realidade da bacia do rio Granjeiro.

2.1.3. *Intensidade, duração e frequência*

Além da classificação das chuvas quanto aos agentes fundamentais de sua origem, elas possuem três elementos quantitativos principais que auxiliam na sua descrição em termos de hidrologia de engenharia. São eles: intensidade, duração e frequência.

A intensidade é a medida da quantidade de chuva que cai em uma área em um determinado de tempo. Tal medida é, então, volumétrica. Entretanto, comumente utiliza-se como referência uma área de 1 m^2 . Assim, a intensidade passa a ser uma medida de altura, comumente em milímetros. A duração é o intervalo de tempo em que ocorre a chuva. Devido aos diversos perfis existentes de precipitações e aos também diversos usos dos seus estudos, os valores de duração de chuva podem ser medidos em diferentes unidades de tempo, como minutos, horas e até dias. A frequência de uma chuva indica quão comum é considerado tal perfil de precipitação. Tal consideração deriva do conceito de probabilidade de ocorrência de tal chuva, o qual é introduzido através da definição da grandeza tempo de retorno. Tal grandeza, em anos, indica o intervalo provável de repetição de uma chuva, estando, assim, associada à sua frequência (BOTELHO, 2011).

Essas três grandezas estão associadas entre si, por equações ou tabelas, de modo que, a partir de duas delas, é possível se calcular a terceira. Tal relação pode ser representada de maneira gráfica (PFAFSTETTER, 1982). Além disso, a equação *idf*, intensidade-duração-frequência, é utilizada como ferramenta analítica em tal cálculo. Pelo seu caráter empírico, a disponibilidade de tais equações depende da localidade estudada e da literatura local existente.

2.2. Hidráulica fluvial

2.2.1. Definições

Hidráulica é a aplicação dos princípios da mecânica dos fluidos sobre a água, os quais podem ser utilizados em projetos de engenharia, tais como canais, rios, reservatórios e estações de tratamento de água. Hidráulica fluvial, ou hidráulica de canal aberto, inclui o estudo de rios, canais artificiais, aquedutos, sendo definida pela presença de uma superfície livre. Nesses casos, a localização de tal superfície livre pode ser variável e se torna um fator fundamental na análise de tais fluxos de água. A geometria do canal, as propriedades do fluido, no caso água, e os parâmetros do fluxo são elementos integrantes de tal ciência aplicada (CHANSON, 2004).

Dois elementos principais constituem o estudo do escoamento em canal: a calha, que inclui sua seção, inclinação e rugosidade; e a vazão, volume de água por unidade de tempo presente no fluxo analisado. Destes elementos, derivam-se grandezas utilizadas nos cálculos hidráulicos de tal escoamento, entre elas área molhada, velocidade da água, profundidade da lâmina d'água, além das condições de escoamento (BOTELHO, 2011).

2.2.2. Tipos de escoamento

A classificação dos tipos de escoamento em canais livres segue dois parâmetros principais: tempo e espaço. Quanto ao tempo, o escoamento pode ser permanente ou não-permanente. No primeiro caso, a velocidade em um ponto qualquer da seção é constante, em módulo e direção, ao longo do tempo e no segundo isso não ocorre. Já quanto ao espaço, o regime de escoamento pode ser uniforme ou não-uniforme. Tal uniformidade ocorre no caso em que as velocidades locais sejam paralelas entre si ao longo de todo o trecho de fluxo (PORTO, 2006).

Dois adimensionais são apresentados, neste trabalho, quanto à classificação dos regimes de escoamento em canais livres: números de Reynolds e de Froude.

Duas forças que atuam sobre o fluxo da água, em canais livres, a de inércia e a de viscosidade, são relacionadas através do número de Reynolds, dado por:

$$Rey = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VR_h}{\nu} \quad (1)$$

onde ρ indica a densidade da água (kg/m^3), V a velocidade média na seção considerada (m/s), L uma dimensão característica (m), μ a viscosidade dinâmica (kg/m.s), R_h o raio hidráulico da seção (m) e ν a viscosidade cinemática de tal fluido. Para escoamento livre, o número de Reynolds permite três tipos de classificação: laminar, quando $Rey < 500$; turbulento, quando $Rey > 2000$; e transição, quando $500 < Rey < 2000$ (PORTO, 2006).

Diferentemente do número de Reynolds, o adimensional de Froude relaciona a força de inércia com a gravitacional, tal que:

$$Fr = \frac{\sqrt{\rho V^2 L^2}}{\sqrt{\rho L^3 g}} = \frac{V}{\sqrt{gL_c}} \quad (2)$$

onde g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e L_c uma dimensão característica do escoamento (m). Comumente, adota-se a altura hidráulica da seção, H_m (m), como tal dimensão característica. Os três tipos de classificação que se derivam do número de Froude são: subcrítico ou fluvial, caso $Fr < 1$; supercrítico ou torrencial, caso $Fr > 1$; e crítico, caso $Fr = 1$ (PORTO, 2006).

No estudo do escoamento uniforme, a classificação quanto a fluvial, torrencial e crítico também se aplica caso se analise a inclinação crítica, analisada a partir de da propagação de perturbações no curso d'água, seja a montante ou a jusante. Nesse caso, o regime fluvial, de inclinação menor que a crítica, apresenta propagações para ambas direções; o torrencial, de inclinação maior que a crítica, apresenta propagações apenas para jusante; e o crítico, no caso de sua inclinação específica, não apresenta propagações, considerado que o fluxo está em situação limite (BOTELHO, 2011).

2.3. *Parques lineares*

2.3.1. *Conceituação*

O conceito de parques lineares está relacionado com os de ecologia e urbanismo. A utilização de tais parques, como elementos de integração de um sistema urbano, se fortaleceu com o crescimento da vertente ideológica do *novo urbanismo*, principalmente nos aspectos de *infraestrutura verde* e *conservação inteligente*. A ênfase de tal movimento se dá na ecologia, em termos de haver no espaço urbano grandes áreas verdes para integrar vizinhanças, as quais são caracterizadas por ambientes de uso misto, espaços abertos e, ao mesmo tempo, pequenas distâncias entre residências, locais de trabalho e centros comunitários. Tal conceito utiliza os rios e, por consequência, os parques lineares como ambientes de conservação, em contraste com o modelo de avenidas, estacionamentos paralelos e grandes distâncias entre os serviços, o qual se fortaleceu mundialmente no pós-guerra (WALMSLEY, 2005).

2.3.2. *Estudos de caso*

Embora relativamente vanguardista, o modelo de parques lineares se distribuiu internacionalmente, sendo adotado em diversos países e obtendo resultados positivos no controle de enchentes. Austrália (MUGAVIN, 2004), Coreia do Sul (JANG; KANG, 2015), Estados Unidos (FÁBOS, 2004), Portugal (RIBEIRO; BARÃO, 2006), Reino Unido (TURNER, 2006) e Singapura (TAN, 2006) são exemplos de países em que tal modelo foi adotado com sucesso em diversas esferas, como gerenciamento de recursos hídricos, transporte urbano e qualidade de vida.

Dada a correlação com a problemática do canal do rio Granjeiro, dois casos de adoção de parques lineares marginais são estudados como exemplificação de tal modelo: o rio Torrens, em Adelaide, Austrália; e o rio Rahway, em Nova Jersey, Estados Unidos. Ambos são casos de restauração pós-urbana de rios.

2.3.2.1. Rio Torrens

A importância do rio Torrens para a cidade de Adelaide, Austrália, estende-se do âmbito histórico-social à disposição urbana da cidade, como mostrado na Figura 6. Considerado como “a tela onde a cidade foi pintada”, tal rio sofreu degradação ao longo dos anos, devido à intensificação da urbanização, à remoção das matas ciliares, à deposição de esgotos e lixo e à extração de areia. Além de tais mudanças, o Torrens apresenta características agravantes de cheias, como alto gradiente longitudinal e rápido desenvolvimento da vazão de pico após a precipitação. Dessa forma, problemas de enchentes passaram a existir na cidade (MUGAVIN, 2004).

Obras de cunho estrutural foram realizadas sobre o rio, como a canalização, a retificação e o alargamento do leito. Entretanto, elas apenas intensificaram a problemática, por acelerar o fluxo e aumentar as áreas de vulnerabilidade dentro do mapa de cheias. Como solução para tal questão hídrica, adotou-se o modelo de parque linear, reintegrando o rio, no seu estado natural, ao planejamento urbano. Com cerca de 50 quilômetros de comprimento, o parque é 40% urbano. Ainda segundo Mugavin (2004, p. 223, tradução nossa):

“Demandado devido a diversas questões estratégicas e a mudanças de atitudes, um plano para a reinstalação do corredor natural do rio foi desenvolvido no final dos anos 1970, de objetivos prioritários de planejamento urbano.”

Dessa forma, o parque linear se torna parte de uma mudança comportamental social do final do século XX, no qual a população passa a atuar mais fortemente nas questões ambientais e, assim, o poder público passa a priorizar soluções de cunho sustentável. Além de recuperar áreas de cheias, mostradas na Figura 7, e, assim, mitigar enchentes, o parque tem funções de recreação, refúgio urbano, conservação de *habitats*, melhoria da qualidade da água e conservação do patrimônio cultural e histórico de Adelaide.

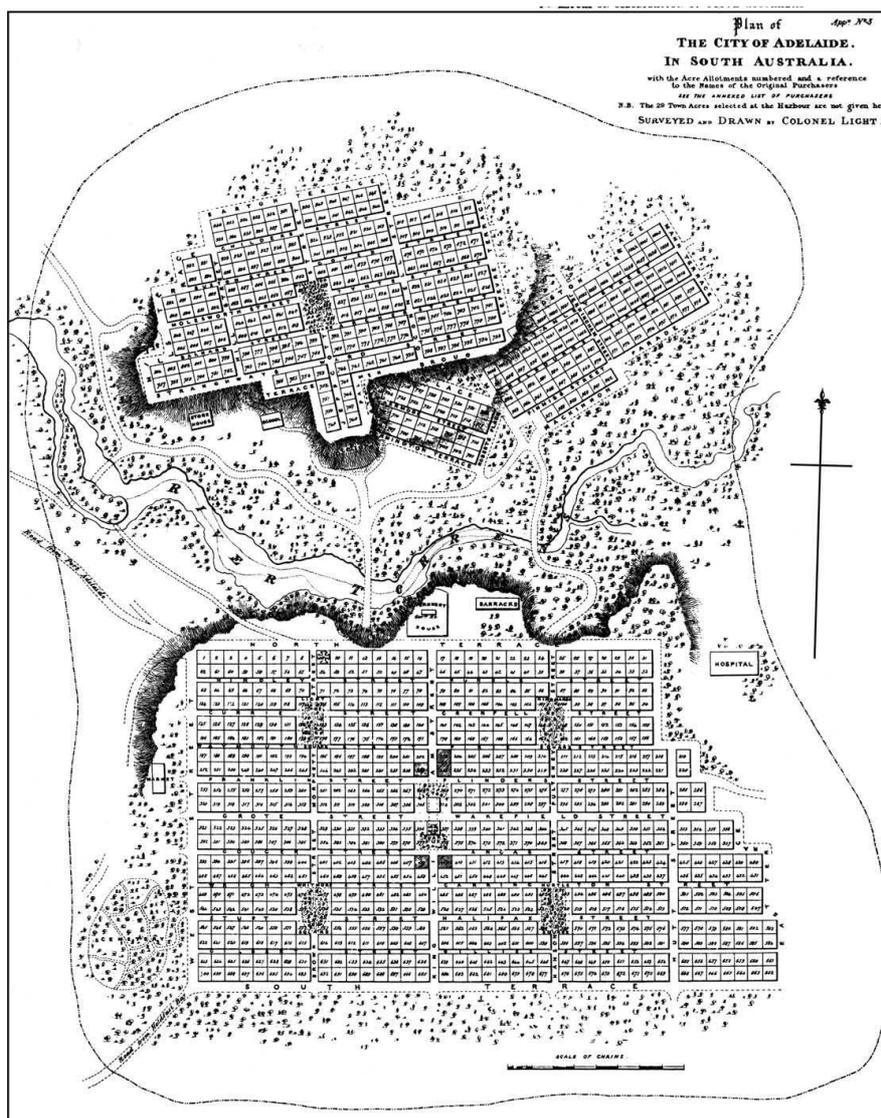


Figura 6: Plano da cidade de Adelaide, 1837, mostrando a importância do rio Torrens, ao centro, para a ocupação urbana de tal cidade. (Fonte: MUGAVIN, 2004 *apud* LIGHT, 1837)



Figura 7: Parque linear do rio Torrens, 2002, mostrando áreas que são submergidas em casos de cheias, sem danos às comunidades locais. Ao fundo, é mostrado um corredor de ônibus. (Fonte: MUGAVIN, 2004)

2.3.2.2. *Rio Rahway*

Outro exemplo de caso de recuperação do leito natural de um rio urbano para, com sucesso, mitigar enchentes é o rio Rahway, na cidade de mesmo nome, nos Estados Unidos. Em tal caso, o processo de urbanização avançou sobre as áreas inundáveis do rio, causando severos danos aos habitantes locais. Como solução, o poder público realocou tais cidadãos e recuperou as áreas marginais do rio, na forma de um parque urbano. As Figuras 8 e 9 mostram, respectivamente, a situação urbana original e o plano de recuperação através da implantação de um parque.



Figura 8: Fotografia aérea da cidade de Rahway, com a área destinada ao parque destacada dentro das linhas brancas. Área amarela representa planícies de cheias e os pontos amarelos os picos de cheias no rio Rahway.

(Fonte: OBROPTA; KALLIN, 2003)



Figura 9: Conceito arquitetônico do parque marginal do rio Rahway.

(Fonte: OBROPTA; KALLIN, 2003)

O parque, de 18.211 m² de área, restaurou a área do rio, provendo melhor retenção das águas da chuva, recuperação da fauna local e melhoria da qualidade da água, através de filtração natural de poluentes de precipitação. Destaca-se, no caso do rio Rahway, a importância da questão educacional, sendo o parque utilizado como um instrumento de conscientização da população sobre o respeito da comunidade quanto às águas do seu rio local (OBROPTA; KALLIN, 2003).

2.3.3. Integração com o espaço urbano

Além da questão hídrica de controle de enchentes, o parque linear altera a disposição de uso e ocupação do solo das margens do rio, de modo que a dinâmica da vizinhança é afetada pela nova forma que tal espaço toma. Tal mudança não deve ser ignorada de modo que, na análise de tal modelo como solução hídrica, o aspecto urbanístico deve ser estudado.

Como mostrado nos estudos de caso, diversos aspectos sócio-urbanísticos são contemplados: educação e conscientização, refúgio urbano, preservação de fauna e flora nativas e conservação do patrimônio histórico-cultural são exemplos disso. De maneira metodológica, seis aspectos podem ser analisados: limpeza, naturalidade, estética, segurança, acesso e apropriação do desenvolvimento (GOBSTER; WESTPHAL, 2004).

A metodologia de análise de tais aspectos varia de acordo com as peculiaridades deles. Por exemplo, limpeza, num sentido de qualidade da água, pode ser medida de acordo com indicadores biofísicos, como presença de oxigênio e espécies nativas de peixes na água. Já estética varia de acordo com a percepção da comunidade local e seus padrões são diversos. Todos os aspectos, denominados dimensões humanas, são considerados no presente trabalho, por sua importância complementar quanto à análise da solução hídrica adotada e de seus impactos sobre a comunidade.

2.4. Drenagem urbana

O conceito tradicional de drenagem urbana está relacionado com a retirada das águas pluviais da cidade o mais rápido possível, normalmente através de medidas

estruturais, como sarjetas e galerias. Tal conceito se mostra ineficiente na tratativa das águas urbanas, por ter um enfoque limitado. Dessa forma, sua adoção resulta em problemas sociais, como enchentes, e altos custos com obras e reconstruções (PORTO *et al*, 2000).

Segundo Botelho (2011), duas concepções antagônicas para a questão da drenagem urbana, quanto a rios urbanos, contrastam-se no Brasil: avenidas de fundo de vale e parques públicos marginais. A primeira solução, largamente utilizada, libera áreas para o sistema viário e para o mercado imobiliário, fortalecendo a facilidade de escolha dela por parte dos modelos de urbanização. Entretanto, seus custos as tornam inviáveis a longo prazo, devido aos impactos das enchentes. Dessa forma, a segunda opção, embora ainda discreta em termos de adoção no país, se mostra como modelo de drenagem urbana mais adequado. A Figura 10 contrasta ambas as opções.



Figura 10: Opções antagônicas de modelos de drenagem urbana.

(Fonte: BOTELHO, 2011)

Os impactos do processo de urbanização sobre os cursos d'água devem ser compreendidos para a tomada de decisões quanto à determinação de diretrizes e ao dimensionamento do sistema de drenagem. O ábaco da Figura 11 e a Tabela 1 indicam as consequências de diversas mudanças acarretadas pela urbanização. O ábaco mostra que, por exemplo, para uma região 20% urbanizada, em termos de área e presença de condutos, o volume de água aumenta em 50% se comparado ao de condições naturais. Para casos extremos de urbanização, tal volume aumenta em cerca de 6 vezes.

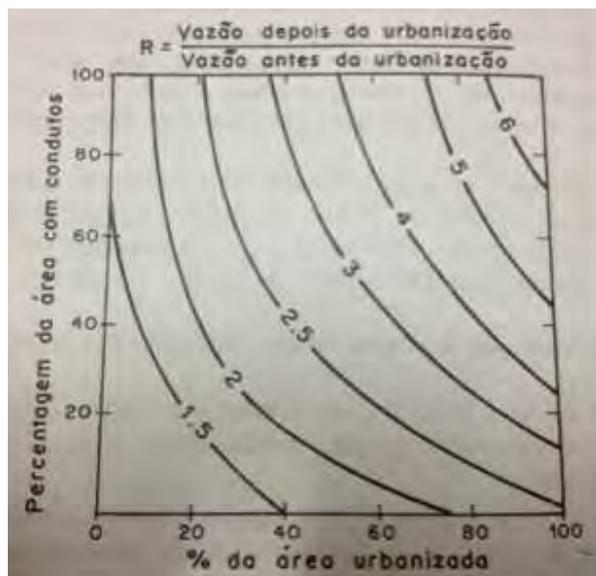


Figura 11: Efeito da urbanização sobre a vazão máxima.

(Fonte: PORTO *et al*, 2000, *apud* LEOPOLD, 1965)

Tabela 1: Efeitos de diversas mudanças ocasionadas pelo processo de urbanização.

(Fonte: PORTO *et al*, 2000)

Causas	Efeitos
Impermeabilização	Maiores picos e maiores vazões
Redes de drenagem	Maiores picos a jusante
Lixo	Degradação da qualidade da água Entupimento de bueiros e galerias
Redes de esgoto deficientes	Degradação da qualidade da água Moléstias de veiculação hídrica Inundações: consequências mais sérias
Desmatamento e desenvolvimento indisciplinado	Maiores picos e volumes Mais erosão Assoreamento em canais e galerias
Ocupação das várzeas	Maiores prejuízos Maiores picos Maiores custos de utilidades públicas

Nas últimas décadas, diversos conceitos têm sido desenvolvidos com o intuito de se mudar a concepção tradicional de drenagem urbana e, assim, torná-la mais focada no âmbito da sustentabilidade. Entre eles estão: *best management practices*, BMP, cujo foco é a redução dos picos volumétricos de águas pluviais; *low impact development*, LID, cujas práticas incluem processos de recuperação de leitos de rios e restauração ao estado natural; *sustainable urban drainage system*, SUDS, focado no design dos sistemas de drenagem, de modo a se evitar a transferência de impactos; e *water sensitive urban design*, WSUD, uma abordagem mais holística dos sistemas de drenagem, cujas considerações incluem não só soluções de engenharia, mas também outras áreas, como um entendimento social, legal e cultural da região (MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2014).

2.5. Modelagem hidráulica

Para se compreender os impactos da implantação do parque linear marginal sobre o rio, em termos de seu comportamento hidráulico, sua modelagem torna-se fundamental. Dessa forma, utilizou-se o *software* HEC-RAS em tal processo, obtendo-se dados que permitem uma descrição detalhada do fluxo de água no rio sob diferentes cenários de chuvas.

2.5.1. HEC-RAS

O HEC-RAS, do *U.S. Army Corps of Engineers*, ou HEC-RAS, é um *software* que permite a simulação unidimensional de rios de regimes permanentes e não-permanentes, cálculos de transporte de sedimentos, computações de leito móvel e modelagem de temperatura da água. Desenvolvido no *Hydrologic Engineer Center*, uma divisão do *Institute for Water Resources*, instituto referente ao exército americano, tal *software* é de domínio público, o que facilitou sua adoção nos mais diversos segmentos de estudos hidráulicos (USACE, 2010).

No presente trabalho, utiliza-se a ferramenta de simulação hidráulica de um rio sob regime permanente, não sendo analisadas as outras ferramentas do *software*, como análises de sedimentos, leitos móveis e temperatura da água. Além disso, o

presente modelo trabalha com unidades do SI, de acordo com a opção oferecida pelo *software*.

2.5.1.1. *Dados de entrada*

Na modelagem hidráulica sob regime permanente, o HEC-RAS requer três categorias principais de dados de entrada: geometria do rio, sendo seus integrantes as seções transversais e os comprimentos longitudinais entre elas; coeficientes de perdas de energia, no caso por atrito, contração e expansão; e dados hidrológicos, referentes às vazões máximas dos cenários de chuvas analisados.

Como os coeficientes de contração e expansão são considerados constantes independente do cenário analisado, pela consideração da homogeneidade do fluido analisado, os coeficientes de Manning se tornam o único dado de perda de energia relevante em termos de escolha de projeto para a modelagem hidráulica.

Os valores referentes à contração e à expansão, para regime permanente, são dados como o padrão do modelo de HEC-RAS, sendo de 0,1 e 0,3 respectivamente, levando-se em consideração sua aplicação na equação de energia (USACE, 2010).

2.5.1.2. *Métodos de cálculo*

Para o caso de regime permanente, o HEC-RAS utiliza-se da equação de Bernoulli nos cálculos que relacionam a linha de energia e suas perdas, com o nível da linha d'água e a velocidade média nas seções do canal. Considerando duas seções adjacentes, tal relação é dada por:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} + h_{L(1,2)} \quad (3)$$

onde WS indica o nível da superfície da água (m), α o coeficiente de ponderação das velocidades (adimensional), V a velocidade média (m/s), g a aceleração da gravidade (m/s^2) e h_L a perda de carga hidráulica entre as seções analisadas (m). Tal perda de carga é dada por:

$$h_{L(1,2)} = X \cdot \bar{S}_f + C \cdot \left| \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} \right| \quad (4)$$

onde X é o comprimento longitudinal médio do trecho entre as duas seções transversais analisadas (m), \bar{S}_f a declividade média da linha de energia entre tais seções (m/m) e C o coeficiente de perda por contração ou expansão (adimensional). Para o cálculo referente à declividade da linha de energia, de acordo com a equação de Manning:

$$\bar{S}_f = \left(\frac{n \cdot Q}{k \cdot A \cdot R_h^{2/3}} \right)^2 \quad (5)$$

onde n indica o coeficiente de Manning, Q a vazão (m³/s), k uma constante característica de transformação de unidades de valor 1 para o SI (adimensional), A a área de escoamento (m²) e R_h o raio hidráulico (m). A Figura 12, a seguir, ilustra esquematicamente a equação da energia.

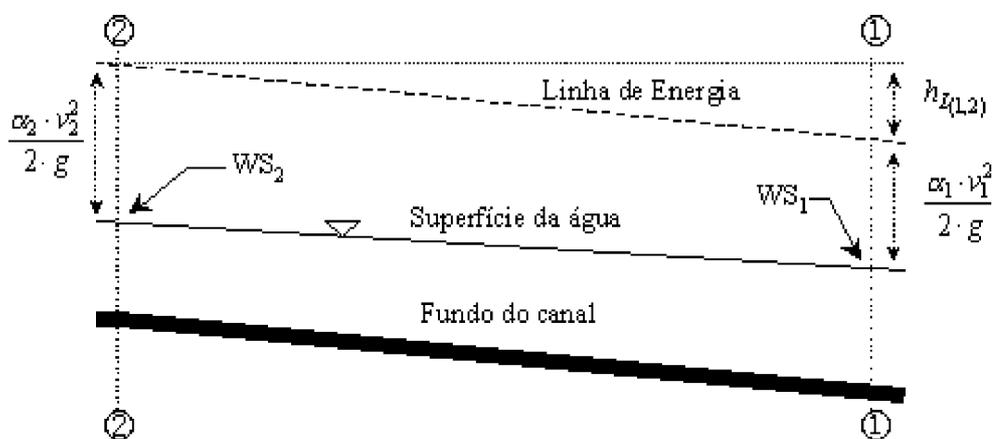


Figura 12: Esquema da linha de energia com relação à superfície da água e ao fundo do canal, mostrando os termos da equação da energia. (Fonte: SILVA, T., 2013)

2.5.1.3. Dados de saída

O HEC-RAS, após processamento dos cálculos, fornece dados de como se encontra o canal em termos de todas as seções transversais analisadas. Tais dados de

saída são apresentados na forma gráfica, sendo o eixo x referente à posição longitudinal no canal, ou na forma de tabela. Há opção de diversas variáveis de saída, referentes ao modelo do canal. No presente trabalho, três variáveis são analisadas como dados de saída: velocidade média, número de Froude e altura da lâmina d'água. A escolha de tais variáveis se dá devido à problemática analisada e é detalhada no item 4.1. *Resultados da modelagem hidráulica do parque do rio Granjeiro.*

3. Rio Granjeiro

O estudo do rio Granjeiro, em especial do seu trecho urbano, deve conter uma fundamentação teórica quanto à caracterização da sua bacia. Além disso, discussão aprofundada da proposta de parque linear requer um estudo hidráulico, elaborado, neste trabalho, através de modelagem em HEC-RAS. São apresentadas, neste capítulo, duas modelagens distintas: a do canal, elaborada por Sá (2015); e, com base nessa primeira modelagem, a do parque, original deste trabalho.

3.1. Caracterização da bacia do rio Granjeiro

A caracterização da bacia do rio estudado, com destaque para o trecho urbano, é feita através de estudo da literatura existente, compreendendo-se sua caracterização em termos de geografia, regime de chuvas e geomorfologia. Por fim, descreve-se o atual canal de concreto do rio Granjeiro, no seu estado mais recente.

A importância de tal estudo se dá na análise hidrológica que embasa as modelagens hidráulicas, visto que é necessário um entendimento da problemática, no caso o fenômeno das enchentes, e suas causas, no caso o regime de chuvas da bacia atrelado ao processo de urbanização da cidade de Crato.

3.1.1. Geografia

A bacia do rio Granjeiro, principal rio urbano da cidade de Crato, Ceará, inicia-se na Chapada do Araripe e termina no rio Batateiras. Ela está inserida na bacia hidrográfica do Salgado, segundo classificação da COGERH. Sua área de contribuição é de 18,54 km² (MOREIRA, 2013) ou 18,35 km² (LIMA NETO *et al*, 2008), incluindo diversos tipos de uso e ocupação do solo, por abranger tanto área rural, de fazendas e reserva ambiental, como urbana. Tal bacia é dividida em 9 sub-bacias, quanto ao seu estudo hidrológico (MOREIRA, 2013).

Sua localização é ilustrada na Figura 13, e, na Figura 14, o mapa de uso e ocupação do solo é apresentado.

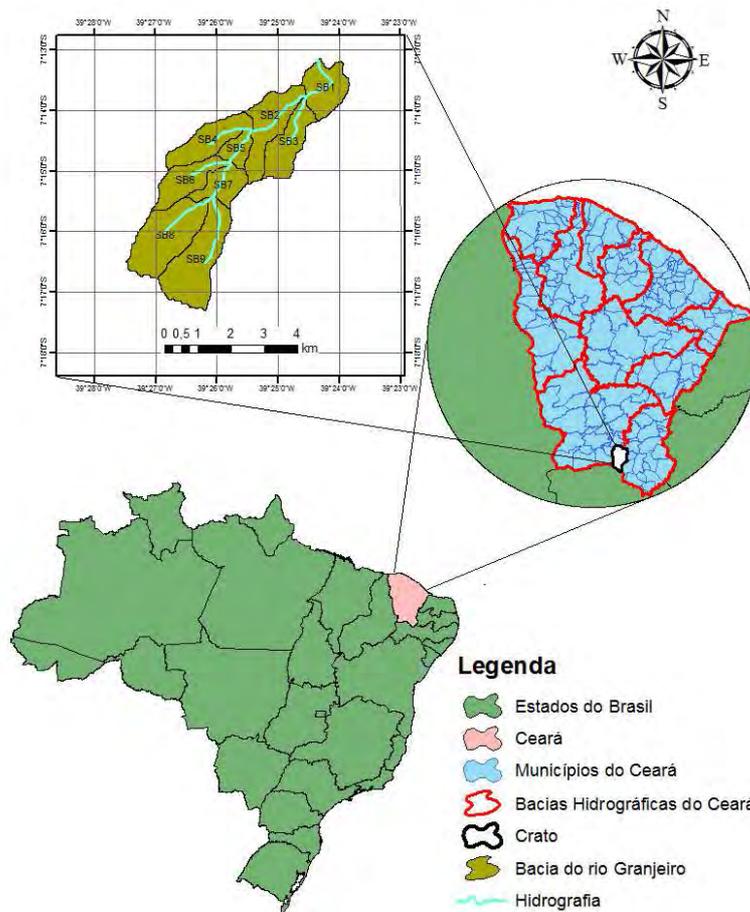


Figura 13: Localização da bacia hidrográfica do rio Granjeiro.

(Fonte: MOREIRA, 2013)

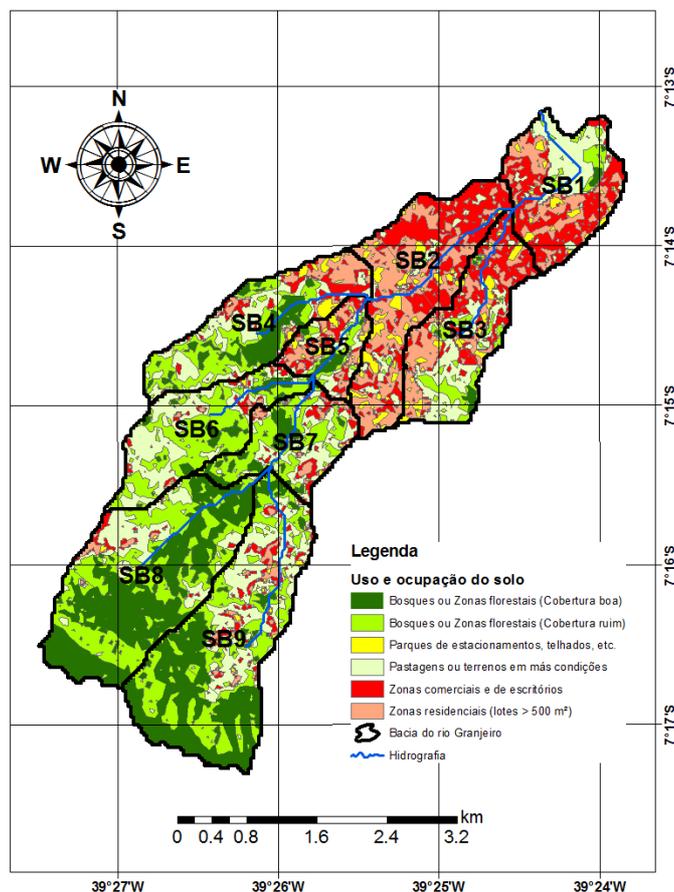


Figura 14: Mapa de uso e ocupação do solo, bacia do rio Granjeiro.

(Fonte: MOREIRA, 2013)

3.1.2. Regime de chuvas

Por sua localização geográfica, no sopé da Chapada do Araripe, o regime de chuvas da cidade de Crato difere consideravelmente do regime da região do semi-árido. O clima em tal localização é tropical quente subúmido e tropical quente semi-árido brando. A distribuição das chuvas é dividida entre a pré-estação, de dezembro a janeiro e que contribui com 23% da precipitação anual, e a estação chuvosa, de fevereiro a maio, cuja contribuição é de 62% de tal total. Seu curso d'água se apresenta como perene devido à presença de nascentes na Chapada, além da de águas subterrâneas (LIMA NETO *et al*, 2008).

A média de precipitação anual, em termos de intensidade, é de 1.130,7 mm, com um desvio padrão amostral de 276,4 mm. (MOREIRA, 2013) A distribuição das frequências de chuvas é mostrada na Figura 15.

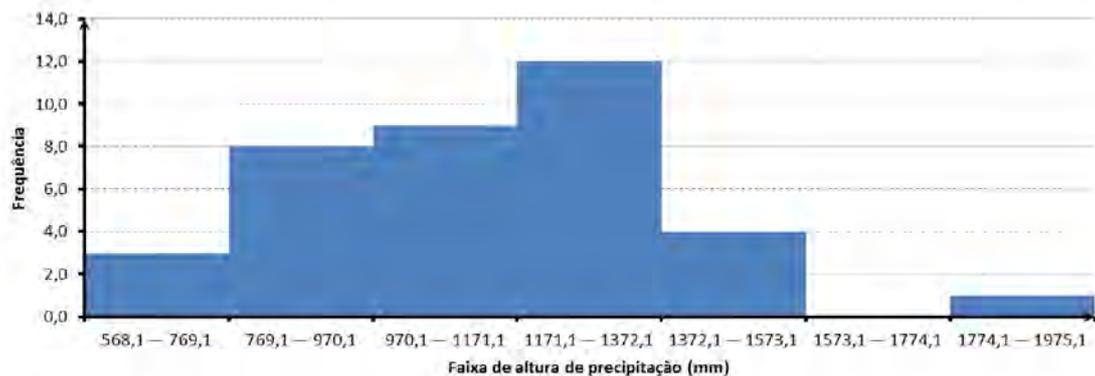


Figura 15: Frequências de chuvas totais anuais, no município de Crato, dados da série histórica de 1974 a 2011. (Fonte: MOREIRA, 2013)

3.1.3. Geomorfologia

As declividades, na bacia do rio Granjeiro, são consideráveis, principalmente dada a topografia acidentada de tal rio, do seu início na Chapada ao seu exutório. Com variações de 953 m a 399 m de altitude, tais declividades se mostram fatores importantes na caracterização das vazões de pico de tal bacia. As Figuras 16 e 17 mostram a distribuição das declividades e das altitudes na bacia estudada, dividida em sub-bacias de acordo com o estudo hidrológico de Moreira (2013).

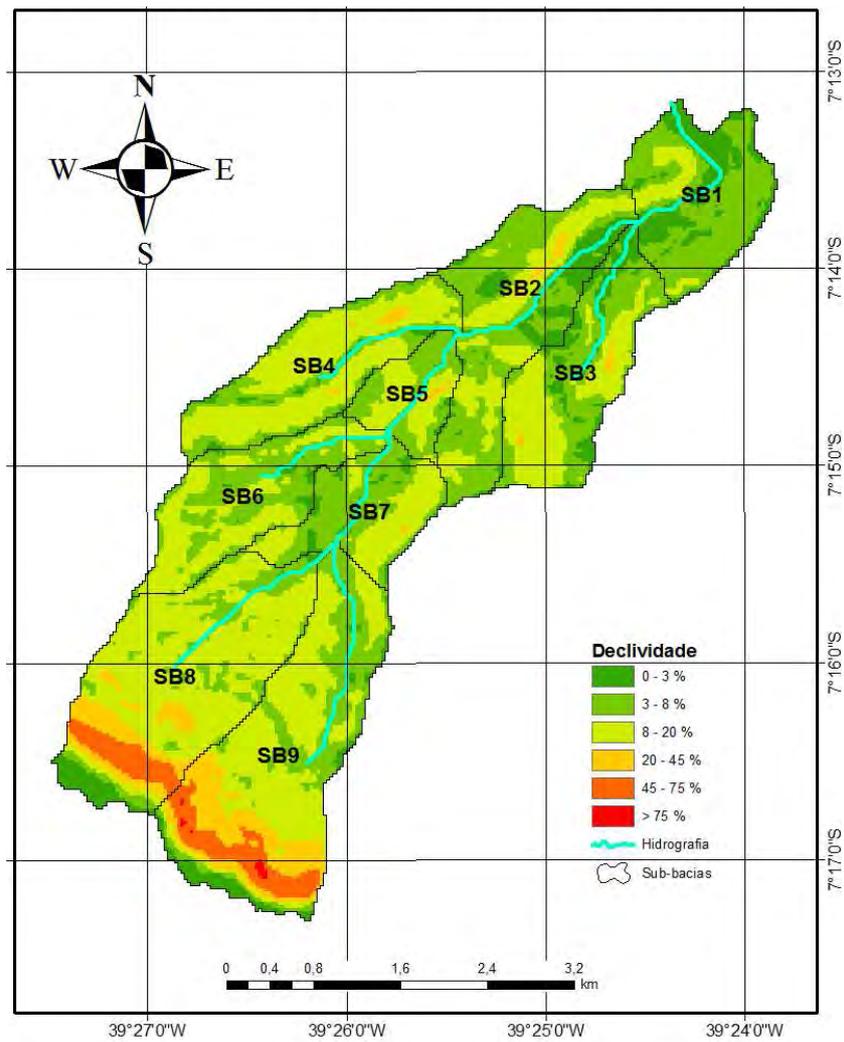


Figura 16: Mapa de declividades, bacia do rio Granjeiro. (Fonte: MOREIRA, 2013)

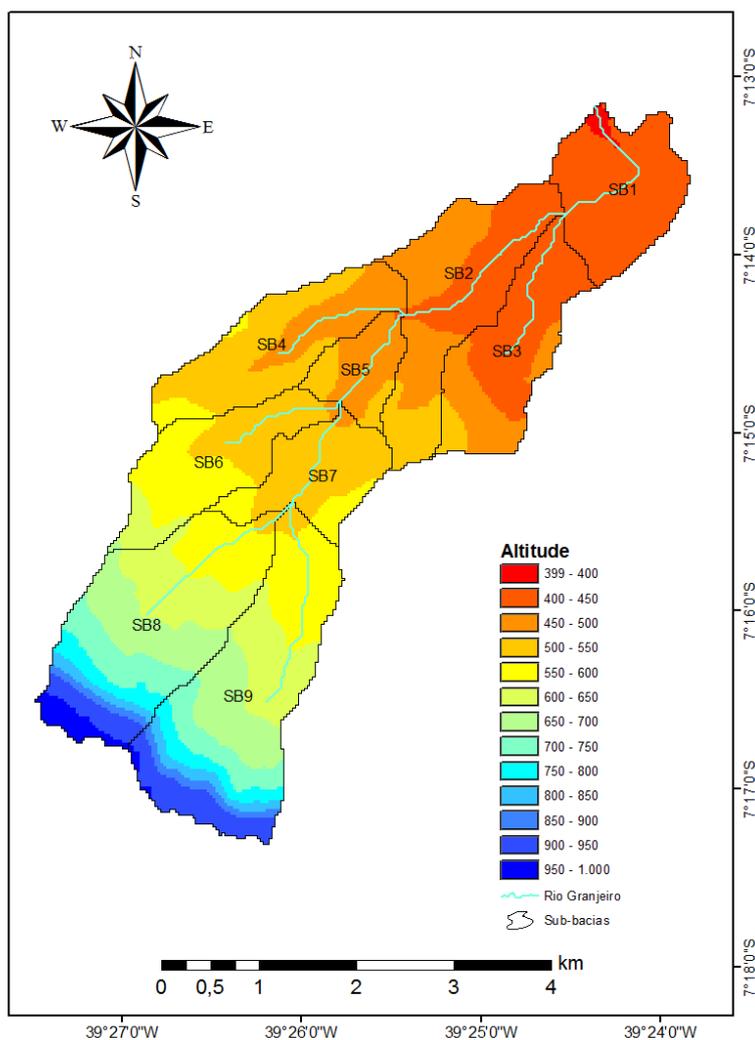


Figura 17: Mapa hipsométrico, bacia do rio Granjeiro. (Fonte: MOREIRA, 2013)

A bacia apresenta, no topo da Chapada, a presença da formação Exu, de arenitos quartzosos, em geral caulínicos, e, na sua encosta, as formações Arajara, de arenitos finos, siltitos e argilitos, e Santana, de calcário, gipsita e folhelhos, são encontradas. No vale há a formação Rio da Batateira, de arenitos com intercalações de lentes de argilas e folhelhos. Já quanto aos solos, são encontrados, majoritariamente, solos aluviais, ou litólicos eutróficos, latossolos vermelho-amarelo e podzólico vermelho-amarelo (LIMA NETO *et al*, 2008).

A Figura 18 apresenta o mapa pedológico da região.

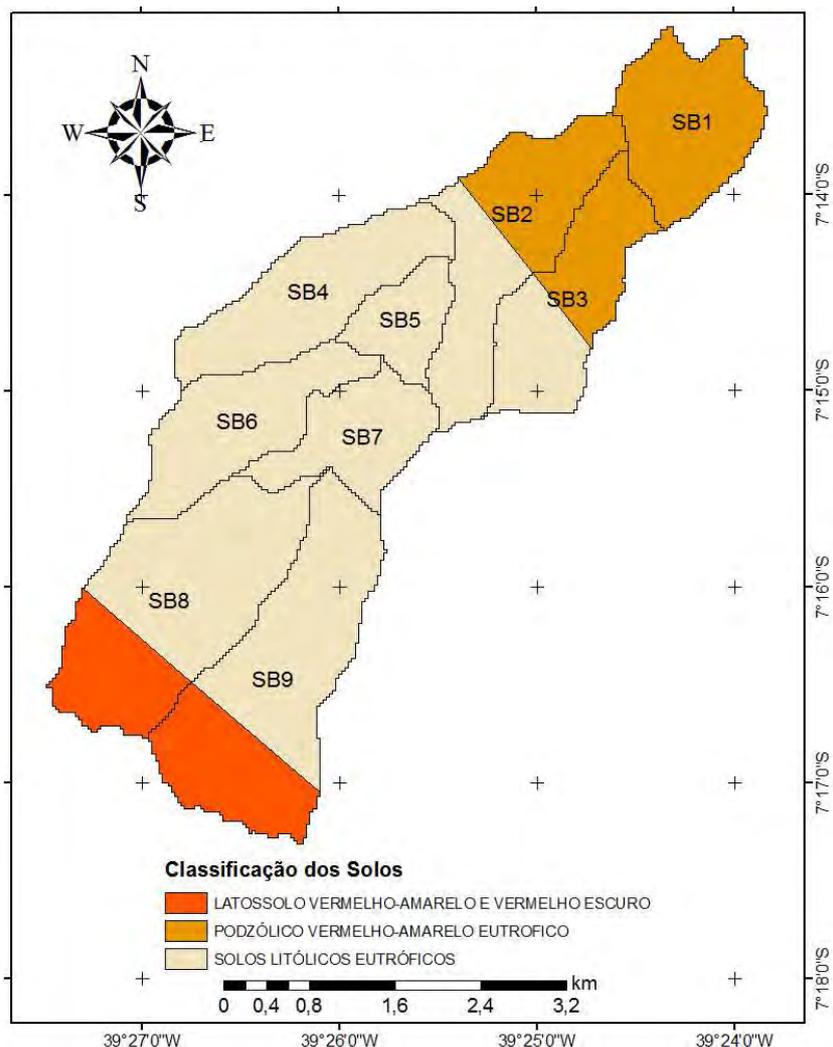


Figura 18: Mapa pedológico, bacia do rio Granjeiro. (Fonte: MOREIRA, 2013)

3.1.4. Canal urbano

O canal do rio Granjeiro, na zona urbana de Crato, tem extensão de 2.242,86 m, com seção de geometria variável, majoritariamente trapezoidal de 10m de base maior, 2,6 de base menor e inclinação lateral 2V:1H (SILVA, T., 2013). Sua geometria sofreu diversas mudanças ao longo do tempo, principalmente por reconstruções estruturais consequentes de eventos de chuva destrutivos. Atualmente, o canal apresenta duas regiões mais distintas: o primeiro quilômetro, com relação à montante, reconstruído e de dimensões maiores, em termos de altura e largura das seções transversais; e o restante do canal, de menores dimensões e maior desgaste das paredes de concreto e do fundo do canal, o qual apresenta maior concentração de rochas e vegetação.

Abrangendo os bairros de Pimenta, Centro e Palmeiral, o canal é caracterizado por uma retificação do curso d'água, efluência de águas pluviais e esgotos no rio e presença de lixo. Além disso, ele apresenta uma avenida marginal.

A montante do canal, o rio segue um curso natural, mas já apresenta poluição, principalmente devido à crescente urbanização nas proximidades de suas margens, embora ainda de densidade inferior à da região canalizada. A jusante, o canal deságua em uma região de acumulação de água. As seções mais a montante e a jusante são mostradas, respectivamente, nas Figuras 19 e 20. As Figuras 21, 22, 23 e 24 mostram trechos intermediários do canal.

Devido ao problema de enchentes urbanas, somado a vazões de altas velocidades, o canal recorrentemente sofre danos e passa por reconstruções estruturais. A questão das enchentes é crítica para a população cratense, principalmente para os residentes ribeirinhos e os comerciantes da região central.



Figura 19: Seção a montante, reconstruída, canal do rio Granjeiro.

(Fonte: SÁ, 2015)



Figura 20: Seção a jusante, não reconstruída, canal do rio Granjeiro.
(Fonte: SILVA, T., 2013)



Figura 21: Trecho intermediário do canal, reconstruído, ilustrando a retificação do curso do rio Granjeiro. (Fonte: Autor)



Figura 22: Trecho intermediário, reconstruído, do canal do rio Granjeiro, ilustrando seções transversais com diferentes dimensões. (Fonte: Autor)



Figura 23: Transição entre o trecho reconstruído, superior, e não reconstruído, inferior, do canal do rio Granjeiro, mostrando estreitamento do leito. (Fonte: SÁ, 2015)

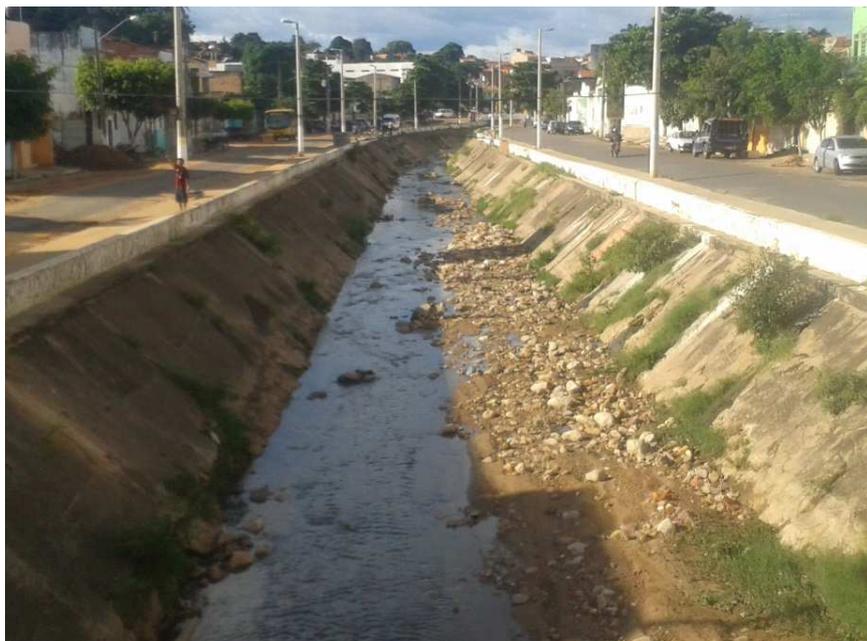


Figura 24: Trecho intermediário, não reconstruído, do canal do rio Granjeiro, apresentando maior desgaste das paredes e sedimentação no fundo. (Fonte: SÁ, 2015)

3.2. Modelagem hidráulica do canal do rio Granjeiro

Segundo a literatura acadêmica mais atualizada, duas modelagens recentes foram feitas quanto ao canal do rio Granjeiro: por Thiago da Silva (2013) e por Sá (2015). Ambos utilizaram como ferramenta o *software* HEC-RAS e apresentaram dados reais das seções transversais e topografia do canal.

O modelo de Sá (2015) apresenta dados mais atualizados, incluindo últimas reconstruções estruturais, finalizadas ao término do ano de 2013, com custo de cerca de R\$ 10 milhões por parte do Governo do Estado do Ceará. Por apresentar os dados mais recentes, o presente trabalho utiliza como base tal modelo.

As considerações feitas, os dados de entrada e a literatura de fundamentação quanto a tal estudo são apresentados a seguir, com o objetivo de se mostrar a base utilizada para o presente trabalho.

3.2.1. Seções transversais: canal

O canal apresenta relativa heterogeneidade geométrica ao longo das suas seções, principalmente graças aos diversos eventos de enchentes destrutivas e suas

consequentes reestruturações. A reconstrução mais recente, por exemplo, se estende apenas ao longo do primeiro quilômetro do canal, com relação à montante. Exemplos de como as seções variam, utilizando-se quatro tipos comuns, são mostrados nas Figuras 25, 26, 27 e 28, a seguir.

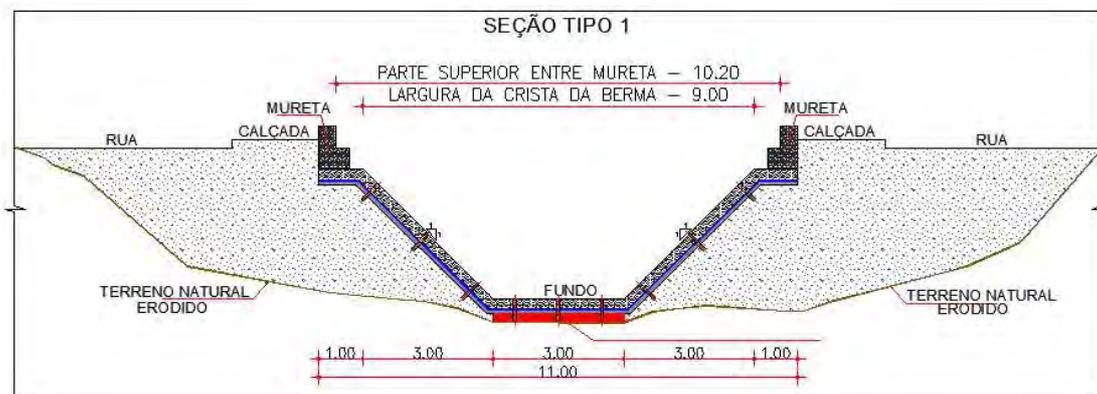


Figura 25: Seção transversal do canal do rio Granjeiro, tipo 1. (Fonte: SÁ, 2015)

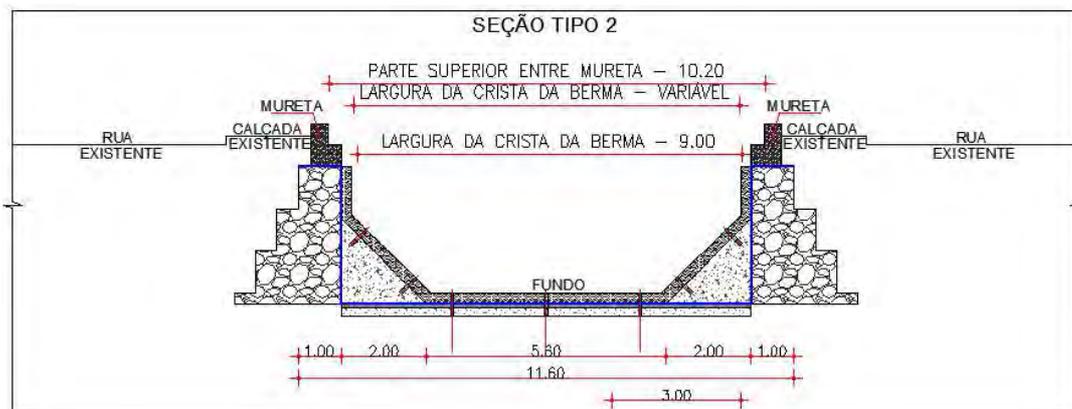


Figura 26: Seção transversal do canal do rio Granjeiro, tipo 2. (Fonte: SÁ, 2015)

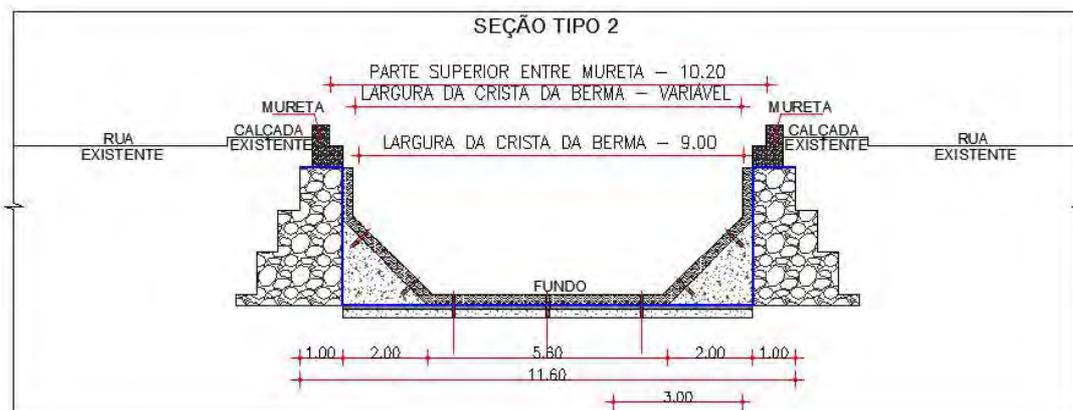


Figura 27: Seção transversal do canal do rio Granjeiro, tipo 3. (Fonte: SÁ, 2015)

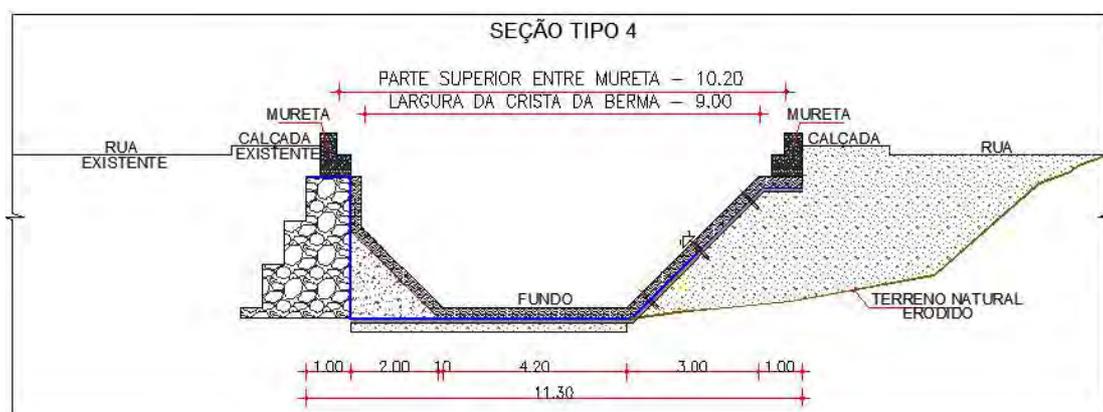


Figura 28: Seção transversal do canal do rio Granjeiro, tipo 4. (Fonte: SÁ, 2015)

Observa-se que o canal não se apresenta de maneira uniforme, tanto em termos dos materiais que suportam a estrutura, com presença de gabiões em alguns trechos, por exemplo, como em termos da sua geometria, havendo diversos trechos de estreitamento do seu leito. O modelo estudado utiliza dados de 136 seções transversais, ao longo de todo o canal.

3.2.2. Coeficientes de Manning: canal

As perdas de energia por atrito são determinadas pelo coeficiente de Manning. O modelo estudado considera os materiais que compõem as paredes e fundo do canal, no caso concreto pré-moldado (n de 0,013) e solo sem revestimento (n de 0,023), sendo este último utilizado apenas para o fundo nas seções não reconstruídas. Os

valores são derivados dos estudos de Ven te Chow (1988), considerando-se valores usuais.

3.2.3. *Dados hidrológicos: canal*

A literatura local apresenta um estudo hidrológico recente, de Moreira (2013), o qual serviu como base para as posteriores modelagens hidráulicas. Tal estudo apresenta resultados de dados de vazões para chuvas com tempos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Em sua concepção, o estudo hidrológico considera distribuição espacial uniforme; distribuição temporal de acordo com o método dos blocos alternados quanto ao hietograma; equação de chuvas intensas do município de Crato; evento com duração igual ao tempo de concentração da bacia analisada, contemplando a vazão máxima no exutório, de acordo com o método SCS, com tempo de simulação de 4 horas e verificação de dados a cada 2 minutos. A limitação de tal estudo se dá pela então falta de dados fluviométricos para estimativa dos fenômenos de propagação, não simulando, assim, o amortecimento no escoamento do rio. O *software* de modelagem hidrológica utilizado em tal estudo foi o *Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS).

Os dados de vazão, resultantes de tal estudo hidrológico, são dados na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2: Vazões para chuvas de diferentes tempos de retorno, bacia do rio Granjeiro.

(Fonte: MOREIRA, 2013)

Tempo de retorno (anos)	5	10	20	50	100
Vazão (m³/s)	189,3	213,7	232,8	256,3	274,4

3.3. *Modelagem hidráulica do parque do rio Granjeiro*

Esta modelagem tem como objetivo fornecer ao presente trabalho um embasamento hidráulico para a proposta de implantação do parque linear marginal. Dessa forma, torna-se fundamental a comparação com a situação presente do canal,

ponderando-se os impactos positivos e negativos da mudança, compreendendo-se como tal proposta se encaixa como solução de engenharia para a problemática analisada.

Utilizando-se como base para elaboração deste modelo o estudo hidráulico de Sá (2015), considera-se que a comparação da situação proposta, parque, com a situação atual, canal, é válida, pois mantém-se constantes todos os parâmetros da simulação, alterando apenas dados de entrada pontualmente, no caso dados de geometria das seções e coeficientes de Manning do canal.

3.3.1. Seções transversais: parque

A presente proposta de implantação de parque linear marginal considera a situação atual do canal do rio Granjeiro como base para sua geometria, com o objetivo de minimizar impactos e custos de execução. As 136 seções propostas por Sá (2015) são utilizadas, sendo alteradas de modo a se adequarem à sua nova condição espacial, comportando instalações comuns a parques urbanos. De tais dados de seções, 98 se localizam na parte reconstruída, com até 1km de distância longitudinal com relação à montante; enquanto 38 nos 1,24km restantes.

Tal adequação ocorre de acordo com o seguinte critério de projeto geométrico adotado: redução de 20 cm de cota nos pontos de borda das seções transversais; extensão lateral de 3,60 m a partir de tais pontos, referentes às planícies de cheia, nas quais o parque terá suas instalações; aumento de cota, nos novos pontos de borda das seções transversais, de 40 cm, referentes à adequação à cota da calçada da pista, considerando presença da mureta de concreto. Um exemplo de tal adequação é mostrado nas Figuras 29 e 30, a seguir, as quais comparam uma seção original, canal, com uma proposta, parque, ambas na mesma localização longitudinal.

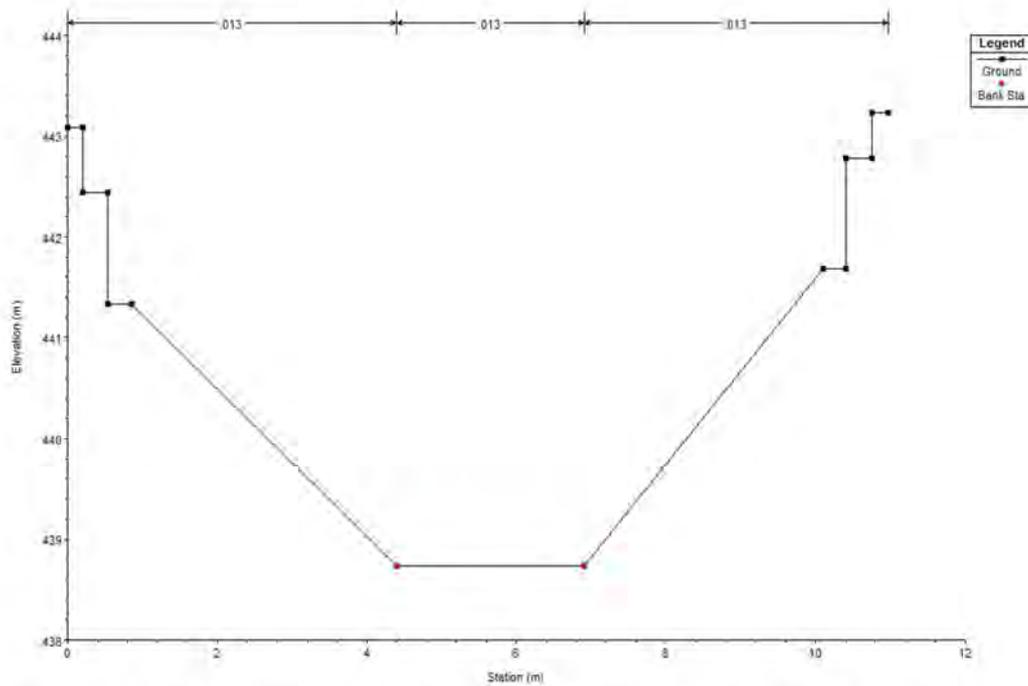


Figura 29: Seção transversal, canal do rio Granjeiro, localizada a 205 m de distância longitudinal da montante, representação do HEC-RAS, com coeficientes de Manning na parte superior. (Fonte: SÁ, 2015)

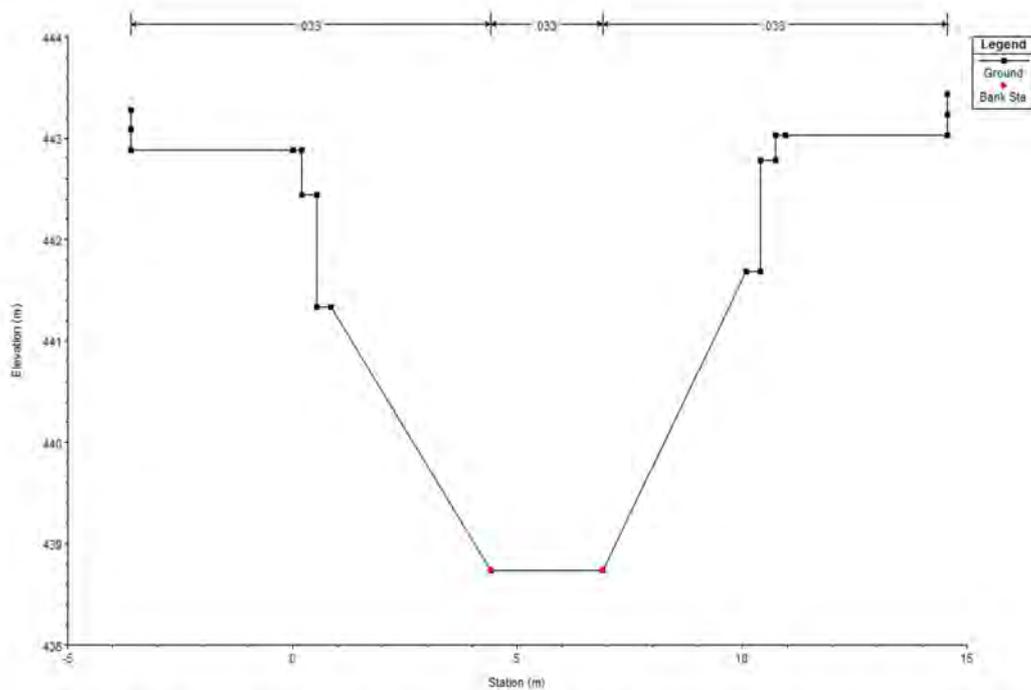


Figura 30: Seção transversal, parque do rio Granjeiro, localizada a 205 m de distância longitudinal da montante, representação do HEC-RAS, com coeficientes de Manning na parte superior. (Fonte: Autor)

As mudanças realizadas sobre as seções tomam como base a disponibilidade espacial na avenida José Alves de Figueiredo, tendo as novas seções, então, as dimensões extras relativas a uma faixa de rolamento, 3,60 m, em cada margem do rio. Tal decisão de projeto tem como fundamentação a questão dos conflitos espaciais e modelos de urbanização. Tal concepção é detalhada na literatura, tal como mostrado no item 2.4. *Drenagem urbana*.

3.3.2. *Coefficientes de Manning: parque*

A alteração dos materiais sobre os quais o rio percorre tem consequências sobre seu fluxo. No caso, uma mudança de uma superfície menos rugosa, concreto, para uma mais, vegetação, acarreta em maiores perdas de energia por atrito, sendo o fluxo da água então “freado” sob a nova perspectiva.

Os coeficientes de Manning adotados na modelagem traduzem tal atrito e permitem os cálculos dos impactos de tal alteração. Na situação original, os coeficientes considerados são de 0,013 para todo o canal, com exceção do fundo das seções não-reconstruídas, de coeficiente 0,023, com base na literatura, sendo tais coeficientes relativos, respectivamente, aos materiais concreto pré-moldado e solo sem revestimento, valores usuais (SÁ, 2015).

A modelagem do parque do rio Granjeiro também se utiliza da literatura na determinação dos coeficientes de Manning. Utilizando os critérios adotados por Ven te Chow (1988), considera-se que a situação proposta com a implantação do parque, por retornar o rio ao seu leito natural e aumentar a presença de vegetação no seu leito, se assemelha a situações com coeficientes de Manning variando de 0,025 a 0,040. Por exemplo, o caso de canais naturais, com larguras menores que 100ft (aproximadamente 30,5m), numa situação de fluxo em planície, relativamente limpo e retilíneo, sem quebras ou acumulações, mas podendo apresentar vegetação natural ou rochas localizadas. Os valores usuais, em tal situação, tal como mostrado na Tabela 3, a seguir, variam de 0,030 a 0,035. O valor de 0,033 foi adotado como padrão para esse caso, baseando-se em tal literatura.

Tabela 3: Valores do coeficiente de Manning
(Fonte: VEN TE CHOW, 1988, tradução nossa)

Canais naturais, largura de topo em estágio de enchente < 30,5m, em planícies	Mínimo	Usual	Máximo
Limpo, retilíneo, estágio de cheia, sem quebras ou acumulações	0,025	0,030	0,033
Como acima, mas com mais rochas e vegetação	0,030	0,035	0,040

3.3.3. *Dados hidrológicos: parque*

Os dados hidrológicos utilizados são derivados do estudo de Moreira (2013), em concordância com os utilizados por Thiago da Silva (2013) e Sá (2015). Assim, os dados são referentes às vazões para chuvas de tempos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos, tal como mostrados na Tabela 2, no item 3.2.3. *Dados hidrológicos: canal*.

Cabe ressaltar que a implantação do parque impacta também na hidrologia da bacia do rio Granjeiro em termos de índices de infiltração e evapotranspiração. Tal impacto diz respeito à retirada das camadas de concreto, canal, e asfalto, avenida, as quais são substituídas por, predominantemente, cobertura vegetal, permitindo maior infiltração da água, amenizando o escoamento superficial. A maior presença de vegetação aumenta também os índices de evapotranspiração, pois eles são diretamente interligados com a área de ocupação e a densidade de tal camada. Os cálculos desses impactos fogem do escopo do trabalho, focado no modelamento hidráulico, e não foram realizados. Destaca-se, no entanto, a relevância desses impactos, de forma a tornar a proposta de implantação do parque ainda mais atrativa, por retirar tamanha camada impermeável em uma região vulnerável ao escoamento superficial, principalmente aquele de altas velocidades e energia.

4. Resultados e discussões

Os resultados do presente trabalho são focados em duas frentes: a primeira voltada à viabilidade hidráulica da proposta de parque linear marginal; a segunda quanto às mudanças urbanísticas propiciadas por tal proposta.

Assim, propõe-se uma discussão ampla do papel do rio Granjeiro para a cidade de Crato, a qual é fundamentada por resultados hidráulicos essenciais para o processo decisório por parte do poder público em termos de um melhor planejamento urbano e busca por soluções para tal problemática das enchentes.

4.1. Resultados da modelagem hidráulica do parque do rio Granjeiro

Como parâmetros analisados após feita a simulação, três são escolhidos para a análise da problemática do rio Granjeiro: velocidade, número de Froude e altura da lâmina d'água. Pelas suas peculiaridades, tal rio, atualmente, apresenta problemas de fluxo com excessiva velocidade e energia, resultando em consequências destrutivas para a cidade, tanto social como estruturalmente. Além desses dois fatores, o transbordamento das águas do canal também faz parte da realidade cratense, de modo que o nível da lâmina d'água e o risco de transbordamento devem ser analisados.

4.1.1. Apresentação e análise dos resultados

Os resultados são claramente influenciados pelo histórico de reconstruções no canal. Dessa forma, a análise de resultados permite uma divisão em dois grupos de fácil visualização, em termos da sua posição longitudinal. O primeiro corresponde a, aproximadamente, o primeiro quilômetro, com relação à montante, região que foi recentemente reconstruída e apresenta maior inclinação longitudinal do seu nível de fundo. O segundo corresponde ao restante do canal, cujas seções apresentam características não reconstruídas: seções de dimensões menores, tanto largura como altura; e maior grau de deterioração das paredes e do fundo do canal.

Foram coletados dados de saída para todos os diferentes tempos de retorno analisados: 5, 10, 20, 50 e 100 anos. Para melhor visualização gráfica, os resultados são apresentados de forma dividida: um gráfico contendo os tempos de retorno de 5,

10 e 20 anos, e outro contendo os de 50 e 100 anos. Além da análise gráfica, outras características foram estudadas: valores médios e máximos para cada parâmetro de saída, de acordo com a divisão nos grupos já descritos.

4.1.1.1. *Velocidade: parque*

As Figuras 31 e 32, a seguir, mostram os resultados da simulação do parque do rio Granjeiro, quanto à velocidade.

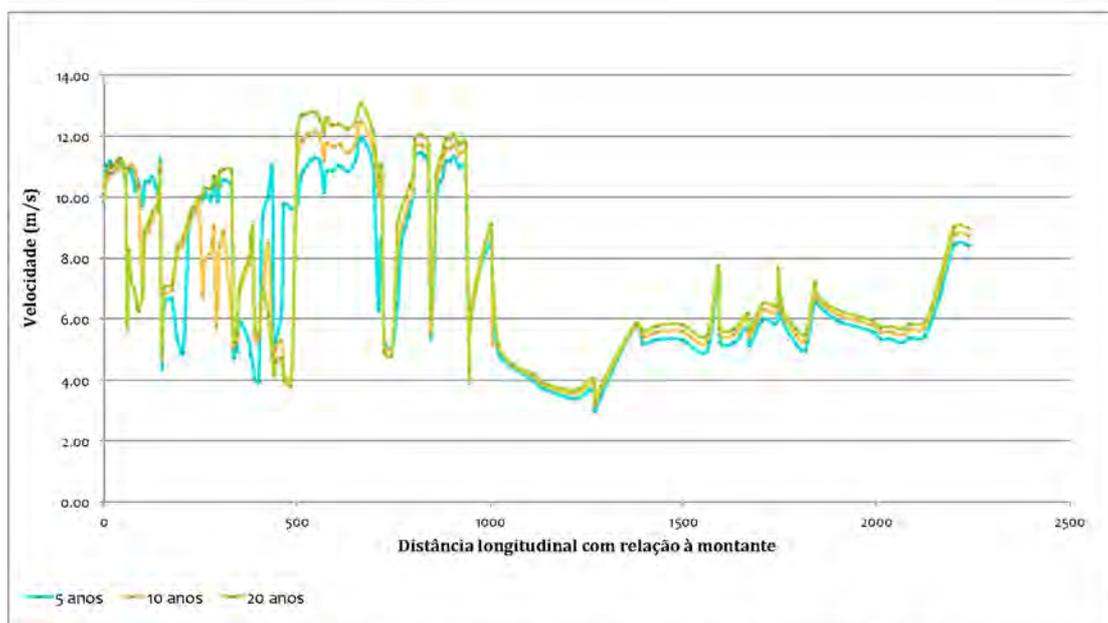


Figura 31: Gráfico das velocidades para a simulação do parque do rio Granjeiro, tempos de retorno de 5, 10 e 20 anos. (Fonte: Autor)

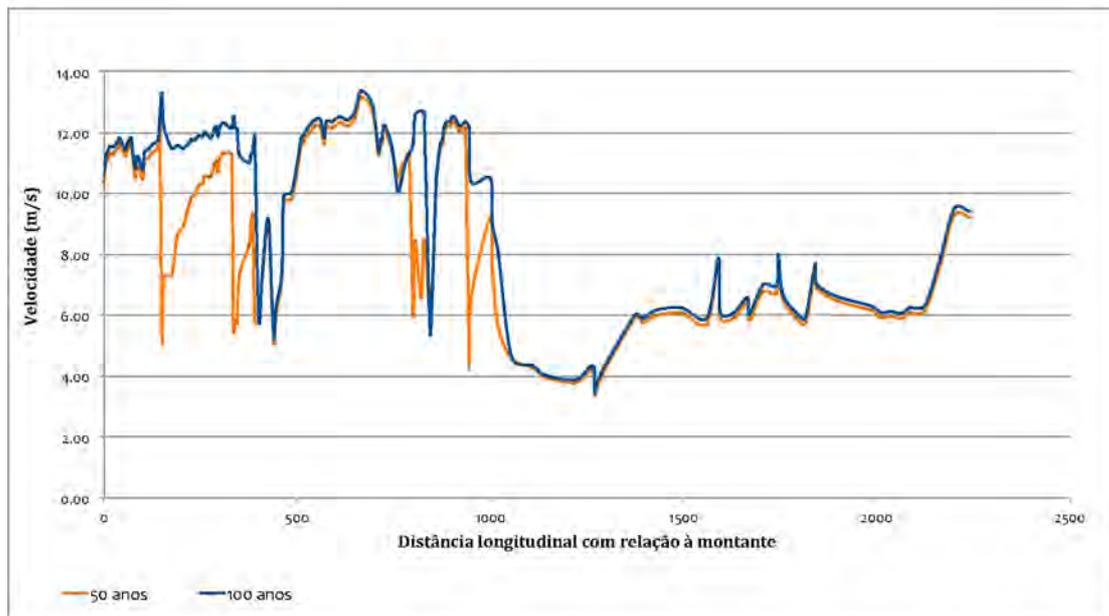


Figura 32: Gráfico das velocidades para a simulação do parque do rio Granjeiro, tempos de retorno de 50 e 100 anos. (Fonte: Autor)

Os gráficos deixam clara a heterogeneidade longitudinal do canal, entre o trecho reconstruído, referente ao primeiro quilômetro, e o não reconstruído, restante do canal. Além disso, percebe-se uma oscilação significativa dos valores de velocidade, principalmente no primeiro trecho, no qual há seções com seguidos estreitamentos e alargamentos, além de ser caracterizado como a região mais íngreme do canal. Dessa forma, além das oscilações nos valores, é explicitado que eles são de intensidade maior em tal trecho, como esperado por suas características de inclinação.

Quanto aos diferentes tempos de retorno, espera-se que, chuvas de maior tempo de retorno apresentem valores de velocidade mais elevados. Em geral, tal crescimento ocorre, embora haja oscilações no primeiro trecho, no segundo é mais visível a relação entre os tempos de retorno.

A Tabela 4, a seguir, mostra uma análise da compilação de tais dados, em termos de velocidades máximas e médias, divididas entre os dois grupos, trecho reconstruído e não reconstruído. Além disso, é feita uma análise da velocidade média no rio como um todo, representado por uma média ponderada entre tais grupos, sendo o comprimento longitudinal o peso em tal cálculo.

Tabela 4: Velocidades máximas e médias no cenário de simulação do parque do rio Granjeiro. (Fonte: Autor)

Análise	Parâmetro	TR = 5 anos	TR = 10 anos	TR = 20 anos	TR = 50 anos	TR = 100 anos
Trecho reconstruído	$V_{\text{média}}$ (m/s)	9,17	9,09	9,37	10,03	11,27
	$V_{\text{máx}}$ (m/s)	11,94	12,46	13,06	13,16	13,37
Trecho não reconstruído	$V_{\text{média}}$ (m/s)	5,55	5,75	5,98	6,18	6,45
	$V_{\text{máx}}$ (m/s)	8,46	8,81	9,11	9,29	10,48
Compilado	$V_{\text{média}}$ (m/s)	7,17	7,24	7,49	7,90	8,60

4.1.1.2. Número de Froude: parque

As Figuras 33 e 34, a seguir, mostram os resultados da simulação do parque do rio Granjeiro, quanto ao número de Froude.

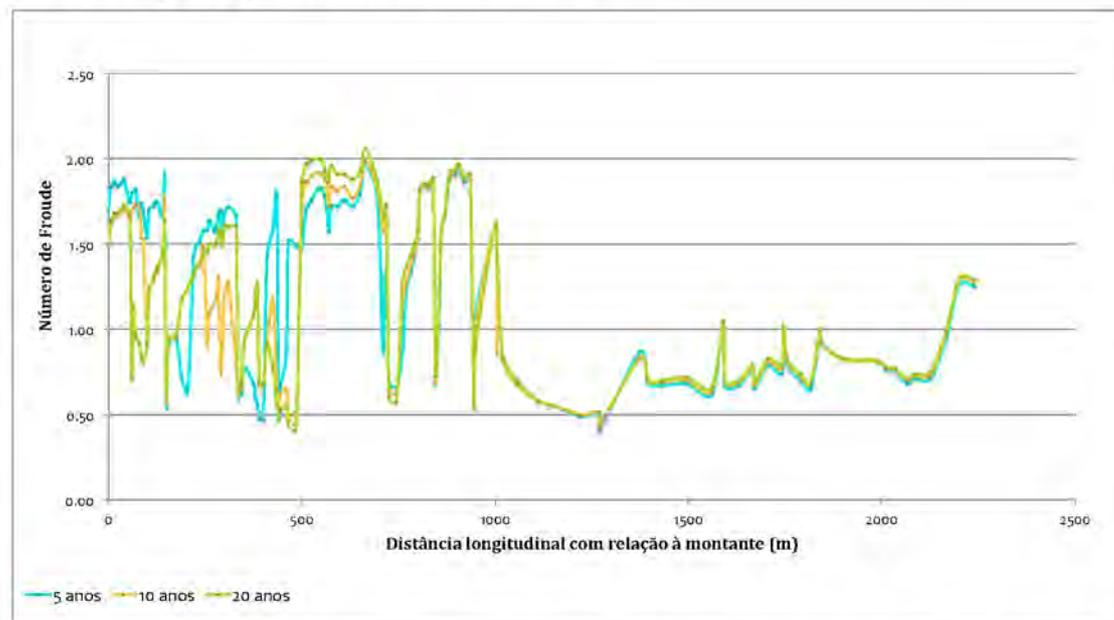


Figura 33: Gráfico dos números de Froude para a simulação do parque do rio Granjeiro, tempos de retorno de 5, 10 e 20 anos. (Fonte: Autor)

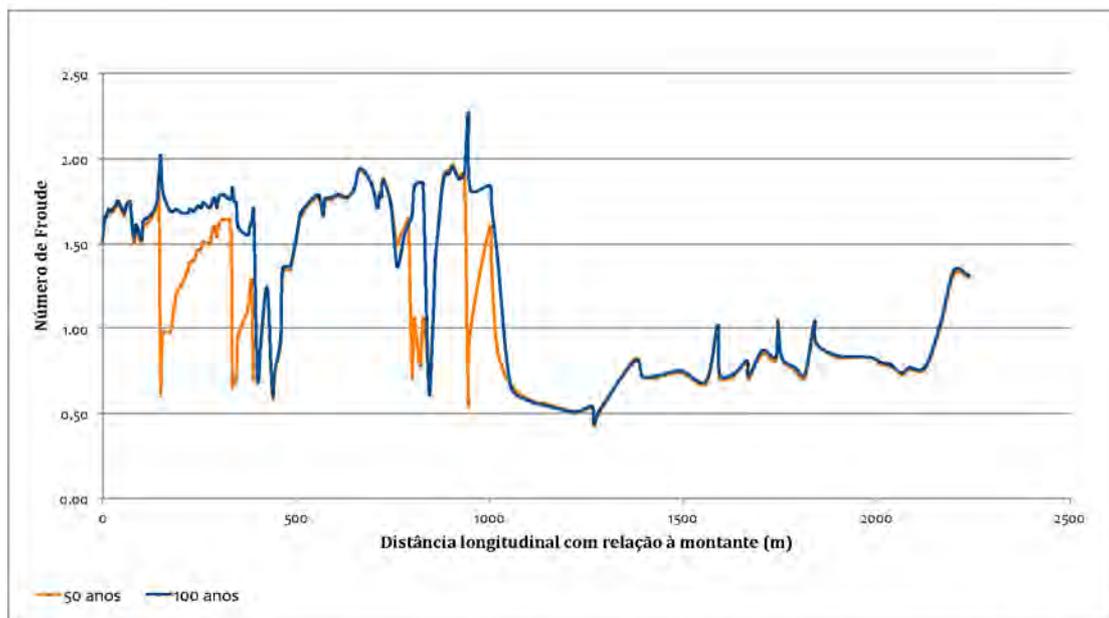


Figura 34: Gráfico dos números de Froude para a simulação do parque do rio Granjeiro, tempos de retorno de 50 e 100 anos. (Fonte: Autor)

A Tabela 5, a seguir, mostra uma análise da compilação de tais dados, também com divisão em grupos e compilação dos dados para o valor médio. Além disso, tal tabela fornece dados da porcentagem de seções em que ocorre escoamento supercrítico, caracterizado por número de Froude maior do que 1.

Como esperado, o comportamento do número de Froude acompanha aquele da velocidade, incluindo as oscilações no trecho reconstruído e a redução significativa nos valores no não reconstruído. A diferença entre os tempos de retorno, no segundo trecho, fica menos visível, já que, para o número de Froude, os valores encontrados apresentam-se como mais próximos.

Tabela 5: Números de Froude máximos e médios no cenário de simulação do parque do rio Granjeiro, incluindo porcentagem de seções com escoamento supercrítico.

(Fonte: Autor)

Análise	Parâmetro	TR = 5 anos	TR = 10 anos	TR = 20 anos	TR = 50 anos	TR = 100 anos
Trecho reconstruído	$Fr_{\text{médio}}$	1,44	1,36	1,37	1,44	1,63
	$Fr_{\text{máx}}$	1,97	1,99	2,06	1,96	2,27
	Escoamento supercrítico (%)	76,53	74,49	71,43	79,59	91,84
Trecho não reconstruído	$Fr_{\text{médio}}$	0,79	0,79	0,82	0,82	0,86
	$Fr_{\text{máx}}$	1,58	1,59	1,62	1,59	1,84
	Escoamento supercrítico (%)	13,16	13,16	15,79	21,05	23,68
Compilado	$Fr_{\text{médio}}$	1,08	1,04	1,06	1,10	1,20
	Escoamento supercrítico (%)	41,45	40,54	40,63	47,19	54,11

Embora com resultados de caráter semelhante aos da velocidade, como explicitado no item 2.2.2. *Tipos de escoamento*, ressalta-se que a importância do número de Froude se dá na classificação do tipo de escoamento, no caso, as seções que apresentam escoamento supercrítico apresentam fluxo torrencial, com maior energia e, assim, maior risco estrutural ao leito do rio.

4.1.1.3. *Altura da lâmina d'água: parque*

As Figuras 35 e 36, a seguir, mostram os resultados da simulação do parque do rio Granjeiro, quanto à altura da lâmina d'água. Os gráficos também apresentam o nível de fundo do rio.

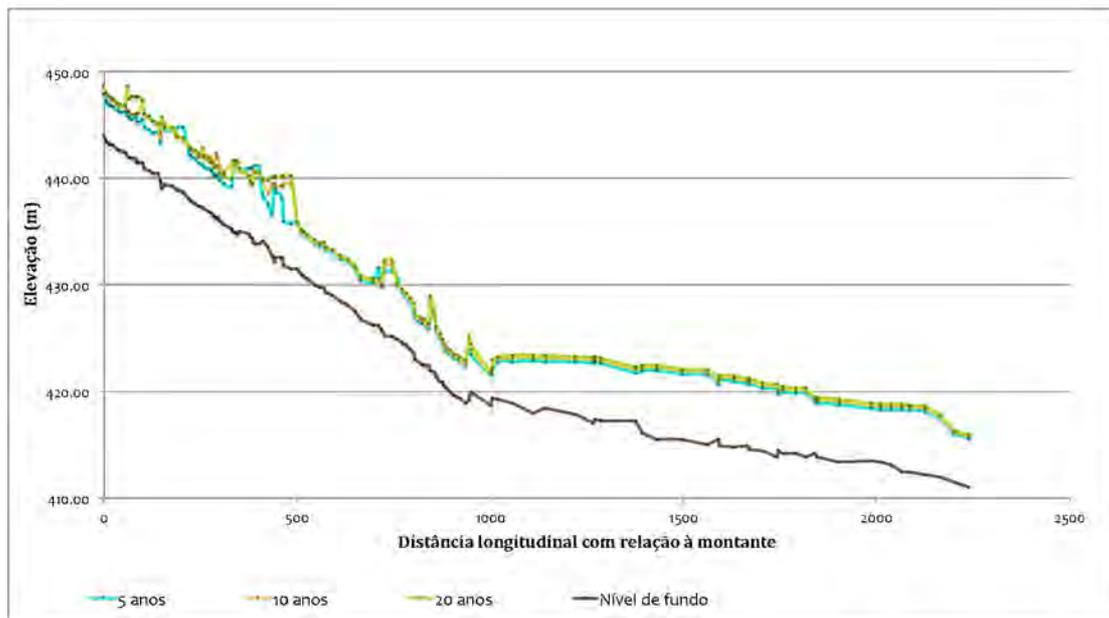


Figura 35: Gráfico das alturas da lâmina d'água para a simulação do parque do rio Granjeiro, tempos de retorno de 5, 10 e 20 anos. (Fonte: Autor)

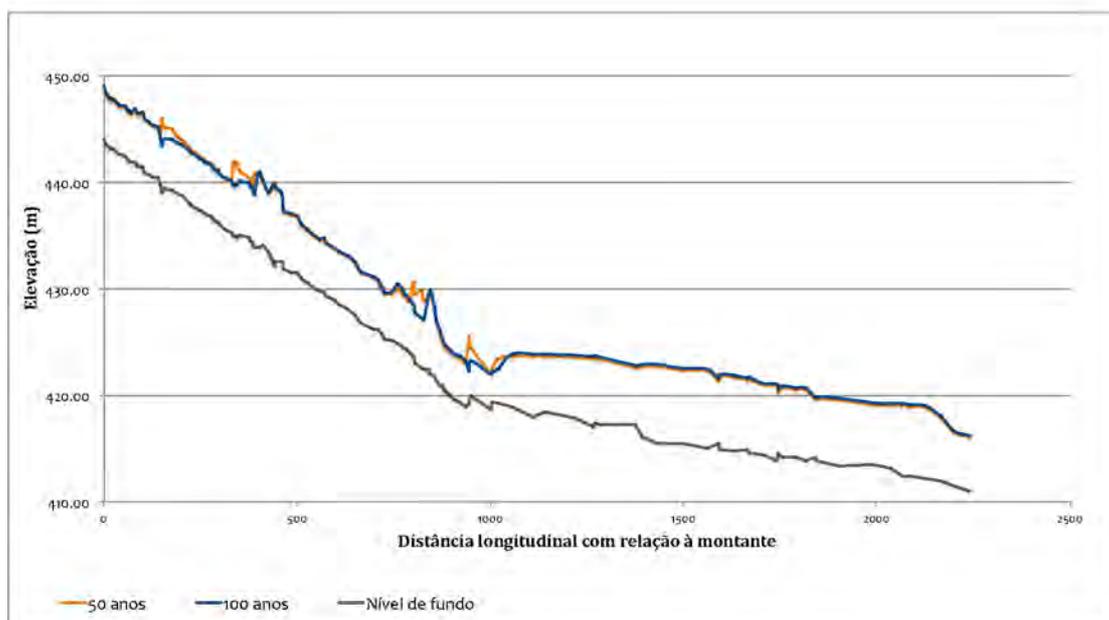


Figura 36: Gráfico das alturas da lâmina d'água para a simulação do parque do rio Granjeiro, tempos de retorno de 50 e 100 anos. (Fonte: Autor)

Observa-se que, diferentemente dos outros parâmetros já analisados, a altura da lâmina d'água apresenta uma mudança positiva na transição entre trechos reconstruído e não reconstruído. Dessa forma, conclui-se que problemas de

transbordamento são mais comuns no segundo, visto tal maior altura, aliada à geometria de menores dimensões.

Devido ao comportamento pontualmente oscilatório, principalmente no trecho não reconstruído e naquele de transição, há pontos em que chuvas de menor tempo de retorno apresentam alturas da lâmina d'água comparativamente mais elevadas do que outras com maior tempo de retorno. Considerando o segundo trecho, tal comportamento oscilatório deixa de ocorrer, tal como nos outros gráficos.

A Tabela 6, a seguir, mostra dados das alturas da lâmina líquida, considerando a diferença entre as elevações da superfície da água e as do nível de fundo. A análise também leva em consideração a divisão em grupos, além de incluir a porcentagem de seções que apresentam transbordamento.

Tabela 6: Alturas da lâmina d'água máximas e médias no cenário de simulação do parque do rio Granjeiro, incluindo porcentagens das seções que apresentam transbordamento. (Fonte: Autor)

Análise	Parâmetro	TR = 5 anos	TR = 10 anos	TR = 20 anos	TR = 50 anos	TR = 100 anos
Trecho reconstruído	WS _{média} (m)	4,45	4,93	5,14	5,22	5,01
	WS _{máx} (m)	7,20	7,88	8,62	7,56	7,91
	Transbordamento (%)	23,47	47,96	55,10	73,47	81,63
Trecho não reconstruído	WS _{média} (m)	5,27	5,55	5,73	5,96	6,10
	WS _{máx} (m)	6,55	6,81	7,00	7,24	7,42
	Transbordamento (%)	94,74	94,74	94,74	94,74	92,11
Compilado	WS _{média} (m)	4,90	5,27	5,46	5,63	5,61
	Transbordamento (%)	62,92	73,85	77,04	85,24	87,43

Ressalta-se que a geometria do trecho não reconstruído, por apresentar menores dimensões de largura e altura das suas seções transversais, tem uma capacidade reduzida de comportar o fluxo de água se comparada à do trecho reconstruído. Isso pode ser observado nas porcentagens de seções com transbordamento, as quais ficam sempre acima de 90% no trecho não reconstruído, explicitando sua limitação geométrica.

4.1.2. Análise comparativa: parque e canal

Sendo o principal objetivo deste trabalho a proposta de implantação de parque linear marginal como solução de engenharia para a problemática das enchentes destrutivas no rio Granjeiro, é fundamental a comparação da situação hidráulica de tal proposta com a do atual canal de concreto. Os parâmetros de comparação são: velocidade, número de Froude e altura da lâmina d'água, pelas razões explicitadas no item 4.1. *Resultados da modelagem hidráulica do parque do rio Granjeiro.*

Para melhor visualização e comparação dos dados, restringe-se esta análise a um único tempo de retorno. Por se tratar de um estudo de canal, o tempo de retorno de 50 anos foi escolhido como base de parâmetros para os dados analisados.

A presente comparação é feita em duas frentes: gráfica, a qual permite fácil diferenciação de escala, também incluindo visualização clara dos grupos resultantes das variações geométricas ao longo do canal; e em termos de valores máximos e médios dos parâmetros analisados, também considerando a divisão citada e incluindo análise da variação dos resultados médios compilados para todos os trechos estudados.

Com exceção de parâmetros já apresentados na forma de porcentagens, o cálculo da variação de um parâmetro qualquer Y é dado por:

$$Var_Y (\%) = 100 \left(\frac{Y_{parque} - Y_{canal}}{Y_{canal}} \right) \quad (6)$$

onde Var_Y indica a variação do parâmetro Y . Nos casos de exceção, o cálculo é dado pela diferença simples.

Ressalta-se a importância de se analisar se tal resultado de variação é positivo ou não, pois resultados positivos indicam aumento no parâmetro analisado no cenário

de implantação de parque. Como todos os parâmetros considerados têm características proporcionais à gravidade da problemática de enchentes, conclui-se que uma redução deles é o resultado desejável de uma solução de engenharia viável para o rio Granjeiro.

4.1.2.1. Velocidade: análise comparativa

A Figura 37, a seguir, mostra a comparação de valores de velocidade nos cenários analisados: parque e canal.

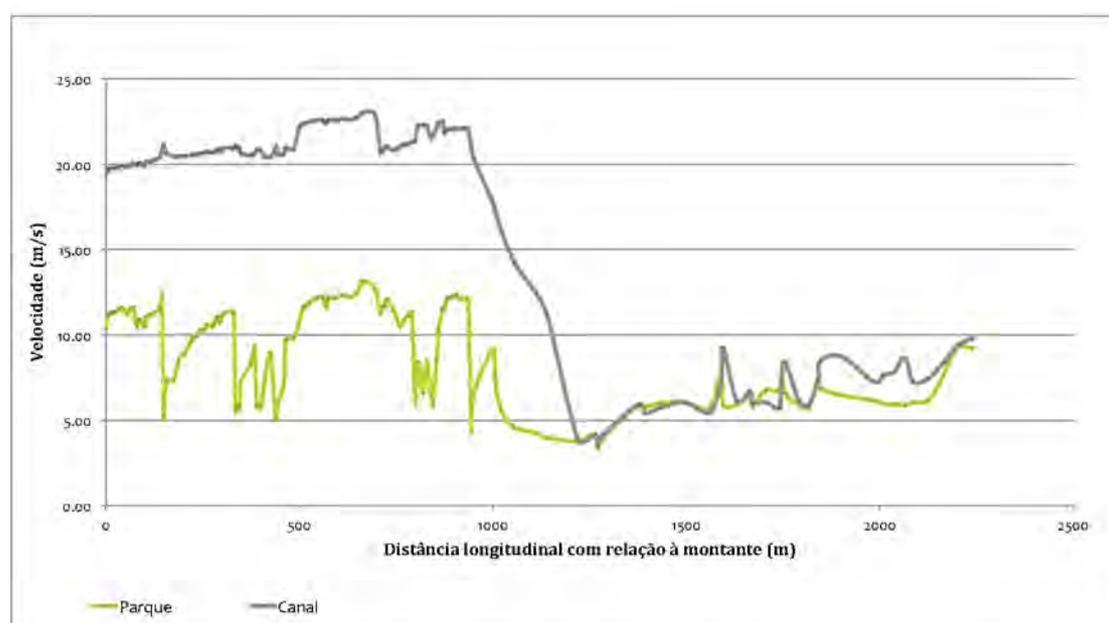


Figura 37: Gráfico comparativo das velocidades para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)

A Tabela 7, a seguir, compila tais dados de acordo com os grupos considerados e com o cálculo da variação.

Tabela 7: Análise comparativa de valores médios e máximos de velocidades, com variação percentual. (Fonte: Autor)

Análise	Parâmetro	Canal	Parque	Var (%)
Trecho reconstruído	$V_{\text{média}}$ (m/s)	21,07	9,37	-55,54
	$V_{\text{máx}}$ (m/s)	23,04	13,06	-43,32
Trecho não reconstruído	$V_{\text{média}}$ (m/s)	8,07	5,98	-25,88
	$V_{\text{máx}}$ (m/s)	17,75	9,11	-48,68
Compilado	$V_{\text{média}}$ (m/s)	13,87	7,49	-45,99

Observa-se que a implantação do parque linear marginal acarreta em uma redução considerável das velocidades nos trechos analisados do rio Granjeiro, atingindo uma redução de 45,99% para a velocidade média.

Quanto aos grupos, percebe-se que o impacto quanto a redução de velocidade é mais acentuado no trecho reconstruído do canal, o qual apresenta valores consideravelmente elevados no cenário atual. Embora menos acentuada, a redução de velocidade também ocorre no trecho não reconstruído, sendo da ordem de 48,68%, enquanto seu valor é de 55,54% no primeiro quilômetro do canal.

4.1.2.2. Número de Froude: análise comparativa

A Figura 38, a seguir, mostra a comparação de valores de número de Froude nos cenários analisados: parque e canal.

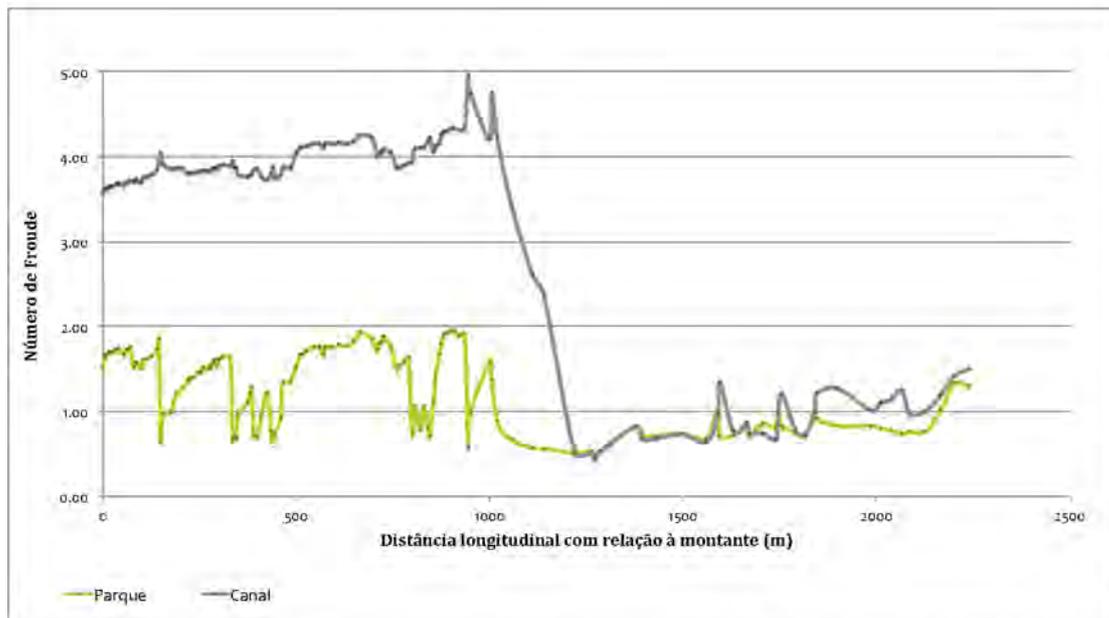


Figura 38: Gráfico comparativo dos números de Froude para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)

A Tabela 8, a seguir, compila tais dados de acordo com os grupos considerados e com o cálculo da variação, incluindo também as porcentagens de seções que apresentam escoamento supercrítico.

Tabela 8: Análise comparativa de valores médios e máximos dos números de Froude, com variação percentual e análise de seções com escoamento supercrítico.

(Fonte: Autor)

Análise	Parâmetro	Canal	Parque	Var (%)
Trecho reconstruído	$Fr_{médio}$	3,94	1,44	-63,59
	$Fr_{máx}$	4,95	1,96	-60,40
	Escoamento supercrítico (%)	100,00	79,59	-20,41
Trecho não reconstruído	$Fr_{médio}$	1,34	0,82	-38,54
	$Fr_{máx}$	4,75	1,59	-66,53
	Escoamento supercrítico (%)	44,74	21,05	-23,68
Compilado	$Fr_{médio}$	2,50	1,10	-56,16
	Escoamento supercrítico (%)	69,41	47,19	-22,22

Observa-se que a implantação do parque linear marginal acarreta em uma redução considerável dos números de Froude nos trechos analisados do rio Granjeiro, atingindo uma redução de 56,16% para seu valor médio. Além disso, há redução de 22,22% na porcentagem de seções com escoamento supercrítico.

O comportamento gráfico do número de Froude acompanha aquele da velocidade, incluindo sua divisão nos grupos. Dessa forma, a redução do valor médio do número de Froude é mais acentuada no primeiro quilômetro, sendo de 63,59%, enquanto no trecho não reconstruído ela vale 38,54%, ainda considerada significativa.

4.1.2.3. *Altura da lâmina d'água: análise comparativa*

A Figura 39, a seguir, mostra a comparação de valores de altura da lâmina d'água nos cenários analisados: parque e canal, incluindo elevação do nível de fundo.

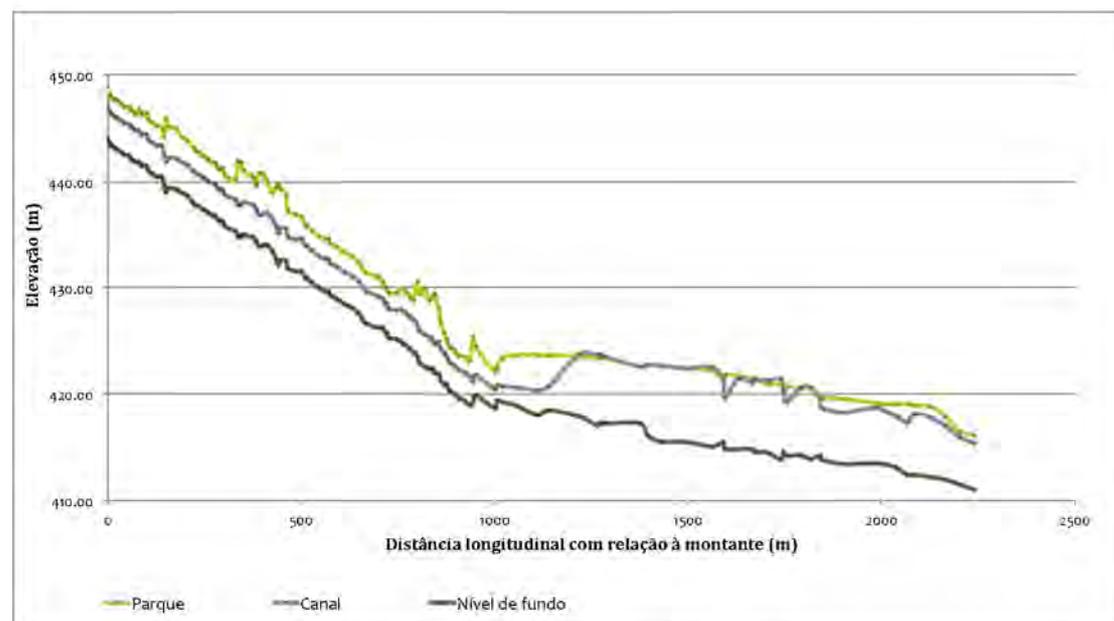


Figura 39: Gráfico comparativo das alturas da lâmina d'água, incluindo elevação do nível de fundo, para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)

Quanto à compilação dos dados, a altura da lâmina d'água deve ser analisada em termos: do seu valor absoluto, dado pela diferença entre sua elevação e a elevação do nível de fundo; do fenômeno de transbordamento, presente caso sua elevação supere a elevação da menor lateral da seção transversal considerada; e da intensidade

do transbordamento, caso ocorra tal fenômeno, ou seja, da altura da lâmina d'água que supera tal cota lateral. Para tanto, é feita a análise de grupos e a sua compilação, tal como mostrado na Tabela 9, a seguir.

Tabela 9: Análise comparativa das alturas da lâmina d'água, considerando casos de transbordamento e seus impactos. (Fonte: Autor)

Análise	Parâmetro	Canal	Parque	Var (%)
Trecho reconstruído	WS_{média} (m)	2,92	5,22	78,57
	WS_{transb,média} (m)	0,00	0,45	NA*
	WS_{transb,máx} (m)	0,00	2,60	NA*
	Transbordamento (%)	0,00	73,47	73,47
Trecho não reconstruído	WS_{média} (m)	5,23	5,96	13,98
	WS_{transb,média} (m)	2,00	2,32	16,18
	WS_{transb,máx} (m)	3,85	3,40	-11,69
	Transbordamento (%)	84,21	94,74	10,53
Compilado	WS_{média} (m)	4,20	5,63	34,04
	WS_{transb,média} (m)	1,11	1,49	34,53
	Transbordamento (%)	46,62	85,24	38,63

*Não se aplica.

Contrastando-se com as reduções obtidas nos parâmetros velocidade e número de Froude, a implantação do parque acarreta em um aumento da altura da lâmina d'água. O aumento da largura das planícies de cheia, por ser acompanhado de um aumento relativamente pequeno da altura das margens relacionadas a tais planícies, não ameniza completamente o efeito do aumento da rugosidade, o qual quebra a energia da água e sua velocidade, porém resulta em maiores valores do seu nível de elevação. Ressalta-se que a geometria proposta na implantação do parque segue a filosofia de impactos mínimos sobre a geometria atual, minimizando-se custos de execução.

O primeiro quilômetro, que no cenário atual não apresenta problemas de inundação, sofre um aumento expressivo da altura da lâmina d'água, tendo 73,47% de suas seções com transbordamento no cenário de parque. Já no trecho não reconstruído tal aumento ocorre, mas não é significativo, sendo de 10,53% em termos das seções.

Analisando-se todos os trechos analisados, há aumentos de 34,04% e 34,53% nas alturas da lâmina d'água média e média de transbordamento, respectivamente. O aumento absoluto em porcentagem de transbordamento é de 38,63%.

4.1.3. Análise de sensibilidade

Para melhor compreensão da simulação do parque do rio Granjeiro, das causas que influenciam os resultados obtidos e de outros resultados não apresentados, são feitas três análises de sensibilidade: influência da rugosidade; proposta de cenário híbrido; e velocidades laterais.

Assim como na análise comparativa, para melhor visualização dos resultados, a presente também se restringe ao tempo de retorno de 50 anos.

4.1.3.1. Influência da rugosidade

A simulação do parque do rio Granjeiro considera duas mudanças com relação às seções originais do canal de concreto: geometria e coeficientes de Manning. A presente análise de sensibilidade tem como objetivo determinar a importância relativa dessas mudanças, adotando como critério um cenário hipotético em que a geometria original do canal é mantida e altera-se apenas os coeficientes de rugosidade, de 0,013, concreto, para 0,033, leito natural.

As Figuras 40, 41 e 42, a seguir, apresentam os resultados gráfico desta análise. Além disso, dados compilados são mostrados na Tabela 10.

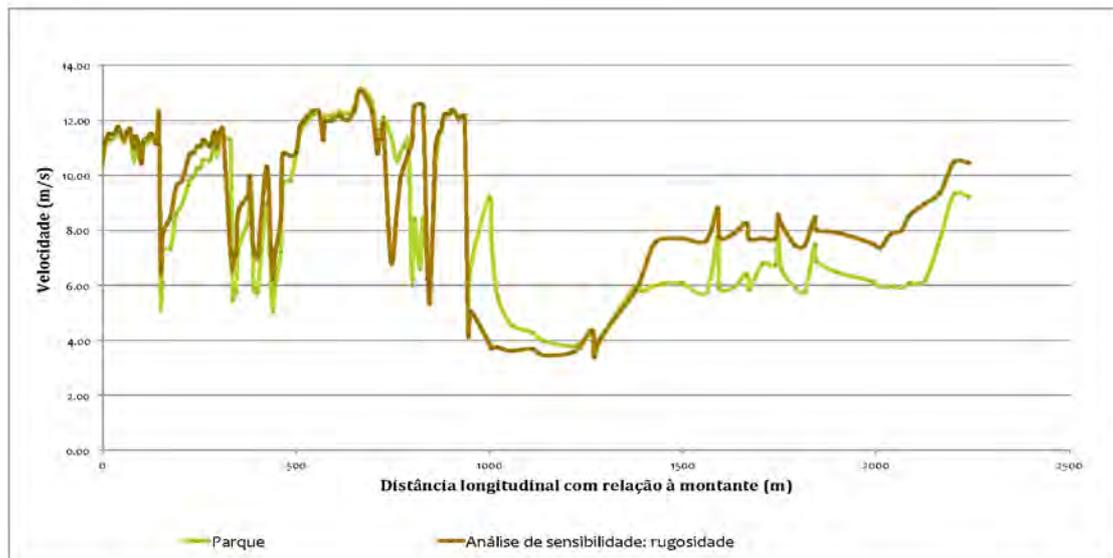


Figura 40: Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, influência da rugosidade, comparação da velocidade, tempo de retorno de 50 anos.

(Fonte: Autor)

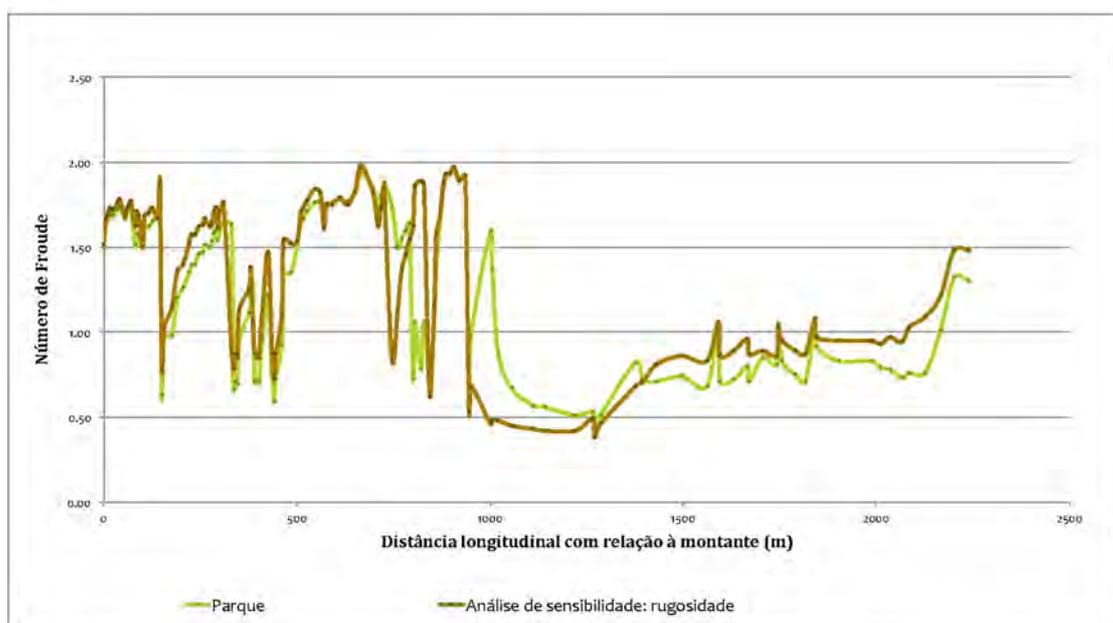


Figura 41: Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, influência da rugosidade, comparação do número de Froude, tempo de retorno de 50 anos.

(Fonte: Autor)

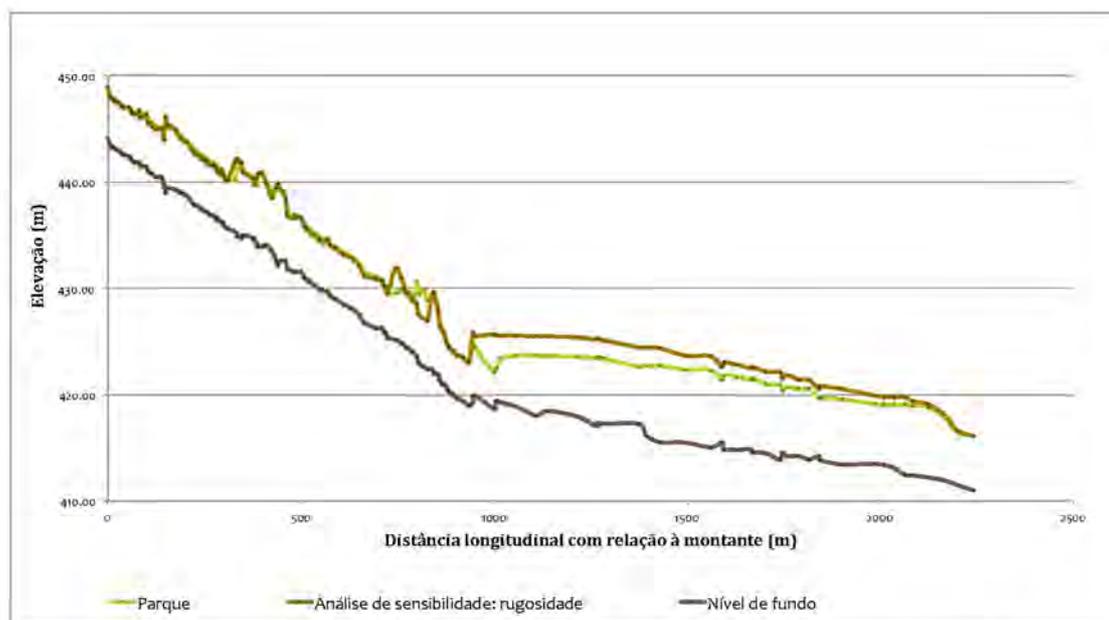


Figura 42: Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, influência da rugosidade, comparação da altura da lâmina d'água, tempo de retorno de 50 anos.

(Fonte: Autor)

Tabela 10: Análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, influência da rugosidade, dados compilados para o tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)

Parâmetro	Parque	Cenário de influência da rugosidade	Var (%)
$V_{média}$ (m/s)	7,49	8,48	13,11
$Fr_{médio}$	1,10	1,13	3,18
Escoamento supercrítico (%)	47,19	49,46	2,28
$WS_{média}$ (m)	5,63	6,29	11,62
$WS_{transb,média}$ (m)	1,49	2,31	55,42
Transbordamento (%)	85,24	88,16	2,91

Observa-se comportamentos consideravelmente semelhantes nos resultados analisados. As variações apresentadas nos dados compilados são, em sua maioria, menores que 10%. Destaca-se o aumento da altura média de transbordamento, de 55,42%, mostrando a importância da geometria adotada em tal parâmetro.

Considerando as grandes variações observadas na análise comparativa entre parque e canal, conclui-se que a influência da alteração no coeficiente de Manning é principal causa de mudança hidráulica na proposta de implantação do parque.

Entretanto, dado que todos os resultados de variação desta análise de sensibilidade são positivos, conclui-se que a alteração geométrica proposta, de alargamento das planícies de cheia, traz melhoras hidráulicas em termos dos parâmetros analisados, principalmente na zona de transição entre os trechos reconstruído e não reconstruído e sobre o parâmetro altura de transbordamento.

4.1.3.2. Proposta de cenário híbrido

Como o canal apresenta dois trechos distintos, classificados como grupos de análise, propõe-se uma análise de sensibilidade baseada na possibilidade de as decisões de projeto do parque do rio Granjeiro serem específicas para cada um desses grupos. Nesse caso, supõe-se um cenário de leito híbrido, no qual o trecho reconstruído tem suas rugosidades alteradas de 0,013, concreto, para 0,033, vegetação, em sua totalidade e o trecho não reconstruído sofre tal alteração apenas nas suas laterais, mantendo seu valor original, 0,023, solo revestido, no fundo do leito. Tal proposta se baseia na necessidade de escoar a água mais rapidamente no trecho não reconstruído, caracterizado atualmente por problemas de inundação.

As Figuras 43, 44 e 45, a seguir, mostram os resultados da presente análise. Além disso, dados compilados e suas variações são apresentados na Tabela 11.

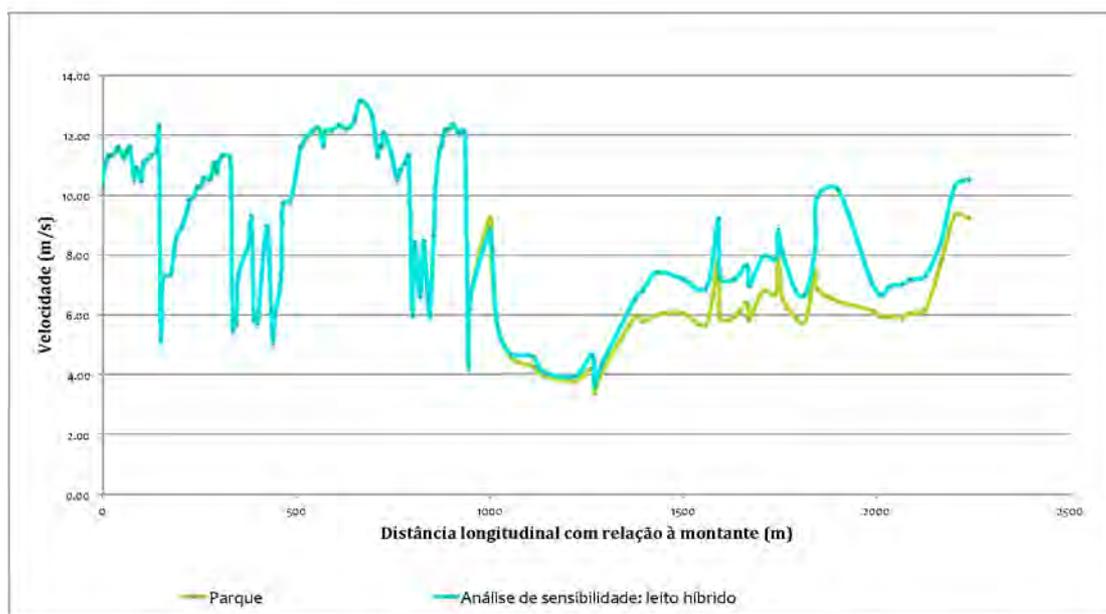


Figura 43: Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, cenário de leito híbrido, comparação da velocidade, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)

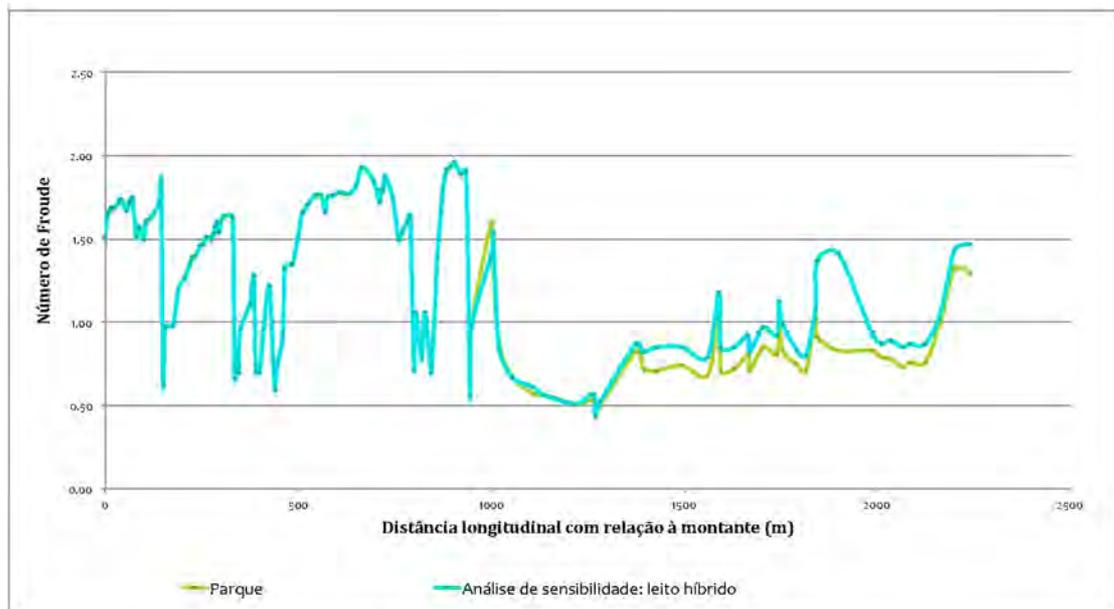


Figura 44: Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, cenário de leito híbrido, comparação do número de Froude, tempo de retorno de 50 anos.

(Fonte: Autor)

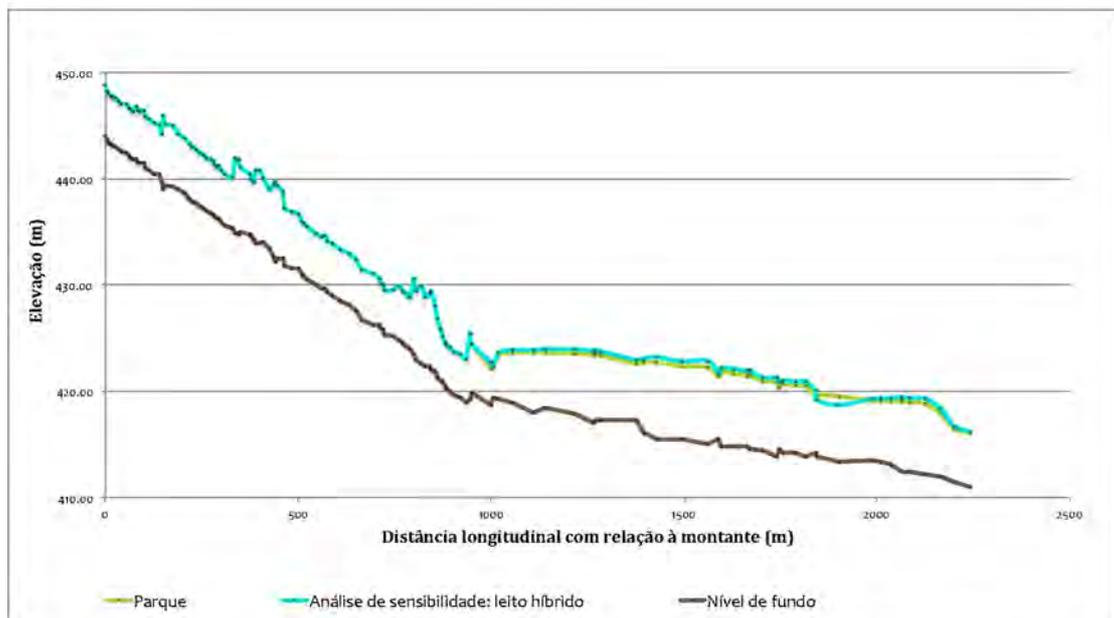


Figura 45: Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, cenário de leito híbrido, comparação da altura da lâmina d'água, tempo de retorno de 50 anos.

(Fonte: Autor)

Tabela 11: Análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, cenário de leito híbrido, dados compilados para o tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)

Parâmetro	Parque	Cenário de leito híbrido	Var (%)
$V_{\text{média}}$ (m/s)	7,49	8,43	12,56
$Fr_{\text{médio}}$	1,10	1,15	5,23
Escoamento supercrítico (%)	47,19	50,10	2,91
$WS_{\text{média}}$ (m)	5,63	5,80	3,01
$WS_{\text{transb,média}}$ (m)	1,49	1,65	10,96
Transbordamento (%)	85,24	85,24	0,00

Observa-se pouca variação dos resultados dos cenários comparados, a maioria com valores absolutos menores que 10%. Ressalta-se variações positivas de todos os parâmetros, principalmente a velocidade média e a altura média de transbordamento. Dessa forma, considera-se que o cenário de parque originalmente proposto traz melhores resultados hidráulicos do que o de leito híbrido, embora bastante semelhantes.

4.1.3.3. Velocidades laterais

A simulação em HEC-RAS permite, na determinação da geometria, a divisão do leito em três partes: *channel*, *left overbank* e *right overbank*. Nas modelagens realizadas, é considerado que: *channel* se refere à parte central do leito, incluindo seu fundo; e *left overbank* e *right overbank* se referem às laterais, esquerda e direita respectivamente, do leito, incluindo taludes e planícies de cheia.

Nas análises de resultados, considerou-se como parâmetro de saída a velocidade relativa à modelagem da parte *channel*, por ser o valor crítico observado na simulação. Entretanto, uma análise das velocidades laterais mostra-se importante na compreensão de sua comparação com a velocidade central e também na sua escala, visto que elas influenciam numa possível análise de estabilidade dos taludes laterais e do seu impacto destrutivo sobre estruturas e propriedades adjacentes.

A Figura 46, a seguir, mostra a presente análise de sensibilidade, considerando os três diferentes valores de velocidades: uma central e duas laterais.

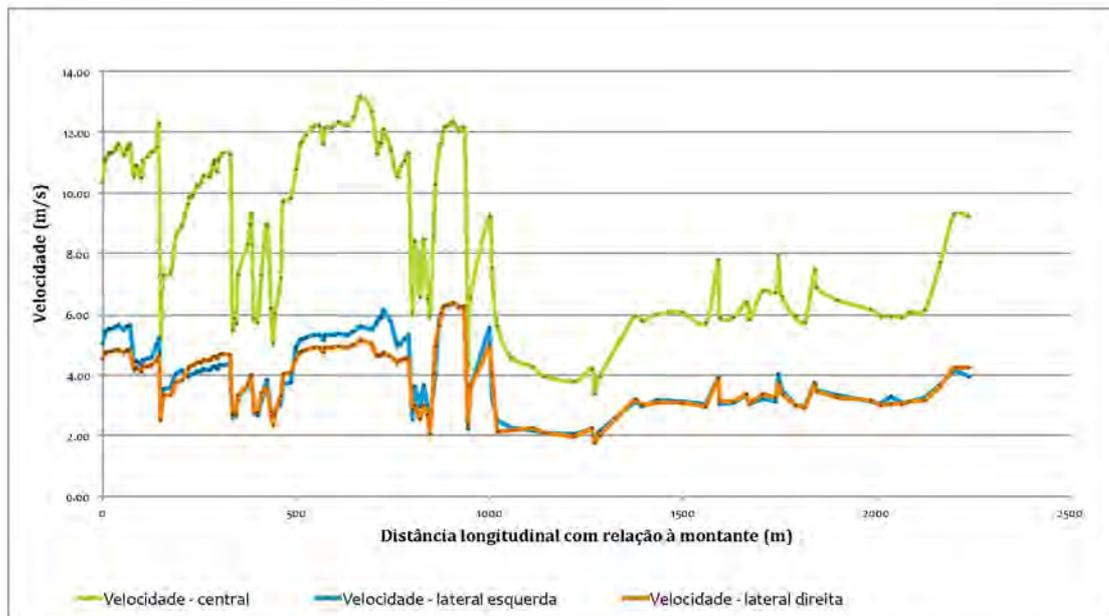


Figura 46: Gráfico da análise de sensibilidade do parque do rio Granjeiro, velocidades laterais, tempo de retorno de 50 anos. (Fonte: Autor)

As velocidades laterais apresentam valores significativamente menores que a central, com valores médios de 3,77 m/s na lateral esquerda, 3,65 m/s na direita, sendo de 7,93 m/s os para a parte central. Assim, há redução média de, respectivamente, 52,51% e 54,00%. Entretanto, considera-se, com base nos valores sugeridos por Porto (2006) que a escala das velocidades laterais é considerada elevada, devendo-se analisar cautelosamente a estabilidade de taludes de solo com vegetação.

4.1.4. Discussões e recomendações

A implantação do parque linear marginal traz vantagens, do ponto de vista da hidráulica de canais, em termos de se amenizar a força destrutiva do fluxo no rio Granjeiro, quanto à velocidade e à energia dele. Entretanto, o problema de inundação se agrava em termos de nível da lâmina d'água, pois, ao se amenizar tal fluxo, há acumulação da água nos trechos estudados.

A existência de maior rugosidade no leito acarreta na quebra de tal força da água observada, devido à vegetação que substitui o concreto. A alteração dos coeficientes de Manning é dada como a principal mudança hidráulica da proposta do parque. A nova geometria, a qual inclui 3,60 m em cada borda a mais, permite a

implantação propriamente dita do parque e melhora a área verde da cidade, reduzindo sua impermeabilização e, assim, melhorando a infiltração da água, além de aumentar a taxa de evapotranspiração.

Ressalta-se que o modelo elaborado não considera o aumento de tais índices de infiltração e evapotranspiração, os quais podem ser significativos na amenização do nível da água, agora com maiores problemas de inundação no novo cenário.

Em termos de variação percentual com relação ao canal do rio Granjeiro, a implantação do parque reduz, em valores aproximados, a velocidade média em 46%; e o número de Froude médio em 56%, o que acarreta em escoamento supercrítico em 22% menos seções. Ela, no entanto, aumenta o nível médio da lâmina d'água em 34%, implicando em 39% mais seções com transbordamento.

Assim, dos três parâmetros analisados, dois melhoram significativamente, aumentando a segurança estrutural do leito do rio Granjeiro, tanto em termos de estabilidade dos taludes laterais como das estruturas presentes nele, como pontes e bueiros. Recomenda-se uma análise estrutural mais aprofundada de tais elementos, pois sua recuperação, nos casos de cheias destrutivas observadas, implica em gastos públicos que devem ser evitados.

Para adoção do parque linear marginal como solução de engenharia para a problemática das enchentes destrutivas do rio Granjeiro, o aumento da altura da lâmina d'água deve ser resolvido. Para tanto, recomenda-se estudos da implantação de uma bacia de retenção ou detenção a montante do canal. Uma análise prévia da ocupação urbana de Crato apresenta relativa disponibilidade de área. Dados de topografia e impacto ambiental devem ser considerados em tal análise. A presença de tal bacia, com seu devido estudo de viabilidade, aliada às vantagens hidráulicas do parque, pode vir a solucionar tal problemática sustentavelmente e com responsabilidade social, econômica e ambiental.

4.2. *Impactos urbanísticos*

A presença de um parque altera a configuração espacial de uma cidade, em diversos aspectos, como qualidade de vida, ecologia, mobilidade e economia. Dadas as suas dimensões, 2,24 km de comprimento e aproximadamente 18 m de largura, e a importância histórica do rio Granjeiro para a cidade de Crato, os impactos

urbanísticos da presente proposta são fundamentais no processo decisório de sua adoção como solução de engenharia para a problemática de tal rio.

Segundo Walmsley (1995, p. 81, tradução nossa), os benefícios da ideia de implantação de um parque linear atingem diversos setores da sociedade civil:

Grupos ambientalistas apoiam a ideia para preservar *habitats* naturais, comunidades de plantas nativas e corredores de fauna silvestre. Planejadores, urbanistas e arquitetos de paisagens a veem como uma maneira de trazer ordem a subúrbios espalhados e de revitalizar bairros centrais. Ativistas comunitários são atraídos pelos aspectos igualitários de se abrir o espaço urbano para o maior número de pessoas possível. Oficiais do governo consideram o conceito de parque linear positivamente, já que ele melhora a imagem das suas comunidades, atraindo novos desenvolvimentos ou investimentos e, assim, gerando empregos e receitas.

Dessa forma, o presente trabalho aprofunda a discussão de implantação do parque linear através de discussões e recomendações para sua execução, analisando diferentes impactos urbanísticos: socioambientais, sobre a mobilidade urbana, econômicos e, finalmente, encaixando o parque do rio Granjeiro em um contexto maior de urbanismo cratense.

4.2.1. Impactos socioambientais

Para a discussão de tais impactos, analisam-se as dimensões humanas propostas por Gobster e Westphal (2004): limpeza, naturalidade, estética, segurança, acesso e apropriação do desenvolvimento.

Em termos de limpeza, três aspectos são considerados: lixo, qualidade da água e qualidade do ar. A presença de lixo no canal do rio Granjeiro e suas adjacências é visível, fato conectado com a situação de perene poluição em que se encontra essa área da cidade, dada a presença de esgotos no canal e a falta de infraestrutura de coleta e educação das comunidades sobre de tal questão. Sugere-se: a presença, no parque, de devida infraestrutura de limpeza e de coleta de lixo, incluindo a seletiva; a preocupação com a reciclagem de resíduos sólidos; e incentivos educacionais, como oficinas de conscientização, como observado em Adelaide, por Mugavin (2004). A qualidade da água é comprometida pela já citada presença de esgotos. Projetos de

saneamento já realizados e também em fase de planejamento são essenciais para solucionar tal problema, evitando o despejo de tais efluentes no rio Granjeiro. Crato também não possui estação de tratamento de esgoto, o que compromete a qualidade da água a jusante, mesmo com desvio de efluentes. A recuperação do leito natural do rio auxilia na melhoria da qualidade da água. Aliando-se aos projetos sanitários, a limpeza da água do rio Granjeiro com a presença do parque linear é considerada factível. Em termos de poluição atmosférica, a restrição ao uso do carro, pela condição de contorno espacial de uma faixa a menos em cada sentido da avenida, aliada à maior presença de árvores e vegetação tendem a diminuir índices de poluição atmosférica.

A naturalidade, dimensão relativa ao meio-ambiente, seus ecossistemas e sua preservação, é intensificada com a presença do parque linear. Recuperação da flora local é diretamente viável, recomendando-se o plantio de árvores e outras plantas típicas da região, estando também associada à recuperação da fauna local, cuja área verde de *habitat* aumenta. Assim, a conexão da população com a natureza aumenta, sendo tal impacto intensificado para as gerações mais jovens. Outro aspecto particularmente importante para o caso da cidade de Crato é o microclima urbano, normalmente mais quente do que o clima natural da região. A presença do parque, principalmente por substituir coberturas de asfalto e concreto, ameniza as altas temperaturas típicas da cidade estudada. A Figura 47 apresenta um exemplo de amenização do microclima urbano, em uma das diversas praças cratenses.



Figura 47: Praça Siqueira Campos no município de Crato, exemplo de ambiente com microclima de temperaturas mais amenas. (Fonte: Autor)

A percepção estética popular da comunidade está diretamente interligada à percepção de sua boa manutenção e sentimento de pertencimento dos seus habitantes e visitantes (GOBSTER; WESTPHAL, 2004). O ambiente do parque linear enriquece tal percepção, pela sua tranquilidade e beleza natural, podendo ser expandida através de paisagismo, recomendando-se uma preocupação com o estado original do rio Granjeiro, em termos de espécies e paisagens nativas.

Caracteristicamente, parques urbanos têm risco de se tornarem ambientes inseguros. Para evitá-lo, deve haver uma compreensão da interação homem-ambiente, na qual tanto a ecologia humana como a biofísica devem ser consideradas no projeto do parque linear e, assim, adotar-se uma abordagem holística à questão da segurança. Como sugerido por Luymes e Tamminga (1995), cinco características devem ser consideradas em tal projeto: visibilidade dos outros, o quão fácil é para uma pessoa perceber outras na sua proximidade; visibilidade pelos outros, o quão fácil é para uma pessoa ser vista por outras; escolha e controle, em termos de liberdade de movimento dentro do parque linear; consciência e legibilidade, ou seja, sobre a “leitura” de que o visitante do parque tem sobre seu ambiente e a facilidade de se localizar nele; e, por fim, solidão sem isolamento, de modo a proporcionar tranquilidade e refúgio, sem isolar o visitante de modo a torná-lo vulnerável.

Como segurança urbana é uma questão de grande importância no urbanismo brasileiro, dadas as características sociais do país, recomenda-se especial atenção a essa dimensão no projeto do parque linear, de modo a se evitar a percepção de vulnerabilidade e atingir o resultado de melhoria da segurança em tal ambiente, se comparado com a situação atual. Para tanto, é bem-vindo o aumento do fluxo de pessoas transitando pelo local, preferencialmente a pé ou em transportes não-motorizados, bicicletas e *skates* por exemplo. A existência de devido policiamento e iluminação pública, com boa manutenção, além da integração com os ambientes adjacentes torna o parque um lugar seguro, mesmo em períodos noturnos, mais críticos. Dessa forma, conclui-se que, considerando a maior atratividade do parque para o fluxo de pessoas, gerenciamento público devido em termos de policiamento e iluminação, atendimento às características holísticas de projeto de parque e integração de ambientes, o parque do rio Granjeiro tende a melhorar a situação de segurança pública na sua área e adjacências.

A dimensão da segurança também deve ser analisada no seu outro aspecto: da vulnerabilidade dos transeuntes do parque quanto a acidentes. Assim, recomenda-se as devidas medidas de proteção, como muretas, considerando a existência da depressão fluvial.

Quanto ao acesso, duas análises são feitas: mobilidade urbana e acessibilidade a deficientes. A problemática da mobilidade urbana é detalhada no item 4.2.2. *Impactos sobre a mobilidade urbana*. Já a acessibilidade a deficientes deve ser considerada na concepção do parque. Alguns exemplos de tal acessibilidade são: padronização de trechos de circulação, rampas de acesso, dispositivos sonoros em cruzamentos, e placas informativas em *braille*.

O parque linear do rio Granjeiro, caso seja implantado, deve ser um espaço urbano democrático. Isso se dá devido à importância da última dimensão humana de impactos socioambientais analisada neste trabalho: apropriação do desenvolvimento. O capital social gerado pelo parque deve se distribuir para a população como um todo, a qual deve ter acesso aos benefícios dele. Para tanto, recomenda-se que o parque seja um espaço sempre aberto ao público e que integre ambientes de recreação, como academias a céu aberto, quadras esportivas, pistas de *skate* e recreios infantis, com o ambiente natural, de modo a se respeitar as ecologias humana e biofísica.

4.2.2. *Impactos sobre a mobilidade urbana*

A presente proposta de implantação de parque linear marginal tem dois impactos diretos sobre a mobilidade urbana na cidade de Crato: a retirada de uma faixa de rolamento em cada sentido da avenida José Alves de Figueiredo; e a criação de um novo corredor verde, o parque em si.

Na análise de tais impactos, deve-se entender que a mobilidade urbana se refere ao deslocamento de pessoas e bens em tal espaço, e que os modais e suas infraestruturas não são finalidades, mas ferramentas. Além disso, é fundamental a contextualização de tal questão no cenário brasileiro atual, no qual a sustentabilidade vem alterando conceitos que nortearam, por décadas, as políticas públicas de transporte urbano (BARBOZA, 2014).

O novo contexto brasileiro se apresenta diante do paradigma da mobilidade urbana sustentável (SUM), no qual percebe-se claramente a transição do papel do cidadão e dos meios de transporte, sendo tal mudança principalmente em termos de priorização de transportes coletivos e individuais não-motorizados com relação aos individuais motorizados. Esse momento de mudança leva em consideração a relevância dada ao automóvel no tecido urbano, em que seu papel tem transitado de solução de transporte para “vilão socioambiental”, principalmente devido às suas externalidades, como poluição, acidentes e congestionamentos (MARX *et al*, 2015).

A cidade de Crato se encaixa em tal contexto, visto o rápido crescimento do uso de transportes individuais motorizados, carros e, principalmente, motos, nas últimas décadas. Segundo o Ministério das Cidades (2007), cidades com a faixa de população na qual a cratense se inclui, de 100 a 250 mil habitantes, estão no limiar entre a maioria da utilização do transporte individual não-motorizado, pois tal faixa populacional apresenta uma média de 52,43% de participação das viagens como a pé ou de bicicleta. Tal porcentagem média se reduz para menos de 50% a partir de faixas de população acima de 250 mil habitantes.

O cenário de diminuição do uso de transportes individuais não-motorizados com a urbanização é preocupante em termos de políticas públicas principalmente pela questão das externalidades, as quais geram altos custos para as cidades. O interior do Ceará, principalmente pelo acelerado crescimento das motos como meio de transporte, já sofre as consequências de tais externalidades. Por exemplo, segundo

dados do Ministério da Saúde (2015), a cidade de Barbalha, local onde se registram muitos acidentes de trânsito da região do Cariri, destaca-se nacionalmente nesse índice, ilustrando a gravidade da questão da mobilidade urbana em tal cidade e também nos municípios vizinhos, incluindo Crato. O fenômeno de externalidades mostra como a mobilidade urbana transcende sua própria esfera e está diretamente interligada com outras questões da administração pública, como a previdência e a saúde, sendo que soluções nessas últimas esferas requerem recursos financeiros de uma escala consideravelmente maior, com aposentadorias por invalidez e tratamentos médicos traumatológicos, por exemplo.

Conclui-se que deve ser dada a devida importância e priorização ao transporte individual não-motorizado na cidade do Crato. Dessa forma, a retirada das faixas de rolamento da avenida marginal, embora possa impactar as jornadas de carros, motos e ônibus, sendo estes últimos outro elemento a ser priorizado nos planos de mobilidade, por exemplo com criação de corredores exclusivos, traz um novo espaço urbano apropriado para pedestres e ciclistas. A Figura 48, a seguir, ilustra a situação atual do canal do rio Granjeiro, não apropriado para o trânsito de ciclistas, cuja demanda está intrinsecamente ligada à infraestrutura de apoio a esse modal.



Figura 48: Ciclista no canal do rio Granjeiro, onde atualmente não há infraestrutura adequada para transporte ciclovário. (Fonte: Autor)

Duas considerações devem ser feitas, então, na análise de impactos do parque linear sobre a mobilidade. A primeira diz respeito à melhoria das condições de viagens de pedestres e ciclistas, a qual estimula transportes não-motorizados e auxilia na diminuição das externalidades de carros e motos. A segunda diz respeito à permeabilidade do tecido urbano. Tornar o parque acessível a todos, com mais travessias do rio para pedestres e ciclistas, mais baratas, permite melhor conectividade de rotas e quebra barreiras espaciais de maneira sustentável.

Recomenda-se, assim, na implantação do parque linear, a existência de um corredor verde de transporte, com ciclovias, travessas, pontes e fácil acesso às regiões adjacentes. Além disso, um estudo da mobilidade urbana cratense, com análise de matriz origem-destino e pesquisa de preferência, para nortear o plano de mobilidade e se integrar com o plano diretor é outra recomendação fundamental nesta questão. Ressalta-se a importância da tratativa da SUM para tais estudos e planos.

4.2.3. Impactos econômicos

A mudança da dinâmica urbana proposta pelo parque do rio Granjeiro tem impacto direto sobre o valor da terra em suas adjacências. Com base na literatura existente, considera-se que, por aumentar a área verde em uma região central da cidade, e pelos seus impactos positivos em outras esferas, como social, ambiental e de mobilidade, a implantação do parque traria valorização econômica para a cidade de Crato, em especial para as adjacências do rio.

Segundo Pack (2005), entre os cinco itens mais importantes na valorização de uma zona residencial estão a presença de trilhas, parques e recreios infantis. Tal autor classifica a presença de áreas verdes como chave no desenvolvimento econômico de uma área urbana, considerando o tipo de uso do solo da área analisada.

Nas adjacências do canal do rio Granjeiro, a ocupação é basicamente residencial e comercial, com diversos prédios de interesse público, como praças, igreja, escola, base militar e sedes de órgãos governamentais, incluindo a da Prefeitura Municipal do Crato.

A valorização da terra, assim como proposta pelo modelo de regressão hedônica de Geoghegan (2002), ocorre com a presença de ambiente natural próximo a áreas residenciais. Além disso, seguindo o modelo de construção verde e dos

impactos de áreas construídas seguindo princípios de sustentabilidade ou localizadas próximas a áreas verdes, há relação positiva entre tal nível de sustentabilidade e a valorização econômica da área (SON *et al*, 2012).

Conclui-se que a presença do parque linear tende a impulsionar economicamente a região adjacente, valorizando residências, comércios e prédios de interesse público, de uma maneira em que o espaço urbano se agregue ao corredor verde proposto.

4.2.4. Contexto urbanístico atual: Crato, um novo projeto de cidade

Com 251 anos de história, a cidade de Crato passa por diversas mudanças no seu perímetro urbano, as quais trazem não apenas oportunidades, mas também riscos sociais, econômicos e ambientais. O crescimento da malha urbana, associado ao maior índice de impermeabilização e desmatamento na sua zona central e adjacências, aliado à nascente conurbação com o município vizinho de Juazeiro do Norte tem trazido novos desafios a um urbanismo democrático e sustentável. A construção e constantes reconstruções do canal do rio Granjeiro, com a presença da sua avenida marginal, com seus recorrentes problemas de enchentes é um exemplo da necessidade de se repensar o modelo de urbanização não sustentável.

Dados os desafios de tal novo cenário urbano, a cidade de Crato, na última década, tem passado por uma revitalização de seus valores como cidade cultural, com apreço à qualidade de vida dos seus moradores e visitantes. Diversos projetos, como o centro cultural da estação ferroviária, a revitalização do centro histórico e a contenção da encosta do bairro seminário, mostram um período de efervescência urbanística, no qual Crato se reinventa na sua proposta de cidade democrática.

O projeto de instalação do centro cultural da estação ferroviária reestruturou o prédio, longamente abandonado, e suas adjacências, incluindo hoje, além do centro cultural em si, biblioteca, restaurante e farmácia públicos. Servindo como centro de transporte urbano, essa área é ponto de conexão de diferentes modais, como ônibus, lotações e, mais recentemente, veículo leve sobre trilhos (VLT).

A revitalização do centro histórico, projeto com financiamento do Banco Mundial, também realizado em diversas cidades do interior do Ceará, integrou diversas praças e ruas da região central de Crato, seguindo normas de acessibilidade,

como calçadas padronizadas e alargadas e rampas elevadas para travessia de pedestres, e sustentabilidade, com calçamento mais permeável, implantação de canteiros verdes e coleta seletiva de lixo. As Figuras 49, 50, 51 e 52 ilustram tal projeto e seus impactos sobre o urbanismo da cidade.



Figura 49: Praça da Sé revitalizada, Crato, exemplo de ambiente público sustentável, com presença de coleta seletiva e abundante vegetação. (Fonte: Autor)



Figura 50: Centro de Crato, após revitalização, com ambiente urbano mais adequado, com calçadas alargadas, presença de bancos, canteiros e lixeiras, nova pavimentação das ruas e travessias elevadas para pedestres. (Fonte: Autor)

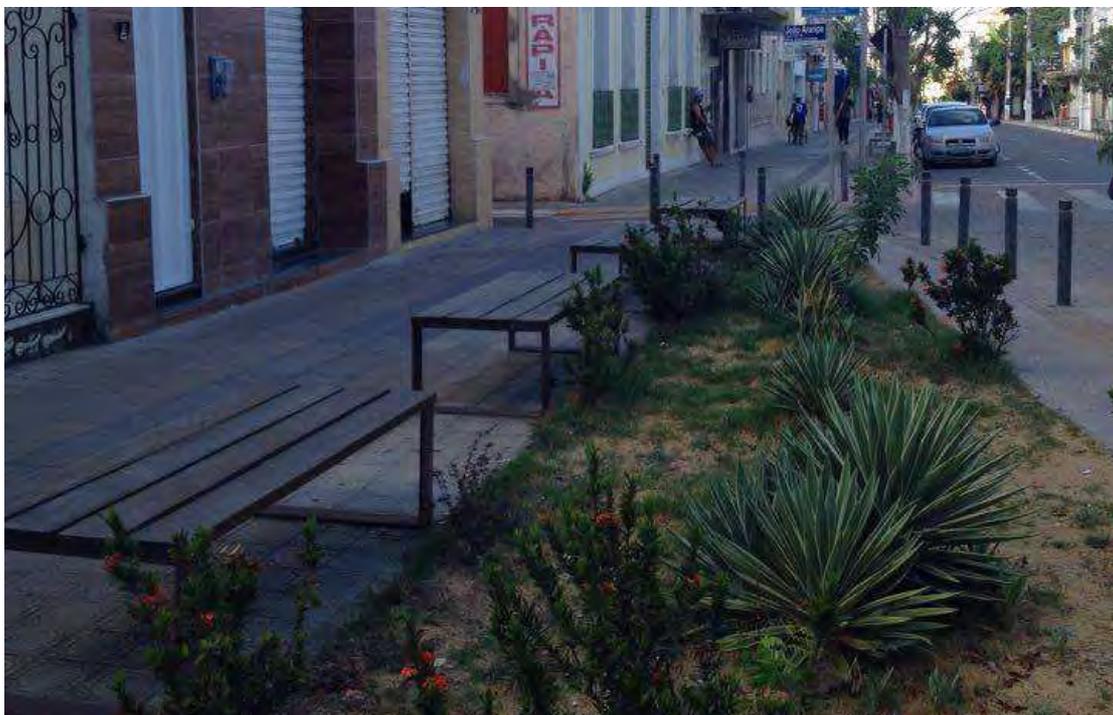


Figura 51: Exemplo de novo canteiro, no centro de Crato. A revitalização providenciou ambiente mais amigável para pedestres, ocorrendo, assim, reocupação do espaço público urbano. (Fonte: Autor)



Figura 52: Centro histórico de Crato, recentemente revitalizado, com aumento da arborização urbana. (Fonte: Autor)

Neste ano, foi inaugurada a nova encosta do bairro Seminário, região mais populosa da cidade, localizada no topo de um morro próximo à margem noroeste do canal do rio Granjeiro. Tal grande obra de infraestrutura inclui estabilização de taludes, recuperação de voçorocas, saneamento básico e reurbanização do topo da encosta, com pavimentação, calçamento e implantação de um novo espaço público, o qual inclui recreios, academia a céu aberto, pista de *skate* e quadra de futebol. As Figuras 53, 54, 55 e 56 ilustram esse projeto.



Figura 53: Calçada no topo da encosta do Seminário, Crato, com vista para a cidade e ambiente adequado para pedestres. (Fonte: Autor)



Figura 54: Rua no topo da encosta do Seminário, Crato, exemplo de via de uso compartilhado entre veículos, ciclistas e pedestres. (Fonte: Autor)



Figura 55: Novo espaço urbano, no Seminário, Crato, com bancos e recreios. Espaço atrativo aos moradores e visitantes. (Fonte: Autor)



Figura 56: Estabilização da encosta do Seminário, Crato, espaço antes ocupado por voçoroca. Pode-se observar, parcialmente, o canal do rio Granjeiro, no canto direito da imagem. (Fonte: Autor)

Dados os diversos problemas urbanos comuns nas cidades brasileiras, como congestionamentos, violência e poluição, e o ritmo crescente de urbanização da cidade de Crato, a existência de projetos urbanísticos sustentáveis e democráticos, como os exemplificados neste trabalho, demonstra a vontade popular e governamental de desviar o rumo e tal ritmo, da falta de planejamento e caos consequente para um caminho de cidade do futuro, onde os espaços urbanos são pensados e integrados, com respeito às ecologias às quais eles tangem.

A implantação do parque do rio Granjeiro, localizado paralelamente entre os corredores do centro histórico e da encosta do Seminário, tem o potencial de ser mais um grande projeto de infraestrutura urbana, além de, na sua essência e concepção, ser uma solução de engenharia, junto com a instalação da bacia de retenção, para a problemática das enchentes em Crato. Dessa forma, o parque tende a coroar a atual primavera urbanística cratense.

5. Conclusões

À luz dos resultados da modelagem hidráulica do parque do rio Granjeiro, incluindo análise comparativa e de sensibilidade, e à discussão da sua viabilidade e dos seus impactos urbanísticos, considera-se que este trabalho apresenta uma discussão aprofundada da implantação de tal parque como solução de engenharia para a problemática de enchentes destrutivas no rio urbano estudado.

A fundamentação teórica considerou a situação dos estudos de parques lineares e corredores verdes como alternativas para essa problemática, concluindo-se que, embora com diversos casos de sucesso internacionais, essa solução é relativamente vanguardista no Brasil, devido ao modelo de urbanização que prioriza crescimento desordenado, canalização de cursos d'água e instalação de avenidas marginais.

A literatura local foi analisada, com destaque ao estudo geomorfológico de Lima Neto *et al* (2008), ao hidrológico de Moreira (2013) e às modelagens hidráulicas de Thiago da Silva (2013) e Sá (2015), sendo essa última a base para a modelagem do parque do rio Granjeiro, por possuir dados atualizados de seção. Dessa forma, o presente trabalho se agrega a tal literatura de forma a introduzir uma nova abordagem, utilizando-se do conhecimento existente e com o objetivo comum de se atingir uma solução sustentável para tal problema.

Em termos de resultados hidráulicos, três parâmetros foram classificados como fundamentais na compreensão das enchentes do rio Granjeiro: velocidade, número de Froude e altura da lâmina d'água. Comparando-se os valores médios, para tempo de retorno de 50 anos, do cenário proposto, parque, com os do atual, canal, há redução de 46% na velocidade e 56% no número de Froude, mas aumento de 34% na altura da lâmina d'água. Assim, há melhorias significativas na amenização da força destrutiva do fluxo de água, mas piora-se na situação de transbordamento. Para resolver essa situação, recomendou-se estudos da implantação de bacia de retenção ou detenção à montante do canal, para, assim, viabilizar a proposta de parque como solução de engenharia.

Em termos de impactos urbanísticos, foram analisadas três esferas principais: a socioambiental, incluindo dimensões como limpeza e segurança, a econômica e a de mobilidade urbana. Considerando o conceito de urbanismo sustentável, a necessidade

das cidades de possuírem espaços democráticos e atrativos aos cidadãos e visitantes e, em termos de mobilidade, aos pedestres e ciclistas, concluiu-se que a implantação do parque melhora a dinâmica de Crato, gerando valor social e econômico para seus cidadãos, com destaque às comunidades adjacentes ao rio.

Como as situações hidráulica e urbanística da proposta foram consideradas positivas, e contextualizando o cenário do parque do rio Granjeiro dentro do atual contexto urbanístico de Crato, no qual a cidade se reinventa com grandes projetos de infraestrutura socialmente sustentáveis, conclui-se que o presente trabalho apresenta à academia, às autoridades governamentais e à população cratense uma nova discussão de solução factível, tanto humanística como tecnicamente, para a problemática das enchentes, com o objetivo comum de melhoria da qualidade de vida através do conceito de uma cidade mais verde.

6. Bibliografia

BARBOZA, M. H. C. **Análise da matriz origem-destino para a mobilidade urbana em São José dos Campos: subsídios para a ampliação do transporte cicloviário**. 2014. Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

BERTONI, J. C. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2000. cap. 5. p. 177-241.

BOTELHO, M. H. C. **Águas de chuva: engenharia das águas pluviais nas cidades**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Plano Nacional de Mobilidade Urbana: caderno de referência para elaboração de plano de mobilidade urbanam (PlanMob)**. Brasília, 2007.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Águas subterrâneas e o ciclo hidrológico**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>>. Acesso em 12 nov. 2015.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS)**. Disponível em: <<http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/>>. Acesso em 12 nov. 2015.

CABRAL, S. L.; CAMPOS, J. N. B.; TEIXEIRA, F. A. A.; SILVEIRA, C. S.; LEMOS, W. E. D. Mapeamento de inundação urbana utilizando modelos hidrológicos e hidráulicos integrado a SIG: o caso da bacia do rio Granjeiro, Crato-CE. In: **XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2014.

CHANSON, H. **The hydraulics of open channel flow: an introduction**. 2. ed. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

FÁBOS, J. G. Greenway planning in the United States: its origins and recent case studies. **Landscape and Urban Planning**, 68, 321-342, 2004.

GEOGHEGAN, J. The value of open spaces in residential land use. **Land Use Policy**, 19(1), 91-98, 2002.

GOBSTER, P. H.; WESTPHAL, L. M. The human dimensions of urban greenways: planning for recreation and related experiences. **Landscape and Urban Planning**, 68, 147-165, 2004.

JANG, M.; KANG, C. Urban greenway and compact land use development: a multilevel assessment in Seoul, South Korea . **Landscape and Urban Planning**, 143, 160-172, 2015.

LIMA NETO, R. T.; MEDONÇA, L. A. R.; PEREIRA, J. A.; SOUSA, C. A. V.; GONÇALVES, J. Y. B.; FRISCHKORN, H. Análise morfométrica e ambiental da microbacia hidrográfica do rio Granjeiro, Crato/CE. **Revista Escola de Minas**, 61(3), 2008.

LINSLEY, R. K. J.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. **Hydrology for engineers**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1982.

LUYMES, D. T.; TAMMINGA, K. Integrating public safety and use into planning urban greenways. **Landscape and Urban Planning**, 33, 391-400, 1995.

MARX, R.; MELLO, A. M.; ZILBOVICIUS, M.; LARA, F. F. Spatial contexts and firm strategies: applying the multilevel perspective to sustainable urban mobility transitions in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 108, 1092-1104, 2015.

MIGUEZ, M. G.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P. City growth and urban drainage alternatives: sustainability challenge. **Journal of Urban Planning and Development**, 141(3), 2006.

MOREIRA, A. A. C. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Granjeiro – Crato-CE: composição do cenário atual e simulações de uso e ocupação do solo**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte.

MUGAVIN, D. Adelaide's greenway: River Torrens Linear Park. **Landscape and Urban Planning**, 68, 223-240, 2004.

OBROPTA, C. C.; KALLIN, P. L. Case study: the restoration of an urban flood plan. In: World Water & Environmental Resources Congress, 2003. **American Society of Civil Engineers**, 2003.

PACK, A. The economics of urban park planning: urban park planning through strategic land use can lead to increased value for recreation. **Parks & Recreation**, 40 (8), 64, 2005.

PFAFSTETTER, O. **Chuvas intensas no Brasil: relação entre precipitação, duração e frequência de chuvas em 98 postos com pluviógrafos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Obras de Saneamento, 1982.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

PORTO, R.; ZAHED, K.; TUCCI, C.; BIDONE, F. Drenagem Urbana. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2000. cap. 21. p. 805-847.

RIBEIRO, L.; BARÃO, T. Greenways for recreation and maintenance of landscape quality: five case studies in Portugal. **Landscape and Urban Planning**, 76, 79-97, 2006.

SÁ, P. E. F. **Modelagem hidráulica do canal do rio Granjeiro: análise do escoamento após a reconstrução da calha**. 2015. Monografia (Graduação) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte.

SACHS, J. D. **The age of sustainable development**. New York: Columbia University Press Online Access, 2014.

SANTOS, P.; MARQUES, G. F.; SOUZA, V. B. F. S. Analysis of the contribution of linear parks in urban flood control. In: World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries. **American Society of Civil Engineers**, 2012.

SILVA, F. O. E. **Relatório de visita técnica e parecer preliminar sobre o evento hidrológico de enxurrada e os colapsos estruturais ocorridos no canal do rio Granjeiro na cidade do Crato no mês de janeiro/2011**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, Columbia Water Center, 2011.

SILVA, T. A. **Modelagem hidráulica do canal do rio Granjeiro, Crato/CE, utilizando o programa computacional HEC-RAS**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Gestão de Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e a bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2000. cap. 1. p. 26-33.

SON, K.; KUNHEE, C.; WOODS, P.; PARK, Y. J. Urban sustainability predictive model using GIS: appraised land value versus LEED sustainable site credits. **Journal of Construction Engineering and Management**, 138(9), 1107-1112, 2012.

WALMSLEY, A. Greenways: multiplying and diversifying in the 21st century. **Landscape and Urban Planning**, 76, 252-290, 2006.

TAN, K. W. A greenway network for Singapore. **Landscape and Urban Planning**, 76, 45-66, 2006.

TURNER, T. Greenway planning in Britain: recent work and future plans. **Landscape and Urban Planning**, 76, 240-251, 2006.

USACE. **HEC-RAS River Analysis System User's Manual**. Version 4.1. Davis, 2010.

VEN TE CHOW. **Open-channel hydraulics**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

VEN TE CHOW (Org.) **Handbook of applied hydrology**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1964.

VEN TE CHOW; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

WALMSLEY, A. Greenways and the making of urban form. **Landscape and Urban Planning**, 33, 81-127, 1995.

WALMSLEY, A. Greenways: multiplying and diversifying in the 21st century. **Landscape and Urban Planning**, 76, 252-290, 2006.

Apêndice A. Análise comparativa, parque e canal, para diferentes tempos de retorno

As Figuras 57 a 68, a seguir, ilustram a análise comparativa entre canal e parque, para os parâmetros velocidade, número de Froude e altura da lâmina d'água. São apresentados os tempos de retorno de 5, 10, 20 e 100 anos, não presentes na análise comparativa do texto principal deste trabalho.

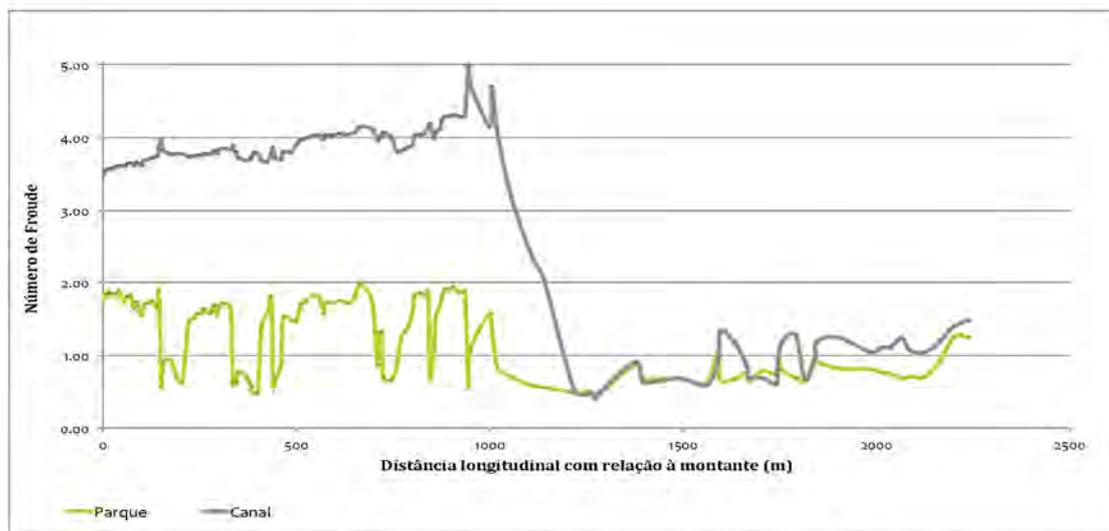


Figura 57: Gráfico comparativo dos números de Froude para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 5 anos. (Fonte: Autor)

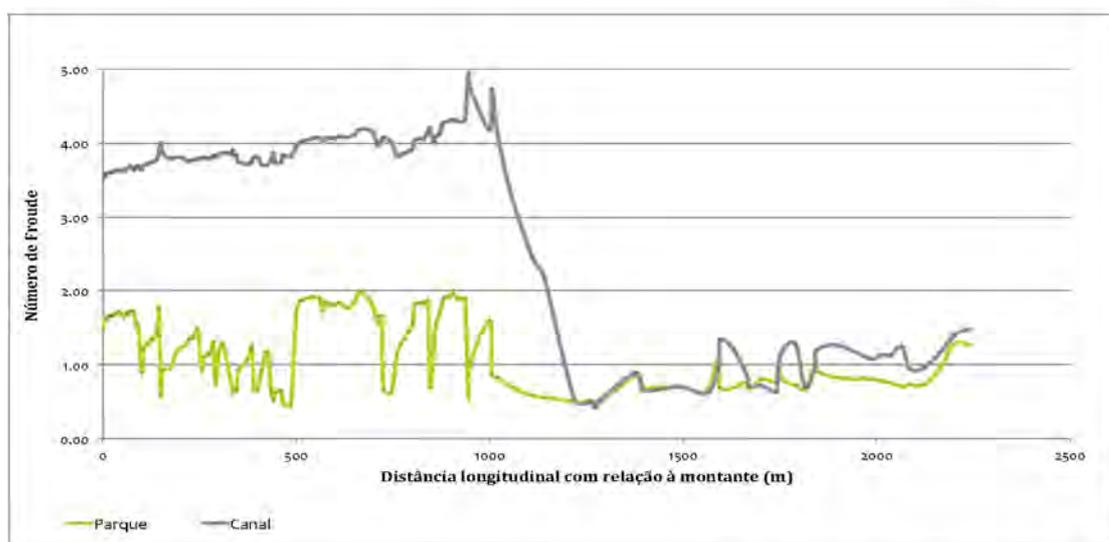


Figura 58: Gráfico comparativo dos números de Froude para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 10 anos. (Fonte: Autor)

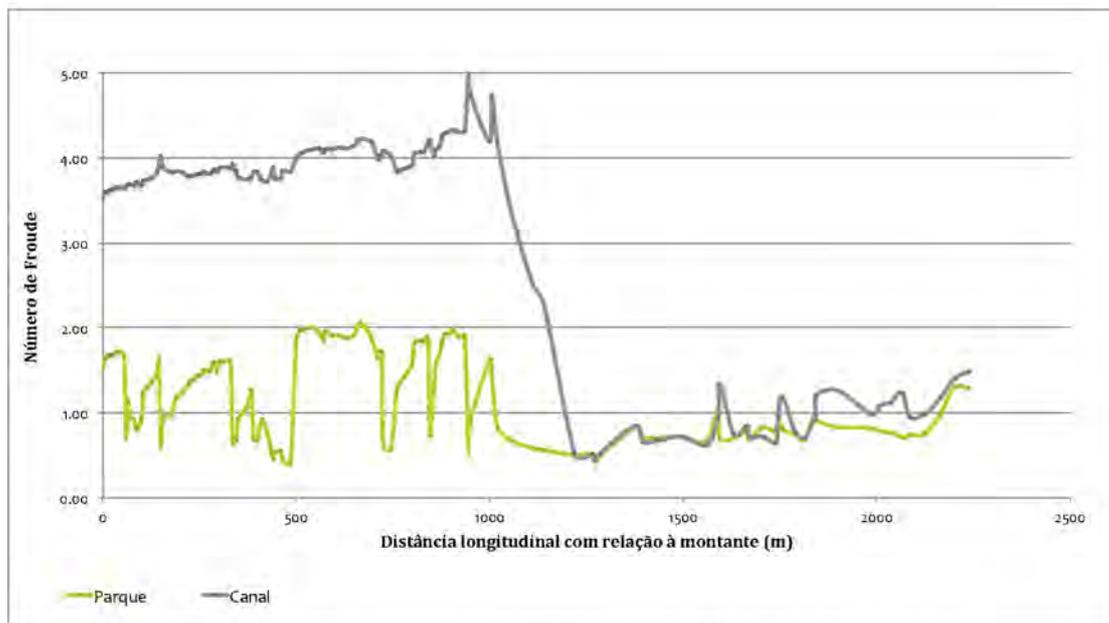


Figura 59: Gráfico comparativo dos números de Froude para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 20 anos. (Fonte: Autor)

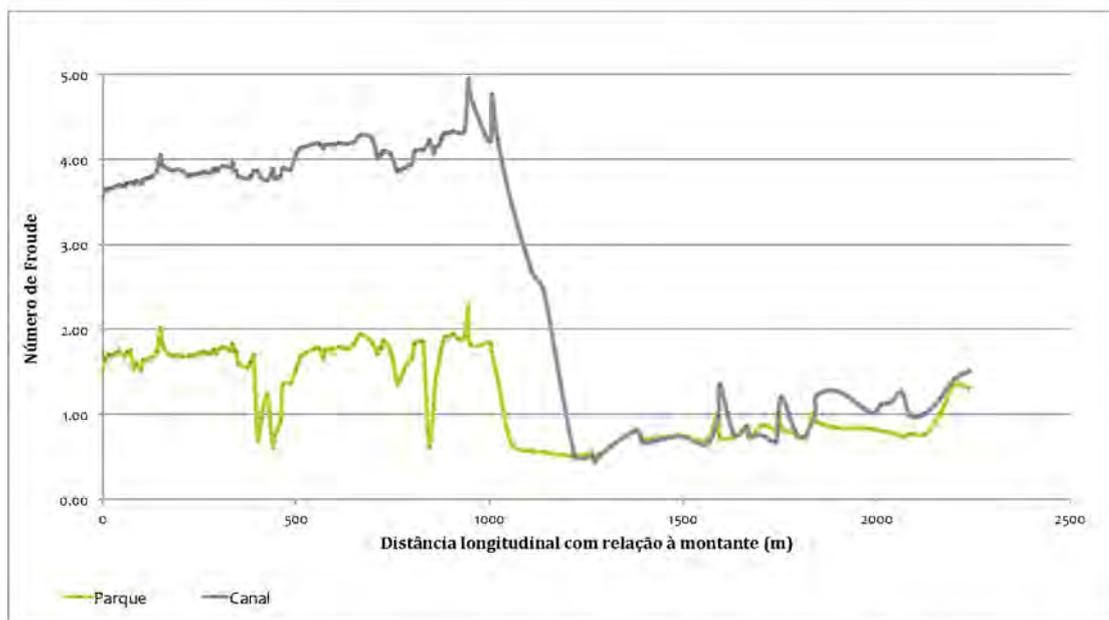


Figura 60: Gráfico comparativo dos números de Froude para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 100 anos. (Fonte: Autor)

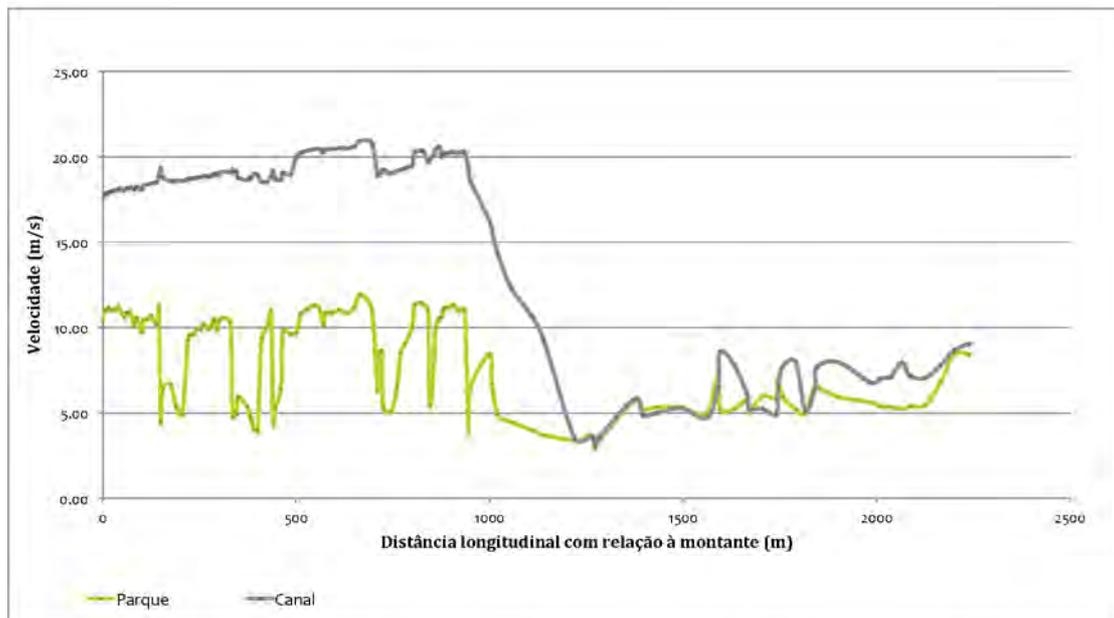


Figura 61: Gráfico comparativo das velocidades para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 5 anos. (Fonte: Autor)

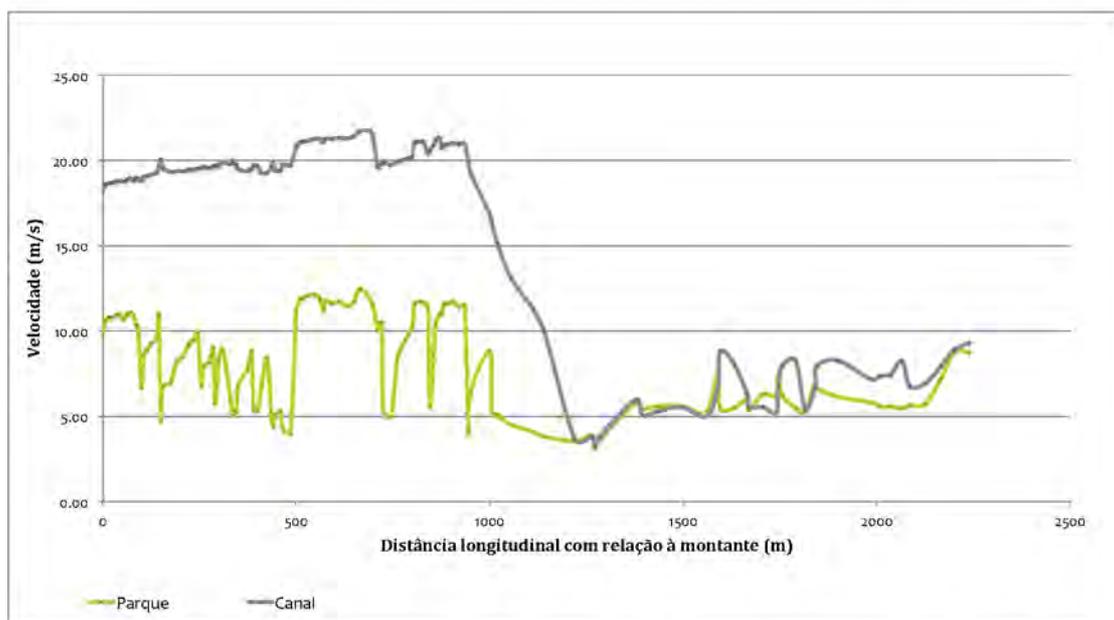


Figura 62: Gráfico comparativo das velocidades para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 10 anos. (Fonte: Autor)

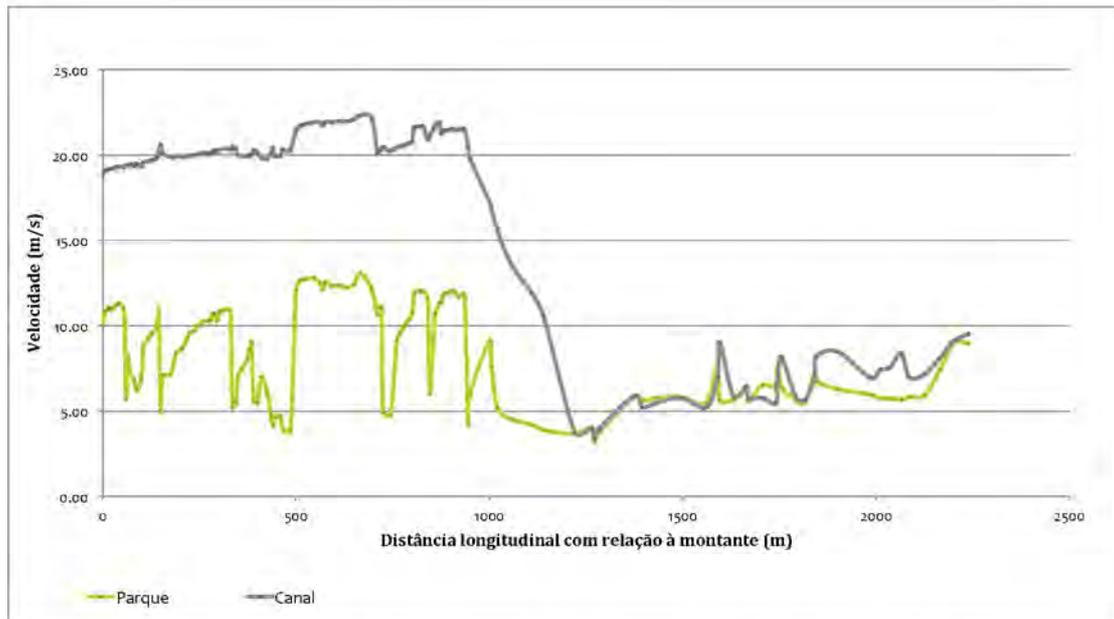


Figura 63: Gráfico comparativo das velocidades para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 20 anos. (Fonte: Autor)

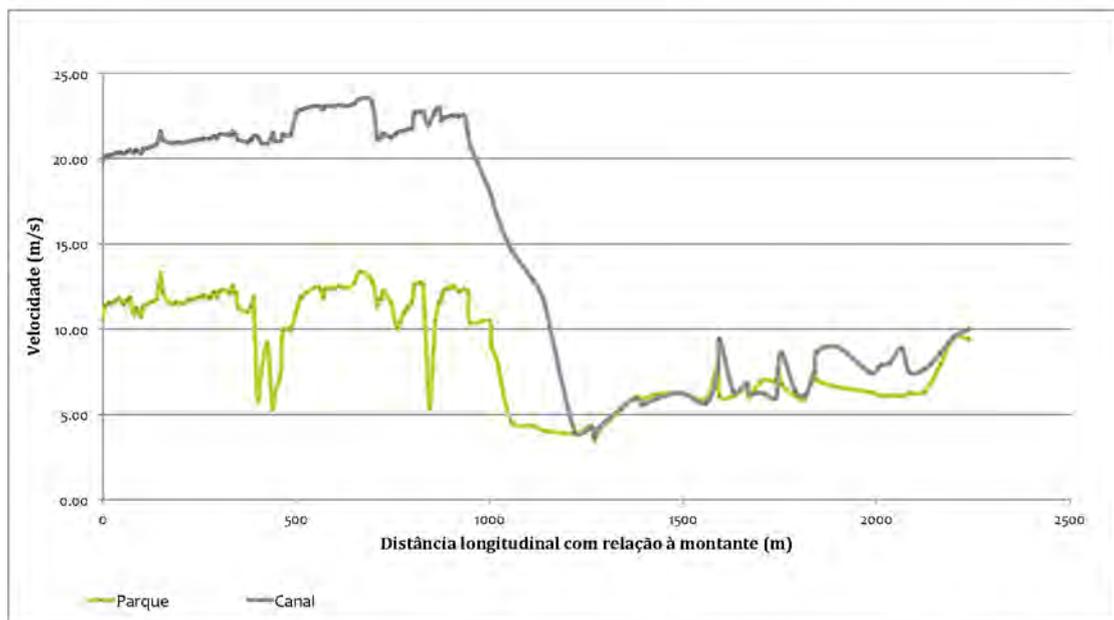


Figura 64: Gráfico comparativo das velocidades para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 100 anos. (Fonte: Autor)

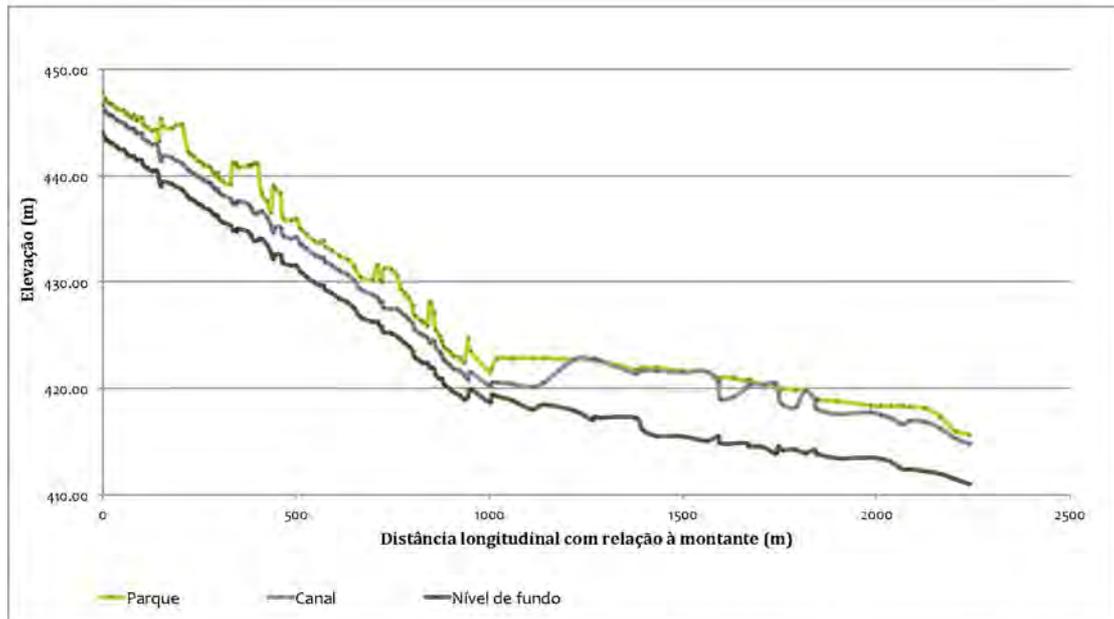


Figura 65: Gráfico comparativo das alturas da lâmina d'água para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 5 anos. (Fonte: Autor)

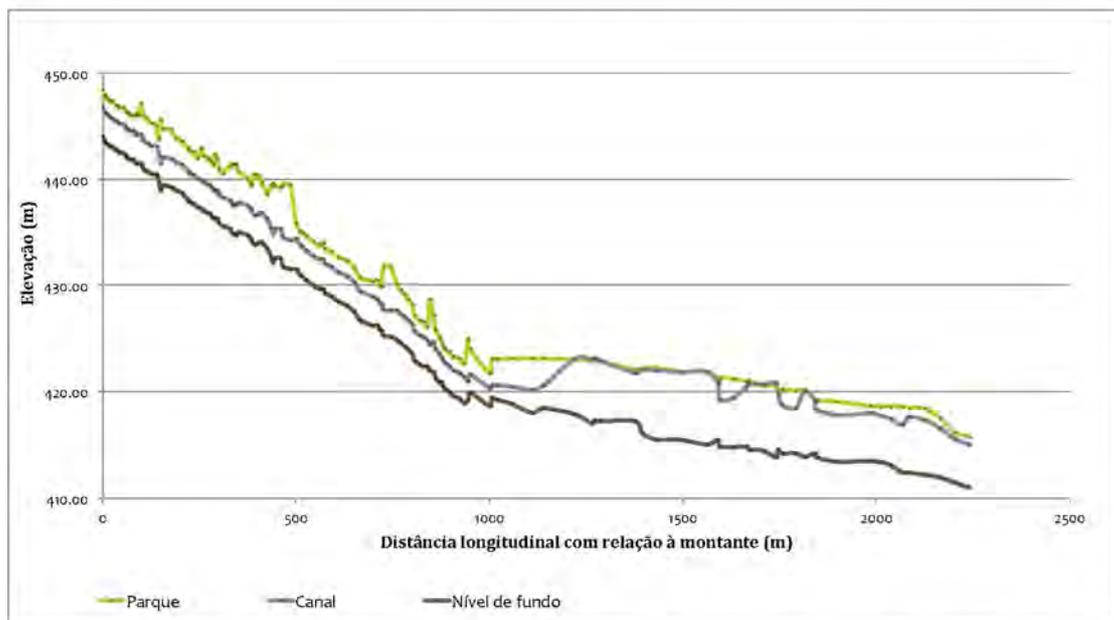


Figura 66: Gráfico comparativo das alturas da lâmina d'água para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 10 anos. (Fonte: Autor)

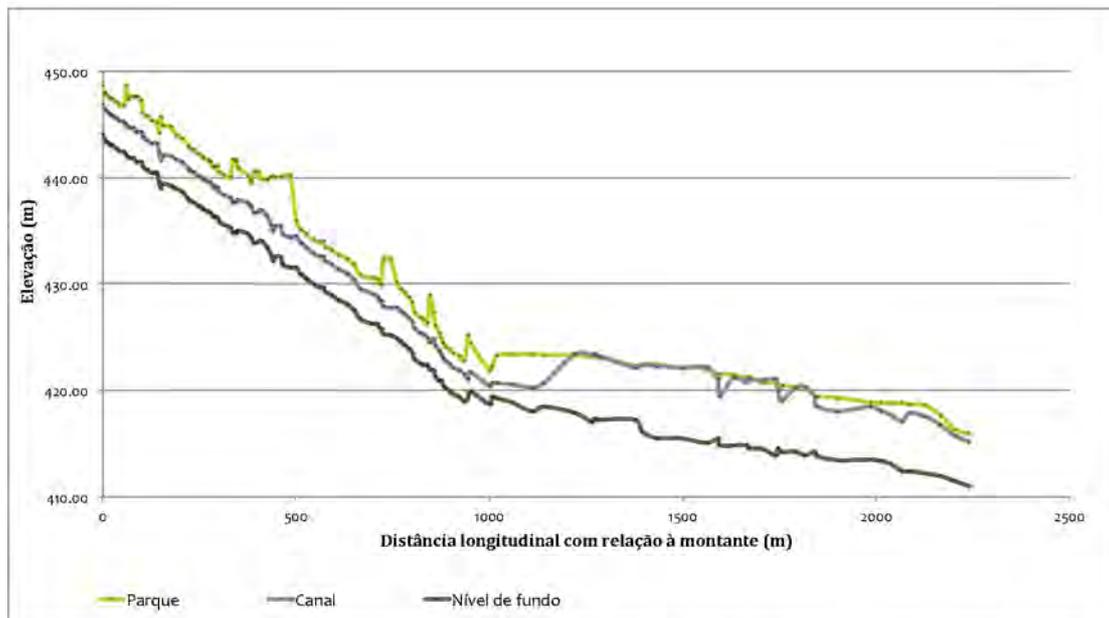


Figura 67: Gráfico comparativo das alturas da lâmina d'água para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 20 anos. (Fonte: Autor)

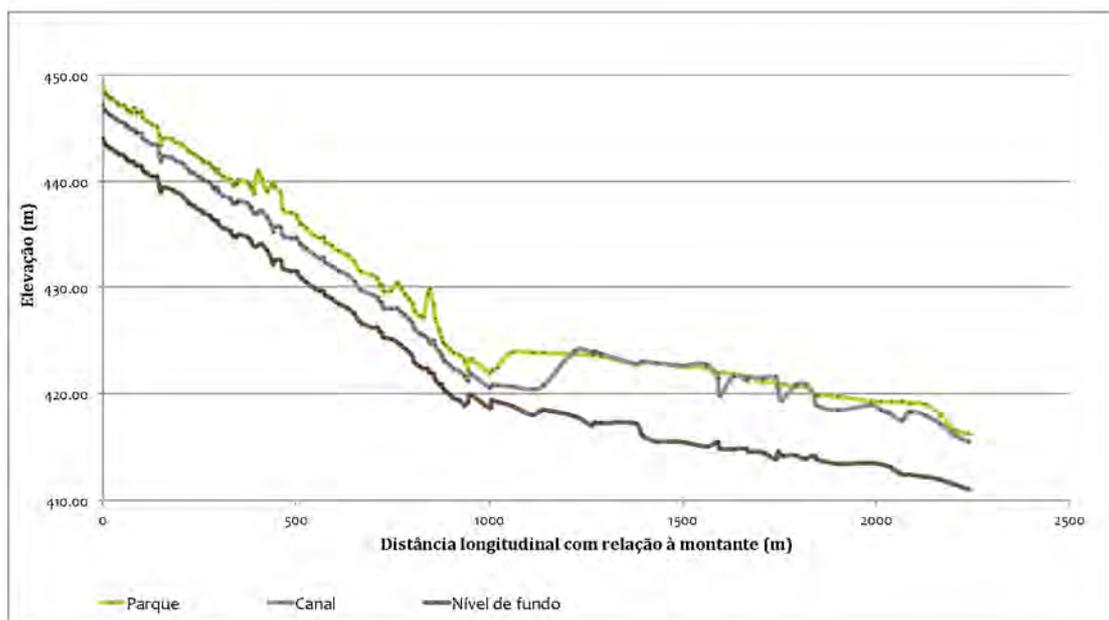


Figura 68: Gráfico comparativo das alturas da lâmina d'água para os cenários de parque e canal do rio Granjeiro, tempo de retorno de 100 anos. (Fonte: Autor)

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 17 de novembro de 2015	3. REGISTRO Nº DCTA/ITA/TC-039/2015	4. Nº DE PÁGINAS 107
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Estudo de impactos hidráulicos e urbanísticos mediante implantação de um parque linear marginal ao rio Granjeiro, Crato, Ceará.			
6. AUTOR: Bruno Bezerra Bluhm			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Parques lineares, Hidráulica de canais, Modelagem hidráulica, Urbanismo sustentável.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Estruturas hidráulicas; Rios; Canais; Enchentes; Desenvolvimento urbano; Engenharia civil.			
10. APRESENTAÇÃO: ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientadora: Profa. Dra. Nadiane Smaha Kruk. Publicado em 2015. <div style="text-align: right; margin-right: 100px;"> <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional </div>			
11. RESUMO: Como proposta de solução de engenharia para a problemática das enchentes no canal urbano do rio Granjeiro, em Crato, Ceará, este trabalho apresenta uma discussão aprofundada do cenário de implantação de um parque linear, substituindo o atual canal de concreto e, parcialmente, sua avenida marginal. Com o crescimento urbano, a impermeabilização e a retificação do seu leito, tal rio sofre com recorrentes eventos de cheias destrutivas, caracterizadas por escoamentos torrenciais com altas velocidades e transbordamento. Inspirado no conceito de urbanismo sustentável, o qual prioriza a relação de respeito entre as ecologias humana e biofísica, este trabalho propõe a implantação de um parque linear marginal, solução internacionalmente estabelecida, mas de caráter ainda vanguardista no Brasil. Para tanto, realizou-se uma modelagem hidráulica e uma análise dos impactos urbanísticos. O cenário de parque, se comparado com o atual, de canal de concreto, apresenta reduções significativas nos valores médios de velocidade e número de Froude: 46% e 56%, respectivamente. Entretanto, há um aumento de 34% na altura da lâmina d'água, piorando a situação de transbordamento. Esta pode ser solucionada com estudos de implantação de uma bacia de retenção a montante do canal, viabilizando o parque linear como solução de engenharia para a problemática do rio Granjeiro. Além disso, a presente proposta tende a somar à cidade um novo espaço público democrático, com melhorias sociais, ambientais, econômicas e de mobilidade, se agregando a recentes grandes projetos de revitalização urbana, coroando este momento em que Crato se reinventa como cidade sustentável.			
12. GRAU DE SIGILO: <div style="text-align: center;"> <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO </div>			