



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

MARINA REFATTI FAGUNDES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA A FIM DE
AUXILIAR NA DEFINIÇÃO DE UM CRITÉRIO PARA O
FECHAMENTO DA TRILHA DO RIO DO BOI**

Porto Alegre

Dezembro 2018

MARINA REFATTI FAGUNDES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA A FIM DE AUXILIAR
NA DEFINIÇÃO DE UM CRITÉRIO PARA O FECHAMENTO DA TRILHA DO RIO
DO BOI**

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE ENGENHEIRA AMBIENTAL.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan

Porto Alegre

Dezembro 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Fagundes, Marina Refatti
MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA A FIM DE
AUXILIAR NA DEFINIÇÃO DE UM CRITÉRIO PARA O FECHAMENTO
DA TRILHA DO RIO DO BOI / Marina Refatti Fagundes. --
2018.

98 f.

Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Coorientador: Maurício Andrades Paixão.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Modelo HEC-HMS. 2. Modelo hidrodinâmico. 3.
Índice de perigo. I. Mainardi Fan, Fernando, orient.
II. Andrades Paixão, Maurício, coorient. III. Título.

MARINA REFATTI FAGUNDES

MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA A FIM DE AUXILIAR NA
DEFINIÇÃO DE UM CRITÉRIO PARA O FECHAMENTO DA TRILHA DO RIO DO BOI

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **06/12/2018** pela Comissão avaliadora constituída por:

Banca Examinadora:

.....
Msc. Maurício Andrades Paixão - Coorientador

.....
Msc. Fernando Zambrano – Bolsista de Doutorado IPH - UFRGS

.....
Raíza Cristóvão Schuster – Divisão de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos

Conceito:.....

Dedico este trabalho a meus pais, Marilice e Luis, avós,
Maria e Lourdes, e avôs, Normando e Gervásio, que
sempre me apoiaram e especialmente durante o período do
meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais e à minha família, pelo incentivo, paciência e por me apoiarem nas decisões, valorizando sempre a busca pelo conhecimento.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Fernando Fan, pelos ensinamentos recebidos e por estar sempre presente e disposto a responder as minhas dúvidas, não importando o horário e o local.

Ao meu Coorientador, Maurício Paixão, pelo convite para trabalhar na área da modelagem, por me auxiliar em todo o desenvolvimento do trabalho e pela parceria de todos esses anos.

Às bolsistas de iniciação científica do GPDEN, Laís Mazzali e Isabela Zini, por me auxiliarem na obtenção dos dados, sendo sempre muito prestativas e atenciosas.

À banca examinadora, Fernando Zambrano, Maurício Paixão e Raíza Schuster. Obrigada por terem aceitado o convite e por terem contribuído com o desenvolvimento do presente trabalho.

Aos colegas de trabalho da Divisão de Planejamento e Gestão da Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, que muito me ensinaram ao longo desse ano, me auxiliando no desenvolvimento dos trabalhos, além do apoio e atenção dedicados.

À equipe do Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, local onde comecei a trabalhar com a pesquisa científica, principalmente ao Eduardo Barboza, a Gabriela Rockett e ao Eduardo Martins, que me acompanharam ao longo do período que estive lá.

Às companheiras de todo dia, Ana e Carol, por me acompanharem e me apoiarem nessa jornada. Obrigada pela paciência e pela amizade, além de me ajudarem a manter o foco nos estudos.

Aos meus amigos do coração, Lucas, Jéssica, Karine e Bruna, por estarem comigo durante a maior parte do curso da graduação, me dando apoio, sendo companheiros e por tornarem meus dias mais alegres.

Aos meus grandes amigos, entre eles, Ana Raquel, Bernardo, Bruno, Carol, Édina, Fabi, Gabriel, Luísa, Maria, Marina, Nicole, Priscila, Rodrigo, Rosi e Vitória. Obrigada por terem me acompanhado ao longo do desenvolvimento desse trabalho, por me darem o apoio necessário para enfrentar os desafios dessa jornada e por fazer meus dias mais divertidos.

À UFRGS e a todos os professores, por me darem a oportunidade de realizar o curso de graduação, pela infraestrutura e recursos fornecidos.

E a Deus por todas as oportunidades recebidas.

“Que a memória de nossos antepassados
ilumine nossa própria trajetória pela terra.”

Autor desconhecido.

RESUMO

FAGUNDES, M.R. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica a fim de auxiliar na definição de um critério para o fechamento da Trilha do Rio do Boi. 2018. 98p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

O crescimento acelerado das cidades e a vida caótica dos grandes centros urbanos fazem com que a procura pela prática de atividades em ambientes naturais seja cada vez maior. Normalmente, essas estão relacionadas à realização de trilhas, sendo que muitas vezes os trajetos percorridos se localizam próximos a corpos d'água. É nesse contexto que se insere a Trilha do Rio do Boi, objeto desse estudo. A trilha em questão se localiza no Parque Nacional Aparados da Serra e é aberta à visitação somente com acompanhamento de um guia. O trecho percorrido durante o passeio situa-se no interior do cânion Itaimbezinho e acompanha na maior parte do tempo o leito do Rio do Boi. Dependendo do nível em que o rio se encontra, não é possível realizar esse percurso, já que a força do fluxo de água pode arrastar as pessoas, ocasionando situações de perigo. Sendo assim, nos dias em que os valores do nível observado superam os estipulados como limites, ocorre o fechamento da trilha, não sendo possível a visitação. Atualmente, o critério para o fechamento da trilha utilizado pelo parque não considera quaisquer variáveis hidrometeorológicas que possam influenciar na variação das condições de escoamento do corpo hídrico. O sistema toma como base para a definição da abertura ou fechamento somente o nível medido por réguas instaladas nos dois principais trechos de drenagem da bacia. Se pelo menos um desses valores observados for superior a um determinado limiar estabelecido, a trilha é fechada. Do contrário, ela permanece aberta sendo liberada para realizar o passeio. Nesse sentido, o presente trabalho buscou auxiliar na definição de critérios para o fechamento da Trilha do Rio do Boi que levassem em consideração essas variações climáticas existentes. Para realizar essa análise, foram utilizados os dados da série histórica da estação meteorológica instalada na sede do parque e do sensor fluviométrico instalado no Arroio Perdizes que possuem elevada resolução temporal. Tomando como base essas e outras informações relativas às características físicas da bacia, foi desenvolvido, primeiramente, um modelo hidrológico que possibilitasse estimar as vazões ocorridas no Arroio Perdizes a partir dos eventos de precipitação observados. Dessa forma, o modelo foi desenvolvido no *software* HEC-HMS e passou por etapas de calibração e validação dos dados para que as variáveis determinadas com base nessas análises fossem o mais parecidas possível com as observadas. Após, os hidrogramas gerados pelo modelo chuva-vazão referentes ao Arroio Perdizes foram propagados para as seções de interesse localizadas no Rio do Boi, através do desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico no *software* HEC-RAS. Os resultados obtidos a partir dessa segunda modelagem, que são referentes à velocidade do fluxo de água e sua profundidade, permitiram determinar o índice de perigo aos quais os turistas estão sujeitos ao realizar a trilha. Tomando como base referências especializadas, foi estabelecido como limite para esse parâmetro o valor de 0,6 m²/s, que garante a segurança das pessoas no decorrer do percurso. Dessa forma, nos dias em que o valor do índice de perigo superou esse limiar, a trilha foi considerada como fechada pelo modelo. Por fim, os dados referentes à abertura ou fechamento da trilha obtidos a partir dos resultados dos modelos desenvolvidos foram comparados com os registros do parque através da metodologia ROC (*Relative Operative Characteristics*). Isso permitiu classificar o desempenho e a qualidade do modelo desenvolvido como satisfatórios.

Palavras-chave: Modelo HEC-HMS, modelo hidrodinâmico, índices de perigo.

ABSTRACT

The accelerated growth of cities and the chaotic life of large urban centers resulted in an increase in the demand for the practice of activities in natural environments. Usually, these are related to the realization of trails, where often the paths traveled are located near water. It's in this context that Trilha do Rio do Boi, the object of this study, is inserted. The trail in study is located in the Parque Nacional dos Aparados da Serra and is open to visitors only with the assistance of a guide. The section covered during the tour is located inside the Itaimbezinho canyon and accompanies most of the time the bed of the Rio do Boi. Depending on the level of the river, it is not possible to carry out this route, since the force of the water flow can drag people, causing dangerous situations. Thus, on days when the values of the observed level exceed those stipulated as limits, the trail closes and it is not possible to visit. Currently, the criterion for the closure of the trail used by the park does not consider any hydrometeorological variables that may influence the variation of the water body flow conditions. The system takes as a basis for the definition of opening or closing the track only the level measured by rules installed in the two main water bodies of the basin. If at least one of these observed values exceeds a set threshold, the track is closed. Instead, it remains open being released to take the tour. Thus, the present work sought to help define the criteria for the closure of the Trilha do Rio do Boi that take into account these existing climatic variations. In order to perform this analysis, data from the historical series of the meteorological station installed in the park was used along with the data from the fluvimetric sensor installed in the Arroio Perdizes that have high temporal resolution. Based on these information and other sources of data related to the physical characteristics of the basin, a hydrological model was first developed to estimate the flows in Arroio Perdizes due to the observed rainfall events. The model was developed in the HEC-HMS software and underwent calibration and validation of the data so that the variables determined based on these analyzes were as similar as possible to those observed. Afterwards, the hydrograms generated by the rain-flow model for Arroio Perdizes were propagated to the sections of interest located in the Rio do Boi, through the development of a hydrodynamic model in the HEC-RAS software. The results obtained from this second modeling, which are related to the water flow velocity and its depth, allowed to determine the index of danger to which the tourists are subject when they perform the trail. Based on specialized references, a limit of $0.6 \text{ m}^2/\text{s}$ was established as the limit for this parameter, which guarantees the safety of people during the path. Thus, on days when the hazard index value exceeded this threshold, the trail was considered to be closed by the model. Finally, the data related to the opening or closing of the trail obtained from the results of the developed models were compared with the park records through the ROC methodology (Relative Operative Characteristics). This allowed to classify the performance and the quality of the developed model as satisfactory.

Key words: HEC-HMS model, hydrodynamic model, hazard index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama representando os índices de perigo de inundação associados às diferentes profundidades e velocidades dos escoamentos.....	29
Figura 2 - Localização da área de estudo.	34
Figura 3 - Inserção da área da BH do Rio do Boi nos PNAS e PNSG.....	36
Figura 4 - Vegetação presente na Bacia Hidrográfica do Rio do Boi.	39
Figura 5 - Tipos de solos presentes na Bacia Hidrográfica do Rio do Boi.	40
Figura 6 - Régua de nível instalada no Arroio Perdizes.	43
Figura 7 - Estação meteorológica instalada.	44
Figura 8 - Sensor de nível instalado no Rio do Boi.	44
Figura 9 - Croqui da rede de monitoramento hidrometeorológico instalado no local.	44
Figura 10 - Localização do sensores do nível, das réguas e da seção meteorológica instalada.	45
Figura 11 - Fluxograma das etapas que foram realizadas no desenvolvimento do presente trabalho.....	47
Figura 12 - Curva-chave para o Arroio Perdizes.	54
Figura 13 - Informações contidas no <i>Twitter</i> do PNAS e PNSG.	61
Figura 14 - <i>Tweet</i> indicando o nível do Arroio Perdizes e do Rio do Boi e os limites máximos que esses corpos hídricos podem atingir para a trilha estar aberta.	61
Figura 15 - Tabela de contingência do método ROC.	62
Figura 16- Exemplo de diagrama ROC.....	63
Figura 17 - Tabela de contingência do método ROC, considerando que o método utilizado pelo parque objetiva atingir os resultados obtidos pelo modelo gerado.	65
Figura 18 - Divisão das sub-bacias utilizadas para a modelagem hidrológica.	67
Figura 19 - Representação das sub-bacias no modelo hidrológico HEC-HMS.....	68

Figura 20 - Hidrograma resultante da etapa de calibração do modelo com a série histórica completa. A linha azul representa o hidrograma gerado pelo modelo e a linha preta é relativa aos dados observados.	71
Figura 21 - Hidrogramas resultantes da calibração do modelo desconsiderando o evento de precipitação dos dias 23 e 24 de dezembro. As linhas pretas representam os dados observados e as linhas azuis representam os dados estimados pelo HEC-HMS.	73
Figura 22 - Hidrograma resultante da etapa de validação do modelo com a série histórica completa. A linha azul representa o hidrograma gerado pelo modelo e a linha preta é relativa aos dados observados.	75
Figura 23 - As linhas em laranja apresentam os locais onde foram determinadas as formas da seção transversal do Rio do Boi.	76
Figura 24 - Exemplo de seção transversal e perfil de velocidades do modelo desenvolvido. .	77
Figura 25 - Representação do escoamento em um trecho do Rio do Boi no software HEC-RAS.	78
Figura 26 - Exemplo de tabela apresentando os resultados do processamento do modelo.	78
Figura 27 - Os pontos amarelos representam o percurso da Trilha do Rio do Boi mapeada pela equipe do GPDEN e as linhas laranjas representam as seções transversais determinadas para a análise de propagação dos hidrogramas.	79
Figura 28 - Variação do índice de perigo ao longo do mês de janeiro referente à seção 2.	81
Figura 29 - Número de ocorrências em cada possível cenário no período analisado.	82
Figura 30 - Diferença nos tempos de recessão dos hidrogramas gerado (linhas azuis) e observado (linhas pretas).	83
Figura 31 - A linha preta representa o hidrograma observado e a linha azul o desenvolvido.	83
Figura 32 - Exemplo de situação em que o hidrograma gerado é maior do que o observado, ocasionando o fechamento da trilha sem haver necessidade.	84
Figura 33 - Diagrama ROC representando o desempenho do modelo gerado.	85
Figura 34 – Número de ocorrências em cada cenário considerando a tabela de contingência apresentada na Figura 17.	86

Figura 35 - Desempenho do método utilizado pelo parque como critério de fechamento, considerando que o modelo calibrado é o que se objetiva atingir.86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação do perigo conforme características da pessoa.	31
Quadro 2 - Faixa de valores utilizados para o coeficiente de Manning em canais naturais.	57
Quadro 3 - Classificação do IP.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das sub-bacias.	67
Tabela 2 - Parâmetros referentes às sub-bacias em análise otimizados pelo modelo.....	69
Tabela 3 - Valores mensais da vazão de base considerados para cada sub-bacia ao calibrar o modelo.	70
Tabela 4 - Parâmetros referentes às sub-bacias em análise otimizados pelo modelo, após a remoção dos dados de precipitação dos dias 23 e 24 de dezembro.	72
Tabela 5 - Dados analisados para verificar a eficiência dos modelos gerados.....	73
Tabela 6 - Vazão de base para os meses do ano considerados na validação do modelo.	74
Tabela 7 - Dados analisados para verificar a eficiência do modelo validado.....	74
Tabela 8 - Tabela resumo dos dados relativos à análise do fechamento da trilha a partir dos dados do índice de perigo.	80

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CN	<i>Curve Number</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GPDEN	Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais
GPS	Global Positioning System
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center – River Analysis System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IP	Índice de Perigo
LABGEO	Laboratório de Geoprocessamento
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PNAS	Parque Nacional dos Aparados da Serra
PNSG	Parque Nacional da Serra Geral
POD	<i>Probability of Detection</i>
POFD	<i>Probability of False Detection</i>
ROC	<i>Relative Operative Characteristics</i>
S2iD	Sistema Integrado de Informações sobre Desastres
SCS-CN	<i>Soil Conservation Service – Curve Number</i>
SIBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIGSC	Sistema de Informação Geográfica de Santa Catarina
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UC	Unidade de Conservação
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNDP	<i>United Nations Development Programme</i>
VANTs	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
2.1. OBJETIVOS GERAIS	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. MODELAGEM HIDROLÓGICA	20
3.1.1. Classificação dos modelos	21
3.1.2. Modelos precipitação-vazão	22
3.2. MODELAGEM HIDRODINÂMICA	23
3.3. SISTEMAS DE MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO	25
3.4. ÍNDICES DE PERIGO	28
3.5. ESTUDOS INTEGRADOS	31
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	34
4.1. APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	34
4.1.1. Vegetação	37
4.1.2. Pedologia	39
4.1.3. Sistema de monitoramento existente	42
5. METODOLOGIA	46
5.1. MODELAGEM HIDROLÓGICA	47
5.1.1. Dados de entrada	48
5.1.2. Inserção e métodos para o processamento dos dados HEC-HMS	49
5.1.3. Calibração do modelo	53
5.1.4. Validação do modelo	55
5.2. MODELAGEM HIDRODINÂMICA	55

5.3. ÍNDICES DE PERIGO	59
5.4. QUALIDADE E DESEMPENHO DO MODELO DESENVOLVIDO	60
6. RESULTADOS	66
6.1. DEFINIÇÃO DAS SUB-BACIAS E SUAS CARACTERÍSTICAS	66
6.2. MODELO HEC-HMS	68
6.3. MODELO HIDRODINÂMICO E ÍNDICES DE PERIGO	75
6.4. DIAGRAMA ROC	81
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	87
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento das cidades e a transformação do espaço urbano, que acontece principalmente através da supressão de áreas verdes para a construção de prédios e outras propriedades, juntamente com a vida caótica nos grandes centros, faz com que cada vez mais as pessoas busquem realizar atividades em ambientes naturais para conviver com a natureza (Endres, 1998). Nesse sentido, o ecoturismo ganhou força nos últimos anos, sendo uma forma de contato da população com o meio ambiente.

A prática desse tipo de atividade normalmente está relacionada à realização de trilhas em ambientes que ainda se mantêm preservados e que possuam elevada beleza do ponto de vista paisagístico. Entretanto, como a natureza é um sistema dinâmico e que está em constante processo de transformação, existem riscos associados à prática do turismo em ambientes naturais. Para chegar aos locais onde se deseja visitar, muitas vezes é necessário percorrer trechos que possuem elevado grau de dificuldade para sua realização, devido à presença de declives acentuados, de terrenos irregulares, entre outros fatores (Cotes *et al.*, 2007).

Além disso, é muito comum que os trajetos realizados estejam associados a algum curso de água, seja localizando-se ao longo de um rio ou arroio, seja cruzando seu leito. Isso também gera riscos à segurança dos turistas que realizam o trajeto proposto, pois, dependendo das características do escoamento do corpo hídrico no momento da realização da trilha, as pessoas podem vir a ser arrastadas pela força do fluxo de água.

É nesse contexto que se insere a Trilha do Rio do Boi, que fica localizada entre os municípios de Cambará do Sul (RS) e Praia Grande (SC), sendo muito procurada pelos turistas de todo o Brasil por possuir uma beleza extraordinária. O trajeto proposto por esse passeio é realizado na parte interior do cânion Itaimbezinho e acompanha o leito do Rio do Boi, chegando muitas vezes a cruzá-lo. Por fazer parte de uma bacia hidrográfica relativamente pequena, a resposta a eventos de precipitação ocorridos nas cabeceiras dos afluentes do rio são rapidamente sentidas, ocasionando à elevação do nível desse trecho de drenagem. Esse fato pode acabar impossibilitando a realização da trilha, já que impede os cruzamentos do leito do rio pelos turistas.

Levando em consideração que a trilha está localizada no interior do cânion, somente há uma entrada e uma saída, sendo assim, caso o nível do Rio do Boi se altere durante a realização do trajeto, os turistas podem acabar ficando “ilhados” por não conseguirem mais

cruzar o leito do rio em segurança. Por esse motivo, antes de realizar o trajeto proposto deve ser verificado se o nível do rio permite que o passeio seja executado. Atualmente, isso é feito através da análise do nível de uma régua instalada em um dos afluentes do Rio do Boi, mas sem considerar quaisquer variáveis climáticas que possam influenciar nos resultados.

Pesquisas vêm sendo realizadas nessa área a fim de aprimorar o sistema empregado para determinar um critério para o fechamento da trilha tomando como base o uso de parâmetros hidrometeorológicos. Como exemplo, pode ser citado o estudo de Bins (2017) que utilizou dados diários das estações meteorológicas do INMET a fim de relacionar a precipitação ocorrida com nível registrado no rio. Os resultados obtidos por esse autor demonstraram que o tempo de reação dessa bacia é bem inferior a 24 horas, sendo então necessária a utilização dados de séries históricas com maior resolução temporal para obter maior precisão nas análises.

Nesse sentido, o presente trabalho busca aprimorar os modelos desenvolvidos através do uso de dados com elevada resolução temporal que permita estudar mais afundo as variáveis hidrometeorológicas da bacia hidrográfica do Rio do Boi. Para isso, modelos hidrológicos e hidrodinâmicos foram utilizados a fim de transformar os dados pluviométricos em vazão e propagá-los ao longo do leito do rio.

Essa análise é importante, pois possibilita avaliar os índices de perigo aos quais as pessoas estão sujeitas ao realizar o trajeto proposto. Sendo assim, a adoção de um critério para o fechamento da trilha que considere as variações climáticas do local e que vise garantir a segurança, minimiza a probabilidade da ocorrência de acidentes e outras situações indesejadas.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

O trabalho tem como objetivo auxiliar na definição de critérios para o fechamento da Trilha do Rio do Boi a partir da obtenção de novos dados meteorológicos e do aperfeiçoamento dos modelos hidrológicos já existentes.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

*Aplicação de um modelo hidrológico, tendo como base os dados meteorológicos obtidos a partir das estações pluviométricas e fluviométricas instaladas no Arroio Perdizes e no Rio do Boi.

*Utilização de um modelo hidrodinâmico a fim de determinar o perfil de velocidades e a profundidade do escoamento no trecho do Rio do Boi onde ocorre a passagem dos turistas.

*Definição dos índices de perigo como critério para o fechamento da trilha do Rio do Boi.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MODELAGEM HIDROLÓGICA

Os modelos hidrológicos se caracterizam por serem representações matemáticas do comportamento dos sistemas hídricos ao longo de um período de tempo (FAN *et al.*, 2014). Eles permitem simular as variações temporais dos fenômenos naturais e avaliar diferentes combinações de acontecimentos, consistindo assim em uma das principais ferramentas para a gestão dos recursos hídricos (Viola *et al.*, 2009).

Segundo Tucci (2005), o modelo hidrológico é um instrumento que permite entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições futuras diferentes das observadas. Nos últimos tempos, vários modelos com características distintas vêm sendo desenvolvidos de acordo com os objetivos que se deseja alcançar, sendo que essas simulações são limitadas pela heterogeneidade física da bacia e dos fenômenos naturais envolvidos.

Marinho Filho *et al.* (2012) afirmam que o uso da modelagem hidrológica tem apresentado resultados positivos, tanto para a previsão de cenários hipotéticos para a avaliar os impactos resultantes das modificações dos ambientes naturais, quanto como ferramenta de elaboração de projetos.

Como os modelos hidrológicos desenvolvidos são aproximações da realidade, é necessário que haja o monitoramento das variáveis ambientais para que os dados de saída sejam os melhores possíveis (Kobiyama *et al.*, 1999). Nesse sentido, quanto melhor for a qualidade dos dados de entrada, melhor será a qualidade do modelo. Para isso, é necessário que existam séries hidrometeorológicas de elevada qualidade, com poucas falhas e vários anos de dados. Além dessas informações, outros parâmetros são essenciais ao desenvolver modelos hidrológicos como, por exemplo, a capacidade de infiltração de água no solo e a declividade da bacia hidrográfica.

Recentemente, os modelos hidrológicos tem se desenvolvido em duas principais vertentes: uma para grandes bacias, que analisa a distribuição de parâmetros para áreas de grandes extensões de forma empírica, e outro para pequenas bacias, que procuram representar com maior precisão os processos hidrológicos (Tucci, 2005).

3.1.1. Classificação dos modelos

Existem diversas maneiras de classificar os modelos hidrológicos. Normalmente, elas variam de acordo com os tipos dos parâmetros e das variáveis que são utilizadas como dados de entrada. Nesse sentido, é proveitoso conhecer os critérios de classificação a fim de entender quais são as qualidades e limitações do uso de cada uma delas (Schuster, 2014).

Os modelos podem ser classificados de acordo com a variabilidade espacial em concentrados ou distribuídos. No primeiro caso não é levada em consideração a variação dos parâmetros no espaço, ou seja, são aplicados valores médios a toda a bacia em estudo (Marinho Filho *et al.*, 2013). Já nos modelos distribuídos, os valores dos parâmetros e das variáveis dependem do tempo e do espaço, sendo assim possível dividir a bacia em partes menores a fim de caracterizá-la (Schuster, 2014).

Quando considerada a forma de representação das informações, os modelos podem ser divididos em contínuos ou discretos. Modelos contínuos representam fenômenos que são incessantes no tempo, entretanto os registros utilizados para a realização da modelagem são sempre discretos. Normalmente, buscam representar períodos mais longos de tempo, abrangendo todas as fases do ciclo hidrológico. Já os modelos discretos são aqueles que buscam representar eventos isolados da série como, por exemplo, um único evento de precipitação (Marinho *et al.*, 2013; Macedo, 2010).

Também, podem-se dividir os modelos de acordo com o tipo de relação que é feita entre as variáveis. Nesse sentido, os modelos empíricos são aqueles que ajustam os valores calculados aos dados que são observados em campo por meio de equações que não possuem relação com os processos físicos envolvidos (Schuster, 2014). Por esse motivo, são denominados como “caixa-preta”. Os modelos conceituais por outro lado, levam em conta os fenômenos físicos envolvidos nos processos hidrológicos (Santos, 2009).

Os modelos também podem ser classificados de acordo com a sua variabilidade temporal. Nesse caso eles podem ser estacionários, quando não há variação no tempo, ou dinâmicos, quando as variáveis e os parâmetros se alteram no decorrer do tempo.

Por fim, os modelos podem ser divididos com relação ao tipo de variáveis de entrada que são empregadas ao executar a modelagem. Modelos estocásticos são aqueles que levam em consideração a probabilidade de ocorrência dos eventos, resultando assim em saídas aleatórias para as mesmas entradas (Schuster, 2014). Já nos modelos determinísticos a

probabilidade de ocorrência dos eventos é negligenciada, ou seja, para um conjunto de dados de entrada o modelo produz um mesmo conjunto de dados de saída.

3.1.2. Modelos precipitação-vazão

No processo de gerenciamento dos recursos hídricos, existe um grande número de alternativas que podem ser levadas em consideração. Sendo assim, a metodologia utilizada nesse planejamento deve ser aquela que permita quantificar os processos da melhor maneira possível e auxilie na tomada de decisão. Nesse contexto, existem diversos modelos que podem ser utilizados para esse fim. Um deles são os modelos precipitação-vazão que permitem avaliar o comportamento da resposta de um sistema sujeito a diferentes entradas como, por exemplo, a avaliação do uso do solo em uma bacia hidrográfica (Tucci, 2005).

Em geral, esses modelos têm como finalidade representar a parte do ciclo hidrológico que está entre a precipitação e a vazão, ou seja, a transformação da precipitação em escoamento e a propagação deste na bacia hidrográfica. Foram desenvolvidos a partir da necessidade de se obterem séries históricas mais longas e representativas de vazão para um corpo hídrico. Como a precipitação é uma variável que pode ser mais facilmente medida e normalmente possui séries mais compridas, é possível estimar as vazões desconhecidas a partir desses dados (Tucci, 2005; Fan *et al.*, 2014).

Segundo Freitas *et al.* (1990), uma das principais limitações dos modelos chuva-vazão é devido à dificuldade de inferir como ocorrem os processos de infiltração e percolação de água no solo. A grande variabilidade espacial e temporal dos parâmetros necessários à realização da modelagem e as características heterogêneas das bacias hidrográficas também dificultam a realização desse tipo de análise (Fan *et al.*, 2014; Oliveira, 2003).

Os modelos precipitação-vazão podem ser classificados em dois tipos: em contínuo ou por evento. No primeiro caso são analisados os fenômenos e os processos hidrológicos em uma escala de tempo maior, considerando períodos secos e úmidos. Já no segundo caso o objetivo é determinar a resposta da bacia a um evento de precipitação específico (Chu, 2009).

Uma das ferramentas comumente utilizada para realizar a modelagem hidrológica é o HEC-HMS da *US Army Corps of Engineers*. Esse programa permite construir modelos chuva-vazão em bacias hidrográficas gerando hidrogramas e informações sobre o volume de deflúvio, vazão de pico e tempo de escoamento (USACE-HEC, 2016). A partir desses

hidrogramas de saída é possível inferir qual será a resposta de um rio a determinado evento de precipitação, com intensidade e frequência conhecidas.

O uso conjunto do HEC-HMS com *softwares* de SIG permite obter com maior precisão e facilidade os valores de determinados parâmetros necessários à realização dos modelos, como, por exemplo, o comprimento do rio principal e a área da bacia (Macedo, 2010). Estudos anteriores como o de Knebl *et al.* (2005), na bacia de Santo Antônio (EUA), mostram que os resultados obtidos a partir dessa metodologia apresentam boa precisão e diversas aplicações.

Por fim, um das principais aplicações desse tipo de modelo hidrológico é a possibilidade de prever as vazões que irão ocorrer em decorrência de determinado evento de precipitação. Isso é importante no controle de cheias, permitindo realizar a previsão em tempo atual considerando os cenários de uso da bacia (Tucci, 2005).

3.2. MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A hidrodinâmica é a parte da física que se encarrega do estudo do movimento dos fluidos incompressíveis, em especial da água, de suas interações com os meios físicos e de suas propriedades químicas (Zambrano, 2017). Também, trata da resistência que os mesmos exercem sobre os corpos quando estão em movimento em relação a eles.

A modelagem hidrodinâmica permite representar o comportamento dos escoamentos, tanto para canais naturais quanto para canais artificiais, com relação aos campos de velocidades e os níveis da água presentes nos trechos em análise. Diferentemente da modelagem hidrológica, que considera o comportamento mais geral da água dentro do ciclo hidrológico, a hidrodinâmica se concentra em situações mais pontuais no espaço e no tempo do movimento desse fluido (Monteiro *et al.*, 2015). Uma das principais vantagens do uso desse método é que ele permite prever cenários futuros, com a realização de prognósticos, e de analisar condições ambientais extremas.

Nesse contexto, a utilização desse tipo de modelo permite mapear as zonas de inundação a partir de dados de eventos conhecidos, o que é importante para o planejamento do uso do solo e para a gestão dos recursos hídricos (Yang *et al.*, 2004). Também, através do uso de modelos hidrodinâmicos, é possível simular as consequências de alterações realizadas

nos sistemas hídricos e os efeitos no escoamento à jusante, entender como ocorre a propagação da vazão ao longo dos trechos dos rios, fazer estimativas da qualidade das águas e transporte de sedimentos ao longo das calhas fluviais.

Na modelagem hidrodinâmica o escoamento fluvial pode ser considerado como permanente ou não permanente. No primeiro caso, não ocorrem variações temporais significativas. Pode-se então trabalhar com a Equação de Bernoulli e a conservação da energia de um ponto a outro (Zambrano, 2017). Já no segundo, que é o mais comumente encontrado na natureza, ocorre a variação no tempo e no espaço das variáveis do escoamento em um rio ou canal. Nesses casos, deve-se trabalhar com equações que considerem a variação temporal dos escoamentos, como é o caso da Equação de Saint-Venant (Paiva, 2009; Monteiro, 2015).

Normalmente, essas equações são resolvidas através de métodos numéricos que permitem discretizar os corpos hídricos em seções, possibilitando assim representar melhor a variabilidade das características desses sistemas. Na hidrodinâmica um dos métodos mais utilizados é o das diferenças finitas, que possibilita propagar as perturbações ocorridas à montante ao longo do comprimento do rio (Tucci, 2005; Monteiro, 2015).

Para a realização desse tipo de modelagem, alguns parâmetros de entrada são essenciais. Entre eles destacam-se as áreas das seções transversais em estudo, o comprimento do rio, os dados das vazões e as condições de contorno. Como parâmetro de entrada de importância chave no sistema está a rugosidade do canal, que não é um parâmetro constante ao longo da calha do rio e possui elevada sensibilidade no desenvolvimento dos modelos (Timbadiya *et al.*, 2011).

Um dos programas mais utilizados para realizar essa modelagem foi desenvolvido pela *US Army Corps of Engineers* e é denominado HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*). Ele se baseia na resolução das Equações de Saint-Venant por diferenças finitas para fluxo em uma direção em canais naturais abertos, podendo ser considerados escoamentos permanentes ou não (Fernandez *et al.*, 2013).

Horrit *et al.* (2002) avaliaram, entre outros modelos, a capacidade do HEC-RAS de fazer previsões das áreas inundadas a partir da calibração com dados de eventos de diferentes magnitudes e concluíram que esse modelo possui respostas coerentes com as esperadas. Outros estudos, como os de Yang *et al.* (2005) tentaram aprimorar as técnicas de mapeamento das zonas de inundação através da integração do HEC-RAS com *softwares* de SIG e também teve bons resultados. Como uma das principais limitações do uso desse modelo

hidrodinâmico tem-se seu caráter unidimensional, que não é o mais adequado nas situações em que há grandes irregularidades nas seções transversais das linhas de água (Fernandez *et al.*, 2013).

Por fim, Hicks *et al.* (2005) afirma que a maior parte das previsões de cheias em rios são realizadas em duas etapas. Primeiramente se determinam as rotas de inundação e os respectivos hidrogramas esperados utilizando modelos hidrológicos. Após, os picos de inundação são então convertidos em previsões de nível ao longo dos trechos do rio usando modelos hidráulicos de fluxo constante, tais como, HEC-RAS. Por esse motivo, percebe-se que a utilização conjunta de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos são metodologias complementares e permitem estimar com maior precisão e detalhes como ocorrem os fenômenos hidrológicos.

3.3. SISTEMAS DE MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO

Como citado anteriormente, as modelagens hidrológica e hidrodinâmica dependem altamente da qualidade dos dados de entrada que são utilizados. Não existem bons modelos se não houver o monitoramento dos fenômenos naturais que represente de forma coerente o que ocorre na realidade. De acordo com Marinho Filho *et al.* (2013), quanto mais detalhado for o modelo que se quer projetar, maior será a exigência dos dados de entrada.

Nesse sentido, as redes de monitoramento hidrometeorológico permitem coletar dados com a finalidade de criar uma base que possibilite realizar esse tipo de análise (Blainski *et al.*, 2012). Nessas redes normalmente são medidos os seguintes parâmetros: temperatura, umidade, radiação, vento, precipitação e nível dos rios. Através do monitoramento é possível detectar alterações e tendências que o regime hidrológico de uma determinada região possui, podendo assim ter uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos (Dias, 2014).

As estações hidrometeorológicas onde são coletados os dados podem ser de três tipos: convencionais, automáticas e telemétricas. As estações convencionais são aquelas em que há a necessidade de um observador ir coletar os dados registrados pelos sensores a cada certo intervalo de tempo. Já as estações automáticas coletam os dados continuamente e esses ficam salvos em uma unidade de memória central (*data logger*), sendo depois necessário um técnico ir coletá-los (INMET, 2018). Por fim, as estações telemétricas medem os parâmetros

meteorológicos e os enviam em tempo real às centrais responsáveis pelo gerenciamento dos recursos hídricos.

Segundo Clarke *et al.* (2003), os principais usos dos dados coletados são: a previsão das vazões nos rios e nos reservatórios, análise do impacto das alterações dos sistemas naturais e a estimativa da ocorrência de eventos extremos. Nesse sentido, Oliveira (2003) afirma que o monitoramento e o acompanhamento dos dados meteorológicos em tempo real é fundamental para a previsão de vazões. A mesma autora afirma que uma das limitações dos modelos hidrológicos é a disponibilidade dos dados, tanto em quantidade, pois várias séries apresentam falhas, quanto em qualidade, pois muitas vezes os dados são mal medidos ou mal observados.

Um dos motivos pelos quais é complicado encontrar séries longas e sem falhas para determinadas regiões é que no passado a instalação de redes de monitoramento era uma tarefa onerosa. Com o passar dos anos, a quantidade e a variedade de equipamentos disponíveis no mercado aumentaram, reduzindo os custos de compra e instalação dos mesmos. Hoje em dia, com os avanços das telecomunicações, é possível monitorar os fenômenos naturais em tempo real (Blainski *et al.*, 2012).

Entretanto, mesmo que a situação tenha melhorado nos últimos anos, a instalação de uma estação ainda exige grandes esforços como os de manutenção. Além disso, é importante salientar que além de haverem os sistemas de monitoramento hidrometeorológico instalados, é necessário que haja um controle da qualidade, acurácia e divulgação dos dados para a comunidade por parte dos órgãos responsáveis (Clarke *et al.*, 2003). Por esses motivos, não é possível ampliar a rede de monitoramento em todos os locais em que é necessário. Como os fenômenos que se deseja observar variam no tempo e no espaço, a instalação de estações requer a busca por uma solução ótima na distribuição e no número de estações a serem instaladas de modo a abranger toda a área que se quer monitorar (Dias *et al.*, 2014).

No Brasil, as principais instituições responsáveis pelo monitoramento dos fenômenos hidrológicos/meteorológicos são a Agência Nacional de Águas (ANA), o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Além dessas, existem outras estações hidrométricas administradas por entes federais, estaduais, setoriais e particulares (CPRM, 2018).

Nesse contexto, a ANA é o ente nacional vinculado ao Ministério do Meio Ambiente que tem por objetivos, além de planejar e regular os usos das águas, monitorar os recursos

hídricos. Os principais parâmetros monitorados por essa instituição são a precipitação, o nível, a vazão, os sedimentos e qualidade das águas dos rios. Atualmente sua rede compreende mais de 4000 estações espalhadas pelo Brasil, com medições horárias dos dados. As séries históricas estão disponíveis para a população e são disponibilizadas através do *Portal Hidroweb* (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>).

Desde 2009, a ANA vem também monitorando e analisando os eventos de chuva, os níveis e as vazões dos principais rios, bacias hidrográficas e reservatórios a partir das Salas de Situação. Esse sistema é composto por diversas estações telemétricas e permite que boletins diários, semanais e mensais sejam analisados e enviados a defesa civil. Isso tem por objetivo identificar previamente a ocorrência de eventos extremos emitindo alertas a fim de minimizar os efeitos adversos dessas situações (Sala de Situação, 2018; ANA, 2018).

Já o CPTEC atua com a finalidade de fornecer previsões do tempo de curto e médio prazos e climáticas com elevada precisão visando o benefício da sociedade. As informações que alimentam o sistema vem dos satélites Meteosat e Goes, da rede de dados da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e das redes nacionais sob responsabilidade do INMET. Em alguns locais, como no Vale do Paraíba, o CPTEC também fornece informações de dados de precipitação acumulada nas últimas 24 e 72 horas a fim de verificar se aquele local está em situação crítica, auxiliando assim as atividades da defesa civil (INPE, 2010).

Por fim, o INMET tem como objetivos de monitorar, analisar e realizar a previsão do tempo e do clima. Possui uma rede de monitoramento composta por estações convencionais e automáticas totalizando mais de 400 estações. É uma de suas atribuições emitir avisos e boletins meteorológicos especiais, que são separados nas categorias de perigo potencial, perigo e grande perigo para vários fenômenos naturais, entre eles, de chuvas intensas, estiagens e chuva acumulada. Além disso, através de métodos numéricos são realizadas previsões do tempo com um horizonte de 24, 48, 72 e 96 horas à frente (INMET, 2018).

Esse monitoramento contínuo e com boa resolução temporal é de suma importância para o estudo dos fenômenos naturais. Ele auxilia principalmente na previsão dos parâmetros de interesse com base em dados históricos e assim permite simular cenários futuros. A análise das tendências possibilita preparar a sociedade aos potenciais efeitos danosos que os condicionantes climáticos podem causar, como, por exemplo, a ocorrência de inundações e enxurradas (Tucci, 2005).

3.4. ÍNDICES DE PERIGO

Segundo Kobiyama *et al.* (2006) os termos perigo e risco normalmente são utilizados de forma incorreta como sinônimos. Situações de perigo se referem àquelas em que há a ameaça à integridade ou existência de uma pessoa, animal ou objeto. No caso em que se analisam os fenômenos que ocorrem na natureza, o perigo se refere aos eventos que podem vir a causar danos em suas áreas de influência. Exemplos desses tipos de situações são a ocorrência de inundações e deslizamentos (Goerl *et al.*, 2012).

Já os riscos se referem às situações em que há a probabilidade de ocorrerem consequências negativas e/ou perdas ambientais, econômicas ou sociais em decorrência da interação entre os perigos naturais e a sociedade (UNDP, 2004). Chen *et al.* (2004) consideram que o risco de um determinado sistema pode ser visto como uma função do perigo, da vulnerabilidade e da exposição. Sendo assim, o risco existente em decorrência de um evento de inundação em uma área, por exemplo, é aquele capaz de causar danos às propriedades das pessoas que ali vivem.

Nesse contexto, as inundações são o tipo de desastre natural que mais afetam a população, deixando milhares de desabrigados o todos os anos (Moore, 2005). Segundo dados disponibilizados pelo EM-DAT, apesar de não ser o tipo de desastre mais frequente, estando atrás das estiagens e das secas, as inundações são os que causam mais prejuízos e mortes. De acordo com informações históricas do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD), no período compreendido entre 2010 e 2016 foram registrados 769 eventos de enxurradas, enchentes e inundações somente no Rio Grande do Sul.

A fim de tentar reduzir os impactos decorrentes desses eventos, podem ser adotadas medidas estruturais e/ou não estruturais. As medidas estruturais são aquelas que envolvem obras de engenharia como, por exemplo, a construção de barragens ou diques de contenção. Esse tipo de medida nem sempre evita que o desastre ocorra e, normalmente, possuem um custo bem mais elevado. Já as medidas não estruturais são aquelas em que há o planejamento prévio do sistema com a finalidade de prevenir que os desastres venham a ocorrer. Exemplos são os sistemas de alerta e mapeamento das áreas de risco (Goerl *et al.*, 2012; Zambrano, 2017).

Independentemente das medidas a serem adotadas na prevenção dos desastres naturais, a primeira etapa consiste na identificação do perigo, seguida do risco de ocorrência (Monteiro,

2011). Nesse sentido, Stephenson (2002) propôs uma metodologia para a determinação dos perigos associados aos fluxos de água, que varia de acordo com a profundidade do rio e a velocidade do escoamento, podendo ser expressa conforme a Equação 1.

$$IP = h * v \quad (1)$$

Onde:

IP é o índice de perigo (m^2/s)

h é a profundidade da lâmina de água em metros

v é a velocidade do escoamento em m/s

Sendo assim, o índice de perigo apresentado por Stephenson (2002) está diretamente relacionado à energia do escoamento, ou seja, ao seu potencial destrutivo, e é expresso pela vazão unitária do fluxo de água (Monteiro *et al.*, 2015).

De acordo com essa equação, se o rio for profundo e a velocidade da correnteza for elevada, o escoamento poderá vir a causar danos às estruturas e às propriedades. No caso de haverem pessoas desabrigadas, essas também poderão ser carregadas pela força do fluxo de água. Conforme a velocidade do fluxo for reduzindo e, conseqüentemente, a profundidade for baixando, o fluxo de água torna-se mais seguro, causando assim menos estragos (Stephenson, 2002). A Figura 1 apresenta o diagrama do Índice de Perigo proposto por esse autor.

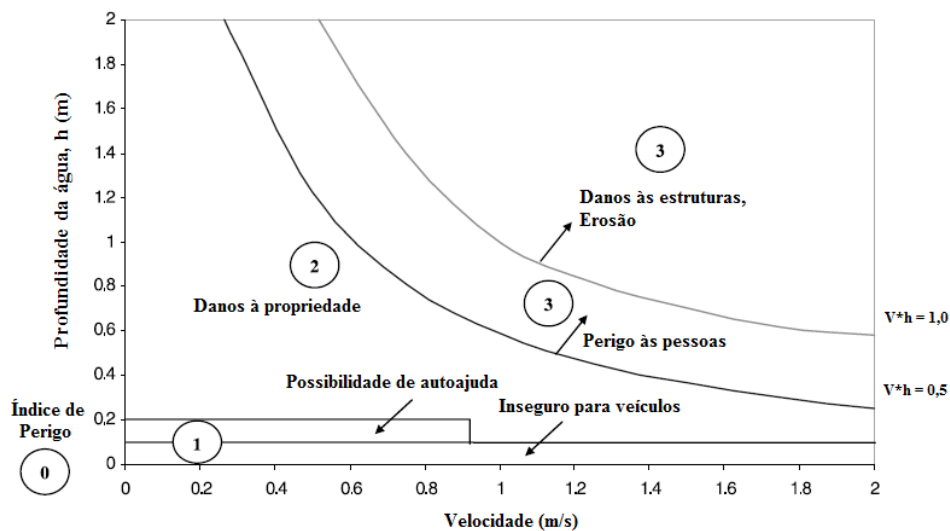


Figura 1 - Diagrama representando os índices de perigo de inundação associados às diferentes profundidades e velocidades dos escoamentos.

FONTE: Adaptado de Stephenson (2002).

No estudo de Stephenson (2002) o índice de perigo foi utilizado em conjunto com a probabilidade de ocorrência dos eventos com o objetivo de verificar as possibilidades de desenvolvimento nas margens do Rio Vaal na África do Sul. Nele o nível do índice de perigo tolerado seria determinado conforme a escolha das autoridades responsáveis, podendo ser tomadas diferentes decisões com base nos valores humanos, legais e econômicos que se desejasse preservar.

Zambrano (2017) também usou esse índice juntamente com a frequência de inundação em termos do período de retorno a fim de realizar o mapeamento do perigo de inundação para a bacia do Arroio Forromeco no Rio Grande do Sul. Esse local tem um histórico de ocorrência de inundações bruscas e assim um mapa de perigo auxilia na determinação das zonas que apresentam maior probabilidade de sofrerem com esses eventos e, conseqüentemente, no planejamento urbano da cidade.

Além dessas utilizações mais ligadas ao desenvolvimento urbano das cidades, esse índice também pode ser usado para determinar os perigos aos quais as pessoas expostas aos escoamentos estão sujeitas durante eventos de inundações. Nesse contexto, foram desenvolvidas nas últimas décadas, diversas pesquisas em laboratório considerando diferentes regimes de escoamentos, a fim de determinar os valores limites de velocidade e profundidade que as pessoas são capazes de suportar (Cox *et al.*, 2010).

Cox *et al.* (2010) evidencia que comparando os dados dos diferentes experimentos realizados são verificadas diferenças significativas entre os limites estabelecidos. Como o perigo a que uma pessoa está exposta depende muito de sua capacidade de suportar o fluxo de água e isso está relacionado em parte ao seu peso e sua altura, esse autor propôs uma separação que pudesse ser aplicada de forma geral a toda população. Isso resultou em três categorias: uma para adultos, uma para crianças e uma para crianças muito pequenas, idosos e outras pessoas frágeis. Pessoas que se encaixem nessa última categoria são consideradas em perigo em qualquer situação de escoamento. O Quadro 1 apresenta os resultados obtidos por esse autor.

Quadro 1 - Classificação do perigo conforme características da pessoa.

hv (m ² /s)	Crianças pequenas (H.M.* ≤ 25 mkg) e pessoas idosas	Crianças (H.M.* entre 25 e 50 mkg)	Adultos (H.M.* ≥ 50 mkg)
0	Seguro	Seguro	Seguro
0 - 0.4	Perigo extremo; Perigoso para todos	Perigo baixo	Perigo baixo
0.4 - 0.6		Perigo significativo; perigoso para a maioria	
0.6 - 0.8		Perigo extremo; perigoso para todos	Perigo moderado; perigoso para alguns
0.8 - 1.2			Perigo significativo; perigoso para a maioria
> 1.2			Perigo extremo; perigoso para todos
*H.M. é o produto da altura (<i>height</i>) pela massa (<i>mass</i>) da pessoa.			

FONTE: Adaptado de Cox et al. (2010).

Por fim, pode haver também instabilidade gerada devido a outros fatores além dos considerados acima, como, por exemplo, a presença de objetos flutuantes no fluxo de água, a presença de ventos fortes e superfícies escorregadias (Cox et al., 2010).

3.5. ESTUDOS INTEGRADOS

Estudos que integram as modelagens hidrológica e hidrodinâmica são bastante frequentes, tendo sido aplicados a diversas bacias hidrográficas com diferentes características físicas. Na maior parte dos casos, as pesquisas realizadas avaliam os efeitos de eventos de inundações e enxurradas em áreas urbanas, através do mapeamento e determinação das planícies de inundação. Também, são comuns os casos que analisam a implantação de medidas estruturais e não estruturais e as consequências da variação no uso do solo do local, considerando assim diferentes cenários.

Nesse sentido, Knebl et al. (2005) utilizou os hidrogramas gerados por um modelo chuva-vazão no HEC-HMS para simular como seriam as planícies de inundação resultantes de um evento de enxurrada extremo ocorrido no Texas (EUA), considerando um fluxo não permanente. A região em análise sofre seguidamente com inundações e estudos como o que foi realizado permitem aprimorar os sistemas de alerta existentes e ainda podem ser utilizados para mitigação dos perigos.

Decina *et al.* (2016), utilizando a mesma metodologia, avaliaram o desempenho e o efeito de medidas estruturais e não estruturais nas planícies de inundação da Bacia Hidrográfica do Córrego do Gregório (SP) geradas através de simulações, considerando precipitações com diferentes tempos de retorno. Ribeiro Neto *et al.* (2015), investigaram a possibilidade de aplicação do HEC-HMS e do HEC-RAS para fazer simulações na Bacia Hidrográfica do Rio Una (PE) que é frequentemente atingida por inundações ribeirinhas e, dessa maneira, auxiliar na análise e previsão de cheias.

Outros estudos como os de Góes (2009) e Lou (2010) também verificaram a possibilidade da utilização conjunta de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos como forma de avaliação de diferentes cenários, a fim de prever e antecipar os efeitos resultantes de eventos de precipitação e, assim, dar suporte à decisão na ocorrência de situações extremas.

Além de avaliar as manchas de inundação resultantes dos eventos de precipitação para fins de planejamento e gestão, algumas pesquisas também analisam o nível de perigo que estão sujeitas as populações que vivem nos locais atingidos. Nesse sentido, Monteiro *et al.* (2011), após realizar simulações hidrológicas e hidrodinâmicas, mapearam as áreas suscetíveis à ocorrência de eventos de inundação na bacia hidrográfica do Braço do Baú e criaram um mapa de perigo, que leva em consideração o potencial destrutivo dos escoamentos e o índice proposto por Stephenson (2002). Sendo assim, puderam verificar quais as áreas que são mais críticas e que os habitantes estão sujeitos a maiores danos.

Entretanto, pesquisas relacionadas aos perigos a que estão sujeitos os pedestres em uma cidade durante um evento de inundação são mais difíceis de serem encontradas. O mesmo verifica-se para bacias rurais, onde por vezes são realizadas práticas de ecoturismo próximo a rios ou até mesmo acompanhando seu leito, como é o caso do da Trilha do Rio do Boi, objeto de estudo desse trabalho. Nesse local, dependendo do nível em que se encontram os principais cursos de água, os turistas são impedidos de realizar a trilha por questões de segurança.

Nesse sentido, Bins (2017) realizou uma primeira aproximação de um modelo simplificado para a previsão de cheias a partir de dados históricos de estações pluviométricas da ANA, que auxiliasse na definição de um critério para o fechamento da Trilha do Rio do Boi. Os resultados da análise foram satisfatórios, mas demonstraram a importância da utilização de dados de alta resolução temporal para obtenção de modelos com maior nível de confiabilidade nas previsões realizadas.

Sendo assim, o presente trabalho busca aprimorar o sistema desenvolvido por Bins (2017) a fim de contribuir para a melhoria do sistema existente de fechamento da trilha, de modo a considerar a variação das características hidrometeorológicas do local tomando como base dados de elevada resolução temporal.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1. APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste trabalho foi estudada a Bacia Hidrográfica do Rio do Boi, que fica localizada na fronteira dos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, mais especificamente nos municípios de Cambará do Sul (RS) e Praia Grande (SC). Saindo de Porto Alegre, uma das possíveis rotas ao local se faz pelas rodovias RS 290 seguida da BR 101 e SC 290. Por fim, é necessário percorrer um pequeno trecho em uma estrada de chão até a guarita do parque, onde inicia-se a trilha até o rio. A bacia hidrográfica em questão possui área total de aproximadamente 112,87 km² e tem como principais afluentes o Arroio Água Comprida e o Arroio Perdizes. Na Figura 2 estão apresentados os limites da região em estudo e os principais trechos de drenagem presentes.

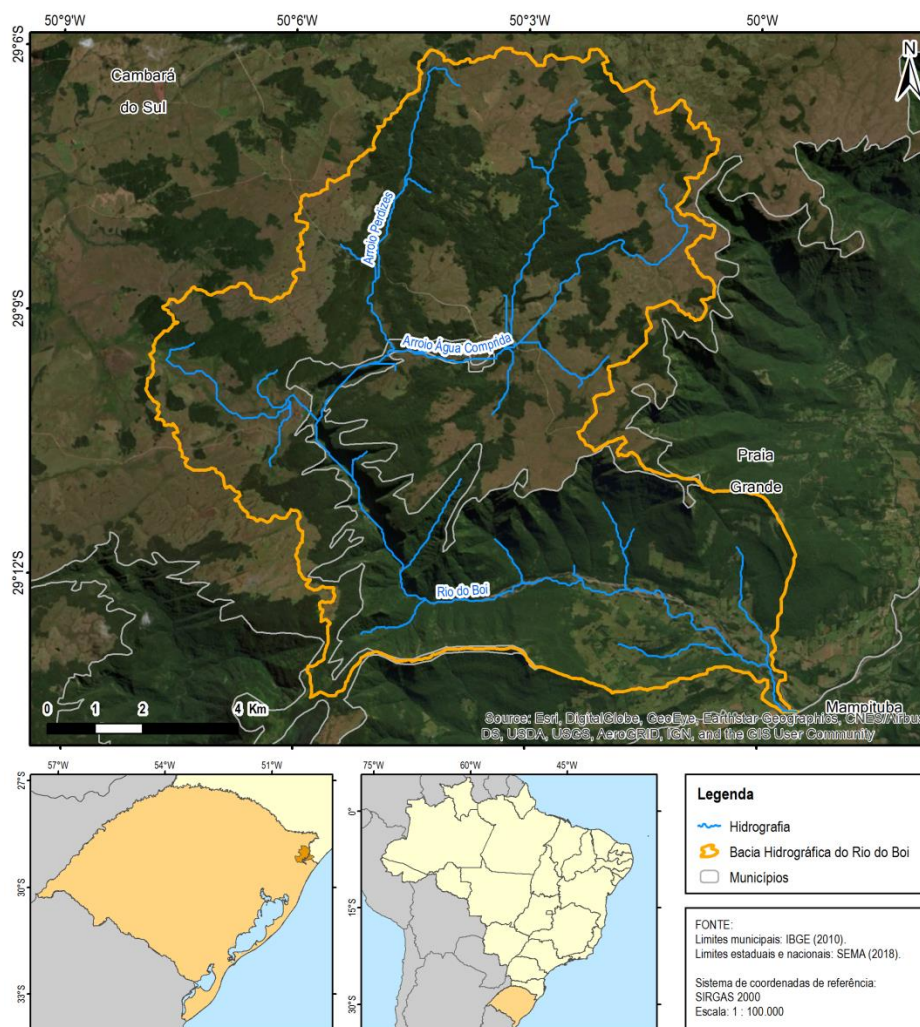


Figura 2 - Localização da área de estudo.

FONTE: Elaboração própria (2018).

Por se tratar de uma região que abriga grande diversidade de fauna e flora e também única do ponto de vista paisagístico, nesse local foram criadas duas Unidades de Conservação de Proteção Integral, sendo elas o Parque Nacional dos Aparados da Serra (PNAS), com aproximadamente 10250 ha, e o Parque Nacional Serra Geral (PNSG), com aproximadamente 17300 ha.

A história do PNAS começou em 1957 quando o governo gaúcho decretou o local como sendo uma área de preservação. A proposta surgiu depois de ter sido observada a elevada extração de araucárias da região por ambientalistas e botânicos, entre eles, o Padre Balduino Rambo. Somente dois anos depois, o PNAS foi oficialmente criado pelo Decreto nº 47446 de 1959 com a finalidade de preservar a paisagem e a biodiversidade da borda da Serra Geral. Naquela época, a parte gaúcha do parque pertencia ao município de São Francisco de Paula, que em 1963 teve parte de suas terras emancipadas e assim foi criado o município de Cambará do Sul.

Mais tarde, por volta de 1982/1983, com a elaboração do primeiro plano de manejo do parque, sugeriu-se por parte dos gestores da UC a inserção de outros cânions como o Fortaleza e o Malacara na área do parque como forma de aumentar a proteção da biodiversidade. Para atender a essa sugestão do plano de manejo, foi criado pelo Decreto nº 531 de 1992 o Parque Nacional da Serra Geral. A área desse parque é dividida em duas partes, uma ao norte do PNAS, com 15000 ha, e outra ao sul, com 2300 ha, sendo que o PNAS faz fronteira com esses dois limites do PNSG.

Por estarem categorizados como Parques Nacionais, sendo, portanto unidades de conservação de proteção integral, só é permitido realizar o uso indireto dos recursos naturais presentes no local, ou seja, atividades de caça e pesca ou remoção de exemplares nativos não são permitidos. Os objetivos desse tipo de unidade são preservar os ecossistemas locais e as paisagens naturais com elevada beleza cênica e, além disso, promover atividades de educação ambiental, turismo ecológico e pesquisa científica, sendo dessa forma possível realizar visitas nessas UCs. Atualmente, ambos os parques são administrados pelo Instituto Chico Mendes de Conservação de Biodiversidade (ICMBio). A Figura 3 apresenta a localização dos parques em relação à área de estudo.

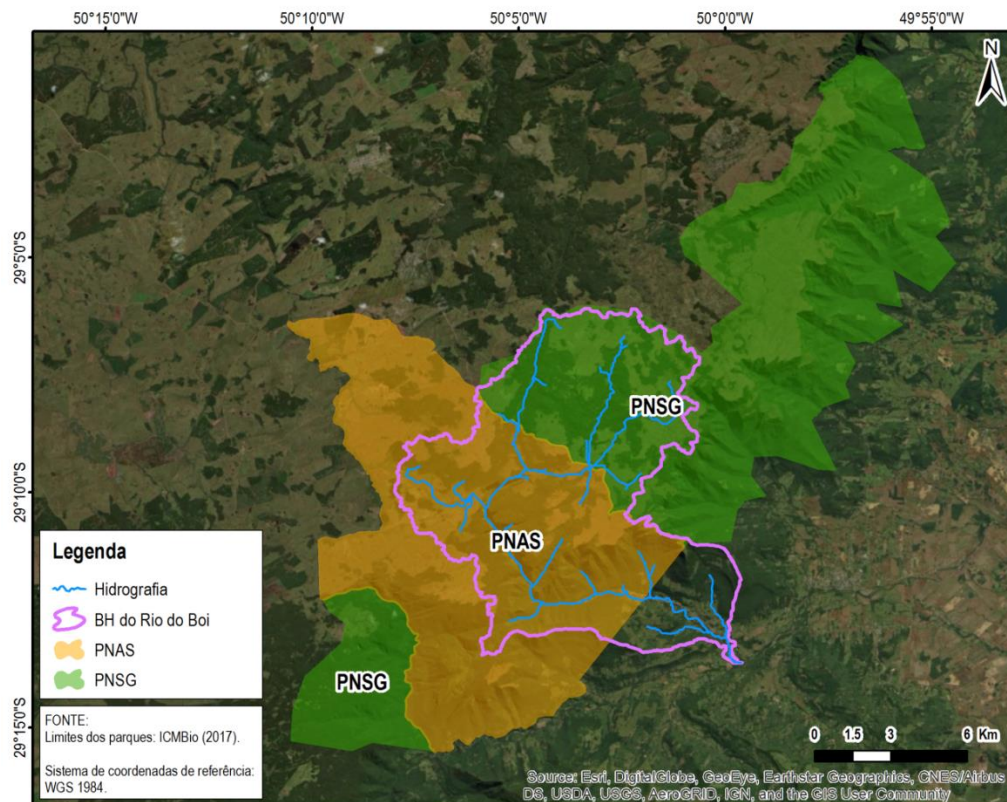


Figura 3 - Inserção da área da BH do Rio do Boi nos PNAS e PNSG.

FONTE: Elaboração própria (2018).

O local em estudo é amplamente conhecido pelos cânions que compõe a região, que chegam a ter quase 900 metros de altura. O relevo é caracterizado pelo corte abrupto do planalto dos Campos de Cima da Serra através de paredões quase verticais formados por rochas vulcânicas que tiveram origem a partir dos derramamentos de lava sobre o continente durante a Era Mesozoica. É dessas formações geomorfológicas que constituem o terreno que derivam os nomes das UCs. Ao todo a escarpa tem quase 250 km de extensão e é recortada por vários cânions, entre eles, o Itaimbezinho, o Fortaleza e o Malacara.

Por ser um dos pontos turísticos mais procurados do sul do país, todos os anos o local recebe grandes quantidades de turistas que buscam, entre outras atividades, a realização de trilhas e turismo de aventura. Nesse sentido, em ambos os parques podem ser realizadas caminhadas ao ar livre, sendo que em algumas delas a presença de um guia credenciado pelo parque é obrigatória. Esse é o caso da Trilha do Rio do Boi, objeto de estudo deste trabalho. A trilha em questão é realizada na parte inferior do cânion mais famoso do local, o Itaimbezinho, que possui 5,8 km de extensão e paredões que chegam até a 720 metros de

altura. Por questões de preservação da natureza, o acesso à trilha é restrito a 180 pessoas por dia.

Na realização desse passeio, a distância total percorrida é de aproximadamente 8 km (4 km de ida e mais 4 km de volta), sendo que a duração da trilha varia entre 5h a 8h dependendo do ritmo que é realizada a caminhada. A parte inicial do trajeto é realizada em meio à mata nativa até chegar ao leito do Rio do Boi, onde segue-se margeando o rio até o ponto final que é próximo ao “cotovelo” do cânion. Ao longo do percurso, é necessário cruzar o leito do rio algumas vezes. Considerando o trajeto de ida e volta, esse número varia entre 20 a 24 cruzamentos, devido à dinâmica hidrossedimentológica do rio no momento em que é realizada a trilha.

Além de ser considerada uma trilha com alto grau de dificuldade por possuir trechos com relevo acidentado, terreno altamente irregular e presença de animais silvestres peçonhentos, existem ainda riscos associados à dinâmica do rio. Por estar localizada no interior do cânion, somente há uma entrada e uma saída da trilha. Como o rio em questão se localiza em uma bacia hidrográfica relativamente pequena, a resposta a eventos de precipitação são rapidamente sentidas, podendo ocorrer à elevação do nível do rio de modo repentino.

Nos casos em que os turistas estiverem realizando a trilha, essa situação poderá fazer com que os mesmos não consigam mais cruzar o leito do rio e acabem por ficar “ilhados”. Esse tipo de situação já ocorreu algumas vezes como foi o caso ocorrido em 12 de março de 2017, em que 45 turistas ficaram presos em uma das travessias do rio e tiveram que ser resgatados em uma operação emergencial através de uma ação conjunta dos bombeiros, dos guias das trilhas e dos responsáveis pelo parque.

Por esses motivos, a realização da trilha só é permitida nos casos em que o nível do rio medido por uma régua de nível localizada à montante do cânion estiver abaixo de um determinado valor. Mais detalhes dessas medições serão apresentados na seção “4.1.3. Sistema de Monitoramento Existente”.

4.1.1. Vegetação

A bacia hidrográfica em estudo está inserida no bioma Mata Atlântica e possui em sua área de abrangência uma grande diversidade de espécies vegetais. Nas partes baixas da bacia,

predominam remanescentes de Florestas Ombrófilas Densas, enquanto que nas partes altas predominam as Florestas Ombrófilas Mistas alternadas por vegetações campestres. Na faixa de altitudes compreendida entre essas duas formações vegetais há uma zona de transição onde há a presença de Florestas Ombrófilas Densas Submontanas e Montanas e Florestas Nebulares, além de uma vegetação rupícola nas encostas dos planaltos e nos paredões mais verticais dos cânions (Plano de Manejo, 2003).

Nesse local, a presença de florestas de araucárias também é bastante significativa. Como citado anteriormente, esta é uma espécie que teve grande parte de seus exemplares originais removidos, tendo sido este um dos motivos para a criação do PNAS. Hoje ela é considerada como uma espécie vulnerável pela Lista Vermelha da Flora (Fundação Zoobotânica, 2014).

Vale ressaltar que antes de terem sido criadas as UCs, as áreas dos parques eram utilizadas pelo homem para diferentes fins. Os locais mais planos e próximos ao litoral eram usados para o plantio de algumas culturas como, por exemplo, arroz e tabaco, enquanto as partes campestres dos Campos de Cima da Serra eram utilizadas para a pecuária. Por esse motivo, considera-se que todas as formações vegetais presentes no local já sofreram com algum tipo de alteração antrópica (Plano de Manejo, 2003).

A fim de analisar um pouco mais a fundo a distribuição espacial das formações vegetais presentes, buscou-se no portal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) um mapa da vegetação do local. Este foi obtido na escala 1:250.000 e é referente ao ano de 2005. Segundo ele, na região em estudo predomina a vegetação secundária sem palmeiras e estepes gramíneo lenhosas com florestas de galeria, sendo que as estepes estão presentes somente nas regiões de maiores altitudes.

Nas áreas mais próximas ao exutório da bacia, foi identificada a presença de uma área significativa de pastagens, estando parte dela inserida no parque. As áreas de reflorestamento registradas são de pequena representatividade (0,06 km²) e só estão presentes em um ponto no norte da bacia. A Figura 4 apresenta a distribuição espacial da vegetação na área da bacia.

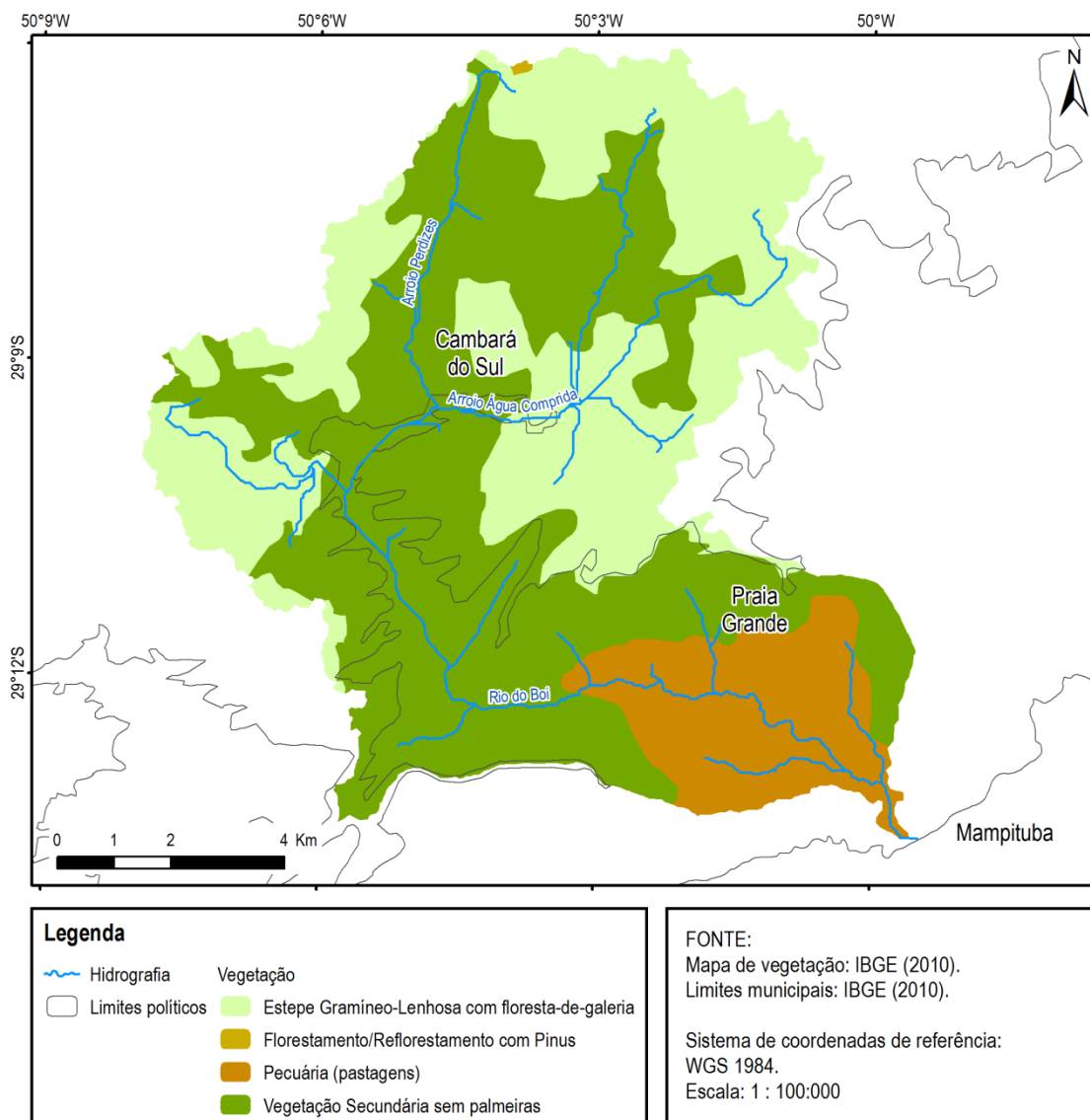


Figura 4 - Vegetação presente na Bacia Hidrográfica do Rio do Boi.

FORNTE: Elaboração própria (2018).

4.1.2. Pedologia

Um aspecto a ser levado em consideração na modelagem hidrológica e hidrodinâmica é a capacidade que o terreno tem de gerar escoamento superficial ou promover a infiltração das águas das chuvas. Nesse sentido, sabe-se da influência que o tipo solo possui sobre esse processo. Enquanto, solos mais arenosos tendem a terem maiores taxas de infiltração, solos com maiores teores de argilas tendem a gerar maior escoamento.

De acordo com o mapa de solos obtido a partir do site do IBGE na escala 1:250.000 para o ano de 2005, a bacia hidrográfica em estudo possui quatro diferentes tipos de solos: os cambissolos húmicos alumínicos, os cambissolos flúvicos Ta eutróficos, os nitossolos

vermelhos distroféricos e os neossolos litólicos chernossólicos. Essa classificação se baseia no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) que foi desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) em parceria com outros órgãos. Nessa classificação são levados em consideração, entre outros aspectos, as características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas do solo. Nesse sentido, nos próximos parágrafos do texto se fará uma breve descrição das propriedades de cada uma dessas classificações. A Figura 5 apresenta a distribuição espacial dos solos presentes na região em estudo.

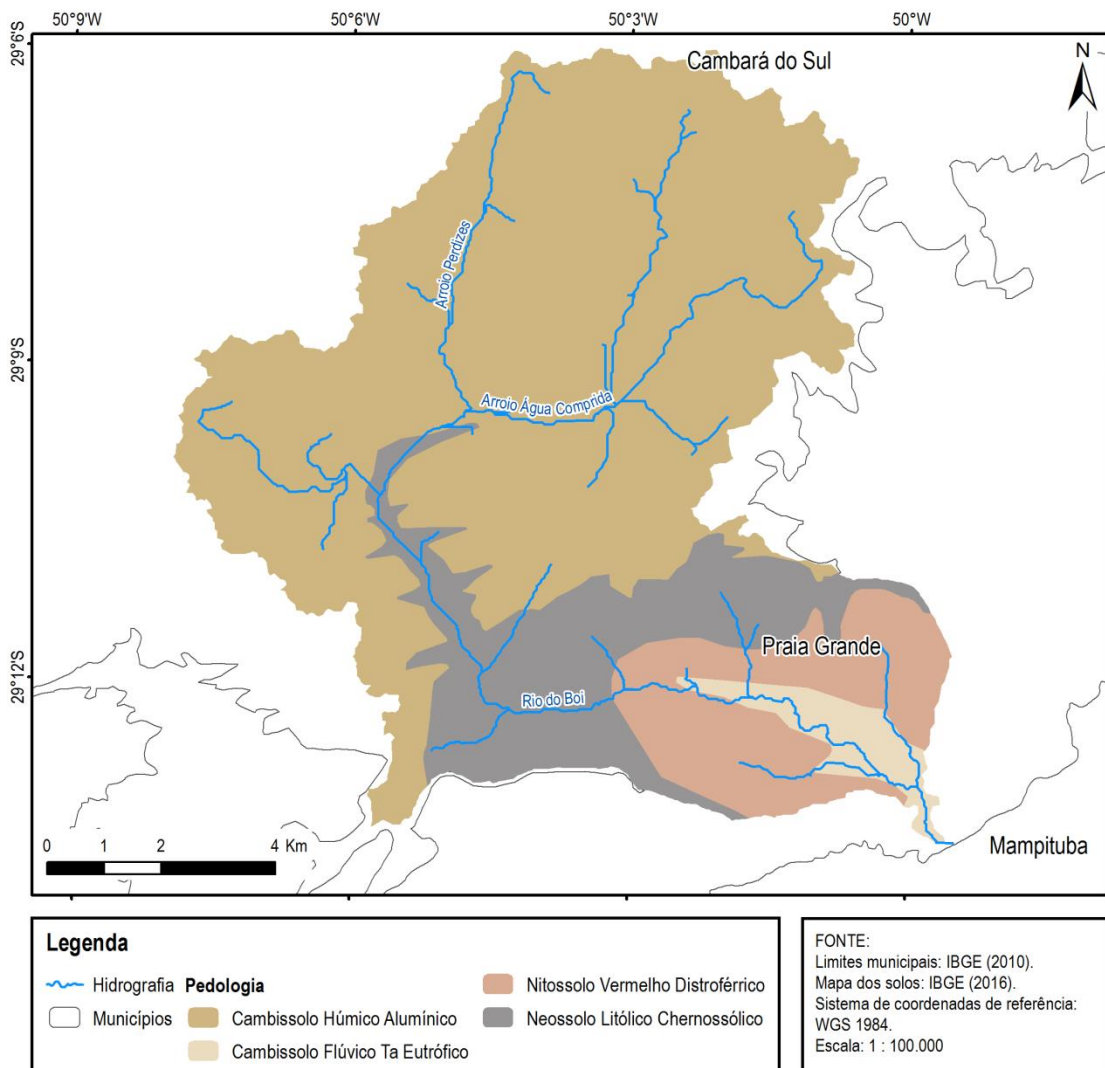


Figura 5 - Tipos de solos presentes na Bacia Hidrográfica do Rio do Boi.

FONTE: Elaboração própria (2018).

De acordo com a Figura 5, pode-se perceber que o tipo de solo que mais está presente na área em estudo são os cambissolos, possuindo área aproximada de 81,38 km². Essa categoria faz referência aos solos que ainda estão em formação, ou seja, são solos pouco

desenvolvidos e que apresentam algumas características herdadas da rocha que lhe deu origem, podendo ser evidenciado pela presença de minerais primários. Normalmente, esses possuem baixa permeabilidade e estão associados a relevos ondulados e montanhosos, mas podem ocorrer em áreas mais planas em zonas onde não há a influência do lençol freático.

No caso dos cambissolos húmicos, há a presença de matéria orgânica em grande quantidade, sendo caracterizado por uma cor escura. Está presente principalmente em zonas de clima frio e de altitude, como é o caso da região em estudo. Isso é evidenciado ao analisar a figura em que se percebe que este tipo de solo está presente em toda a parte superior dos cânions e nas áreas próximas às nascentes dos principais afluentes do Rio do Boi. Sua classificação como alumínico significa que esses solos possuem elevados teores de alumínio em sua composição.

Já os cambissolos flúvicos se referem àqueles solos formados a partir de sedimentos aluviais ao longo de várzeas fluviais. A categorização de terceiro nível deste solo é considerada como Ta Eutróficos, indicando a presença em grande quantidade de argilas de alta atividade e alta fertilidade. Na região em estudo, esse tipo de solo se encontra nas partes baixas da bacia, próximo ao exutório do rio.

Os neossolos também são solos pouco evoluídos e que ainda apresentam as características originárias da rocha matriz, sendo comumente provenientes da decomposição de rochas cristalinas do período Pré-Cambriano. São solos com espessura inferior a 30 cm, constituídos por materiais minerais e orgânicos e que não apresentam horizonte B diagnóstico, ou seja, estão assentados diretamente sobre a rocha.

Os neossolos litólicos estão normalmente associados a terrenos declivosos (morros e serras), como é o caso em estudo, em que esse tipo de solo está presente nas partes de maior declividade da bacia. Pela sua pequena profundidade a infiltração de água é dificultada, sendo indicado para a preservação da vegetação nativa e nascentes de corpos hídricos nele presentes.

Por fim, a última categoria de solos presentes na bacia hidrográfica do Rio do Boi são os nitossolos. Esses normalmente tem sua origem associada à decomposição de rochas básicas e apresentam textura argilosa a muito argilosa o que dificulta a infiltração de água. Como o nome já diz os nitossolos vermelhos têm coloração vermelha a vermelha escura e não possuem grande diferenciação entre os horizontes de formação. São solos de grande importância agrônômica e, mesmo possuindo baixa fertilidade, esses respondem muito bem à aplicação de corretivos agrícolas, como é o caso dos nitossolos vermelhos distroféricos.

4.1.3. Sistema de monitoramento existente

Atualmente, o monitoramento das variáveis hidrometeorológicas na bacia hidrográfica do Rio do Boi é realizado através de quatro réguas de nível, uma estação meteorológica e dois sensores fluviométricos. Entretanto, até o final do ano de 2017, esse monitoramento era realizado somente com as duas réguas de nível, sendo uma delas localizada no Arroio Perdizes, à montante da cachoeira principal, e outra localizada no Rio do Boi, próximo à guarita que faz o acesso à entrada da trilha.

Como as réguas de nível não possuem nenhum tipo de sensor automático é necessário que todos os dias pela manhã um funcionário do parque vá até o local e registre qual o nível do rio naquele momento. Para a régua instalada no Arroio Perdizes há um registro histórico de dados desde 2012. Já para a régua instalada no Rio do Boi, têm-se dados somente a partir de 2014, ano em que foi instalada.

Conforme foi citado na seção “4.1. Apresentação da área de estudo”, por questões de segurança a realização da trilha somente é permitida quando o nível medido no Arroio Perdizes e no Rio do Boi estiverem abaixo de um determinado valor, sendo que este foi estabelecido sem considerar quaisquer parâmetros meteorológicos e hidrológicos que possam vir a afetar a vazão no corpo hídrico. Segundo os funcionários do parque, o valor acima do qual não é permitido aos turistas realizarem a trilha é de 15 cm para o Arroio Perdizes e 20 cm para o Rio do Boi.

A utilização desse critério pode acarretar em uma incorreta escolha acerca da abertura ou fechamento da trilha. Por exemplo, se o nível da régua localizada à montante estiver marcando 16 cm, os turistas não poderão realizar esse passeio mesmo que seja um dia de sol e não estejam ocorrendo eventos de precipitação nas áreas à montante da bacia. O inverso também é válido. A régua pode estar marcando menos de 15 cm e a trilha ser aberta aos visitantes mesmo que esteja chovendo nas cabeceiras dos afluentes do Rio do Boi, o que pode levar a uma rápida elevação no nível do rio, fazendo com que os turistas fiquem sem ter condições de sair.

Trabalhos anteriores sobre o local em estudo como o de Bins (2017) avaliaram o percentual de erros e acertos no fechamento da trilha utilizando os dados diários obtidos a partir dessas réguas de nível e concluíram que os mesmos não são tão eficientes para desenvolver modelos de previsão e alerta, sendo necessários dados com uma melhor resolução

temporal. Por esse motivo, esse autor, em parceria com o Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN) da UFRGS, instalaram mais duas réguas de nível, dois sensores fluviométricos e uma estação meteorológica no local.

Essas duas novas réguas de nível foram instaladas na mesma seção da régua que já estava em funcionamento no Arroio Perdizes, sendo uma delas localizada no meio do arroio e outra na margem (Figura 6). Isso foi feito com o objetivo de se ter uma melhor estimativa da vazão que passa nesse corpo hídrico, já que a régua antiga estava instalada próxima à margem do mesmo, o que levava a marcação de nível zero em muitas ocasiões, podendo ser inferido incorretamente que a vazão seria zero naquele momento. Atualmente, os responsáveis do parque registram os dados tanto da régua nova quanto da antiga, o que permite a realização de uma correlação dos dados das mesmas.



Figura 6 - Régua de nível instalada no Arroio Perdizes.

FONTE: GPDEN (2018).

Com relação aos sensores de nível, um deles foi instalado em uma nova seção de controle no Arroio Perdizes à montante da ponte. Foi escolhido esse novo local, pois foi considerado que a seção antiga não era a mais adequada para realizar esse tipo de medição. O outro sensor foi instalado no Rio do Boi próximo à entrada da trilha. Ambos os sensores possuem resolução temporal de 10 minutos e tem registros desde outubro de 2017. Por fim, estação meteorológica foi instalada em frente à sede do parque e registra dados de precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade e direção dos ventos, pressão e radiação solar.

Nas Figuras 7, 8 e 9 estão apresentados, respectivamente, a estação meteorológica e o sensor de nível do Rio do Boi instalados por Bins (2017) juntamente com a equipe do GPDEN e um croqui de todo o sistema de monitoramento realizado. Já na Figura 10 é representada a localização espacial dos equipamentos de controle das variáveis hidrometeorológicas do parque.



Figura 7 - Estação meteorológica instalada.
FONTE: GPDEN (2018).



Figura 8 - Sensor de nível instalado no Rio do Boi.
FONTE: GPDEN (2018).

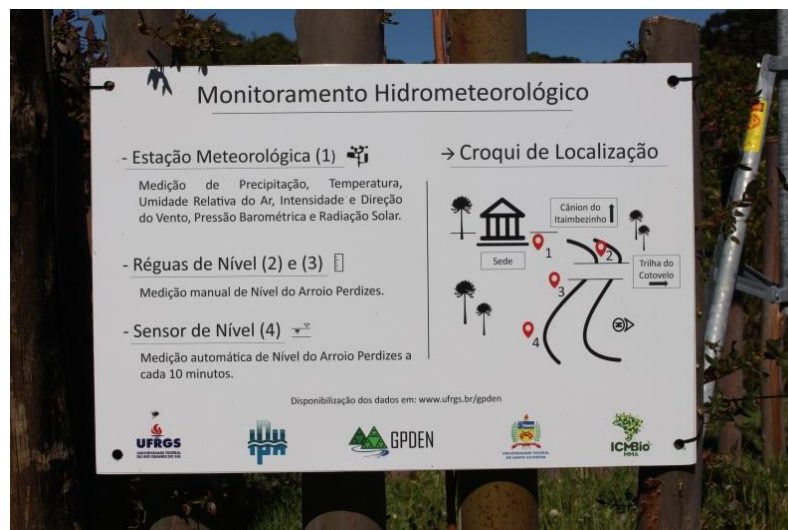


Figura 9 - Croqui da rede de monitoramento hidrometeorológico instalado no local.
FONTE: GPDEN (2018).

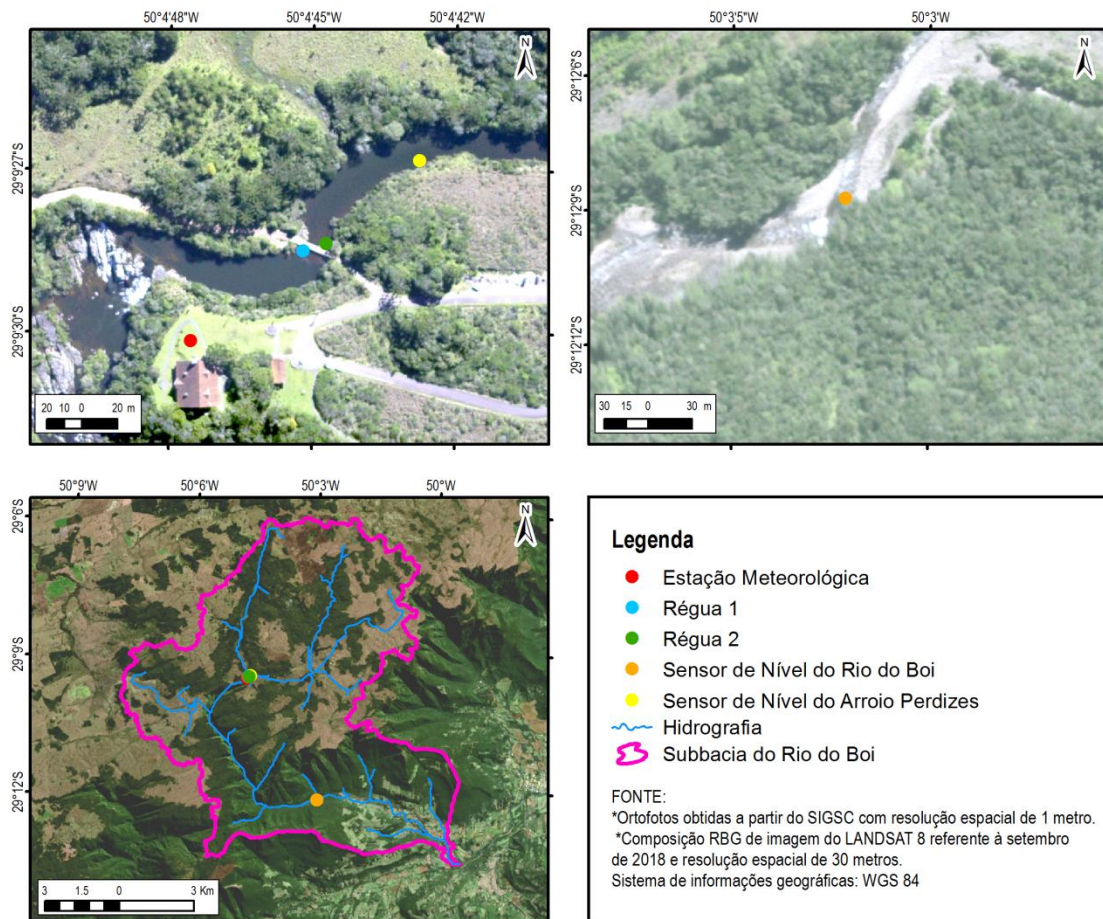


Figura 10 - Localização dos sensores de nível, das réguas e da seção meteorológica instalada.

FONTE: Elaboração própria (2018).

5. METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente trabalho tem como propósito alcançar os objetivos definidos previamente e seguiu a série de etapas que estão descritas a seguir. Primeiramente, foi necessário adquirir dados referentes às variáveis hidrometeorológicas do local e informações acerca das características do terreno que pudessem influenciar no modo como ocorre o escoamento e a infiltração da água no solo. Essas informações são essenciais à aplicação do modelo hidrológico e sem elas o trabalho não teria como ser realizado.

Após, o modelo hidrológico gerado passou por uma etapa de calibração e validação. Isso foi feito a fim de certificar que os resultados obtidos ficassem o mais parecidos possível com os dados observados e fossem representativos caso utilizadas séries históricas referentes a outros períodos que não os de calibração.

Os hidrogramas desenvolvidos nessa etapa foram utilizados como dado de entrada para a simulação hidrodinâmica juntamente com os dados referentes às seções transversais do leito do rio. Essas foram obtidas a partir dos Modelos Digitais de Terreno (MDT) e de técnicas de topografia. A realização dessa análise permitiu propagar os hidrogramas gerados na etapa anterior para locais situados à jusante da onde foram determinados e, dessa forma, obter informações acerca da velocidade e profundidade do escoamento em pontos de interesse.

Sendo assim, a determinação do índice de perigo proposto por Stephenson (2002) pode ser efetuada nos locais por onde as pessoas passam durante a realização do passeio e, dessa maneira, puderam ser verificados os dias nos quais ocorreu excedência dos valores considerados como limites, ocorrendo então o fechamento da trilha.

Os dados referentes aos dias em que a trilha foi considerada como fechada pelo modelo foram comparados aos registros do parque a fim de verificar a qualidade e o desempenho da análise realizada. Na Figura 11 está apresentado um fluxograma que representa todas as etapas que foram utilizadas no decorrer da elaboração desse estudo.

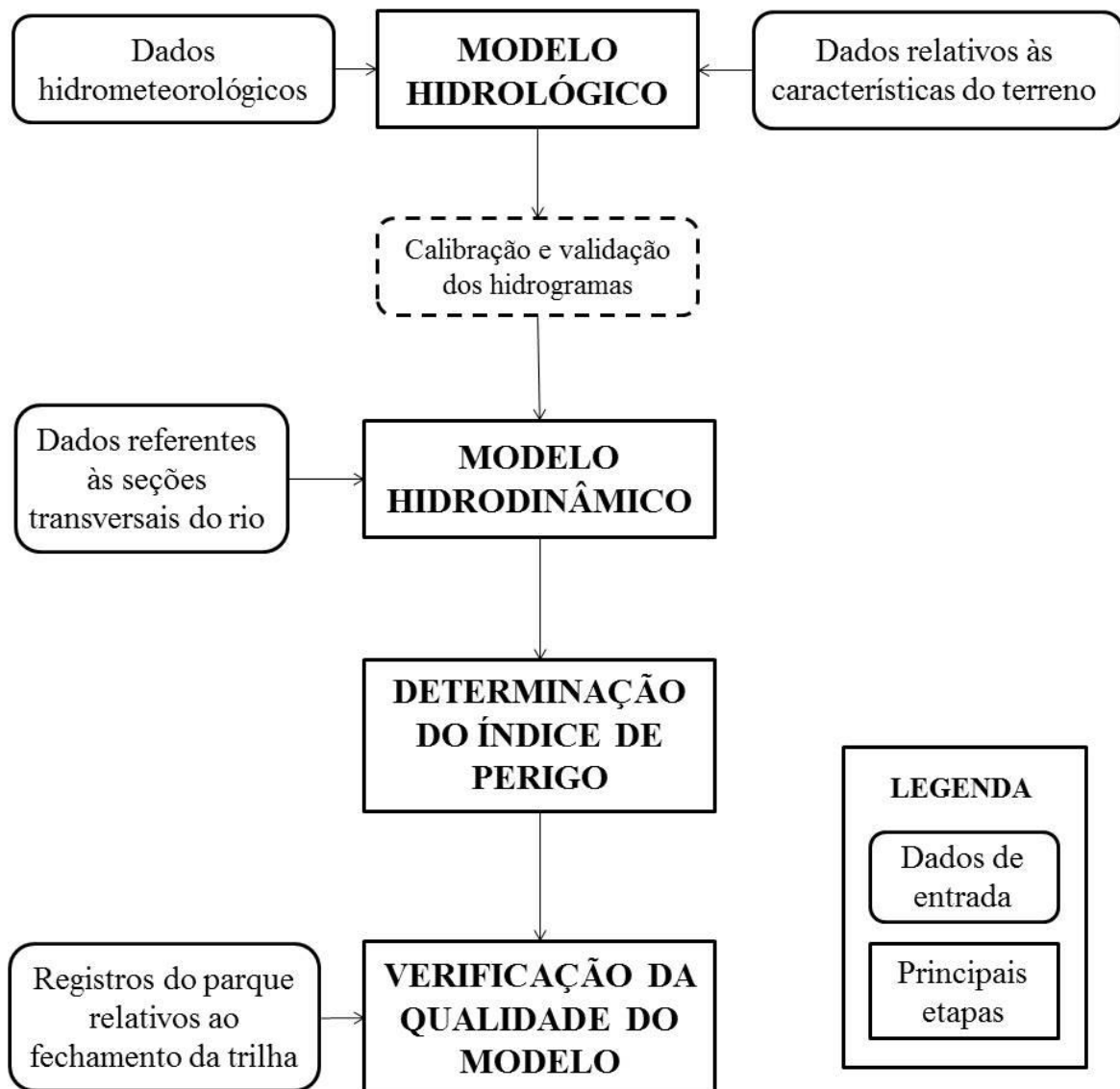


Figura 11 - Fluxograma das etapas que foram realizadas no desenvolvimento do presente trabalho.

FONTE: Elaboração própria (2018).

5.1. MODELAGEM HIDROLÓGICA

Nesse tópico do texto serão apresentados os dados de entrada e os métodos que foram utilizados para a realização da modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio do Boi. Essa modelagem foi realizada com o objetivo de determinar os hidrogramas de saída referentes às séries históricas de precipitação na bacia, para que, posteriormente, os mesmos possam ser propagados para locais de interesse à jusante e auxiliem a determinar os critérios de fechamento da trilha.

Para realizar essa análise também foi necessário definir, através da calibração e validação dos modelos, os parâmetros relativos às características das bacias para que o hidrograma gerado pelo *software* fosse o mais parecido possível com o hidrograma observado. A definição desses coeficientes é importante para que estudos posteriores possam ser realizados e tragam resultados satisfatórios mesmo ao serem consideradas séries históricas de precipitação e vazão de outros períodos.

5.1.1. Dados de entrada

O primeiro passo para a realização de uma modelagem hidrológica é a delimitação da área de abrangência da bacia hidrográfica em estudo e definição de suas principais características físicas. Para a determinação de seus limites, normalmente são utilizadas cartas topográficas ou modelos digitais de elevação (MDEs). Nesse trabalho, foi utilizado um MDE obtido a partir do site do Laboratório Geoprocessamento da UFRGS (LABGEO), que foi elaborado com base em dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e possui resolução espacial de 90 metros (Weber *et al*, 2004).

Como a bacia do Rio do Boi está inserida em um local que possui um relevo com grandes diferenças de altitudes em áreas relativamente pequenas, essa resolução do MDE acaba por não representar de forma satisfatória o terreno. Por esse motivo, antes de definir os limites da bacia, foram realizadas algumas correções com a finalidade de melhorar a resolução espacial desse MDE a partir dos dados contidos nas cartas oficiais do exército. Após efetuar esses aprimoramentos, a bacia foi delimitada utilizando o *software* de geoprocessamento ArcGIS versão 10.3.1. A localização do exutório da bacia foi determinada como sendo o exutório do Rio do Boi. Esse mesmo MDE foi utilizado posteriormente para a definição das áreas e limites das sub-bacias que serão explicadas com mais detalhes na próxima seção do texto.

Além disso, foi também utilizado um MDE proveniente do Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC) que possui resolução espacial de 1 metro (Governo do Estado de Santa Catarina, 2018). Esse modelo não foi utilizado para a delimitação de toda a bacia hidrográfica do Rio do Boi, pois só existem dados para o estado de Santa Catarina e, como foi comentado anteriormente, parte dessa bacia se localiza no estado do Rio Grande do Sul.

O objetivo do uso desse segundo modelo foi devido ao fato de que, como um dos dados necessários à modelagem é a declividade do terreno, informações mais precisas das altitudes da parte interior do cânion podem ser obtidas através de sua utilização. Esse trecho é extremamente importante nessa análise, pois apresenta variações significativas no relevo que não são representadas adequadamente no modelo do LABGEO, mesmo após terem sido efetuadas as correções, podendo levar à erros consideráveis durante o processamento dos dados.

Além do MDE, foram utilizados como dados de entrada para a realização do modelo, a série histórica do sensor fluviométrico localizado no Arroio Perdizes e a série histórica de precipitação da estação meteorológica instalada por Bins (2017) em parceria com o Grupo de Pesquisas em Desastres Naturais (GPDEN). Esses dados compreendem o período entre novembro de 2017 a agosto de 2018 e tem resolução temporal de 10 minutos. Por existirem algumas pequenas falhas nas séries de dados, a modelagem foi realizada somente quando havia dados de precipitação e nível para o mesmo período. Para a calibração do modelo foram utilizados dados referentes ao período compreendido entre 17 de novembro de 2017 a 30 de abril de 2018 e para a validação os dados de 15 de junho a 13 de agosto de 2018.

O último dado de entrada utilizado é referente aos valores de evapotranspiração potencial e real que ocorrem na região. Esses foram obtidos a partir dos Mapas Mensais dos Boletins Agro-Climatológicos do INMET e são relativos ao mesmo período dos dados do sensor fluviométrico e da estação meteorológica. Sendo assim, para cada mês do período em análise, foi obtido um valor para evapotranspiração real e potencial o que permite que esses dados sejam utilizados em conjunto.

5.1.2. Inserção e métodos para o processamento dos dados no HEC-HMS

Tendo posse dos dados de entrada necessários, é possível proceder para a modelagem hidrológica propriamente dita. Para isso, foi utilizado o *software* HEC-HMS versão 4.2.1 da *US Army Corps of Engineers* (Usace-HEC, 2016). Nesse *software* é possível criar simulações hidrológicas de transformação de chuva em vazão a partir de uma representação dos elementos da bacia hidrográfica e as conexões que são estabelecidas entre eles.

Para a realização da modelagem nesse programa, é necessário dividir a bacia em partes menores conforme o que se deseja representar. É importante levar em consideração que

normalmente as bacias hidrográficas não são regiões homogêneas e possuem em sua área de abrangência paisagens distintas que conferem diferentes propriedades de escoamento e infiltração ao solo, o que pode influenciar nos resultados do modelo. Quanto maior for o nível de detalhamento e precisão esperado, em mais partes a divisão deverá ser realizada, entretanto, haverá também a necessidade de uma maior quantidade de dados de entrada. Esses dados normalmente são referentes às características do relevo do local, à localização dos principais trechos de drenagem e à disponibilidade de informações hidrológicas.

Sendo assim, é comum efetuar a divisão da bacia hidrográfica agrupando em uma mesma sub-bacia os locais que possuem características de geração de escoamento e infiltração similares, ou seja, locais com classes pedológicas semelhantes ou com o mesmo uso do solo podem ser agrupadas em um mesmo conjunto. Também, é frequente realizar a separação conforme os principais trechos de drenagem presentes. A partir disso, deve-se inserir esses dados no HEC-HMS, montando um esquema de representação do sistema hidrológico que considere todas as sub-bacias criadas, os pontos em que elas se unem e onde elas deságuam.

Além de fazer essa subdivisão da área e estabelecer as inter-relações entre os elementos hidrológicos presentes, é necessário também entrar com alguns parâmetros em cada um dos componentes hidrológicos inseridos no *software* e escolher os métodos de infiltração e escoamento que melhor representem os fenômenos que ocorrem na bacia, antes de rodar o modelo.

Entre as variáveis de entrada tem-se o tempo de concentração, que é definido por ser o tempo que uma gota de água da chuva leva para percorrer a distância compreendida entre o ponto mais remoto da bacia até seu exutório. Existem diversas equações que podem ser utilizadas para estimar esse parâmetro, sendo que cada uma delas é mais adequada para determinadas situações. Uma das mais utilizadas é a Equação de Kirpich, que originalmente foi desenvolvida a partir de dados de bacias rurais com áreas inferiores a 0,5 km² (Collischonn *et al*, 2013). Entretanto, Silveira (2005) analisou a eficiência dessa expressão e concluiu que ela apresenta bons resultados para bacias com áreas de até 12000 km², sendo então aplicável ao caso em estudo.

A Equação de Kirpich relaciona o comprimento do rio principal com diferença de altitude da bacia hidrográfica conforme a expressão abaixo e foi utilizada para fazer uma estimativa inicial do tempo de concentração das sub-bacias definidas para representar o modelo.

$$T_c = 57 * \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (2)$$

Onde:

T_c é o tempo de concentração em minutos (min)

L é o comprimento do curso de água principal expresso em quilômetros (km)

Δh é a diferença de altitude ao longo do talvegue do curso de água expresso em metros (m)

O comprimento do rio principal foi determinado com o auxílio de *softwares* de SIG e é referente à rede de drenagem gerada durante a delimitação da bacia hidrográfica. Já para a determinação do Δh , foi considerada a da diferença de altitudes entre a nascente e o exutório do rio principal de cada sub-bacia, utilizando o MDE obtido do LABGEO com as correções efetuadas.

Como método para análise da chuva efetiva gerada durante um evento de precipitação, foi escolhido o SCS-CN da *Natural Resources Conservation Center* dos Estados Unidos, antiga *US Soil Conservation*. Esse método faz uma estimativa do volume de água escoado para cada evento de chuva proposto e é de simples aplicação. Está baseado na determinação de um parâmetro, *Curve Number* (CN), que varia de 0 a 100 de acordo com as características do solo e com o tipo de ocupação que o local possui, sendo que quanto mais próximo de 100 estiver o coeficiente, maior será o escoamento superficial e menor a infiltração.

Para estimar o valor do coeficiente CN em diferentes situações, podem ser usados os dados tabelados pela instituição que desenvolveu o método e que consideram quatro principais tipos de solos e diversos usos da terra e condições da cobertura vegetal. Com relação ao tipo de solo, estes podem variar entre as categorias A, B, C e D, sendo que a categoria A compreende solos com características mais arenosas e com maior potencial de infiltração e a categoria D compreende solos mais argilosos. Também, é realizada uma classificação distinta para bacias hidrográficas urbanas e rurais.

Como essas considerações feitas pelo método foram baseadas em experimentos realizados em solos americanos que possuem uma classificação diferente da encontrada no Brasil, Sartori *et al.* (2005) propôs uma modificação para as classes pedológicas equivalentes existentes aqui. Essa conversão foi utilizada para determinar em qual categoria os solos da Bacia do Rio do Boi se encaixavam melhor.

Por ser um coeficiente que leva em consideração a interpretação que o observador tem do local em análise, a determinação de um valor exato para esse parâmetro é difícil, sendo que podem ser encontrados diferentes valores para uma mesma região dependendo da metodologia utilizada. Por esse motivo, para o caso em estudo, essa foi umas das variáveis que foram ajustadas pelo modelo.

Sendo assim, para a sub-bacias em análise, a determinação de uma margem de valores que esse parâmetro pode assumir foi realizada para cada uma delas, considerando o tipo de solo e os usos predominantes que foram apresentados na seção do texto “4.1. Apresentação da área de estudo”. Com a realização da modelagem, será possível determinar os valores que melhor se ajustam à região.

Além disso, esse método permite também considerar as perdas iniciais de água que ocorrem principalmente devido à infiltração. Para fazer uma estimativa desse valor, utilizou-se a fórmula proposta por essa mesma metodologia que considera que as perdas iniciais são equivalentes à 20% da máxima infiltração potencial acumulada, de acordo com a Equação 3.

$$I_a = 0,2 * S \quad (3)$$

Onde:

I_a são as perdas iniciais (mm)

S é a máxima infiltração potencial acumulada que pode ser definida pela Equação 4.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

Onde:

CN é o valor do parâmetro relativo à capacidade de infiltração do terreno

Com relação ao escoamento de base, foram analisados os dados obtidos a partir do sensor de nível do Arroio Perdizes a fim de determinar um valor médio da vazão que se mantém constante nos períodos com ausência de precipitação. Isso foi feito para cada mês do período em análise, já que em cada um deles as condições climáticas são distintas devido principalmente às estações do ano, e assim, pode haver pequenas variações nesse fluxo. Dessa maneira, o valor da vazão referente ao escoamento de base foi considerado constante dentro de cada mês do ano, tendo sido realizados alguns ajustes nos valores durante a calibração do modelo.

Outros elementos que foram considerados no modelo hidrológico foram a evapotranspiração e a interceptação da água da chuva. Para representar a evapotranspiração foi considerada uma perda diária no período baseada na média dos valores obtidos a partir dos boletins mensais do INMET (INMET, 2018). Sendo assim, obteve-se um único valor de evapotranspiração potencial e um único valor de evapotranspiração real para todo o período de análise. A unidade resultante referente a esse dado é mm/dia. O valor obtido foi aplicado para ambas as sub-bacias, pois é um dado mais geral e que não apresenta grandes variações na região já que a bacia hidrográfica em estudo é relativamente pequena.

No que diz respeito à interceptação, que se refere às perdas por retenção da água da chuva em folhas, caules e superfícies impermeáveis, e que aumentam a evaporação da água em detrimento do escoamento (Collischonn *et al.*, 2013), foi considerado um valor constante que foi ajustado e calibrado pelo modelo.

Após inserir todos esses dados no HEC-HMS, a última coisa a fazer é relacionar o modelo hidrológico desenvolvido com os dados meteorológicos da bacia hidrográfica. Assim, pode-se proceder para a calibração dos dados.

5.1.3. Calibração do modelo

Como resultado da modelagem dos dados no HEC-HMS tem-se um hidrograma, que é um gráfico que relaciona a vazão que passa em um ponto de interesse do curso de água com o tempo. A partir desse gráfico, é possível obter informações acerca do momento em que ocorreram as vazões máximas e mínimas e avaliar qual foi a sua intensidade. Também, permite estimar os volumes dos fluxos de água que passaram pelo local.

Para ser possível comparar o hidrograma gerado pelo *software* com o hidrograma que foi realmente observado, é necessário ter uma série de vazões no ponto que está sendo estudado. Nesse caso, os dados referentes ao nível no Arroio Perdizes foram convertidos para valores de vazão a partir da curva-chave desse trecho de drenagem (Figura 12). Depois de efetuada essa conversão, esses dados foram inseridos no programa HEC-HMS no ponto onde foram registradas essas medições.

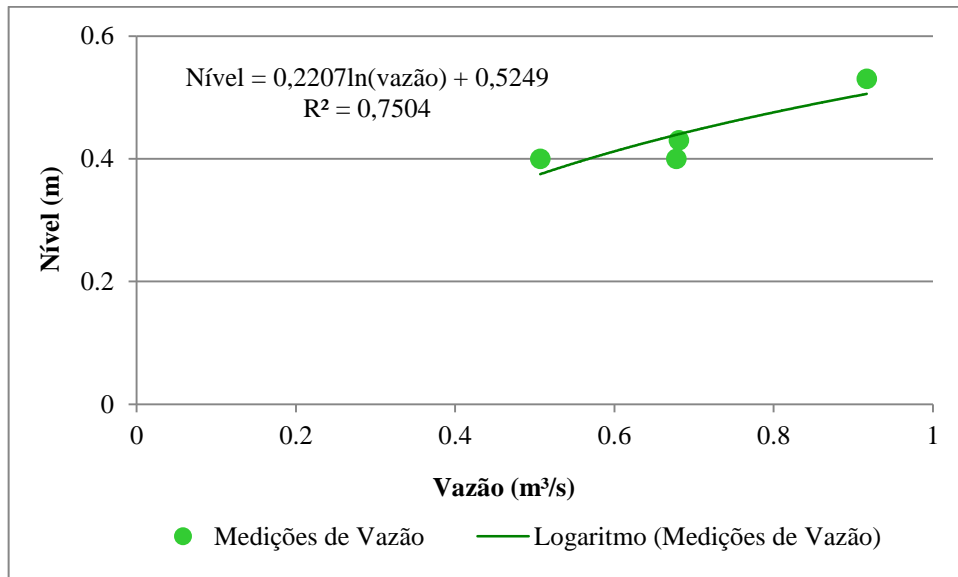


Figura 12 - Curva-chave para o Arroio Perdizes.

FONTE: Adaptado de Bins (2017).

Normalmente, em uma primeira análise, o hidrograma gerado pelo *software* apresenta alguns dados que não são compatíveis com a realidade, ou seja, os valores dos picos das vazões e os volumes dos fluxos de água não são similares aos que realmente ocorreram e foram registrados pelas estações. Essas variações estão relacionadas principalmente aos parâmetros de entrada que foram utilizados e podem resultar em erros no tempo de subida dos picos do hidrograma, deixando-os deslocados, ou erros relacionados à magnitude do evento, resultando em diferentes vazões máximas.

Para que o hidrograma gerado pelo *software* se torne o mais parecido possível com o hidrograma gerado pelos dados registrados pelo sensor, é necessário então realizar uma calibração do modelo. Esse processo pode ser realizado de duas maneiras, manualmente ou de forma automática. No caso em estudo, uma primeira calibração foi realizada manualmente alterando-se alguns dos parâmetros inseridos como dados de entrada no programa dentro de uma margem pré-estabelecida, até que os erros resultantes do modelo se tornassem aceitáveis. Entre os parâmetros que foram calibrados tem-se o coeficiente CN, o tempo de concentração, as perdas iniciais, a evapotranspiração diária, as perdas por interceptação e o máximo armazenamento do solo. Após, um refinamento foi realizado utilizando algoritmos de otimização que são oferecidos pelo programa.

A fim de determinar a qualidade da calibração realizada no modelo gerado foi utilizado o coeficiente de Nash Sutcliffe. Esse coeficiente é um dos mais empregados para determinar o desempenho das aproximações realizadas por modelos hidrológicos. Seu valor

pode variar de menos infinito a 1, sendo que o valor de 1 indica que os modelos possuem perfeito ajuste com os dados observados. Para os casos em que os valores obtidos são menores que zero, utilizar média dos dados observados é melhor do que utilizar as previsões realizadas pelo modelo.

De acordo com Gotschalk e Motovilov (2000), os modelos são considerados aceitáveis se o valor desse coeficiente ficar entre 0,36 e 0,75 e são considerados bons se o valor for maior do que 0,75. Sendo assim, para o trabalho em questão, tentou-se fazer com que o valor desse parâmetro fosse pelo menos aceitável. Além desse coeficiente, também foram analisados a raiz quadrada do erro médio e a média dos erros absolutos para avaliar o desempenho do modelo gerado. Todas essas variáveis em estudo são automaticamente geradas ao rodar o modelo no *software* HEC-HMS.

5.1.4. Validação do modelo

A última etapa dessa primeira parte da análise é validar o modelo gerado. Isso tem por objetivo verificar se os valores dos coeficientes estabelecidos permitem realizar boas aproximações nos hidrogramas de saída se forem considerados outros períodos de análise, além do de calibração. Também, possibilita o uso desses valores em estudos posteriores que forem realizados na mesma área de estudo. Para isso, utilizaram-se os dados referentes ao período compreendido entre 15 de junho de 2018 a 15 de agosto de 2018 e avaliou-se o coeficiente de Nash Sutcliffe resultante.

5.2. MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Tendo posse dos hidrogramas de saída calibrados e validados pelo HEC-HMS, pode-se então proceder para a modelagem hidrodinâmica. No caso em estudo, esta foi realizada no *software* HEC-RAS versão 4.1.0 (Usace-RAS, 2010), também pertencente à *US Army Corps of Engineers*. Como citado anteriormente, esse programa se baseia na resolução das Equações de Saint Venant através do método de diferenças finitas e permite, entre outras funções, propagar os hidrogramas gerados no HEC-HMS para pontos de interesse localizados à jusante na bacia hidrográfica.

Nessa versão utilizada do *software*, são realizadas algumas simplificações para resolver as equações de Saint Venant. Entre elas, é considerado que os fluídos são incompressíveis, que o escoamento só ocorre em uma direção e que as pressões que atuam sobre os fluídos são hidrostáticas. Versões mais recentes desse programa já permitem realizar simulações com escoamentos bidimensionais.

Como dado de entrada necessário à realização dessa modelagem, tem-se primeiramente a caracterização da geometria do corpo hídrico no qual se deseja propagar o hidrograma, podendo ser feita tanto para os rios principais, quanto para seus afluentes. Sendo assim, devem ser inseridas informações referentes à forma do canal e às sinuosidades naturais que estão presentes ao longo de sua extensão.

Além disso, nessa etapa devem ser inseridos no *software* os dados relativos à forma das seções transversais e das planícies de inundação do corpo hídrico em estudo. Isso se faz devido ao fato de que a geometria do canal influencia no modo como o escoamento irá ocorrer, podendo oferecer mais ou menos resistência à passagem dos fluxos de água, o que modifica o perfil de velocidades e o tempo que os picos de vazão levam para percorrer determinado trecho. A geometria do canal também fornece informações acerca da capacidade de escoamento que o curso de água tem, tanto através de sua calha principal, quanto através de seu leito maior.

A obtenção dos dados relativos à forma dessas seções pode ser feita, entre outros métodos, a partir de imagens de satélite, levantamento com o uso de VANTS e de técnicas de topografia. Essa última metodologia é a que apresenta maior precisão com relação à profundidade dos corpos hídricos, porém, é necessário realizar saídas de campo para coletar essas informações, o que dificulta muitas vezes a aquisição desse tipo de dado.

No caso em estudo, como não foi possível ir a campo para coletar esses dados, foi utilizado o MDT adquirido do portal SIGSC que possui resolução espacial de 1 metro para a definição dessas geometrias. Apesar de não ser a melhor técnica para a determinação das seções transversais de um curso de água, ainda mais em um local que possui o terreno com declives acentuados, os modelos oferecem boas aproximações e podem ser utilizados para realizar essas estimativas.

Como normalmente não é possível obter dados das seções transversais para toda a extensão do corpo hídrico em estudo, foi necessário, então, escolher alguns locais que fossem representativos do terreno para caracterizar o todo. Essa escolha levou em consideração,

principalmente, as sinuosidades do leito do rio e mudanças significativas que ocorrem na declividade da calha principal e das margens desse curso hídrico. Após, as seções definidas foram interpoladas através de ferramentas que são oferecidas pelo programa.

Além desses dados, outras informações relativas às geometrias dos corpos hídricos e que são necessárias à realização da modelagem são as distâncias entre as seções que foram determinadas e a largura do canal principal, desconsiderando suas planícies de inundação. Todos esses dados foram obtidos com o auxílio de *softwares* de SIG e após foram inseridos no HEC-RAS.

O último parâmetro de entrada que é necessário determinar para cada seção transversal analisada e para suas planícies de inundação é o número de Manning. Esta é uma variável que representa a rugosidade do canal, sendo correspondente à resistência que o mesmo oferece ao escoamento que passa pelo local. Esse coeficiente varia conforme o material que compõe o fundo e as margens do curso de água, com as irregularidades presentes, com a sinuosidade do canal e com a presença de vegetação (Collischonn *et al.*, 2013). Quanto maior for o valor desse coeficiente, maior será a rugosidade do leito por onde passa o fluxo de água.

Na literatura, é possível encontrar diversas tabelas que apresentam os valores médios do coeficiente de Manning, tanto para canais artificiais quanto para trechos de drenagem naturais, que são baseados em experimentos realizados em laboratório. Para o caso em estudo, a margem de valores utilizada para a determinação do coeficiente de Manning para os cursos de água foi baseada em Boiten (2008) e está apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Faixa de valores utilizados para o coeficiente de Manning em canais naturais.

Tipo de canal e descrição	Coeficiente de Manning ($m^{-1/3}.s$)		
	Mínimo	Normal	Máximo
Canais naturais			
<i>Córregos menores, em planícies</i>			
Limpos, retos, com perfil regular	0,025	0,030	0,033
Limpos, sinuosos, algumas piscinas e baixios	0,033	0,040	0,045
O mesmo do acima, mas irregulares	0,045	0,050	0,060
<i>Rios de montanha</i>			
Fundo de cascalho com poucas pedras	0,030	0,040	0,050
Pedras com grandes pedregulhos	0,040	0,050	0,070
<i>Planícies de inundação</i>			
Pastagens ou áreas cultivadas	0,025	0,035	0,050
Arbustos e árvores	0,035	0,075	0,160

FONTE: Adaptado de BOITEN (2008).

O HEC-RAS permite que diferentes valores do número de Manning sejam inseridos para a o canal principal e para suas planícies de inundação, podendo assim representar com maior precisão a variação desse parâmetro ao longo de uma seção transversal. Como esse é um dado que pode assumir diversos valores e varia conforme a perspectiva de quem está realizando a análise, normalmente ele é um dos parâmetros que podem ser calibrados pelo modelo a fim de ajustar o valor que melhor represente os fenômenos hidrológicos da região.

Em alguns casos, pode também ser necessária a inserção de outros elementos ao longo da extensão do trecho de drenagem. Estruturas como pontes, açudes e vertedouros influenciam no modo como o escoamento ocorre e assim, se estiverem presentes, devem ser representados para que os resultados da modelagem sejam o mais parecido possível com a realidade.

Tendo finalizado a inserção das informações relativas à geometria e às características do canal, deve-se então determinar qual regime de escoamento que se deseja analisar. Como citado anteriormente, os escoamentos podem ser permanentes, quando não ocorrem alterações nos fluxos de água com o tempo, ou não permanentes, quando existem variações da vazão ao longo de um período. Para o caso em estudo, o regime foi considerado como não permanente, pois havia o interesse em simular e analisar a variação do perfil de velocidades e o nível do rio em diferentes pontos com o tempo.

Para realizar essa modelagem é necessário, então, determinar as condições iniciais e as condições de contorno do problema. As condições iniciais se referem às características do escoamento no momento inicial da simulação e são relativas à vazão e à profundidade da lâmina de água. Estas podem ser determinadas realizando uma simulação do escoamento em regime permanente ou fornecendo algum dado de vazão para as seções do trecho analisado. No caso em estudo, foi utilizada como condição inicial a vazão de base do Rio do Boi.

Já as condições de contorno são aplicadas aos limites do espaço físico, ou seja, na seção inicial e final do trecho analisado, sendo necessário ter uma vazão ou altura da lâmina de água nesses pontos. Nessa simulação, os hidrogramas gerados pelo HEC-HMS na primeira etapa do trabalho foram utilizados como condição de contorno para a seção do rio que se localiza mais à montante e a declividade do trecho foi a condição determinada para a seção mais à jusante.

Com isso, todas as informações necessárias ao modelo foram determinadas e assim foi possível realizar a simulação. Os resultados dessa análise fornecem informações relativas à

profundidade do trecho de drenagem e velocidade do escoamento que permitem calcular os índices perigo e, dessa maneira, determinar os momentos em que é seguro realizar a trilha do Rio do Boi.

É importante ressaltar que os modelos hidrodinâmicos não possuem processos de calibração automáticos, devendo então o usuário analisar os resultados e verificar se estão coerentes com a realidade. Para isso, podem ser utilizados dados de cotas de inundação de eventos conhecidos e que foram registrados a fim de comparar com as informações obtidas pela modelagem. Sendo assim, o modelo poderá passar por um processo de aperfeiçoamento alterando parâmetros como, por exemplo, o número de Manning.

5.3. ÍNDICES DE PERIGO

A próxima etapa da análise faz referência à determinação dos índices de perigo aos quais os turistas estão sujeitos ao realizar a trilha. Tomando por base os resultados apresentados pelo HEC-RAS, que são relativos ao perfil de velocidades e profundidades nas seções transversais do Rio do Boi, torna-se possível a definição desse índice e sua comparação com valores tabelados. Como apresentado anteriormente, o índice de perigo é estabelecido através da expressão determinada por Stephenson (2002), que está apresentada abaixo.

$$IP = h * v \quad (5)$$

IP é o índice de perigo

h é a profundidade do rio (metros)

v é a velocidade do escoamento (m/s)

Tomando por base os resultados dessa multiplicação, é possível avaliar em quais momentos é constatado perigo durante a realização da trilha. Sendo assim, quanto maior for o valor do IP, maior é o perigo que existe ao percorrer o trajeto proposto, elevando o risco de uma pessoa ser arrastada pelo escoamento do rio. Os valores do índice de perigo tomados como referência para essa análise foram adaptados daqueles propostos por Cox *et al.* (2010) e estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Classificação do IP.

hv (m ² /s)	Adultos (H.M.* ≥ 50 mkg)
0	Seguro
0 - 0.6	Perigo baixo
0.6 - 0.8	Perigo moderado; perigoso para alguns
0.8 - 1.2	Perigo significativo; perigoso para a maioria
> 1.2	Perigo extremo; perigoso para todos
*H.M. é o produto da altura (<i>height</i>) pela massa (<i>mass</i>) da pessoa.	

FONTE: Adaptado de Cox et al. (2010).

Através da análise do Quadro 3, pode-se concluir que, para valores do índice de perigo superiores a 0,6 m²/s, já é constatado perigo para algumas pessoas, sendo este, então, o critério de fechamento da trilha considerado por esse estudo. Na classificação original proposta por esse autor, apresentada no tópico “3.4. Índices de perigo”, são ainda estabelecidos os valores limitantes desse parâmetro para crianças e idosos. Entretanto, como a realização da trilha não é indicada para menores de 12 anos e nem para pessoas que possuem dificuldade para percorrer trajetos mais longos, foram considerados apenas os valores tabelados dos índices de perigo relativos à categoria dos adultos.

Considerando que se deseja verificar a segurança das pessoas ao realizar o trajeto, a definição desse índice somente foi feita no trecho do Rio do Boi em que os turistas passam durante a realização da trilha. Esse percurso foi mapeado com o auxílio de um GPS pela equipe do GPDEN, permitindo que essas informações fossem plotadas juntamente com os dados das seções transversais definidas anteriormente e, assim, pode-se verificar por quais delas ocorre a passagem dos turistas.

Por fim, o cálculo desse índice foi efetuado para todos os dias do período de dados em que o modelo hidrológico foi calibrado e validado e, dessa maneira, verificaram-se os dias em que a trilha deveria ter ficado fechada tomando como base o valor desse parâmetro.

5.4. QUALIDADE E DESEMPENHO DO MODELO DESENVOLVIDO

Com a finalidade de verificar a qualidade e o desempenho do modelo gerado, os dados referentes aos dias em que a trilha esteve aberta/fechada determinados através do índice de perigo, foram comparados com os registros históricos do parque obtidos a partir do *Twitter* do

PNAS e PNSG. Nessa plataforma são inseridas diariamente informações relativas ao *status* da trilha com base no nível em que se encontra o Arroio Perdizes e o Rio do Boi. As Figuras 13 e 14 apresentam um exemplo das postagens que são realizadas.



Figura 13 - Informações contidas no *Twitter* do PNAS e PNSG.

FONTE: Twitter PNAS (2018).

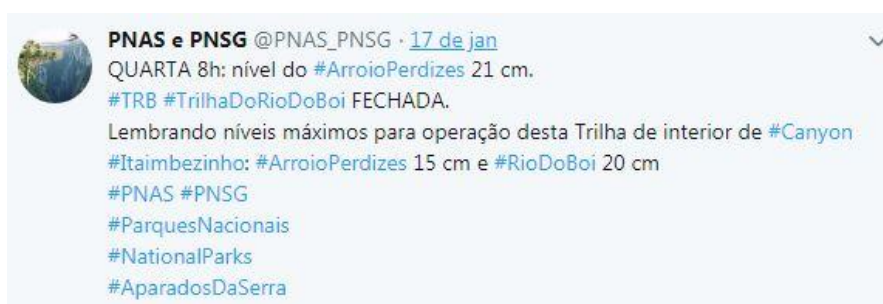


Figura 14 - *Tweet* indicando o nível do Arroio Perdizes e do Rio do Boi e os limites máximos que esses corpos hídricos podem atingir para a trilha estar aberta.

FONTE: Twitter PNAS (2018).

Nos casos em que não havia informações no *Twitter*, foram considerados os registros de nível que são efetuados diariamente no turno da manhã pelos guardas do parque. Entretanto, nessas anotações constam somente os valores do nível em que se encontrava o corpo hídrico no momento da medição, não informando se a trilha estava aberta ou fechada. Nessas situações, o *status* da trilha foi efetuado considerando os limites máximos estabelecidos que estão apresentados na Figura 14.

Tendo posse dessas informações, pode-se proceder para sua análise e comparação. Esta foi realizada com base na metodologia *Relative Operating Characteristic (ROC)* que é uma análise gráfica da medida da capacidade de previsão de um sistema à ocorrência de determinado evento discreto, sendo muito frequente seu uso em estudos de previsão de cheias. Como exemplos de pesquisas que utilizaram esse método para a avaliação de modelos, podem ser citados os trabalhos de Fan (2015) e Bins (2017).

Sendo assim, o primeiro passo para a aplicação dessa metodologia é separar as informações obtidas nos quatro possíveis cenários de ocorrência de um evento, conforme é exposto na tabela de contingência apresentada na Figura 15. Para o caso em estudo, a tabela

foi adaptada de modo a representar qual é o *status* em relação à abertura ou ao fechamento da trilha em um dia qualquer de acordo com o método atual do parque e de acordo com modelo desenvolvido.

		Parque?	
		Fecha	Abre
Modelo?	Fecha	a	b
	Abre	c	d

Figura 15 - Tabela de contingência do método ROC.

FONTE: Adaptado de Bins (2017).

Dessa maneira, cada dia do período analisado foi classificado em um dos quadrantes da tabela de contingência. Por exemplo, se os registros do parque indicam que a trilha estava fechada e o modelo diz que os índices de perigo para aquele dia também foram superiores aos permitidos, esse evento é classificado no quadrante “a”. Já se os níveis dos corpos hídricos estavam abaixo do permitido e o índice de perigo também resultou em um valor baixo, o evento é classificado no quadrante “d”. Esse processo foi repetido para todo o período considerado pelo modelo, tanto para a etapa de calibração, quanto para a etapa de validação dos dados.

Após separar os eventos conforme os quadrantes estabelecidos pela Figura 15, deve-se então calcular o índice de probabilidade de detecção (*Probability of Detection* - POD) e o índice de probabilidade de falsa detecção (*Probability of False Detection* – POFD). Esses parâmetros podem variar seu valor entre zero e um, sendo que quanto maior for o valor do POD e menor for o do POFD, melhor será a qualidade do modelo gerado.

Matematicamente, o POD representa a fração de positivos totais, ou seja, a probabilidade de detecção dos eventos pelo modelo desenvolvido. É determinado pelo número de vezes que foi prevista a excedência de um determinado limiar que realmente aconteceu, em relação ao número total de vezes que ocorreu a excedência. Para o caso em estudo, ele seria equivalente ao percentual de dias em que o modelo previu corretamente o fechamento da trilha em função de todos os dias nos quais a trilha foi fechada pelo parque. Esse índice pode ser expresso através da Equação 6.

$$POD = \frac{a}{a + c} \quad (6)$$

Já o POFD representa a probabilidade de falsa detecção do modelo gerado, podendo ser definido como o percentual de vezes que o modelo previu um evento de excedência sem ele ter realmente acontecido. Seria equivalente a dizer que, de acordo com o modelo, a trilha teria sido fechada sem haver necessidade, ou seja, seria emitido um falso alarme. Essa relação pode ser expressa conforme a Equação 7.

$$POFD = \frac{b}{b + c} \quad (7)$$

A partir dos valores de POD e POFD, pode-se proceder para a elaboração do diagrama ROC. Para isso, é construído um gráfico em que o eixo das abscissas representa os valores de POFD e o eixo das ordenadas representa os valores de POD (Figura 16). A avaliação desses índices para cada modelo desenvolvido resulta em uma coordenada (x,y) que deve então ser plotada no diagrama criado.

Conforme for a localização desse ponto no diagrama, diferente será a qualidade do modelo desenvolvido, sendo utilizada a equação de desempenho da climatologia ($y=x$) para realizar essa comparação. Dessa forma, se os pontos resultantes das análises estiverem localizados acima dessa reta, a qualidade do modelo gerado é considerada boa. Já se os pontos se encontrarem abaixo, o modelo gerado é ruim, sendo que as variáveis avaliadas são mais bem representadas pela equação da climatologia.

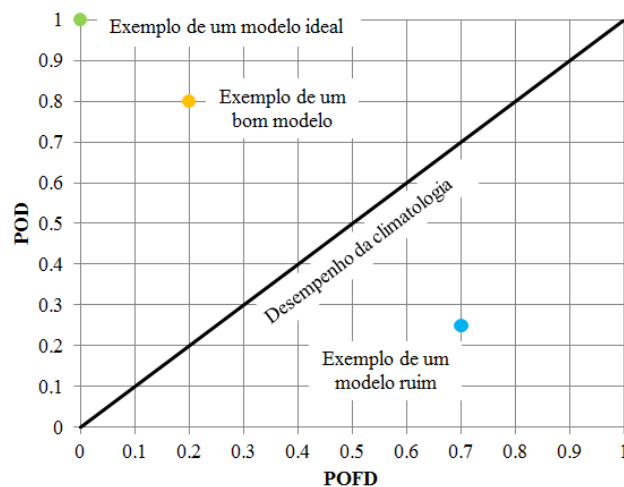


Figura 16- Exemplo de diagrama ROC.

FONTE: Adaptado de Bins (2017).

A aplicação do diagrama ROC permite verificar de forma simples e prática a qualidade e o desempenho do modelo desenvolvido. Realizar esse procedimento é importante, pois, dessa maneira, caso seja verificado que o modelo representa de forma fiel as variáveis ambientais, ele poderá ser utilizado como base para realizar previsões. Caso seja constatado que o modelo gerado é ruim, poderão ser efetuadas outras comparações com a utilização de diferentes métodos de desenvolvimento a fim de aprimorar os resultados obtidos.

Nesse estudo, o objetivo do modelo desenvolvido é que ele possua boa simulação da excedência dos limiares dos índices de perigo, ou seja, que acerte na representação dos eventos que superam os valores limites que levam ao fechamento da trilha e que possam apresentar riscos à segurança dos turistas, sem fechar a trilha sem haver necessidade.

É importante ressaltar que, ao utilizar a tabela de contingência da forma como foi apresentada na Figura 15, considerou-se que o método de fechamento da trilha utilizado pelo parque é o que o modelo tem como objetivo de atingir. Isso seria equivalente a dizer que o método atual utilizado pelo parque está correto, embora se saiba que é uma maneira bastante simplificada de avaliar o *status* da trilha e que não leva em consideração as variáveis hidrometeorológicas que podem influenciar na dinâmica do rio. Entretanto, a verificação foi realizada dessa maneira devido ao fato de que o modelo calibrado nesse estudo é uma primeira aproximação matemática da transformação da chuva que ocorre na área em vazão.

Para fins de comparação dos resultados obtidos, após realizar essa primeira avaliação, uma segunda situação foi considerada. Nela, a tabela de contingência foi invertida de modo a analisar qual seria a capacidade de detecção dos eventos pelo método utilizado pelo parque, se o modelo desenvolvido nesse estudo estivesse sendo usado como forma de determinação da abertura/fechamento da trilha. Dessa forma, a tabela de contingência seria expressa conforme a Figura 17. Com isso, também puderam ser determinados os valores de POD e POFD para esse caso e, conseqüentemente, elaborado o diagrama ROC.

		<u>Modelo?</u>	
		Fecha	Abre
<u>Parque?</u>	Fecha	a	b
	Abre	c	d

Figura 17 - Tabela de contingência do método ROC, considerando que o método utilizado pelo parque objetiva atingir os resultados obtidos pelo modelo gerado.

FONTE: Elaboração Própria (2018).

6. RESULTADOS

6.1. DEFINIÇÃO DAS SUB-BACIAS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Os primeiros resultados das análises realizadas são relativos à divisão da bacia hidrográfica e a caracterização de seus aspectos físicos. Nesse sentido, para o processamento da modelagem hidrológica, foram consideradas apenas duas sub-bacias localizadas na parte superior dos cânions, sendo uma referente à área de drenagem do Arroio Perdizes e outra referente à área de drenagem do Arroio Água Comprida.

O local escolhido para ser o exutório das sub-bacias foi determinado como sendo o ponto de confluência desses dois corpos hídricos, que é também muito próximo ao ponto onde está instalado o sensor de nível do Arroio Perdizes. Como citado na seção anterior do texto, as áreas das sub-bacias foram definidas a partir do MDE obtido do LABGEO e com o auxílio de *softwares* de SIG.

Ao realizar essa divisão, não foi considerada a área total da bacia devido ao fato de que o Rio do Boi não possui uma curva-chave que permita realizar a conversão dos dados do sensor fluviométrico instalado nesse corpo hídrico em vazão. Essa conversão é importante para calibrar os hidrogramas desenvolvidos no HEC-HMS, já que permite que os dados gerados e observados sejam comparados, buscando assim uma maior aproximação entre os dois. Além disso, esse sensor está localizado à jusante do ponto onde se quer determinar os índices de perigo. Nesse sentido, não é necessária a inserção do restante da bacia no modelo hidrológico.

Atualmente, a curva-chave para o Rio do Boi está em fase de criação, sendo assim, estudos futuros poderão utilizar esses dados para aprofundar essa pesquisa. Como o Arroio Perdizes possui uma curva-chave, é possível então realizar a modelagem hidrológica nessa parte da bacia e propagar esse hidrograma através da modelagem hidrodinâmica para os pontos de interesse no Rio do Boi. Mais detalhes dos resultados desse processamento serão apresentados nas próximas seções do texto.

Na Figura 18 está representada a divisão adotada para as sub-bacias, bem como os nomes que foram definidos para cada uma delas, a fim de facilitar a interpretação dos dados obtidos. Já na Tabela 1, estão apresentados os parâmetros relativos às sub-bacias que foram determinados com o auxílio do ArcGIS.

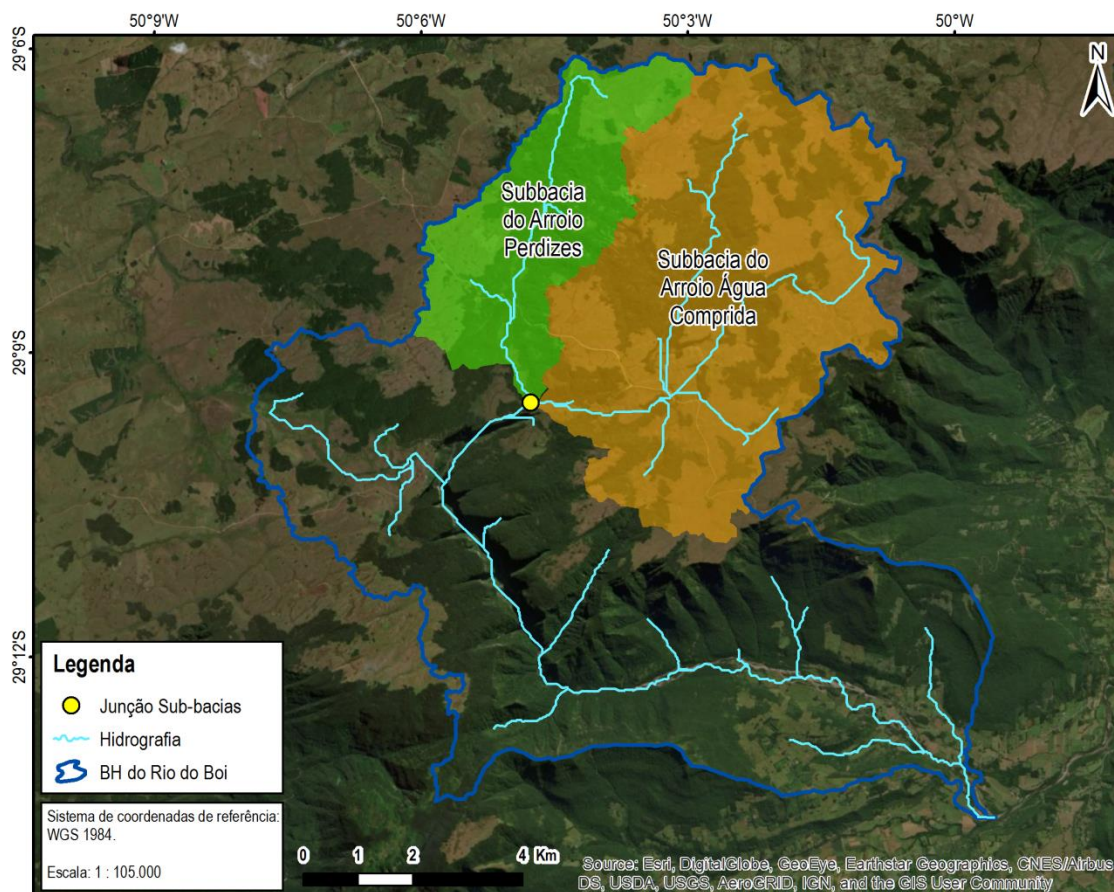


Figura 18 - Divisão das sub-bacias utilizadas para a modelagem hidrológica.

FONTE: Elaboração própria (2018).

Tabela 1 - Características das sub-bacias.

Sub-bacia	Área (km ²)	Declividade (m/m)	Comprimento do rio principal (m)	Estimativa inicial do tempo de concentração (min)
Arroio Perdizes	14,17	0,0179	8.433,05	96,3
Arroio Água Comprida	36,14	0,0154	10.673,50	122,9

FONTE: Elaboração própria (2018).

Com relação aos tipos de solos presentes na Bacia do Rio do Boi e sua capacidade de gerar escoamento ou infiltração da água da chuva, determinou-se que as classes pedológicas onde foi desenvolvido o modelo hidrológico (Cambissolos Háplicos e Húmicos) estão enquadradas na categoria C considerada pelo método SCS-CN. Para realizar essa comparação foi utilizada a conversão proposta por Sartori *et al.* (2005), citada no item “5.1. Modelagem Hidrológica”. Segundo esse mesmo autor, essa categoria inclui solos com baixa resistência à erosão e alto potencial de escoamento.

De acordo com as tabelas padronizadas pela instituição que desenvolveu o método, os valores de CN variam entre 62 e 86, nos casos em que há a presença de florestas em bacias rurais, e entre 70 e 77 no caso de campos permanentes, sendo esses os usos mais presentes na área. Nesse sentido, essa foi a margem de valores desse parâmetro utilizada para calibrar o modelo.

6.2. MODELO HEC-HMS

Tendo posse da divisão das sub-bacias e de suas características físicas, foi possível inserir os dados no HEC-HMS, relacionando as diferentes partes que compõem o modelo hidrológico. Para o caso em questão, isso resultou na inserção de duas sub-bacias e uma junção. A estrutura resultante dessa construção está retratada na Figura 19, onde são apresentados os elementos que foram inseridos no *software* a fim de realizar a modelagem.

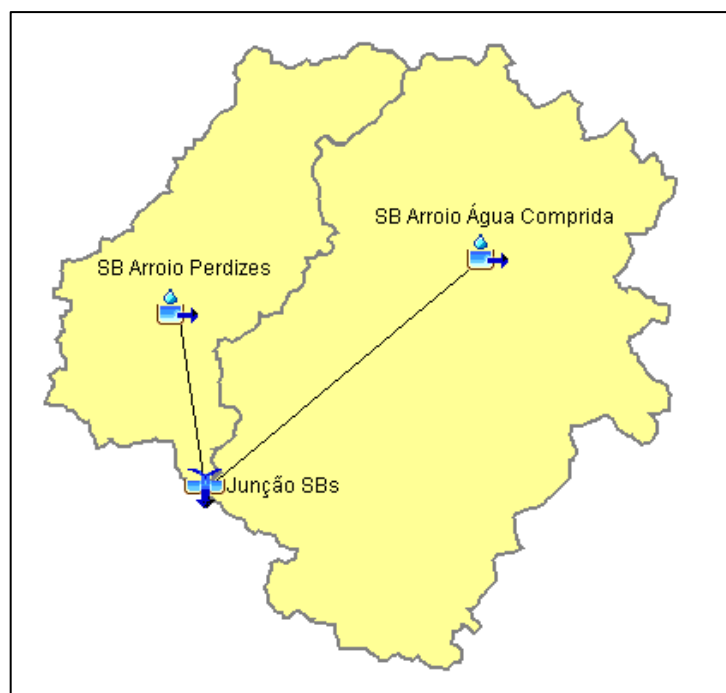


Figura 19 - Representação das sub-bacias no modelo hidrológico HEC-HMS.

FONTE: Elaboração própria (2018).

Após inserir os dados referentes às características físicas das sub-bacias no HEC-HMS e determinar os métodos para análise dos componentes do modelo hidrológico, já definidos na metodologia, rodou-se o modelo. A partir daí foi realizada a etapa da calibração, em que foram testados diferentes valores para os parâmetros de maior incerteza dentro de uma margem pré-estabelecida e que resultassem em uma melhor representação do ciclo

hidrológico no local. Ao atingir um valor considerado como aceitável para o coeficiente de Nash Sutcliffe, foi utilizado um algoritmo de otimização dessa variável, disponível no *software*, para refinar os valores dos parâmetros obtidos.

Como o objetivo do trabalho é tentar propor um critério para o fechamento da trilha a fim de aumentar a segurança dos turistas que realizam o trajeto, nos casos em que não se conseguiu ajustar corretamente os valores das vazões máximas, preferiu-se deixar os picos gerados pelo modelo com valores maiores do que os observados. Isso foi feito levando em consideração questões de segurança, já que é melhor que a trilha seja fechada sem haver motivo, do que ela seja aberta e ocorra algum evento de inundação repentina.

Sendo assim, em uma primeira etapa de calibração, em que foram considerados os dados da série histórica compreendidos entre 17 de novembro de 2017 a 30 de abril de 2018, o valor do coeficiente de Nash Sutcliffe resultante após a otimização do modelo ficou em 0,466, estando dentro da margem considerada como aceitável. Na Tabela 2 estão apresentados os valores otimizados dos parâmetros considerados pelo modelo.

Tabela 2 - Parâmetros referentes às sub-bacias em análise otimizados pelo modelo.

	Sub-bacia	
	Arroio Perdizes	Arroio Água Comprida
Tempo de concentração ajustado (min)	232	265
CN	80,4	81,8
Abstração inicial	1,73	1,04
Armazenamento inicial	1,88	1,38
Máximo armazenamento	10,63	13,09

FONTE: Elaboração própria (2018).

Como se pode perceber através da análise desses dados, os valores dos tempos de concentração resultantes ficaram bem mais elevados do que os estabelecidos pela estimativa inicial considerando a Equação de Kirpich, chegando a ser mais de 50% superior ao dado prévio. A partir dessa informação, chega-se a conclusão que esta não é a melhor expressão para a determinação do tempo de concentração nessa bacia hidrográfica. Entretanto, como foi possível comparar o hidrograma gerado com os observados, puderam-se realizar os ajustes necessários.

Com relação aos resultados dos valores do coeficiente CN, estes ficaram dentro da margem pré-estabelecida. Já para os dados relativos à abstração inicial, armazenamento inicial e máximo armazenamento, a margem de valores utilizada para a calibração foi mais ampla,

deixando a configuração padrão do programa para o ajuste desses dados. Os resultados obtidos são coerentes e não diferem muito daqueles que eram esperados.

Os valores do escoamento de base utilizados para a criação desse modelo foram determinados a partir da vazão que se mantinha aproximadamente constante nos períodos em que não havia precipitação e foram considerados como iguais para as duas sub-bacias. Apesar da região em estudo não apresentar grandes períodos de estiagem que alterem significativamente a vazão de base, esses valores foram definidos para cada mês do ano, já que a sazonalidade pode influenciar nesse escoamento, podendo então haver pequenas variações nesse fluxo entre os meses mais frios e os meses mais quentes. Os dados que melhor se ajustaram ao modelo estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores mensais da vazão de base considerados para cada sub-bacia ao calibrar o modelo.

Mês	Vazão de base (m ³ /s)
Novembro	0,2
Dezembro	0,2
Janeiro	0,15
Fevereiro	0,15
Março	0,15
Abril	0,2

FONTE: Elaboração própria (2018).

Por fim, analisando os dados de evapotranspiração obtidos a partir dos boletins agroclimatológicos do INMET, referentes ao período compreendido entre novembro de 2017 a abril de 2018, considerou-se que a evapotranspiração real diária é em torno de 4 mm/dia. A junção e o processamento de todos esses dados resultaram no hidrograma apresentado pela Figura 20.

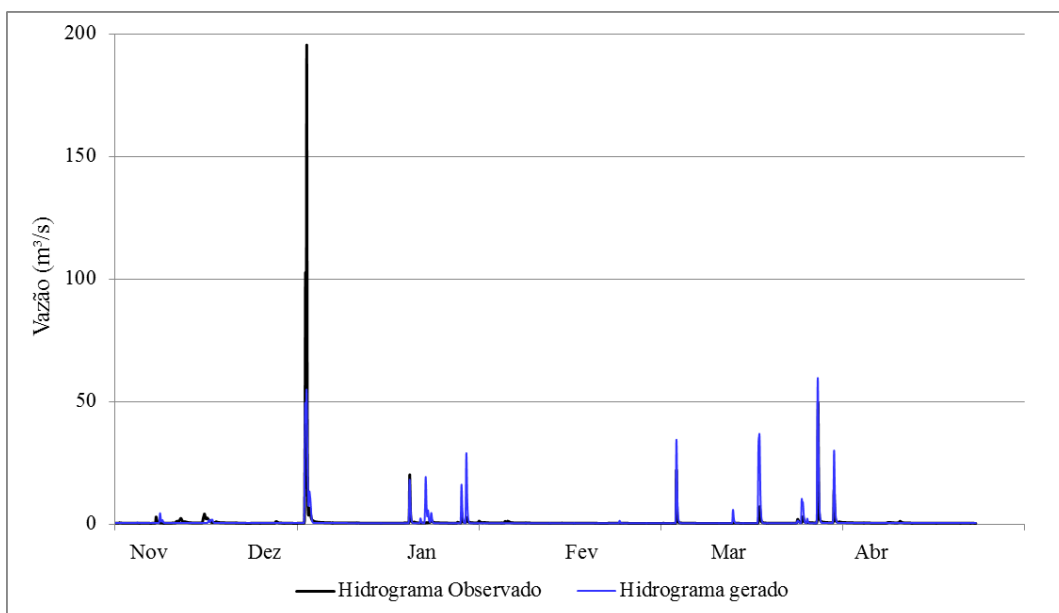


Figura 20 - Hidrograma resultante da etapa de calibração do modelo com a série histórica completa. A linha azul representa o hidrograma gerado pelo modelo e a linha preta é relativa aos dados observados.

FONTE: Elaboração própria (2018).

Através da análise desses hidrogramas, pode-se perceber que os picos de vazão gerados pelo *software* e os picos observados são semelhantes, principalmente com relação ao tempo de subida. Em geral, os eventos de precipitação ocorridos e que foram registrados pelo sensor através da mudança de nível do rio e, conseqüentemente, alteração na vazão, foram retratados no modelo desenvolvido, sendo que na maior parte das vezes os picos estimados pelo HEC-HMS ficaram com valores de vazão um pouco superiores.

Entretanto, ao analisar os resultados dessa primeira aproximação, percebeu-se que o evento de precipitação ocorrido entre os dias 23 e 24 de dezembro, em que foi registrado um total de 94,4 mm em apenas 29 horas, levou à ocorrência de um pico de vazão entre os dias 24 e 25 com um valor de quase 200 m³/s, de acordo com a conversão efetuada com base na curva-chave. Ao efetuar a calibração do modelo para esse período, em nenhum momento se conseguiu aproximar o valor da vazão gerada com esse dado observado.

Como o nível máximo medido para a criação da curva-chave é 0,53 metros e, nesse evento extremo, a régua chegou a marcar 1,689 metros, é possível que haja erros decorrentes dessa conversão de nível em vazão devido à grande extrapolação desses dados. Além disso, como todos os outros picos obtidos com o modelo possuíam valor de vazão superior ao

observado, optou-se por tentar fazer outras tentativas de calibração do modelo desconsiderando somente os dados desse evento.

Sendo assim, foi realizada uma segunda tentativa de calibração removendo os dados da precipitação ocorrida entre os dias 23 e 24 de dezembro, ou seja, ao inserir os dados da série histórica no *software*, os valores relativos à precipitação nesses dois dias foram considerados como zero. Com isso, também foram ajustados os valores de vazão observados a fim de que ficassem similares aos valores do escoamento de base para o mês de dezembro.

Após realizar essas modificações, o modelo passou por um novo processo de calibração e otimização de seus parâmetros. Como resultado, o coeficiente de Nash Sutcliffe ficou com um valor de 0,522, que é bem superior ao que havia sido obtido anteriormente. Os valores do erro médio absoluto e do erro médio quadrado também diminuíram, podendo constatar que, em relação aos parâmetros de qualidade do modelo, essa nova aproximação é melhor que a anterior. Os valores dos coeficientes otimizados estão apresentados na Tabela 4. É importante ressaltar que os dados referentes à evapotranspiração e ao escoamento de base mensal foram considerados idênticos aos da simulação anterior.

Tabela 4 - Parâmetros referentes às sub-bacias em análise otimizados pelo modelo, após a remoção dos dados de precipitação dos dias 23 e 24 de dezembro.

	Sub-bacia	
	Arroio Perdizes	Arroio Água Comprida
Tempo de concentração ajustado (min)	232	265
CN	64,94	66,26
Abstração inicial	38,32	21,66
Armazenamento inicial	0	0
Máximo armazenamento	22,62	22,08

FONTE: Elaboração própria (2018).

A partir da análise das informações contidas nessa tabela, percebe-se que os dados de alguns parâmetros foram significativamente alterados. Os valores do coeficiente CN reduziram bastante, ficando quase no limite inferior da margem proposta. Já a abstração inicial e o máximo armazenamento aumentaram consideravelmente seus valores. O hidrograma resultante desse modelo está apresentado na Figura 21 e os parâmetros para a verificação da qualidade dos modelos desenvolvidos estão expostos na Tabela 5.

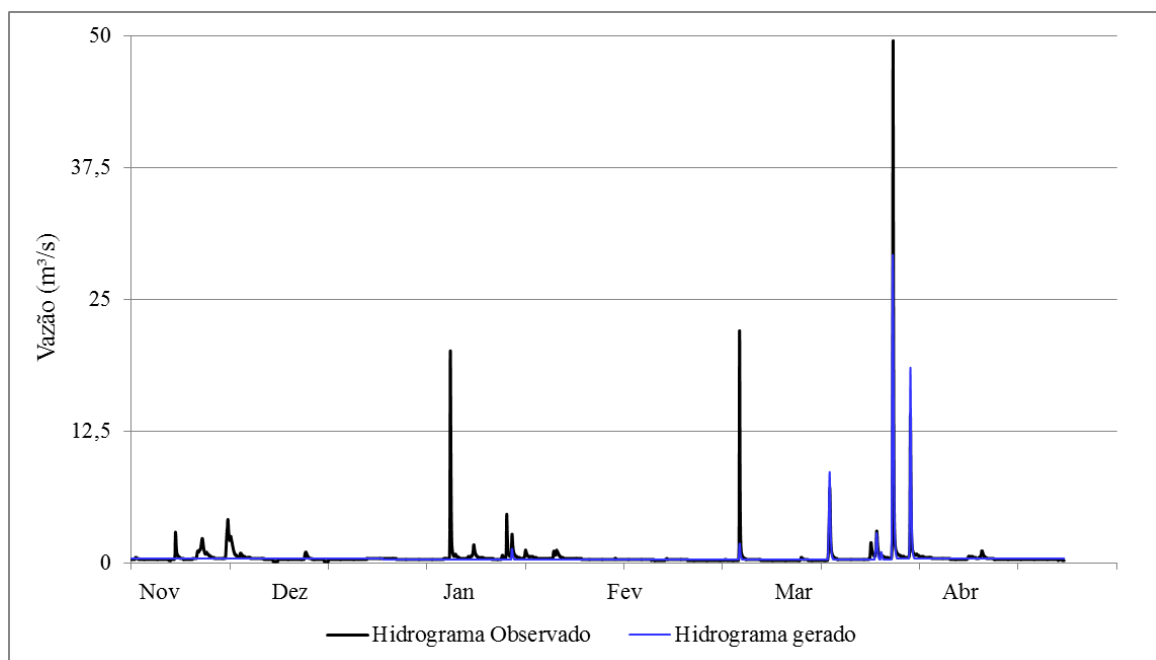


Figura 21 - Hidrogramas resultantes da calibração do modelo desconsiderando o evento de precipitação dos dias 23 e 24 de dezembro. As linhas pretas representam os dados observados e as linhas azuis representam os dados estimados pelo HEC-HMS.

FONTE: Elaboração própria (2018).

Tabela 5 - Dados analisados para verificar a eficiência dos modelos gerados.

Tentativa	Nash Sutcliffe	Erro médio absoluto (m³/s)	Erro médio quadrado (m³/s)
Série completa	0,466	0,6	4,3
Sem dados de maior vazão	0,522	0,2	1,0

FONTE: Elaboração própria (2018).

Apesar de todos os valores dos coeficientes de qualidade serem melhores para a segunda tentativa, nesse novo modelo alguns picos de vazão não foram bem representados, principalmente os que ocorreram nos meses de janeiro e fevereiro. Como o objetivo desse trabalho é justamente analisar a variação do escoamento e a propagação da vazão no Rio do Boi em decorrência de eventos de precipitação, o resultado que se espera do modelo é que os picos gerados e observados sejam o mais semelhantes possível. Esses foram melhor estimados utilizando os coeficientes definidos através da análise com a série histórica completa. Por esse motivo, nas etapas subsequentes do trabalho somente foram utilizados os dados obtidos com a primeira tentativa.

Após ter calibrado o modelo, é necessário realizar a validação do mesmo a fim de corroborar sua eficiência. Isso se faz utilizando os coeficientes obtidos na análise em um

período de dados diferente do utilizado na calibração. Nesse caso, os dados escolhidos para realizar esse processamento estão compreendidos entre os dias 15 de junho e 13 de agosto de 2018, não sendo considerado um maior período de dados devido ao fato de que a série histórica possuía algumas falhas.

Como essa etapa considerou um período do ano diferente da calibração, os valores de evapotranspiração foram alterados já que no inverno a radiação solar e a umidade relativa do ar são diferentes do que no verão e no outono. Do mesmo modo que na calibração, esse dado foi determinado utilizando as informações dos Boletins Agro-Climatológicos do INMET resultando em um valor de 2,95 mm/dia. Nessa etapa também foram inseridos dados referentes ao escoamento de base para os meses de junho, julho e agosto que estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Vazão de base para os meses do ano considerados na validação do modelo.

Mês	Vazão de base (m ³ /s)
Junho	0,2
Julho	0,2
Agosto	0,2

FONTE: Elaboração própria (2018).

Os valores dos coeficientes de erro analisados para verificar a eficiência do modelo obtidos na etapa de validação estão apresentados na Tabela 7 e os hidrogramas resultantes desse processamento estão apresentados na Figura 22.

Tabela 7 - Dados analisados para verificar a eficiência do modelo validado.

Nash Sutcliffe	Erro médio absoluto (m ³ /s)	Erro médio quadrado (m ³ /s)
0,417	0,5	1,7

FONTE: Elaboração própria (2018).

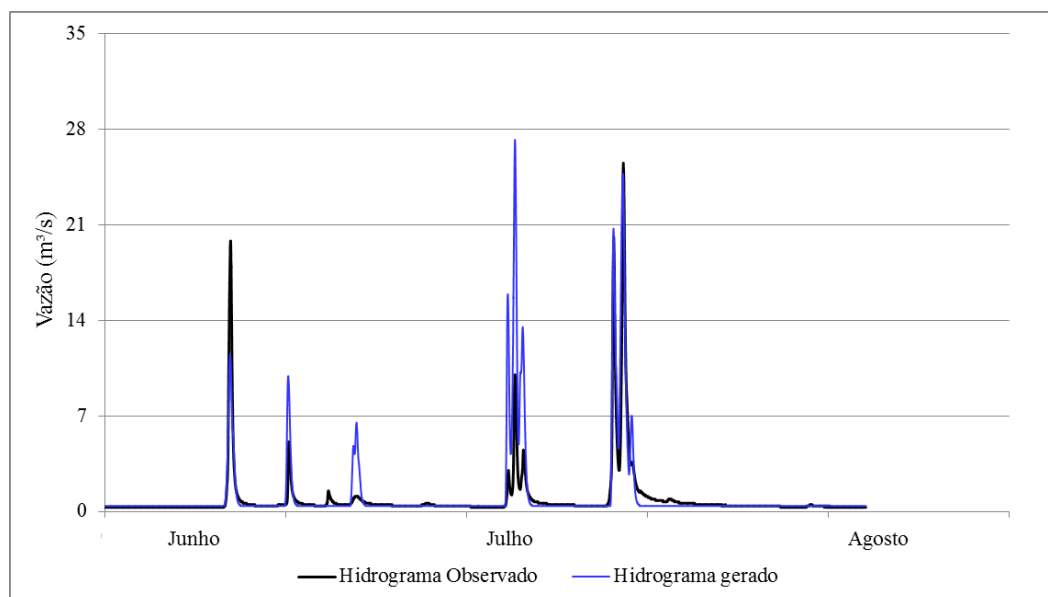


Figura 22 - Hidrograma resultante da etapa de validação do modelo com a série histórica completa. A linha azul representa o hidrograma gerado pelo modelo e a linha preta é relativa aos dados observados.

FONTE: Elaboração própria (2018).

O valor do coeficiente de Nash Sutcliffe resultante da validação do modelo ficou dentro da margem considerada como aceitável e os valores do erro médio absoluto e erro médio quadrado encontrados foram menores do que os para o modelo calibrado. Ao analisar o hidrograma, também é possível perceber que os picos de vazão foram bem representados em todos os eventos de precipitação, podendo então constatar que esse modelo é representativo do ciclo hidrológico do local.

6.3. MODELO HIDRODINÂMICO E ÍNDICES DE PERIGO

Tomando por base os hidrogramas desenvolvidos para o Arroio Perdizes, foi possível propagá-los para o Rio do Boi através da modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS. Para fazer essa análise, o primeiro passo foi determinar os locais onde seria importante adquirir dados referentes às geometrias das seções transversais. Sendo assim, para os pontos em que foi constatado que existem mudanças significativas na declividade ou que há a presença de sinuosidades no leito do rio, foi determinada a forma da seção. Ao todo foram definidas 9 seções transversais no Rio do Boi, que foram interpoladas a cada 75 metros através de ferramentas existentes no programa. A localização dos pontos onde foram coletadas essas informações está apresentada na Figura 23.

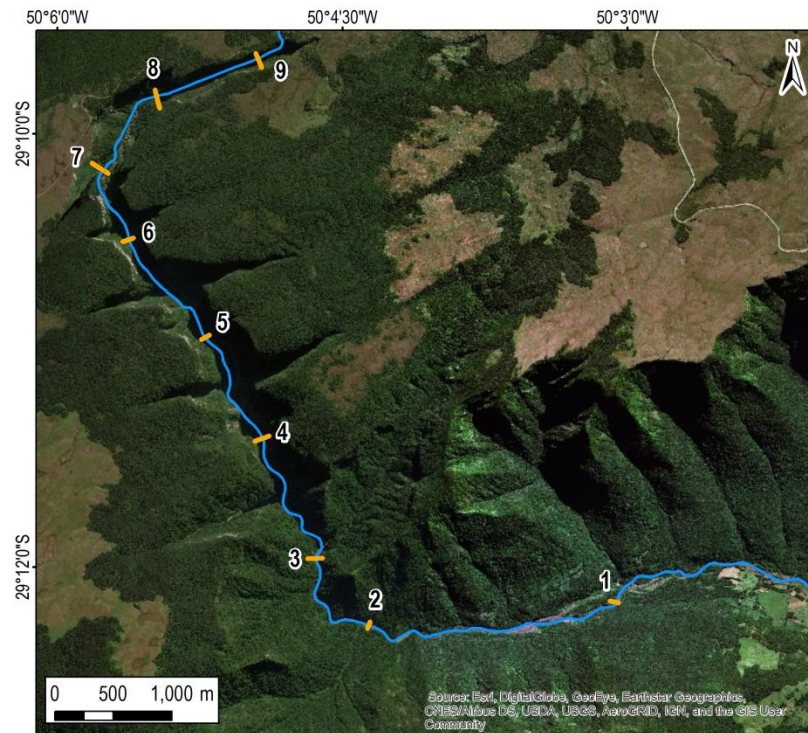


Figura 23 - As linhas em laranja apresentam os locais onde foram determinadas as formas da seção transversal do Rio do Boi.

FONTE: Elaboração própria (2018).

É importante ressaltar que, como a determinação da forma da seção foi realizada a partir de um MDT, as profundidades do rio não são representadas corretamente. Por esse motivo, foi realizado um “aprofundamento” em cada uma das seções considerando a profundidade média do Rio do Boi obtida de dados coletados em campo referentes a algumas seções mapeadas através de técnicas de topografia. Sendo assim, um aprofundamento menor ocorreu próximo às margens, aumentando na medida em que se aproximava do centro do canal.

Com relação ao coeficiente de Manning, foi utilizado para o canal principal o valor de 0,07 referente à classe “*Pedras com grandes pedregulhos*” apresentada no Quadro 2 do subcapítulo “5.2. *Modelo hidrodinâmico*”. Foi escolhido o valor máximo dessa categoria devido ao fato de que valores menores estavam gerando velocidades demasiado elevadas para o escoamento no rio. Isso aconteceu muito provavelmente devido à elevada diferença entre as altitudes de montante e de jusante que esse curso de água possui. Para as planícies de inundação, foi considerado o valor de 0,12, que está entre os valores considerados como normais e os valores máximos da categoria “*Arbustos e árvores*” da mesma tabela citada anteriormente.

Tendo definido a geometria do corpo hídrico em estudo, o próximo passo foi então estabelecer as condições para a resolução do problema. Como condição inicial foi determinado o valor de 0,4 m³/s que é o valor do escoamento de base no exutório das sub-bacias para a maior parte dos meses do ano. Já as condições de contorno devem ser definidas para os limites do espaço físico a ser analisado. Nesse sentido, para a seção localizada à montante foram inseridos os dados dos hidrogramas gerados no HEC-HMS e para a seção localizada à jusante foi utilizado o valor da declividade média do Rio do Boi (0,055 m/m).

Como logo após o sensor fluviométrico do Arroio Perdizes existe uma queda de água com elevada declividade e que influencia no modo como ocorre o escoamento, podendo levar à instabilidades ao rodar o modelo no *software*, nesse trabalho optou-se por considerar que os hidrogramas gerados pelo HEC-HMS eram referentes à parte inferior dos cânions. Sendo assim, o hidrograma de entrada no modelo foi inserido alguns metros mais a frente do que ele realmente ocorreu.

Após rodar o modelo no *software*, os resultados obtidos podem ser visualizados de forma gráfica para todas as seções transversais estabelecidas previamente. Também, é possível acompanhar a variação do nível de água e outras características do escoamento ao longo do tempo através de animações que são geradas automaticamente após rodar o programa.

Como exemplo estão apresentados, na Figura 24, o perfil de uma seção transversal do Rio do Boi, seu nível e sua velocidade de escoamento no instante em análise e na Figura 25 está representado de forma gráfica o fluxo de água em um trecho do Rio do Boi.

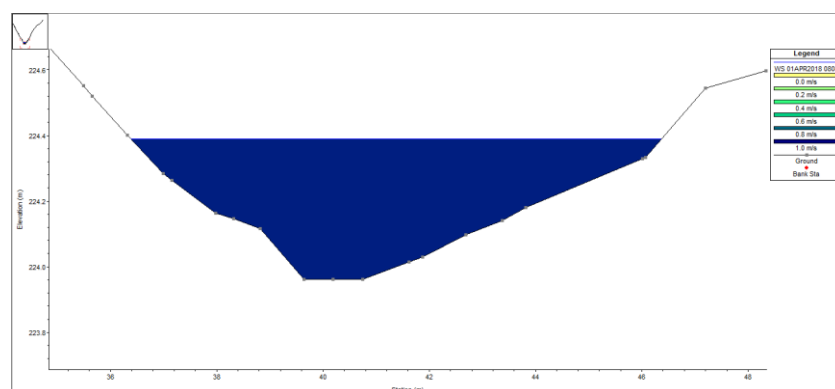


Figura 24 - Exemplo de seção transversal e perfil de velocidades do modelo desenvolvido.

FONTE: Elaboração própria (2018).

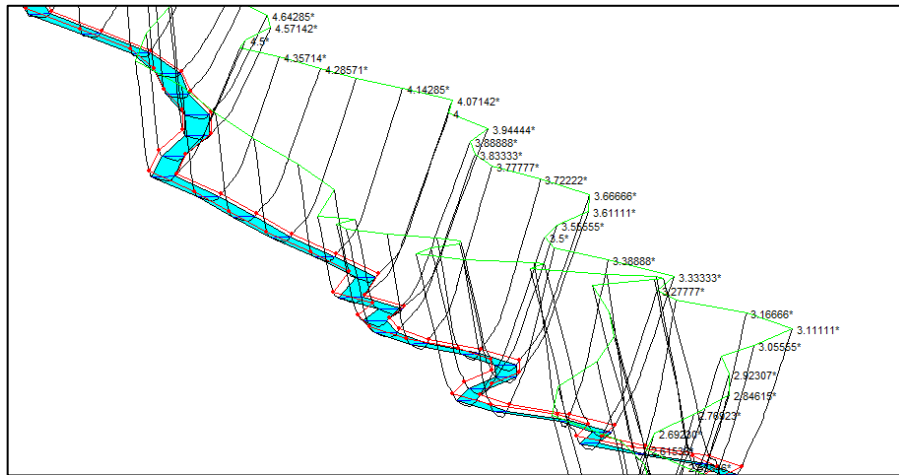


Figura 25 - Representação do escoamento em um trecho do Rio do Boi no software HEC-RAS.

FONTE: Elaboração própria (2018).

Além disso, os dados referentes à altura da superfície de água, velocidade do fluxo do rio e outros parâmetros para cada seção e em cada instante de tempo são apresentados em uma tabela, permitindo assim ao usuário analisar com mais especificidade os resultados obtidos. Nesse sentido, é nesta tabela em que se encontram os dados relativos à profundidade e velocidade do escoamento, necessários ao cálculo dos índices de perigo para período analisado (Figura 26).

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /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 ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
1	9	31MAR2018 1204	0.30	700.40	700.55	700.55	700.59	0.107886	0.85	0.35	4.61	0.98
1	8	31MAR2018 1204	0.64	577.10	577.21	577.21	577.26	0.107474	0.96	0.67	7.20	1.01
1	7	31MAR2018 1204	0.31	534.60	534.69	534.72	534.77	0.444883	1.22	0.25	5.51	1.82
1	6	31MAR2018 1204	0.94	464.40	464.65	464.70	464.81	0.253751	1.77	0.53	4.29	1.61
1	5	31MAR2018 1204	0.59	392.50	392.67		392.70	0.070652	0.76	0.77	8.50	0.81
1	4	31MAR2018 1204	0.41	323.75	323.91		323.93	0.037212	0.70	0.58	4.50	0.62
1	3	31MAR2018 1204	0.49	283.00	283.19	283.19	283.24	0.102090	0.95	0.52	5.39	0.98
1	2	31MAR2018 1204	0.39	254.61	254.80		254.82	0.044393	0.69	0.56	5.05	0.66
1	1	31MAR2018 1204	0.18	198.72	198.79	198.80	198.84	0.197412	0.95	0.19	3.36	1.26

Figura 26 - Exemplo de tabela apresentando os resultados do processamento do modelo.

FONTE: Elaboração própria (2018).

Sendo assim, a determinação da profundidade do canal foi realizada através da diferença entre a altura da superfície de água pela altura mínima do canal, apresentadas na Figura 26 pelas colunas *W.S. Elev* e *Min. Ch. El*, respectivamente. Dessa maneira, é considerada a maior profundidade do corpo hídrico no instante em análise, ou seja, os resultados são calculados a favor da segurança. Com relação à velocidade, o *software* fornece somente um valor médio para todo o canal, sem considerar as variações que ocorrem devido aos efeitos das margens e do fundo, estando esse dado apresentado na coluna “*Vel Chnl*”. Tendo posse das informações, foi possível determinar os índices de perigo.

No caso em estudo, a determinação desse parâmetro foi efetuada para as seções 2, 3 e 4, que são aquelas mais próximas aos locais em que ocorre a passagem dos turistas durante o percurso da trilha, estando apresentadas na Figura 27. Dessa maneira, os dados relativos a essas seções foram salvos em um arquivo *txt* para que os cálculos e outras análises pudessem ser realizados com o auxílio do *software* Excel.

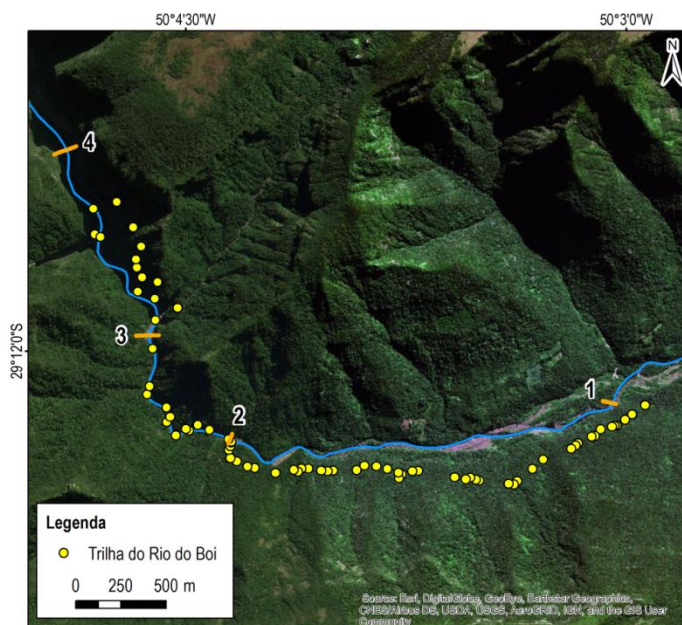


Figura 27 - Os pontos amarelos representam o percurso da Trilha do Rio do Boi mapeada pela equipe do GPDEN e as linhas laranjas representam as seções transversais determinadas para a análise de propagação dos hidrogramas.

FONTE: Elaboração própria (2018).

Como citado anteriormente, após calcular o índice de perigo para todo o período em análise, foram verificados os dias nos quais seu valor superou $0,6 \text{ m}^2/\text{s}$, considerando então que deveria ter ocorrido o fechamento da trilha. É importante ressaltar que, como em alguns dias os índices de perigo superaram o valor estabelecido como limite somente na parte da noite (após 20h), foi considerado que a trilha poderia ter sido aberta. Sendo assim, de um total de 225 dias analisados, somente em 25 dias esse valor superou os limites estabelecidos pela classificação utilizada, não sendo possível realizar o passeio.

Na Tabela 8 estão apresentados os dados referentes ao fechamento da trilha para cada mês do período analisado obtidos a partir do modelo desenvolvido. No mês de maio e no início de junho o sensor de nível do Arroio Perdizes não estava funcionando, portanto nesse

período a série histórica apresentava falhas e, dessa forma, não havia dados para serem processados.

Tabela 8 - Tabela resumo dos dados relativos à análise do fechamento da trilha a partir dos dados do índice de perigo.

Data	Nº dias analisados	Percentual de dias analisados	Nº fechamentos	Percentual de dias analisados com fechamento
Nov/2017	14	47%	1	7%
Dez/2017	31	100%	3	10%
Jan/2018	31	100%	5	16%
Fev/2018	28	100%	0	0%
Mar/2018	31	100%	6	19%
Abr/2018	30	100%	2	7%
Mai/2018	0	0%	0	-
Jun/2018	16	53%	2	13%
Jul/2018	31	100%	6	19%
Ago/2018	13	42%	0	0%

FONTE: Elaboração própria (2018).

A partir dos dados presentes na Tabela 8, pode-se perceber que os meses de novembro e abril são os que apresentaram menor percentual de dias com fechamento. Entretanto, novembro tem apenas 47% dos dias analisados, podendo ter ocorrido eventos de precipitação com consequente aumento do nível do rio e fechamento da trilha na parte do mês que não foi analisada.

Já os meses de março e julho são aqueles em que ocorreu maior número de fechamentos da trilha, chegando a quase 20% do total dos dias analisados. Esse fato reforça a importância da realização do presente trabalho, já que situações consideradas de risco acontecem com uma elevada frequência durante o ano, sendo relevante então haver um sistema de monitoramento e alerta confiável e eficiente para aumentar a segurança das pessoas que realizam esse trajeto.

Por fim, é apresentado como um exemplo, o gráfico referente à variação do índice de perigo para o mês de janeiro obtido a partir do modelo desenvolvido (Figura 28). A linha laranja representa a variação desse parâmetro ao longo do mês e a linha bordo representa o

critério estabelecido como limite para o fechamento da trilha, o que possibilita identificar claramente os dias nos quais o valor desse índice superou os permitidos.

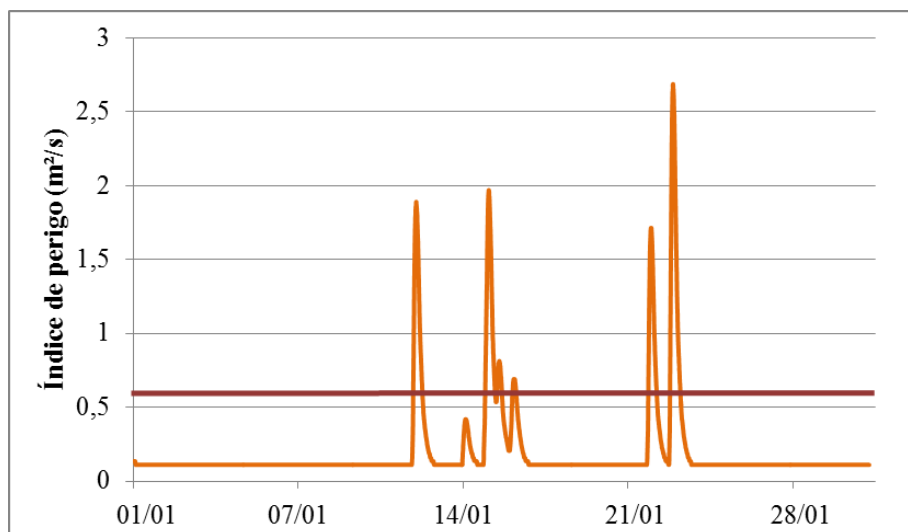


Figura 28 - Variação do índice de perigo ao longo do mês de janeiro referente à seção 2.

FONTE: Elaboração própria (2018).

6.4. DIAGRAMA ROC

Com o objetivo de avaliar a fidelidade dos dados obtidos a partir do modelo, os mesmos foram comparados com os registros de abertura e fechamento da trilha realizados pelo parque conforme a metodologia apresentada na seção “5.4. Verificação da qualidade e desempenho do modelo desenvolvido”. Sendo assim, primeiramente serão discutidos os resultados da situação considerada pela tabela de contingência da Figura 15.

Ao realizar essa comparação, os dados foram separados de acordo com os 4 possíveis cenários de ocorrência dos eventos e foi contabilizado o número de vezes que cada um deles ocorreu, resultando nos dados apresentados na Figura 29.

Vale ressaltar que, para alguns dias dos meses de novembro e dezembro de 2017, não foram obtidos dados acerca da abertura ou fechamento da trilha nem nos registros do parque nem no *Twitter* do PNAS e PNSG. Sendo assim, para as análises realizadas, foram considerados apenas os dias que possuíam dados tanto para o modelo desenvolvido, quanto para os arquivos do parque. Isso reduziu o número de dias em análise de 225 para 204, já que além da ausência desses registros do parque, o modelo já não possuía dados relativos ao mês de maio e início de junho.

		<u>Parque?</u>	
		Fecha	Abre
<u>Modelo?</u>	Fecha	19	6
	Abre	14	165

Figura 29 - Número de ocorrências em cada possível cenário no período analisado.

FONTE: Elaboração própria (2018).

A partir da Figura 29, percebe-se que a maior parte das ocorrências é referente ao quadrante “d”, em que o modelo e o parque abriram a trilha para visitação, representando aproximadamente 81% do total das ocorrências. Já os casos em que o modelo e o parque fecharam a trilha são equivalentes a 9,31% do total.

Os casos em que o parque fechou a trilha e o modelo a manteve aberta são considerados como sendo os de maior perigo, já que o uso do modelo poderia estar colocando em risco a seguranças das pessoas por não prever corretamente a varia o da vazão e permitir a realiza o do percurso. Esses representam 6,86% do total dos eventos avaliados. A fim de verificar mais afundo a origem das diferenças presentes nos dias em que ocorreram essas situa es, os índices de perigo para esses dias foram analisados separadamente.

Dessa forma, pode-se perceber que a diferença na classifica o do *status* em rela o   abertura ou fechamento a trilha entre o modelo e os registros do parque são relativos   ocorrência de três situa es diferentes. A primeira tem rela o ao tempo de recessão dos hidrogramas gerados pelo modelo. Em algumas situa es o hidrograma desenvolvido possui tempo de recessão menor do que o hidrograma observado, ou seja, a onda de cheia gerada termina mais rápido do que ela realmente ocorreu. Sendo assim, as vazões calculadas foram menores do que as reais e, dessa forma, o  ndice de perigo resultou em um valor abaixo do permitido. A Figura 30 apresenta um exemplo desse tipo de caso, que ocorreu nos dias 27 e 28 de julho.

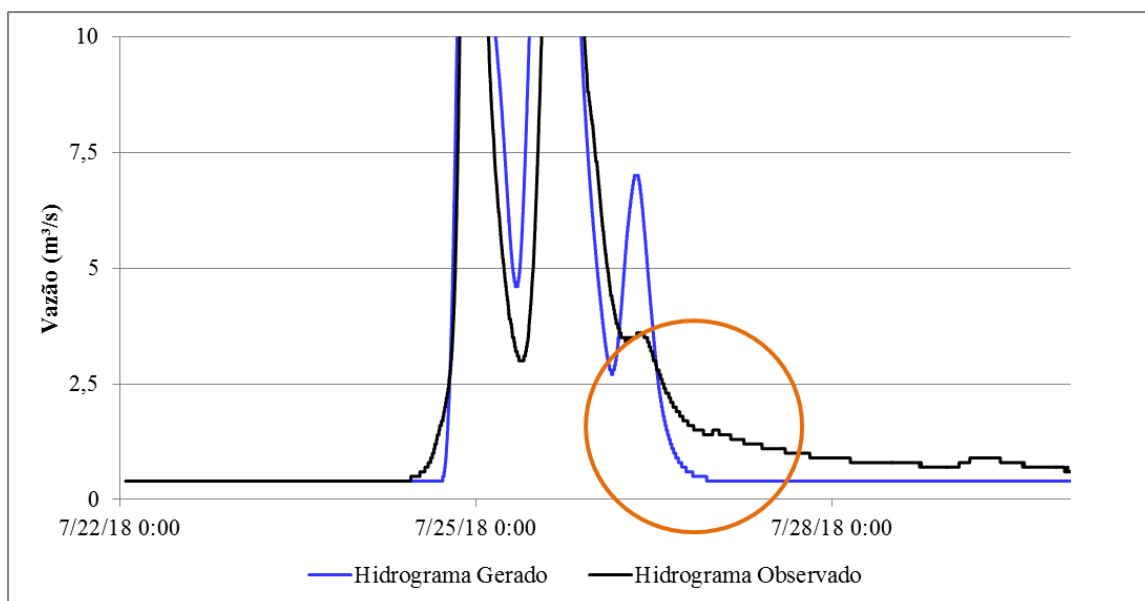


Figura 30 - Diferença nos tempos de recessão dos hidrogramas gerado (linhas azuis) e observado (linhas pretas).
FONTE: Elaboração própria (2018).

A segunda situação tem referencia aos picos de vazão que não foram representados pelo modelo. Na maior parte das situações, esses são picos de menores valores de vazão em comparação com os outros observados e o modelo acabou não representando a variação do fluxo de água corretamente. Um exemplo dessa situação ocorreu no dia 30 de novembro e está apresentado na Figura 31.

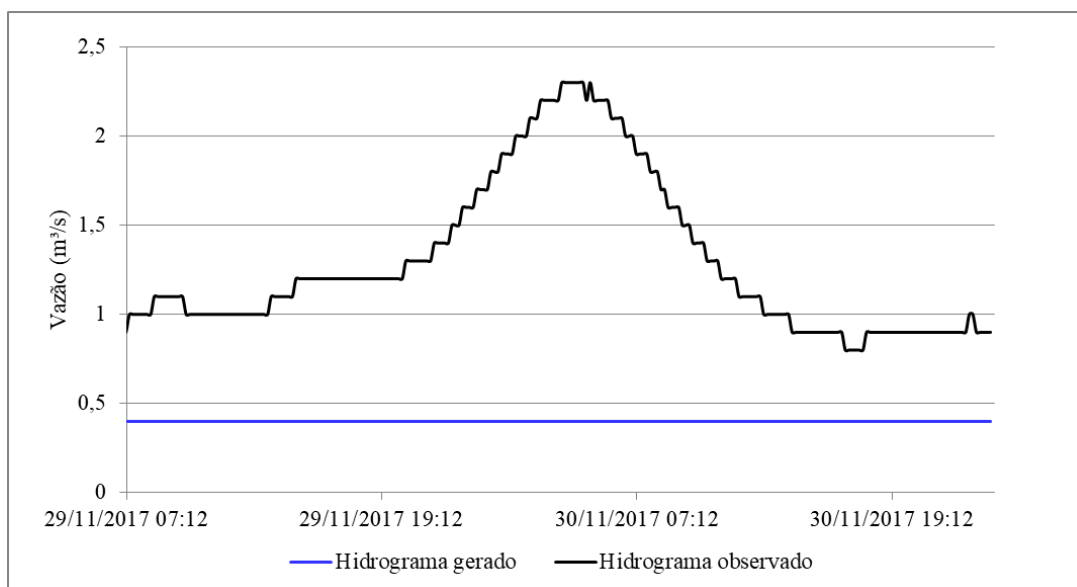


Figura 31 - A linha preta representa o hidrograma observado e a linha azul o desenvolvido.
FONTE: Elaboração própria (2018).

Na última situação verificada, os índices de perigo determinados pelo modelo aumentaram significativamente com a passagem da onda de cheia, mas não atingiram o valor considerado como limite para o fechamento da trilha. Sendo assim, esta pode ser uma diferença resultante dos níveis de tolerância dos índices de perigo estabelecidos pelo modelo e pelo parque.

Além de todos esses casos, foram verificadas algumas situações em que não ocorreram variações nos valores das vazões observadas e, mesmo assim, a trilha foi fechada. Isso pode ter ocorrido em decorrência de outros fatores, como riscos a deslizamentos, ou a trilha pode ter sido fechada como precaução sem ter ocorrido evento de precipitação nenhum, ou seja, um falso alarme.

O último cenário a ser analisado faz referência aos casos em que o modelo fechou a trilha e o parque não, representando 2,94% do total de ocorrências. Essa situação se verificou devido ao fato de que, como os picos gerados pelo modelo desenvolveram tentaram aproximar as vazões do evento de precipitação ocorrido nos dias 24 e 25 de dezembro, que possuía um valor de quase 200 m³/s, os picos de vazão dos outros eventos de precipitação ficaram com valores superiores aos observados. Sendo assim, a trilha acabou sendo fechada pelo modelo desenvolvido em alguns dias em que a vazão observada era baixa e não apresentava riscos à segurança. Um exemplo dessa situação está apresentado na Figura 32.

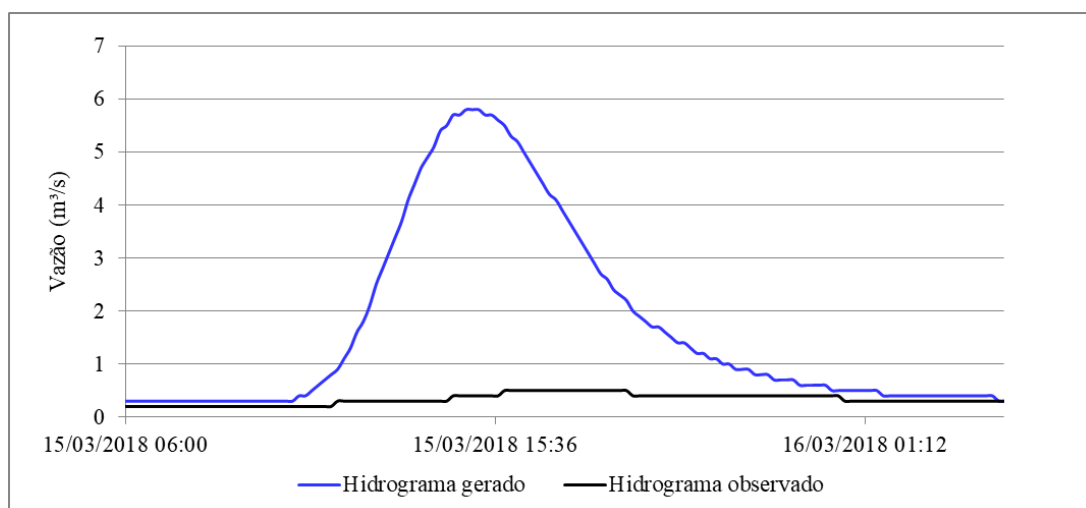


Figura 32 - Exemplo de situação em que o hidrograma gerado é maior do que o observado, ocasionando o fechamento da trilha sem haver necessidade.

FONTE: Elaboração própria (2018).

Após realizar todas essas análises, determinou-se os valores dos coeficientes POD e POFD a partir das fórmulas 6 e 7 apresentadas na seção “5.4. Verificação do desempenho e

qualidade do modelo desenvolvido”. Isso resultou em um valor de 0,57 para o POD e de 0,3 para o POFD. Ao colocar esses dados no diagrama ROC, percebe-se que apesar de terem sido verificadas algumas diferenças entre os dados observados e gerados, o modelo desenvolvido é considerado como bom. Na Figura 33 está apresentado o diagrama ROC construído por esse estudo e a comparação com a equação de desempenho da climatologia.

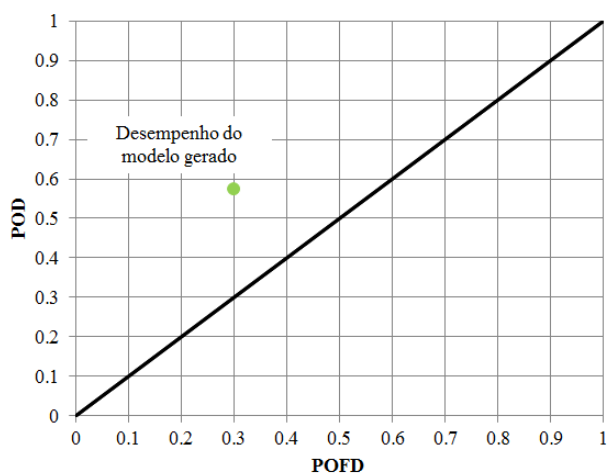


Figura 33 - Diagrama ROC representando o desempenho do modelo gerado.

FONTE: Elaboração própria (2018).

A partir das informações obtidas, percebe-se que modelo desenvolvido apresenta boa eficiência quando considerado que o mesmo tem como objetivo apresentar resultados semelhantes ao método atualmente utilizado pelo parque. Entretanto, apesar dos valores de POD e POFD classificarem o modelo como sendo bom, como o mesmo foi gerado com a finalidade de auxiliar na tomada de decisão em relação à abertura ou ao fechamento da trilha, de modo a garantir a segurança de quem realiza o percurso e minimizar os riscos presentes, o modelo deve passar por aprimoramentos e uma fase de teste antes de ser posto em prática.

Por fim, foi realizada uma análise de desempenho do modelo de maneira inversa conforme apresentado na tabela de contingência da Figura 17. Nela foi verificada a capacidade de detecção dos eventos pelo método utilizado pelo parque, considerando que o modelo gerado estivesse sendo usado como critério para a determinação do *status* da trilha, ou seja, a situação inversa da anteriormente descrita. A partir disso, obtém-se a tabela de contingência que está apresentada na Figura 34. A diferença entre ela e a tabela exposta na Figura 29 são apenas os valores dos coeficientes “b” e “c”.

		<u>Modelo?</u>	
		Fecha	Abre
<u>Parque?</u>	Fecha	19	14
	Abre	6	165

Figura 34 – Número de ocorrências em cada cenário considerando a tabela de contingência apresentada na Figura 17.

Fonte: Elaboração própria (2018).

O cálculo dos valores de POD e POFD para essa situação resulta em 0,76 e 0,7 respectivamente. Ao plotar esses dados no diagrama ROC (Figura 35), percebe-se que o método do parque também é considerado como bom de acordo com a proposta de verificação utilizada, embora o ponto gerado esteja muito próximo à equação de desempenho da climatologia. Também, apesar do valor de POD ser superior ao da situação anteriormente considerada, o valor de POFD aumentou bastante, ou seja, vários falsos alarmes teriam sido emitidos. Isso leva a concluir que, o método utilizado pelo parque não é tão eficiente se for considerado que o modelo representa mais fielmente as variáveis ambientais.

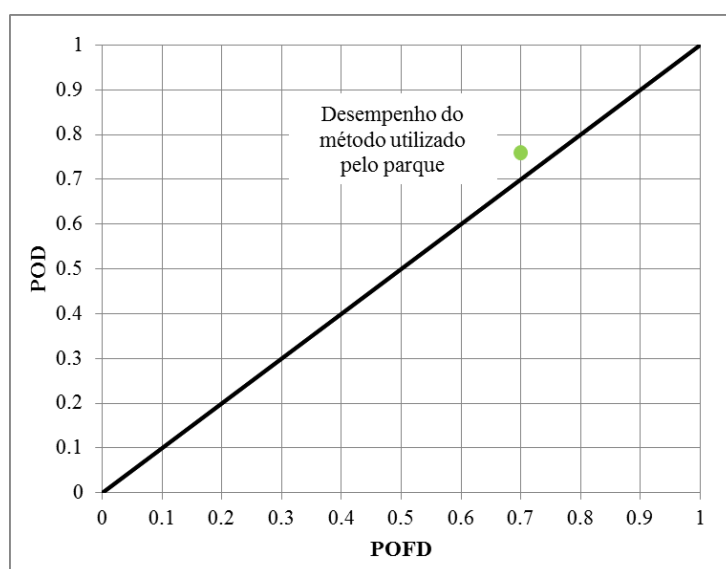


Figura 35 - Desempenho do método utilizado pelo parque como critério de fechamento, considerando que o modelo calibrado é o que se objetiva atingir.

Fonte: Elaboração própria (2018).

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao analisar o desenvolvimento do estudo como um todo, pode-se perceber que o uso de técnicas de modelagem que buscam representar os fenômenos que ocorrem na natureza é uma tarefa complexa, já que este é um sistema dinâmico e está em constante transformação. Dessa forma, existem diversas aproximações que podem ser realizadas utilizando diferentes métodos e técnicas de análise, sendo que a escolha da mais adequada varia conforme o objetivo que se queira alcançar.

Apesar dos modelos não conseguirem representar de forma perfeita o que ocorre na realidade, seu desenvolvimento é importante já que permite simular e prever eventos e situações diferentes das observadas. No caso em estudo, a previsão e a simulação da passagem da onda de cheia permite garantir maior segurança às pessoas durante a realização da Trilha do Rio do Boi.

Tomando por base os resultados aqui obtidos, pode-se constatar que o modelo desenvolvido pode ser utilizado para integrar um sistema de previsão para a trilha, desde que sejam respeitadas às restrições relacionadas ao desempenho das simulações realizadas. Desta forma, uma das recomendações para trabalhos futuros é continuar aprimorando o modelo a partir do uso de séries históricas que compreendam um maior período de dados, permitindo analisar, além das variações sazonais de precipitação e vazão da região, as variações interanuais.

Nesse sentido, é essencial que se mantenham as atividades relacionadas aos sistemas de monitoramento das variáveis hidrometeorológicas com alta resolução temporal, pois, assim, correlações mais confiáveis poderão ser estabelecidas. Além disso, é necessário obter mais dados para a criação da curva chave do Arroio Perdizes e do Rio do Boi que permitam relacionar com maior precisão o nível e a vazão desses corpos hídricos. Dessa forma, será possível calibrar com mais fidelidade os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, principalmente no caso de eventos extremos.

Conservar a prática de registrar os dados relativos à abertura e ao fechamento da trilha no *Twitter* e pelos guardas do parque também é importante, já que na análise realizada essas anotações permitiram comparar os dados obtidos a partir do modelo com o que realmente ocorreu, estabelecendo uma relação matemática entre as variáveis. Sem o uso dessas

informações, não seria possível determinar se o modelo desenvolvido havia representado de forma adequada a realidade ou se as aproximações realizadas tinham sido falhas.

O aprimoramento do modelo obtido também poderá ser realizado através da obtenção de dados de campo referentes à topografia do terreno e batimetria dos cursos de água. Dessa maneira, será possível representar com melhor grau de precisão as seções transversais dos corpos d'água e, conseqüentemente, as condições do escoamento.

Por fim, a realização de testes em modo de previsão que utilizem como base dados de chuva esperada pode auxiliar a verificar a taxa de erros e acertos do modelo. Isso permite realizar as mudanças e os aperfeiçoamentos que se julgarem necessários de modo que as respostas obtidas através do modelo resultem em dados cada vez mais similares com o que ocorre na realidade. Isso trará contribuições na tomada de decisão com relação à abertura e ao fechamento da trilha, buscando sempre evitar a ocorrência de situações emergenciais e que gerem riscos à segurança e ao bem estar das pessoas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. ANA. **Sala de situação**. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/sala-de-situacao>>. Acesso em: 25 ago. 2018.

BLAINSKI, Éverton; GARBOSSA, Luis Hamilton Pospissil; ANTUNES, Eduardo Nathan. **Estações hidrometeorológicas automáticas: recomendações técnicas para instalação**. 2012.

BINS, Rodrigo Borges da Fonseca. **Contribuições para a previsão de cheias e fechamento da Trilha do rio do Boi-Cânion do Itaimbezinho, RS**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Curso de Engenharia Ambiental. Porto Alegre, 2018.

BOITEN, Wubbo; BOITEN, Wubbo. **Hydrometry: IHE Delft lecture note series**. CRC Press, 2008.

CHEN, K.; MCANENEY, J.; BLONG, R.; LEIGH R.; HUNTER, L.; MAGILL, C. Defining area at risk and its effect in catastrophe loss estimation: a dasymetric mapping approach. **Applied Geography**, v. 24, 2004. p. 97-117.

CHU, Xuefeng; STEINMAN, Alan. Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 135, n. 1, p. 119-124, 2009.

CLARKE, Robin T.; DIAS, PL Silva. As necessidades de observação e monitoramento dos ambientes brasileiros quanto aos recursos hídricos. **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Recursos Hídricos**. Brasília, 2003.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. **Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, 2013.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. CPRM. **Rede hidrometeorológica nacional – RHN**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Apresentacao/Rede-Hidrometeorologica-Nacional---RHN-304.html>>. Acesso em: 25 ago. 2018.

COTES, Marcial et al. Avaliação do nível de dificuldade da trilha interpretativa do ecoparque de una aspectos físicos, biológicos e parâmetros de esforço físico dos visitantes. **Revista Brasileira de Ciências do Esporte**, v. 28, n. 3, p. 191-207, 2007.

COX, R. J.; SHAND, T. D.; BLACKA, M. J. Australian Rainfall and Runoff revision project 10: appropriate safety criteria for people. **Water Research**, v. 978, 2010.

DECINA, Thiago Galvão Tiradentes; BRANDÃO, João Luiz Boccia. Performance analysis of structural and non-structural flood control measures in an urban watershed. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 207-217, 2016.

DIAS, F.S.; ROTUNNO FILHO, O.C. & PECLY, J.O.G. **Definição de rede de monitoramento hidrometeorológico com suporte de sensoriamento remoto na Bacia do Dois Rios – RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

ENDRES, Ana Valéria. Sustentabilidade e ecoturismo: conflitos e soluções a caminho do desenvolvimento. **Revista Turismo em análise**, v. 9, n. 1, p. 37-50, 1998.

FAN, Fernando Mainardi; COLLISCHONN, Walter. Integração do modelo MGB-IPH com sistema de informação geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 243-254, 2014.

FAN, F. M. *et al.* Verification of inflow into hydropower reservoirs using ensemble forecasts of the TIGGE database for large scale basins in Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 196-227, 2015.

FERNANDEZ, Paulo; MOURATO, Sandra; MOREIRA, Madalena. Comparação dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na delimitação de zonas inundáveis. **Revista de recursos hídricos**, v. 34, n. 1, 2013.

FREITAS, Marcos Airton de Souza; DE SOUSA PORTO, Adonai. Considerações Sobre um Modelo Determinístico Chuva-Vazão Aplicado a Bacias do Semi-Árido Nordeste. **Revista Tecnologia**, v. 11, n. 1, 1990.

FUNDAÇÃO ZOOBOTÂNICA. Diário Oficial do estado do Rio Grande do Sul. **Lista vermelha de espécies ameaçadas**. 2014.

GOERL, Roberto Fabris; KOBIYAMA, Masato; PELLERIN, Joel Robert Georges Marcel. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: estudo de caso do município de Rio Negrinho–SC. **Boletim de Geografia**, v. 30, n. 1, p. 81-100, 2012.

GÓES, Valéria Camboim. **Simulação hidrológico-hidrodinâmica integrada ao geoprocessamento para avaliação da macrodenagem em centros urbanos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2009.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. Macro–scale hydrological modelling–a scandinavian experience. In: **International Symposium on: ‘Can science and society save the water crisis in the 21st century–Reports from the World**. p. 38-45. 2000.

GOVERNO DO ESTADO DE SANTA CATARINA. Sistema de Informações Geográficas. 2018.

HICKS, F. E.; PEACOCK, T. Suitability of HEC-RAS for flood forecasting. **Canadian Water Resources Journal**, v. 30, n. 2, p. 159-174, 2005.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. **Journal of hydrology**, v. 268, n. 1-4, p. 87-99, 2002.

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS. INPE. **Monitoramento hidrometeorológico auxilia a defesa civil do Vale do Paraíba**. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=2153>. Acesso em: 03 ago. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Boletins Agroclimatológicos**. Disponível em: <www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=agrometeorologia/boletimAgroclimatologico>. Acesso em: 30 set. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. INMET. **Estações automáticas**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

KNEBL, M. R. et al. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. **Journal of Environmental Management**, v. 75, n. 4, p. 325-336, 2005.

KOBIYAMA, Masato; MANFROI, O. J. Importância da modelagem e monitoramento em bacias hidrográficas. **Curso de Extensão: Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal. Curitiba: Curso de Eng. Florestal–UFPR**, p. 111-118, 1999.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O.; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading. 109 p., 2006.

LOU, Rodrigo Furtado. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

MACEDO, Renê Lebarbenchon. **Estudo hidrológico da Bacia do Rio Negrinho utilizando o HEC-HMS**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina. Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis, 2010.

MARINHO FILHO, Gilberto Milhomem et al. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2013.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano de manejo do Parque Nacional de Aparados da Serra e Serra Geral**. Encarte 1 – contextualização. 2003.

MONTEIRO, Leonardo Romero. **Mapeamento das áreas de perigo de inundação no Braço do Baú, Ilhota-SC**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina. Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis, 2011.

MONTEIRO, L. R.; KOBIYAMA, M.; ZAMBRANO, F. C. Mapeamento de Perigo de Inundação. **Porto Alegre: UFRGS/IPH/GPDEN**, 2015.

MOORE, Robert J.; BELL, Victoria A.; JONES, David A. Forecasting for flood warning. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 337, n. 1-2, p. 203-217, 2005.

OLIVEIRA, Luciana Cristina Krau. **Papel do monitoramento e da previsão de vazões no gerenciamento de bacias hidrográficas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias estudo de caso: bacia do rio Solimões**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Porto Alegre, 2009.

RIBEIRO NETO, A. et al. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 2, 2015.

SALA DE SITUAÇÃO. **Monitoramento, prevenção e mapeamento de eventos hidrológicos**. Disponível em: < <http://saladesituacao.rs.gov.br/>>. Acesso em: 26 ago. 2018.

SANTOS, Laércio Leal. MODELOS HIDRÁULICOS-HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 3, p. 1-19, 2009.

SARTORI, Aderson; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, Abel Maia. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005.

SCHUSTER, Raíza Cristovão. **Desenvolvimento de um modelo hidrológico de transformação chuva-vazão e propagação de vazão em reservatórios**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Curso de Engenharia Ambiental. Porto Alegre, 2014.

SILVEIRA, André Luiz Lopes. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 1, pg. 05-23, 2005.

STEPHENSON, David. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. **Urban Water**, v. 4, n. 4, p. 423-428, 2002.

TIMBADIYA, Prafulkumar V.; PATEL, Prem Lal; POREY, Prakash D. Calibration of HEC-RAS model on prediction of flood for lower Tapi River, India. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 3, n. 11, p. 805, 2011.

TUCCI, Carlos EM et al. **Modelos hidrológicos**. UFRGS, 2005.

USACE-HEC. Hydrologic Modeling System, **HEC-HMS v4.2.1 – User’s Manual**. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 614 p., 2016.

USACE-RAS. River Analysis System, **HEC-RAS v4.1.0 – User’s Manual**. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 417 p., 2010.

UNDP. **Reducing Disaster Risk: a Challenge for Development**. New York, 2004.

VIOLA, Marcelo R. et al. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 581-590, 2009.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S. 2004. **Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação**. Porto Alegre, UFRGS Centro de Ecologia. ISBN 978-85-63843-02-9. Disponível em: <<http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>>.

YANG, Jie; TOWNSEND, Ronald D.; DANESHFAR, Bahram. Applying the HEC-RAS model and GIS techniques in river network floodplain delineation. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 33, n. 1, p. 19-28, 2006.

ZAMBRANO, Fernando Campo. **Avaliação do perigo de inundações bruscas por meio de modelagem hidrogeomorfológica: estudo de caso, Bacia do Arroio Forromeco-RS**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

Anexo 4 – Fichas de avaliação do TCC
(a ser preenchida pela Banca Examinadora no momento da apresentação do trabalho)

APRESENTAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

DATA: _____

NOME DO ALUNO(A): _____

TÍTULO DO TRABALHO: _____

EXAMINADOR: PROF. _____

		NOTA
Conteúdo do trabalho (CT)	peso 6	
Apresentação escrita (AE)	peso 2	
Apresentação oral (AO)	peso 2	
NOTA FINAL		

AVALIAÇÃO DO TRABALHO:

PARECER FINAL : APROVADO

 NÃO APROVADO Justificativa:

Porto Alegre, _____ de _____ de 2012.

Assinatura Professor Examinador

APROVADO EM REUNIÃO CONGRAD-AMB: em ____ / ____ / ____

REGISTRO NA CONGRAD-AMB: em ____ / ____ / ____

Por: _____

PARECER FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

NOME DO ALUNO(A): _____

TÍTULO DO TRABALHO: _____

Banca	Professor	Departamento	Conteúdo do trabalho (CT)	Apresentação escrita (AE)	Apresentação oral (AO)	Média	Assinatura
Orientador							
Co-Orientador							
Examinador							
Examinador							
MÉDIA FINAL							

PARECER FINAL : APROVADO NÃO APROVADO Porto Alegre, _____ de _____ de 2012.

Assinatura Professor Orientador

APROVADO EM REUNIÃO CONGRAD-AMB: em ____/____/____

REGISTRO NA CONGRAD-AMB: em ____/____/____

Por: _____

TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

SEMESTRE: _____

DECLARAÇÃO VERSÃO FINAL DO TCC : PÓS-DEFESA

Declaro que o Trabalho de Conclusão de Curso do aluno (a) _____

intitulado _____

está corrigido, como proposto pela banca examinadora, estando disponível em sua versão final, podendo ser impresso e publicado.

Porto Alegre, de _____ de 2012

Prof. Orientador :

REGISTRO NA COMGRAD-AMB: em ____ / ____ / ____

Por: _____