

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Centro de Desenvolvimento Tecnológico**  
**Curso de Engenharia Hídrica**



Trabalho de Conclusão de Curso

**Modelagem hidrodinâmica unidimensional do Canal São Gonçalo/RS**

**Jade Silva de Oliveira**

Pelotas, 2019

**Jade Silva de Oliveira**

**Modelagem Hidrodinâmica unidimensional do Canal São Gonçalo/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Centro de Desenvolvimento Tecnológico da  
Universidade Federal de Pelotas, como requisito  
parcial à obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Hídrica.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares  
Coorientador: MSc. Guilherme Kruger Bartels

Pelotas, 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O48m Oliveira, Jade Silva de  
Modelagem hidrodinâmica unidimensional do Canal São Gonçalo/RS / Jade  
Silva de Oliveira ; Gilberto Loguercio Collares, orientador ; Guilherme Kruger  
Bartels, coorientador. – Pelotas, 2019.  
51 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Hídrica)—  
Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas,  
2019.

1. HEC-RAS. 2. Modelagem hidrodinâmica. 3. Canal São Gonçalo. 4.  
Modelagem unidimensional. I. Collares, Gilberto Loguercio, orient. II. Bartels,  
Guilherme Kruger, coorient. III. Título.

CDD: 627

Jade Silva de Oliveira

Modelagem hidrodinâmica unidimensional do Canal São Gonçalo/RS

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, como requisito parcial, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Hídrica, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 05/08/2019

Banca examinadora:

Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares (Orientador)  
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade de Santa Maria

MSc. Guilherme Kruger Bartels (Coorientador)  
Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Pelotas

Profa. Dra. Angélica Cirolini  
Doutora em Geografia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Alexandre Felipe Bruch  
Doutor em Geografia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

*Dedico este trabalho à minha mãe, pai, padrasto,  
madrasta e irmãos.*

## **Agradecimentos**

À Deus por ter me colocado no caminho de tanta gente especial e por cada oportunidade que me foi dada, pelo simples fato de viver.

Aos meus pais, Marcia Teixeira e Sérgio Ricardo pelo amor incondicional, paciência, incentivo e apoio em todas as minhas decisões. Por me proporcionaram estar aqui conquistando um diploma.

Aos meus padrastos Carla Vismara e Ricardo Teixeira, que sempre estiveram presentes, me apoiaram e vibraram com cada conquista.

Aos meus avós, tios e padrinhos por todo carinho.

Ao meu orientador Gilberto Loguercio Collares e coorientador Guilherme Kruguer Bartels por todo suporte nessa jornada.

Aos professores da Engenharia Hídrica por todo o conhecimento, experiência, dedicação e motivação que me foi proporcionado, em especial para o professor Mauricio Dai Prá e Idel Milani, pela impecável maneira com que conduziram a minha formação acadêmica e nos quais me espelho muito.

Ao grupo PET Engenharia Hídrica e a SEA Soluções em Engenharia Hídrica, que tornaram a graduação um ambiente mais divertido.

As antigas e queridas amigas, que mesmo de longe, sempre estiveram dispostas a me ajudar, compartilhar histórias, comemorar e inclusive me visitaram, Joyce Rios e Thamires Oliveira.

Aos colegas da engenharia com os quais compartilhei muitas horas de estudo e momentos de descontração. Pelas palavras de conforto nos momentos mais difíceis, e pela parceria nos momentos mais felizes, em especial Angélica Pinheiro, Aryane Farias, Aryane Rodrigues, Arthur Costa, Bruna Dalago, Eduardo Rosa, Laura Kerstner e Pedro Loguercio.

Aos professores e colegas do intercâmbio, por cada ensinamento e momento de descontração, em especial Emilly Siqueira, Higor Cerqueira, Francisco Mateo, Luís Matamoros e Miguel Gonzalez.

À todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação.  
Obrigada.

*“Felicidade só é real quando compartilhada.”*

Into the Wild

## Resumo

OLIVEIRA, J. S. **Modelagem Hidrodinâmica unidimensional do Canal São Gonçalo**. 2019, 53p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Hídrica) - Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

Conhecer a vazão dos cursos d'água é imprescindível para a gestão dos recursos hídricos, permitindo o conhecimento do real volume disponível, para diversos fins. Medições a campo são caras e demandam tempo, nesse sentido têm-se desenvolvido uso de modelos matemáticos para prever o escoamento superficial. Dentre os modelos matemáticos desenvolvidos tem-se o HEC-RAS, baseado na formulação hidrodinâmica completa. O presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho do modelo unidimensional HEC-RAS em simular as vazões do Canal São Gonçalo a partir de dados de nível d'água, observado ao longo do tempo, e características geométricas do canal. O Canal São Gonçalo apresenta sentido de escoamento da Lagoa Mirim para Lagoa dos Patos, no entanto em períodos de estiagem esse fluxo pode mudar. Dessa forma, é possível encontrar velocidades negativas para um mesmo nível, que por sua vez influenciam no cálculo da vazão. Para o estudo optou-se por considerar apenas um sentido de escoamento, gerando o modelo em 1D (unidimensional) e em regime não permanente. Buscou-se calibrar e validar os resultados alterando o coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ), de modo a comparar as vazões simuladas às calculadas pelo método das velocidades indexadas. A eficiência do modelo foi avaliada a partir do coeficiente Nash-Stutcliffe (NS). Os valores de  $n$  utilizados foram 0,1; 0,035; 0,03; 0,02; 0,018. No entanto, resultaram em valores negativos de NS, indicando um mal ajuste entre os dados simulados com os observados. O coeficiente de rugosidade 0,018 apresentou um NS de -0,06, sendo o melhor resultado entre os demais, mas que ainda está fora dos limites aceitáveis para validar o modelo, além de resultar em valores muito elevados de vazão. Nesse sentido, optou-se por não reduzir mais o coeficiente  $n$ , pois os valores não estariam dentro dos limites propostos pela literatura para canais irregulares. Sendo assim, o modelo não conseguiu reproduzir de maneira satisfatória os resultados, uma vez que os valores de vazão foram superestimados e não apresentaram um bom desempenho de acordo com o coeficiente de Nash-Sutcliffe.

**Palavras-chave:** HEC-RAS, modelagem hidrodinâmica, Canal São Gonçalo, modelagem unidimensional.

## Abstract

OLIVEIRA, J. S. **One-dimensional hydrodynamic modeling of the São Gonçalo Canal/RS**. 2019, 53p. Coursework (Undergraduate Course in Water Resources Engineering), Center of Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2019.

The management of water resources depend on knowing the flow of watercourses. Field measurements are expensive and time consuming, nowadays have been developed mathematical models to predict the surface runoff. One example of this is HEC-RAS, which uses the complete hydrodynamic formulation. This study aims to evaluate the performance of the HEC-RAS model to simulate the flows of the São Gonçalo Channel from information of water level data, observed over time, and geometric characteristics of the channel. The São Gonçalo Channel's flow direction is from Lagoa Mirim to Lagoa dos Patos, but in drought periods this can reverse. In this way, it is possible to find negative velocities for the same level, which will influence in the calculation of the flow. The chosen model was 1D and executed in unsteady flow. Sought to calibrate and validate the results by changing the roughness coefficient of Manning, comparing the simulated flows to those calculated by the indexed velocity method. The efficiency of the model was evaluated from the Nash-Stutcliffe (NS) coefficient. Values of  $n$  used were 0.1; 0.035; 0.03; 0.02; 0.018. However, they resulted in negative values of NS, indicating a bad fit between the simulated data and those observed. The roughness coefficient 0.018 presented a NS of -0.06, being the best result among the others, but still outside the acceptable limits to validate the model, besides resulting in high values of flow. Therefore, it was decided not to present the coefficient  $n$ , since the values were not within the limits proposed by the literature for irregular buses. The model was unable to reproduce the results satisfactorily, besides the flow values were overestimated and did not show a good performance according to the Nash-Sutcliffe coefficient.

**Key-words:** HEC-RAS, hydrodynamic modeling, One-dimensional.

## Lista de Figuras

Figura 1	Ciclo hidrológico.....	14
Figura 2	Bacia hidrográfica e sua rede de drenagem.....	16
Figura 3	Fluxograma de resumo dos escoamentos em canais.....	19
Figura 4	Mapa de localização da região de estudo.....	29
Figura 5	Barragem Eclusa do canal São Gonçalo/RS.....	30
Figura 6	Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo e seus principais corpos hídricos.....	31
Figura 7	Seções de estudo do canal São Gonçalo.....	33
Figura 8	Perfil longitudinal das seções 7 a 14, onde o lado esquerdo representa as seções a jusante e a direita a seções a montante.....	35
Figura 9	Hidrograma de entrada para a simulação.....	36
Figura 10	Hidrograma para calibração com coeficiente de Manning 0,1.....	39
Figura 11	Hidrograma para diferentes valores de coeficiente de Manning.....	40
Figura 12	Perfil longitudinal do canal São Gonçalo na condição inicial.....	42
Figura 13	Perfil longitudinal do canal São Gonçalo para a máxima condição.....	42
Figura 14	Seção transversal 7 – montante.....	43
Figura 15	Seção transversal 14 – jusante.....	43
Figura 16	Perfil de velocidades ao longo do canal.....	44
Figura 17	Hidrograma de saída obtido pelo HEC-RAS.....	44

## Lista de Tabelas

Tabela 1	Comparação entre modelos hidrodinâmicos, suas vantagens e desvantagens e exemplos de softwares.....	26
Tabela 2	Coeficientes de rugosidade Manning para diferentes características dos canais.....	34
Tabela 3	Coeficientes de rugosidade Manning utilizados na primeira simulação.....	38
Tabela 4	Desempenho Nash-Sutcliffe dos diferentes valores de Coeficiente de Manning.....	39

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Revisão.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Ciclo hidrológico.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Bacia hidrográfica.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3</b>	<b>Escoamento em rios e canais.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Tipos de escoamentos.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Equações do escoamento.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.2.1</b>	<b>Equação da continuidade.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2.2</b>	<b>Equação da quantidade de movimento.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Classificação dos modelos de escoamento.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4</b>	<b>Hidráulica fluvial.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Hidrograma.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5</b>	<b>Modelagem hidráulica.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Modelagem hidrodinâmica.....</b>	<b>25</b>
<b>2.5.2</b>	<b>O Modelo HEC-RAS.....</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Caracterização da região de estudo.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Barragem Eclusa.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>Levantamento de dados.....</b>	<b>32</b>
<b>3.3</b>	<b>Aplicação do HEC-RAS.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4</b>	<b>Eficiência do modelo.....</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>Calibração do modelo.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2</b>	<b>Simulação hidrodinâmica.....</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>45</b>
	<b>Referências.....</b>	<b>46</b>
	<b>Apêndice.....</b>	<b>49</b>

## 1 Introdução

Entender e representar da melhor maneira possível o processo de escoamento da água em rios e bacias é fundamental para estudos de previsão de vazões, inundações e estiagens, qualidade da água, análise de cenários de intervenções, entre outras aplicações.

O sistema fluvial é o termo utilizado para um conjunto de rios, canais e afluentes conectados, que convergem para um mesmo local. Esse sistema está em frequente mudanças, de modo a buscar atingir um estado de equilíbrio dinâmico. O equilíbrio dinâmico pode ser entendido como um equilíbrio entre as condições de fluxo e o transporte de sedimentos.

A hidrodinâmica estuda o movimento da água, sua interação com o meio físico e suas propriedades químicas, de modo específico, com um grande nível de detalhamento e, normalmente, em uma escala de espaço e tempo menores.

Para estudar a hidrodinâmica do canal fluvial, é necessário conhecer parâmetros como largura, profundidade, velocidade. A vazão é a unidade de medida usada para quantificar toda a água da bacia hidrográfica que passa em uma seção de controle. Sua obtenção dá-se de forma indireta e está associada a um custo considerável. Para facilitar a obtenção desse dado, é realizada a relação entre o nível e a vazão, ou seja, de acordo com o nível de água, que é obtido por meio de réguas linimétricas ou sensores de nível, é feita uma estimativa da vazão através de uma equação gerada para uma determinada seção de controle.

O gráfico gerado por essa relação é conhecido como curva-chave. No entanto, em determinados casos essa relação não pode ser empregada, devido ao fato do curso d'água sofrer influência de outros condicionantes ou propriedades do próprio escoamento, observando para um mesmo nível, diferentes valores de vazão ou fluxo bi-direcional, como é o caso do Canal São Gonçalo.

Deste modo, é necessário buscar outras metodologias ou estratégias com base em outras relações, podendo assim, estimar de forma rápida e precisa os valores de vazão do curso d'água, de acordo com seu comportamento dinâmico.

Um método alternativo à aplicação da curva-chave, é tentar modelar as vazões, a partir de dados de nível (réguas linimétricas ou sensores de nível), observado ao

longo do tempo, e características geométricas do canal. Nesse sentido, o modelo HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center-River Analysis System*), baseado na formulação hidrodinâmica, desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers* (HEC, 2008a; HEC, 2008b) é uma opção gratuita para simulação de escoamento em canais.

É importante conhecer a vazão para melhorar a gestão dos recursos relacionados ao curso de água em estudo, permitindo o conhecimento do real volume disponível, para os usos múltiplos da água. Para o Canal São Gonçalo é imprescindível esse tipo de informação devido a hidrovia Uruguai-Brasil, a implantação de uma estação de tratamento de água para a cidade de Pelotas às margens do São Gonçalo, a retomada do uso do porto de Pelotas e as atividades de produção agrícola da região.

### **1.1 Objetivo**

Avaliar o desempenho do modelo hidrodinâmico HEC-RAS para simular as vazões no Canal São Gonçalo/RS.

## 2 Revisão

A revisão bibliográfica do presente trabalho se estrutura em cinco itens, sendo eles: ciclo hidrológico; bacia hidrográfica; escoamento em rios e canais; hidráulica fluvial; modelagem hidráulica e a caracterização da região de estudo. Estes tópicos abordam conceitos fundamentais aos entendimentos necessários para realização das análises e das discussões que se sucedem.

### 2.1 Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico corresponde à dinâmica da água no meio ambiente, compreendendo seus diferentes estados físicos (líquido, vapor e sólido) que se verifica nos diferentes ambientes do globo terrestre, tais como atmosfera, oceano, solo, leitos naturais de escoamento, montanha e outros. A fonte básica da energia que aciona e torna o ciclo possível é a radiação solar (MELLO e SILVA, 2013).

Essa dinâmica pode ser observada em diferentes escalas como global, continental, grandes bacias hidrográficas com milhares de km<sup>2</sup> até pequenas bacias com dezenas de hectares.

Os elementos que compõem o ciclo hidrológico são: *precipitação*, *interceptação*, *evaporação*, *evapotranspiração*, *infiltração* e *escoamento superficial* (SILVEIRA, 2002), sendo a precipitação a principal componente de entrada, conforme ilustra a Figura 1.

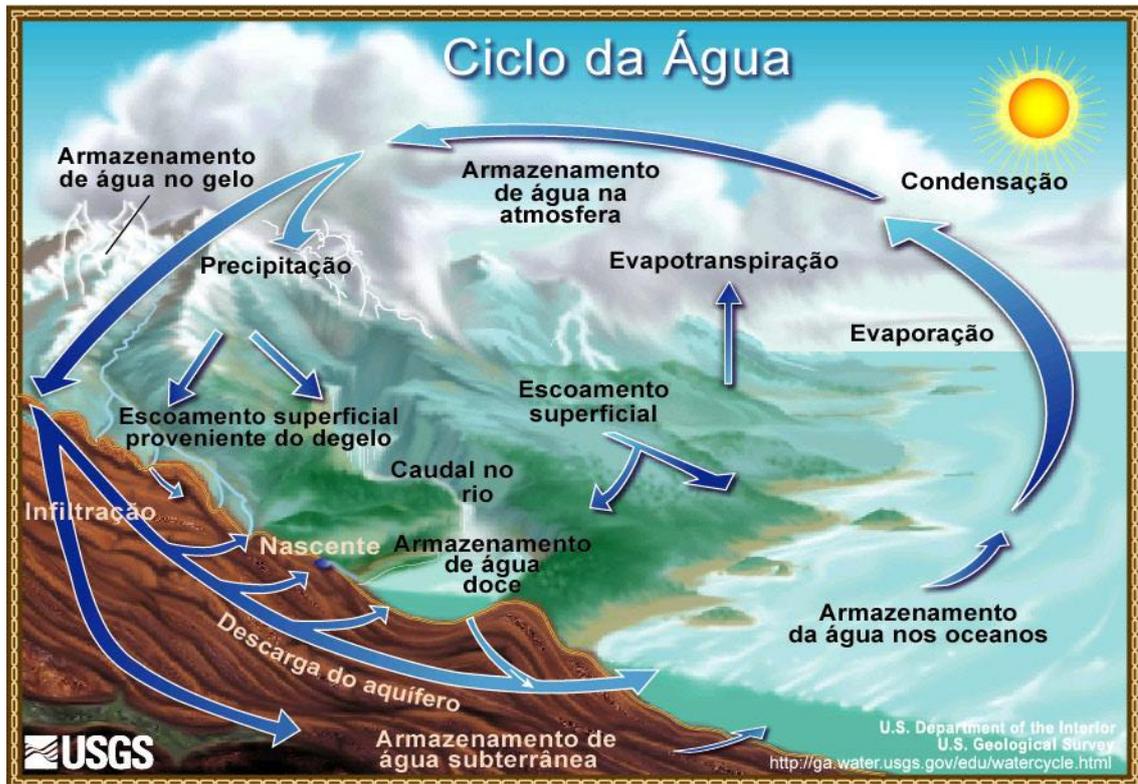


Figura 1: Ciclo hidrológico.  
 Fonte: USGS – United States Geological Survey.

De acordo com Tucci (2015) a *precipitação*, na sua forma mais comum é a chuva, ocorre quando há um crescimento das microgotículas em nuvens com presença significativa de umidade. Formam-se uma grande quantidade de gotas com tamanho e peso suficientes para vencer a força da gravidade.

Parte da água precipitada pode ser *interceptada* pela cobertura vegetal, sendo a quantidade retida, dependendo de características como por exemplo sua área foliar. Esta parte de água pode evaporar-se ou escorrer pelo tronco, ou ainda, gerar precipitação interna (MELLO e SILVA, 2013).

Excedendo a capacidade de armazenar água na superfície dos vegetais, ou por ação dos ventos, a água interceptada pode precipitar-se novamente para o solo. A água quando atinge o solo segue diversos caminhos. Há *infiltração* da precipitação que chega ao solo até que a superfície do solo não se sature. A partir do momento da saturação superficial, o solo vai sendo saturado a maiores profundidades, a infiltração decresce e o excesso não infiltrado da precipitação gera o *escoamento superficial* (TUCCI, 2015).

O escoamento superficial é impulsionado por meio da gravidade para as cotas mais baixas vencendo o atrito com a superfície do solo, sendo o principal responsável pelo transporte de sedimentos (TUCCI, 2015; MELLO e SILVA, 2013).

Em qualquer tempo e local por onde circula a água na superfície terrestre, seja nos continentes ou nos oceanos, há *evaporação* para a atmosfera, fenômeno que fecha o ciclo hidrológico (TUCCI, 2015).

Além dessas etapas, a água absorvida pelas plantas e a presente no solo, sofrem um processo conjunto conhecido como *evapotranspiração*, que é a transferência da água, na forma de vapor, para a atmosfera, isso só é possível pela influência da radiação solar (MELLO e SILVA, 2013).

A partir desses elementos é possível chegar a uma equação denominada balanço hídrico, que de acordo com Mello e Silva (2013) a partir dela pode-se prever o comportamento da evapotranspiração de uma bacia hidrográfica, o comportamento do armazenamento de água na bacia nos diferentes meios (solo e zona saturada), a simulação do escoamento superficial, dentre outros objetivos.

Tal equação pode ser descrita da seguinte forma, levando em consideração um intervalo de tempo:

$$(P - IT) + LC = ES_d + ES_b + ES_{ss} + LP + \Delta A_L + ET \quad (1)$$

Onde:

P: Precipitação

IT: Interceptação pelo dossel

LC: Lâmina associada à ascensão capilar

ES<sub>d</sub>: Escoamento superficial direto

ES<sub>b</sub>: Escoamento de base

ES<sub>ss</sub>: Escoamento sub-superficial

LP: Percolação

$\Delta A_L$ : Variação de armazenamento de água numa camada de espessura L do solo

ET: Evapotranspiração.

O escoamento superficial talvez seja a fase mais importante do ciclo hidrológico e de maior importância para os engenheiros, pois é a etapa que estuda o

deslocamento das águas na superfície da Terra e está diretamente ligada ao aproveitamento da água superficial e à proteção contra os efeitos causados pelo seu deslocamento (erosão do solo, inundações, etc.) (ANA, 2012).

## 2.2 Bacia hidrográfica

Bacias hidrográficas são áreas delimitadas espacialmente pelos divisores de água, constituídas por uma rede de drenagem interligada, cujo escoamento converge para uma seção comum, denominada de seção de controle ou exutório da bacia (MELLO e SILVA, 2013), conforme a Figura 2.



Figura 2: Bacia hidrográfica e sua rede de drenagem.  
Fonte: Wanderley (2009).

A bacia hidrográfica consiste então em uma unidade geomorfológica de captação de água proveniente de eventos de precipitação, os quais são concentrados no tempo e a posterior conversão ou compartimentação da água de acordo com os demais elementos do ciclo hidrológico. O escoamento superficial, é a saída de água distribuída ao longo do tempo junto à seção de controle da bacia hidrográfica. O comportamento temporal do escoamento superficial é regido pelas características da bacia, podendo ser mais rápido em determinadas situações específicas, tais como condições topográficas mais declivosas e uso urbano do solo, dentre outros aspectos (Mello e Silva, 2013).

## 2.3 Escoamento em rios e canais

O escoamento superficial é gerado a partir da interação dos diversos processos de armazenamento e transporte do ciclo hidrológico. O escoamento é regido por leis físicas e representado quantitativamente por variáveis como vazão, profundidade do escoamento e velocidade. O comportamento do escoamento é descrito por equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento (TUCCI, 2014). Segundo Porto (2006) a principal característica desse tipo de escoamento é a presença da pressão atmosférica que atua sobre a superfície da água.

De acordo com Carmo (2004) podem ser classificados como naturais ou artificiais. Canais naturais são aqueles cujo os cursos d'água já existem na natureza, como é o caso de rios, córregos, estuários, etc. As propriedades hidráulicas desses canais são geralmente bastante irregulares, então a aplicação da teoria da hidráulica gera resultados aproximados, pois muitas vezes são obtidos a partir de hipóteses de simplificação. Já os canais artificiais são cursos de água construídos pelo homem, e podem ser de seção aberta como canais de irrigação e navegação ou de seção fechada como aquedutos e as galerias pluviais. Por tratar-se de um canal dimensionado, conhece a vazão que ele transporta, além de suas dimensões como largura, inclinação de fundo e das paredes. Dessa forma a aplicação das propriedades hidráulica destes canais são bem empregadas e trazem bons resultados.

### 2.3.1 Tipos de escoamentos

Os escoamentos nos canais podem ter variabilidade espacial e temporal, isto é, características hidráulicas como altura d'água, área molhada, raio hidráulico podem variar no espaço, de seção para seção, e no tempo (PORTO, 2006).

Ao considerar o parâmetro tempo um escoamento pode ser *permanente* ou *não permanente*. De acordo com Collischon e Dornelles (2013), quando as variáveis velocidade, vazão e o nível da água não se alteram ao longo do tempo em um determinado trecho do canal, têm-se um *escoamento permanente*. Ao contrário, o *escoamento é não permanente* se a velocidade em certo ponto varia com o passar do tempo (PORTO, 2006).

A condição de escoamento permanente é utilizada por exemplo para: cálculo de remanso em rios, na análise de perfil de cheias; no escoamento em estiagem, como

base para análise da qualidade da água; e dimensionamento de obras hidráulicas (TUCCI, 2014).

O escoamento em regime não permanente considera a variação no tempo e no espaço das variáveis. Essa situação ocorre na maioria dos problemas hidrológicos de escoamento superficial e de rios e canais (TUCCI, 2014).

Utilizando como critério o parâmetro o espaço, os escoamentos podem ser *uniformes* e *não uniformes* ou *variados*. Segundo Baptista (2014) para que ocorra escoamento uniforme em um conduto livre as características área molhada, profundidade do escoamento e a velocidade devem ser constantes. Dessa maneira, pressupõe que o líquido não sofra nenhuma aceleração ou desaceleração, mantendo a mesma velocidade em todas as seções. Exemplos de escoamento uniforme são encontrados nos condutos de seção constante de grande extensão, como adutoras e canais prismáticos em que a altura da lâmina d'água é invariável.

No escoamento *não uniforme* ou *variado* pressupõe-se que as características área molhada, profundidade do escoamento e velocidade não são constantes ao longo de uma mesma trajetória. Condutos com vários diâmetros ou canais com declividades variáveis, são exemplos deste tipo de escoamento (BAPTISTA, 2014). O escoamento variado pode ser permanente ou variável, acelerado ou desacelerado, se a velocidade aumenta ou diminui no sentido do movimento (PORTO, 2006).

O escoamento variado, por sua vez, é subdividido em gradualmente variado e rapidamente variado. No primeiro caso, os elementos característicos da corrente variam de forma lenta e gradual, de seção para seção, e no segundo, há uma variação brusca na altura d'água e demais parâmetros, sobre uma distância comparativamente pequena (PORTO, 2006).

A classificação dos escoamentos pode ser resumida conforme o Fluxograma apresentado na Figura 3.

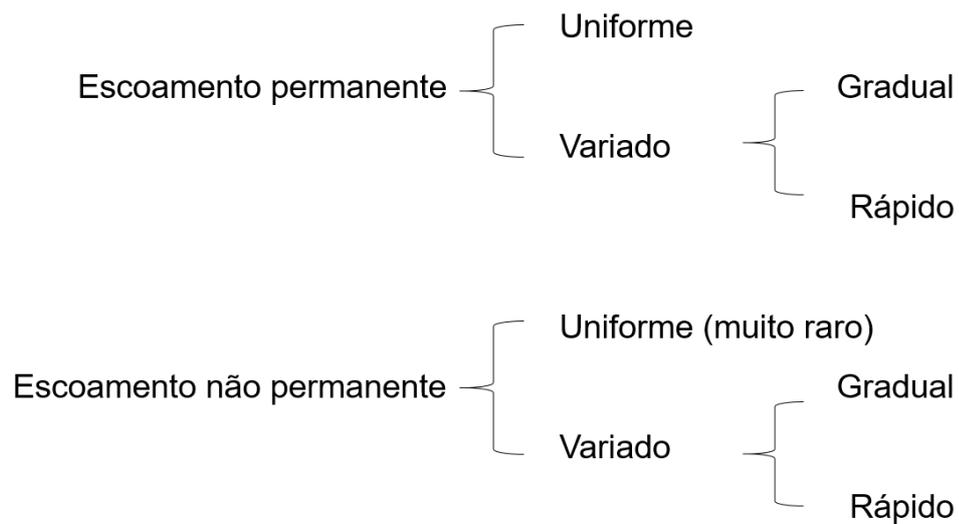


Figura3: Fluxograma de resumo dos escoamentos em canais.  
Fonte: Porto, 2006.

No escoamento de um fluido real com a superfície livre deve-se considerar as forças da inércia, da gravidade e de atrito. Dessa forma, as relações adimensionais expressas pelo número de Reynolds e pelo número de Froude permite classificar os escoamentos livres.

O número de Reynolds, que é a relação entre a força de inércia e a força viscosa, é expresso por:

$$Rey = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VRh}{\nu} \quad (2)$$

Sendo:

V: velocidade média na seção considerada;

Rh: raio hidráulico da seção;

$\nu$ : velocidade cinemática da água.

Segundo Porto (2006) através do número de Reynolds é possível classificar os escoamentos livres em três tipos:

- Escoamento laminar  $Rey < 500$ ;
- Escoamento turbulento  $Rey > 2000$ ;
- Escoamento de transição  $500 < Rey < 2000$ .

O número de Froude, por sua vez, pode ser definido como a raiz quadrada da relação entre a força da inércia e a força da gravidade expresso por (PORTO, 2006):

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

Sendo:

V: velocidade média na seção

g: aceleração da gravidade

Lc: uma dimensão do escoamento

Nos canais é comum definir como dimensão característica a altura hidráulica da seção de modo que o número de Froude é apresentado como:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH_m}} \quad (4)$$

De acordo com Porto (2006) os escoamentos livres são classificados de acordo com o número de Froude em três tipos:

- Escoamento subcrítico ou fluvial,  $Fr < 1$ ;
- Escoamento supercrítico ou torrencial,  $Fr > 1$ ;
- Escoamento crítico,  $Fr = 1$ .

### 2.3.2 Equações do escoamento

De acordo com Porto (2006) a grande maioria dos escoamentos livres se dá normalmente em condições de regime variado e não permanente, nos quais as características mudam em função do tempo e do espaço, mas se essas alterações forem pequenas, supõe-se que o escoamento é permanente. No entanto, se as alterações sofridas são significativas, como, por exemplo, pela presença de ondas originadas por manobras de comportas, esta suposição não é admissível.

As fórmulas propostas para condutos livres apenas levam a resultados satisfatórios quando a forma dos canais é estável e definida. Por isso, nem sempre

elas podem ser aplicadas com segurança, no caso de rios e cursos d'água naturais (AZEVEDO NETO, M. F. FERNANDEZ, R. ARAUJO, 1998).

Para Carmo (2004) o tratamento para esse tipo de escoamento é bem mais complexo. Sendo necessário descrever um fenômeno físico através de um conjunto de equações matemáticas, nos quais deve-se considerar suas reais potencialidades, limitações matemáticas e as condições de aplicabilidade.

Dessa forma deve-se formular conjunto de hipóteses para aplicar equações matemáticas em rios e canais naturais, sendo elas: escoamento unidimensional, distribuição de pressão hidrostática, canal de baixa declividade, canal prismático e declividade constante, fluido incompressível com vazão dada por  $Q = V(x, t) \cdot A(x, t)$  e perda de carga no regime variável computada por uma equação de resistência do regime permanente e uniforme (PORTO, 2006).

O escoamento superficial em rios e canais, poderá então ser retratado por duas equações: conservação de massa e quantidade de movimento, denominadas também de equação de Saint-Venant.

### 2.3.2.1 Equação da continuidade

A equação de continuidade baseada na conservação da massa considerando um trecho  $dx$  de escoamento em superfície livre, pode ser representada por:

$$\rho(\partial A/\partial t)dxdt = \rho Qdt + \rho q dx dt - \rho[Q + (\partial Q/\partial x)dx]dt \quad (5)$$

Sendo o primeiro termo a variação da massa armazenada no intervalo  $dt$ , o segundo termo a massa que entra na seção de montante no mesmo intervalo de tempo. A massa que entra por contribuição lateral, no mesmo período é o terceiro termo e a massa que sai na seção de jusante o quarto termo da equação acima representada.

Considerando a massa específica constante e dividindo por  $dx$  e  $dt$  a equação anterior fica:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (6)$$

Onde:

A: área molhada;

Q: vazão;

T: tempo;

q: vazão de contribuição lateral.

x: deslocamento no sentido do escoamento.

### 2.3.2.2 Equação da quantidade de movimento

A conservação da quantidade de movimento (QM) no trecho é obtida pela soma dos vetores da quantidade de movimento que entram no trecho, menos a soma da QM que sai, mais as forças que atuam no corpo de água no trecho, é igual à variação da QM do trecho no intervalo de tempo considerado (Tucci, 2014).

As principais forças que atuam sobre este escoamento são: gravidade, atrito e pressão.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + g A \frac{\partial y}{\partial x} = g A S_o - g A S_f \quad (7)$$

Onde:

A: área molhada;

Q: vazão;

t: tempo;

x: deslocamento no sentido do escoamento;

$\beta$ : coeficiente de quantidade de movimento

g: aceleração gravitacional;

Sf: declividade da linha de energia.

So: declividade de fundo

Os dois primeiros termos são denominados de termos de inércia, o terceiro refere-se à força de pressão. Os dois termos da direita da equação são os termos de gravidade e atrito.

Essas duas equações de acordo com Tucci (2014) são denominadas também de equações unidimensionais do escoamento não permanente gradualmente variado. Há diferentes formas de representa-las de acordo com as variáveis de interesse (vazão e profundidade de escoamento).

De acordo com Porto (2006) a resolução dessas equações completas do escoamento não permanente variado, requerem técnicas numéricas bem como uma grande quantidade de dados hidráulicos do canal.

### 2.3.3 Classificação dos modelos de escoamento

Os modelos são ferramentas utilizadas para representar processos e elaborar prognósticos.

Chow (1959) classificou os modelos de escoamento em *hidrológicos* e *hidráulicos*. No primeiro grupo estão os modelos que consideram somente o efeito do armazenamento no escoamento, desprezando a formulação dos efeitos da equação da quantidade de movimento. Os modelos hidráulico, são modelos que usam as equações de Saint-Venant (TUCCI, 2014).

Os modelos que utilizam a equação da continuidade e equação de quantidade de movimento, desprezando-se os termos de pressão e inércia, são ditos modelos *ondas cinemática* (TUCCI, 2014).

Quando há efeitos de jusante sobre o escoamento proveniente de montante, os modelos anteriores não podem descrever este processo, pois consideram o escoamento unidirecional (montante para jusante).

De acordo com Tucci (2014) ao acrescentar o termo de pressão no modelo de onda cinemática, o de escoamento passa a ser representado. Neste caso o modelo é dito *difusão*. No entanto, os modelos de difusão não consideram os termos inércia. Esses termos são importantes quando ocorre grande variação temporal e espacial da velocidade do sistema. Neste caso, passa a ser importante o uso de modelo *hidrodinâmico* que considera a equação de quantidade de movimento completa (TUCCI, 2014).

## 2.4 Hidráulica fluvial

Os rios, assim como os canais, são sistemas de transporte nos quais a água escoar, tendo a superfície livre em contato com o ar, sujeito à pressão atmosférica. Como características principais que ditam o comportamento do rio têm-se a velocidade de escoamento da água e a geometria do curso d'água, representada pelo comprimento, largura, profundidade e declividade (Baptista e Pádua, 2016).

A velocidade da corrente associada à área a qual ocupa no espaço é chamada de vazão e sua determinação auxilia bastante no momento de classificar um determinado escoamento. Conforme Santos et al. (2001) a medição de vazão é todo aquele processo empírico que procura descrever o escoamento relacionando o volume com o tempo. Os principais métodos para a medição de vazão são: a medição e integração de distribuição de velocidades, métodos acústicos, método volumétrico, método químico, o uso de geometrias regulares (vertedores e calhas Parshall) e a medição com flutuadores.

Os métodos de medições no campo possuem um elevado custo associado e demandam muito tempo, por isso têm-se procurado desenvolver e aplicar modelos matemáticos para prever o escoamento superficial.

#### **2.4.1 Hidrograma**

Os hidrogramas podem ser entendidos como as representações gráficas de propriedades do escoamento como vazão e velocidade em um curso d'água ao longo do tempo. É bastante usado para hidrólogos, pois consiste na resposta das bacias hidrográficas frente à eventos de chuva, de acordo com Mello e Silva (2013) é possível examinar hidrológicamente uma bacia sob vários aspectos, e são suas características fisiográficas que determinam as relações entre chuva e escoamento, ou seja, é o mecanismo que transforma chuva em vazão.

#### **2.5 Modelagem hidráulica**

Os modelos hidráulicos, são modelos numéricos que, por meio de equações e técnicas especiais, representam os princípios físicos, através de uma estrutura computacional (software) (CARMO, 2004). É possível simular diferentes cenários de modo a facilitar a gestão dos recursos hídricos e compreender os sistemas hidráulicos (QUEDI et al 2018).

### 2.5.1 Modelagem hidrodinâmica

Os escoamentos podem ser classificados de acordo com o vetor velocidade e seu sentido longitudinal. No caso de escoamento em canais naturais ou artificiais pode-se considerar o escoamento uni, bi ou tridimensional. Os cursos d'água natural são instáveis dinamicamente dessa forma há uma variação na velocidade tornando-se mais complexa e tridimensional, mas em muitos casos os estudos são conduzidos como unidirecionais (SOUTO, 2008) de forma a simplificar a situação, e por vezes atendem as necessidades exigidas.

Em estuários as seções são largas e a simplificações de uma dimensão não é válida. Neste caso, modelos bidimensionais devem ser usados para simular as velocidades nas direções transversal e longitudinal (TUCCI, 2014).

Hidrodinâmica é tudo que se relaciona ao movimento ou fluxo da água em seu leito e também fora dele, quando o rio transborda (BAPTISTA e PÁDUA, 2016).

A modelagem Hidrodinâmica tem por objetivo o estudo do movimento dos fluidos. Os modelos hidrodinâmicos utilizam as equações de Saint-Venant de escoamento e não desprezam nenhum termo da equação da quantidade de movimento. Este tipo de modelo requer soluções numéricas das equações diferenciais que necessitam maior quantidade de dados que os demais modelos. As vantagens deste tipo de modelo é a maior precisão e representação física do escoamento, permitindo simular modificações do sistema estudado (TUCCI, 2014).

As equações de Saint-Venant, nesses modelos, são resolvidas sem qualquer simplificação adicional e os modelo de resolução numérica mais comuns são: método das características, método das diferenças finitas e de elementos finitos.

No método dos elementos finitos, o domínio em estudo é dividido em elementos, expressando-se o campo da variável (profundidade do escoamento, velocidade, etc.) em termos de funções de aproximação em cada um dos elementos. As funções de aproximação, também designadas por funções de interpolação, são definidas em termos da variável dependente em certos pontos designados por nós. Os valores que a variável toma nos nós e a função de interpolação definem completamente o comportamento do campo da variável no interior dos elementos. Os valores nos nós são as incógnitas do problema (CARMO, 2004, p.84).

Segundo Ávila (2018) os modelos hidrodinâmicos fornecem uma base física para a modelagem e têm a capacidade de simular diferentes condições de fluxo.

Vários pesquisadores desenvolveram modelos hidrodinâmicos baseados na equação da onda dinâmica unidimensional ou na equação de onda difusiva.

Pode-se observar as vantagens e desvantagens a partir das divisões dos modelos hidrodinâmicos diante de suas características espaciais (unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais) na Tabela 1, assim como exemplos de modelos usuais.

Tabela 1- Comparação entre modelos hidrodinâmicos, suas vantagens e desvantagens e exemplos de softwares.

	<b>Definição</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Exemplos de Modelos</b>
<b>Unidimensionais</b>	Assume apenas o sentido longitudinal	Muito eficiente; Simples de usar; Requer poucos dados.	Apenas modela parâmetros básicos; Pode não ser tão preciso.	HEC-RAS MIKE 11
<b>Bidimensionais</b>	Assume os sentidos lateral e longitudinal ou vertical e longitudinal	Pode modelar mais parâmetros	Pode não ser adequado para alguns processos de modelagem complexos	MIKE 11 TELEMAC
<b>Tridimensionais</b>	Assume os sentidos longitudinal, lateral e vertical	Opções mais complexas de modelagem	Computacionalmente intensivo; Pode ser computacionalmente mais caro (mais custos associados com dados de entrada e calibração do modelo)	SSIIM MIKE 3

Fonte: adaptado de KOAS (2016).

O modelo unidimensional é menos complexo que os demais modelos e é empregado para calcular níveis de água, vazão e velocidade, assumindo apenas o sentido longitudinal do fluxo.

### 2.5.2 O Modelo HEC-RAS

Ferramentas computacionais reduzem tempo e simplificam a preparação de modelos hidrodinâmico. Dentre os modelos hidrodinâmicos capazes de simular o regime de escoamento, um dos mais conhecidos é o HEC-RAS (USACE, 2005).

O software HEC-RAS foi desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC), uma instituição conjunta ao Institute for Water Resources, do US Army Corps of Engineers. Esse software está disponível gratuitamente e possibilita a análise dos escoamentos em rios e canais abertos. O HEC-RAS permite a simulação de escoamento unidimensional em regime permanente e a propagação unidimensional em regime transitório, resolvendo as equações completas de Saint-Venant (Equações 6 e 7) a partir do método dos elementos finitos.

A primeira versão 1.1 do HEC-RAS foi lançada em julho de 1995, desde então houve vários lançamentos importantes deste pacote de software, em 2015 a versão 5.0 que introduziu a modelagem bidimensional do fluxo, bem como os recursos de modelagem de transferência de sedimentos (HYDRAULIC REFERENCE MANUAL, 2016).

Para a determinação da resistência é aplicada a Equação de Manning-Strickler (Equação 9). A equação de Manning-Strickler utilizada no modelo pode ser descrita da seguinte forma:

$$Sf = \frac{n^2 Q |Q|}{Rh^{\frac{4}{3}} A^2} \quad (9)$$

Onde:

Sf: Declive de fricção, que é comumente escrito como a equação de Manning para fluxo uniforme e constante;

RH: Raio hidráulico;

n: Coeficiente de Manning.

O coeficiente de rugosidade de Manning (n) é parâmetro imprescindível para descrição da vazão sobre uma superfície (LI e ZHANG, 2001), no entanto estimá-lo se torna bastante difícil. Sendo necessário realizar medições à campo, utilização de

equações empíricas ou ainda utilizar valores tabelados propostos pelas literaturas para determinadas situações.

Nas análises do perfil da superfície da água em escoamento permanente, gradualmente variado, o procedimento computacional básico é baseado na solução unidimensional da equação da energia. As perdas são avaliadas por atrito (Equação de Manning) e por contração/expansão.

Além disso, está disponível gratuitamente um suplemento, chamado HEC-GeoRAS, que é uma extensão GIS que fornece uma série de procedimentos e ferramentas para a preparação dos dados georreferenciados para importação para o HEC-RAS (USACE, 2005).

### 3 Metodologia

#### 3.1 Área de estudo

O Canal São Gonçalo interliga a Laguna dos Patos com a Lagoa Mirim (Figura 4) e possui 76 km de extensão tendo, portanto uma ligação indireta com o oceano. O fluxo de escoamento do canal, normalmente é no sentido da Lagoa Mirim para a Lagoa dos Patos, entretanto Hartmann e Harkot (1990) comprovam que este fluxo pode inverter-se, o que geralmente ocorre em períodos de estiagem.

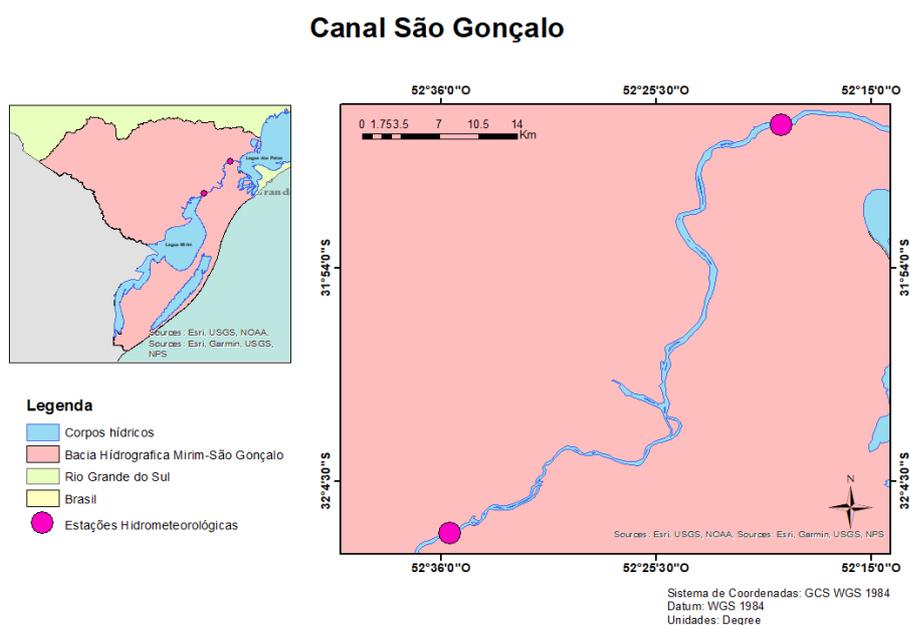


Figura 4: Mapa de localização da região de estudo.

Os principais usos da água do canal se destinam a irrigação, abastecimento humano e dessedentação animal (SEMA, 2018), dessa forma para controlar a inversão de fluxo e impedir a intrusão salina, uma barragem eclusa foi construída no canal (Figura 5).



Figura 5: Barragem Eclusa do canal São Gonçalo/RS.  
Fonte: Google Earth.

O estudo foi realizado no Canal São Gonçalo, no qual o Núcleo de Ensino, Pesquisa e Extensão em Hidrometria e Sedimentos para Manejo de Bacias Hidrográficas (NEPE – HidroSedi) juntamente com a Agência de Desenvolvimento da Lagoa Mirim (ALM), possui estações hidrometeorológicas de monitoramento de precipitação, nível e velocidade de escoamento da água na localidade de Santa Isabel (coordenadas  $32^{\circ} 07' 07''$  Sul e  $52^{\circ} 35' 35.3''$  Oeste) e no Campus Anglo da Universidade Federal de Pelotas (coordenadas  $32^{\circ} 46' 57''$  Sul e  $52^{\circ} 19' 25''$  Oeste), aproximadamente 10,5km do exutório do canal na Laguna dos Patos.

### 3.1.1 Caracterização da região de estudo

A Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo (BHMSG) é uma bacia hidrográfica transfronteiriça de grande relevância ambiental, socioeconômica e cultural, compartilhada entre Brasil e Uruguai. A área situada no território brasileiro pode ser observado na Figura 6.

A BHMSG situa-se no sudeste do Estado do Rio Grande do Sul entre as coordenadas geográficas  $31^{\circ}30'$  a  $34^{\circ}35'$  de latitude Sul e  $53^{\circ}31'$  a  $55^{\circ}15'$  de longitude Oeste. Possui uma área de 25.961,04 km<sup>2</sup>, abrangendo municípios como Arroio Grande, Candiota, Canguçu, Capão do Leão, Chuí, Jaguarão, Pelotas, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar (SEMA, 2018).

### Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo

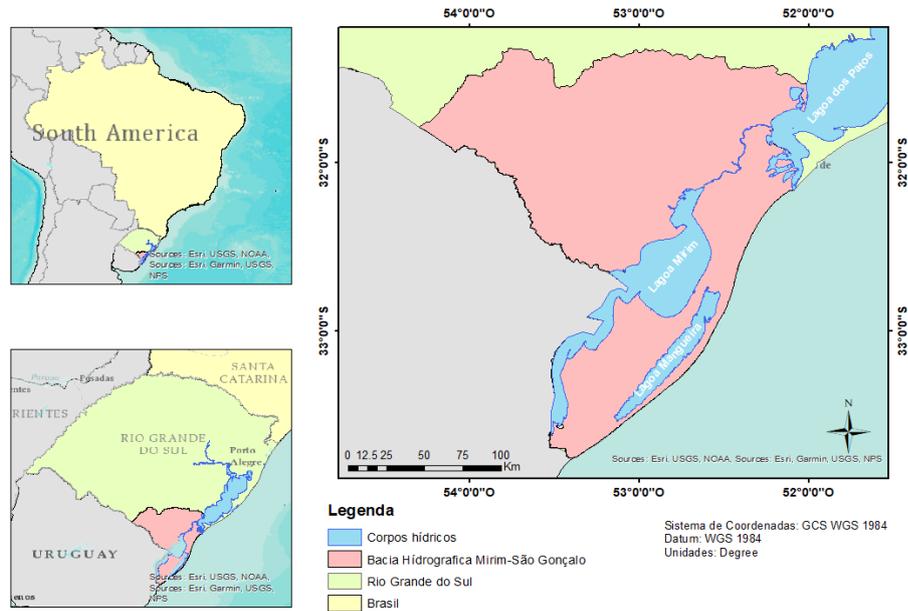


Figura 6: Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo e seus principais corpos hídricos.

Como indica Steinke (2007), a região possui áreas úmidas importantes que acolhem aves migratórias vindas de todo o mundo em busca de alimento e local para reprodução. De acordo com Kotzian e Marques (2004) a Lagoa Mirim é o segundo maior corpo hídrico lacustre do Brasil, ficando atrás somente da laguna dos Patos.

O complexo lagunar Mirim-Patos, é a região que compreende essas duas bacias hidrográficas, sendo de grande importância, pois é uma região de interface entre zonas costeiras, águas interiores e águas costeiras marinhas. Nestes ambientes há uma grande dinâmica e interdependência entre fauna e flora e grande produtividade biológica. Além disso, ocorrem alterações significativas de vários parâmetros tais como a densidade, a temperatura, o vento e a pressão (PEREIRA, 2010), que irão influenciar sobre o escoamento.

#### 3.1.2 Barragem Eclusa

A Barragem Eclusa do Canal São Gonçalo viabiliza a navegação no extremo sul do Brasil e também nas relações com o Uruguai já que é transfronteiriça ligando os diferentes portos da região e, ao mesmo tempo, garante a qualidade da água da Lagoa Mirim para a produção agrícola da região, assim como para o abastecimento

de água doce para a cidade de Rio Grande e logo mais de Pelotas, pois está sendo construído uma Estação de Tratamento de Água a montante da eclusa.

Um estudo realizado por Hartmann e Harkot (1990) observou que a vazão do canal é dependente do nível de água na Lagoa dos Patos e das condições de fluxo do Rio Piratini, que é um dos contribuintes mais importante do canal, além do nível do canal na sua desembocadura e das condições impostas pela barragem eclusa do Canal São Gonçalo. Afirmam também que a ação dos ventos na maior parte das vezes é o fator mais importante.

Devido a influência da zona estuarina da Lagoa dos Patos, a análise do escoamento e do nível de descarga do canal é de extrema importância, por causa da sua contribuição para a área de sólidos em suspensão, e de outros parâmetros como temperatura, pH, etc., que podem alterar a qualidade da água (HARTMANN e HARKOT, 1990).

### 3.2 Levantamento de dados

As seções transversais utilizadas para entrada no modelo HEC-RAS, foram obtidas do estudo realizado por Bonczynski (2018) que realizou o levantamento topográfico do Canal São Gonçalo em 16 seções (Figura 7). Para a modelagem do escoamento foi utilizado as geometrias entre as seções S7 e S14.

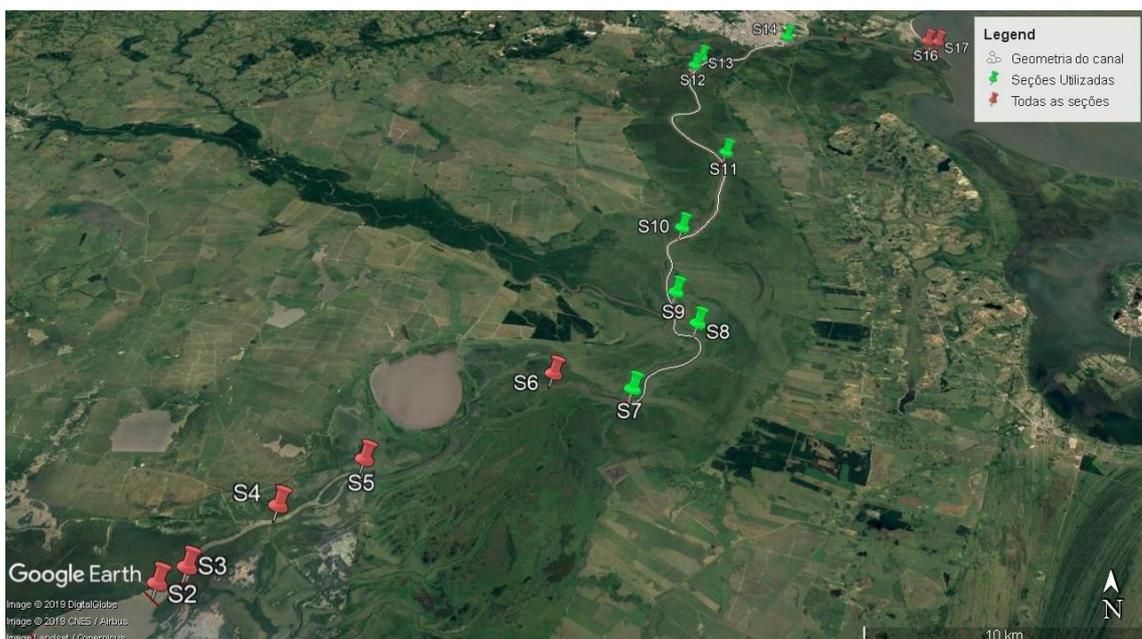


Figura 7: Seções de estudo do canal São Gonçalo.

A primeira etapa desse trabalho, consistiu na criação da geometria do canal, a partir dos levantamentos batimétricos de Bonczynski (2018). Para a criação da geometria fez-se um pré-processamento em um ambiente de SIG, onde gerou-se um Modelo Digital de Terreno (MDT), no software ArcGIS 10.3, a partir dos pontos cotados. O MDT é informação fundamental para a modelagem hidráulica, pois fornece as informações altimétricas necessárias para indicar a direção de fluxo do escoamento.

Os pontos cotados também foram inseridos no Google Earth, onde pode-se criar o leito do canal, através da ferramenta “*caminho*”, tal trajeto foi desenhado minuciosamente para que estivesse no centro do canal e do mesmo modo traçou-se as margens. Essa informação foi exportada para o ArcGIS, de modo a obter uma base para processamentos futuros a partir da extensão HEC-GeoRAS.

A obtenção de seções transversais são importantes para a modelagem no HEC-RAS. As seções transversais, devem ser de modo perpendicular ao curso d'água e acompanhando dos pontos cotados.

### 3.3 Aplicação do HEC-RAS

No presente estudo foi utilizado a versão 5.0.5 do software HEC-RAS. Os dados de entrada do HEC-RAS foram à geometria dos canais, incluindo as seções transversais dos canais.

Para realização deste trabalho, adotou-se as seguintes informações:

- Não considerou-se a presença da barragem eclusa;
- Não considerou-se as pontes existente ao longo do curso d'água;
- Não considerou-se efeitos da maré a jusante;
- Não considerou-se as contribuições laterais de vazão na área de modelagem.

Posteriormente, inseriu-se os valores de coeficiente de rugosidade de Manning para as seções transversais. O valor foi definido conforme descrito por Baptista e Lara (2014) (Tabela 2), para canais de grande porte com seções irregulares e planícies de inundação para as margens. Variou-se o coeficiente para a calha principal do canal de 0,035 até 0,1 e para as margens do canal de 0,045 até 1,60. A escolha adequada do valor de Manning é de extrema importância pois irá influenciar diretamente nos resultados finais.

Tabela 2 – Coeficientes de rugosidade Manning para diferentes características dos canais.

Tipo	Características	Rug. Mín (n)	Rug. Méd. (n)	Rug. Máx (n)
<b>Canais em planície (L&lt;30)</b>	Limpos	0,025	0,033	0,045
	Trechos lentos	0,050	0,070	0,080
<b>Canais em montanha (L&lt;30m)</b>	Leito desobstruído	0,030	0,040	0,050
	Leito com matacões	0,040	0,050	0,070
<b>Canais de grande porte (L&gt;30m)</b>	Seções regulares	0,025	-	0,060
	Seções irregulares	0,035	-	0,100
<b>Planícies de inundação</b>	Pastagens	0,025	0,030	0,035
	Culturas	0,020	0,040	0,050
	Vegetação densa	0,045	0,070	0,160

Fonte: Adaptado de Baptista&Lara, 2014.

No próprio modelo HEC-RAS, realizou-se uma interpolação entre as seções, para melhorar o desempenho computacional do modelo e como consequência a qualidade dos resultados. Interpolou-se de modo a obter espaçamentos máximos de 500 metros, com exceção à penúltima seção à jusante que teve espaçamentos máximos 200 metros devido a presença da eclusa. No total foram geradas 92 seções.

O perfil longitudinal do canal está representado na Figura 8, onde é possível observar que ele não é uniforme e há a presença de uma depressão, que poderá causar alguma instabilidade no modelo.

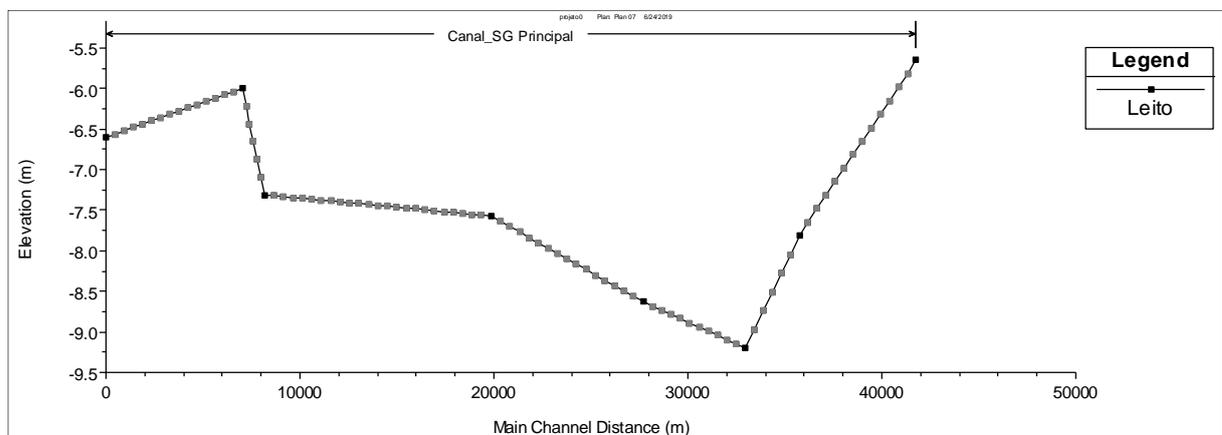


Figura 8: Perfil longitudinal das seções 7 a 14, onde o lado esquerdo representa as seções a jusante e a direita a seções a montante.

Além das seções transversais, foram utilizadas o nível d'água, vazão inicial e declividade do leito, como entrada para a modelagem hidrodinâmica. O nível da lâmina d'água foi obtido através da estação hidrometeorológica de Santa Isabel, no período de março de 2018 à junho de 2018 em intervalos de 10 minutos (Figura 9).

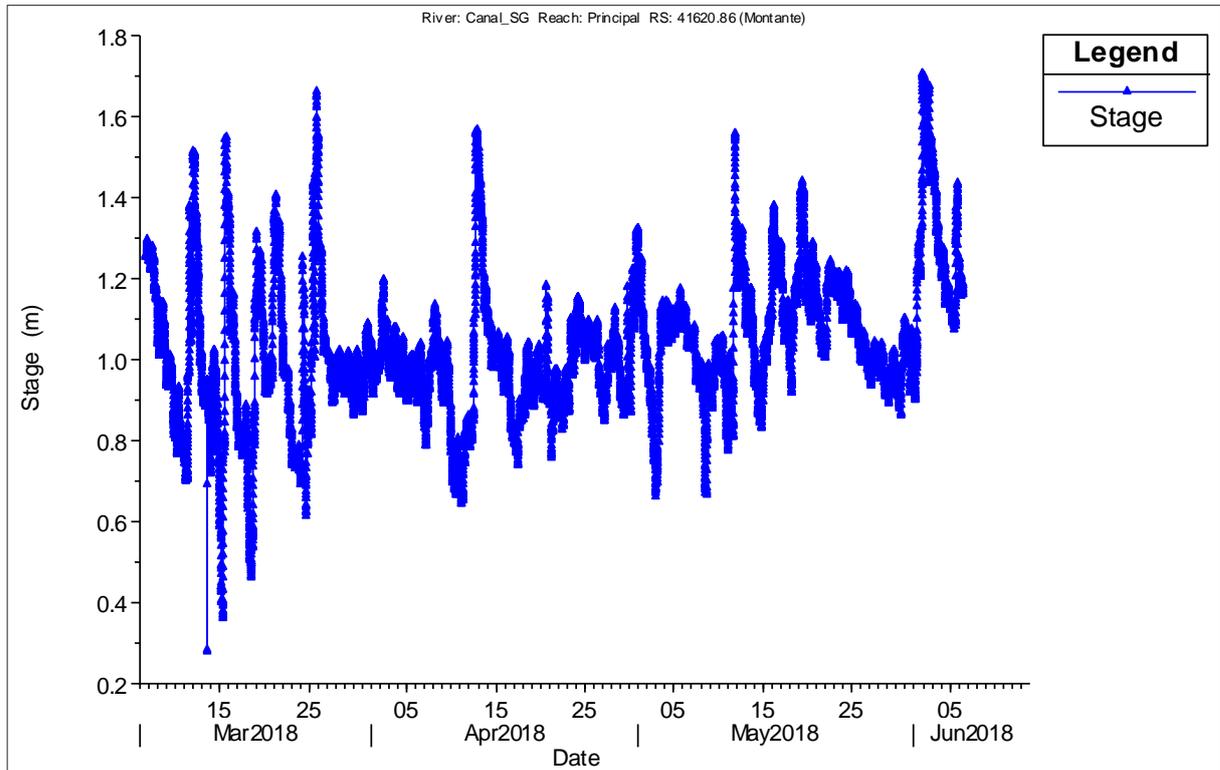


Figura 9: Hidrograma de entrada para a simulação.

A vazão inicial, condição de contorno a montante do modelo, foi obtida através da média das vazões encontradas por Noschang (2018), onde ele utiliza o método das velocidades indexadas para estimativa das vazões. Fez-se a média apenas dos valores positivos encontrados, uma vez que o Canal São Gonçalo pode mudar de sentido e o vetor velocidade tem diferentes sentidos, logo positivo ou negativo, afetando no cálculo da vazão. No entanto, decidiu-se utilizar somente os valores positivos, pois a modelagem se dará em apenas uma direção.

A declividade foi obtida pela razão da diferença entre as cotas de montante e jusante, sobre a distância entre eles.

O modelo foi gerado em escoamento de regime não permanente e o tipo de escoamento como misto, onde o próprio HEC-RAS define quais são as regiões onde o escoamento é supercrítico e subcrítico de acordo com as condições de escoamento e de contorno.

### 3.4 Eficiência do modelo

A correta definição de parâmetros e calibração de um modelo hidrodinâmico condiciona o sucesso da simulação. Neste estudo manteve-se em maior parte dos parâmetros do modelo HEC-RAS 1D nas configurações padrão (default).

Para verificar a eficiência do modelo é necessário comparar os dados simulados aos observados, dessa maneira utilizou-se, o coeficiente de Nash-Sutcliffe (Equação 10). Este coeficiente indica o ajuste dos dados simulados aos observados, podendo variar de menos infinito a 1, e quanto mais próximo de 1 se apresente o coeficiente, melhor será o ajuste da equação ao conjunto de dados.

$$N = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QO_i - QO_m)^2} \quad (10)$$

Onde:

$QC_i$ : Vazão simulada no intervalo  $i$ ;

$QO_i$ : Vazão observada no intervalo  $i$ ;

$N$ : Número total de intervalos;

$QO_m$ : Média das vazões observadas.

O coeficiente Nash-Sutcliffe (NS), por considerar o quadrado das diferenças entre as vazões observada e simulada, mede a performance do modelo.

Dessa forma, os valores observados foram obtidos da Estação Hidrometeorológica, localizada no Campus Anglo, no período de março a junho de 2018. A estação fornece valores de nível/cota do nível d'água que por meio da equação gerada pelo método das velocidades indexadas obtida por Lima (2016) possibilitará calcular as respectivas vazões observadas para cada dia.

## 4 Resultados e Discussão

### 4.1 Calibração do modelo

A calibração do modelo foi feita variando o coeficiente de rugosidade de Manning, pois ele interfere bastante na estimativa do fluxo do curso d'água. O ajuste dos parâmetros foi manual, por tentativa e erro, de modo que os valores de vazão gerados pelo modelo pudessem ser comparados com os calculados pelo método das velocidades indexadas para a Estação Hidrometeorológica localizada no campus Anglo (jusante).

Primeiramente fez-se uma simulação com os valores coeficientes máximos sugeridos pela literatura para canais naturais com seções irregulares. O valor de vazão de entrada para a modelagem foi de  $213,27 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , que representa a média dos valores positivos obtidos pelo método das velocidades indexadas para a seção mais a montante.

O modelo permite que sejam colocados diferentes coeficientes para as seções transversais, como também para as margens e canal principal. Diante disso, optou-se por fixar os valores das margens para 0,07 e alterar somente o valor do canal principal. Esse valor foi escolhido pois representa a rugosidade média para áreas com vegetação. Os valores escolhidos para a primeira simulação estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes de rugosidade Manning utilizados na primeira simulação.

	<b>Margem esquerda</b>	<b>Canal principal</b>	<b>Margem Direita</b>
<b>Canal SG</b>	0,07	0,1	0,07

Ao utilizar esses valores, a simulação apresentou vazões muito baixas e níveis d'água negativos. Quando calculou-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe obteve um valor de -1,83, indicando um péssimo resultado, pois de acordo com Silva (2008), a equação está bem ajustada quando o NS é superior a 0,75; entre 0,35 e 0,75 estará aceitável e quando se apresenta inferior a 0,36 será considerado inaceitável.

O hidrograma gerado para n 0,1 pode ser observado conforme a Figura 10, ele está discretizado em 10 minutos. É possível observar que as vazões calculadas e as

simuladas não coincidem na maior parte do tempo. E de acordo com a diferença no formato entre eles fica evidenciado a falta de calibração do modelo. As vazões simuladas são muito próximas ao valor de entrada do modelo, sendo o máximo valor  $226,88\text{m}^3\text{s}^{-1}$  e o mínimo de  $174,92\text{m}^3\text{s}^{-1}$ .

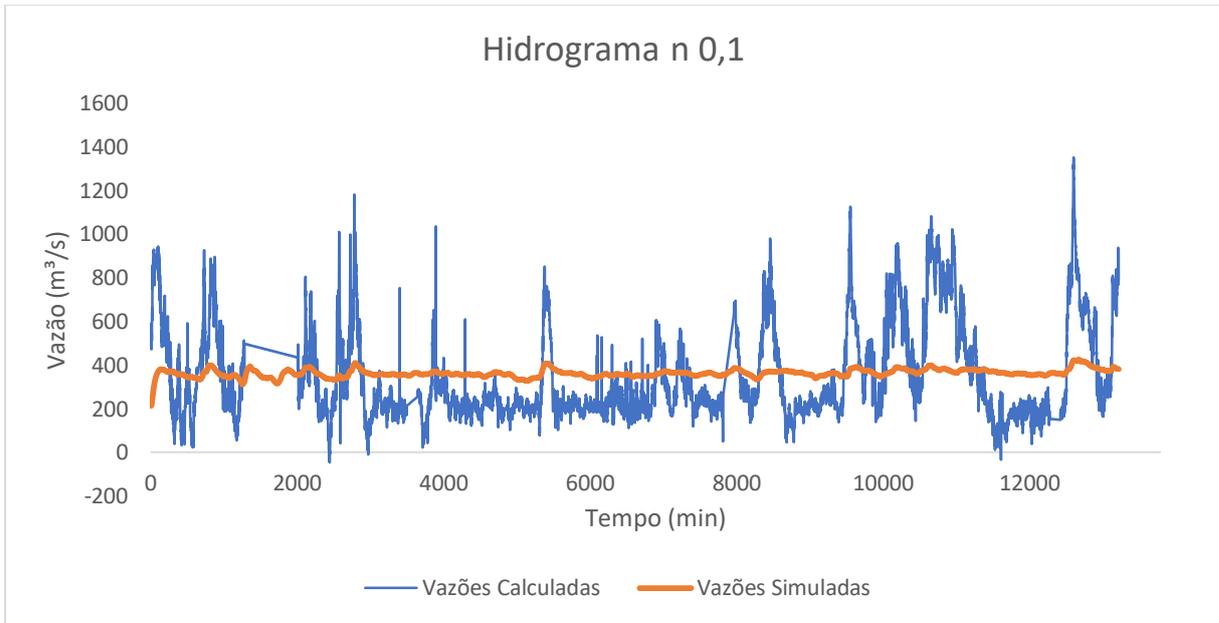


Figura 10– Hidrograma para calibração com coeficiente de Manning 0,1.

Dessa maneira, optou-se por variar o valor de Manning para buscar melhores resultados, os valores escolhidos e seus respectivos valores para o coeficiente de NS estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Desempenho Nash-Sutcliffe para os diferentes valores de Coeficiente de Manning

	<b>N</b>	<b>NS</b>
<b>Canal SG</b>	0,035	-0.85
	0,03	-0.40
	0,02	-0.08
	0,018	-0,06

Percebe-se que os valores obtidos pelo coeficiente NS não são aceitáveis para a calibração do modelo. Durante as simulações houve algumas inconsistências, como por exemplo valores de vazões negativas.

Optou-se por não reduzir mais o  $n$ , visto que não estaria mais dentro dos limites propostos para canais irregulares de acordo com Baptista e Lara (2014). Apesar de

haver uma melhora no desempenho do coeficiente NS, a simulação continuou apresentando inconsistências, houve um aumento muito significativo nas vazões a montante, ultrapassando valores de  $5000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

A partir da análise visual, ao comparar as vazões simuladas com as vazões calculadas pela equação curva pelo método das velocidades indexadas, observou-se que as vazões simuladas são mais constantes. As figuras 11 ilustra os hidrogramas obtidos da modelagem através do HEC-RAS com a variação do coeficiente de rugosidade de Manning, em comparação com o hidrograma das vazões observadas na seção de controle calculadas de acordo com o método das velocidades indexadas.

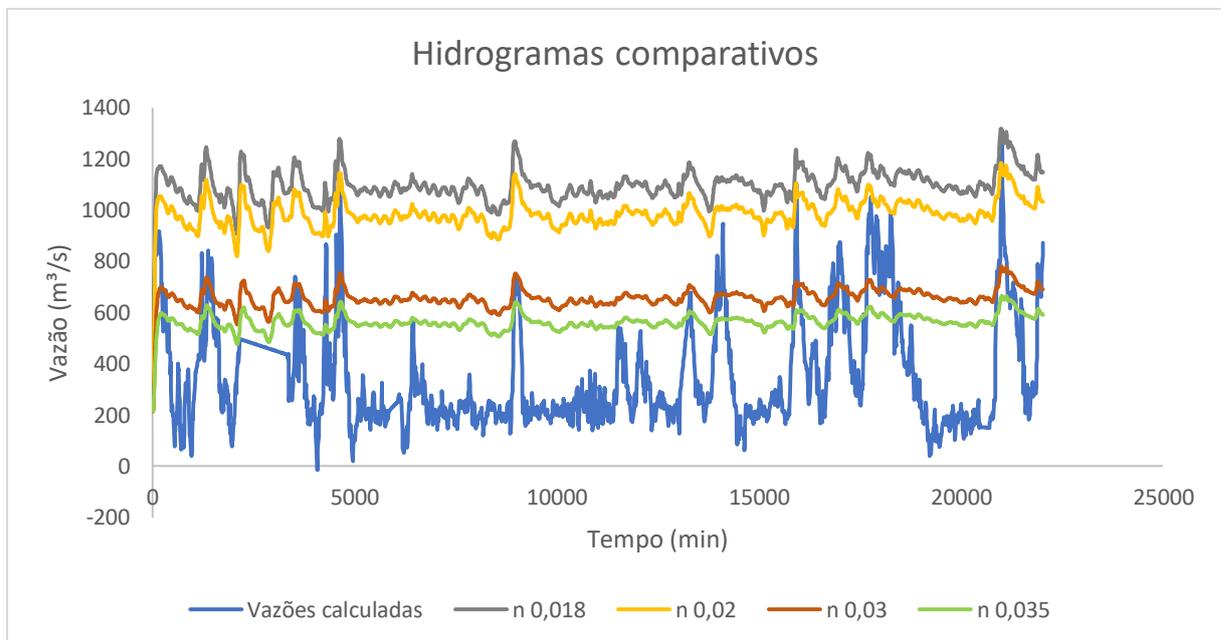


Figura 11– Hidrogramas para diferente valores de coeficiente de Manning.

Para o valor de  $n = 0,035$  máxima foi de  $665,25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , para o valor de  $n = 0,03$  a máxima foi  $780,47 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  a mínima para ambos coincidiu com os valores de entrada do modelo. Para os valores de  $0,020$  e  $0,018$  as vazões foram superestimadas, sendo respectivamente as máximas de  $1183,38 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  e  $1318,33 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , as mínimas novamente foram o valor de entrada da simulação de  $213,27 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Mesmo apresentando o melhor desempenho do NS há inconsistências no modelo gerado com o coeficiente de manning  $0,018$ .

Há valores bem distintos de vazões, no mesmo período de tempo e com a mesma cota, isso pode ser explicado pelo modelo só considerar um sentido de

escoamento, enquanto à campo apresenta escoamento nos dois sentidos, afetando o vetor velocidades que pode ser negativo resultando na diferença de valores de vazão.

Assim como Luz et. al (2017), o presente estudo não obteve sucesso com a calibração pelo coeficiente de Manning, no entanto os autores, alteraram a área de escoamento a jusante a fim de validar seu experimento. Tal consideração não foi feita, visto que as seções foram medidas em campo por ecobatímetro.

## 4.2 Simulação hidrodinâmica

Sharkey (2014) chama atenção para os dados gerados pelo modelo HEC-RAS em escoamentos dinâmicos, pois pode fornecer resultados que não condizem com a realidade, além disso discute sobre a necessidade de um melhor tratamento dos dados de entrada.

Toombes e Chanson (2011) compararam os modelos físicos com escoamentos turbulentos simulados nos modelos HEC-RAS, MIKE11, MIKE21 e FLOW-3D. Os resultados da simulação pelo HEC-RAS foram bons em termos de perfil hidráulico para vazões baixas. No entanto, para vazões altas apresentou diferenças entre o modelo físico e o modelo simulado.

De acordo com Hameed e Ali (2013) os modelos podem ficar instáveis no início da simulação por conta das condições iniciais não serem boas. Além disso, eles acreditam que as medições das vazões nos rios apresentam muitas incertezas e os dados hidrográficos que geralmente contém erros nas medições.

Apesar do modelo não conseguir reproduzir de maneira satisfatória os resultados, optou-se por apresentar alguns dos resultados obtidos pela simulação para o coeficiente de Manning 0,018, que de acordo com o NS apresenta o melhor desempenho entre os demais valores de  $n$ .

Os perfis longitudinais (Figura 12 e 13) apresentam declividade de 0,000022% com sentido do escoamento, da direita para esquerda. A Figura 12 indica a condição inicial para a simulação, com as condições de contorno inseridas a montante. É possível observar que a linha crítica de energia acompanha o fundo do canal.

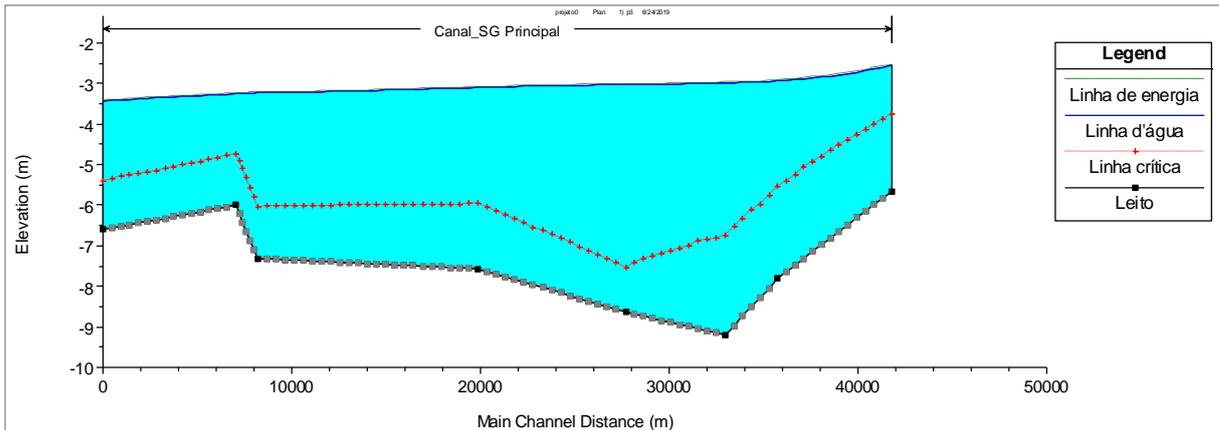


Figura 12: Perfil Longitudinal do Canal São Gonçalo na condição inicial.

É possível analisar o perfil longitudinal para cada data simulada, assim como para as máximas condições encontradas. A figura 13 representa o máximo nível d'água observado através da simulação para o n 0,018.

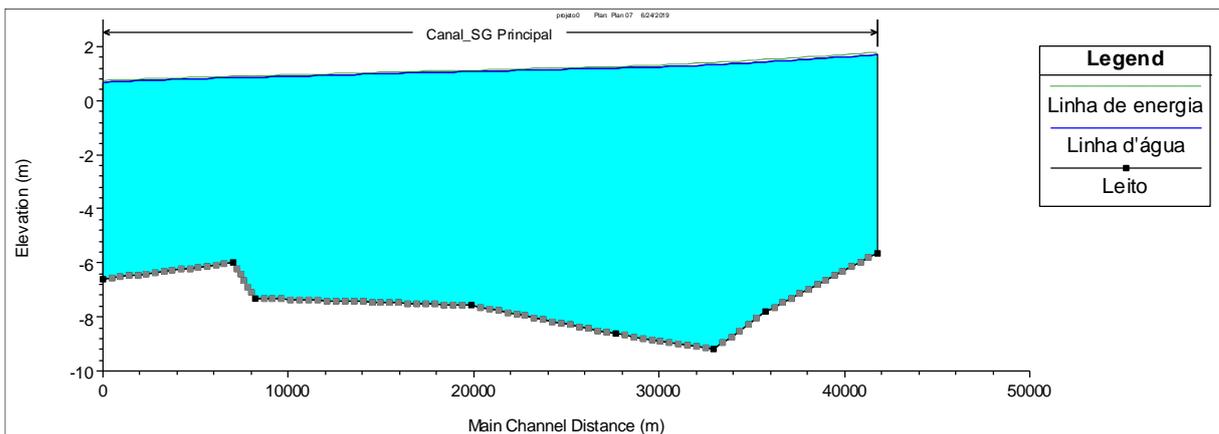


Figura 13: Perfil Longitudinal do Canal São Gonçalo para a máxima condição

Além da seção transversal, o HEC-RAS permite analisar cada seção transversal inclusive as seções interpoladas. Dessa maneira, as figuras 19 e 20 representam as seções de montante e jusante respectivamente, com a máxima vazão modelada para o período. As demais seções podem ser observadas no apêndice desse trabalho.

Os pontos em vermelho representam a margem do canal, e por vezes o nível de água excedeu esses limites durante a modelagem, o que indicaria situações de inundação, no entanto para as seções onde isso ocorreu não foram muito significativas. É possível observar que nas Figuras 14 e 15 o nível d'água ultrapassa as margens.

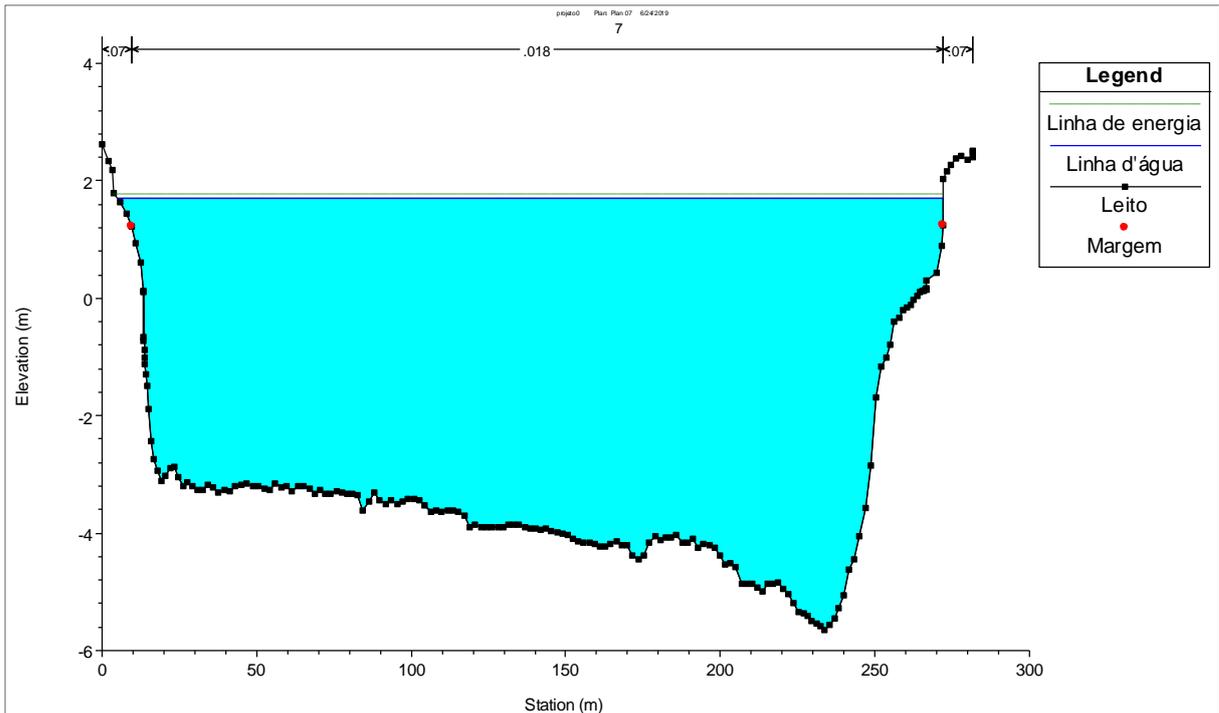


Figura 14: Seção transversal 7 - montante.

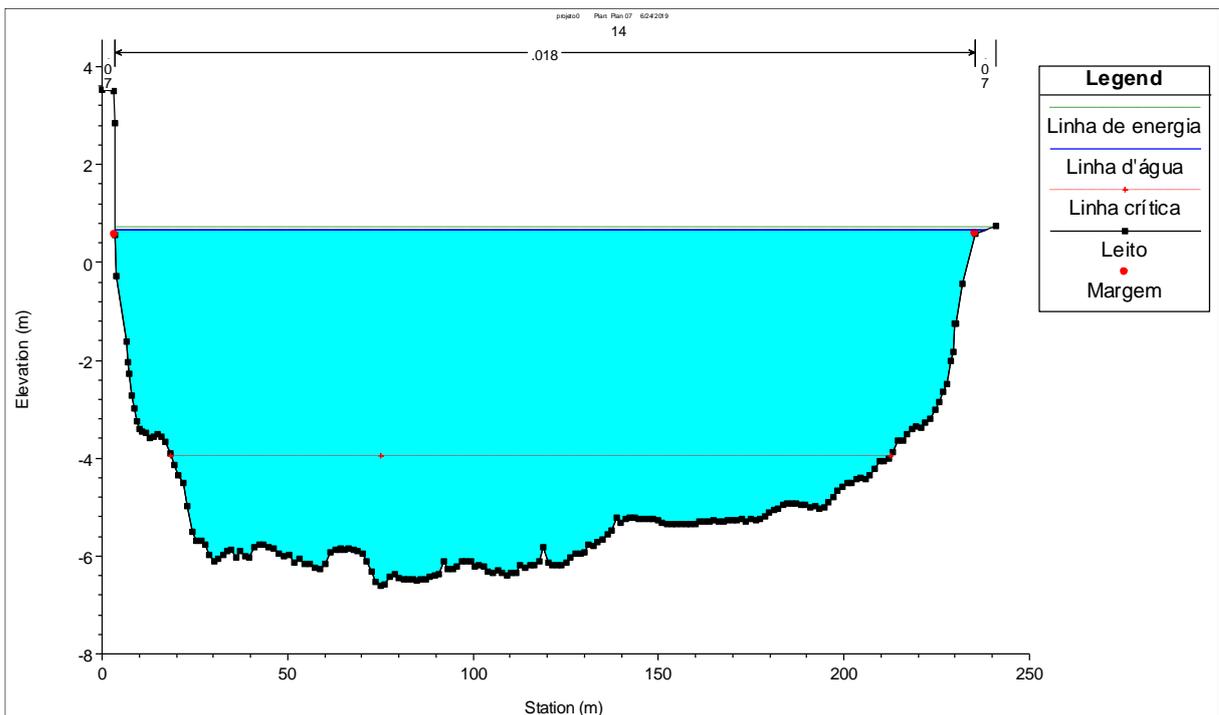


Figura 15: Seção transversal 14 - jusante.

O modelo foi simulado em regime misto, e valor de Froude para todas as seções foi menor que 1, o que indica que todas estão em regime subcrítico. A máxima velocidade encontrada foi de  $1,19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em seções interpoladas próximas a máxima depressão do canal (Figura 16).

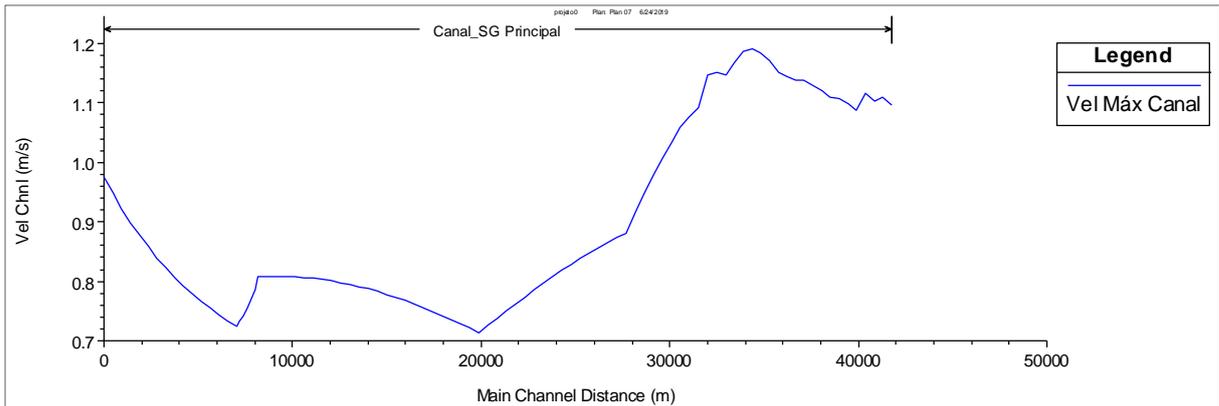


Figura 16: Perfil de velocidades ao longo do canal.

O hidrograma de saída na seção de controle pode ser observado na Figura 17. Há uma comparação entre os valores de vazão e de nível d'água ao longo do tempo. Rocha (2008) analisou a sensibilidade do HEC-RAS para os tempos de simulação, modificando os intervalos computacionais e detalhamento do hidrograma de saída, como resultado obteve hidrogramas inconsistentes. Do mesmo modo, alterou-se os tempos de simulação a fim de encontrar um melhor ajuste das curvas, no entanto os hidrogramas encontrados também foram inconsistentes.

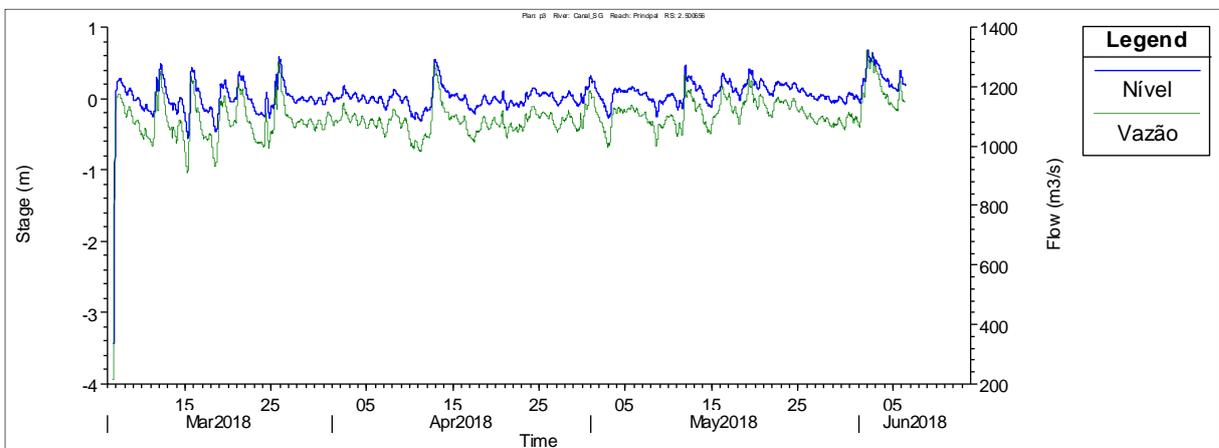


Figura 17: Hidrograma de saída obtido pelo HEC-RAS

## 5 Conclusão

O estudo da hidrodinâmica se baseia nos princípios da conservação da massa, energia e movimento. Situações reais por muitas vezes são complexas para se resolver numericamente, sem que haja suposições e aproximações no esquema.

Este trabalho teve como objetivo analisar o desempenho do modelo HEC-RAS para simular as vazões do Canal São Gonçalo para tanto, optou-se por realizar a modelagem 1D. O modelo não conseguiu reproduzir de maneira satisfatória os resultados, uma vez que os resultados encontrados pela simulação não representaram a situação real. As vazões de saída na seção de controle foram superestimadas. Não foi possível calibrar o modelo pelo coeficiente de rugosidade Manning.

É importante ressaltar que os resultados preliminares apresentados nesse trabalho fazem parte de uma análise de caráter exploratório. Para próximos trabalhos recomenda-se avaliar outros modelos computacionais, modelos 2D ou 1D/2D (junção de ambos) pois podem ser mais recomendáveis para uma melhor representação do escoamento.

Além disso, a inserção as pontes e outras estruturas existentes ao longo do curso d'água também é recomendável, visto que, de maneira geral, tais estruturas alteram a seção de escoamento de um rio, de maneira a diminuir a área de escoamento no local de sua construção

## Referências Bibliográficas

- AZEVEDO NETO, M. F. FERNANDEZ, R. ARAUJO, A. E. Ito. **Manual de Hidráulica**. São Paulo, EdigarBlucher, 1998 8ª ed. 669p. BAPTISTA, M; LARA M.
- BAPTISTA, Márcio; PÁDUA, Valter Lúcio. **Restauração de Sistemas Fluviais**. São Paulo: Manole, 2016.
- BAPTISTA, M; LARA, M. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. UFMG. 4ed. Lavras. 2014.
- BONCZYNSKI, Reginaldo Galski. **Modelagem Geométrica do Canal São Gonçalo através do Levantamento de Seções Topobatemétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Geoprocessamento), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2018.
- CARMO, João Simão Antunes do. **Modelação em hidráulica fluvial e ambiente**. Coimbra: Imprensa da Universidade, 2004. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=pt-PT&lr=&id=eS5ll9H5HvAC&oi=fnd&pg=PR1&dq=hidraulica+fluvial&ots=3hyFi1jVLt&sig=DJ2J9ARlhGFusvll\\_\\_49mJ-EOQ#v=onepage&q=hidraulica%20fluvial&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-PT&lr=&id=eS5ll9H5HvAC&oi=fnd&pg=PR1&dq=hidraulica+fluvial&ots=3hyFi1jVLt&sig=DJ2J9ARlhGFusvll__49mJ-EOQ#v=onepage&q=hidraulica%20fluvial&f=false)> Acesso em: 02 mai 2019.
- CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. New York: McGRAW-HILL Book Company, 1959, 680p.
- Agência Nacional das Águas, **CURSO SEGURANÇA DE BARRAGENS; MÓDULO I – BARRAGENS: ASPECTOS LEGAIS, TÉCNICOS E SÓCIOAMBIENTAIS UNIDADE 5: ASPECTOS HIDROLÓGICOS**. p26, ANA, 2012.
- HARTMAN, C.; HARKOT, P. F. C.; Influência do canal São Gonçalo no aporte de sedimentos para o estuário da Laguna dos Patos, RS. **Revista Brasileira de Geociências**. Departamento de Geociências, FURG, Rio Grande, RS, Brasil. P.329-332, março/dezembro de 1990
- HARTMANN, Carlos; HARKOT, Paulo Fernando Carreta. Influência do canal São Gonçalo no aporte de sedimentos para o estuário da Laguna dos Patos/RS. **Revista Brasileira de Geociências**, 20(1-4):329-332, março/dezembro de 1990. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/11858/11402>> Acesso em: 01 abr 2019.
- HAMEED, L. K.; ALI, S. T.; Estimating of Manning's Roughness Coefficient for Hilla River through Calibration Using HEC-RAS Model. **Jordan Journal of Civil Engineering**, Volume 7, No. 1, 2013
- KOTZIAN, H. B.; MARQUES, D. M. Lagoa Mirim e a convenção Ramsar: um modelo para ação transfronteiriça na conservação de recursos hídricos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 1, n. 2, p. 101-111, 2004.

Li, Z.; Zhang, J. Calculation of field manning's roughness coefficient. **Agricultural Water Management**, v.49, n.2, p.153-161, 2001.

LIMA, Luciana Shigihara. **Estimativa de vazões para o Canal São Gonçalo, do sistema Lagunar Patos-Mirim-RS, através do método das velocidades indexadas**. 2016, 63p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Hídrica), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

LUZ, Lucas Mauro Rosa da; CHAFFE, Pedro Luiz Borges; SPECKHANN, Gustavo Andrei. Modelagem hidráulica de áreas suscetíveis a inundações na bacia hidrográfica do Rio Cubatão Sul. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Disponível em: <[http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/XXIISBRH/Artigos/XXIISBRH\\_Lucas.pdf](http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/XXIISBRH/Artigos/XXIISBRH_Lucas.pdf)> Acesso em: 02 jun 2019.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: Ed. UFLA, 2013.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, 10(3), 282–290, 1970.

NOSHCANG, Anderson Andrei. **Estimativa de descarga líquida do Canal São Gonçalo na região de desembocadura da Lagoa Mirim, extremo sul do Brasil, utilizando o método das velocidades indexadas**. 2015, 53p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Hídrica), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2018.

PORTO, R de M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC-SP, 2006. 519p.

QUEDI, E. S.; CAMPOS, J. A.; FAN, F. M. **Avaliação do Desempenho do Modelo HEC-RAS 1D em Rio com Quedas d'água Variando os Parâmetros do Método Local Partial Inertia (LPI)**. XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA BUENOS AIRES, ARGENTINA, Sep.2018. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/183988/001079871.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 20 mai 2019.

ROCHA, H. L.; **Propagação de onda de cheia em canais simplificados: estudo comparativo de modelo hidrodinâmico e muskingum-cunge**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, nov 2008. Disponível em: <[http://www.labhidro.ufsc.br/Projetos/TCC/TCC\\_%28Henrique\\_Rocha\\_2008%29.pdf](http://www.labhidro.ufsc.br/Projetos/TCC/TCC_%28Henrique_Rocha_2008%29.pdf)> Acesso em: 20 mai 2019.

SANTOS, I; FILL, H. D. *et al.* **Hidrometria Aplicada**. 1.ed. Curitiba/PR. CEHPAR - Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza. 2001.

SEMA/RS. Secretaria de Meio-Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul. **L040 - Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim e do Canal São Gonçalo**. Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br/l040-bacia-hidrografica-da-lagoa-mirim-e-do-canal-sao-goncalo>> Acesso em: 30 mar 2019.

SHARKEY, Jennifer Kay. “**Investigating Instabilities with HEC-RAS Unsteady Flow Modeling for Regulated Rivers at Low Flow Stages**”. Master’s Thesis, University of Tennessee. (2014)

SILVEIRA, A. L. L. **Drenagem Urbana: Aspectos de Gestão**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. e COELHO, G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 258-265, 2008

SOUTO, J.N; **Análise e estudo de escoamento em condutos livres com um tratamento computacional através de software de simulação**. 2008. 131p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia da Computação). Centro Universitário de Brasília. Brasília, 2008.

STEINKE, Valdir Adilson. **Identificação de áreas úmidas prioritárias para conservação da biodiversidade na Bacia da Lagoa Mirim (Brasil-Uruguai): subsídio para gestão transfronteiriça**. 2007. 138f. Tese (Doutorado em Ecologia) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

TOOMBES L, CHANSON H. “**Numerical Limitations of Hydraulic Models**”. The 34th International Association for Hydraulic Research World Congress, Brisbane, Australia, pp. 2322-2329.2011.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**; colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH, 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 4ª edição. Porto Alegre, RS. Editora UFRGS. 2014.

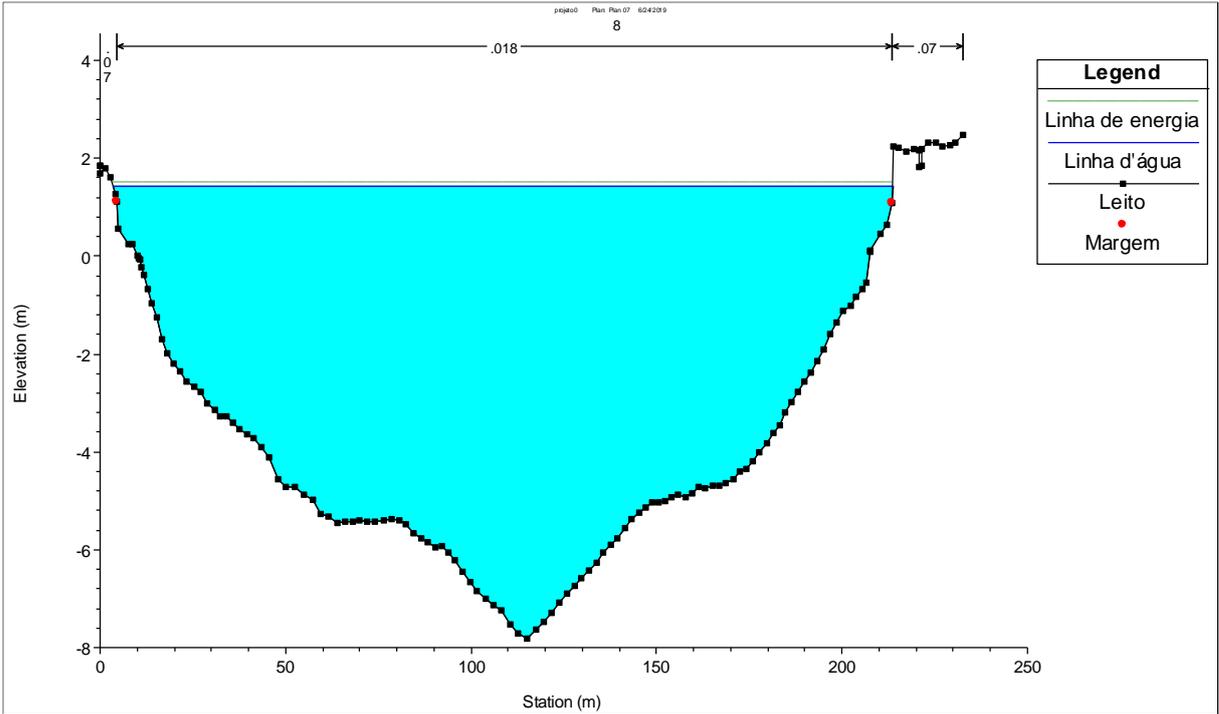
USACE-HEC “Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Technical Reference Manual”. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2005.

USACE-HEC (a). “Hydrologic Modeling System, HEC-HMS v3.3 – User’s Manual”, US Army Corps of Engineers, **Hydrologic Engineering Center**, 2008.

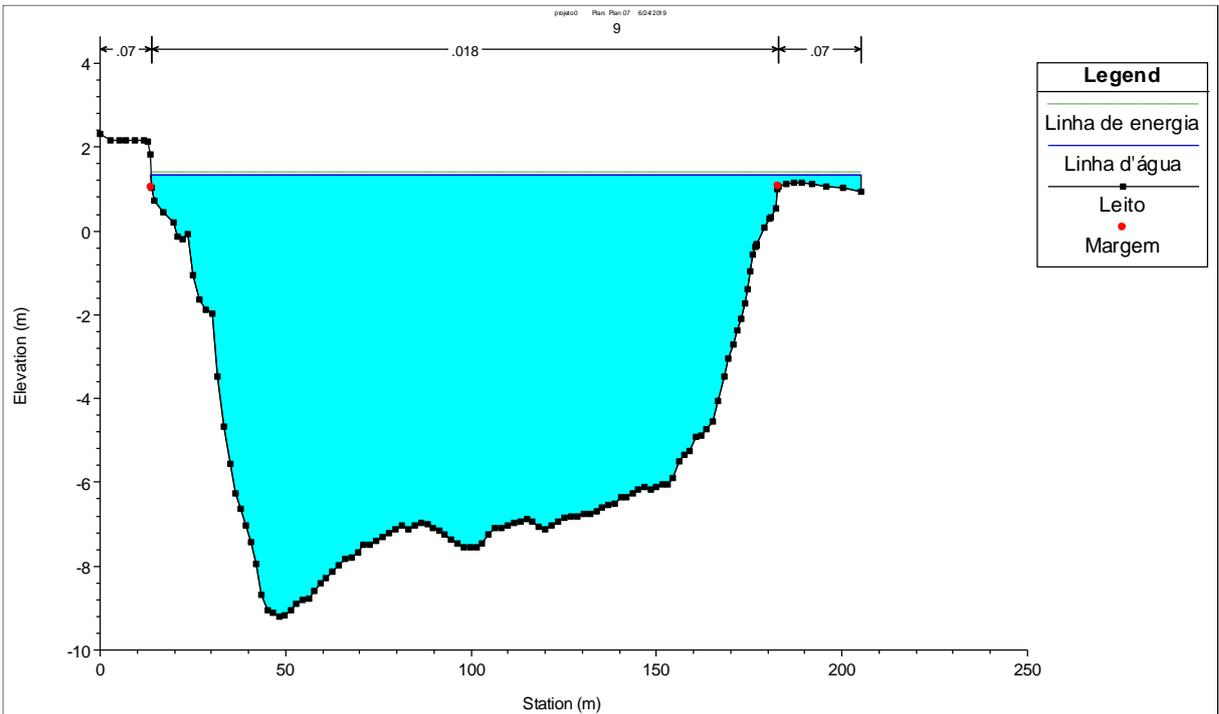
USACE-HEC (b). “Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Applications Guide”, US Army Corps of Engineers, **Hydrologic Engineering Center**, 2008.

USACE. (2008). HEC-RAS River Analyses System. Release Notes. US Army Corps of Engineers. **Hydrologic Engineering Center**, 2008.

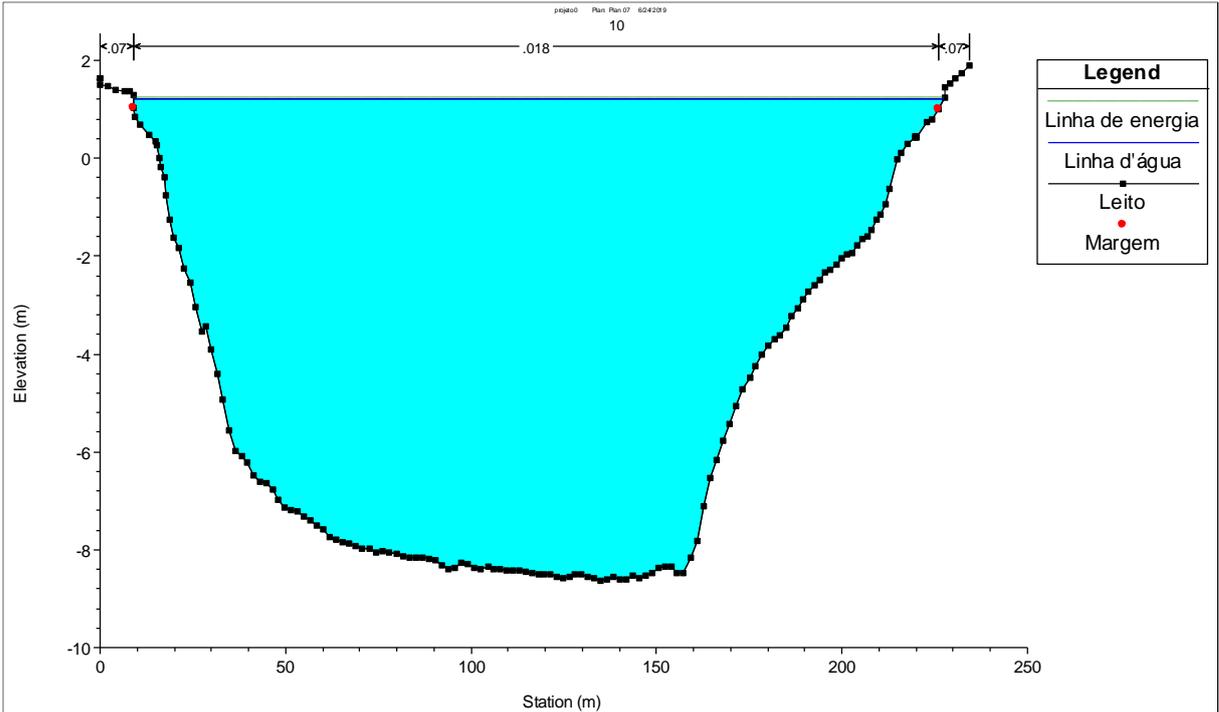
## Apêndice



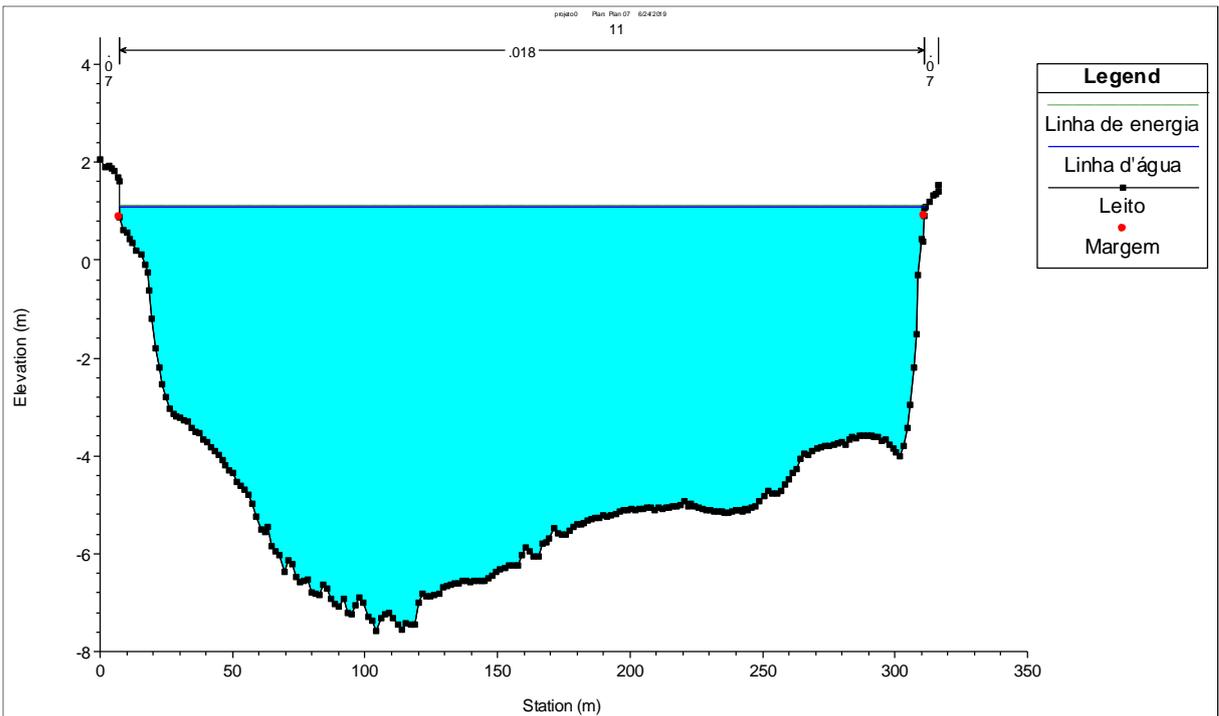
Seção 8



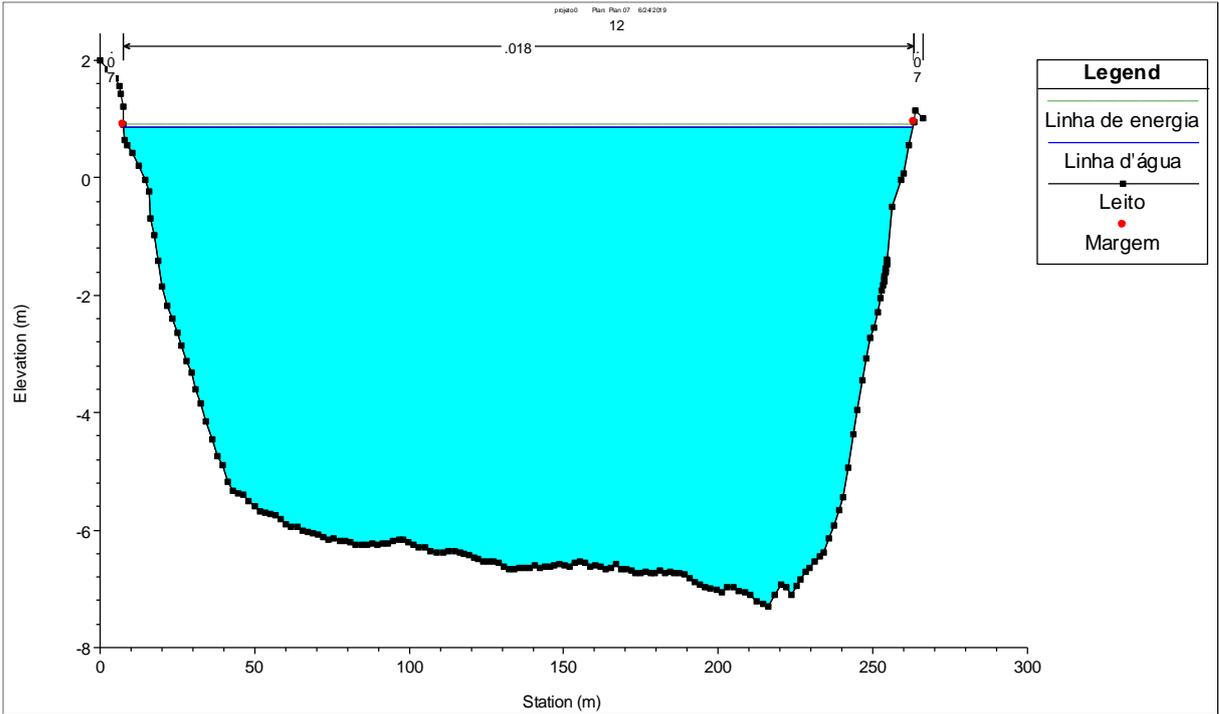
Seção 9



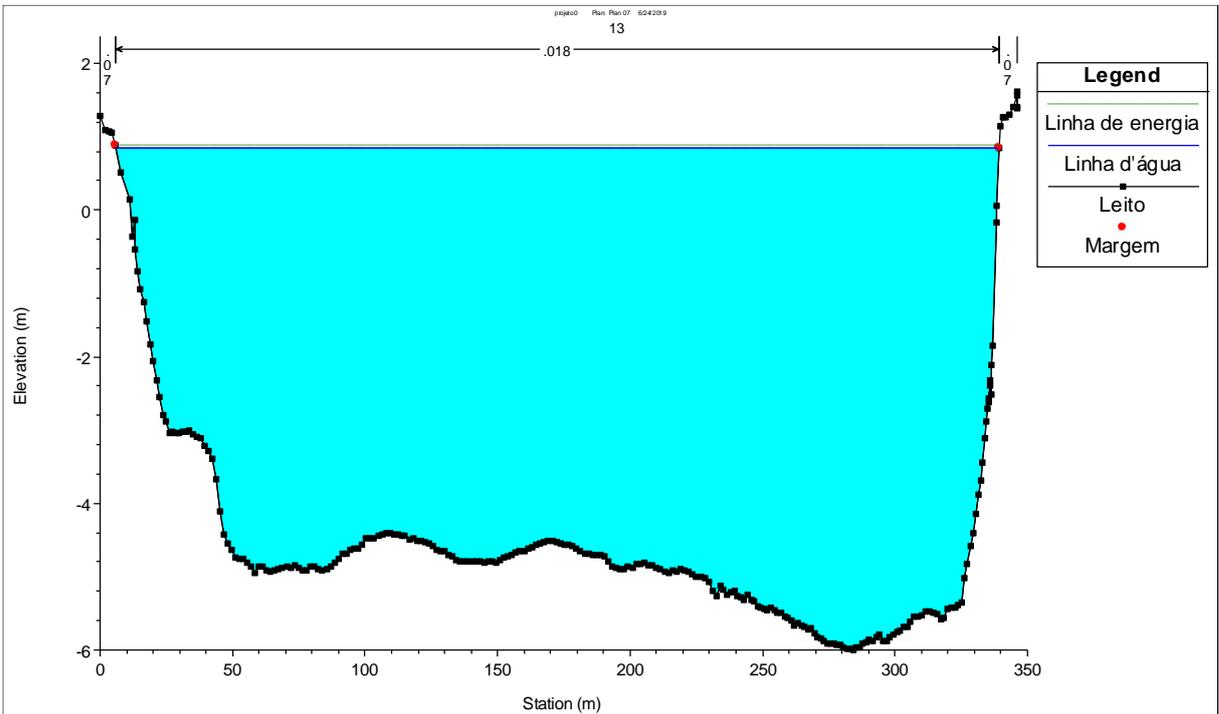
Seção 10



Seção 11



Seção 12



Seção 13