



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ – UFC**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRAULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS**

**THIAGO ALVES DA SILVA**

***MODELAGEM HIDRÁULICA DO CANAL DO RIO GRANJEIRO, CRATO/CE,  
UTILIZANDO O PROGRAMA COMPUTACIONAL HEC-RAS.***

**FORTALEZA**

**2013**

**THIAGO ALVES DA SILVA**

***MODELAGEM HIDRÁULICA DO CANAL DO RIO GRANJEIRO, CRATO/CE,  
UTILIZANDO O PROGRAMA COMPUTACIONAL HEC-RAS.***

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Gestão de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Gestão de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares – UFCA

**FORTALEZA**

**2013**

**THIAGO ALVES DA SILVA**

***MODELAGEM HIDRÁULICA DO CANAL DO RIO GRANJEIRO, CRATO/CE,  
UTILIZANDO O PROGRAMA COMPUTACIONAL HEC-RAS.***

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Gestão de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Gestão de Recursos Hídricos.

Monografia aprovada: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

Nota: \_\_\_\_\_

Banca Examinadora:

---

Prof. Paulo Roberto Lacerda Tavares, Dr. (Orientador)

---

Prof. John Kenedy de Araújo, Dr. (Examinador Interno)

---

Prof. Mariano de França Alencar Neto, Dr. (Examinador Externo)

*Dedico este trabalho a minha família pelo apoio e compreensão.*

## **AGRADECIMENTOS**

### **A DEUS**

Por me conceder o dom da vida.

### **A FAMILIA**

A minha mãe por ter contribuído intensamente na minha formação e na minha vida profissional, assim como também o meu irmão e parentes mais próximos.

### **AOS COLABORADORES**

Por ter contribuído para a elaboração deste trabalho, aos colegas de curso, bem como os professores e colegas de trabalho que tanto enriqueceram esta produção científica e em especial a *SRH - Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará* e *COGERH - Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos* pela oportunidade de crescimento profissional e intelectual.

## RESUMO

Esta pesquisa foi desenvolvida na zona urbana do município de Crato-CE na região do Cariri. O estudo tratou da aplicação de um modelo hidráulico para escoamento em canais livres em um canal de concreto que percorre parte da área urbanizada do centro da cidade e que ao longo dos anos vem ocorrendo eventos de inundação por conta das variáveis precipitações no município. O trabalho elaborado contou com visitas em campo de posse de equipamentos para realização de levantamentos topográficos, aferições de vazões, coleta de imagens e mensuração de campo. As informações obtidas nessa pesquisa servirão de base bibliográfica para contribuir no avanço de pesquisas e fornecimento de dados para um melhor planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos local.

Palavras-chave: *vazão, canais, escoamento.*

## **ABSTRACT**

This research was conducted in the urban area of the municipality of Crato-CE in the Cariri. The study is dealing with the application of a hydraulic model for runoff and free channels in a channel that winds masonry part of the urbanized area of the city center and over the years has been occurring flood events due to variable rainfall in the city. The work done included field visits, possession of equipment for conducting surveys, measurements of flow, collecting images and measurement field. The information obtained from this study will be a bibliographic database to contribute to the advancement of research and provision of data for better planning and management of water resources site.

Keywords: flow, channel flow.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Transbordamento de trecho do canal do Rio Granjeiro. (Fonte: Autor).....	2
Figura 02: Destruição de trecho do canal do Rio Granjeiro. (Fonte: Autor).....	2
Figura 03: Sedimento arrastado para o centro da cidade do Crato/CE após o transbordamento canal do Rio Granjeiro. (Fonte: Autor).....	3
Figura 04: Prejuízos causados ao moradores e comerciantes após o transbordamento canal do Rio Granjeiro. (Fonte: Autor).....	3
Figura 07: Localização da área da pesquisa. (Fonte: Autor).....	15
Figura 08: Localização da área da pesquisa. (Fonte: Autor).....	15
Figura 09: Instalação do GPS Geodésico modelo LEICA 9200 (Gps da Base) .....	16
Figura 10: Levantamento do eixo do canal com o GPS Geodésico modelo LEICA 9200 (Gps Móvel).....	17
Figura 11: Vista da seção de entrada do canal de alvenaria do Rio Granjeiro.....	17
Figura 12: Medição das dimensões estruturais do canal do Rio Granjeiro .....	18
Figura 13: Perfil longitudinal do canal do Rio granjeiro .....	18
Figura 14: Aferição da vazão de entrada do canal do Rio Granjeiro com o medidor de fluxo para canais abertos modelo ultrasônico FLOWTRACK.....	19
Figura 15: Aferição da vazão de saída do canal do Rio Granjeiro com o medidor de fluxo para canais abertos modelo ultrasônico FLOWTRACK.....	19
Figura 16: Vista da seção final do canal do Rio Granjeiro.....	20
Figura 17: Esquema do modelo da BHG no HEC-HMS. (Fonte: Modelagem Hidrológica da Bacia do Rio Granjeiro – Crato –ce Composição do Cenário Atual e Simulações de Uso e Ocupação do Solo).....	21
Figura 18: Interface gráfica do software HEC-HAS. (Fonte: Autor)......	23
Figura 19: Distribuição espacial das seções transversais no canal do Rio Granjeiro (Fonte: Autor) .....	28
Figura 20: Coeficientes de rugosidade para canais artificiais. (Fonte: Baptista e Lara, 2003) .....	32
Figura 21: Coeficientes de rugosidade para canais artificiais. (Fonte: Baptista e Lara, 2003) .....	32
Figura 22: Coeficientes de rugosidade para canais naturais. (Fonte: Baptista e Lara, 2003) .....	33

Figura 23: Representação do traçado do canal no modelo HEC-RAS 4.0.....	35
Figura 24: Representação dos termos da Equação da Energia. ....	36
Figura 25: Representação da altura máxima da lâmina d'água para os Tr de 5, 10, 20,50 e 100 anos.....	38
Figura 26: Representação do perfil longitudinal do canal para os Tr de 5, 10, 20, 50 e 100 anos.....	39
Figura 27: Representação do n° de Froude do canal para os Tr de 5, 10, 20,50 e 100 anos .....	39
Figura 28: Representação da vazão modelada no canal para os Tr de 5, 10, 20,50 e 100 anos .....	40
Figura 29: Representação das velocidades modelada no canal para os Tr de 5, 10, 20,50 e 100 anos.....	40
Figura 30: Representação do perfil longitudinal para as vazões de efluentes de entrada e saída do canal do Rio Granjeiro.....	41
Figura 31: Representação do perfil das vazões de efluentes de entrada e saída do canal do Rio Granjeiro.....	41
Figura 32: Representação do perfil altura máxima da lâmina d'água para as vazões de efluentes de entrada e saída do canal do Rio Granjeiro .....	42
Figura 33: Representação do n° de Froude para as vazões de efluentes de entrada e saída do canal do Rio Granjeiro .....	42
Figura 34: Representação das velocidades para as vazões de efluentes de entrada e saída do canal do Rio Granjeiro .....	43
Figura 35: Síntese dos dados da simulação para as vazões de efluentes de entrada e saída do canal do Rio Granjeiro .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Vazões obtidas no modelo hidrológico para os períodos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos.....	22
Tabela 02: Vazões do estudo hidrológico da bacia do rio granjeiro. Fonte: MOREIRA 2013 .....	34
Tabela 03: Vazões de esgotos aferidas com o equipamento FLOWTRACK .....	34
Tabela 04: Análise tabular da síntese dos dados da simulação para as vazões de efluentes de entrada e saída do canal do rio Granjeiro .....	45
Tabela 05: Análise tabular da síntese dos dados da simulação considerando os períodos de retorno de 5 anos .....	45
Tabela 06: Análise tabular da síntese dos dados da simulação considerando os períodos de retorno de 10 anos .....	46
Tabela 07: Análise tabular da síntese dos dados da simulação considerando os períodos de retorno de 20 anos .....	46
Tabela 08: Análise tabular da síntese dos dados da simulação considerando os períodos de retorno de 50 anos .....	46
Tabela 09: Análise tabular da síntese dos dados da simulação considerando os períodos de retorno de 100 anos .....	47

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT .....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Caracterização do problema.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo geral .....	4
1.2.2 Objetivos específicos .....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Regimes de escoamento em rios e canais.....	6
2.1.1 Tempo como referência.....	6
<input type="checkbox"/> Regime Permanente .....	6
<input type="checkbox"/> Regime Não-Permanente.....	7
2.1.2 Espaço como referência.....	8
<input type="checkbox"/> Regime variado .....	9
<input type="checkbox"/> Gradualmente variado .....	9
<input type="checkbox"/> Bruscamente variado .....	9
2.2 Hidráulica fluvial e de canais.....	10
2.2.1 Inundações.....	11
<input type="checkbox"/> Inundações de áreas ribeirinhas.....	11
<input type="checkbox"/> Inundações devido à urbanização .....	12
3. METODOLOGIA .....	13
3.1 Modelagem hidráulica do trecho aluvionar recoberto pelo o canal de alvenaria.....	14
3.1.1 Área de Estudo .....	14
3.1.2 Levantamento de dados.....	16
3.1.3 Dados hidrológicos de entrada no modelo .....	20
3.2 Programa computacional de modelagem hidráulica – HEC-RAS.....	22
3.2.1 Composição do modelo hidráulico.....	27

3.2.2	Inserção de dados no modelo .....	28
3.2.2.1	Definição da geometria.....	28
3.2.2.2	Definição dos coeficientes de Manning.....	29
3.2.3	Definição das vazões para o modelo hidráulico.....	34
3.2.4	Aplicação do modelo hidráulico .....	35
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	38
4.1	Resultados do modelo hidráulico .....	38
4.2	Análise dos resultados.....	43
5.	CONCLUSÃO .....	47
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

## **1. INTRODUÇÃO**

De modo geral, os escoamentos de fluidos estão sujeitos a determinadas condições gerais, princípios e leis da Dinâmica e a teoria da turbulência (PORTO, 2006). O desequilíbrio de suas condições naturais no âmbito quantitativo e qualitativo em decorrências de seu uso inadequado tem incentivado o desenvolvimento de novas tecnologias que auxiliem na gestão desses recursos. A tomada de decisão ligada com a gestão dos recursos hídricos passa necessariamente pelo estudo dos processos físicos que regem a distribuição e o movimento da água, ou seja, a investigação do ciclo hidrológico, que corresponde a um sistema fechado dentro de uma região em análise.

Nesse sentido, podemos especificar a ocorrência de eventos hidrológicos extremos associados a estruturas hidráulicas de escoamento de água, como os canais artificiais.

### **1.1 Caracterização do problema**

As inundações, bem como os demais tipos de desastres naturais, têm ocasionado freqüentemente diversos prejuízos socioeconômicos e ambientais. Alguns autores comentam que a intensidade e freqüência das inundações têm aumentado, e conseqüentemente os danos a ela associados. Para mitigar estes danos tem-se adotado diferentes medidas sendo que o mapeamento de áreas de risco é uma delas.

O município do Crato, localizado no Sul Cearense, assim como muitos outros municípios caririenses, sofre continuamente com a ocorrência das inundações, sendo os eventos de 2004, 2009 e 2010 os mais severos.



Figura 01: Transbordamento de trecho do canal do Rio Granjeiro. (Fonte: Autor)



Figura 02: Destruição de trecho do canal do Rio Granjeiro. (Fonte: Autor)



Figura 03: Sedimento arrastado para o centro da cidade do Crato/CE após o transbordamento canal do Rio Granjeiro. (Fonte: Autor)



Figura 04: Prejuízos causados aos moradores e comerciantes após o transbordamento canal do Rio Granjeiro. (Fonte: Autor)

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral a aplicação de métodos de cálculos hidráulicos utilizando um programa computacional que simule o comportamento do escoamento superficial em canais abertos. Tal ferramenta servirá de base para indicação de algumas medidas mitigadoras do ponto de vista da engenharia hidráulica, buscando evitar futuros acidentes ambientais relacionados a grandes eventos hidrológicos associados a cheias urbanas.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Especificamente, apresenta-se:

- A modelagem hidráulica do canal do rio Granjeiro para os períodos de retorno 5, 10, 20, 50 e 100 anos;
- Propostas de medidas mitigadoras a problemática ambiental do Canal do Rio Granjeiro.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os escoamentos de leito fixo têm a sua geometria fixa pelo homem ou pela natureza e são incapazes de mudar a configuração do canal. Hoje é possível resolver, com uma segurança adequada, grande parte dos problemas práticos presentes neste tipo de escoamento (VALIA, 2000).

Em rios aluvionares, a configuração do canal depende da profundidade da água, da velocidade da água e do transporte sólido. Mas estas propriedades do escoamento dependem também, por sua vez, da configuração do canal. As fases líquida e sólida interagem e o sedimento não pode ser ignorado.

Entre os problemas da Morfologia Fluvial, assumem particular importância a erosão (ou abaixamento) e a deposição (ou elevação) longitudinais do leito do rio, que podem ocorrer ao longo de dezenas, quando não centenas de quilômetros.

Elas distinguem-se das erosões ou deposições localizadas, confinadas à volta de uma seção ou pequeno trecho do rio (SILVA, 2001).

Por modelagem numérica de rios entende-se a simulação das condições de escoamento tendo por base a formulação e resolução das equações que expressam princípios hidráulicos conhecidos. Os conceitos fundamentais relativos aos escoamentos em canais com leito fixo foram apresentados na segunda metade do século XIX, nomeadamente por Barre de Saint-Venant, mas as primeiras aplicações destes princípios às condições reais de um curso de água apenas surgiram com o desenvolvimento do cálculo eletrônico na década de 1950, lentamente, aumentando substancialmente na década de 1970 (CUNGE et al., 1980).

A modelagem da evolução morfológica de rios e canais surgiu com o advento da computação em meados dos anos 50. O primeiro trabalho de análise sistemática das equações envolvidas foi o de VRIES (1965). De realçar o modelo computacional HEC-6 (USACE 1993), desenvolvido no Hydrological Engineering Center (HEC) do U. S. Corps of Engineers (EUA) na década 1970, tendo sofrido desde então várias

atualizações. Este modelo continua ainda hoje a ser o mais usado em nível internacional.

## **2.1 Regimes de escoamento em rios e canais**

Os escoamentos com superfície livre podem apresentar variações contínuas de suas grandezas tanto no espaço como no tempo. Associando a estes escoamentos um sistema de coordenadas cartesianas, no caso de um rio, representaremos o espaço unicamente pela abscissa  $x$ , devido à hipótese de escoamento unidimensional, e o tempo por  $t$ . Isto significa na prática, que uma determinada abscissa  $x$  corresponde à posição de uma seção transversal a partir de um marco inicial, enquanto que um dado valor de  $t$  corresponde a um instante de observação ou medição das propriedades do escoamento.

As coordenadas  $x$  e  $t$  representam, portanto as variáveis independentes em qualquer relação que defina o comportamento do escoamento na calha de um rio. As principais variáveis dependentes são definidas respectivamente como a vazão líquida  $Q(x,t)$  em uma seção transversal, a velocidade média  $v(x, t)$  na mesma seção, a cota nível d'água  $Z(x, t)$  e a profundidade média da seção molhada  $h(x,t)$ .

### **2.1.1 Tempo como referência**

- **Regime Permanente**

As variáveis dependentes dos escoamentos em rios podem variar ou permanecer constantes ao longo do tempo. Quando invariáveis com o tempo em uma mesma seção, diz-se que o escoamento se encontra em regime permanente.

Este regime de escoamento pode ser verificado aproximadamente em rios, durante a estiagem. Nesta época, a única contribuição possível ao leito vem dos lençóis subterrâneos, que se caracterizam por variações temporais muito lentas, e isto pode garantir uma vazão e profundidade aproximadamente constantes em uma mesma seção ao longo de um determinado intervalo de tempo. Outro exemplo importante de escoamento permanente pode ocorrer à montante de uma barragem, gera o controle que pode manter o escoamento permanente ao impor, por exemplo, uma vazão ou um nível constante (VALIA, 2000).

Nos escoamentos permanentes, as derivadas parciais de qualquer variável dependente em relação ao tempo são definições nulas, pois são determinadas para um valor fixo de  $x$ , ou seja, para uma determinada seção transversal. Todavia, isto ocorre com a derivada substantiva devido à existência de uma componente temporal da variação no espaço, definida como o tempo necessário para uma partícula de água percorrer o trecho entre duas seções consecutivas. Tomando-se, por exemplo, a velocidade como variável dependente de referência, a sua derivada no tempo (VALIA, 2000).

A variação da velocidade ao longo do escoamento decorre do fato de que, mesmo em regime permanente, ela pode ser diferente em duas seções consecutivas, e seus valores variam com o tempo necessário para a água se deslocar entre as duas seções.

- **Regime Não-Permanente**

Nos casos onde são observadas modificações nas variáveis dependentes ao longo do tempo e em uma mesma seção, diz-se que o escoamento se encontra em regime não-permanente.

Este é o padrão mais comum dos regimes de escoamentos em Hidráulica Fluvial. Estes movimentos, nos quais as grandezas variam no espaço e no tempo apresentando numa mesma seção, um período de ascensão seguido por um

período de recessão correspondem a ondas de translação, e entre os seus exemplos mais importantes podemos destacar os seguintes (VALIA, 2000):

- a) Ondas de cheia: o processo chuva-vazão em uma bacia provoca o lançamento de um grande volume de água no sistema de drenagem fazendo com o que vazões, níveis e velocidades se alterem para jusante sob a forma de uma onda de translação.
- b) Ondas geradas pela operação de usinas hidrelétricas: também conhecidas como ondas de despacho, resultam da liberação de descargas dos reservatórios das UHE's para geração de energia ou atendimento a outros usos da água a jusante.
- c) Ondas decorrentes da operação de eclusas de navegação: o esvaziamento da câmara de uma eclusa resulta na liberação de descargas que se propagam em forma de onda através do canal de navegação.
- d) Ondas provenientes de acidentes ou ruptura de barragens: ruptura em barragens de concreto ou galgamento em barragens de terra podem produzir a liberação de grande parte do volume armazenado em um curto intervalo de tempo criando ondas devastadoras de grandes proporções.
- e) Ondas de maré em estuários: devido ao caráter oscilatório das marés, a sua penetração nas embocaduras dos rios se faz sob forma de uma onda em sentido contrário ao escoamento durante a enchente, revertendo este sentido no período de vazante.

### 2.1.2 Espaço como referência

Tomando o espaço, no caso o eixo dos  $x$ , como referência, ou seja, analisando a variação das grandezas do escoamento ao longo da calha do rio, podemos definir dois regimes do leito da linha d'água.

Este regime a rigor, não é encontrado na natureza. Entretanto pode-se admitir na prática o uso de relações características do regime uniforme, sempre que for possível desprezar pequenas diferenças nos valores das variáveis entre seções consecutivas. Isto pode ocorrer geralmente nos períodos secos, em trechos retilíneos da calha fluvial, sem contribuição de afluentes importantes, com declividades suaves e formas das seções transversais aproximadamente constantes (VALIA, 2000).

- **Regime variado**

O regime de escoamento em que as grandezas variam ao longo da distância, mas permanecem invariantes no tempo em uma mesma seção, é chamado de regime permanente variado. Como exemplos mais importantes deste regime em hidráulica fluvial podemos destacar os seguintes, todos definidos para uma vazão de referência constante: escoamento a montante de uma barragem; escoamento a montante de uma confluência; escoamentos a jusante de um alargamento ou de uma contração da seção transversal como a provocada por ponte e escoamentos a montante do ponto de inversão da penetração da maré em um estuário.

De acordo com a taxa de variação com a distância das variáveis dependentes, os escoamentos permanentes variados podem se sub-classificar em duas categorias:

- Gradualmente variado

É o regime em que as profundidades e velocidades do escoamento variam com a distância de forma gradual ao longo de varias seções. É o caso do escoamento da montante de barragens, confluências ou no trecho fluvial de um estuário.

- Bruscamente variado

É o regime que ocorre quando estas profundidades variam de forma brusca, isto ocorre geralmente em trechos com pequeno comprimento, o que faz com que a

ocorrência deste tipo de regime também seja conhecida genericamente como um “fenômeno localizado”. As linhas de corrente apresentam curvaturas acentuadas e às vezes uma descontinuidade na superfície livre. Este regime ocorre geralmente sobre vertedouros, na transição de trechos com corredeiras ou em estreitamentos e alargamentos bruscos de seção, dependendo da taxa de variação da seção molhada.

## **2.2 Hidráulica fluvial e de canais**

A característica hidráulica fundamental dos escoamentos em rios e canais é que eles se apresentam sempre como escoamentos com superfície livre. Mesmo quando canalizados através de galerias, eles mantêm esta característica, exceto quando, para vazões superiores à vazão de projeto, o escoamento nestas galerias se coloque sob pressão.

Escoamentos com superfície livre e escoamentos sob pressão são os dois tipos básicos de escoamentos. No caso dos primeiros, duas propriedades são fundamentais para a compreensão dos mecanismos da hidráulica fluvial:

- a) Os escoamentos com superfície livre se efetuam sempre em contato com a pressão atmosférica, podendo variar a posição da superfície da água e no espaço e no tempo como resposta a modificações, por exemplo, na seqüência de vazões de montante. Esta é, aliás, a razão para que eles tenham essa denominação “com superfície livre”. Se compararmos com os escoamentos sob pressão, estes últimos respondem geralmente à modificações nos fatores condicionantes, através do aumento da pressão sobre as paredes do encanamentos. Os lençóis subterrâneos são também exemplos destes tipos de escoamento. Os lençóis denominados freáticos deslocam-se sob pressão e no caso de um poço perfurado nestas condições a água jorra até uma altura correspondente à pressão a que eles estão submetidos. Já os lençóis não freáticos respondem a uma carga provocada pelas chuvas, através de uma simples elevação do nível.

- b) Os escoamentos com superfície livre possuem uma susceptibilidade determinante aos efeitos da gravidade, que representa a força motriz fundamental para este tipo de escoamento. Comparando mais uma vez com escoamentos sob pressão, estes podem escoar contra a gravidade desde que lhes seja fornecida energia suficiente, como ocorre nas estações de bombeamento. No caso dos escoamentos com superfície livre, este padrão é impossível, uma vez que a gravidade é o fator que determina o sentido do escoamento. Na prática, isto é equivalente a dizer que a declividade do terreno indica este sentido.

### 2.2.1 Inundações

O escoamento pluvial pode produzir inundações e impactos nas áreas urbanas devido a dois processos, que ocorrem isoladamente ou combinados: *Inundações de áreas ribeirinhas e inundações devido à urbanização.*

- Inundações de áreas ribeirinhas

Os rios geralmente possuem dois leitos, o leito menor onde a água escoar na maioria do tempo e o leito maior, que é inundado com risco geralmente entre 1,5 e 2 anos. TUCCI (1994) obtiveram um valor médio de 1,87 anos para os rios do Alto Paraguai. O impacto devido à inundação ocorre quando a população ocupa o leito maior do rio, ficando sujeita a inundação.

Estas enchentes ocorrem, principalmente, pelo processo natural no qual o rio escoar pelo seu leito maior. Este tipo de enchente é decorrência do processo natural

do ciclo hidrológico. Quando a população ocupa o leito maior, que são áreas de risco, os impactos são freqüentes.

Essas condições ocorrem, em geral, devido às seguintes ações:

- a) Como no Plano Diretor Urbano da quase totalidade das cidades da América do Sul, não existe nenhuma restrição quanto ao loteamento de áreas de risco de inundação, a seqüência de anos sem enchentes é razão suficiente para que empresários loteiem áreas inadequadas;
- b) Invasão de áreas ribeirinhas, que pertencem ao poder público, pela população de baixa renda;
- c) Ocupação de áreas de médio risco, que são atingidas com freqüências menores, que quando o são, sofrem prejuízos significativos.

Os principais impactos sobre a população são:

- 1) Prejuízos de perdas materiais e humanas;
- 2) Interrupção da atividade econômica das áreas inundadas;
- 3) Contaminação por doenças de veiculação hídrica como leptospirose, cólera, entre outras;
- 4) Contaminação da água pela inundação de depósitos de material tóxico, estações de tratamentos entre outros.

- Inundações devido à urbanização

As enchentes aumentam a sua freqüência e magnitude devido à impermeabilização, ocupação do solo e a construção da rede de condutos pluviais. O desenvolvimento urbano já pode também produzir obstruções ao escoamento, como aterros e pontes, drenagens inadequadas e obstruções ao escoamento junto a condutos e assoreamento.

A medida que a cidade se urbaniza, em geral, ocorrem os seguintes impactos:

1. Aumento das vazões máximas em até 7 vezes e da sua freqüência devido ao aumento da capacidade de escoamento através de condutos e canais e impermeabilização das superfícies;
2. Aumento da produção de resíduos sólidos (lixo);
3. Deterioração da qualidade da água superficial e subterrânea, devido à lavagem das ruas, transporte de material sólido e às ligações clandestinas de esgoto cloacal e pluvial e contaminação de aquíferos;

A forma desorganizada como a infra-estrutura urbana é implantada se apresenta como principal contribuinte para a geração de impactos causados pelas inundações. Exemplos dessas situações são: (a) pontes e taludes de estradas que obstruem o escoamento; (b) redução de seção do escoamento por aterros de pontes e para construção em geral; (c) deposição e obstrução de rios, canais e condutos por lixos e sedimentos; (d) projetos e obras de drenagem inadequadas, com diâmetros que diminuem para jusante, drenagem sem esgotamento, entre outros.

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho tem por objetivo representar por meio de simulações hidráulicas a partir de modelos computacionais uma metodologia que servirá de base para o cálculo da linha d'água no canal do rio Granjeiro na área urbana do município do Crato/CE e verificar o potencial de transbordamento do referido canal.

Neste contexto, será utilizado o programa computacional HEC-RAS para a modelagem hidráulica do canal de concreto em um trecho do rio Granjeiro para verificação de áreas críticas. Com a aplicação do HEC-RAS serão utilizadas, como parâmetros hidrológicos de entrada, as vazões referentes aos períodos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos obtidas no estudo hidrológico da bacia do rio Granjeiro de título: "**Modelagem Hidrológica da Bacia do Rio Granjeiro – Crato – Ce**

## ***Composição do Cenário Atual e Simulações de Uso e Ocupação do Solo” – Moreira 2013.***

### **3.1 Modelagem hidráulica do trecho aluvionar recoberto pelo o canal de alvenaria**

No caso em estudo, consideraram-se, como parâmetros de entrada: a demarcação das seções transversais e longitudinais em toda a extensão do canal, o levantamento topográfico geodésico das seções transversais do canal para a composição da geometria ao longo do trecho modelado, a aferição das vazões de entrada e saída do canal, o levantamento fotográfico, bem como, os diversos coeficientes de Manning e as vazões referentes aos diversos períodos de retorno produzidas pelo estudo hidrológico existente da bacia do rio Granjeiro.

#### **3.1.1 Área de Estudo**

A pesquisa foi desenvolvida na área urbana central do município de Crato-CE, onde o canal abrange os bairros do Centro, parte do bairro Pimenta e pequena parte do bairro Palmeiral, conforme a Figura 08. O canal estudado pode ser localizado através da coordenadas planas no DATUM SIRGAS 2000 UTM's E-453378 N 9199841 com altitude ortométrica de 459.43 metros.

O município de Crato apresenta uma demografia de 121.428 habitantes sendo distribuídos 100.916 habitantes na zona rural com 20.512 habitantes na zona urbana registrados pelo IBGE no senso demográfico no ano de 2010. Sua principal atividade econômica é o setor de comércio e serviços, que, segundo dados de 2002, é responsável por nada menos que 68,8% do PIB municipal. Ainda pelos mesmos dados, a indústria responde por 27,6% do PIB e o setor agropecuário, embora bastante destacado na cidade graças à famosa feira agropecuária da Expocrato a qual é responsável por apenas 3,6%.

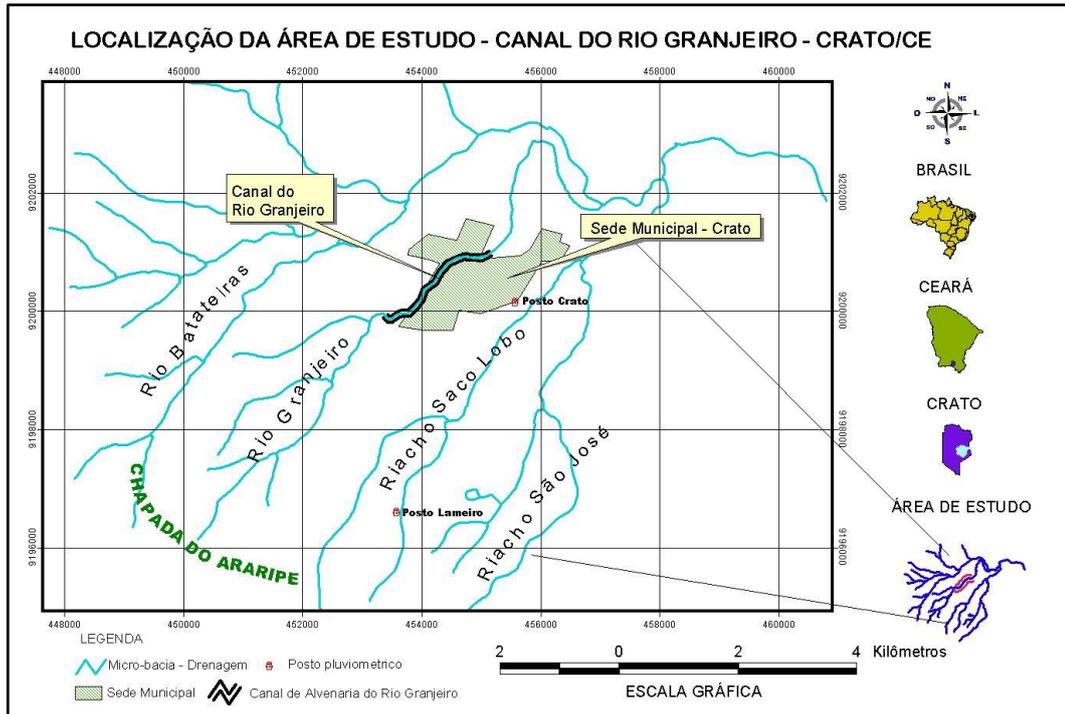


Figura 07: Localização da área da pesquisa. (Fonte: Autor)

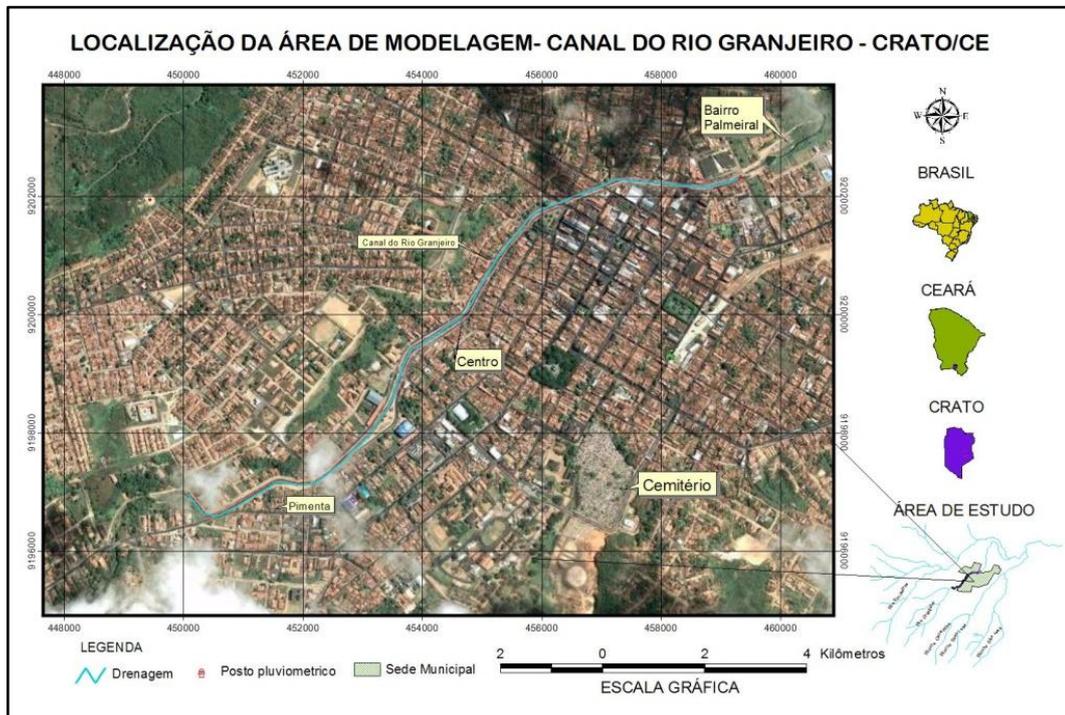


Figura 08: Localização da área da pesquisa. (Fonte: Autor)

### 3.1.2 Levantamento de dados

A obtenção dos dados em campo foi a partir do levantamento geodésico realizado em toda a extensão do canal de concreto que possui 2.242,86 m. As localizações das seções transversais que foram definidas anteriormente ao levantamento geodésico considerou as características das linhas de água, procurando selecionar os cortes transversais de modo a que os trechos entre seções sejam considerados com características praticamente constantes. Foram representadas 72 seções transversais, espaçadas da seguinte forma: 70 seções transversais com distanciamento de 30 metros e 2 seções transversais de 40 metros, perpendiculares à direção de escoamento.

O canal de concreto possui uma forma trapezoidal cuja base menor é da ordem de 2.60 metros, base maior com 10.00 metros de largura, inclinação de 2V:1H e comprimento dos taludes laterais na ordem de 5.00 metros.



Figura 09: Instalação do GPS Geodésico modelo LEICA 9200 (Gps da Base)



Figura 10: Levantamento do eixo do canal com o GPS Geodésico modelo LEICA 9200 (Gps Móvel)



Figura 11: Vista da seção de entrada do canal de alvenaria do Rio Granjeiro



Figura 12: Medição das dimensões estruturais do canal do Rio Granjeiro



Figura 13: Perfil longitudinal do canal do Rio granjeiro



Figura 14: Aferição da vazão de entrada do canal do Rio Granjeiro com o medidor de fluxo para canais abertos modelo ultrasônico FLOWTRACK

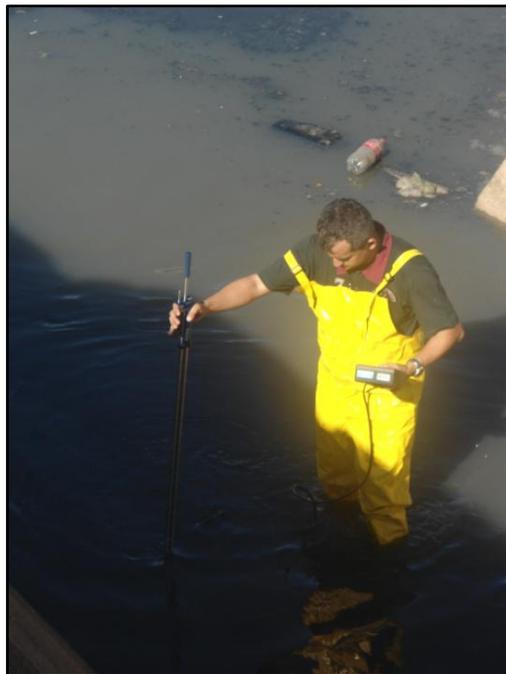


Figura 15: Aferição da vazão de saída do canal do Rio Granjeiro com o medidor de fluxo para canais abertos modelo ultrasônico FLOWTRACK



Figura 16: Vista da seção final do canal do Rio Granjeiro

### 3.1.3 Dados hidrológicos de entrada no modelo

O estudo hidrológico de uma bacia hidrográfica tem como um dos objetivos, encontrar a vazão de água no exutório, ou num determinado ponto, decorrentes de um evento de chuva, sobre a sua área de drenagem.

Os dados de vazão de entrada do modelo foram obtidos a partir da modelagem realizada no estudo: **Modelagem Hidrológica da Bacia do Rio Granjeiro – Crato/CE: Composição do Cenário Atual e Simulações de Uso e Ocupação do Solo**, onde foram idealizadas dois tipos de análises, uma análise do cenário anual, ou seja, considerando a classificação de uso e ocupação realizada com a imagem de satélite de 2010 e a análise de cenários fictícios de uso e ocupação do solo, simulando prováveis situações futuras.

Nas duas análises, foram feitas as seguintes considerações: eventos de chuvas com períodos de retornos de 5, 10, 20, 50 e 100 anos; distribuição espacial uniforme em toda a bacia, conforme CAMPOS (2009), distribuição temporal, usando

o método do hietograma dos blocos alternados, com o cálculo da intensidade, por meio da equação de chuvas intensas do município do Crato; duração do evento igual ao tempo de concentração da BHG, no qual contempla a vazão máxima no seu exutório, calculado pelo método do SCS com tempo de simulação de 4 horas e verificação de dados de 2 em dois minutos devido não simular o amortecimento ocorrido no escoamento pelo rio tendo em vista a falta de dados fluviométricos para estimativa dos parâmetros de propagação.

O modelo construído apresentou nove sub-bacias, nove trechos de rio, quatro junções, um exutório, conforme mostra a imagem a seguir:

### Esquema do modelo hidrológico da BHG no HEC-HMS

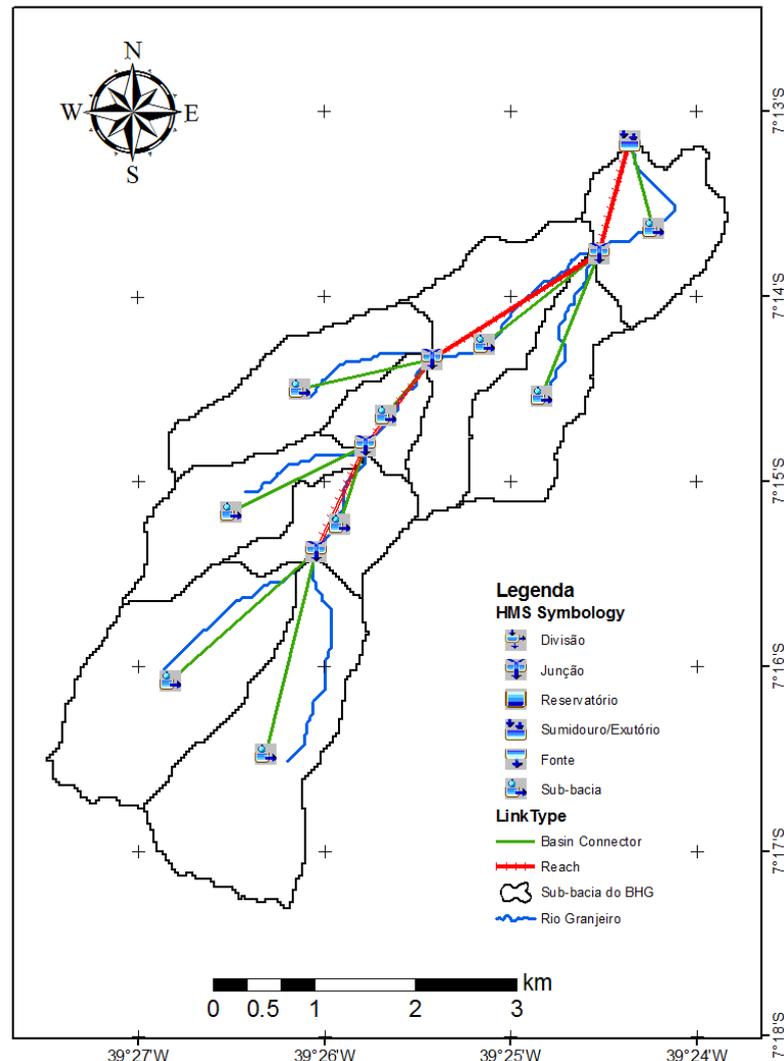


Figura 17: Esquema do modelo da BHG no HEC-HMS. (Fonte: Modelagem Hidrológica da Bacia do Rio Granjeiro – Crato –ce Composição do Cenário Atual e Simulações de Uso e Ocupação do Solo)

Para a elaboração da modelagem hidráulica nesse estudo considerou-se as vazões calculadas a partir do modelo hidrológico proposto no estudo acima citado, para isto, a sub-bacia SB2, apresenta um canal construído em concreto e alvenaria, que tem a intenção de canalizar as águas pluviais até a região posterior ao centro do município. Esta sub-bacia apresenta área bastante povoada e com impermeabilização alta (69,82 %).

Esta sub-bacia está definida entre as junções J1 e J2, onde o escoamento superficial é captado pelo trecho do rio TR2 (canal de concreto), provenientes dos bairros centrais, como Pimenta e Centro, além de partes do Alto do Seminário, Caixa D'água, Sossego e Granjeiro.

As vazões obtidas para os períodos de retornos de 5, 10, 20, 50 e 100 anos estão ilustradas na tabela a seguir:

Tabela 01: Vazões obtidas no modelo hidrológico para os períodos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Sub-bacias	Q (Tr 5) m <sup>3</sup> /s	Q (Tr 10) m <sup>3</sup> /s	Q (Tr 20) m <sup>3</sup> /s	Q (Tr 50) m <sup>3</sup> /s	Q (Tr 100) m <sup>3</sup> /s
<b>SB2</b>	189,3	213,7	232,8	256,3	274,4

### 3.2 Programa computacional de modelagem hidráulica – HEC-RAS

Existem diversos modelos numéricos para realização de simulação hidráulica de escoamento em canais livres independente de seu regime natural de fluxo. Sabe-se que o grande dificuldade no que diz respeito a confiabilidade do modelo hidráulico empregado está na aquisição, definição e parametrização dos dados de entrada. Vários fatores influenciam os respectivos resultados: esquemas numéricos de resolução, hipóteses de base e simplificativas, condições de simulação, calibração, interface entre sistemas e softwares entre outros.

O *software* HEC-RAS é considerado um dos mais difundidos por diversos fatores, nos quais se destacam a facilidade de uso, com relação aos aspectos interativos e a aplicação prática com menor quantidade de inclusão de dados.

Desenvolvido pelo HEC (Hydrologic Engineering Center) o *software* RAS (River Analysis System) foi arquitetado para efetuar cálculos hidráulicos em sistemas dendríticos de canais naturais ou não. A seguir segue a ilustração da interface do programa computacional.

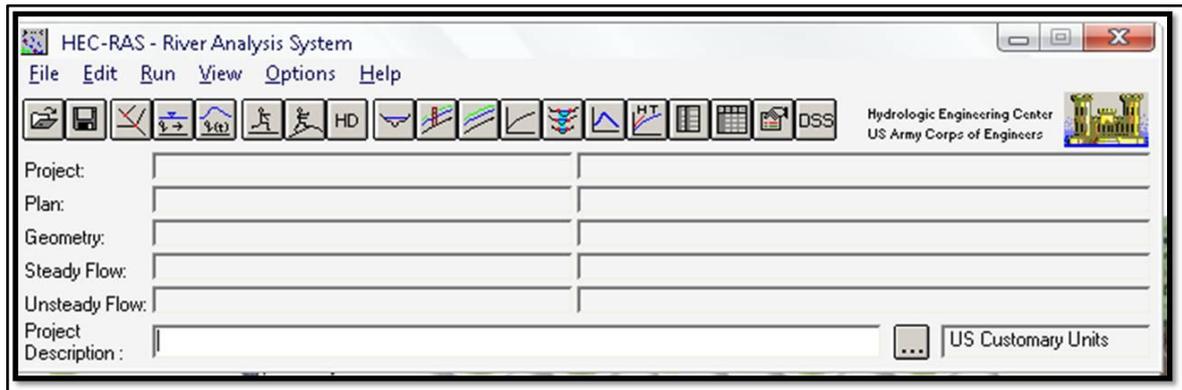


Figura 18: Interface gráfica do software HEC-HAS. (Fonte: Autor).

Entre as aplicações do software estão:

- Estudos para determinação da área de inundação dos rios e de proteção contra as enchentes;
- Efeitos dos diversos obstáculos hidráulicos como pontes, bueiros, vertedores de barragens, diques e outras estruturas hidráulicas;
- Análise das alterações nos perfis da superfície d'água devido à modificações da geometria do canal;
- Múltiplos perfis de superfície d'água (modelagem de cenários para diferentes condições hidráulicas e hidrológicas), erosão em pontes e operação de barragens em seqüência.

Operando sobre modelos unidimensionais, de fundo fixo, sendo capaz de efetuar os cálculos dos perfis de superfície da água em escoamento permanente e não permanente, em canais com superfície livre.

Esses perfis podem ser calculados em regimes subcrítico, supercrítico, e misto, podendo ocorrer mudanças dos regimes supercríticos para subcrítico reciprocamente.

A aplicação do modelo requer algumas hipóteses simplificadoras que estão implícitas nas expressões analíticas. O modelo não tem a capacidade de trabalhar com contornos móveis, isto é, com escoamentos sobre leitos móveis, onde o movimento de sedimentos é significativo; o escoamento é gradualmente variado, no qual a curvatura da superfície livre é pequena, o que permite desprezar as acelerações verticais e, a equação da energia utilizada baseia-se na premissa de que existe uma distribuição uniforme da pressão hidrostática em cada seção transversal; o escoamento é unidimensional, ou seja, as características tais como níveis d'água e vazões variam somente no sentido longitudinal do curso d'água, e nas seções transversais a distribuição de velocidade é assumida como sendo uniforme e a curvatura da superfície livre horizontal; a declividade média do leito do rio é suficientemente pequena; as perdas de energia por atrito são quantificadas pela expressão empírica de MANNING; o fluido é incompressível e homogêneo, o que significa que a densidade do mesmo é considerada constante no tempo e no espaço; os efeitos termodinâmicos e os efeitos dos ventos sobre a superfície livre são desprezados, não sendo sequer citados; o coeficiente de rugosidade de Manning utilizado será um mesmo valor de "n" para todo o canal principal; e, as perdas por contração e expansão terão valor único em todo o trecho de estudo (Oliveira, 2005).

O procedimento de cálculo baseia-se na solução da equação de energia unidimensional. Admite a avaliação do efeito de estruturas hidráulicas como: pontes, bueiros e galerias, na alteração das planícies de inundação, bem como mudanças nos perfis de superfície da água devido à construção de canais e diques. São aplicadas as equações de momento em situações onde o perfil da superfície de água varia rapidamente como em confluências de rios e ressaltos hidráulicos.

Conforme OLIVEIRA (2005) a aplicação do modelo de simulação hidráulica HEC-RAS requer as seguintes informações básicas:

- Diagramas esquemáticos dos cursos d'água:

Definem como os diversos cursos d'água são conectados, onde cada trecho do rio possui uma única identificação.

- Dados das seções transversais:

O contorno geométrico para a análise do escoamento em rios naturais é especificado em termos dos perfis transversais das seções e das distâncias medidas entre essas seções. As seções são localizadas em intervalos ao longo do rio para caracterizar a capacidade de escoamento do rio e suas planícies de inundação adjacentes. SAMUELS (1989) definiu um espaçamento mínimo entre as seções transversais, em regime não permanente, baseado na profundidade de inundação e no desnível médio:

$$\Delta x \leq \frac{0,15 * D}{S} \quad (8)$$

Em que:

$\Delta x$  é o espaçamento mínimo adotado entre as seções transversais (m)

$D$  é o espaçamento entre margens no ponto de maior profundidade do canal (m)

$S$  é o declividade do trecho (m/m).

Elas podem se estender através de toda a planície de inundação e podem ser perpendiculares às linhas de escoamento (aproximadamente perpendiculares à linha de contorno do leito).

A seção transversal é caracterizada por três identificadores: “River” (rio), “Reach” (trecho) e “River Station” (estação ou posto do rio). As confluências dos rios são consideradas junções.

- Comprimento dos trechos dos rios:

As distâncias medidas entre as seções transversais se referem aos comprimentos dos trechos dos rios;

Coefficientes de perda de energia – diferentes tipos de coeficientes são utilizados pelo modelo para avaliar as perdas de energia: coeficiente de Manning para avaliar a perda de atrito; coeficientes de contração e expansão;

Informações sobre as confluências dos cursos d’água – as confluências de cursos d’água são definidas nos locais onde dois ou mais escoamentos se juntam ou se separam. Os dados das junções consistem de comprimentos dos trechos nas junções e ângulos entre os tributários, quando a equação do momento for selecionada.

- Regime de escoamento:

No caso de estudo, o escoamento é permanente.

- Condições de contorno:

São especificadas nos extremos da bacia hidrográfica, seções situadas mais a montante ou a jusante do sistema, para que o modelo dê início aos cálculos da superfície da linha d'água. O HEC-RAS permite que se utilize quatro tipos de condições de contorno, quais sejam: elevação da superfície da água, profundidade crítica, profundidade normal (neste caso deverá ser informada a declividade média do talvegue no local onde se iniciarão os cálculos) e, ainda, a curva Vazão Total x Elevação da Superfície da Água (Curva-Chave).

- Vazões:

As informações sobre vazões são fornecidas ao modelo de montante para jusante, em cada segmento do sistema, para cada perfil que se pretende calcular.

### 3.2.1 Composição do modelo hidráulico

Utilizou-se o software ArcGIS 9.3 para melhor representar de forma espacial o traçado longitudinal do canal, bem como, das 72 seções transversais a partir da importação dos pontos altimétricos, conforme ilustra a Figura 19.

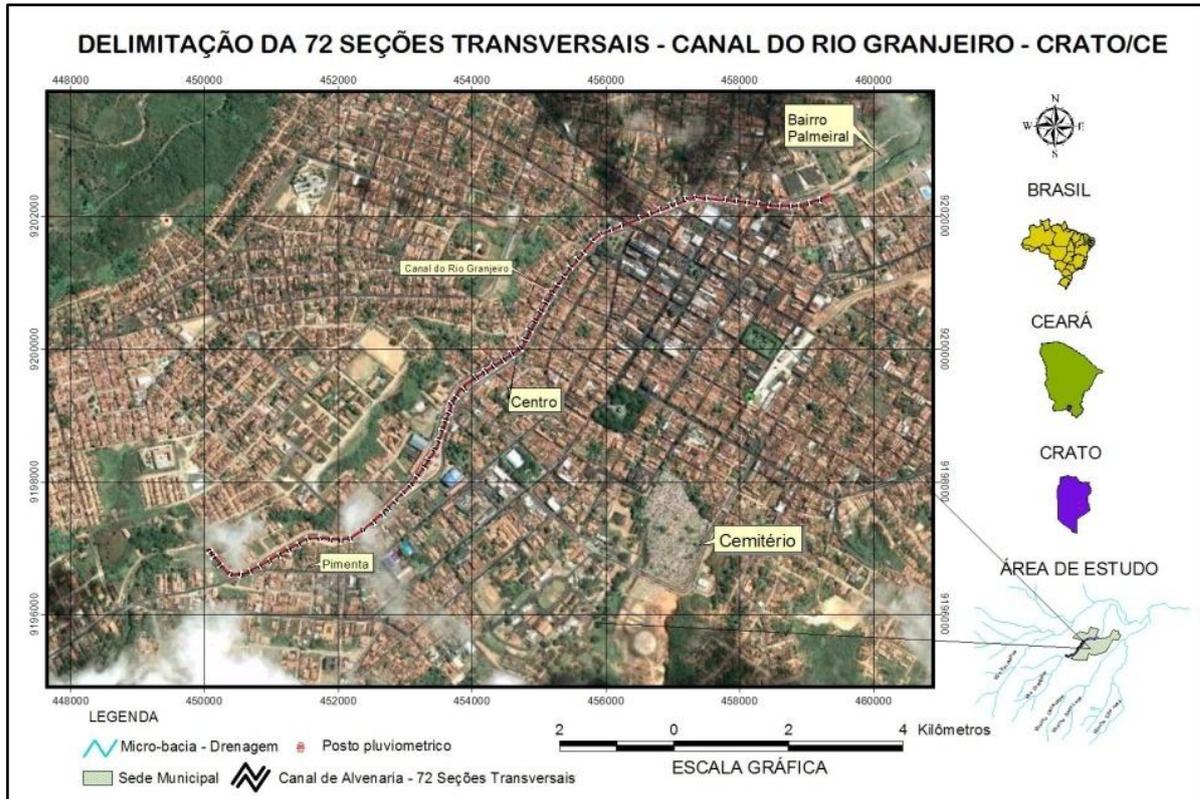


Figura 19: Distribuição espacial das seções transversais no canal do Rio Granjeiro (Fonte: Autor)

### 3.2.2 Inserção de dados no modelo

Para inserção dos dados no software HEC-HAS, executou-se, inicialmente, a composição do modelo, caracterizando, de acordo com os dados obtidos em campo, as seguintes informações:

#### 3.2.2.1 Definição da geometria

O primeiro passo após o traçado do rio e do canal realizado no ArcGIS 9.3, integrada com a extensão GEO-RAS e o apoio do *software* GPS TrackMaker Pro, foi a inserção das 72 seções transversais obtidas no levantamento geodésico realizado.

Para além das coordenadas x e y de cada um dos perfis transversais, sendo x a largura do perfil e y a elevação, ambos em metros. Para cada seção é ainda definida a distância da seção a jusante.

No que concerne à topologia do trecho, a princípio, o trecho em estudo compreende 2.242,86 m que foi subdividido em seções transversais de 30 em 30 metros sendo que duas delas foram de 40 em 40 metros até o deságüe natural do leito. A definição da geometria consistiu em estabelecer as diversas seções transversais; os comprimentos dos trechos que separam as diversas seções consideradas; perdas de carga devido a fenômenos de contração/expansão e de atrito e, por último, informação de todas as junções consideradas.

### 3.2.2.2 Definição dos coeficientes de Manning

O coeficiente de Manning é um parâmetro que procura quantificar a rugosidade da superfície do canal e, conseqüentemente, refletir as perdas de carga no escoamento.

Dessa forma, um dos grandes problemas na avaliação do escoamento em canais é a determinação do coeficiente de rugosidade “n”.

Conforme descrito por Baptista e Lara (2003), alguns procedimentos para determinação do coeficiente de Manning estão apresentados a seguir:

- Determinação direta do coeficiente de rugosidade

Procedimento:

- Determinação das cotas de fundo e das características hidráulicas em duas seções (1 e 2) distintas, separadas pela distância  $\Delta x$ ;
- Determinação das velocidades médias de escoamento nas duas seções;
- Aplicação da Equação de Bernoulli entre as duas seções, permitindo a determinação da declividade da linha de energia:

$$J = \frac{\left( z_1 + y_1 + \frac{U_1^2}{2g} \right) - \left( z_2 + y_2 + \frac{U_2^2}{2g} \right)}{\Delta x} \quad (9)$$

- Cálculo de “n” médio pela aplicação da fórmula de Manning utilizando as características médias entre as duas seções:

$$n = \frac{\bar{R}_h^{2/3} J^{1/2}}{\bar{U}} \quad (10)$$

- Estimativa a partir da granulometria do leito:

Aplicar a expressão de Meyer-Peter e Muller, válida para leitos em material graúdo.

$$n = 0,038 d_{90}^{1/6} \quad (11)$$

$d_{90}$ : diâmetro da peneira (m) com 90% do material passando.

➤ Estimativa através do Método Cowan

Aplicar a expressão:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) M_5 \quad (12)$$

Em que:

n<sub>0</sub>: valor básico para um canal retilíneo, uniforme e com superfícies planas, de acordo com o material associado à superfície de contato;

n<sub>1</sub>: correspondente às irregularidades, tais como erosões, assoreamentos, saliências e depressões na superfície, etc.;

n<sub>2</sub>: correspondente à freqüência de ocorrência de variações de forma, conforme as possibilidades de causar perturbações no fluxo;

n<sub>3</sub>: correspondente à presença de obstruções, como matacões, troncos, etc.,

n<sub>4</sub>: baseado na influência da vegetação no escoamento, segundo o tipo, densidade e altura da vegetação;

M<sub>5</sub>: baseado no grau de meandrização do curso d'água.

Os valores referência para os diferentes parâmetros da equação (12) estão apresentados na Figura 20, a seguir:

Condições do canal		Valores
<b>n0</b> <b>Material envolvido</b>	Solo	0,020
	Rocha	0,025
	Pedregulho fino	0,024
	Pedregulho graúdo	0,028
<b>n1</b> <b>Grau de irregularidade</b>	Liso	0,000
	Pequeno	0,005
	Moderado	0,010
<b>n2</b> <b>Variações da seção transversal</b>	Severo	0,020
	Gradual	0,000
	Alternâncias ocasionais	0,005
<b>n3</b> <b>Efeito de obstruções</b>	Alternâncias freqüentes	0,010 – 0,015
	Desprezível	0,000
	Pequeno	0,010 – 0,015
	Apreciável	0,020 – 0,030
<b>n4</b> <b>Vegetação</b>	Severo	0,040 – 0,060
	Baixa	0,005 – 0,010
	Média	0,010 – 0,025
	Alta	0,025 – 0,050
<b>M5</b> <b>Grau de meandrização</b>	Muito alta	0,050 – 0,100
	Pequeno	1,000
	Apreciável	1,150
	Severo	1,300

Figura 20: Coeficientes de rugosidade para canais artificiais. (Fonte: Baptista e Lara, 2003)

- Estimativa do coeficiente de rugosidade através de tabelas

Nas tabelas a seguir, apresentadas originalmente por Chow (1959), constam estimativas mínimas, usuais e máximas para os coeficientes de rugosidade associados a diversos materiais e situações de utilização.

Revestimento	Rugosidade		
	mínima	usual	máxima
Concreto pré-moldado	0,011	0,013	0,015
Concreto com acabamento	0,013	0,015	0,018
Concreto sem acabamento	0,014	0,017	0,020
Concreto projetado	0,018	0,020	0,022
Gabiões	0,022	0,030	0,035
Espécies vegetais	0,025	0,035	0,070
Aço	0,010	0,012	0,014
Ferro fundido	0,011	0,014	0,016
Aço corrugado	0,019	0,022	0,028
Solo sem revestimento	0,016	0,023	0,028
Rocha sem revestimento	0,025	0,035	0,040

Figura 21: Coeficientes de rugosidade para canais artificiais. (Fonte: Baptista e Lara, 2003)

Tipo	Características	Rugosidade		
		mínima	usual	máxima
Canais de pequeno porte em planície (B < 30 m)	Limpos	0,025	0,033	0,045
	Trechos lentos	0,050	0,070	0,080
Canais de pequeno porte em montanhas (B < 30 m)	Leito desobstruído	0,030	0,040	0,050
	Leito com matacões	0,040	0,050	0,070
Canais de grande porte (B > 30 m)	Seções regulares	0,025	-	0,060
	Seções irregulares	0,035	-	0,100
Planícies de inundação	Pastagens	0,025	0,030	0,035
	Culturas	0,020	0,040	0,050
	Vegetação	0,045	0,070	0,160
	Densa			

Figura 22: Coeficientes de rugosidade para canais naturais. (Fonte: Baptista e Lara, 2003)

➤ Estimativa através de analogia com canais existentes

Identificação do curso d'água em estudo com curso d'água existente, para o qual o coeficiente de rugosidade foi determinado usando coletâneas de fotos de curso d'água com os coeficientes de rugosidade medidos (CHOW, 1959).

O coeficiente de Manning é bastante variável e depende de um grande número de fatores, incluindo: vegetação, irregularidades da superfície, alinhamento e forma do canal, deposições, obstruções, vazão e mudanças sazonais.

No modelo aqui empregado, definiu-se os coeficientes de rugosidade utilizados para canais artificiais de acordo com os materiais a seguir:

Concreto pré-moldado: 0.013

Solo sem revestimento: 0.023

### 3.2.3 Definição das vazões para o modelo hidráulico

A estimativa das vazões máximas para entrada no modelo hidráulico foram obtidas a partir do estudo hidrológico de precipitações máximas de chuvas intensas na bacia hidrográfica do rio Granjeiro e da aferição da vazão realizada com aparelho de medição de fluxo para canais abertos FLOWTRACK, tanto na entrada como na saída do canal.

Vazões obtidas a partir da análise de precipitações máximas de chuvas intensas para os períodos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Tabela 02: Vazões do estudo hidrológico da bacia do rio granjeiro. Fonte: MOREIRA 2013

<b>Tr – 5 anos</b>	<b>Tr – 10 anos</b>	<b>Tr – 20 anos</b>	<b>Tr – 50 anos</b>	<b>Tr – 100 anos</b>
189,3 m <sup>3</sup> /s	213,7 m <sup>3</sup> /s	232,8 m <sup>3</sup> /s	256,3 m <sup>3</sup> /s	274,4 m <sup>3</sup> /s

Vazões obtidas a partir da aferição de vazão feita com o equipamento de medição de fluxo para canais abertos FLOWTRACK.

Tabela 03: Vazões de esgotos aferidas com o equipamento FLOWTRACK

<b>Q – Entrada do canal</b>	<b>Q – Saída do canal</b>
0,043 m <sup>3</sup> /s	0,284 m <sup>3</sup> /s

### 3.2.4 Aplicação do modelo hidráulico

Após a inserção dos dados geométricos no *software* HEC-RAS 4.0, foi possível obter o perfil longitudinal do traçado do canal e sua composição delimitada por 72 seções transversais como mostra a Figura 23.

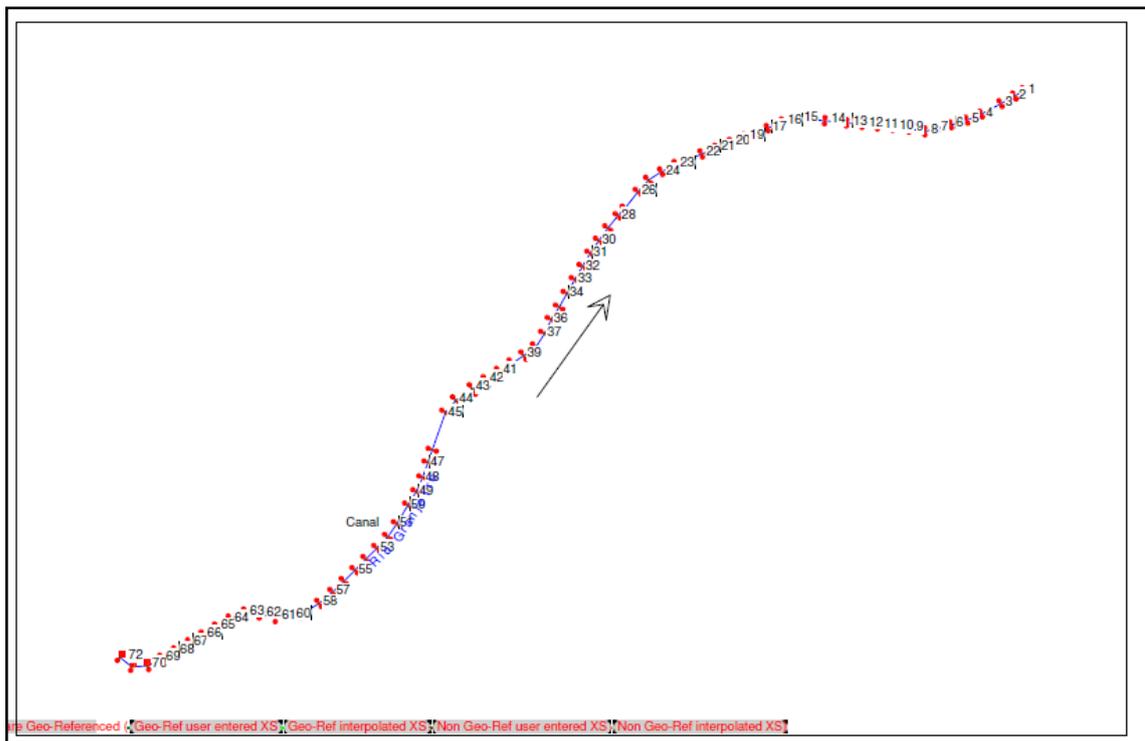


Figura 23: Representação do traçado do canal no modelo HEC-RAS 4.0

#### ➤ Cálculo do perfil da linha d'água

Na utilização do *HEC-RAS* para a situação de escoamento permanente, gradualmente variado, as equações da energia e da continuidade são empregadas em um processo iterativo para o cálculo do perfil da linha da água. A equação da energia está apresentada a seguir:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} + h_{L(1,2)} \quad (13)$$

Em que, para as seções 1 e 2, respectivamente, tem-se:

$WS_1, WS_2$  (m ou ft): elevações da superfície da água;

$\alpha_1, \alpha_2$  : coeficiente de ponderação das velocidades;

$v_1, v_2$  (m/s ou ft/s): velocidades médias;

$g$  (m/s<sup>2</sup> ou ft/s<sup>2</sup>): aceleração da gravidade;

$h_{L(1,2)}$  (m ou ft): perda de carga hidráulica entre as seções;

Os termos da equação da energia estão representados na Figura 24:

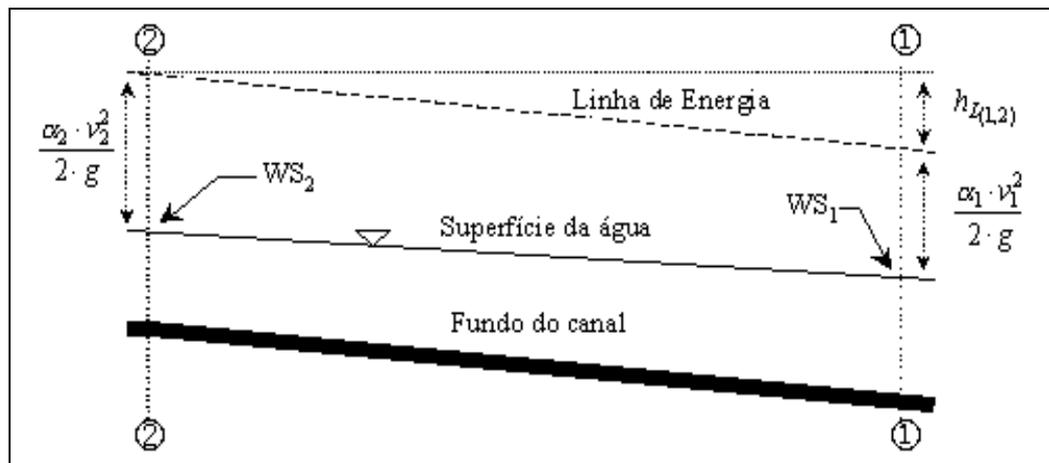


Figura 24: Representação dos termos da Equação da Energia.

A perda de carga hidráulica entre as duas seções transversais é composta de perdas por fricção e perdas por contração ou expansão. A equação para as perdas de carga é a seguinte:

$$h_{L(1,2)} = L \cdot \overline{S_f} + C \cdot \left| \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} \right| \quad (14)$$

Em que, para duas seções transversais consecutivas:

$L$  (m ou ft): comprimento médio do trecho entre duas seções transversais;

$\overline{S}_f$  (m/m ou ft/ft): declividade média da linha de energia entre duas seções transversais;

$C$ : coeficiente de perda por contração ou expansão.

A declividade da linha de energia em cada seção transversal é calculada, a partir da equação de Manning, pela seguinte expressão:

$$S_f = \left( \frac{n \cdot Q}{k \cdot A \cdot R^{2/3}} \right)^2 \quad (15)$$

Em que, para uma dada seção:

$n$ : coeficiente de Manning;

$A_f$  (m<sup>2</sup> ou ft<sup>2</sup>): área de escoamento;

$Q$  (m<sup>3</sup>/s ou ft<sup>3</sup>/s): vazão;

$R$  (m ou ft): raio hidráulico. Corresponde a razão entre área molhada e perímetro molhado da seção;

$k$ : para o Sistema de Unidades Inglês seu valor é 1,486 e para o SI seu valor é 1.

A altura de elevação desconhecida ( $WS_2$ ) é determinada por uma solução iterativa das Equações (13) e (14). O procedimento computacional básico está descrito abaixo:

- (1) Estabelecem-se as condições limite de jusante, se o escoamento for subcrítico; ou as condições limite de montante se o escoamento for supercrítico. As condições limite incluem a altura de elevação inicial, a vazão e seção transversal de início;
- (2) Considerando o caso de escoamento subcrítico, uma altura de superfície da água é estimada na próxima seção transversal (Seção 2) a montante da condição limite (Seção 1);

- (3) Baseado no valor estimado da elevação de superfície da água, determina-se a correspondente carga cinética;
- (4) Com os valores do passo 3, calcula-se o valor  $\overline{S_f}$  e se resolve a Equação (14), obtendo  $h_{L(1,2)}$ ;
- (5) Com os valores dos passos 3 e 4, resolve-se a Equação (13), obtendo  $WS_2$ ;
- (6) Compara-se o valor de  $WS_2$  obtido com o valor estimado no passo 2;
- (7) Repetem-se os passos 2 a 6 até que seja atingida a tolerância exigida

Desta forma, a altura da linha da água é determinada em cada seção do trecho analisado a partir do nível da seção de jusante (regime subcrítico) ou de montante (regime supercrítico), compondo o perfil da superfície da água.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultados do modelo hidráulico

Após a inserção dos dados foi possível modelar dois cenários de escoamento considerando as duas modalidades de vazões obtidas para o modelo.

Considerando o conjunto de vazões do estudo hidrológico da bacia a partir da análise de precipitações máximas para chuvas intensas, os resultados, para diversas variáveis do escoamento, estão apresentados nas figuras 22, 23, 24, 25 e 26.

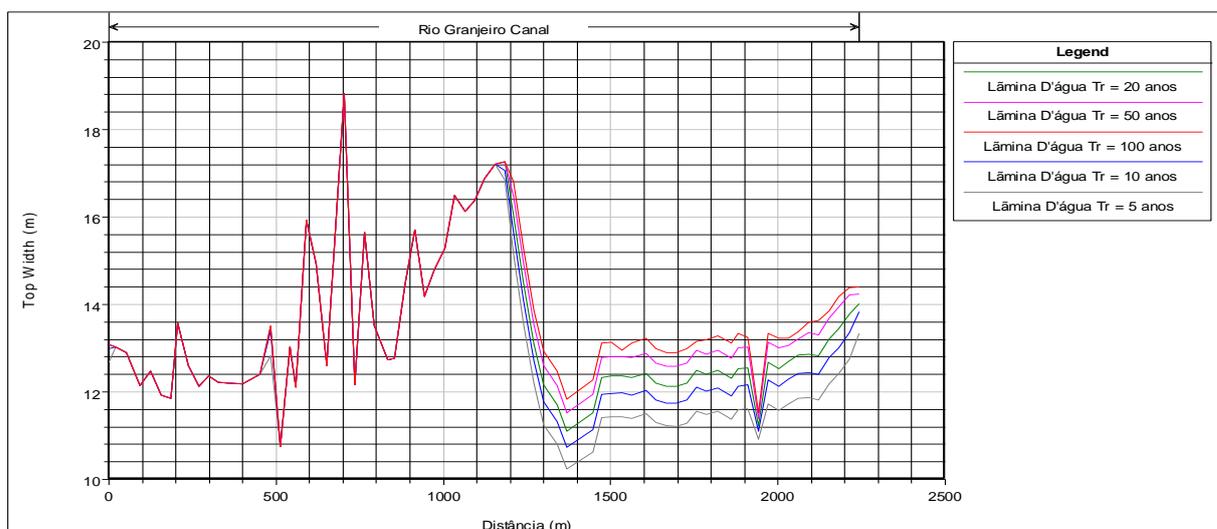


Figura 25: Representação da altura máxima da lâmina d'água para os Tr de 5, 10, 20,50 e 100 anos

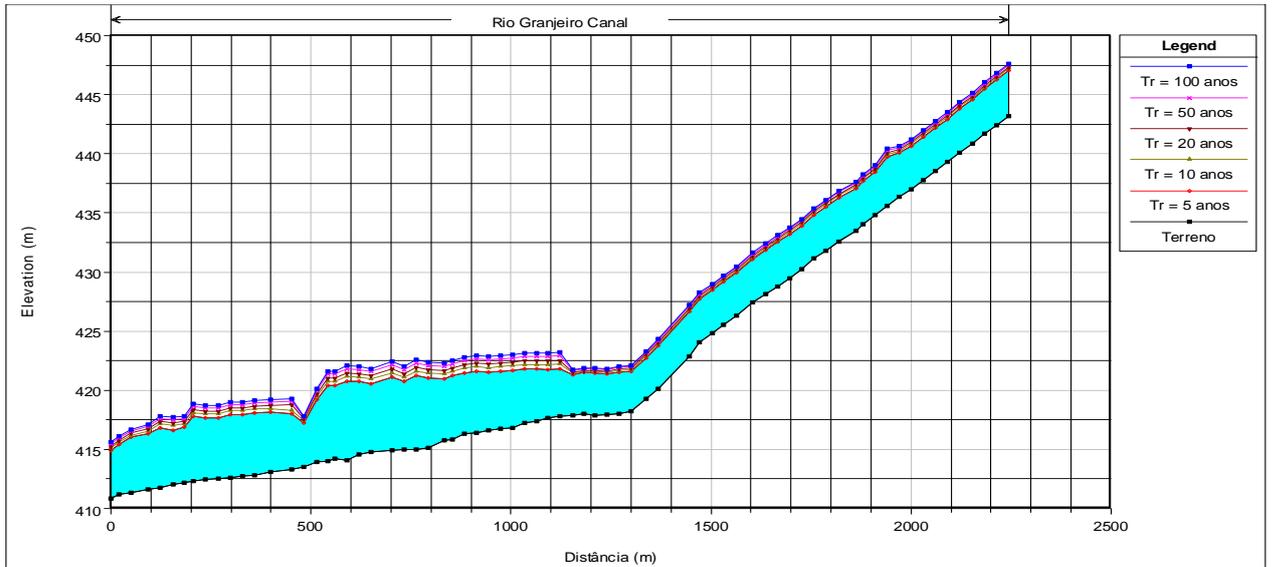


Figura 26: Representação do perfil longitudinal do canal para os Tr de 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

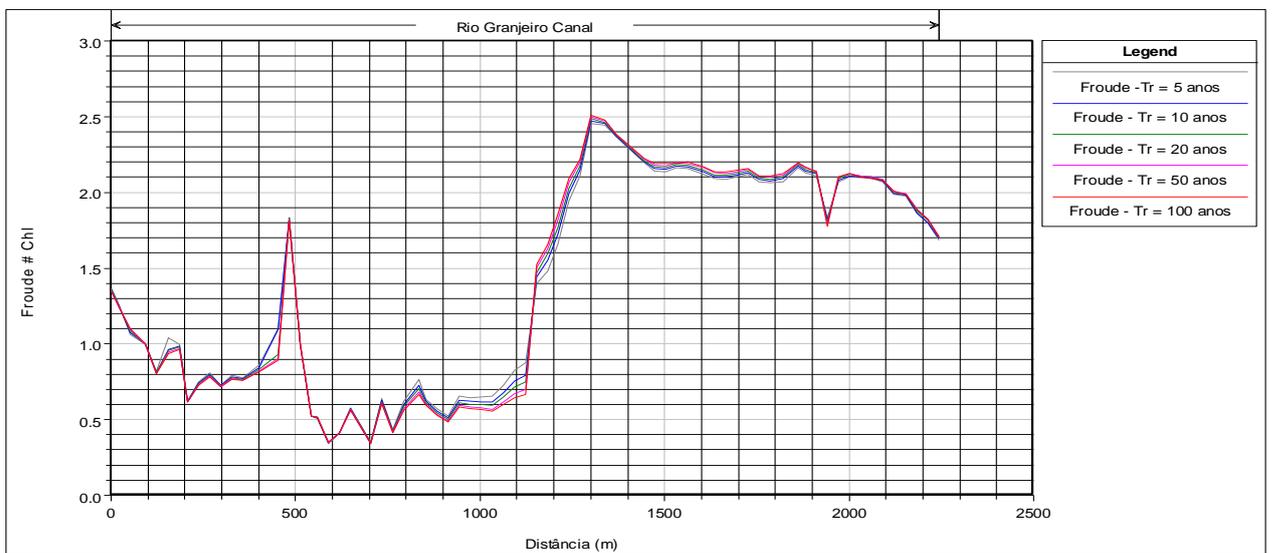


Figura 27: Representação do nº de Froude do canal para os Tr de 5, 10, 20, 50 e 100 anos

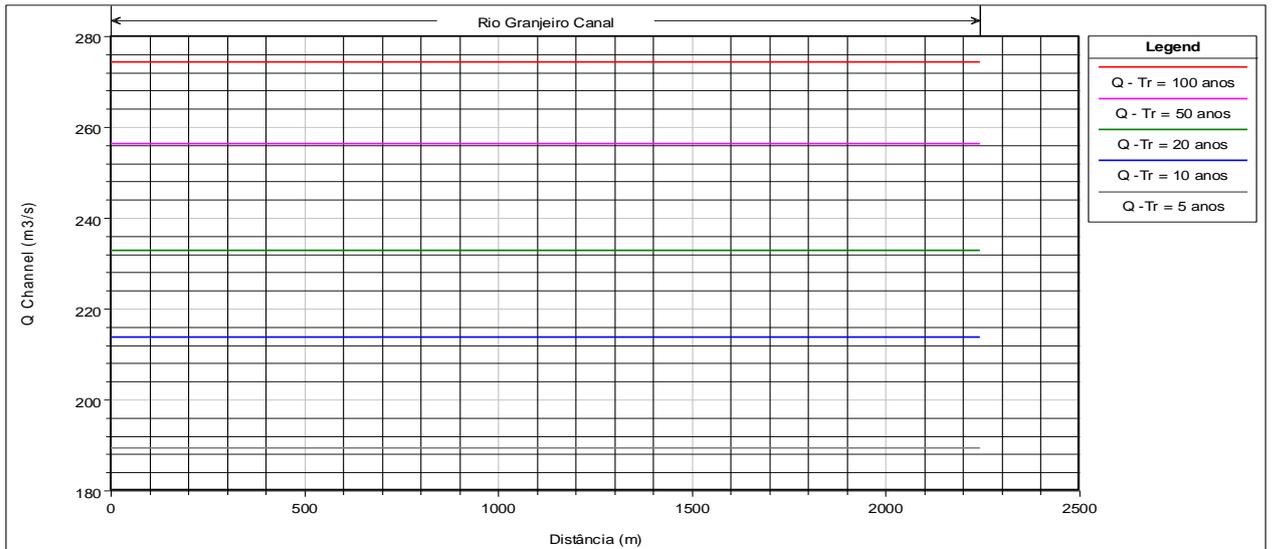


Figura 28: Representação da vazão modelada no canal para os Tr de 5, 10, 20,50 e 100 anos

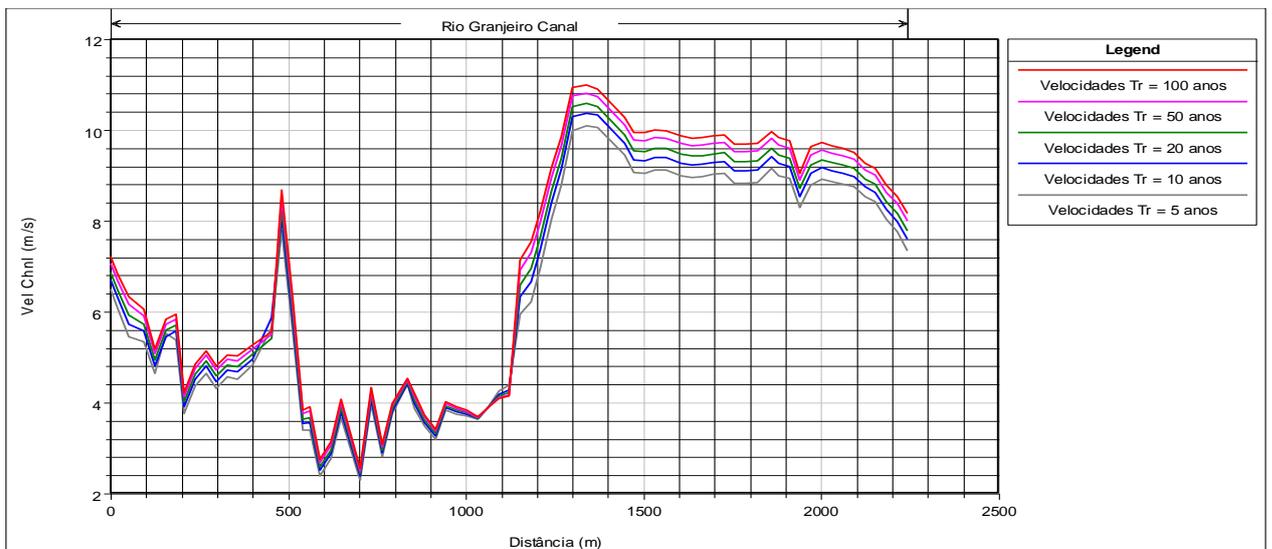


Figura 29: Representação das velocidades modelada no canal para os Tr de 5, 10, 20,50 e 100 anos

Para o modelo considerando as vazões aferidas com equipamento de medição de fluxo param canais abertos FLOWTRACK, os resultados correspondem as figuras 27, 28, 29, 30 e 31.

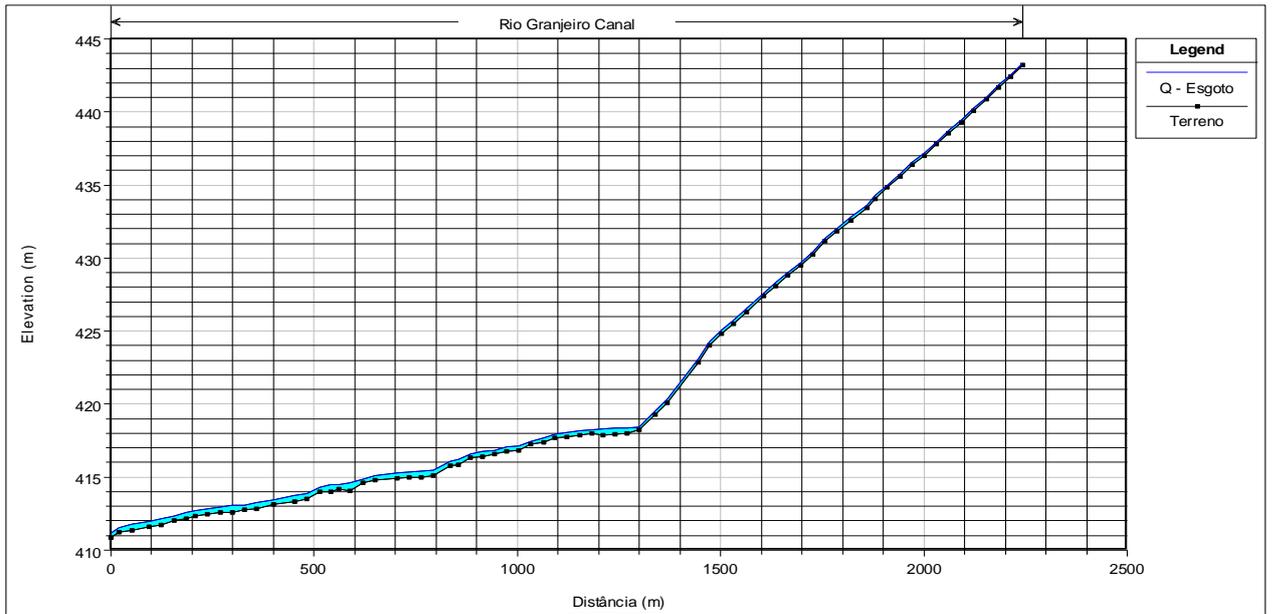


Figura 30: Representação do perfil longitudinal para as vazões de efluentes de entrada e saída do canal do Rio Granjeiro



Figura 31: Representação do perfil das vazões de efluentes de entrada e saída do canal do Rio Granjeiro

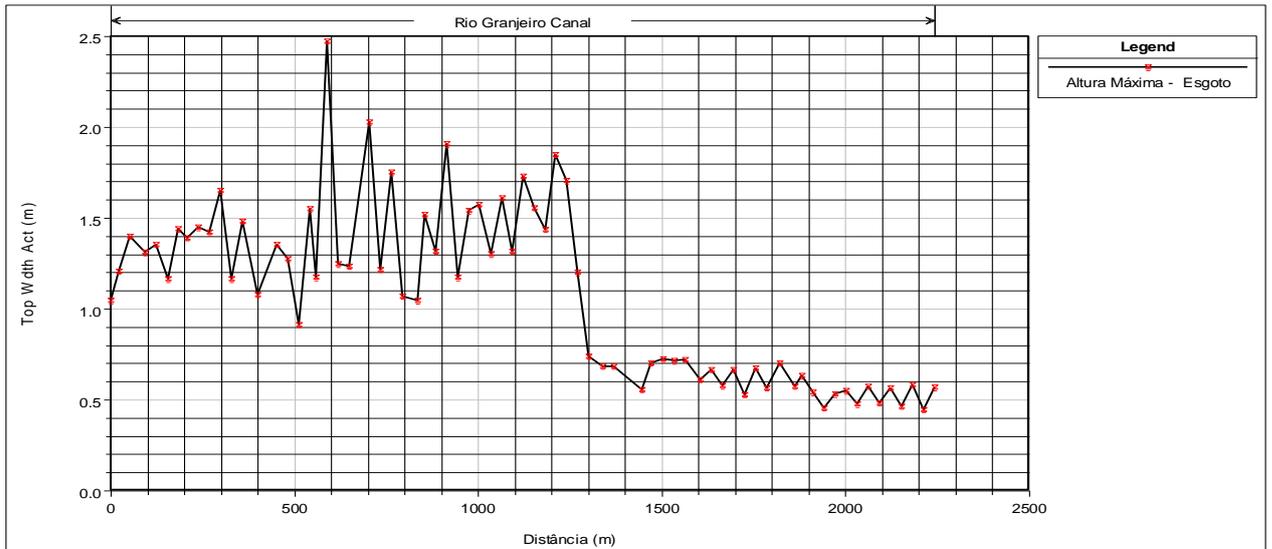


Figura 32: Representação do perfil altura máxima da lâmina d'água para as vazões de efluentes de entrada e saída do canal do Rio Granjeiro

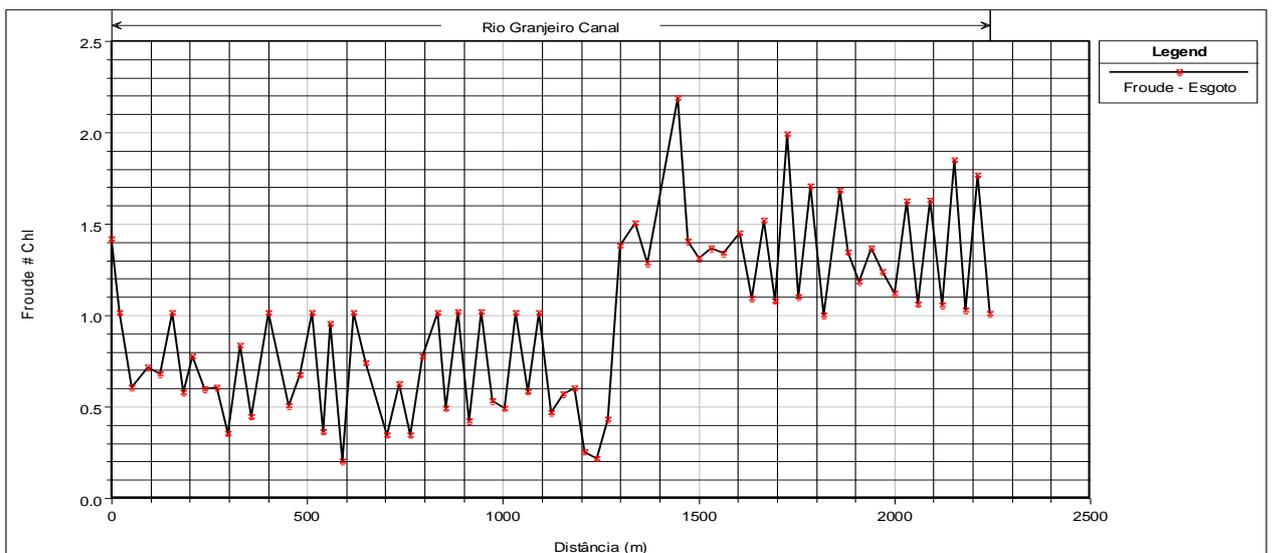


Figura 33: Representação do n° de Froude para as vazões de efluentes de entrada e saída do canal do Rio Granjeiro

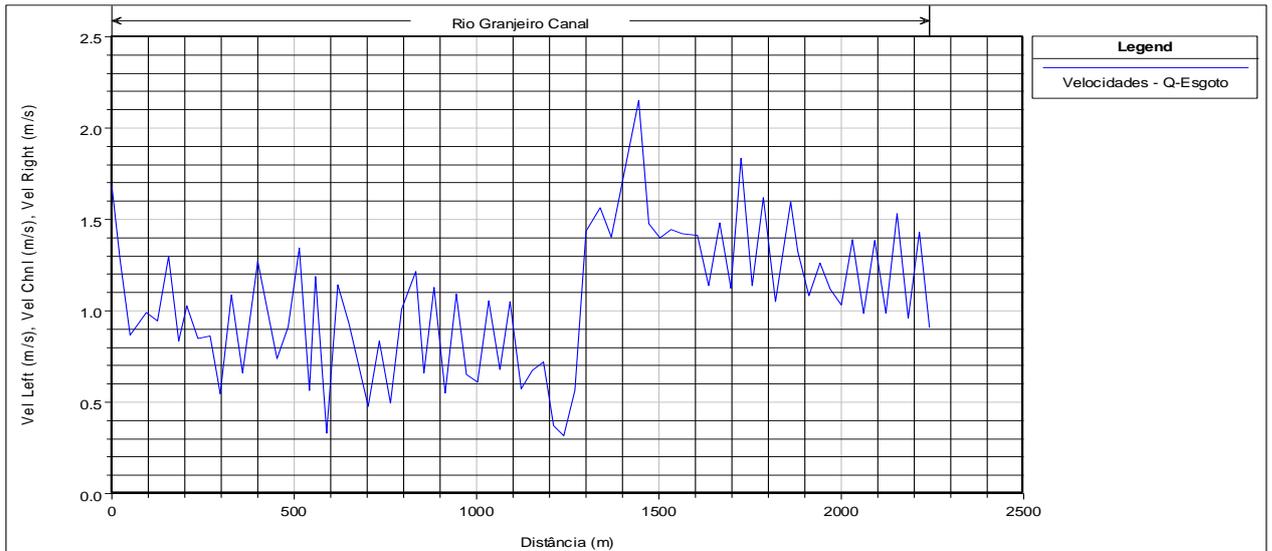


Figura 34: Representação das velocidades para as vazões de efluentes de entrada e saída do canal do Rio Granjeiro

## 4.2 Análise dos resultados

O trabalho desenvolvido foi realizado com o intuito de identificar os pontos críticos de alagamento provocados pela onda de cheia na área urbanizada do centro da cidade do Crato.

Como análise dos resultados optou-se por interpretar de forma análoga os cenários de cheia para as simulações considerando os períodos de retornos de 5, 10, 20, 50 e 100 anos a partir dos dados do estudo hidrológico da bacia e as vazões aferidas pelo equipamento de medição de fluxo.

Para a modelagem considerando os dados de vazão obtidas a partir da medição dos efluentes, observou-se que muito pouco influencia ou representa risco no tocante ao evento de transbordamento do canal.

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m <sup>2</sup> )	Top Width (m)	Froude # Chl
Canal	72	Esgoto	0.04	443.19	443.36	443.36	443.40	0.014813	0.91	0.05	0.57	1.01
Canal	71	Esgoto	0.04	442.43	442.56	442.59	442.66	0.048911	1.43	0.03	0.45	1.77
Canal	70	Esgoto	0.05	441.69	441.87	441.87	441.92	0.015207	0.96	0.05	0.58	1.03
Canal	69	Esgoto	0.05	440.87	441.01	441.05	441.13	0.053080	1.53	0.03	0.46	1.85
Canal	68	Esgoto	0.05	440.06	440.24	440.24	440.29	0.016170	0.99	0.05	0.56	1.05
Canal	67	Esgoto	0.05	439.29	439.44	439.47	439.54	0.040534	1.39	0.04	0.48	1.63
Canal	66	Esgoto	0.05	438.56	438.73	438.74	438.78	0.016281	0.98	0.05	0.57	1.06
Canal	65	Esgoto	0.05	437.80	437.95	437.98	438.05	0.040583	1.39	0.04	0.48	1.63
Canal	64	Esgoto	0.05	437.01	437.19	437.19	437.24	0.018374	1.03	0.05	0.55	1.12
Canal	63	Esgoto	0.05	436.39	436.56	436.57	436.62	0.022800	1.12	0.04	0.53	1.24
Canal	62	Esgoto	0.05	435.58	435.75	435.77	435.83	0.030242	1.26	0.04	0.45	1.37
Canal	61	Esgoto	0.05	434.83	435.00	435.01	435.06	0.020771	1.08	0.05	0.54	1.19
Canal	60	Esgoto	0.08	434.08	434.27	434.30	434.36	0.025257	1.33	0.06	0.63	1.34
Canal	59	Esgoto	0.08	433.45	433.63	433.67	433.76	0.041054	1.59	0.05	0.57	1.68
Canal	58	Esgoto	0.08	432.60	432.83	432.83	432.88	0.013517	1.05	0.08	0.70	1.00
Canal	57	Esgoto	0.08	431.81	432.00	432.04	432.13	0.042413	1.62	0.05	0.56	1.71
Canal	56	Esgoto	0.08	431.14	431.36	431.36	431.42	0.016640	1.14	0.07	0.68	1.10
Canal	55	Esgoto	0.08	430.22	430.40	430.45	430.57	0.059238	1.84	0.05	0.53	1.99
Canal	54	Esgoto	0.08	429.48	429.70	429.71	429.77	0.015993	1.12	0.07	0.67	1.08
Canal	53	Esgoto	0.08	428.79	428.99	429.02	429.10	0.033301	1.48	0.06	0.58	1.52
Canal	52	Esgoto	0.08	428.11	428.33	428.34	428.40	0.016504	1.14	0.07	0.67	1.09
Canal	51	Esgoto	0.08	427.43	427.62	427.65	427.72	0.029788	1.41	0.06	0.61	1.45
Canal	50	Esgoto	0.12	426.29	426.52	426.55	426.62	0.024058	1.42	0.08	0.72	1.34
Canal	49	Esgoto	0.12	425.53	425.76	425.79	425.86	0.025183	1.44	0.08	0.72	1.37
Canal	48	Esgoto	0.12	424.81	425.04	425.07	425.14	0.022996	1.40	0.08	0.72	1.31
Canal	47	Esgoto	0.12	424.04	424.27	424.30	424.38	0.026703	1.48	0.08	0.70	1.41
Canal	46	Esgoto	0.12	422.88	423.08	423.15	423.31	0.070754	2.15	0.05	0.55	2.19
Canal	45	Esgoto	0.12	420.09	420.34	420.36	420.44	0.022694	1.41	0.08	0.68	1.28
Canal	44	Esgoto	0.12	419.28	419.50	419.54	419.63	0.030948	1.56	0.08	0.68	1.51
Canal	43	Esgoto	0.12	418.22	418.45	418.47	418.55	0.025313	1.44	0.08	0.74	1.38
Canal	42	Esgoto	0.12	418.02	418.37	418.27	418.38	0.002096	0.56	0.21	1.20	0.43
Canal	41	Esgoto	0.12	417.91	418.35		418.35	0.000472	0.32	0.37	1.71	0.22
Canal	40	Esgoto	0.15	417.89	418.33		418.34	0.000635	0.37	0.41	1.85	0.25
Canal	39	Esgoto	0.15	417.98	418.27		418.30	0.003969	0.72	0.21	1.43	0.60
Canal	38	Esgoto	0.15	417.88	418.17		418.19	0.003467	0.67	0.22	1.56	0.57
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m <sup>2</sup> )	Top Width (m)	Froude # Chl
Canal	2	Esgoto	0.25	411.22	411.55	411.55	411.63	0.011642	1.29	0.20	1.21	1.01
Canal	1	Esgoto	0.25	410.86	411.14	411.18	411.29	0.023785	1.68	0.15	1.05	1.42

Figura 35: Síntese dos dados da simulação para as vazões de efluentes de entrada e saída do canal do Rio Granjeiro

Com intuito de facilitar uma melhor compreensão do modelo adotado optou-se por apresentar a análise a partir da síntese dos dados obtidos em cada modelo de simulação, seja para a modelagem adotando as vazões do estudo hidrológico, como também as vazões obtidas pela a aferição da caudal de efluentes no canal.

Para a análise dos resultados levando em conta as vazões aferidas com equipamento de medição fluxo para canal aberto FLOWTRACK temos:

Tabela 04: Análise tabular da síntese dos dados da simulação para as vazões de efluentes de entrada e saída do canal do rio Granjeiro

<b>72 Seções Transversais</b>	<b>Velocidades 1 &lt; V(m/s) &lt; 2</b>	<b>Vazão 0.125 &lt; Q (m³/s) &lt;0.250</b>	<b>N° de Forud &lt; 1</b>	<b>N° de Forud &gt; 1</b>	<b>Transbordamento</b>
<b>Quantidade Numérica</b>	15	22	31	41	0
<b>Quantidade em Percentual (%)</b>	20.8	30.5	43	57	0

Para a análise dos resultados levando em conta as vazões obtidas a partir da análise de precipitações máximas de chuvas intensas para os períodos de retornos de 5, 10, 20, 50 e 100 anos temos:

Tabela 05: Análise tabular da síntese dos dados da simulação considerando os períodos de retorno de 5 anos

<b>72 Seções Transversais</b>	<b>Velocidades 8 &lt; V(m/s) &lt; 10</b>	<b>Vazão -Q 189.3 m³/s</b>	<b>N° de Forud &lt; 1</b>	<b>N° de Forud &gt; 1</b>	<b>Transbordamento</b>
<b>Quantidade Numérica</b>	28	72	28	44	38
<b>Quantidade em Percentual (%)</b>	38	100	39	61	53

Tabela 06: Análise tabular da síntese dos dados da simulação considerando os períodos de retorno de 10 anos

<b>72 Seções Transversais</b>	<b>Velocidades 8 &lt; V(m/s) &lt; 10</b>	<b>Vazão -Q 213.7 m³/s</b>	<b>N° de Forud &lt; 1</b>	<b>N° de Forud &gt; 1</b>	<b>Transbordamento</b>
<b>Quantidade Numérica</b>	31	72	29	43	38
<b>Quantidade em Percentual (%)</b>	43	100	40	60	53

Tabela 07: Análise tabular da síntese dos dados da simulação considerando os períodos de retorno de 20 anos

<b>72 Seções Transversais</b>	<b>Velocidades 8 &lt; V(m/s) &lt; 10</b>	<b>Vazão -Q 232.8 m³/s</b>	<b>N° de Forud &lt; 1</b>	<b>N° de Forud &gt; 1</b>	<b>Transbordamento</b>
<b>Quantidade Numérica</b>	29	72	31	41	40
<b>Quantidade em Percentual (%)</b>	40	100	43	57	55

Tabela 08: Análise tabular da síntese dos dados da simulação considerando os períodos de retorno de 50 anos

<b>72 Seções Transversais</b>	<b>Velocidades 8 &lt; V(m/s) &lt; 10</b>	<b>Vazão -Q 256.3 m³/s</b>	<b>N° de Forud &lt; 1</b>	<b>N° de Forud &gt; 1</b>	<b>Transbordamento</b>
<b>Quantidade Numérica</b>	33	72	32	40	40
<b>Quantidade em Percentual (%)</b>	46	100	44	56	55

Tabela 09: Análise tabular da síntese dos dados da simulação considerando os períodos de retorno de 100 anos

72 Seções Transversais	Velocidades $8 < V(\text{m/s}) < 10$	Vazão -Q 274.4 m <sup>3</sup> /s	N° de Forud < 1	N° de Forud > 1	Transbordamento
Quantidade Numérica	34	72	31	41	48
Quantidade em Percentual (%)	47	100	43	57	67

## 5. CONCLUSÃO

De acordo com os dados obtidos após a tabulação pôde-se concluir que ao tratar dos perfis de velocidade levando em conta as vazões obtidas a partir da análise de precipitações máximas de chuvas intensas para os diferentes períodos de retornos não houve discrepância entre os resultados representados por 31 seções, ou seja, 43% das seções modeladas.

Com relação ao numero de Froude observou-se que para os diferentes períodos de retorno a grande maioria do regime de escoamento do canal é supercrítico caracterizando como altas velocidades e elevadas energias o que favorece a desestabilização dos taludes e conseqüente desmoronamento das margens

Em número significa dizer que 42 seções, ou seja, 58% de todo o canal apresentam o referido regime de escoamento.

Com relação ao transbordamento do canal pôde-se avaliar que em média, para os períodos de retorno modelados cerca de 57% do canal ou seja 41 seções não comporta a vazão de escoamento ocasionando transbordamento do mesmo o qual varia entre uma lâmina de 20cm a 3.39 metros de altura.

Após esta interpretação é possível concluir que os principais objetivos foram alcançados em face à dificuldade de obtê-los.

Portanto, os resultados preliminares obtidos mostram que a metodologia utilizada é uma importante ferramenta para a obtenção parâmetros hidráulicos, como coeficientes de rugosidade, para serem utilizadas em novos projetos de engenharia hidráulica. Também é possível associar os resultados obtidos à interface SIG no intuito de produzir mapas de inundação relacionados aos diferentes períodos de retorno para chuvas intensas na bacia do rio Granjeiro, em específico ao canal de concreto existente.

O modelo hidráulico produzido permitiu observar que entre os diferentes períodos de retornos modelados a lâmina de água máxima obtida foi de 3,39 metros a contar da borda superior do canal, com ocorrência na seção de número 23. Isso mostra o quanto é preocupante do ponto de vista da segurança dos residentes na área em torno do canal, caso o evento seja reproduzido na prática.

Mediante essas interpretações, recomendam-se adotar as seguintes sugestões que serviram de parâmetro para tomada de decisões do ponto de vista administrativo governamental como:

1. Elaborar mapas de inundação de toda a área afetada pelo canal do rio granjeiro;
2. Elaborar um plano de contingência e emergência para o problema ambiental em questão;
3. Instalar duas estações sendo: uma (01) estação fluviométrica e uma (01) estação sedimentológica na entrada do canal de alvenaria do rio granjeiro;
4. Reestruturar o plano diretor da cidade no quesito expansão urbanística a fim de instituir na lei de uso e ocupação do solo a definição de novas áreas de proteção do manancial de drenagem rio granjeiro a começar de sua nascente natural.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUGUSTO, A. B, PIOLTINE. A. **Caracterização do Coeficiente de Manning para a Bacia do Alto Sapucaí**. INATURA, UNIFEI AV. B.P. SANTOS, 1303 – ITAJUBÁ MG, BRASIL.

ALLASIA, D. G.; COLLISCHONN, W.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. (2006): **Large basin simulation experience in South America**. IAHS Publication n. 303, v. 303, p. 360-370.

ANDRADE, J.; OLIVETE JR; C.; MENDIONDO, E. (2006): **Calibração de modelo de previsão hidrometeorológica voltado para sistema de alerta antecipado contra enchentes**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Carlos, SP.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. Belo Horizonte: Editora UFMG/Escola de Engenharia da UFMG, 2003. 2. ed. ver.

CHOW, V.T. **Open Channel Hydraulic**.USA: McGraw-Hill, 1959.680p.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. ; LARENTIS, D. G. ; COBALCHINI, M. S. . **Modelo de qualidade de água para planejamento em grandes bacias**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2003): **Ajuste multiobjetivo dos parâmetros e um modelo hidrológico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos.

CHOW, V.T. **Development of uniform flow and its formulas**. In: Open Channel Hydraulics. New York, 1959, p. 89-125.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. Volume 1 – O canal fluvial. Editora Edgard Blücher Ltda, 1981.

DE VRIES, M. (1965) – “**Considerations about non-steady bed-load transport in open-channels**”, Proc. 11th Int. Congress Int. Assoc. for Hydraul. Res. (IAHR), Leningrad, URSS, 3.8.1-3.8.11.

FOX, R. W. MCDONALD, A. T. **Introdução a Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro. 1981.

**Hidráulica aplicada** / organizado por José Almir Cirilo...[et al.] 1. Reimp. Da 2 ed. rev. ampl. – Porto Alegre: ABRH, 2001 – (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v.8).

INPLANCE, **Perfil Básico Municipal**. 2002. [On line]. Crato. Disponível em: [www.inplance.ce.gov.br/sala\\_situacao/PBM\\_2002/index.htm](http://www.inplance.ce.gov.br/sala_situacao/PBM_2002/index.htm). Acesso em: novembro de 2012 às 14h20minhs.

**Inundações Urbanas na América do Sul** / Carlos E. M. TUCCI, Juan Carlos Bertoni (organizadores). – Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

MOREIRA, A A C. **Modelagem Hidrológica da Bacia do Rio Granjeiro – Crato – CE Composição do Cenário Atual e Simulações de Uso e Ocupação do Solo**. Dissertação - Msc. Engenharia Civil, Universidade Federal do Cariri, 2013.

NOGUEIRA, L.C, **Elementos de Engenharia Hidráulica e Sanitária** – 2º Edição – São Paulo, Edgard Blucher, 1976. – 355p.

NETO, A. FERNADEZ, Y, M. ARAÚJO, R. EIJI, A. **Manual de Hidráulica** – 8º Edição – São Paulo, Edgard Blucher, 1998. – 680p.

OLIVEIRA, R A F. **Propagação de Ondas de Despacho e Controle de Inundações da bacia do Paraíba do Sul**. Dissertação - Msc. Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2005.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mechanics of Fluids**. 1997.

PORTO, Rodrigo de melo / **Hidráulica Básica** – 4. Ed. – São Carlos: EESC-USP, 2006. [540] p. : il.

SANTOS, Irani dos. Fill Heninz Dieter. **Hidrometria Aplicada** / Curitiba: Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, 2001. 372p.

SILVA, RUI CARLOS VIEIRA, **Hidráulica fluvial** / Rui Carlos Vieira da Silva, Flávio Cesar Borba Mascarenhas, Marcelo Gomes Miguez – 2. Ed. Ver. Atual. – Rio de Janeiro: COPPE / UFRJ, 2007. Xxii, 306p.: 25,5 cm.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2002) – “**HEC-RAS – River Analyses System –Application guide**”, November.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2002) – “**HEC-RAS – River Analyses System –Manual**”, November.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2002) – “**HEC-RAS – River Analyses System –Reference Manual**”, November.

VALIA.Y.R.S. **Estudo da Resitência ao Escoamento em Canais de Fundo Fixo**.  
Dissertação - Msc. Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
2000.