

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA COMO FERRAMENTA PARA AUXILIAR NO CRITÉRIO DE FECHAMENTO DA TRILHA DO RIO DO BOI (RS e SC)**

*Marina Refatti Fagundes<sup>1</sup> ; Fernando Mainardi Fan<sup>2</sup> & Maurício Andrades Paixão<sup>3</sup>*

**RESUMO** – A Trilha do Rio do Boi é um destino muito procurado por turistas que buscam realizar atividades em ambientes naturais. O trajeto percorrido durante esse passeio está localizado no interior do cânion Itaimbezinho e acompanha na maior parte do tempo o leito do rio. Por esse motivo, não é sempre que é possível realizar esse percurso já que a força do escoamento pode expor as pessoas a situações de risco. Atualmente, o critério para o fechamento da trilha está baseado somente na medição do nível do rio, sem avaliar outras variáveis. Nesse sentido, o presente trabalho buscou auxiliar na determinação de um critério de fechamento que considerasse as condições hidrometeorológicas do local, utilizando para isso simulações hidrológicas e hidrodinâmicas, necessárias ao cálculo do índice de perigo. A partir dessas análises, puderam ser determinados os dias em que a trilha deveria ter ficado fechada, chegando a ser de até 19% do total de dias analisados nos meses de março e julho. Esse fato ressalta a importância da realização dessa pesquisa, já que a abertura indevida da trilha pode levar à ocorrência de acidentes. Por fim, através da metodologia ROC, pode ser avaliada a qualidade do modelo gerado, sendo considerada como satisfatória.

**ABSTRACT**– The Rio do Boi Trail is a place that many tourists look for the realization of activities in natural environments. The track is located in the middle of Itaimbezinho Canyon and accompanies in the most part of the time the riverbed. For this reason, is not always that is possible to perform this tour, since that the force of the flow can expose the people to risk situations. Nowadays, the closing criterion of the trail is based only on river level, without evaluating other variables. In this way, this research sought to help to define the criteria for the closure that take into account the climatic variation of this place. To do that, hydrological and hydrodynamic models were used to serve as a base to the determination of the hazard index. From these analysis, were defined the days that the trail should have been closed, reaching 19% of the analyzed days in march and july. This fact emphasizes the importance of the realization of this research, because an improper opening of the trail may cause accidents. Finally, through the methodology ROC, the quality of the model was evaluated, being considered as satisfactory.

**Palavras-Chave** – Modelo HEC-HMS, modelo hidrodinâmico, índice de perigo.

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. Avenida Bento Gonçalves 9500, CEP 91509-900. Telefone: (51) 3308-6686. E-mail: marinarf95@hotmail.com.br

2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. Avenida Bento Gonçalves 9500, CEP 91509-900. Telefone: (51) 3308-6686. E-mail: fernando.fan@ufrgs.br

3) Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. Avenida Bento Gonçalves 9500, CEP 91509-900. Telefone: (51) 3308-6686. E-mail: mauricio.paixao@ufrgs.br

## INTRODUÇÃO

O Parque Nacional Aparados da Serra (PNAS) é um destino muito procurado por turistas para a realização de atividades em ambientes naturais, sendo uma de suas principais atrações a Trilha do Rio do Boi. Como a trilha em questão fica localizada no interior do cânion Itaimbezinho e acompanha na maior parte do tempo o leito do rio, não é sempre que é possível realizar esse trajeto, já que a força do fluxo de água pode expor as pessoas a situações de perigo.

Atualmente, o critério utilizado para o fechamento da trilha não considera quaisquer variáveis hidrometeorológicas que possam influenciar nas condições de escoamento do corpo hídrico. Nesse sentido, o presente trabalho buscou auxiliar na definição de critérios para o fechamento da trilha que levassem em consideração as variações climáticas existentes.

Para isso, foi utilizado o modelo hidrológico HEC-HMS e o modelo hidrodinâmico HEC-RAS como ferramentas para auxiliar na determinação do índice de perigo aos quais os turistas estão sujeitos ao cruzar o leito do rio. Os resultados obtidos a partir dessa análise foram comparados com os registros históricos do parque através da metodologia ROC (*Relative Operative Characteristics*) a fim de verificar a qualidade dos modelos gerados. 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 de ocorrerem acidentes e outras situações indesejadas.

## CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio do Boi, objeto desse estudo, 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), possuindo área total de aproximadamente 112,87 km<sup>2</sup>. Seus principais afluentes são o Arroio Água Comprida e o Arroio Perdizes que se juntam ainda na parte superior dos cânions, um pouco antes de uma das cachoeiras mais importantes do local.

Atualmente, o sistema de monitoramento automático das variáveis hidrometeorológicas no parque é realizado através de uma estação meteorológica e dois sensores fluviométricos, sendo que um dos sensores fica localizado no Arroio Perdizes, na parte superior dos cânions, e o outro no Rio do Boi. Já a estação meteorológica fica localizada próxima a sede do PNAS, também na parte superior dos cânions (Figura 1). Todos esses equipamentos foram instalados por Bins (2018) em parceria com o Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN) e possuem dados desde outubro de 2017.

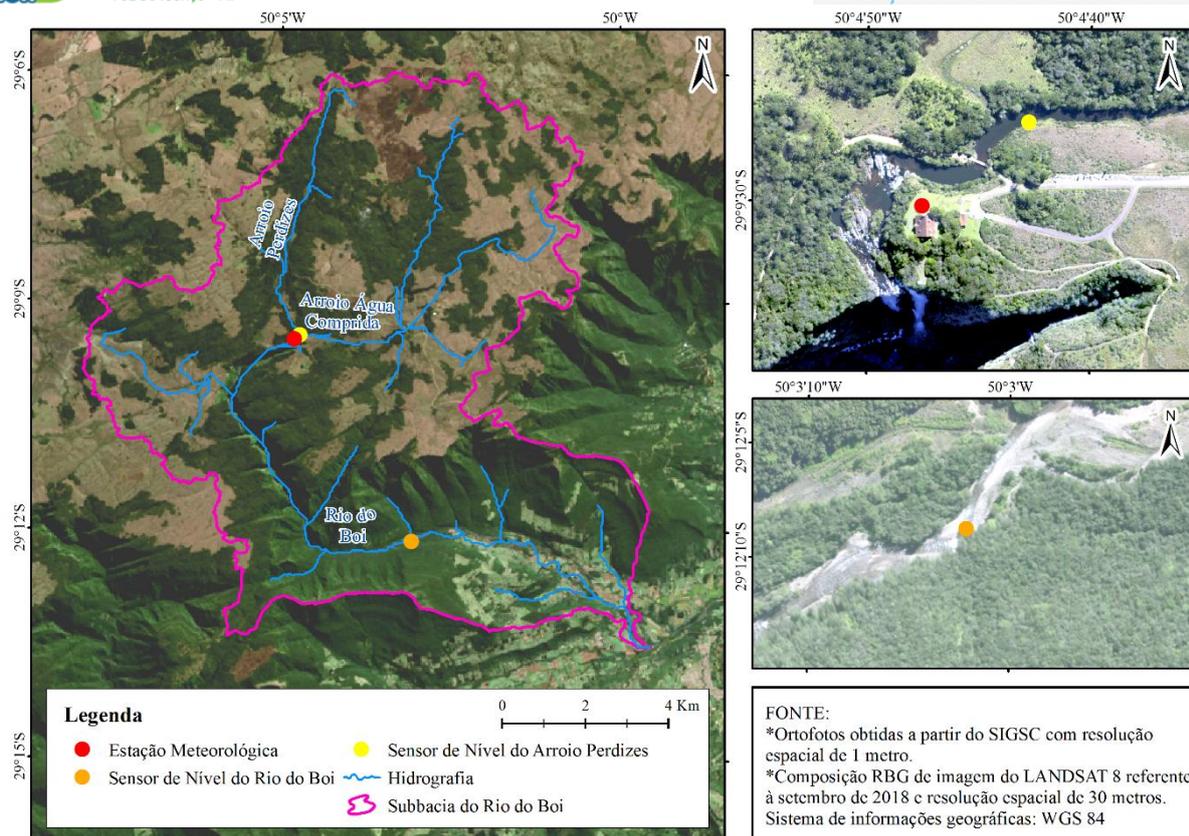


Figura 1 – Apresentação da área de estudo e localização das estações de monitoramento hidrometeorológico na bacia hidrográfica do Rio do Boi.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de alcançar os objetivos propostos por esse estudo, a metodologia do trabalho foi dividida em quatro partes principais, conforme está apresentado na Figura 2 e será explicado com mais detalhes nas seções subsequentes do texto.

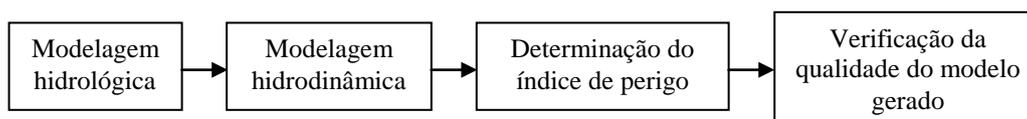


Figura 2 - Fluxograma das etapas que foram realizadas no desenvolvimento do presente trabalho.

### Modelagem hidrológica

A primeira etapa do trabalho consistiu na realização de uma modelagem hidrológica de transformação da chuva em vazão, sendo utilizado para isso o *software* HEC-HMS versão 4.2.1 da *US Army Corps of Engineers* (Usace-HEC, 2016). Como dado de entrada necessário a esse processamento, foi utilizada a série histórica de precipitação da estação meteorológica referida na seção anterior do texto. Os dados possuem resolução temporal de 10 minutos e o período de análise está compreendido entre novembro de 2017 a agosto de 2018.

Além dessas informações, foram utilizados os dados dos Mapas Mensais dos Boletins Agro-Climatológicos do INMET referentes à evapotranspiração potencial e real que ocorre na região.

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, que está baseado na determinação de um coeficiente que varia com o tipo e a ocupação do solo do local.

No caso em estudo, a realização da modelagem hidrológica considerou apenas duas sub-bacias, sendo uma referente à área de drenagem do Arroio Perdizes e a outra referente à área de drenagem do Arroio Água Comprida. O local escolhido para ser o exutório foi determinado como sendo o ponto onde esses dois arroios se unem.

Após a inserção e tratamento dos dados no *software*, os hidrogramas de saída passaram pelas etapas de calibração e validação, utilizando para isso os dados da estação fluviométrica instalada no Arroio Perdizes, referentes ao mesmo período de dados da estação meteorológica, e a curva-chave desenvolvida para esse corpo hídrico. Mais especificamente, a etapa de calibração do modelo considerou o período compreendido entre novembro de 2017 a abril de 2018 e a etapa de validação o período compreendido entre junho a agosto de 2018. Esse processamento foi realizado a fim de que os resultados obtidos ficassem o mais parecido possível com os dados observados e fossem representativos caso utilizadas séries históricas referentes a outros períodos que não os de calibração.

Com a finalidade de determinar a qualidade do processamento realizado, foi utilizado o coeficiente de Nash-Sutcliffe, que é um dos mais empregados para determinar o desempenho das aproximações realizadas por modelos hidrológicos. No caso em estudo, foi considerado que modelos que resultassem em valores que variam entre 0,36 a 0,75 são considerados aceitáveis e para valores acima de 0,75 são considerados bons (Gotschalk e Motovilov, 2000).

### **Modelagem hidrodinâmica e índices de perigo**

Tendo posse dos hidrogramas de saída gerados através da modelagem hidrológica, foi possível propagá-los para pontos de interesse localizados à jusante através da 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*. Vale ressaltar que a modelagem hidrodinâmica foi realizada devido ao fato de que esse processamento possibilita obter as informações necessárias ao cálculo do índice de perigo nos pontos onde ocorre a travessia do rio pelos turistas durante a realização da trilha.

Além dos hidrogramas, outros dados de entrada que são necessários à realização dessa simulação, são o número de Manning e informações relativas às características físicas do corpo hídrico em estudo, como, por exemplo, variação da forma da seção transversal ao longo do trecho em análise e largura do canal principal. Esses últimos dados foram obtidos através de técnicas de geoprocessamento e ferramentas de SIG, utilizando para isso um MDT adquirido no portal do

SIGSC com resolução espacial de 1 metro. Já o número de Manning foi determinado através de calibração, utilizando como base uma faixa de valores estabelecida por Boiten (2008).

A simulação foi realizada em regime não permanente considerando como condição inicial o escoamento de base do Rio do Boi e como condição de contorno hidrogramas gerados pelo HEC-HMS e a declividade do trecho em análise.

Como resultado dessa análise, têm-se informações relativas à profundidade do trecho de drenagem e velocidade média do escoamento. A multiplicação desses dois parâmetros permite com que seja calculado o índice perigo conforme estabelecido por Stephenson (2002). Os valores desse índice tomados como referência para considerar uma situação como segura ou não foram adaptados daqueles propostos por Cox *et al.* (2010), tendo sido adotado o valor de 0,6 m<sup>2</sup>/s como limite para o caso em estudo.

Como a modelagem hidrodinâmica resulta em valores de velocidade e profundidade para cada instante do período analisado, também é possível determinar o índice de perigo para todos os momentos desejados. Sendo assim, 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.

### Comparação dos dados obtidos com os registros do *Twitter* do PNAS

Com a finalidade de verificar a qualidade e o desempenho do modelo gerado, os dados referentes aos dias em que a trilha foi considerada como aberta ou fechada determinados através do índice de perigo, foram comparados com os registros históricos do parque. Esses foram obtidos a partir do *Twitter* do PNAS, plataforma na qual são inseridas diariamente informações relativas ao *status* da trilha tomando como base o nível em que se encontra o Arroio Perdizes e o Rio do Boi. Na Figura 3 está apresentado um exemplo de postagem que foi realizada.

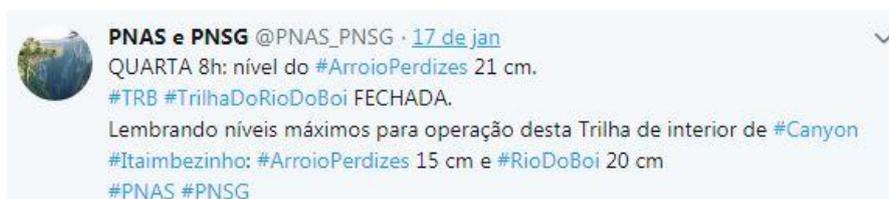


Figura 3 - *Tweet* indicando o nível do Arroio Perdizes e do Rio do Boi e os limites máximos que esses corpos hídricos podem atingir para a trilha estar aberta. FONTE: *Twitter* PNAS (2018).

A partir dessas informações, a metodologia utilizada para realizar essa comparação foi a *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.

Para sua utilização, primeiramente as informações obtidas devem ser separadas conforme os quatro possíveis cenários de ocorrência de um evento, conforme apresentado na Figura 4.

		PARQUE?	
		Fecha	Abre
MODELO?	Fecha	a	b
	Abre	c	d

Figura 4 - Tabela de contingência do método ROC.

Tendo posse dessas informações, é possível determinar o índice de probabilidade de detecção (*Probability of Detection* - POD) e o índice de probabilidade de falsa detecção (*Probability of False Detection* – POFD) conforme estabelecido pelas Equações 1 e 2, que são necessários à elaboração do diagrama ROC.

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (1)$$

$$POFD = \frac{b}{b+c} \quad (2)$$

Com base em seus valores, 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 5), ou seja, uma coordenada (x,y). A qualidade do modelo é determinada conforme for a localização do ponto resultante no diagrama, sendo utilizada a equação de desempenho da climatologia ( $y=x$ ) para realizar essa comparação. Dessa forma, se o ponto estiver localizado 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.

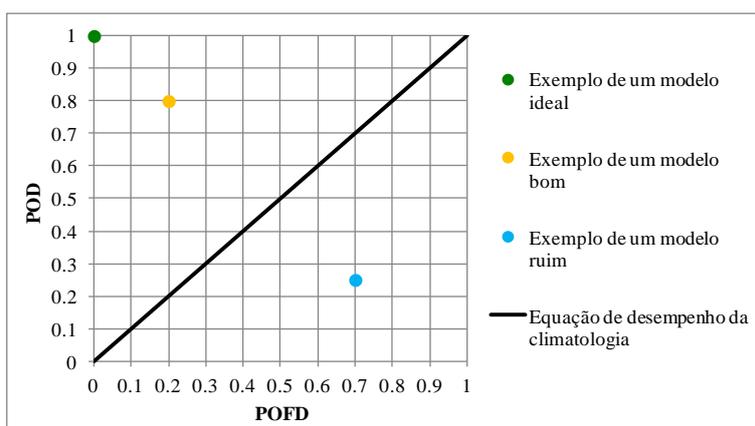


Figura 5 - Exemplo de um diagrama ROC.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os primeiros resultados da análise realizada fazem referência ao processo de calibração e validação do modelo hidrológico. Sendo assim, após completar esse processamento, obtiveram-se os hidrogramas que estão apresentados na Figura 6.

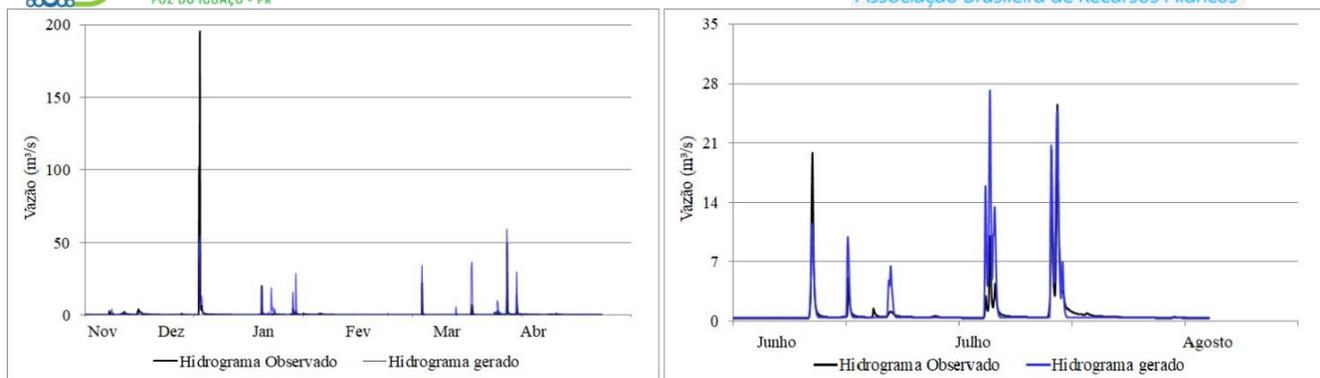


Figura 6 – À esquerda está apresentado o hidrograma resultante da etapa de calibração do modelo e a direita o hidrograma resultante da etapa de validação.

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. O coeficiente de Nash-Sutcliffe da etapa de calibração resultou em um valor de 0,466 e o da etapa de validação em 0,417, ambos estando dentro da faixa considerada como aceitável.

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.

Tomando por base esses resultados, pode-se proceder para a simulação hidrodinâmica. Nessa etapa, uma simplificação que teve que ser efetuada foi a de considerar que os hidrogramas gerados pelo HEC-HMS eram referentes à parte inferior dos cânions. Isso foi feito, pois, como existe uma queda de água de elevada declividade logo após o sensor fluviométrico do Arroio Perdizes, ocorreram a instabilidades ao rodar o modelo no HEC-RAS. Sendo assim, o hidrograma de entrada no modelo foi inserido alguns metros mais a frente do que ele realmente ocorreu.

Como citado anteriormente, os dados de saída da simulação hidrodinâmica foram utilizados para o cálculo do índice de perigo. Esse foi determinado para todos os dias do período analisado, mas somente nos trechos de rio em que ocorre a passagem dos turistas durante a realização da trilha. Sendo assim, nos dias em que o valor do índice de perigo superou o valor de  $0,6\text{m}^2/\text{s}$ , a trilha foi considerada como fechada pelo modelo. A Tabela 1 apresenta um resumo dos dados obtidos.

Tabela 1 - Análise dos dias em que a trilha foi considerada como fechada em cada mês do período analisado, tomando como base os resultados obtidos a partir do índice de perigo.

Data	Nº dias analisados	Percentual de dias analisados no mês	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%

A partir dos dados presentes na Tabela 1, 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, 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 ROC. Isso resultou no diagrama apresentado na Figura 7.

		PARQUE?	
		Fecha	Abre
MODELO?	Fecha	19	6
	Abre	14	165

Figura 7 - Número de ocorrências em cada possível cenário no período analisado.

A partir da Figura 7, percebe-se que as ocorrências referentes aos quadrantes “a” e “d”, em que o modelo e o parque tiveram a mesma decisão em relação ao *status* de abertura ou fechamento da trilha, representam aproximadamente 90,2% do total das ocorrências.

Já os casos em que o parque fechou a trilha e o modelo a manteve aberta representam 6,86% do total dos eventos avaliados. Ao analisar a origem das diferenças presentes nesses dias, percebe-se que as mesmas são referentes principalmente a tempos de recessão distintos entre os hidrogramas gerado e observado, alguns pequenos picos de vazão que não foram representados pelo modelo e situações em que o índice de perigo aumentou, mas não chegou a atingir o valor estabelecido como limite para o fechamento da trilha. A diferença nesse último critério pode ser resultante do nível de tolerância considerado como aceitável que foi estabelecido para o cálculo do índice de perigo e o critério estabelecido pelo parque.

Após realizar todas essas análises, determinou-se os valores dos coeficientes POD e POFD a partir das fórmulas expressas pelas Equações 1 e 2. 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, modelo desenvolvido apresenta boa eficiência (Figura 8).

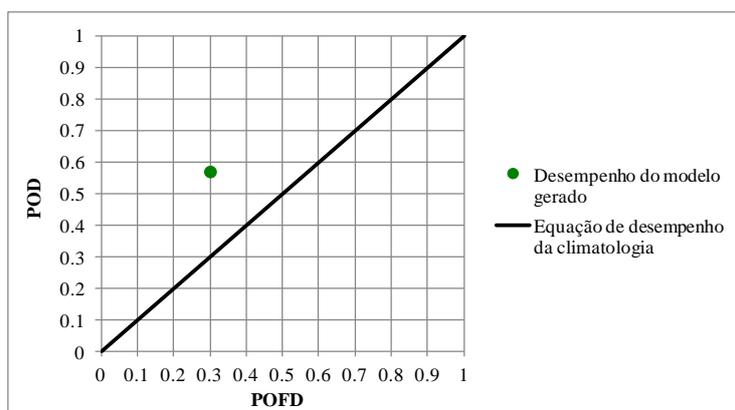


Figura 8 - Diagrama ROC representando o desempenho do modelo gerado.

Entretanto, apesar dos valores de POD e POFD classificarem o modelo como sendo bom, o mesmo foi gerado com o objetivo de auxiliar na tomada de decisão em relação à abertura ou ao fechamento da trilha, a fim de garantir a segurança de quem realiza o percurso e minimizar os riscos presentes. Além disso, o modelo visa prever corretamente os eventos de modo a aumentar a taxa de alarmes verdadeiros e reduzir o número de alarmes falsos, ou seja, determinar o fechamento da trilha somente quando os limites estabelecidos como seguros forem superados, evitando assim perdas. Por esses motivos, aprimoramentos devem ser realizados e uma fase de teste pode ser implementada para que melhores resultados sejam obtidos.

## CONCLUSÕES

Tomando como base os resultados obtidos no decorrer desse trabalho, pode-se constatar que as principais conclusões desse estudo foram:

\*Através da utilização conjunta de modelos e do índice de perigo é possível aprimorar o critério de fechamento da Trilha do Rio do Boi, de modo a considerar não somente o nível dos cursos de água, mas também, outras variáveis hidrometeorológicas que podem influenciar na dinâmica do escoamento e, assim, aumentar a segurança de quem realiza o trajeto.

\*Possibilidade de integração do modelo a um sistema de previsão e alerta, desde que sejam respeitadas às restrições relacionadas ao desempenho das simulações realizadas.

Sendo assim, trabalhos futuros pretendem melhorar a qualidade do desempenho dos modelos utilizados, efetuando as mudanças e os aperfeiçoamentos que se julgarem necessários de modo que as respostas obtidas resultem em dados cada vez mais similares com o que ocorre na realidade. Também, pretende-se desenvolver métodos que possibilitem operacionalizar a utilização desse sistema através do uso de outras ferramentas como, por exemplo, o *software* HEC-RTS.

**AGRADECIMENTOS** - Os autores desse trabalho agradecem o apoio financeiro recebido da CAPES para o desenvolvimento dessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

BINS, R. B. F. (2018). *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. 144p.

BOITEN, W. (2008). *Hydrometry: IHE Delft lecture note series*. CRC Press. 256p.

COX, R. J.; SHAND, T. D.; BLACKA, M. J. (2010). *Australian Rainfall and Runoff revision project 10: appropriate safety criteria for people*. Engineers Australia - Water Engineering, p. 21.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. (2000). "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.

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

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

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