

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**AVALIAÇÃO DE FONTES DE INCERTEZA EM ESTUDOS DE ROMPIMENTOS
DE BARRAGENS**

ARTHUR DA FONTOURA TSCHIEDEL

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Orientação: Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva

Porto Alegre, março de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**AVALIAÇÃO DE FONTES DE INCERTEZA EM ESTUDOS DE ROMPIMENTOS
DE BARRAGENS**

ARTHUR DA FONTOURA TSCHIEDEL

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan – IPH/UFRGS

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques – IPH/UFRGS

Prof. Dr. Anderson Ruhoff – IPH/UFRGS

Prof. Dr. Luiz Rafael Palmier - UFMG

Porto Alegre, março de 2017

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que de uma forma ou de outra se envolveram na construção dos conhecimentos aqui apresentados, dos quais se destaca o meu professor orientador, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, pelo conhecimento repassado e pelo tempo dedicado à realização deste trabalho.

Agradeço também ao professor Marcelo Marques, que foi o nosso elo de ligação com os profissionais da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), que gentilmente cederam dados importantíssimos que viabilizaram a elaboração deste trabalho.

Neste sentido, agradeço à Engenheira Civil Camila Dahm, ao Topógrafo Jéferson e ao Técnico em Hidrologia Vinícius, colaboradores da CEEE que muito competentemente me auxiliaram na obtenção dos dados de campo da UHE Canastra.

Não menos importante, a segunda parte do trabalho, referente à área de estudo da Barragem Lomba do Sabão só foi possível ser executada graças à disponibilização dos dados altimétricos de Porto Alegre pelo Engenheiro Cartógrafo Tiago Salomoni, da prefeitura de Porto Alegre.

Agradeço, ainda, a todos os colegas e amigos do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, dos Grupos de Pesquisa Núcleo de Estudos em Segurança Hídrica (NESH) e Hidrologia de Grande Escala (HGE).

Agradeço também aos membros da banca, pelas valiosas sugestões que possibilitaram melhorar muito este trabalho: Professor Anderson Ruhoff (UFRGS), professor Marcelo Marques (UFRGS), professor Fernando Fan (UFRGS) e professor Luiz Rafael Palmier (UFMG).

Dedico este trabalho à minha família, não só pelo apoio, amor e fé em mim depositados durante os anos de pesquisa, mas também pelos momentos de compreensão e paciência.

Por fim, em especial, dedico este trabalho à minha amada Luciana Mieres, minha companhia, incentivo, diversão e compreensão de todos os momentos.

RESUMO

Este trabalho consiste numa avaliação de como as incertezas de determinados dados de entrada utilizados em estudos de rompimento de barragem afetam determinados resultados utilizados para avaliação da onda de cheia, para seções localizadas em diferentes locais ao longo de cursos hídricos, em áreas de estudo com características contrastantes. Os dados de entrada perturbados foram o coeficiente de Manning, parâmetros de brecha, volume do reservatório, topografia de jusante (representada por Modelos Digitais de Elevação - MDEs), e tipo de modelo hidrodinâmico adotado. Os parâmetros de avaliação considerados foram a vazão de pico, o tempo de pico, a profundidade máxima e a velocidade máxima da onda de cheia. Sendo assim, foram perturbados os dados de entrada dentro de uma faixa esperada de utilização, e resultados oriundos das simulações confrontados a fim de se identificar quais foram os parâmetros de avaliação mais afetados frente a incertezas dos dados de entrada em diferentes seções ao longo dos cursos hídricos avaliados. Foram consideradas duas áreas de estudo com características distintas de vales de jusante: A Barragem da Usina Hidrelétrica de Canastra, localizada em Canela/RS, que apresenta um vale com declividades da ordem de 40m/km, e a Barragem Lomba do Sabão, localizada em Porto Alegre/RS, que conta com declividades da ordem de 4m/km. Para a área com altas declividades foram realizadas 182 simulações hidrodinâmicas em 2 dimensões no modelo HEC-RAS 5.03, considerando MDEs de diversas fontes, incluindo os MDEs globais provenientes do SRTM e do AW3D30. Alguns deles foram pós-processados com a inserção de seções topográficas reais obtidas via processamento de imagens aéreas levantadas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) e calhas de rio fictícias. Para a área de estudo com menores declividades foram realizadas 13 simulações, que foram utilizadas para contrapor os resultados obtidos para a primeira área de estudo. Para esta área de estudo foram utilizados MDEs globais oriundos do SRTM e também um levantamento LiDAR realizado para a cidade de Porto Alegre, que gerou MDEs de alta precisão, com resoluções de 1 metro. Os resultados obtidos sugerem que estudos de rompimento de barragem realizados a partir da utilização de informações topográficas pouco confiáveis podem ter as incertezas oriundas da caracterização da topografia de jusante compensadas por subestimativas ou superestimativas de outros dados de entrada utilizados em estudos de rompimento. Além disso, foi realizado o mapeamento do peso exercido pelas incertezas de diferentes dados de entrada em estudos de rompimentos de barragens, para vales com características topográficas contrastantes em seções próximas ou distantes dos barramentos, mostrando que nem sempre as incertezas relativas à topografia são mais importantes que outros dados de entrada.

ABSTRACT

This work consists of a sensitivity evaluation of how uncertain input data used in dam brake studies affect certain parameters of flood wave for sections located at different locations along water courses, for two different watershed. The input data used were Manning coefficient, dam breach parameters, reservoir volume, downstream topography (represented by Digital Elevation Models (DEMs)), and equation adopted. The evaluation parameters considered were the peak flow, the peak time, the maximum depth and the maximum speed of the flood wave. Thus, perturbation groups of the input data were created within an expected range of use, whose results from the simulations were confronted in order to identify the most affected hydraulic parameters for different input data in different sections of water courses evaluated. Two study areas with distinct characteristics of downstream valleys were considered: The Canastra Dam, located in Canela / RS, which presents a valley with slopes of 40 m/km and the Lomba do Sabão Dam, located in Porto Alegre / RS, which has slopes of the order of 4 m/km. For the area with high slopes, 182 hydrodynamic simulations were performed in 2 dimensions in HEC-RAS 5.03 software, considering DEMs from several sources, including global DEMs from SRTM and AW3D30. Some of them were post-processed with the insertion of real topographic sections obtained through aerial image processing raised by Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). For the study area with smaller slopes, 13 simulations were performed, which were used to counterbalance the results obtained for the first study area. For this area of study, global DEMs from the SRTM were used, as well as LiDAR survey carried out for the city of Porto Alegre, which generated high precision DEMs, with resolutions of 1 meter. As a result, it was observed that in Action Emergency Plans, the uncertainties generated by a given input data can be compensated by conservative values adopted in another input data. In addition, we carried out the mapping of the weight exerted by the uncertainties of different input data in dam break studies, for valleys with contrasting topographic characteristics in sections near or distant from the dams, showing that uncertainties related to the topography are not always more important than other input data.

SUMÁRIO DE CAPÍTULOS

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	CARACTERIZAÇÃO GERAL DE BARRAGENS.....	19
3.2	HISTÓRICO DE ROMPIMENTOS.....	24
3.3	LEGISLAÇÃO RECENTE.....	27
3.4	ROMPIMENTO DO MACIÇO.....	30
3.5	PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA.....	34
3.5.1	MODELOS EM UMA DIMENSÃO (1D).....	35
3.5.2	MODELOS EM DUAS DIMENSÕES (2D).....	37
3.6	DADOS DE ENTRADA PARA MODELOS DE ROMPIMENTOS.....	39
3.6.1	COEFICIENTE DE MANNING.....	39
3.6.2	VOLUME DE RESERVATÓRIOS.....	41
3.6.3	TOPOGRAFIA DO VALE DE JUSANTE.....	42
3.7	ESTUDOS ANTERIORES ENVOLVENDO INCERTEZAS ASSOCIADAS.....	55
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
4.1	EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS HIDRÁULICAS.....	58
4.2	UHE CANASTRA.....	59
4.2.1	MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO UTILIZADOS.....	61
4.2.2	CENÁRIOS ADOTADOS.....	70
4.2.3	MANIPULAÇÃO DOS CENÁRIOS.....	73
4.3	BARRAGEM LOMBA DO SABÃO.....	75
4.3.1	MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO UTILIZADOS.....	76
4.3.2	CENÁRIOS ADOTADOS.....	79
4.3.3	MANIPULAÇÃO DOS CENÁRIOS.....	81
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	82
5.1	RESULTADOS PARA A UHE CANASTRA.....	82
5.1.1	RESULTADOS OBTIDOS PARA DIFERENTES MDEs.....	85
5.1.2	ESTUDO CONJUNTO DAS SEÇÕES.....	93
5.1.3	COMPARAÇÃO ENTRE MODELO DIFUSIVO E SAINT VENANT.....	103
5.1.4	IMPACTOS DA ONDA DE CHEIA.....	104
5.2	RESULTADOS PARA A BARRAGEM LOMBA DO SABÃO.....	106

5.2.1	ESTUDO CONJUNTO DAS SEÇÕES	107
5.2.2	IMPACTOS DA ONDA DE CHEIA	113
5.3	AVALIAÇÃO CONJUNTA.....	114
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	118
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
8	ANEXO	133

Sumário de Figuras

Figura 1 – Barragens cadastradas no Brasil por uso principal até 30/09/2014 (Fonte: ANA, 2015b).....	20
Figura 2 – Países de maior potencial hidrelétrico tecnicamente aproveitável. (Fonte: EPE, 2007).....	20
Figura 3 – Vista Superior típica de um barramento para geração de energia. (Fonte: O autor)	21
Figura 4 – Vista Lateral típica de um barramento para geração de energia. (Fonte: O autor) .	21
Figura 5 – Distribuição das barragens cadastradas por material de construção (Fonte: ANA, 2015b).....	22
Figura 6 – Tipos de Barramentos	23
Figura 7 – Rompimento da barragem de rejeitos de Fundão em Mariana (MG) – Antes e Depois (Fonte: Adaptado de Google Earth)	24
Figura 8 – Rompimentos nas décadas de 1950 a 1970 (adaptado de Carvalho, 2015 e Lauriano, 2009)	25
Figura 9 – Rompimento de barragens por tipo de embasamento (Fonte: Adaptado de Zhang & Xu, 2007).....	26
Figura 10 – Linha do tempo envolvendo a regulamentação legal do tema a nível mundial	28
Figura 11 – <i>Overtopping</i> x <i>Piping</i> (USACE, 2014).....	30
Figura 12 – Esquema de vista frontal de uma brecha e seus parâmetros de formação	32
Figura 13 – Mapa de Inundação Probabilístico (Fonte: FERC 2014).....	34
Figura 14 – Coeficiente de Manning das margens e vegetação (Fonte: Brisbane 2017)	41
Figura 15 – Diferenças entre MDT e MDS (Fonte: o Autor).....	43
Figura 16 – Princípio físico da utilização de LiDAR embarcado. Fonte: (O Autor)	45
Figura 17 – Imagem do Reservatório da Barragem Lomba do Sabão obtida por Aerofotogrametria	46
Figura 18 – Reservatório da Barragem Lomba do Sabão obtida por LiDAR - MDT.....	46
Figura 19 – Reservatório da Barragem Lomba do Sabão obtida por LiDAR - MDS	47
Figura 20 – Produtos oriundos a partir de aerofotogrametria.....	49
Figura 21 – Obtenção de MDE a partir de InSAR (Fonte: TanDem-X, 2017)	51
Figura 22 – Obtenção de MDE a partir de par estereoscópico (Fonte: Vricon, 2017).....	52
Figura 23 – Ilustração da metodologia adotada neste trabalho	56
Figura 24 – Áreas de Estudo	57
Figura 25 – Hidrograma Exemplificativo de Uma Seção Qualquer.....	58

Figura 26 – Resultado <i>Water Surface Elevation</i> (WSE) para uma dada seção no modelo HEC-RAS 5.03	59
Figura 27 – Barragem e reservatório da UHE Canastra (Fonte: Google Earth).....	60
Figura 28 – Caracterização do vale de jusante e arranjo da UHE	60
Figura 29 – Perfil transversal esquemático - retirada do reservatório do SRTM 30.....	61
Figura 30 – Comparação entre o modelo SRTM30 e o modelo SRTM_30M	62
Figura 31 – Comparação entre o SRTM_30M e o SRTM_1M no local da barragem	62
Figura 32 – Dimensões da calha fictícia do Rio Paranhana	63
Figura 33 – Comparação entre o SRTM_1M e o SRTM_1M_CALHA no local do barramento	63
Figura 34 – SRTM_1M_CALHA <i>versus</i> SRTM_1M. Comparação entre seções.	63
Figura 35 – Locais onde foram realizados os levantamentos	64
Figura 36 – Seção 01	65
Figura 37 – Seção 04	65
Figura 38 – Seção 05	65
Figura 39 – Seção transversal esquemática de sobreposição de informações.....	66
Figura 40 – Visualização SRTM_1M_CALHA_VANT e do SRTM_1M_CALHA na barragem.....	66
Figura 41 – Visualização do modelo SRTM_1M_CALHA_VANT e do SRTM_1M_CALHA na Seção 05.....	67
Figura 42 – Comparação entre o modelo SRTM_1M e o modelo AW3D_1M	67
Figura 43 – Comparação entre o MDE_AEROGEO e o SRTM_1M_CALHA_VANT na área da Barragem.....	68
Figura 44 – Visualização do MDE_EXERC e do SRTM_1M_CALHA_VANT na Barragem	69
Figura 45 – Topobatimetria da Seção 01 para os diversos MDEs considerados.....	70
Figura 46 – Topobatimetria da Seção 05 para os diversos MDEs considerados.....	70
Figura 47 – Diferentes Curvas Cota-Volume	71
Figura 48 – Hidrogramas de ruptura considerados como condição de contorno de montante.73	
Figura 49 – Metodologia utilizada para comparar resultados por seção	74
Figura 50 – Ocupação do vale de jusante e arroio Dilúvio	75
Figura 51 – Reservatório da barragem Lomba do Sabão	76
Figura 52 – Modelo Digital de Superfície do vale de jusante para a barragem Lomba do Sabão	77

Figura 53 – Modelo Digital de Superfície do vale de jusante para a barragem Lomba do Sabão sem prédios e sem vegetação.....	77
Figura 54 – Topografia do vale de jusante da barragem Lomba do Sabão – SRTM 30	77
Figura 55 – Topografia do vale de jusante da barragem Lomba do Sabão – SRTM30_c.....	78
Figura 56 – Localização das seções consideradas ao longo do arroio Dilúvio	78
Figura 57 – Diferentes Topobatimetrias para a Seção 01.....	79
Figura 58 – Diferentes Topobatimetrias para a Seção 07.....	79
Figura 59 – Curva cota-volume do reservatório Lomba do Sabão.....	80
Figura 60 – Hidrogramas de ruptura considerados como condição de contorno de montante.	81
Figura 61 – Modificações no hidrograma a partir de variação no MDE a 7,2 km da barragem	83
Figura 62 – Modificações no hidrograma a partir de variação no volume a 7,2 km da barragem	83
Figura 63 – Modificações no hidrograma a partir de variação na variação da brecha a 7,2 km da barragem	84
Figura 64 – Modificações no hidrograma a partir de variação na variação do coeficiente de Manning a 7,2 km da barragem.....	84
Figura 65 – Modificações no hidrograma a partir de variação na variação do equacionamento a 7,2 km da barragem	85
Figura 66 – SRTM_1M x SRTM_30M quanto à vazão de pico para a seção 01 e seção 05 ...	86
Figura 67 – SRTM_1M x SRTM_30M quanto ao tempo de pico para a seção 01 e seção 05	86
Figura 68 – SRTM_1M x SRTM_30M quanto à profundidade máxima para a seção 01 e seção 05	86
Figura 69 – SRTM_1M x SRTM_30M quanto à velocidade máxima para a seção 01 e seção 05	87
Figura 70 – SRTM_1M x SRTM_1M_CALHA quanto à vazão de pico para a seção 01 e seção 05	88
Figura 71 – SRTM_1M x SRTM_1M_CALHA quanto ao tempo de pico para a seção 01 e seção 05	88
Figura 72 – SRTM_1M x SRTM_1M_CALHA quanto à profundidade máxima para a seção 01 e seção 05.....	88
Figura 73 – SRTM_1M x SRTM_1M_CALHA quanto à velocidade máxima para a seção 01 e seção 05.....	88

Figura 74 – SRTM_1M_CALHA_VANT x SRTM_1M_CALHA quanto à vazão de pico para a seção 01 e seção 05	89
Figura 75 – SRTM_1M_CALHA_VANT x SRTM_1M_CALHA quanto ao tempo de pico para a seção 01 e seção 05	90
Figura 76 – SRTM_1M_CALHA_VANT x SRTM_1M_CALHA quanto à prof. máxima para a seção 01 e seção 05	90
Figura 77 – SRTM_1M_CALHA_VANT x SRTM_1M_CALHA quanto à velocidade máxima para a seção 01 e seção 05	90
Figura 78 – SRTM_1M x AW3D_1M quanto à vazão de pico para a seção 01 e seção 05	91
Figura 79 – SRTM_1M x AW3D_1M quanto ao tempo de pico para a seção 01 e seção 05..	91
Figura 80 – SRTM_1M x AW3D_1M quanto à profundidade máxima para a seção 01 e seção 05	91
Figura 81 – SRTM_1M x AW3D_1M quanto à velocidade máxima para a seção 01 e seção 05	91
Figura 82 – MDE_AEROGEO x SRTM_1M_CALHA_VANT quanto à vazão de pico para a seção 01 e seção 05.....	92
Figura 83 – MDE_AEROGEO x SRTM_1M_CALHA_VANT quanto ao tempo de pico para a seção 01 e seção 05	93
Figura 84 – MDE_AEROGEO x SRTM_1M_CALHA_VANT quanto à prof. máxima para a seção 01 e seção 05.....	93
Figura 85 – MDE_AEROGEO x SRTM_1M_CALHA_VANT quanto à velocidade máxima para a seção 01 e seção 05	93
Figura 86 – Variações na Vazão de Pico: Modelo Difusivo para o MDE_AEROGEO	96
Figura 87 –Variações no Tempo de Pico: Modelo Difusivo para o MDE_AEROGEO	97
Figura 88 –Variações na Profundidade Máxima: Modelo Difusivo para o MDE_AEROGEO	98
Figura 89 – Variações na Velocidade Máxima: Modelo Difusivo para o MDE_AEROGEO ..	99
Figura 90 – Coeficientes de variação para vazão de pico.....	100
Figura 91 – Coeficientes de Variação para Tempo de Pico	101
Figura 92 –Coeficientes de variação para profundidade máxima	102
Figura 93 – Coeficientes de variação para velocidade máxima	102
Figura 94 – Comparação entre hidrogramas Saint Venant x Difusivo 2D para algumas seções	103

Figura 95 – Mancha de inundação utilizando o MDE AW3D_1M e as equações de Saint Venant 2D.....	105
Figura 96 – Mancha de inundação utilizando o MDE_AEROGEO e as equações do Modelo Difusivo	105
Figura 97 – Mancha de inundação utilizando o SRTM_1M_CALHA_VANT e as equações do Modelo Difusivo.....	105
Figura 98 – Probabilidades acumuladas de vazão de pico para a Seção 07	106
Figura 99 – Probabilidades acumuladas de tempo de chegada e de pico para Seção 07.....	106
Figura 100 – Variações na vazão de pico	108
Figura 101 – Variações no tempo de pico	109
Figura 102 – Variações na Profundidade Máxima	110
Figura 103 – Variações na Velocidade Máxima	111
Figura 104 – Coeficiente de variação para vazão de pico	112
Figura 105 – Coeficiente de variação para tempo de pico,	112
Figura 106 – Coeficiente de variação para velocidade máxima.....	112
Figura 107 – Coeficiente de variação para profundidade máxima.....	113
Figura 108 – Manchas de inundação para Porto Alegre.....	114
Figura 109 – Coeficientes de variação para vazão de pico.....	115
Figura 110 – Coeficientes de variação para tempo de pico	115
Figura 111 – Coeficientes de variação para velocidade máxima	116
Figura 112 – Coeficientes de variação para profundidade máxima	117

Sumário de Tabelas

Tabela 1 – Principais Colapsos de Barragens Brasileiras Notificados até 2017	24
Tabela 2 – Principais barragens colapsadas em nível mundial até 2014 (Fonte: Dam Failure, 2017).....	26
Tabela 3 – Características de parâmetros de formação de brecha (Fonte: Eletrobrás, 2003)....	33
Tabela 4 – Características de parâmetros de formação de brecha (Fonte: USACE, 2014).....	33
Tabela 5 - Modelos hidrodinâmicos disponíveis (adaptado de Lauriano, 2009).....	35
Tabela 6 – Estimativas quanto ao coeficiente de Manning (adaptado de USACE, 2016)	40
Tabela 7 – Comparação entre modos de levantamento topográfico para estudos de ruptura (Fonte: o Autor).....	43
Tabela 8 – Escala máxima provável x resolução do pixel.....	53
Tabela 9 – MDEs atualmente disponíveis que podem ser utilizados como dados de entrada em simulações hidrodinâmicas.....	54
Tabela 10 – Distâncias acumuladas entre as seções transversais estudadas.....	64
Tabela 11 – Comparação entre as hipsometrias para cada MDE avaliado para Canastra.....	69
Tabela 12 – Identificação dos MDEs	71
Tabela 13 – Identificação do volume do reservatório	71
Tabela 14 – Valores relativos aos parâmetros avaliados para o coeficiente de Manning.	72
Tabela 15 – Valores relativos aos parâmetros avaliados para a configuração da brecha.	72
Tabela 16 – Comparação entre as hipsometrias para cada MDE avaliado para Lomba do Sabão	78
Tabela 17 – Distância entre as seções transversais consideradas para a barragem Lomba do Sabão	79
Tabela 18 – Cenários quanto a Formação da Brecha da barragem Lomba do Sabão	80
Tabela 19 – Cenários quanto ao Coeficiente de Manning para o vale de jusante da barragem Lomba do Sabão	81
Tabela 20 – Influência que variações nos dados de entrada causam nos resultados	117

Lista de Variáveis

A (m ²)	Área da Seção Transversal
c_f	Coefficiente de Fricção de Fundo
C_v	Coefficiente de Variação
f	Parâmetro de Coriolis
F_m	Fator Multiplicador
g (m/s ²)	Aceleração da Gravidade
h (m)	Profundidade do Escoamento
H (m)	Elevação da Superfície d'água
L (m)	Comprimento do Maciço
n	Coefficiente de Manning
P_m (m)	Profundidade Máxima
Q (m ³ /s)	Vazão
q (m ³ /s)	Contribuição ou Abstração de Fluxo
Q_p (m ³ /s)	Vazão de Pico
S_f	Declividade da Linha de Energia
S_o	Declividade do Fundo D'água
t (s)	Tempo
T_a (min)	Tempo de Ascensão
T_p (min)	Tempo de Pico
u (m/s)	Velocidade ao longo do eixo x
v (m/s)	Velocidade ao longo do eixo y
V_m (m/s)	Velocidade Máxima
ν_t	Coefficiente de viscosidade turbulenta
x (m)	Distância ao longo do eixo x
y (m)	Distância ao longo do eixo y

1 INTRODUÇÃO

O papel desempenhado pelos recursos hídricos é fundamental para o desenvolvimento da humanidade. Historicamente, problemas relacionados à escassez e ao excesso de água são enfrentados e contornados pelas mais diversas populações, porém a realidade que o futuro apresenta em relação ao gerenciamento de recursos hídricos pode ser considerada desafiadora devido ao constante aumento da demanda d'água (UNESCO, 2012). Neste cenário, a construção de barragens para estocar grandes volumes d'água surge como solução prática, confiável e economicamente viável.

O número de barragens existentes em solo brasileiro ainda não é definitivo, mas diversos esforços vêm sendo realizados com o passar dos anos para quantificar o total de empreendimentos e mapear os riscos inerentes à implantação dessas estruturas. O Relatório Anual de Segurança de Barragens de 2015 (ANA, 2016a) aponta que, até o ano de elaboração, existiam 17.256 barragens construídas no Brasil, considerando tanto barragens utilizadas para fins energéticos como também aquelas utilizadas para fins de abastecimento, aquicultura, captação de água, regularização, uso industrial, estocagem de resíduos etc.

Independente do arranjo e finalidade do barramento, possíveis rompimentos dessas estruturas têm alto potencial de dano, envolvendo não só perdas econômicas, mas também muitas perdas humanas nas localidades a jusante do barramento (BRASIL, 2010). Mesmo que esse tipo de acidente não seja frequente, diversos casos já foram observados tanto em nível internacional como em nível nacional (Aguiar *et al.* 2014), sendo o mais catastrófico, no Brasil, o caso ocorrido no distrito de Mariana, em Minas Gerais (IBAMA, 2015). Portanto, estudos relativos à predição de possíveis danos ocasionados pelo rompimento dessas estruturas são muito importantes e são elaborados via modelagem hidráulica para subsidiar Planos de Ação Emergenciais (PAEs), a serem acionados em caso de rompimentos, conforme diretrizes apontadas no Plano Nacional de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010). Esses PAEs normalmente levam em conta informações como o tempo de chegada da onda de cheia e como a mancha de inundação máxima em locais de interesse.

Diversos são os modelos hidráulicos atualmente disponíveis no mercado para a predição de variáveis (níveis, vazões, velocidades máximas e profundidades máximas) envolvendo rompimentos de barragens, como por exemplo: DAMBRK, utilizado por Collischonn & Tucci (1997) e HEC-RAS, usado por Rocha *et al.* (2015). As informações utilizadas como dados de entrada nesses modelos, são, em sua maioria, as mesmas, e se resumem à: (i) seções topobatimétricas, tanto do reservatório como do curso hídrico; (ii)

topografia da planície de inundação; (iii) volume do reservatório; (iv) coeficientes de rugosidade do leito e (v) modo de formação e evolução da brecha da barragem. A obtenção precisa dessas informações, na maior parte dos casos, não é simples e costuma ser incerta e onerosa, principalmente quanto ao levantamento de informações topográficas de jusante. A obtenção dessas informações normalmente passa por exaustivo trabalho *in loco*, exigindo equipes de engenheiros e topógrafos especializados que vão até locais de difícil acesso para efetuar levantamentos topográficos desde a calha principal do curso hídrico até uma cota pré-determinada acima do leito. Este tipo de levantamento não é realizado apenas para uma seção topográfica, mas para quantas forem necessárias ao longo do curso hídrico, a partir de estudos previamente definidos.

Portanto, este processo pode acabar sendo um fator limitante à elaboração de estudos de rompimento, não só em relação a recursos financeiros alocados para a realização das campanhas, mas também em relação ao tempo necessário para a obtenção dos dados quando se necessita de, por exemplo, estimativas rápidas quanto a zonas de inundação no momento em que são descobertas rachaduras em barragens que estão à beira de colapsos. Dificuldades como essas levaram, então, ao recente desenvolvimento de muitas pesquisas e estudos destinados a procurar métodos alternativos de obtenção da topografia da planície de inundação (Yan *et al.*, 2015, Alsdorf *et al.*, 2005 e Schuman *et al.*, 2010).

Atualmente, existe uma gama de informações relativas à altimetria de regiões ao longo do globo, obtidas via sensoriamento remoto e representadas por Modelos Digitais de Elevação (MDEs), com as mais diversas resoluções espaciais e temporais, que podem ser incorporadas a modelos hidrodinâmicos. Estes MDEs apresentam resoluções espaciais que variam em sua maior parte entre uma faixa de 1 a 90 metros e custos de obtenção que podem até mesmo serem menores do que os custos relativos ao levantamento *in loco* de seções topográficas do vale de inundação. Além disso, o levantamento de informações topográficas através de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) vem crescendo exponencialmente nos últimos anos, sendo também uma técnica passível de utilização em estudos de rompimento de barragem.

Considerando, portanto, a disponibilidade atual de novos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) de grande precisão, surgem questionamentos relativos à possibilidade de realizar estudos de rompimento de barragens a partir da utilização de informações topográficas obtidas remotamente, em detrimento de informações obtidas por métodos clássicos de levantamento de seções topográficas. Para entender essa problemática, parte-se

do pressuposto que as incertezas associadas aos MDEs devem ser analisadas e comparadas às incertezas associadas a outros dados de entrada em modelos hidrodinâmicos.

Estas relações têm sido objeto de estudo de diversos pesquisadores, que por vezes encontram distintos comportamentos. Collischon & Tucci (1997) e Gallegos *et al.* (2009) afirmam que o volume do reservatório é um dos dados de entrada cuja alteração mais impacta na onda de cheia gerada para jusante, seguido pelo coeficiente de Manning. Huokuna (2001), entretanto, mostra que o modo como evolui a brecha é um dos principais condicionantes da forma e intensidade do hidrograma formado para jusante, enquanto que Kuhlkamp (2016) afirma que os hidrogramas gerados a partir de diferentes configurações de brecha tendem a se convergir para valores similares no vale de jusante. Em contrapartida, Rocha (2015) afirma que a topografia pode ser o principal fator de influência na previsão da mancha de inundação, dentre outras variáveis hidráulicas de interesse.

Os diversos estudos realizados mostram variação na influência exercida pelos dados de entrada nos resultados obtidos, o que sugere que esta variação está atrelada diretamente às configurações geomorfológicas do vale de jusante. Para compreender esta questão, portanto, foi utilizada uma abordagem bi-dimensional do modelo hidráulico HEC-RAS 5.03, lançado em setembro de 2016, a fim de se realizar uma análise de sensibilidade das variações dos dados de entrada do modelo, procurando entender como a modificação destas variáveis interferem em parâmetros de avaliação dispostos ao longo do curso hídrico, para vales de jusantes com características topográficas distintas. O primeiro vale, referente à UHE Canastra é extremamente declivoso, “rápido” e pouco povoado. O segundo vale, referente à barragem Lomba do Sabão, apresenta pequena diferença altimétrica entre as seções avaliadas, é considerado como “lento” e muito povoado. Os dados de entrada considerados no âmbito deste trabalho foram (i) coeficientes de Manning no vale de inundação; (ii) volume do reservatório; (iii) brecha formada na barragem; (iv) topografia do vale de jusante, representada pelo MDE e (v) tipo de equacionamento considerado. Os parâmetros de avaliação utilizados foram: (i) tempo de pico; (ii) vazão de pico; (iii) profundidade máxima e; (iv) velocidade máxima.

Sendo assim, procura-se responder como as incertezas associadas à variação dos MDEs das duas barragens estudadas afetam os hidrogramas de jusante e quais são as ordens de grandeza dessas incertezas em relação à variação dos outros dados de entrada relativos a estudos de rompimento de barragens.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise de propagação de incertezas oriundas das variações dos dados de entrada em estudos de rompimento de barragem, procurando entender como a modificação destes dados de entrada influenciam os resultados obtidos a partir de simulações hidrodinâmicas para vales de jusantes com características topográficas distintas.

Os objetivos específicos desenvolvidos neste trabalho consistem na avaliação de diferentes cenários simulados quanto aos parâmetros de avaliação citados anteriormente. Esses objetivos específicos são definidos a seguir:

- Analisar as incertezas nos parâmetros de saída do modelo (tempo e vazão de pico, profundidade e velocidade máxima) relacionadas a MDEs de diferentes fontes;
- A partir dos resultados obtidos no objetivo específico anterior, pode-se avaliar se MDEs obtidos por VANTs possibilitam resultados de simulação com maior exatidão, quando comparados a MDEs obtidos a partir de técnicas tradicionais (seja sensoriamento remoto ou levantamentos topográficos/aerofotogramétrico, desde baixa até alta resolução espacial);
- Especificar como podem ser levados em consideração nos resultados, os erros referentes à determinação dos dados de entrada em estudos de rompimento de barragens.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem o intuito de apresentar o embasamento técnico-científico necessário para que os objetivos anteriormente citados possam ser alcançados. Desse modo, é dividido em: (i) Caracterização geral de barragens; (ii) Histórico de rompimentos; (iii) Legislação recente; (iv) Rompimento do maciço; (v) Propagação da onda de cheia e; (vi) Dados de Entrada em Rompimentos de Barragens.

3.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DE BARRAGENS

O Brasil conta atualmente com mais de 17 mil barragens catalogadas para os mais diversos usos (ANA, 2016a). Entretanto, o total de barragens no país, considerando as catalogadas e também as não catalogadas, pode ser bem superior a esse número, uma vez que o Relatório de Segurança de Barragens foi instaurado em 2011 pela Agência Nacional de Águas e vem sendo complementado com novos cadastros no decorrer dos últimos anos. No relatório de 2011, em nível exemplificativo, o referido relatório apontava um total de 13.529 barramentos em solo brasileiro (ANA, 2012).

Alguns autores, como Menescal (2005), estimam valores muito mais altos do que esses apontados pela Agência Nacional de Águas em seus relatórios. O autor defende que existiam (até 2005), somente no estado do Ceará, algo em torno de 30.000 barramentos relativos aos mais diversos usos e tamanhos. Em âmbito nacional, o autor afirma que podiam ser estimadas 300.000 barragens, com algumas construídas há mais de 100 anos. Desse modo, mesmo que os trabalhos mais recentes envolvendo a quantificação de barragens em solo brasileiro não tenham conseguido estimar o número total de empreendimentos dessa natureza, pode-se antever como se dá a divisão destes empreendimentos, considerando a finalidade dos mesmos. Considerando que a configuração geral das barragens brasileiras não tenha se modificado significativamente na última década e observando os dados da Figura 1 (que se referem à segunda metade do ano de 2014), pode-se inferir que em torno de 90% das barragens nacionais são utilizadas para usos múltiplos das águas, enquanto apenas 4% é utilizada tendo como uso principal a geração de energia.

Apesar de apresentar um indicativo de como se dividem os barramentos brasileiros, o Relatório Anual de Segurança de Barragens (RASB) para o ano de 2014 (ANA, 2015b) expõe inconsistência quanto a números absolutos. Por exemplo, o inventário nacional de barragens da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016) apresentava no final de 2016 um

total de 493 UHEs (Usinas Hidrelétricas), 2.069 PCHs (Pequenas Centrais Hidrelétricas) e 1.075 CGHs (Centrais Geradoras de Hidreletricidade), que estão em fase de operação ou de implementação. Isto correspondente a 3637 empreendimentos frente aos apenas 642 citados no RASB de 2015.

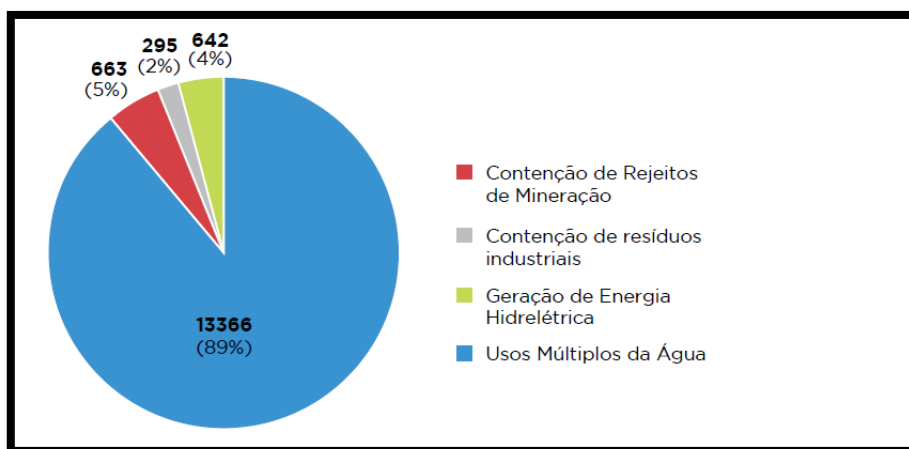


Figura 1 – Barragens cadastradas no Brasil por uso principal até 30/09/2014 (Fonte: ANA, 2015b)

Mesmo que não exista uma coerência quanto ao exato número de barragens no Brasil, assume-se que haverá incremento da demanda de energia no futuro, o que desempenhará papel fundamental na utilização futura de recursos hídricos e conseqüentemente construção de barragens. EPE (2007) reitera esse tipo de afirmativa quando mostra que o Brasil é o terceiro país com maior potencial hidrelétrico tecnicamente aproveitável em nível mundial (Figura 2), tendo grande parte de sua matriz energética, portanto, baseada em aproveitamentos hidrelétricos.

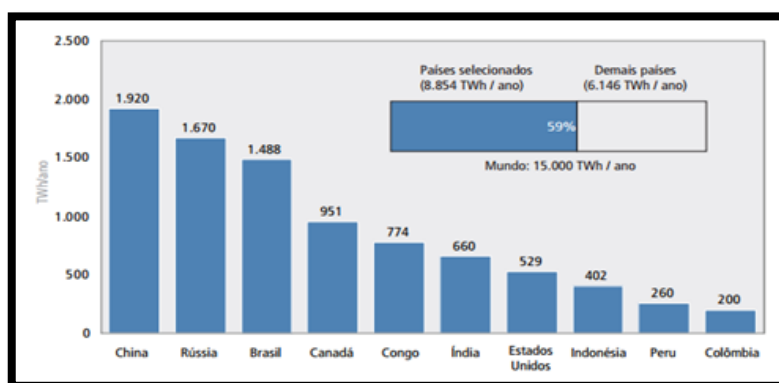


Figura 2 – Países de maior potencial hidrelétrico tecnicamente aproveitável. (Fonte: EPE, 2007)

A intensificação do uso de barragens não será observada, entretanto, apenas no âmbito da geração de energia, mas também para usos múltiplos, em que se consideram aqueles empreendimentos para fins de regularização, abastecimento, aquicultura, irrigação etc. Nos últimos 40 anos, o Brasil vem participado intensamente da economia internacional, situando-

se entre a décima e oitava maior economia do mundo (CBDB, 2011) e esta posição está atrelada, entre diversos outros fatores, à extração de minérios e ao desenvolvimento da indústria brasileira. Assume-se, portanto, que barragens utilizadas para fins de retenção de minérios e rejeitos continuarão a ser implantadas no futuro.

Focando-se em barragens utilizadas para geração de energia, essas estruturas são compostas, majoritariamente, pelo barramento, tomada de água, vertedouro e casa de força (no caso de barragens utilizadas para abastecimento ou irrigação, exclui-se desta relação a casa de força e consequentes estruturas adjacentes). Obviamente, a concepção e geometria de empreendimentos hidroenergéticos variam conforme as condições topográficas do local de implantação, mas de forma geral, uma vista superior de uma barragem apresenta configuração semelhante à da Figura 3 e vista lateral semelhante à da Figura 4 (adaptado de Baptista *et al.*, 2014).

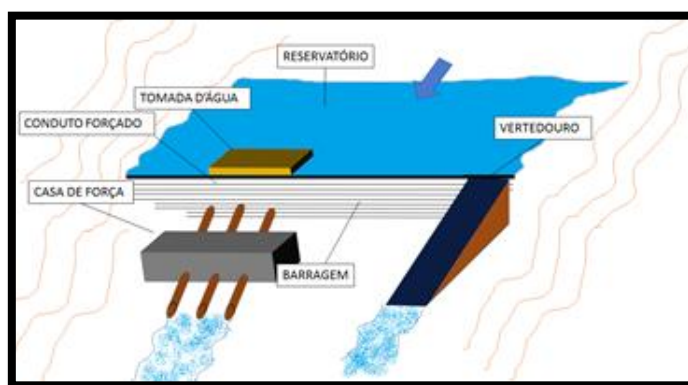


Figura 3 – Vista Superior típica de um barramento para geração de energia. (Fonte: O autor)

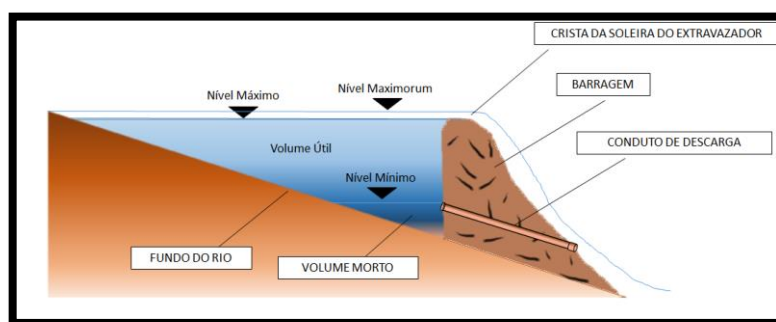


Figura 4 – Vista Lateral típica de um barramento para geração de energia. (Fonte: O autor)

As barragens podem ser classificadas pelo tipo de construção e o material empregado. Tipicamente, elas podem ser dos seguintes tipos (Baptista *et al*, 2014): (i) barragens de concreto; (ii) barragens de terra; (iii) barragens de enrocamento e; (iv) barragens mistas.

As barragens de concreto são aquelas construídas totalmente em concreto simples, convencional ou compactado. Algumas podem ser construídas em concreto armado, o que é

raro no Brasil. A barragem de concreto necessita, de forma geral, a presença de rocha sã ao longo de todo o eixo.

Ainda, este tipo de barramento exerce maiores pressões nas fundações e nas paredes do vale, devido à concentração de esforços em uma área relativamente reduzida. Quatro são os tipos de barragens de concreto: (i) barragem de gravidade; (ii) barragem de gravidade aliviada; (iii) barragem em arco e (iv) barragem em contrafortes. Estas barragens são apresentadas, em conjunto com suas características e exemplos, na composição da Figura 6.

Já as barragens de terra e de enrocamento utilizam materiais disponíveis na região, e no caso de pequenas barragens, com o mínimo de beneficiamento (Batista *et al.*, 2014). Segundo os mesmos autores, a utilização destes tipos de barragens é bastante frequente nas condições brasileiras, tendo em vista o custo de construção, que é mais barato na maioria das vezes, se comparado com os outros.

O número de barragens de terra, entretanto, segundo ANA (2015b) é extremamente maior quando comparado com barragens de enrocamento ou de terra-enrocamento, segundo dados relativos à 15,7% do total de 14.996 barragens levantadas no referido trabalho. Esses dados podem ser observados na Figura 5. Já na Figura 6 é apresentado um resumo envolvendo tipo, característica e ilustração quanto construções típicas de barramentos no Brasil.

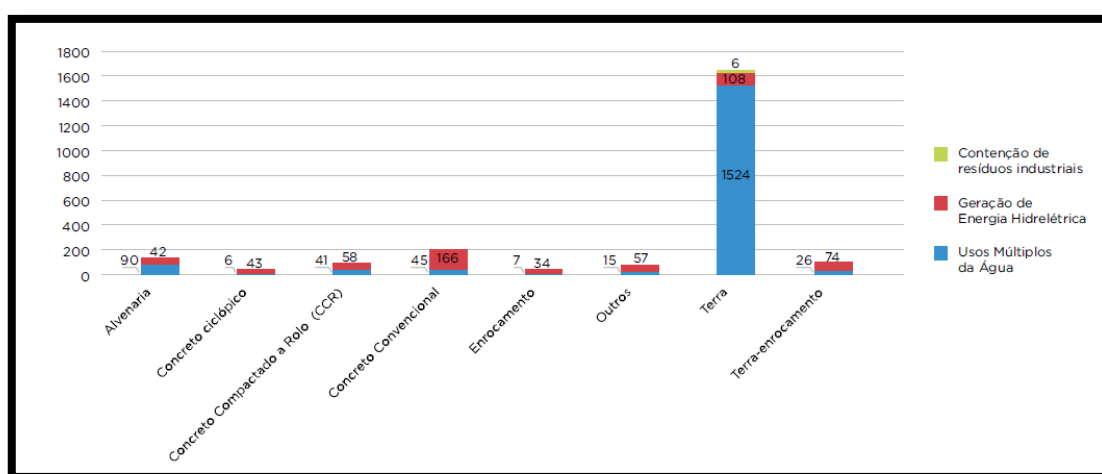


Figura 5 – Distribuição das barragens cadastradas por material de construção (Fonte: ANA, 2015b)

Ressalta-se, entretanto, que independentemente do arranjo e finalidade do barramento, possíveis rompimentos destas estruturas têm alto potencial de dano, envolvendo não só perdas econômicas, mas também muitas perdas humanas nas localidades a jusante do barramento (BRASIL, 2010). O próximo capítulo deste trabalho apresenta uma compilação dos principais acidentes e incidentes registrados nos últimos anos, tanto no Brasil, quanto no exterior

TIPO		CARACTERÍSTICA	ILUSTRAÇÃO	SEÇÃO
CONCRETO	Barragem de Gravidade	A barragem de gravidade é aquela cuja estabilidade está embasada no próprio peso da estrutura. Sendo construída em concreto simples maciço, este tipo de barramento é construído em blocos, com juntas de vedação verticais e concretagem executada em camadas, embora nos últimos anos tenha se usado técnicas mais avançadas para a construção, através da utilização de rolo vibro-compactador. Este tipo de barragem é construída averiguando-se três aspectos principais: (i) O escorregamento ao longo de um plano horizontal; (ii) a rotação em torno do pé e; (iii) a ruptura do material, que pode ocorrer caso haja pouco intervalo de tempo entre as concretagens.	 Barragem de Goitá em Pernambuco	
	Barragem de Gravidade Aliviada	As barragens de gravidade aliviada constituem-se em uma variante das barragens de gravidade, onde se procura otimizar a utilização de concreto, devido ao fato de que em barragens com concreto maciço ocorre um mal aproveitamento do mesmo. Sendo assim, algumas variantes que envolvem, entre outros, a melhor utilização da pressão hidrostática, a execução de cavidades junto à fundação e execução de juntas de dilatação alargadas podem ser utilizadas para diminuir a quantidade de concreto na obra, sem diminuir a segurança. Um exemplo clássico de barragem de gravidade aliviada é a barragem da UHE Itaipú.	 Barragem Itaipú Binacional	
	Barragem em Arco	As barragens em arco são aquelas que apresentam curvatura em planta, de modo a transferir parte da pressão d'água aos pegões do arco, o que possibilita redução do concreto utilizado. Entretanto, este tipo de barragem necessita que as encostas do vale sejam estáveis o suficiente para resistir às tensões elevadas provocadas, podendo ser essencialmente do tipo "com centro constante", que se adaptam a vales de forma de "U" ou do tipo "de centro variável", que se adaptam melhor em vales de formato "V".	 Barragem do Funil, no Rio Paraíba do Sul	
	Barragem de Contrafortes	Esta técnica consiste na implantação de placas inclinadas em concreto que transmitem a pressão hidrostática a uma série de contrafortes perpendiculares ao eixo da barragem. Este tipo de barramento necessita, em geral, um volume bem inferior se comparado a uma barragem de gravidade, mas o custo pode acabar sendo elevado em função das formas e armaduras de construção.	 Barragem de Contrafortes de Valle Grande	
TERRA E ENROCAMENTO	Barragens de terra homogêneas	As barragens de terra homogêneas apresentam só um tipo de material utilizado. O material pode ser da área de empréstimo, por exemplo, desde que quando compactado tenha adequados coeficientes de permeabilidade (Feagri, 2011). Este tipo de barragem possui no seu interior um filtro drenante para controle de fluxo e subpressões (Azevedo 2005).	 Barragem de Rosana	
	Barragens de terra zonadas	As barragens de terra zonadas são aquelas em que o material argiloso é utilizado no centro da barragem, quando a área de empréstimo não tem capacidade de fornecimento de material para construção de toda a barragem. Neste caso, havendo um núcleo argiloso, os taludes podem ser constituídos de material mais permeável, garantindo a estanqueidade do barramento (Azevedo, 2005).	 Barragem de São Simão	
	Barragens de enrocamento com núcleo impermeável	As barragens de enrocamento são assim denominadas quando na seção há a predominância de material rochoso. O processo construtivo deste tipo de barragem envolve a compactação do material rochoso antes do enchimento do reservatório. A estanqueidade do barramento é garantida, por fim, com um núcleo de material impermeável, havendo enrocamento tanto a montante como a jusante do barramento.	 UHE Campos Novos	
	Barragens de enrocamento com face em concreto	Este tipo de barragem se refere ao método construtivo em que se utiliza concreto como material impermeabilizante na face de montante de uma barragem de enrocamento, sem a necessidade portanto de utilização de material impermeável no núcleo da barragem (Batista, 2003).	 Barragem de Itá	

Figura 6 – Tipos de Barramentos

3.2 HISTÓRICO DE ROMPIMENTOS

O histórico nacional acerca de rompimentos de barragem tem, como evento mais recente, o acidente ocorrido no distrito de Mariana, em Minas Gerais. Nesta catástrofe, ocorreu o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, da empresa Samarco, resultando em aproximadamente 34 hm³ de rejeitos da mineração de ferro lançados na bacia do Rio Doce. O desastre foi responsável pela perda de muitas vidas humanas e também pela degradação de grande parte da bacia do Rio Doce (IBAMA, 2015), além de ter sido um marco na regulação do setor de segurança de barragens (Figura 7).



Figura 7 – Rompimento da barragem de rejeitos de Fundão em Mariana (MG) – Antes e Depois (Fonte: Adaptado de Google Earth)

Muito embora este tenha sido um dos acidentes de maior notoriedade no Brasil, muitos outros ocorreram no passado, como citam Aguiar *et al.* (2014) e Lima (2014). Em nível nacional, realizou-se uma compilação dos acidentes envolvendo ruptura parcial ou total do corpo de barramentos desde a década de 1950, considerando barramentos de diferentes portes. As fontes utilizadas para essa compilação foram Carvalho (2015), Lauriano (2009), ANA (2015a), ANA (2015b) e ANA (2016a). Os resultados são apresentados na Tabela 1, que apresenta um total de 31 acidentes ocorridos no Brasil desde a década de 1950.

Tabela 1 – Principais Colapsos de Barragens Brasileiras Notificados até 2017

Década						
1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Pampulha	Orós	Euclides da Cunha	Boa Esperança	Macacos	Rio Verde	Itabirito
		Limoeiro	Santa Helena	Emas	Cataguases	Fundão
		Poquim	Fernandinho		Miraí	Laranjal do Jari
			Pico São Luiz		Espora	Herculano
					Apertadinho	Camocim
					Algodões	Analandia
					Camará	Boa Vista do Uru
					Nova Lima	Vacaro
						Coronel Sapucaia
						Zampieri
						Buritis

Obviamente, como citado anteriormente, se o controle referente ao número total de barragens no Brasil é deficitário, o mesmo se aplica para o controle da quantidade de estruturas rompidas, principalmente dos acidentes ocorridos no passado. Enquanto uma pequena compilação a partir das fontes citadas apresenta um total de 31 barragens rompidas desde a década de 1950, Menescal (2005) cita, por exemplo, que somente em 2004 estima-se que mais de 300 barragens de diversos tamanhos e tipos tenham se rompido no Brasil, muitas delas devido à incapacidade de suportar hidrogramas de cheia.

Dos acidentes citados na Tabela 1, alguns, que ocorreram no passado, são tão emblemáticos como o rompimento da barragem de Fundão, em Minas Gerais. Portanto, os colapsos de seus maciços são retratados a partir da compilação de fotos da Figura 8, para a UHE Euclides da Cunha (a), UHE Limoeiro (b), UHE Pampulha (c) e Barragem Orós (d).



Figura 8 – Rompimentos nas décadas de 1950 a 1970 (adaptado de Carvalho, 2015 e Lauriano, 2009)

Considerando o histórico de colapsos em barragens internacionais, diferentemente das nacionais, parte-se do pressuposto de que os mesmos se resumem a rompimentos de grandes maciços, existindo vasta literatura internacional que trata do assunto. Enquanto no Brasil são esperadas algo em torno de 1.400 grandes barragens (ANA 2015b), utilizadas para os mais diversos fins, ICOLD (2017) estima que em nível mundial, sejam esperados mais de 58.000 grandes barramentos, com uma evolução de construção que teve seu ápice na década de 1970. A Tabela 2 apresenta os principais acidentes envolvendo rompimentos em outros países. Esta compilação foi realizada com base em Aguiar *et al.* (2014) e Dam Failure (2017). Parte do histórico de rompimentos ocorridos em escala mundial foi, ainda, estudado por Zhang & Xu (2007), que utilizaram um banco de dados de mais de 900 barragens que sofreram colapsos a partir da década de 1950, e percebeu que mais de 60% dos rompimentos ocorreram em barragens de terra, conforme indicado na Figura 9. Outro levantamento relevante foi o

apresentado por FERC (2004) que apontou que ocorreram algo da ordem de 200 rompimentos de barragens notáveis no século 20, resultando em mais de 8.000 mortes.

Tabela 2 – Principais barragens colapsadas em nível mundial até 2014 (Fonte: Dam Failure, 2017)

BARRAGEM	PAÍS	TIPO	ALTURA	ANO DE RUPTURA
Marib Dam	Iemen	-	-	575
Puentes Dam	Espanha	-	-	1802
Dale Dyke (Bradfield)	Inglaterra	Terra	29	1864
Iruhaike	Japão	Terra	28	1868
Mill River	USA	Terra	13	1874
South Fork Dam	usa	-	-	1889
South Fork	USA	Terra	22	1889
Walnut Grove	USA	Enrocamento	34	1890
Gohna Lake dam	Índia	-	-	1894
Bouzey	França	Concreto Gravidade	15	1895
Austin	USA	Concreto Gravidade	15	1911
Tigra Dam	Índia	-	-	1917
Llyn Eigiau dam and Coedty reservoir	Inglaterra	-	-	1925
St Francis	USA	Arco	62	1928
Alla Sella Zerbino	Itália	Concreto Gravidade	12	1935
Edersee Dam	Alemanha	-	-	1943
Heiwa Lake Dam	Japão	-	-	1951
Vegga de Terra (Ribadelago)	Espanha	Contrafortes	34	1959
Malpasset	França	Arco	61	1959
Vajont	Itália	Arco	261	1963
Sempor Dam	Indonésia	-	-	1967
Ban Qjao & Shimantan	China	Terra	24,5	1975
Teton	EUA	Terra	123	1976
Machuchu	Índia	-	-	1979
Val di Stava dam	Itália	-	-	1985
Val di Stava dam	Itália	-	-	1985
Saguenay Flood	Canadá	-	-	1996
Zeyzoun Dam	Síria	-	-	2002
Shakidor Dam	Paquistão	-	-	2005
Koshi Barrage	Nepal	-	-	2008
Situ Gintung Dam	Indonésia	-	-	2009
Ajka alumina plant accident	Hungria	-	-	2010
Köprü Dam	Turquia	-	-	2012
Tokwe Mukorsi Dam	Zimbábue	-	-	2014

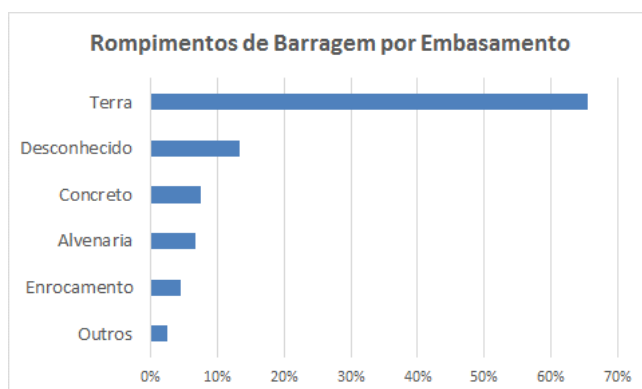


Figura 9 – Rompimento de barragens por tipo de embasamento (Fonte: Adaptado de Zhang & Xu, 2007)

Frente ao histórico apresentado, muito embora possam parecer frequentes os acidentes relativos aos colapsos de barramentos, Silveira (2005) ressalta que os dimensionamentos das

estruturas de uma barragem são realizados de forma a tornar a probabilidade anual de rompimento da mesma equivalente a 0,1%. Isso equivale a um dimensionamento para suportar cheias com tempo de retorno equivalente a 10.000 anos, ou seja, aquela cheia que ocorre apenas uma vez a cada 10.000 anos seria capaz de colapsar o barramento. Esse dado também pode ser interpretado considerando que 1 a cada 100 barragens deverá romper em um tempo de vida útil de 100 anos (Medeiros, 1999). E considerando que a realidade brasileira já ultrapassa 10.000 barragens existentes, pode-se esperar uma probabilidade acumulada de ao menos uma ocorrência relativa ao colapso de maciços brasileiros, por ano.

Este alto risco associado à implantação de barramentos gerou, portanto, demandas regulativas no setor de gerenciamento de barragens brasileiras. O próximo capítulo deste estudo trata, portanto, do estado da arte atual de leis e regulamentações no setor de segurança de barragens.

3.3 LEGISLAÇÃO RECENTE

A legislação relativa à segurança de barragens no Brasil que regula o setor é a Lei 12.334, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, sancionada no ano de 2010 (BRASIL, 2010). Mesmo que a preocupação referente ao rompimento dessas estruturas tenha surgido na década de 1950, ocasionando o desenvolvimento de estudos relativos ao tema desde então (Mascarenhas, 1990), a recente política nacional foi a primeira tentativa de regulação do setor que entrou em vigor. Dentre alguns projetos de leis anteriores, que podem ter sido usados de subsídios para tornar realidade a Lei 12.334, podem ser destacados o Projeto de Lei Nº 1.181, de 2003 (BRASIL, 2003) e o Projeto de Lei Nº 436 de 2007 (BRASIL, 2007). O primeiro projeto de lei tinha como objetivo tecer normas para regulamentar o setor de segurança de barragens, enquanto que o segundo apontava a obrigatoriedade de contratação de seguro contra rompimento de barragens, visando cobrir danos físicos e prejuízos materiais a pessoas físicas e jurídicas domiciliadas a jusante de barramentos (Colle, 2008).

Percebe-se, assim, que a regulamentação instaurada no Brasil ocorreu muito tardiamente. Enquanto que a regulamentação nacional começou a ser pensada no final dos anos 2000, em nível internacional, a preocupação com os riscos associados ao rompimento de barragens começou a partir dos anos 1970, quando o ICOLD (*International Commission on Large Dams*), maior autoridade internacional no assunto, passou a investir fortemente em

programas de segurança de barragens em nível mundial (Willinghoefer, 2015). Ainda, Verol (2010) afirma que alguns países de destaque na economia mundial instauraram suas políticas de segurança de barragens antes dos anos 2000, como é o caso de EUA (1978), Austrália (1978), Portugal (1990) e Canadá (1995). Uma linha do tempo a cerca destas regulamentações é apresentada na Figura 10. Excluindo esses quatro países, mais o Brasil, até o ano 2010, a referida autora afirma que havia ao menos 25 países ao longo do globo com legislações específicas quanto à segurança de barragens.

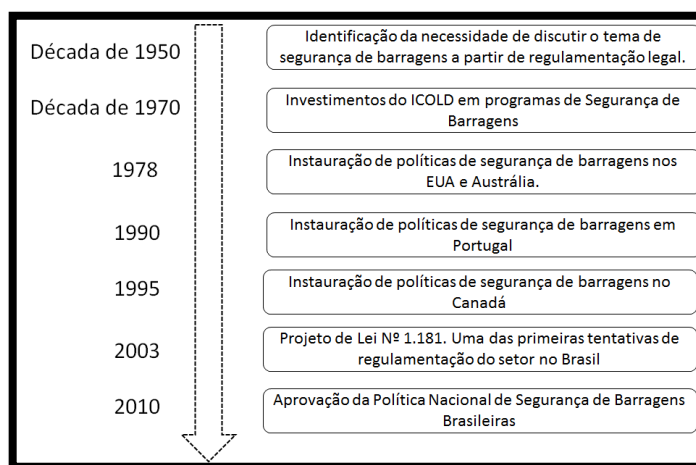


Figura 10 – Linha do tempo envolvendo a regulamentação legal do tema a nível mundial

Voltando à realidade brasileira, mais especificamente à Lei 12.334, ressalta-se que, entre outros, o objetivo desta regulamentação é *garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências*. Esta Lei, entretanto, não é aplicável a todas as barragens, restringindo-se àquelas que se enquadrem em pelo menos um dos itens a seguir, segundo o artigo primeiro: “(i) altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros); (ii) capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos); (iii) reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis e; (iv) categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º.” (Brasil, 2010). De acordo com a Lei 12.334 toda a barragem que está sob esta jurisdição deverá ser classificada por categoria de risco, pelo dano potencial associado e pelo volume, de acordo com os critérios do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) e, mais especificamente, com base na resolução nº 143 do CNRH, que estabelece critérios para a classificação de barragens por seu volume, dano potencial associado e categoria de risco, segundo seu artigo terceiro (CNRH, 2012). Desse modo, tanto a categoria de risco, quanto o dano potencial associado, passam a ser classificados em: (i) baixo; (ii) médio ou; (alto). A

associação desta classificação é discutida, por fim, na resolução nº 91 de 02 de abril de 2012 (ANA, 2012b), que estabelece, entre outros, o nível do detalhamento do plano de segurança da barragem. Interessante notar, que apesar da resolução nº 91 da ANA apresentar a obrigatoriedade de existência de Plano de Ação Emergencial (PAE) para toda barragem que tenha tanto o Dano Potencial Associado como a Categoria de Risco classificados como “Alto” (pela Resolução nº 143 de 2012), a mesma não cita como deve ser feito esse PAE. Esta lacuna foi preenchida de modo preliminar em 2015 (ANA, 2015c) e de forma oficial apenas em 2016, quando a Agência Nacional de Águas publicou o “Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE” (ANA, 2016b). Tendo em vista as colocações até aqui expostas, é no âmbito de como a ANA trata a modelagem da cheia de ruptura em seu guia de orientações, dentre os diversos aspectos presentes na elaboração de um PAE, que se dedica esta dissertação. Neste sentido, ANA (2016b) aconselha a utilização de modelos reconhecidos para esta aplicação, como o modelo HEC-RAS e o modelo DAMBRK, e abre a possibilidade de utilização de métodos simplificados, ao critério da entidade fiscalizadora, a serem aplicados em pequenas barragens com altura do maciço menor que 15 metros e capacidade total do reservatório menor do que 3 hm³ que tenham seu dano potencial associado classificado como “alto”. Para aplicar esta metodologia simplificada, entretanto, são necessárias informações topográficas do vale de jusante. E, nesse sentido, a legislação aponta que “*não havendo outra topografia disponível*” a topografia do vale de jusante poderia ser obtida via modelo digital de elevação (MDE) global proveniente da missão *Shuttle Radar Topography Mission – SRTM* (Farr *et al.*, 2007), que tem resolução planimétrica de 90 metros (compatível com uma escala de 1:250.000). Ainda, a legislação aponta que podem ser processados melhoramentos nestes MDES, com o de ajustamento da calha do rio a partir de geometrias trapezoidais ou retangulares. O manual aponta, ainda, que as edificações de jusante poderiam ser identificadas com o uso do software Google-Earth e imagens de satélite atuais.

Muito embora haja recomendação por parte da ANA em que se permita a utilização do MDE proveniente do SRTM 90 metros para caracterizar o vale de inundação, muitos autores já provaram que existem diferenças consideráveis nos resultados relativos à chegada da onda de cheia, quando são comparados os resultados advindos de simulações que utilizam MDES com resolução da ordem de 30 ou 90 metros e MDEs mais precisos e com escala maior, obtidos via técnicas de aerofotogrametria ou utilização de LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Estudos deste tipo podem ser observados nos trabalhos de Sanders (2007), Yan *et al.* (2015), Wang *et al.* (2012) e Rocha (2015).

Além de refletir sobre o uso de MDEs em estudos de rompimento de barragem, ANA (2016b), resume como devem ser estimados outros parâmetros de suma importância em estudos deste tipo, que são os que envolvem a formação da brecha da barragem. Os parâmetros que envolvem o rompimento do maciço, como tempo de formação, largura e altura da brecha formada, são, nesse sentido, nada mais do que uma pequena compilação da literatura internacional reconhecida nesta área. O próximo capítulo abordará, portanto questões relativas a como ocorre o rompimento do maciço de uma barragem.

3.4 ROMPIMENTO DO MACIÇO

A formação da brecha em uma barragem pode ser originada por diversos fatores, destacando-se seis principais, segundo Lauriano (2009): (i) galgamento; (ii) erosão interna; (iii) falha nas fundações; (iv) efeitos sísmicos; (v) falhas no projeto e; (vi) ações de guerra. no âmbito deste trabalho, serão enfocados principalmente dois fatores de rompimento: galgamento, (*overtopping*) e erosão interna (*piping*).

De forma sucinta, o *overtopping* ocorre quando o vertedouro da barragem não é capaz de extravasar grandes volumes de águas que chegam ao reservatório, ocasionados de forma natural ou não. Esse fato extraordinário resulta na elevação da água no reservatório e consequente galgamento da barragem, como pode ser observado ao lado esquerdo da Figura 11. Quando ocorrido em barragens de terra ou enrocamento, pode ocorrer erosão ao longo da barragem e, como consequência, desestabilizar o maciço e causar o completo rompimento do mesmo.

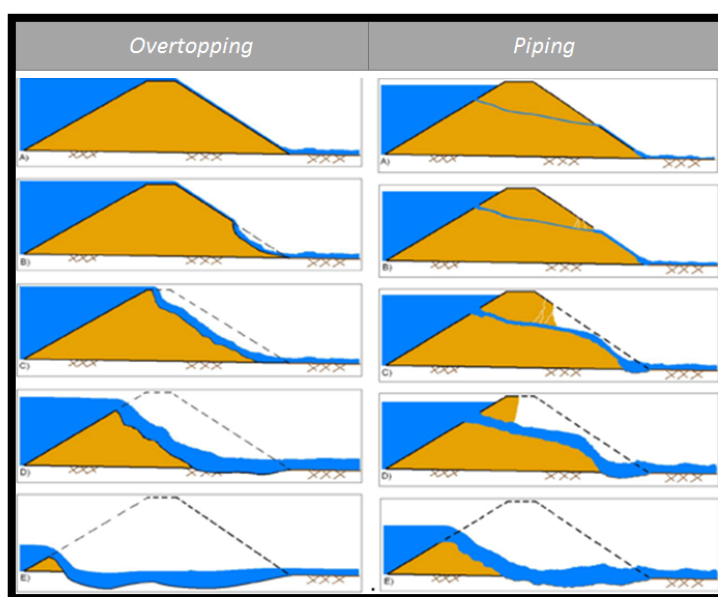


Figura 11 – *Overtopping* x *Piping* (USACE, 2014)

Já o processo de *piping* (lado direito da Figura 11) é um fenômeno relacionado à erosão regressiva, que tem origem a partir da formação de uma infiltração inter-granular, ocorrendo sem caminhos preferenciais no corpo do maciço. Ainda, McCook (2004) *apud* DNR (2016) define erosão interna como resultado de caminhos preferenciais resultantes de defeitos na estrutura do embasamento, normalmente ocorrendo de jusante para montante. Estes processos físicos podem ser simulados matematicamente, como destaca Collischonn & Tucci (1997), que mostram que a evolução da brecha em barragens pode ser simulada pelos seguintes métodos:

- ***Hidrograma de ruptura estimado***, que seria o método mais simples. Este método gera um hidrograma de ruptura a partir de estimativas de vazão de pico, tempo de esvaziamento e volume do reservatório;
- ***Evolução pré-determinada de uma brecha***, que é um dos métodos mais populares de aplicação em todos os tipos de barragem. Resume-se ao crescimento da brecha de acordo com parâmetros de formação da brecha e dimensões máximas que a mesma pode ter;
- ***Evolução por erosão simplificada***, que é especialmente utilizado em barragens de terra ou enrocamento. Este método leva em consideração a erosão do material da barragem por alguma expressão de descarga sólida aliada a aspectos hidráulicos de forma simplificada. Normalmente, se utiliza a equação do vertedor de soleira espessa e;
- ***Evolução por erosão completa***, que é o método mais completo que combina as equações hidrodinâmicas com equações de descarga sólida.

Ainda que os modelos de formação de brecha que incorporam conceitos de erosão e transporte de material sólido pareçam ser os mais fisicamente consistentes, a aplicação dos mesmos acaba não sendo tão prática (Collischonn & Tucci., 1997), uma vez que necessitam uma grande quantidade de dados sobre o material da barragem. Este fato é agravado, pois o hidrograma formado apresenta grande sensibilidade a estes dados, que por sua vez apresentam grande incerteza. Estas constatações fazem dos dois últimos métodos os menos aplicáveis em casos práticos de formação de brecha em barragens segundo Almeida & Franco (1994).

O tamanho e o tempo de formação da brecha, segundo Chauhan *et al.* (2004), estão diretamente relacionados à forma da barragem, ao tipo de estrutura, à topografia do local de implantação e às características de fundação do barramento, além das propriedades do material de construção e do volume armazenado no momento da ruptura.

Embora sejam diversas as metodologias envolvendo a evolução da brecha em um barramento, no âmbito deste trabalho serão enfocadas aquelas existentes no modelo HEC-

RAS, que será o modelo hidrodinâmico a ser utilizado neste estudo. O método presente no modelo HEC-RAS para a evolução da brecha (seja a barragem de terra, de concreto, ou de enrocamento) utiliza conceitos importantes, que foram apresentados por Lauriano (2009): (i) forma da brecha; (ii) profundidade; (iii) largura final; (iv) tempo de formação e; (v) taxa de crescimento da brecha. A estes parâmetros, Monte-Mor (2004) adiciona a localização do centro da brecha como fator importante a ser considerado. Fred & Lewis. (1998) ilustram esta questão a partir de uma figura esquemática que tem a finalidade de visualização dos parâmetros que envolvem a formação de brecha, conforme o método “Evolução pré-determinada de uma brecha” (Figura 12).

No modelo HEC-RAS existem duas opções de escolha para o modo de formação da brecha. Uma é a partir da entrada direta de dados relativos à evolução da brecha e outra é a utilização de um modelo físico simplificado de evolução de brecha. A opção da entrada direta de dados relativos à evolução da brecha requer que o usuário dê a entrada de todos os parâmetros de formação de brecha, como tamanho, tempo de desenvolvimento, progressão da brecha etc. Já a utilização do modelo físico simplificado necessita que o usuário insira no programa a relação entre a velocidade do escoamento e a progressão da brecha inicialmente formada (USACE, 2014).

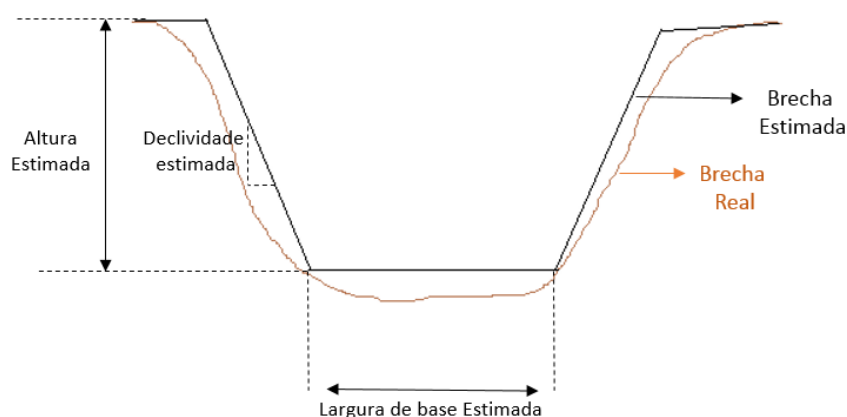


Figura 12 – Esquema de vista frontal de uma brecha e seus parâmetros de formação

Interessante notar que, a partir de vários incidentes e acidentes envolvendo o colapso de maciços ao longo da história, muitos dados relativos às características finais das brechas foram coletados. E alguns trabalhos realizados a partir da comparação destes dados com as características do maciço permitiram pré-determinar possíveis faixas de variação de parâmetros, conforme o tipo de barramento. Isto permite, portanto, que a utilização da metodologia intitulada “Evolução Pré-Determinada da Brecha” não parta de uma abstração total do que realmente pode ocorrer num acidente. Estudos realizados pela Eletrobrás (2003)

apontam, por exemplo, características médias que podem ser adotadas em estudos de rompimento de barragens, segundo a Tabela 3. Já Tabela 4 mostra as componentes médias que podem ser adotadas para estimar parâmetros de brecha, segundo USACE (2014), em que “h” se refere à altura do maciço e “L” ao comprimento do maciço.

Tabela 3 – Características de parâmetros de formação de brecha (Fonte: Eletrobrás, 2003)

Tipo de Barragem	Tempo de Ruptura	Forma da Ruptura / Profundidade da Brecha	Largura da Brecha
Arco	Menor do que 0,1 hora	Declividade da lateral da brecha entre zero e a declividade do vale	Comprimento da Crista
Contraforte	Entre 0,1 e 0,3 horas	Declividade da lateral da brecha normalmente igual à zero	Múltiplos Trechos
Gravidade	Entre 0,1 e 0,3 horas	Declividade da lateral da brecha normalmente igual à zero	Um ou mais trechos (Usualmente menor do que a metade do comprimento da crista)
Terra e Enrocamento	Entre 0,1 e 1 hora (Compactada) e entre 0,1 e 0,5 horas (Não Compactada)	Declividade da lateral da brecha entre 0,25 e 1	Entre 1 e 5 vezes a altura da barragem (normalmente entre 2 e 4 vezes)

Tabela 4 – Características de parâmetros de formação de brecha (Fonte: USACE, 2014)

Tipo de Barragem	Largura Média da Brecha	Inclinação da Brecha	Tempo de Falha (Horas)	Agência
Terra / Enrocamento	(0,5 a 3)h	0 a 45°	0,5 a 4	USACE 1980
	(1 a 5)h		0,1 a 1	FERC
	(2 a 5)h		0,1 a 1	NWS
	(0,5 a 5)h		0,1 a 4	USACE 2007
Concreto - Gravidade	Múltiplas falhas	Vertical	0,1 a 0,5	USACE 1980
	Normalmente < 0,5L		0,1 a 0,3	FERC
	Normalmente < 0,5L		0,1 a 0,2	NWS
	Múltiplas falhas		0,1 a 0,5	USACE 2007
Concreto - Arco	Barragem Inteira	0 à Declividade da parede do vale		USACE 1980
	Barragem Inteira		<0,1	FERC
	0,8L à L			NWS
	0,8L à L			USACE 2007

Percebe-se que a faixa de variação relativa aos dados de entrada envolvendo a formação da brecha em um maciço é bastante considerável. Desse modo, independentemente do tipo de método escolhido para estimar como será formada a brecha de uma barragem, USACE (2014) recomenda que se façam análises de sensibilidade dos parâmetros da brecha, a fim de identificar os seus efeitos no hidrograma de saída. Nesse sentido, FERC (2014) sugere transferir para o vale de inundação as incertezas relativas à determinação da brecha, a partir de um mapa de inundação probabilístico, como apresentado na Figura 13. A mesma instituição também comenta que dependendo da escala e da geometria da topografia de

jusante, MDEs de 10 metros de resolução podem ser suficientes para bem representar estes estudos.

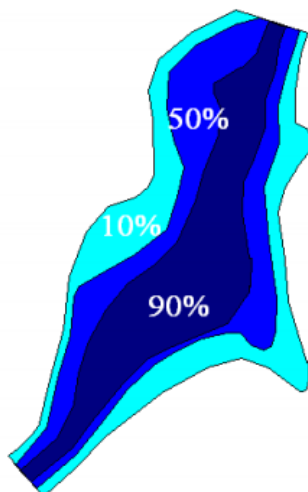


Figura 13 – Mapa de Inundação Probabilístico (Fonte: FERC 2014)

Muito embora as tabelas apresentadas sejam muito utilizadas em estudos de rompimentos de barragens, a partir da aplicação do método de evolução pré-determinada da brecha, muitas equações envolvendo a relação de outras características do barramento com os parâmetros de brecha foram desenvolvidas com o passar dos anos. Compilações relativas a estes trabalhos podem ser observadas nos estudos de Saraiva (2014) ou Ferreira *et al.* (2015), que apresentam equações predictoras relativas a parâmetros do hidrograma de ruptura, como vazão de pico, tempo de pico e tempo de base estimadas a partir de volume do reservatório, área do reservatório, altura da lâmina d'água entre outros não abordados profundamente nesta dissertação.

A forma do hidrograma de ruptura gerado pelo modelo HEC-RAS está vinculada principalmente aos parâmetros de formação de brecha. Para estimar o hidrograma proveniente do colapso do maciço, o modelo HEC-RAS utiliza, entre outros métodos, aproximações numéricas das equações de Saint Venant em duas dimensões (USACE, 2014). Estas equações hidrodinâmicas são abordadas no próximo item deste estudo.

3.5 PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA

Diversos são os modelos hidráulicos atualmente disponíveis para a predição de variáveis envolvendo rompimentos de barragens, seja em abordagens 1D, 2D ou 3D. A Tabela 5 mostra a grande variedade de modelos passíveis de utilização para auxiliar na predição de impactos decorrentes de rompimentos de barragens existentes no mercado,

dividindo-os por dimensionalidade e sem entrar no mérito de quais são gratuitos e quais não são.

Tabela 5 - Modelos hidrodinâmicos disponíveis (adaptado de Lauriano, 2009)

Dimensionalidade	Modelo	Organização
1D	DAMBRK	NWS
	DAMBRK-UK	Binnie & Partners
	FLDWAV	NWS
	FLORIS	ETHZ
	HEC-RAS	USACE
	HYDRO 1D	Mott MacDonald
	MIKE 11	DHI
2D	DBK2	IWHR
	FLOOD 2D	ENEL
	HEC-RAS	USACE
	HYDRO 2D	Mott MacDonald
	JFLOW	Jeremy Berm Association
	LISFLOOD	University of Bristol
	MIKE 21	DHI
XP SWMM	XP SOLUTIONS	
3D	FLUENT	FLUENT
	HYDRO 3D	Mott MacDonald
	MIKE 3	DHI
	TELEMAC-3D	EDF
	TRIVAST	Cardiff Univerity

No âmbito deste trabalho, como anteriormente abordado, foi escolhida a utilização do modelo HEC-RAS 5.03, lançado oficialmente pela USACE (U.S Army Corps of Engineers) em setembro de 2016. O modelo HEC-RAS 5.03 (USACE, 2016), permite que sejam realizadas simulações com escoamento permanente ou não permanente de forma unidimensional ou bi-dimensional a partir da solução numérica das equações de Saint Venant.

3.5.1 MODELOS EM UMA DIMENSÃO (1D)

As equações majoritariamente utilizadas para a modelagem de escoamento de forma unidimensional são conhecidas por equações do escoamento unidimensional não permanente gradualmente variado, equações de Saint-Venant ou equações de águas rasas 1D. Estas equações são consideradas a base no desenvolvimento de modelos de escoamento utilizados para representar o escoamento superficial de cursos hídricos e apresentam as seguintes simplificações (Tucci, 1998):

- Funções Contínuas: Na definição das equações diferenciais, admite-se que as funções são contínuas em relação ao tempo e ao espaço longitudinal, ignorando-se singularidade dos cursos hídricos;

- Fluido incompressível e homogêneo: Ou seja, se aplica apenas a fluidos em que a compressibilidade é desprezível, como é o caso da água;

- Pressão Hidrostática: As pressões consideradas na formulação das equações de Saint-Venant são hidrostáticas, o que significa que a aceleração vertical do escoamento, que ocorre, por exemplo, num rompimento de barragem, é desconsiderada;

- Declividade do Fundo: A simplificação adotada faz referência ao fato de que o gradiente do fundo é igual à tangente do ângulo;

- Escoamento Unidimensional: São desprezadas as variações de velocidade nas direções transversal e vertical. Sendo assim, a velocidade média é representativa da variabilidade da velocidade na seção transversal;

- Atrito: A declividade da linha de atrito é obtida pelo uso das equações de movimento uniforme de Chézy e Manning.

As equações de Saint-Venant 1D são formadas pela equação da continuidade (Equação 01) e pela equação da quantidade de movimento (Equação 02), a seguir apresentadas:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (01)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q/A^2)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (02)$$

Para as duas equações apresentadas, x é a distância ao longo do rio, Q é a vazão, t é o tempo, A é a área da seção transversal, h é a profundidade do escoamento, S_0 é a declividade do fundo no curso d'água e S_f é a declividade da linha de energia. Desse modo, na equação de quantidade de movimento podem ser observados, portanto, da esquerda para a direita, termos relativos à: (i) inércia local, (ii) inércia advectiva, (iii) força de pressão, (iv) força de gravidade e, (v) força de atrito. A supressão total ou parcial dos termos (i) à (v) da equação de quantidade de movimento, por fim, resultam em modelos unidimensionais simplificados, segundo observado por Fan *et al.* (2014).

Destes modelos simplificados, os mais conhecidos são os de Onda Cinemática, (em que são suprimidos da Equação 02 os termos i, ii e iii) e o Não Inercial / Difusivo (originados da supressão, dos termos i e ii da Equação 02), dentre outros mais simples, segundo Collischonn & Dorneles. (2013), Tucci (1998) e Fan *et al.* (2014). A consideração de todos os termos presentes na Equação de Saint-Venant, portanto, representa o escoamento unidimensional na sua forma mais completa, sendo conhecida como modelo hidrodinâmico.

Como explicado anteriormente, não existe solução analítica para este conjunto de equações, forçando a utilização de métodos numéricos para se obter aproximações confiáveis dos resultados. Anteriormente, em sua versão 4.1, a solução numérica interna do modelo

HEC-RAS era dada a partir de métodos implícitos de diferenças finitas (Lauriano, 2009) que foram posteriormente atualizados (a partir da versão 5.0) para uma discretização híbrida combinando o esquema de diferenças finitas e o esquema de volumes finitos (USACE, 2016).

3.5.2 *MODELOS EM DUAS DIMENSÕES (2D)*

Os modelos bidimensionais de águas rasas trabalham com velocidade médias na profundidade, integrando as equações de Navier-Stokes ao longo do eixo vertical z e resolvendo as equações de conservação de massa e de conservação do momento nos eixos x e y do curso hídrico modelado (Martin & McCutcheon, 1998), dando origem às equações 2D de Saint Venant. Estes modelos são aplicáveis a cursos hídricos com profundidades insignificantes frente às extensões de lâmina d'água, como lagos bem misturados, não estratificados e várzeas de inundação (Zhen-Gang, 2008).

As simplificações adotadas no conjunto de soluções em duas dimensões do modelo HEC-RAS 5.03 são muito similares às simplificações adotadas nas equações de Saint Venant 1D: Fluido incompressível, massa específica uniforme e pressões hidrostáticas, sendo a movimentação turbulenta aproximada pela viscosidade turbulenta do fluido. Ainda, assim como ocorre para modelos 1D, as equações 2D de Saint-Venant também podem ser simplificadas, dando origem a outros modelos hidrodinâmicos mais simples que podem ser aplicáveis para determinadas condições de contorno (USACE, 2016).

A utilização do módulo bi-dimensional do HEC-RAS 5.03 permite, portanto, o emprego de duas opções de equacionamentos: Podem ser empregadas as equações de Saint Venant 2D (também chamada de “Full Momentum Equations”) ou uma simplificação da mesma, chamada de “Modelo Onda Difusa 2D” (ou também de “Diffuse Model”), que é originada a partir da supressão de determinados termos da equação da conservação de momento 2D (USACE, 2016). O modelo dado pelas equações de Saint Venant 2D é composto, portanto, da equação da conservação de massa (Equação 03) e da equação da conservação de momento nos eixos x e y (Equação 04 e Equação 05).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + q = 0 \quad (03)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (04)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (05)$$

Nas três equações anteriores, u e v são as velocidades nas direções cartesianas, t é o tempo, q são as contribuições ou abstrações de fluxo, g é a aceleração da gravidade, H é a elevação da superfície d'água, h é a profundidade, v_t é o coeficiente de viscosidade turbulenta, c_f é o coeficiente de fricção de fundo e f é o parâmetro de Coriolis. A Equação 04 e a Equação 05 podem ainda ser reescritas em notação vetorial:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = -g \nabla H + v_t \nabla^2 V - c_f V + f k \times V \quad (06)$$

Em que o operador diferencial ∇ é o vetor da derivada parcial dada por $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$, enquanto k é o vetor unitário na direção vertical. Na Equação 06, os termos representam, da esquerda para a direita: (i) aceleração local, (ii) aceleração convectiva, (iii) termo de gravidade, (iv) viscosidade turbulenta, (v) fricção de fundo e; (vi) termo de Coriolis.

O modelo de Onda Difusiva 2D do HEC-RAS 5.03 provém, portanto, da utilização da Equação da Conservação de Massa 2D e da Equação da Conservação de Momento com apenas dois termos considerados: Os termos de gravidade (iii) e de fricção de fundo (v). Ou seja, a Equação de Conservação de Momento, no modelo Onda Difusiva 2D se resume, em sua notação vetorial, à:

$$g \nabla H + c_f V = 0 \quad (07)$$

Assim como no modelo difusivo em uma dimensão (Fan *et al.*, 2014), o modelo difusivo em 2 dimensões não inclui termos de acelerações locais, que se referem a mudanças na velocidade em relação ao tempo (termo i), e termos de acelerações convectivas, que se referem a mudanças de velocidade em relação à distância (termo ii). Segundo USACE (2016), esses termos podem ser importantes em estudos de rompimentos de barragens, principalmente no quesito da estabilidade do modelo à jusante do barramento.

A solução, tanto do modelo de Onda Difusiva 2D, como o de Saint Venant 2D, é dada a partir de um algoritmo implícito de volumes finitos, que permite passos de tempo maiores do que em métodos explícitos. O método de volumes finitos fornece ao modelo um incremento na estabilidade e robustez quando comparado aos tradicionais métodos de

diferenças finitas. Adicionalmente, o algoritmo é capaz de resolver regimes subcríticos, supercríticos e mistos (USACE, 2016).

O controle dos erros oriundos das simulações realizadas pelo módulo bi-dimensional do modelo HEC-RAS 5.03 é realizado por meio da contabilização da diferença entre volumes iniciais e finais na área 2D modelada. Sendo assim, para cada simulação realizada, o HEC-RAS 5.03 fornece a quantidade de volume total criada durante as simulações e o erro percentual total obtido, considerando entradas e saídas.

Embora existam atualmente modelos hidrodinâmicos capazes de fornecer respostas precisas quanto à predição de manchas de inundação originadas por rompimentos de barragem, Qi & Mustafa (2012) apontam que estudos deste tipo são complexos, sendo os resultados dependentes não só da dimensionalidade utilizada (1D, 2D ou 3D), mas também das variáveis de entrada, e das simplificações consideradas durante o processo. As variáveis de entrada consideradas nestes estudos, segundo os autores, em sua maioria, são: (i) seções topobatimétricas, tanto do reservatório como do curso hídrico; (ii) topografia da planície de inundação; (iii) volume do reservatório; (iv) coeficientes de rugosidade do leito e; (v) modo de formação e evolução da brecha da barragem.

O item a seguir dissertará, portanto, a respeito de variáveis de entrada ainda não explanadas, como a topografia do vale de jusante, volume do reservatório e coeficientes de rugosidade do leito.

3.6 DADOS DE ENTRADA PARA MODELOS DE ROMPIMENTOS

Considerando que dados de entrada relativos à formação de brecha foram abordados no item 3.4, este item abordará os dados de entrada restantes, sendo subdividido em: (i) coeficientes de Manning; (ii) volume do reservatório e; (iii) topografia do vale de jusante.

3.6.1 COEFICIENTE DE MANNING

A utilização de coeficientes representativos da rugosidade de materiais utilizados para dimensionamento de estruturas de condução de água já era datada no século XVIII, a partir da fórmula de vazão de Kutter (ABTC, 2004) e dos trabalhos do engenheiro Francês Philippe Gauckler, em 1867, e do engenheiro irlandês Robert Manning, em 1891 (Fischenich, 2000). Desde então, diversos são os trabalhos e estudos relativos à determinação dos valores do coeficiente de Manning nas mais diversas estruturas e sistemas.

Segundo Lyra *et al.*, (2010) uma das grandes dificuldades em estudos envolvendo modelagem hidráulica reside na escolha correta dos valores de algumas variáveis, como, principalmente, coeficiente de Manning. A natureza de variação relativa aos valores dos coeficientes de Manning pode ser observada também em USACE (2016), que, por exemplo, aponta que para um mesmo tipo de uso de solo a faixa de variação pode ser de até 50% em relação a dado valor central. As informações apresentadas por USACE (2016) foram adaptadas e são apresentadas na Tabela 6. Nesta compilação é possível observar a grande variação que o coeficiente de Manning pode apresentar, para um mesmo tipo de leito.

Tabela 6 – Estimativas quanto ao coeficiente de Manning (adaptado de USACE, 2016)

Local de Escoamento	Descrição	Mínimo	Normal	Máximo
Canais Construídos	Concreto, para diversas situações	0,011	0,018	0,027
	Asfalto, para diversas situações	0,013	0,016	0,016
Rios Naturais	Limpo, pouco sinuoso e sem grandes obstruções	0,025	0,030	0,033
	Igual ao anterior, com alguns matacões e pedras	0,030	0,035	0,040
	Limpo, sinuoso com alguns bancos de areia	0,033	0,040	0,045
	Igual ao anterior, com obstruções, pedras, zonas inefetivas	0,045	0,050	0,060
	Trechos sinuosos, vagarosos com obstruções e muitas zonas inefetivas	0,050	0,070	0,080
	Trechos sinuosos com muitos obstáculos, vegetação e bancos de areia	0,070	0,100	0,150
		Zonas com gramíneas apenas	0,025	0,032
Zonas de Inundação	Zonas Agrícolas	0,020	0,035	0,050
	Vegetação densa de pequeno porte	0,045	0,085	0,160
	Zona limpa com árvores bem espaçadas	0,030	0,040	0,050
	Vegetação não fechada e presença de algumas árvores	0,035	0,055	0,080
	Vegetação média e obstáculos naturais consideráveis para escoamento	0,080	0,100	0,120
	Vegetação densa em diversos estágios evolutivos. Mata fechada.	0,110	0,150	0,200

Em estudos ideais, o valor do coeficiente de Manning utilizado em simulações para avaliação de zonas inundáveis deve ser calibrado, segundo USACE (2014). Entretanto, ressalta-se que a calibração desse coeficiente para eventos de extrema magnitude passa a ser de difícil aplicação, uma vez que muito provavelmente não existam registros de medições de cota e vazão em zonas que só seriam inundadas caso houvesse de fato um rompimento de barragem. Devido a este fato, tabelas como as de USACE (2016) são extremamente utilizadas em estudos envolvendo simulação de grandes cheias. A importância da exatidão deste parâmetro, relativo ao valor do mesmo em conjunto com mapas de uso de solo é reiterada por Kalyanapu *et al.* (2009), que estudou como variações da espacialização do uso do solo podem alterar um hidrograma de cheia, simulado a partir do modelo EPA SWMM, sem, entretanto, variar os valores de Manning. O trabalho realizado por Kalyanapu *et al.* (2009) pode ser

utilizado como um exemplo de como os valores relativos ao coeficiente de Manning podem mudar para um mesmo uso do solo. O referido autor utilizou, por exemplo, um coeficiente de 0,4 para representar florestas, enquanto que USACE (2016) recomenda a utilização de coeficientes da ordem de 0,2 para representar florestas densas. Brisbane (2017) ajuda a ilustrar um pouco a questão da representatividade do coeficiente de Manning frente às configurações do solo. Na Figura 14 pode-se perceber como ocorre a dependência do coeficiente de Manning com a vegetação presente no leito do curso hídrico.



Figura 14 – Coeficiente de Manning das margens e vegetação (Fonte: Brisbane 2017)

3.6.2 VOLUME DE RESERVATÓRIOS

Frequentemente, em estudos envolvendo rompimentos de barragens, a curva cota-volume de um reservatório é bem definida, considerando que é interessante o empreendedor monitorar o assoreamento do leito para fins de geração de energia (Barbosa *et al.*, 2014). A curva cota-volume pode ser estimada por meio de diferentes métodos, sendo o *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)* um dos métodos mais conhecidos nesse segmento (Filho *et al.*, 2003). Independentemente do método de obtenção, uma vez disponíveis curvas cota-

volume bem definidas, é possível então, o modelador determinar qual seria a cota inicial da lâmina d'água de um reservatório, no começo de um rompimento, sem que existam muitos erros agregados. Entretanto, essa não é uma verdade para a maioria absoluta dos barramentos existentes.

Muitas pesquisas vêm sendo realizadas com o passar dos anos envolvendo como a curva cota-volume de reservatórios pode ser estimada a partir de dados de satélite. Trabalhos a respeito deste assunto podem ser observados, por exemplo, em Collischonn & Clarke (2016). Os referidos autores utilizaram séries históricas de dados de satélite da série Landsat para estimar a área inundada de determinados reservatórios com cotas monitoradas, integrando a curva gerada com o passar dos anos e obtendo resultados que contribuem em muito com o atual estado da arte dessa área da hidrologia. Outros trabalhos envolvendo a integração entre dados altimétricos obtidos por satélite e imagens do satélite Landsat podem ser observados em Gupta *et al.* (1985), Alcântara *et al.* (2010), Liu *et al.* (2013) e, Wang *et al.* (2013). Alguns autores mostram, por outro lado, a possibilidade de extração de curvas cota-volume de reservatórios implantados após 2001 por meio da aplicação do MDE oriundo do SRTM. Nesse sentido, Fleishmann *et al.* (2015) aplicaram ferramenta semelhante para extrair curva cota-volume a partir de modelos digitais de elevação como o SRTM no Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB-IPH (Collischonn, 2001), mostrando a aplicação que ferramentas deste tipo apresentam.

3.6.3 TOPOGRAFIA DO VALE DE JUSANTE

A topografia do vale de jusante pode ser obtida das mais diversas maneiras, que envolvem desde a obtenção de informações via topografia *in situ* até informações obtidas via satélite, de modo que cada método apresenta vantagens e desvantagens que devem ser avaliados no momento da escolha de como serão levantadas informações altimétricas de um vale a jusante de um barramento. O levantamento *in situ*, realizado a partir de instrumentos como Estação Total e GPS, por exemplo, tem como vantagem fornecer dados extremamente precisos, mas em contrapartida os trabalhos de campo demandam custos altos por ponto adquirido. Já levantamentos topográficos realizados por Aerofotogrametria e por LiDAR (*Light Detection and Ranging*) podem se apresentar como alternativas interessantes quando se deseja fazer o levantamento altimétrico de grandes áreas com um bom nível de precisão (Jensen, 2009). No começo dos anos 2000, a obtenção de dados topográficos via satélite se colocava como uma alternativa de baixo custo (ou inexistente) para mapeamento de grandes áreas aliada a uma

baixa precisão. Entretanto, com o avanço tecnológico na área de sensoriamento remoto, modelos digitais de elevação obtidos via satélite têm se apresentado como alternativas competitivas frente a levantamentos realizados via aerofotogrametria e LiDAR, dependendo obviamente das condições de contorno desejadas. De um modo geral, pode-se dizer que a configuração geral de uma possível comparação entre os 4 métodos citados não diferiria muito do quadro apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Comparação entre modos de levantamento topográfico para estudos de ruptura (Fonte: o Autor)

Escopo		Levantamento Topográfico			
		<i>in situ</i>	LiDAR	Aerofotogrametria	Satélites
CUSTO	Inexistente/Baixo				x
	Médio			x	x
	Alto	x	x	x	x
MAPEAMENTO	Áreas Pequenas	x	x	x	x
	Áreas Médias		x	x	x
	Áreas Grandes			x	x
EXATIDÃO	Pequena			x	x
	Média		x	x	x
	Alta	x	x		
TEMPO DE OBTENÇÃO	Rápido				x
	Médio		x	x	
	Demorado	x	x	x	

No âmbito da utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE), faz-se importante a classificação dos mesmos em dois tipos de sub-modelos. Segundo Jensen (2009) o nome “Modelo Digital de Elevação” é genérico, e pode ser dividido em “Modelos Digitais de Terreno (MDT)” e em “Modelos Digitais de Superfície (MDS)”, de forma que o MDS pode carregar consigo informações relativas à cotas de árvores, prédios e pontes, enquanto que o MDT carrega consigo apenas informações altimétricas relativas ao solo propriamente dito, conforme apresentado na Figura 15.



Figura 15 – Diferenças entre MDT e MDS (Fonte: o Autor)

Este tema, referente aos Modelos Digitais de Elevação, será abordado a seguir em quatro itens, pois objetiva tecer considerações importantes a respeito de levantamentos topográficos obtidos via: (i) Métodos convencionais *in situ*; (ii) LiDAR; (iii) Aerofotogrametria e; (iv) Dados orbitais.

3.6.3.1 MÉTODOS CONVENCIONAIS

Os levantamentos realizados *in situ*, ou, como considerados neste estudo, *métodos convencionais*, podem ser realizados de diversas maneiras, muito embora seja mais frequente, conforme citado anteriormente, a utilização de aparelhos de GPS (*Global Positioning System*), Estação Total e/ou GPS RTKs (*Real Time Kinematic*), segundo Jensen (2009).

A estação total pode ser considerada como a junção de teodolitos e distanciamentos eletrônicos em um único equipamento, sendo utilizada com o intuito de se medir eletronicamente ângulos e distâncias a partir de um sinal infravermelho emitido e refletido na mesma direção que foi recebido (Almeida *et al*, 2017), podendo ser utilizado, portanto, para identificar a posição de pontos de difícil acesso, desde que estejam em uma linha de visada sem obstáculos. A partir de uma estação total é possível também obter outras informações como condições do nivelamento do aparelho, número do ponto medido, coordenadas UTM ou geográficas e a altitude do ponto.

Já o RTK é uma técnica de posicionamento onde levantamentos se caracterizam pela particularidade de obtenção de coordenadas geodésicas em tempo real. Um sistema RTK é composto por dois receptores com respectivas antenas e link de comunicação para transmitir e receber correções da estação de referência (Silva *et al*, 2012). Ou seja, o conceito de posicionamento por RTK baseia-se na transmissão instantânea de dados de correções de sinais de satélites para os receptores instalados.

3.6.3.2 LIDAR

Levantamentos topográficos envolvendo LiDAR partiram do desenvolvimento de sistemas baseados em tecnologia LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) na década de 80, sendo os primeiros trabalhos comerciais realizados datados de 1993 (Brandalize 2001). Essa tecnologia se baseia na emissão de pulsos eletromagnéticos do infravermelho próximo (na região de 1040 a 1060 *nm* de comprimento de onda) a partir de um sensor instalado em uma plataforma, que podem ser aviões de pequeno porte ou em VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados). Através da medição do tempo de retorno de um pulso emanado é possível estimar a distância entre a plataforma e o ponto de reflexão do pulso no solo (Figura 16). Desse modo, o sistema oferece uma alternativa aos levantamentos

topográficos realizados por métodos convencionais, uma vez que proporciona a obtenção de produtos de grande precisão (Jensen, 2009).

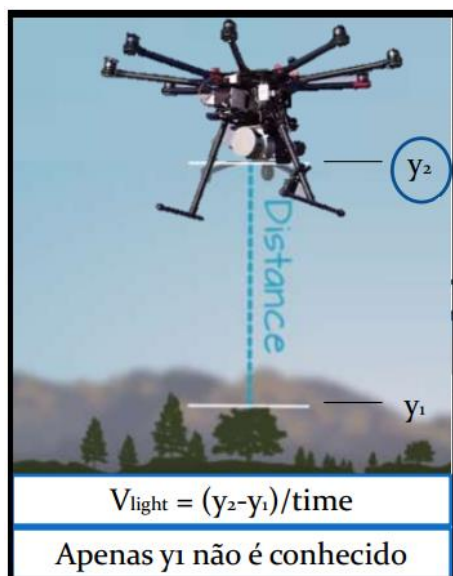


Figura 16 – Princípio físico da utilização de LiDAR embarcado. Fonte: (O Autor)

Levantamentos topográficos realizados via LiDAR podem, ainda, chegar à acurácia de levantamentos realizados por métodos convencionais, como argumentado por Jensen (2009), que apresenta uma comparação entre dados altimétricos oriundos de um levantamento LiDAR e um levantamento realizado por métodos convencionais para determinada área de controle, na região do Rio Savannah, nos EUA. O autor argumenta, por fim, que a acurácia vertical dos dados provenientes do LiDAR foi da ordem de 13 cm, o que fica muito aquém da precisão milimétrica que muitas vezes é necessária em levantamentos topográficos de obras de engenharia. Mesmo assim, outros autores, como Peixoto *et al* (2010) afirmam que a ferramenta tem potencial futuro para substituir levantamentos topográficos convencionais, ou atuar complementarmente ao mesmo.

Muitos pesquisadores já abordaram as potencialidades da utilização da tecnologia LiDAR em diversas áreas, como pode ser exemplificado em Oliveira *et al* (2014). Já Ackerman *et al* (2006), Rendon *et al* (2012) e Weller (2012) utilizaram dados de levantamentos de LiDAR para estimar a topografia do vale de jusante em estudo de rompimentos de barragem a partir do HEC-RAS, mostrando portanto a popularização contínua da utilização dessa poderosa ferramenta em estudos de rompimento de barragens.

Um levantamento via LiDAR que é de interesse no âmbito deste trabalho é o citado por Zanardi *et al* (2013), que foi realizado pela empresa Aerosat, contratada pela Prefeitura de Porto Alegre (Estado do Rio Grande do Sul) para realizar a atualização cartográfica e cadastral do município. O levantamento conduziu à geração de produtos de grande potencial

de utilização no âmbito de simulações hidrodinâmicas envolvendo rompimento de barragens, como fotografias aéreas ortoretificadas com resolução espacial de 0,15 metros e Modelos Digitais de Terreno e de Superfície com resolução espacial de 1 metro. Detalhes destes produtos são apresentados na Figura 17, Figura 18 e Figura 19. A referida imagem mostra o produto com enfoque no reservatório de uma barragem localizada no Parque Saint'Lair, no limite dos municípios de Porto Alegre e Viamão, chamada Barragem Lomba do Sabão. Salienta-se que neste caso não foi realizado estudo topobatimétrico do referido reservatório, de modo que a cota do mesmo é constante em toda sua extensão.



Figura 17 – Imagem do Reservatório da Barragem Lomba do Sabão obtida por Aerofotogrametria

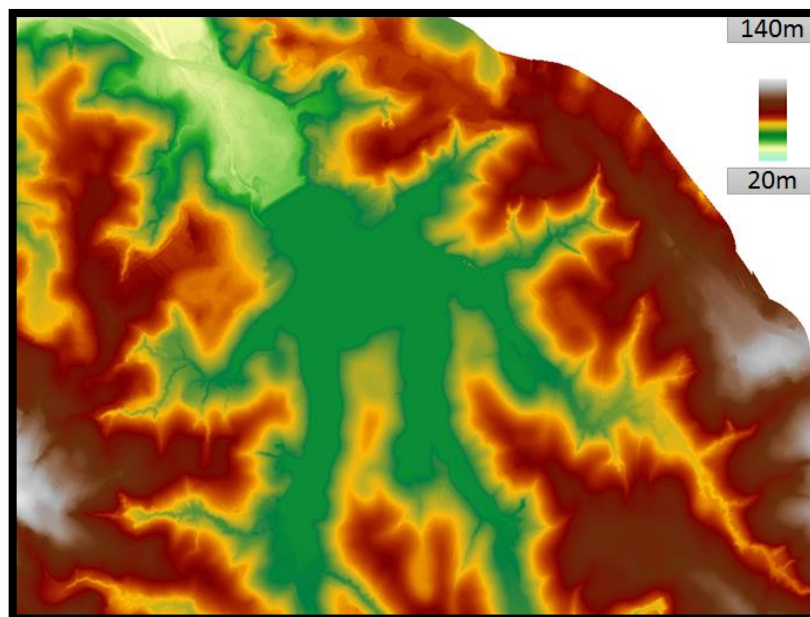


Figura 18 – Reservatório da Barragem Lomba do Sabão obtida por LiDAR - MDT

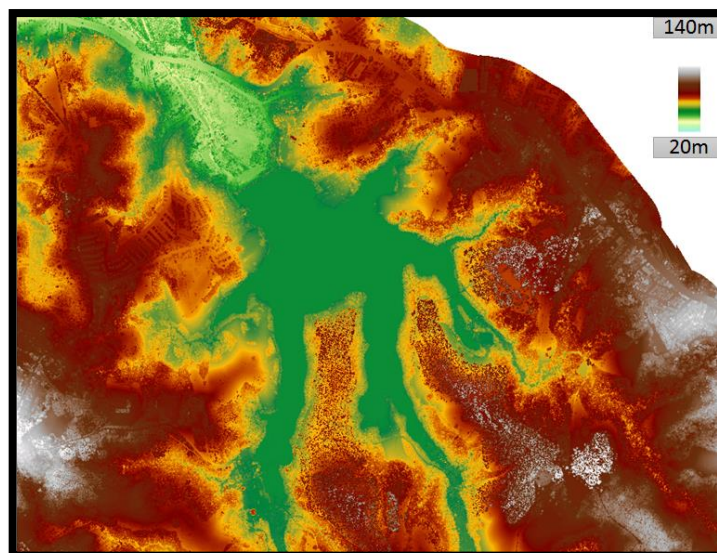


Figura 19 – Reservatório da Barragem Lomba do Sabão obtida por LiDAR - MDS

3.6.3.3 AEROFOTOGRAMETRIA

A aerofotogrametria, segundo Jensen (2009) “... é a arte e a ciência de realizar medições precisas por meio de fotografias aéreas...” e resume-se à, como parte do escopo deste estudo, obtenção de Modelos Digitais de Superfície de determinadas áreas com alta acurácia. A exatidão de MDSs obtidos por aerofotogrametria é dependente diretamente do sensor utilizado para captar as imagens, sendo necessário que as imagens estejam com pelo menos 60% de sobreposição lateral (Linder, 2003) para que haja pelo menos 1 par estereoscópico no processo. Ainda, Jensen (2009) aponta diversos aspectos metodológicos envolvendo a aerofotogrametria convencional que não serão aqui abordados.

Assim como cita Monteiro (2000), a utilização de aerofotogrametria até os dias atuais normalmente é vinculada à utilização de pequenas aeronaves, para levar as máquinas fotográficas até a altitude desejada, estando esta técnica, portanto, atrelada a altos custos.

Entretanto, o avanço nos últimos anos envolvendo a tecnologia de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) de baixo custo com câmeras acopladas facilitou a obtenção de fotografias aéreas por parte da sociedade civil. Desse modo, centenas de fotografias aéreas de um mesmo local podem ser facilmente obtidas para o estudo de uma determinada área. E a estas fotos podem ser aplicadas técnicas de fotogrametria.

Muito embora diversos produtos oriundos de aerofotogrametria com VANTs já sejam utilizados no mercado privado, ainda é incipiente a produção científica, tanto em nível nacional quanto internacional, relacionada à aplicação de VANTs na área da hidrologia, havendo poucos artigos relacionados ao tema divulgados em meios científicos de publicação.

Isto pode estar atrelado ao fato de a tecnologia ter aparecido para a sociedade civil de forma mais consistente a partir de 2014, quando VANTs de baixo custo começaram a ser produzidos por empresas como a DJI e a AirParrot, por exemplo.

Um dos primeiros estudos relacionando aerofotogrametria de VANTs e recursos hídricos foi realizado por Flener *et al.* (2013), que propôs a elaboração de um MDS de alta resolução para cursos hídricos e suas planícies de inundação a partir da combinação entre aerofotogrametria e um sistema LiDAR acoplado em um VANT, mostrando que é possível aliar estas duas técnicas para obter inclusive a batimetria de um curso hídrico. Estudo similar foi também realizado por Leitão *et al.* (2016), que comparou um MDS gerado por aerofotogrametria por meio do VANT e-Bee com MDS gerado por LiDAR, em uma área localizada na Suíça. Palermo & Leite (2013) utilizaram um VANT de pequeno porte e uma câmera Canon Rebel XSI com 12.1 MP para gerar um modelo tridimensional de monumento histórico com precisão planimétrica de 0,33m.

Obviamente, os VANTs neste caso têm o mesmo papel da pequena aeronave no levantamento aerofotogramétrico convencional. Ou seja, servem apenas como veículo para transportar um sensor de interesse até a altitude desejada. Dessa forma, existem câmeras fotográficas que são reconhecidamente mais adequadas que outras para realizar a restituição aerofotogramétrica de determinada área de estudo. Câmeras fotográficas com alta resolução e função *time lapse* (que permite que seja programada sequência de fotografias por período de tempo) e com lentes que possuam distância focal adequada de modo a não ocasionar o efeito “Olho de Peixe”, como ocorre nas fotografias geradas pela linha de câmeras Go-Pro, são sem dúvida mais adequadas para serem utilizadas em estudos aerofotogramétricos.

Em um primeiro momento, a maior parte de pesquisadores e profissionais afirmam não ser possível realizar fotogrametria com câmeras como as Go-Pro acopladas em VANTs. Esse fato se dá não só pelo sistema de captura deste tipo de câmera, denominado *Rolling Shutter*, mas também pelas distorções relativas à Distorção Radial Simétrica, ocasionada pelo tipo de lente utilizada, que permite a obtenção de cenas de áreas maiores. Navarro *et al.* (2014), apresentam um estudo, entretanto, em que são utilizadas técnicas de fotogrametria a partir de uma câmera Go-Pro para reconstituir um modelo tri-dimensional de uma fachada de um prédio, mostrando que a utilização de câmeras deste tipo na fotogrametria pode sim gerar resultados satisfatórios.

Com base em experiências desse tipo, Reberte *et al.* (2016), utilizaram um VANT da empresa DJI com uma Go-Pro embarcada para obter fotografias aéreas de determinada área de projeto. Os referidos autores processaram as fotografias no software *Agisoft Photoscan*, e

mostraram ser possível obter produtos aerofotogramétricos de qualidade a partir da utilização de câmeras da linha Go-Pro como sensor de obtenção de fotografias. Testes similares foram realizados por Bolognesi *et al.* (2015) que provaram a possibilidade de, a partir desta tecnologia, obter erros médios inferiores a 2cm.

É interessante notar, também, que no âmbito tanto da hidrologia como de simulações hidrodinâmicas, a utilização de MDS que tenham resolução espacial da ordem de 5 metros muitas vezes já é considerada satisfatória. Desse modo, a possível geração de MDS a partir de câmeras da linha Go-Pro que possa vir a ter erros agregados ainda assim pode se constituir, portanto, em informações muito valiosas para engenheiros hidráulicos.

O atual estado da arte de obtenção de fotografias aéreas a partir de VANTs, independentemente de qual seja a plataforma de voo, ou a câmera fotográfica, passa necessariamente pelo processamento das fotos em softwares específicos. Os softwares mais reconhecidos atualmente que fazem esse tipo de processamento são o *Agisoft Photoscan* e o *Pix4D*. A Figura 20 mostra o potencial existente na utilização deste tipo de ferramenta em que são comparados o MDS construído a partir do processamento, no software *Agisoft Photoscan*, das imagens capturadas por uma câmera Go-Pro acoplada em um VANT DJI Phantom 2 e o MDS originado pelo levantamento LiDAR realizado na cidade de Porto Alegre, conforme exposto no item 3.6.3.2. O local onde foi realizado o levantamento das imagens foi a área do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Porto Alegre/RS.



Figura 20 – Produtos oriundos a partir de aerofotogrametria

O *Agisoft Photoscan*, assim como o *Pix4D*, trabalha a partir de uma busca de pontos em comum dentre todas as fotografias analisadas, a partir do algoritmo SIFT – *Scale Invariant Feature Transform*, que consegue identificar mesmas feições para diferentes ângulos de visada. Este algoritmo, segundo Silveira (2008) foi proposto por Lowe (2004), e tem sido empregado com sucesso na área da robótica. Ele é invariante quanto à escala de rotação e parcialmente invariante quanto à iluminação e não será explorado no âmbito deste estudo. A partir dessa tecnologia, os programas conseguem realizar automaticamente a

estereocorrelação em porções ortoretificadas das imagens, calculando a paralaxe (e correspondente elevação) associada a cada novo ponto do modelo estéreo (Jensen, 2009). Mais informações técnicas a respeito do processamento de imagens no software Photoscan podem ser encontradas em Agisoft (2016) e não serão aqui abordadas, pois fogem do objetivo central desta pesquisa.

A utilização de aerofotogrametria para alvos terrestres é uma tecnologia consolidada e estável, até certo ponto. Entretanto, existem problemas relacionados à utilização de aerofotogrametria em cursos hídricos, principalmente pelas modificações constantes na configuração da superfície da lâmina d'água, segundo Jagt & Alsdorf (2014). Além disso, a partir de levantamentos realizados no âmbito deste trabalho, se percebeu que outro problema relativo à realização de aerofotogrametria em cursos hídricos, mais especificamente em reservatórios, é devido à posição solar, uma vez que a luz solar pode refletir na superfície da lâmina d'água, dando a impressão que está na mesma posição para fotografias tiradas em diferentes locais.

Interessante ressaltar também as diferenças básicas entre a topografia levantada por métodos convencionais e aquela levantada via aerofotogrametria. Dentre elas, podem ser citadas as diferenças relacionadas à precisão, cobertura vegetal, tempo de processamento de dados e capacidade para se mapear grandes áreas. Enquanto a geração de topografia por meio de aerofotogrametria tem precisão centimétrica, alta capacidade para mapear grandes áreas em pouco tempo (dependendo do equipamento) e gera como resultado um MDS, a utilização de topografia convencional via estação total, por exemplo, tem como característica principal o levantamento de pontos com precisão milimétrica, alto tempo para obtenção de dados de grandes áreas e geração de um MDT, ou seja, sem a influência da copa das árvores (Geodrones, 2016). Apesar de as duas tecnologias parecem ser opostas em um primeiro momento, percebe-se que na verdade elas devem ser complementares, uma vez que a obtenção de MDSs via aerofotogrametria e VANTs passa necessariamente por uma calibração. Essa calibração é realizada a partir da demarcação de alvos de controle postos no local da área de projeto, que devem ser levantados, por exemplo, com o uso de métodos convencionais, dos quais se destacam o uso de GPS ou de Estação Total.

3.6.3.4 DADOS ORBITAIS

A obtenção de dados altimétricos a partir do uso de satélites está ligada diretamente ao amadurecimento da utilização de Sistemas de Informações Geográficas e do Sensoriamento Remoto que ocorreram nas décadas de 1970 e 1980 (Hunter & Goodchild, 1995). Na década

de 1980 já era possível a obtenção de modelos digitais de elevação a partir de informações levantadas pelo satélite Spot 4, conforme Holmes (1984) e Barros (2005). Um dos primeiros modelos digitais de elevação disponibilizados de forma global, entretanto, foi disponibilizado apenas na década de 1990. Intitulado de GTOPO30, o modelo tinha resolução espacial de aproximadamente 900 metros (Araujo, 2010). A evolução da tecnologia na área do sensoriamento remoto, entretanto, permite, nos dias atuais, a obtenção de modelos digitais de elevação com até 0,5 metros de resolução espacial (Vricon, 2017).

Esta evolução na área de sensoriamento remoto voltado para obtenção de dados altimétricos permitiu, portanto, a utilização de dados orbitais para subsidiar modelagens hidrodinâmicas de alta precisão em locais de difícil acesso (Schumann *et al.* 2016). Considerando-se o processo evolutivo de sensores remotos, bem como dos produtos gerados, acredita-se que futuramente a qualidade dos modelos digitais de elevação globais e gratuitos fornecidos por sensores orbitais seja tamanha que poderá ser necessária a realização de *downscaling* das informações para diminuir os custos computacionais (como tempo de processamento de dados) atrelados ao processo, mesmo para simulações hidráulicas para pequenas áreas. Além disso, essa nova geração de sensores orbitais está fornecendo informações altimétricas tão precisas que seus produtos relativos a MDEs podem acabar por se tornar competitivos o suficiente para fazer frente aos custos relativos à realização de levantamentos aerofotogramétricos convencionais em grandes bacias hidrográficas.

De modo geral, um modelo digital de elevação (tanto o MDT, como o MDS) pode ser obtido a partir de duas técnicas principais. Neste sentido, podem ser utilizados sistemas ativos, a partir da aplicação de técnicas de Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSAR), como ilustrado na Figura 21, ou sistemas passivos, que são dependentes da capacidade de imageamento do sensor em Pares Estereoscópicos, e se baseiam na extração de informação de duas imagens de um mesmo local, adquiridas em ângulos diferentes de imageamento (Figura 22). Enquanto a utilização de sistemas passivos para geração de MDEs depende unicamente da recepção da luz solar refletida na Terra pelo sensor, sistemas ativos emitem radiação eletromagnética, e capturam a resposta do sinal.



Figura 21 – Obtenção de MDE a partir de InSAR (Fonte: TanDem-X, 2017)



Figura 22 – Obtenção de MDE a partir de par estereoscópico (Fonte: Vricon, 2017)

A física envolvida no processo de obtenção de MDEs a partir de InSAR resume-se, portanto, à emissão de pulsos de Radiação Eletromagnética e detecção da resposta do alvo pelo sensor (Jensen, 2009). As imagens de radar de um mesmo local do terreno são, portanto, registradas por antenas em diferentes localizações, o que gera a aquisição de duas informações de um mesmo local com dois ângulos de visada diferentes. Sendo assim, a avaliação do interferograma gerado permite medidas tridimensionais de um local específico (Paradella *et al.*, 2015).

Já a técnica de utilização de pares estereoscópicos para gerar modelos digitais de elevação vem sendo aplicada ao longo dos anos, desde que passou a ser possível captar imagens *of nadir* de um mesmo local, a partir do mesmo satélite. A partir destas imagens obtidas, portanto, podem ser aplicados modelos matemáticos que são capazes de extrair informações altimétricas do terreno avaliado, como bem explicado em Jensen (2009) e Galindo (2008).

Usualmente, as informações altimétricas utilizadas em simulações hidrodinâmicas podem ser associadas a dois formatos: formato *raster* e formato *vetorial*. Os dados em formato *raster* consistem em uma malha quadrangular em que para cada *pixel* com resolução x,y há uma cota z associada, sendo este o tipo de formato utilizado para disponibilizar informações altimétricas a partir de dados orbitais. Já o formato *vetorial* normalmente está associado à disponibilização de curvas de nível com resolução dada a partir de sua escala, obtidas a partir de outras técnicas vistas anteriormente, como métodos convencionais, LiDAR e Aerofotogrametria. É importante, portanto, saber como as escalas relativas a dados em formato vetorial se relacionam com as resoluções espaciais de formatos de *raster*.

Segundo Boggione *et al.* (2009), a relação existente entre a resolução espacial de um pixel e a escala de dados vetorizados pode ser estimada a partir da equação a seguir:

$$Escala = \frac{1}{2.Resolução\ Espacial.1000} \quad (08)$$

A aplicação da Equação 08 a algumas resoluções espaciais usualmente utilizadas em MDEs oriundos de dados orbitais e permite a obtenção de um quadro comparativo aproximado entre resoluções espaciais máximas esperadas e escalas, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Escala máxima provável x resolução do pixel

Escala	1:180.000	1:60.000	1:40.000	1:20.000	1:10.000	1:4.000	1:2.000	1:1.000
Resolução Espacial do Pixel (m)	90	30	20	10	5	2	1	0,5

A Tabela 9 apresenta, por fim, os principais produtos relativos a MDEs atualmente prontos e disponíveis para todos os continentes, considerando-se tanto produtos distribuídos gratuitamente como produtos pagos. Muitos são, entretanto, os MDEs locais existentes além dos apresentados, uma vez que a técnica de obtenção de dados altimétricos a partir de pares estereoscópicos é passível de aplicação a uma vasta gama de satélites lançados ao espaço desde os anos de 1980. Além destes, podem também ser citados outros MDEs que partiram da integração de dois ou mais produtos altimétricos ou técnicas de obtenção, como observado em Schumann *et al.* (2016), Chang & Ge, (2010) e Poli *et al.* (2015), que apresentam, em seus trabalhos, modelos como o Ace-2, Etopo 5, TerrainBase e modelos locais oriundos de imagens de satélite de alta resolução espacial, como o QuickBird, GeoEye-1, WorldView-2, entre outros. A referida tabela, portanto, resguarda-se em apresentar apenas os MDEs globais, de fácil acesso, com acurácia publicada em meios científicos e com grande relevância tanto no meio científico como no meio comercial. Finalizando o capítulo de revisão bibliográfica, o próximo item abordará os estudos anteriormente desenvolvidos que discutiram análises de sensibilidade dos dados de entrada em estudos de rompimentos de barragens.

Tabela 9 – MDEs atualmente disponíveis que podem ser utilizados como dados de entrada em simulações hidrodinâmicas

Produto	Resolução Espacial Aproximada (m)	Ano de Obtenção de Dados	Ano de Publicação	Satélite	Agência	Custo Mínimo para Aquisição (R\$)	Referências	Erro RMSE (m)	Método
GTOPO30	900	-	1996	-	EROS (EUA)	Gratuito	Araujo (2010) e Schuman <i>et al.</i> (2016)	9 - 30	O modelo GTOPO partiu da compilação de diversas fontes de informações topográficas e produtos altimétricos
SRTM 90	90	2000	2003	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (SRTM)	NASA (EUA) / DLR (ALEMANHA)	Gratuito	Rodriguez <i>et al.</i> (2006) e Paradella <i>et al.</i> (2015)	6 - 10	Interferometria de Radar de Abertura Sintética - InSAR
SRTM 30	30		2014		NASA (EUA) / DLR (ALEMANHA)	Gratuito		6 - 10	
ASTER GDEM 30	30	1999 - 2008	2011	TERRA	METI (JAPÃO) / NASA (EUA)	Gratuito	Tachikawa <i>et al.</i> (2011) e Lopes (2011)	13	A geração de dados altimétricos pelo sensor "Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)" partiu da aplicação da técnica de pares estereoscópicos.
AW3D30	30	2006 - 2011	2015	<i>Advanced Land Observing Satellite</i> (ALOS)	JAXA (JAPÃO)	Gratuito	Santilan & Santilan (2016)	6	Este produto foi obtido a partir da re-amostragem do produto AW3D, com a finalidade de ser distribuído gratuitamente.
AW3D	5		2016			10.000 R\$ / 100 km ² (100,00 R\$/Km ²)	Takaku <i>et al.</i> (2016) / Egg (2012) e Tadono <i>et al.</i> (2014)	5	O modelo foi gerado a partir da utilização de aproximadamente 6,5 milhões de imagens do Satélite ALOS, mais especificamente a partir do sensor "Pancromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM)", que operou em uma única banda pancromática de comprimento de onda entre 0,52 e 0,77 micrometros. O sensor PRISM é dotado de três detectores posicionados em visadas distintas (Nadir, Forward e Backward), o que permite a obtenção de pares estereoscópicos utilizados para a construção do MDE.
TanDem-X	12	2010 - Presente	2014	TerraSAR-X / TanDEM-X	DLR/ALEMANHA	5.500 R\$ / 100 Km ² (55,00 R\$/ Km ²)	Schuman <i>et al.</i> (2016) e DLR (2016)	2	Utilizando a técnica de Interferometria de Radar de Abertura Sintética - InSAR (Banda X) para geração de MDEs, ambos satélites coletam informações altimétricas com resolução temporal de 11 dias, para um mesmo local.
DigitalGlobe DSM	0.5	2015 - Presente	On Demand	World View (1-4) / GeoEye -1	DIGITAL GLOBE COMPANY (EUA) Privada	80.000 R\$ / 1.000 Km ² (80,00 R\$ / km ²)	Vricon (2017) e DigitalGlobe (2016)	3	Obtido a partir de pares estereoscópicos de imagens de alta resolução.
DigitalGlobe DSM-10	10					63.000 R\$ / 10.000 Km ² (6,30 R\$/km ²)			

3.7 ESTUDOS ANTERIORES ENVOLVENDO INCERTEZAS ASSOCIADAS

Muitos pesquisadores, inclusive alguns já citados no escopo deste trabalho, dedicaram-se para examinar como a perturbação de alguns dados de entrada altera os resultados finais em modelagens da propagação de onda de cheia proveniente de ruptura de barragens. Entre eles, Collischon & Tucci (1997) fizeram uma análise de sensibilidade dos dados de entrada no modelo DAMBRK para a barragem de Ernestina, localizada no estado do Rio Grande do Sul. Os autores concluíram que os resultados do modelo são particularmente sensíveis aos parâmetros relacionados ao volume do reservatório, mais precisamente ao nível da cota d'água inicial do reservatório. Além disso, identificaram que as incertezas relativas ao coeficiente de Manning tem grande impacto na determinação do tempo de pico. Informações desta grandeza também foram constatadas por Gallego *et al.* (2009) que fez uma análise de sensibilidade no estudo de rompimento da barragem de Baldwin Hills, nos Estados Unidos. O referido autor notou que o volume de água no reservatório é fator crítico que mais influência causa nos resultados obtidos, mas que o modo de formação da brecha também é importante.

Em contrapartida aos resultados obtidos por Collischon & Tucci (1997), Huokuna (2001) mostra que o modo como evolui a brecha de uma barragem é um dos principais condicionantes da forma e intensidade do hidrograma formado para jusante, implicando diretamente na delimitação de zonas inundáveis, em um estudo realizado para uma barragem localizada na Finlândia.

Kuhlkamp (2016) ressalta as dificuldades envolvendo a determinação de parâmetros de ruptura do maciço, mas afirma que, de modo geral, os hidrogramas gerados a partir de diferentes configurações de brecha tendem a se convergir para valores similares no vale de jusante, contrariando, portanto, os resultados encontrados por Huokuna (2001). Kim *et al.* (2016) suportam os aspectos ressaltados em Kuhlkamp, afirmando que estudos anteriores mostram que as extensões das inundações não estão tão correlacionadas com variações na brecha da barragem.

Rocha (2015) também avaliou como variações nos dados de entrada de um estudo de rompimento de barragem de rejeito alteram os resultados da onda de cheia, e encontrou que a topografia pode ser o principal fator de influência na previsão da mancha de inundação, contrariando, portanto, todos os autores anteriores.

Observa-se, portanto, que diversos autores apontam diferentes dados de entrada como fatores predominantes em estudos de rompimento de barragens. O item a seguir apresenta os materiais e métodos utilizados para gerar uma visão global acerca do problema.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia geral deste trabalho consistiu na realização de diversas simulações usando diferentes dados de entrada para fatores como coeficiente de Manning, Volume do Reservatório, Configuração da Brecha e Topografia do vale de jusante, além do tipo de modelo de simulação, afim de avaliar o impacto da incerteza de cada um desses fatores nos resultados de saída do modelo, como vazão de pico, tempo de pico, profundidade máxima e velocidade máxima, utilizando o módulo 2D do modelo hidrodinâmico HEC-RAS 5.03.

A partir da aplicação desta metodologia foi possível mapear as incertezas relativas à simulação de ondas de cheia proveniente de barragens para áreas com características distintas, conforme ilustrado na Figura 23.

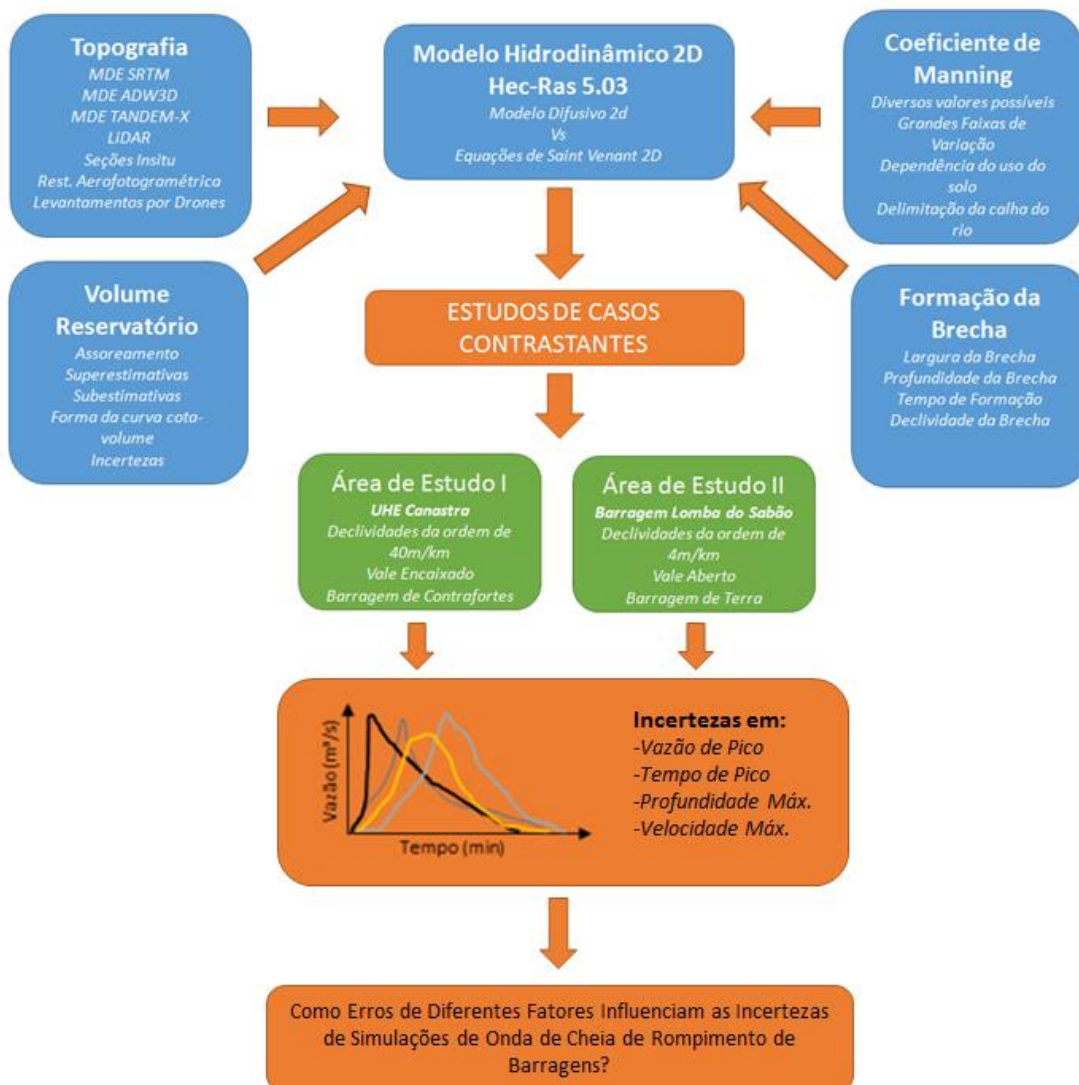


Figura 23 – Ilustração da metodologia adotada neste trabalho

Na Figura 24 podem ser observadas as localizações dessas duas áreas de estudo consideradas. A primeira, referente à UHE Canastra, se localiza na serra gaúcha, distante em torno de 150 km de Porto Alegre e é representada no mapa pelo ponto de cor magenta. O reservatório da UHE Canastra é considerado pequeno, enquanto que o vale de jusante se apresenta bem encaixado e com altas declividades. Já a barragem da Lomba do Sabão, que se localiza numa região muito plana do Estado, é caracterizada pelo ponto vermelho no mapa da Figura 24. O reservatório da barragem Lomba do Sabão é considerado como grande e o vale é bastante aberto, com baixas declividades.



Figura 24 – Áreas de Estudo

Neste capítulo de Material e Métodos são apresentados os seguintes itens:

- (i) *Extração de Variáveis Hidráulicas do modelo HEC-RAS 5.03*, que mostra os métodos, conceitos e simplificações consideradas neste trabalho sob o âmbito de obtenção dos dados a partir do modelo HEC-RAS 5.03;
- (ii) *UHE Canastra*, que apresenta, além da área de estudo em questão, os dados de entrada utilizados nas simulações e os cenários considerados e;
- (iii) *Barragem Lomba do Sabão*, que apresenta, além da área de estudo em questão, os dados de entrada utilizados nas simulações e os cenários considerados.

4.1 EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS HIDRÁULICAS

Com o intuito de realizar avaliações mais rápidas e dinâmicas, optou-se por automatizar o processo de obtenção de informações hidráulicas em cada seção estudada. Desse modo, os resultados advindos do HEC-RAS 5.03 foram processados de forma padronizada com a utilização de macros elaboradas no software Microsoft Excel 2013. As variáveis hidráulicas calculadas para cada seção foram:

- Vazão de Pico (Q_p);
- Tempo de chegada do pico (T_p);
- Tempo de ascensão do hidrograma (T_a);
- Profundidades máximas (P_m) e;
- Velocidades máximas (V_m).

As variáveis picos de vazão, tempo de chegada do pico e tempo de ascensão, são informações obtidas diretamente via tabela referente ao hidrograma resultante em uma dada seção de avaliação inserida no projeto. Na Figura 25 é apresentado um hidrograma exemplificativo, em que se observa a vazão de pico Q_p , com o correspondente tempo de pico T_p e com o tempo de ascensão do hidrograma T_a . No âmbito deste trabalho, considerou-se o parâmetro T_a como sendo o tempo necessário para que a vazão naquele instante seja maior do que a vazão do tempo anterior, somada de uma parcela de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Essa consideração se fez importante para evitar que algumas variações internas na vazão calculada pelo modelo, que em sua maioria eram da ordem de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$, fornecessem falsos valores de T_a .

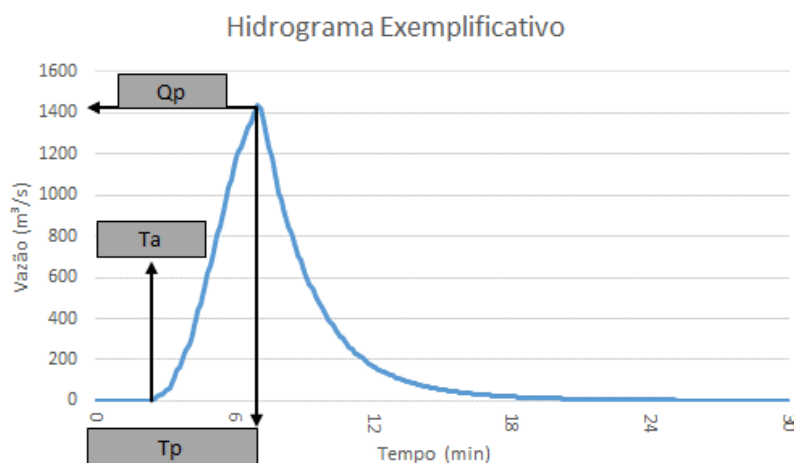


Figura 25 – Hidrograma Exemplificativo de Uma Seção Qualquer.

Já os parâmetros profundidades máximas, médias e medianas e velocidades máximas, médias e medianas foram obtidos via processamento do *output* relativo à “*Water Surface Elevation*”,

fornecido pelo modelo HEC-RAS 5.03, cujo exemplo gráfico é apresentado na Figura 26, ressaltando que as velocidades máximas obtidas por seção são velocidades máximas locais, e não velocidades máximas médias obtidas para toda a seção no momento da passagem do pico de cheia. Este tipo de abordagem pode, portanto, acabar gerando velocidades máximas maiores do que as habitualmente observadas em rompimentos de barragens.

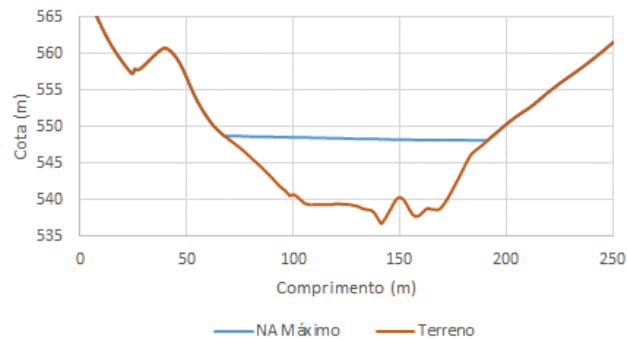


Figura 26 – Resultado *Water Surface Elevation* (WSE) para uma dada seção no modelo HEC-RAS 5.03

4.2 UHE CANASTRA

A UHE Canastra é uma usina hidrelétrica localizada no alto da bacia do Rio Paranhana, mais especificamente no Rio Santa Maria, no município de Canela, no Estado do Rio Grande do Sul. A usina tem uma potência total de 44 MW, representados por duas turbinas Francis de eixo horizontal de 22 MW cada. O reservatório, com área superficial de aproximadamente 0,05 km² e com volume útil da ordem de 0,37 hm³ (CBDB, 2011) é constituído a partir de uma barragem do tipo Ambursen em concreto armado, com altura máxima de 26 metros e comprimento de 179 metros (CEEE, 2011), que é apresentada na Figura 27.

O desvio é realizado por um conduto de adução com comprimento em torno de 6,6 km até a chaminé de equilíbrio da onde partem dois condutos forçados que percorrem em torno de 600 metros até as turbinas e geradores da usina, que aproveitam uma queda bruta de em torno de 344 metros, de vale bem encaixado (Figura 28). Após passar pela usina e gerar eletricidade, a vazão turbinada volta ao rio Paranhana, que é novamente barrado na Barragem de Laranjeiras, localizada a menos de 1 km a jusante da usina de Canastra. O trecho de Rio Paranhana considerado no âmbito deste estudo está entre as duas marcações em amarelo que sinalizam o início e o final do trecho de 8,5 km de extensão, conforme indicado na Figura 28,



Figura 27 – Barragem e reservatório da UHE Canastra (Fonte: Google Earth)



Figura 28 – Caracterização do vale de jusante e arranjo da UHE

A seguir, no **item 4.21**, são apresentados os 7 modelos digitais de elevação utilizados como dados de entrada nas simulações da UHE Canastra, enquanto que no **item 4.2.2** são apresentados os demais dados de entrada considerados nas simulações e os cenários adotados. No **item 4.3.4** é explanado como todos os cenários adotados foram analisados.

4.2.1 MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO UTILIZADOS

Neste item são apresentados os 7 Modelos Digitais de Elevação considerados como dados de entrada das simulações realizadas para a UHE Canastra, que representam todas as possibilidades gratuitas de obtenção de informações topográficas de jusante, somadas a outros levantamentos realizados.

4.2.1.1 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO SRTM_30M

O Modelo Digital de Elevação aqui representado pela nomenclatura SRTM_30M foi originado a partir do processamento do produto oriundo da missão *Shuttle Radar Topography Mission*, com resolução de 1 arco de segundo (30 metros), disponibilizado para a América do Sul em meados de 2014. Este modelo digital de elevação apresenta um erro médio altimétrico de 6 metros para a América do Sul e tem um pixel de aproximadamente 30 metros de resolução espacial. Contudo, procurando-se obter um modelo digital de elevação hidrológicamente consistente, optou-se pela utilização do filtro *fill sinks* da extensão *Arc Hydro* do software Arc-Gis 10.2 (ESRI, 2017) eliminando, portanto, possíveis depressões do terreno que podem ser consideradas como erro.

Cabe ressaltar que o ano da missão *Shuttle Radar Topography Mission* foi posterior ao ano de construção da Barragem de Canastra. Isso quer dizer que o reservatório está presente no MDE original do SRTM, havendo conseqüentemente pixels de cota condizente à cota do nível d'água no local do reservatório. Para fins de simulação de rompimento de barragem no modelo HEC-RAS 5.03, entretanto, estes pixels foram rebaixados, a fim de simular a condição real do terreno antes da construção da barragem. Este processamento (que se resume à retirada do reservatório formado pela barragem de Canastra no MDE) foi realizado a partir de uma interpolação linear entre o que seria a cota do pé da barragem e o que seria a cota do fundo do reservatório, utilizando a ferramenta *Topo To Raster* do ARC-GIS 10.2, dando origem ao modelo SRTM_30M. A Figura 29 procura ilustrar esse procedimento, comparando o resultado da interpolação, que seria o “fundo do reservatório estimado” com algo semelhante ao que seria um fundo real.

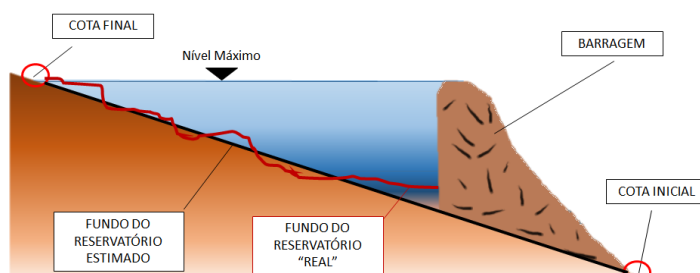


Figura 29 – Perfil transversal esquemático - retirada do reservatório do SRTM 30

A Figura 30 mostra a comparação entre o modelo original e o modelo SRTM_30M no local do barramento, de modo que é possível notar que as inconsistências presentes no modelo não corrigido podem ser um impeditivo para realizar uma simulação adequada, uma vez que há uma grande falsa depressão logo a jusante do barramento. Na Figura 30 o reservatório é representado pelo tracejado azul.

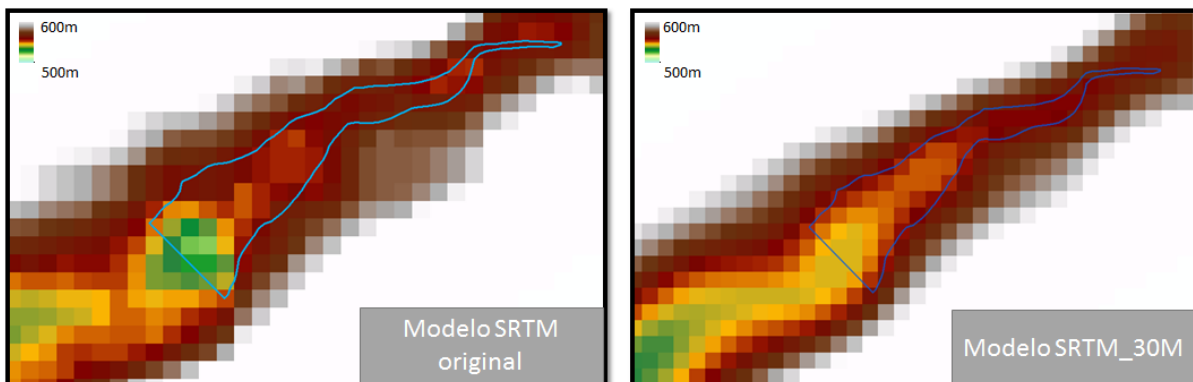


Figura 30 – Comparação entre o modelo SRTM30 e o modelo SRTM_30M

4.2.1.2 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO SRTM_1M

O modelo digital de elevação intitulado SRTM_1M é resultante do *downscaling* do modelo SRTM_30M, (cuja resolução espacial é de aproximadamente 30 metros), para um modelo com resolução espacial de 1 metro. Este procedimento foi realizado a partir de interpolação linear no ArcGis 10.2, utilizando como dado de entrada o modelo SRTM_30M. A ferramenta utilizada para realizar esse processo interpola linearmente os valores centrais de cada pixel, resultando no modelo apresentado na Figura 31.

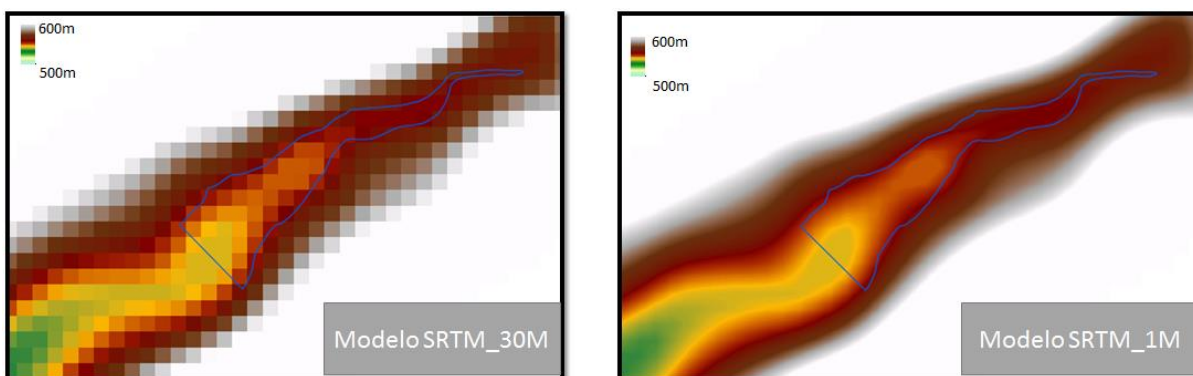


Figura 31 – Comparação entre o SRTM_30M e o SRTM_1M no local da barragem

4.2.1.3 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO SRTM_1M_CALHA

O modelo SRTM_1M_CALHA consiste na adição, ao modelo SRTM_1M, de uma rede de drenagem fictícia, porém esperada. Para tal, a rede de drenagem esperada do modelo

SRTM_1M foi obtida com a utilização de ferramentas presentes na extensão *Arc Hydro*, do software ArcGis 10.2, conforme recomendado por Paiva *et al.* (2011). A partir de então, utilizou-se esta rede de drenagem para “escavar” uma calha de rio fictícia no modelo com as dimensões apresentadas na Figura 32, que foram estimadas com base nas observações realizadas em campo para diferentes seções do Rio Paranhana.

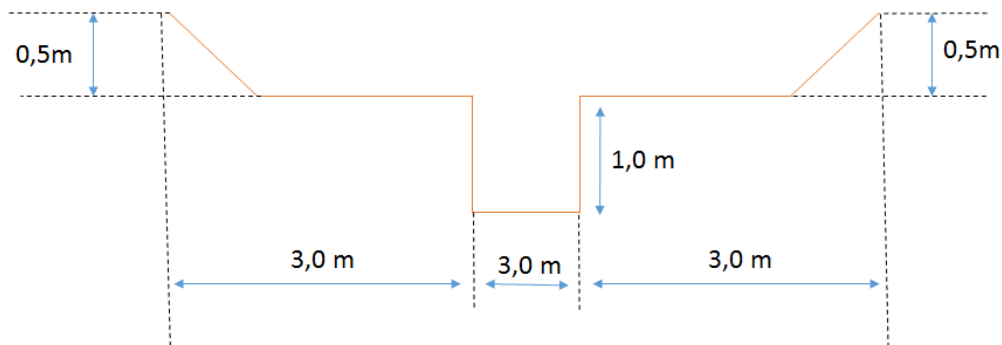


Figura 32 – Dimensões da calha fictícia do Rio Paranhana

A Figura 33 mostra o modelo para o local da barragem, enquanto que a Figura 34 apresenta a diferença para uma seção transversal aleatória existente entre os modelos SRTM_1M e SRTM_1M_CALHA.

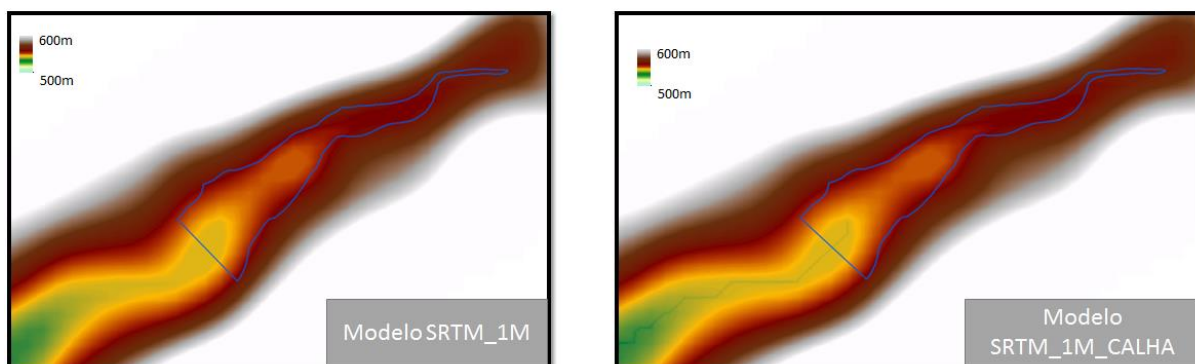


Figura 33 – Comparação entre o SRTM_1M e o SRTM_1M_CALHA no local do barramento

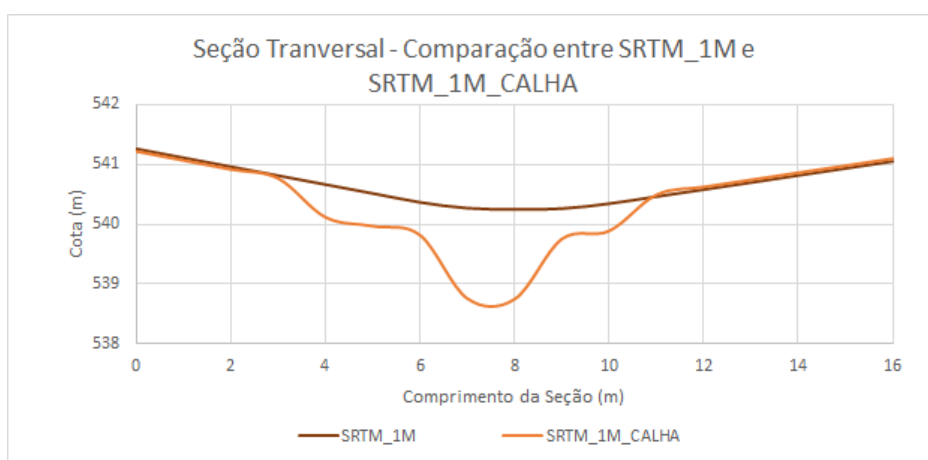


Figura 34 – SRTM_1M_CALHA versus SRTM_1M. Comparação entre seções.

4.2.1.4 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO SRTM_1M_CALHA_VANT

Nos dias 09 e 10 de agosto de 2016 foi realizada uma campanha de campo ao longo dos 10 km de Rio Paranhana localizados a jusante da barragem de Canastra, que teve como objetivo levantar seções topográficas ao longo do trecho analisado. O levantamento dessas seções foi realizado a partir de dois métodos distintos, que, entretanto, se complementam: (i) Levantamento aerofotogramétrico a partir de um VANT e; (ii) Levantamento topográfico convencional com Estação Total e GPS RTK (*Real Time Kinematic*). Nos locais marcados no mapa da Figura 35, com exceção à “Seção 03”, foram realizados levantamentos do tipo topográfico convencional (representados por pontos brancos no mapa), enquanto que as seções 01, 04 e 05 foram também realizados levantamentos a partir de aerofotogrametria. O levantamento aerofotogramétrico não foi realizado em todas as seções avaliadas devido principalmente às condições locais de voo no momento da campanha. O modelo do VANT utilizado foi o Phantom II, da empresa DJI, com uma Go-Pro Hero3+ acoplada. A Estação Total é da marca Topcon, modelo GPT 7501, com precisão angular de 1”, enquanto que o GPS RTK também é da marca Topcon, modelo GR 3, de 72 canais e constelações GPS e GLONASS, com precisão horizontal de 10mm e vertical de 15mm. O distanciamento existente entre as seções é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Distâncias acumuladas entre as seções transversais estudadas

Seção	1	2	3	4	5	6	7
Distância acumulada (m)	30	281	1619	4464	7270	7921	8458



Figura 35 – Locais onde foram realizados os levantamentos

Com a finalidade de caracterizar cada seção levantada por aerofotogrametria, as figuras a seguir (Figura 36 à Figura 38) apresentam, a partir da ortorretificação de diversas fotografias aéreas obtidas a partir do VANT utilizado, o local de cada seção levantada em conjunto com o MDS gerado.

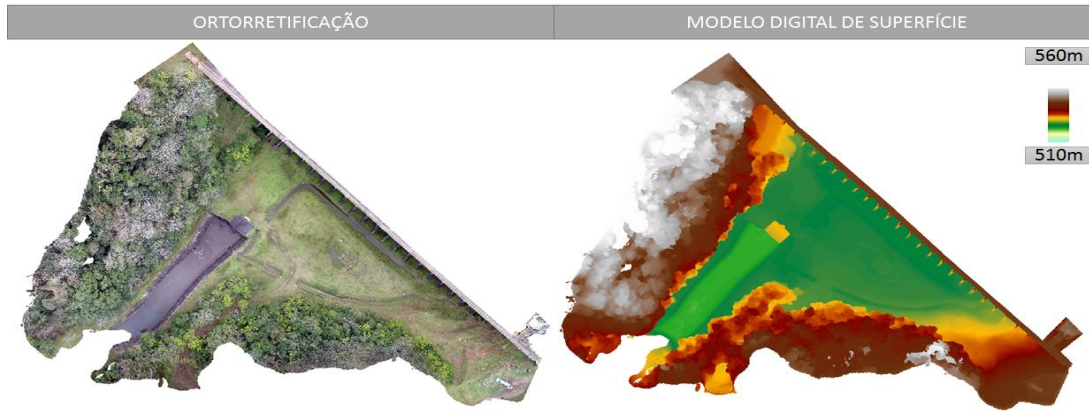


Figura 36 – Seção 01

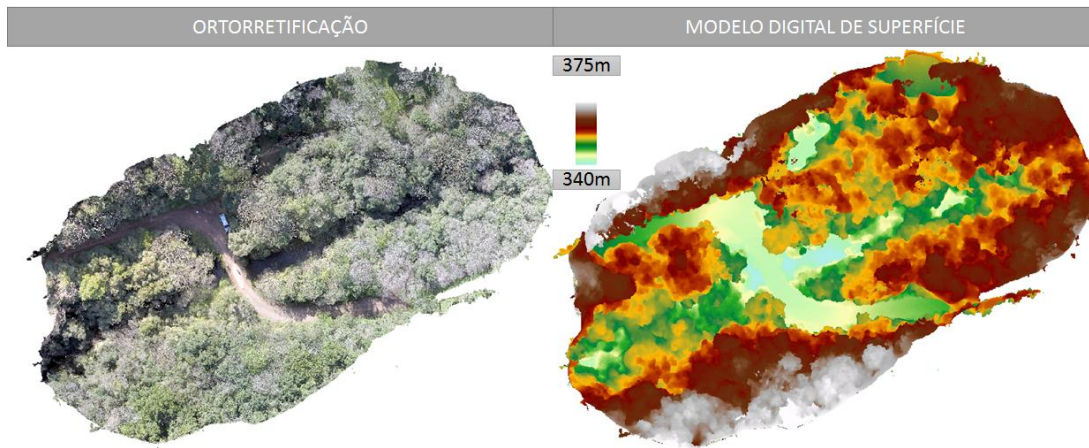


Figura 37 – Seção 04

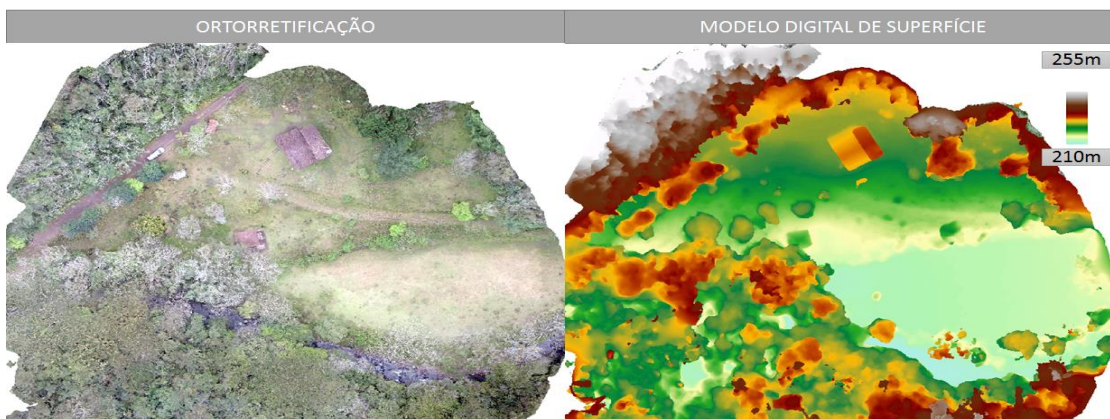


Figura 38 – Seção 05

Os resultados oriundos destes levantamentos, cuja metodologia foi explanada no item 3.6.3.4, foram, por fim, inseridos no modelo SRTM_1M_CALHA, dando origem ao modelo

SRTM_1M_CALHA_VANT. A inserção destas informações, que se resumem a pontos cotados no caso de levantamento convencional e a pequenos modelos digitais de terreno no entorno das seções de interesse, foi realizada considerando as configurações locais do SRTM_1M_CALHA, para a seção de análise, de forma que se procurou manter as cotas do mesmo no início e no final do trecho inserido. Por exemplo: a cota levantada em campo, em determinado local próximo ao pé da barragem, é de 524 metros. O mesmo ponto, no modelo SRTM_1M_CALHA corresponde à cota 546 metros. Neste caso, trabalhou-se com a cota levantada em campo adicionada de 22 metros.

A partir dessa premissa, conseguiu-se inserir informações espaciais muito mais próximas da realidade no modelo SRTM_1M_CALHA, mantendo-se um erro relativo pequeno em relação às feições de entorno. A Figura 39 procura ilustrar, a partir de uma seção transversal fictícia ao longo do rio, as premissas utilizadas na inserção destas informações, a partir de ferramentas do ArcGis 10.2. Já a Figura 40 mostra o modelo SRTM_1M_CALHA e o SRTM_1M_CALHA_VANT para o local da barragem, enquanto que a Figura 41 mostra a diferença entre os dois modelos para a Seção 05.

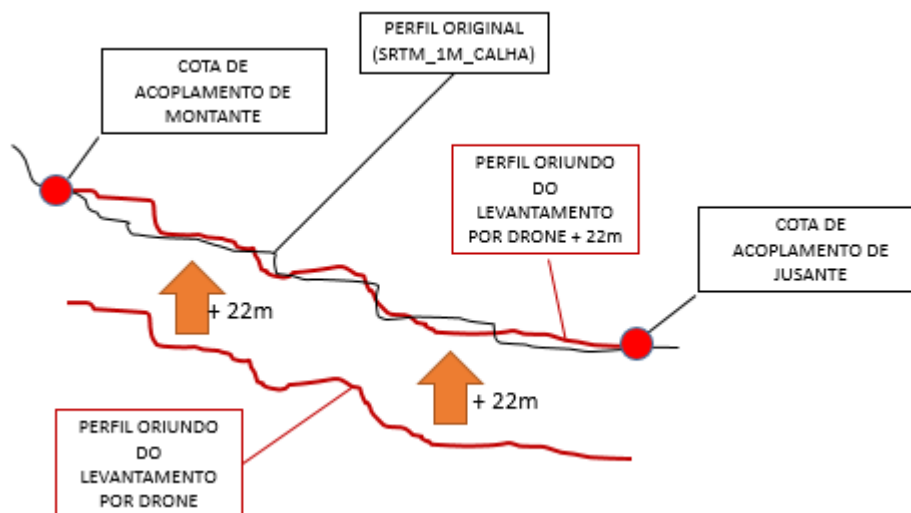


Figura 39 – Seção transversal esquemática de sobreposição de informações

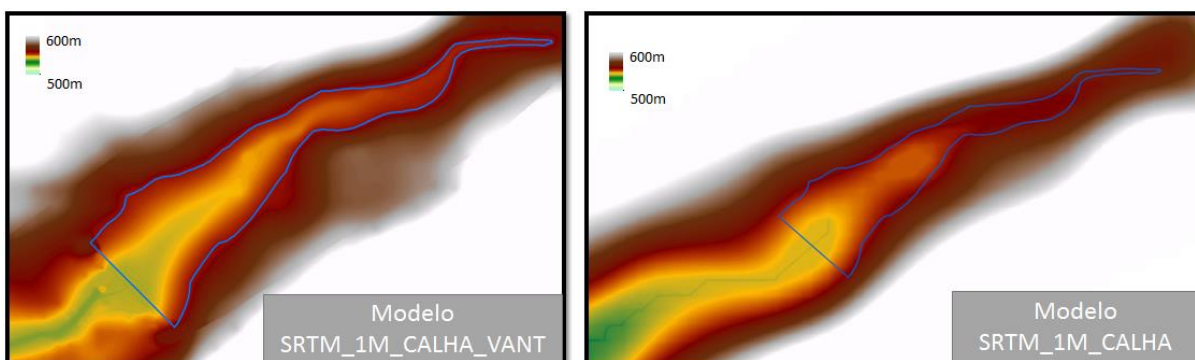


Figura 40 – Visualização SRTM_1M_CALHA_VANT e do SRTM_1M_CALHA na barragem

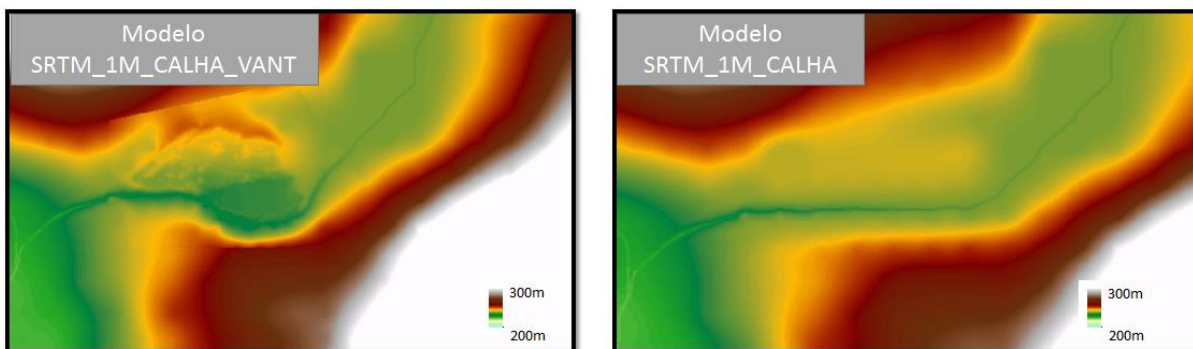


Figura 41 – Visualização do modelo SRTM_1M_CALHA_VANT e do SRTM_1M_CALHA na Seção 05

4.2.1.5 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO AW3D_1M

O modelo digital de elevação AW3D_1M é proveniente do modelo digital de elevação global AW3D30, disponibilizado gratuitamente pela agência espacial japonesa (JAXA) a partir do ano de 2015, como explicado anteriormente no item 3.6.3.4. O modelo AW3D30, que vem sendo constantemente aprimorado, tem 30 metros de resolução espacial, sendo nada mais que um *upscaling* do AW3D, que é o MDE global japonês com 5 metros de resolução, que tem alto custo agregado. Apresenta, segundo Santilan & Santilan (2016), menores erros quando comparado ao MDE proveniente do SRTM, sendo esse uma das principais vantagens do AW3D30. O processamento do modelo AW3D30 para a região de interesse criou, por fim, o modelo AW3D_1M, que nada mais é do que o modelo original de resolução de 30 metros interpolado linearmente para 1 metro de resolução espacial a partir da ferramenta *resample* do ArcGis10.2. A Figura 42 mostra as diferenças existentes entre o SRTM_1M (obtido a partir do processamento do SRTM) e o AW3D_1M (proveniente de igual processamento do AW3D30).

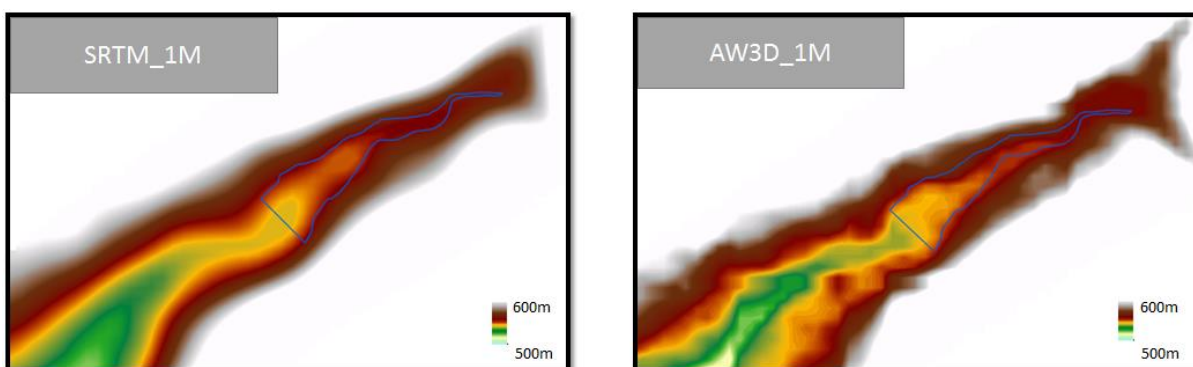


Figura 42 – Comparação entre o modelo SRTM_1M e o modelo AW3D_1M

Até este item, foram apresentados os MDEs globais e gratuitos utilizados para representar a topografia da área de estudo I, considerando tanto produtos brutos como produtos processados. Entretanto, não foram somente utilizados MDEs provenientes de dados

orbitais. Também foram utilizadas informações obtidas localmente a partir de restituição aerofotogramétrica, que são apresentadas nos itens a seguir.

4.2.1.6 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO MDE_AEROGEO

O modelo digital de elevação MDE_AEROGEO partiu do processamento das curvas de nível levantadas por restituição aerofotogramétrica realizada pela empresa AEROGEO, contratada pela CEEE no ano de 2003. O levantamento, que tem equidistância das curvas de nível de 5 metros, foi realizado em escala de 1:30.000 e mapeou, além da altimetria, o curso principal do rio Paranhana e as principais estruturas da usina. Sendo assim, utilizou-se a ferramenta *topo to raster* do ArcGis 10.2 para criar um modelo digital de elevação com 1 metro de resolução espacial a partir dessas informações. Esse procedimento partiu da interpolação linear entre as curvas de nível com equidistância de 5 metros, resultando no produto considerado como o mais acurado quando é levada em conta toda a área de estudo. Em contrapartida, o modelo digital de elevação com maior acurácia em nível local, para algumas determinadas seções, é o MDE SRTM_1M_CALHA_VANT. A Figura 43 mostra uma comparação entre o MDE_AEROGEO e o MDE SRTM_1M_CALHA_VANT para o local do barramento.

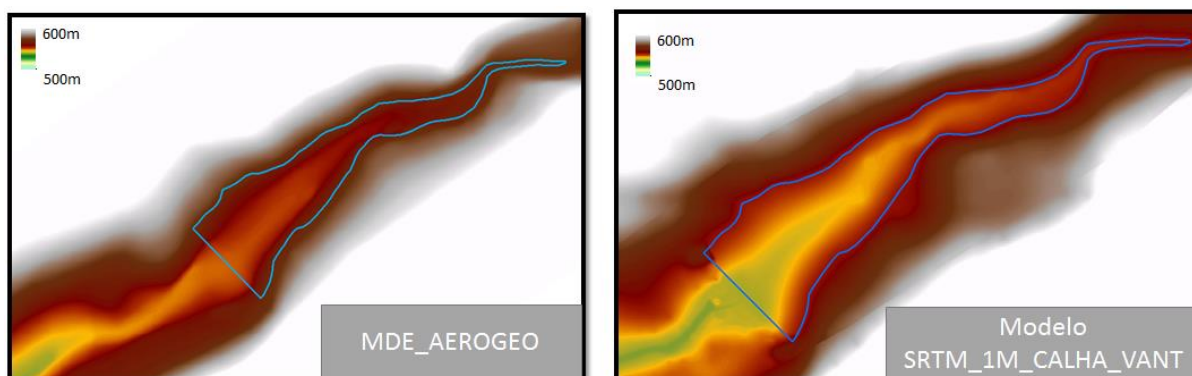


Figura 43 – Comparação entre o MDE_AEROGEO e o SRTM_1M_CALHA_VANT na área da Barragem

O último MDE avaliado no âmbito deste estudo foi o proveniente das curvas de nível em escala de 1:50.000 disponíveis para o Estado do Rio Grande do Sul. Este MDE, intitulado MDE_EXERC é apresentado no item a seguir.

4.2.1.7 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO MDE_EXERC

O MDE_EXERC refere-se ao MDE construído a partir das curvas de nível da carta do exército, para o Estado do Rio Grande do Sul, em escala de 1:50.000. Estas curvas de nível foram disponibilizadas a partir dos esforços de Hasencak & Webber. (2010), que vetorizaram 462 cartas da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG) e do Instituto Brasileiro de

Geografia e Estatística (IBGE). O modelo digital de elevação foi construído, então, interpolando as curvas de nível a partir da ferramenta *Topo to Raster* do ArcGis10.3. O produto pode ser observado na Figura 44, que apresenta uma comparação entre o MDE_EXERC e o MDE considerado como o mais fidedigno do entorno da barragem, que é o SRTM_1M_CALHA_VANT.

Comparando-se este MDE com os outros avaliados neste trabalho, ressalta-se que o MDE_EXERC apresenta baixa qualidade para a área em estudo, até mesmo quando comparado a modelos de baixa precisão, como o SRTM_1M.

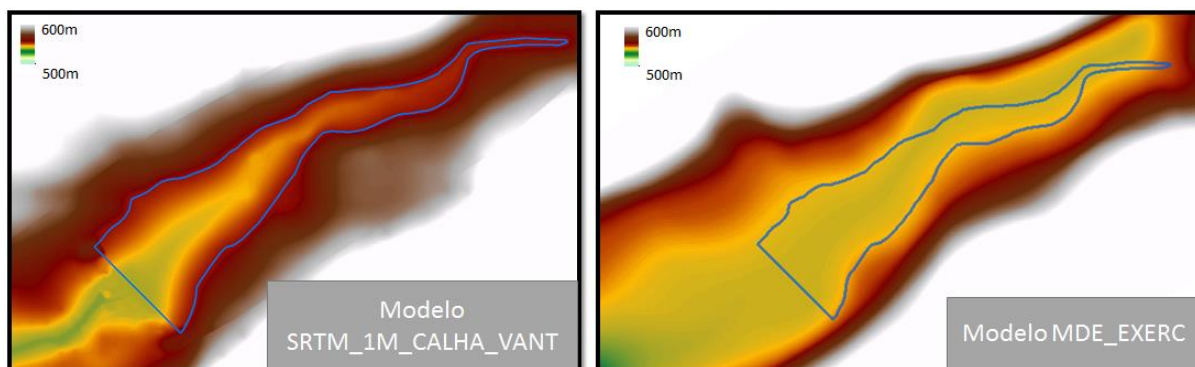


Figura 44 – Visualização do MDE_EXERC e do SRTM_1M_CALHA_VANT na Barragem

4.2.1.8 – SÍNTESE DOS MDEs UTILIZADOS

Sintetizando as características gerais dos MDEs utilizados como dados de entrada nesta área de estudo, a Tabela 11 mostra que, em geral, os dados altimétricos não sofrem tanta variação em termos de declividade média considerando a cota do nível d'água da barragem até a Seção 07. Nesse sentido, as declividades variaram entre 37 e 42 m/km, enquanto que a queda bruta total variou de 323 a 342 metros, representando uma variação da ordem de 6%.

Tabela 11 – Comparação entre as hipsometrias para cada MDE avaliado para Canastra

Modelo Digital de Elevação	Cota de Montante (Barragem)	Cota de Jusante (Seção 07)	Queda bruta (m)	Comprimento (m)	Declividade (m/km)
SRTM_30M	548	209	339	8433	40
SRTM_1M	547	208	339	8654	39
SRTM_1M_CALHA	546	207	339	8658	39
SRTM_1M_CALHA_VANT	537	207	331	8638	38
AW3D_1M	541	210	331	8753	38
MDE_AEROGEO	548	225	323	8800	37
MDE_EXERC	540	198	342	8229	42

Pode-se observar também as diferenças existentes entre alguns MDEs estudados a partir da comparação entre suas seções transversais, para a Seção 01 (Figura 44) e para a Seção 05 (Figura 46), por exemplo. Nestas figuras nota-se que a seção para o MDE_EXERC está

muito longe do observado no SRTM_1M_CALHA_VANT, que é considerado o MDE mais localmente acurado de todos os estudados. Observa-se também que o MDE AW3D_1M parece ter configuração mais próxima do MDE mais acurado, quando comparado com o SRTM_1M.

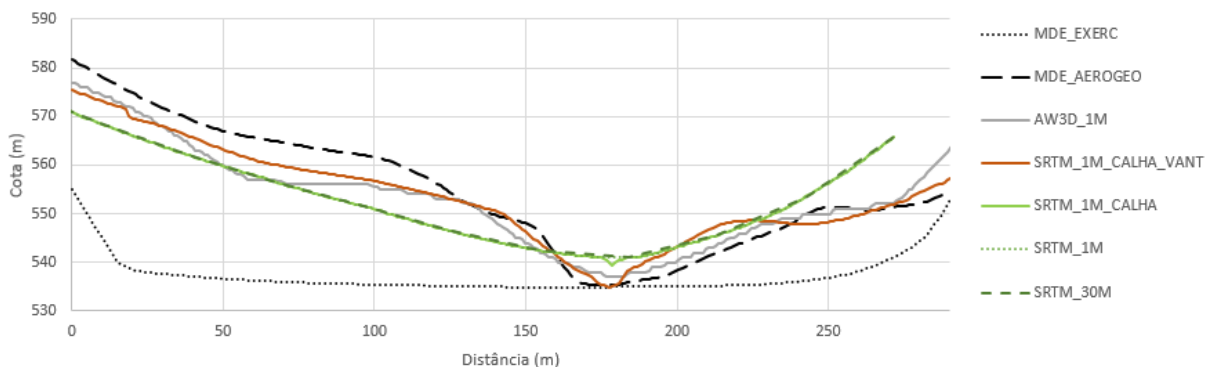


Figura 45 – Topobatimetria da Seção 01 para os diversos MDEs considerados

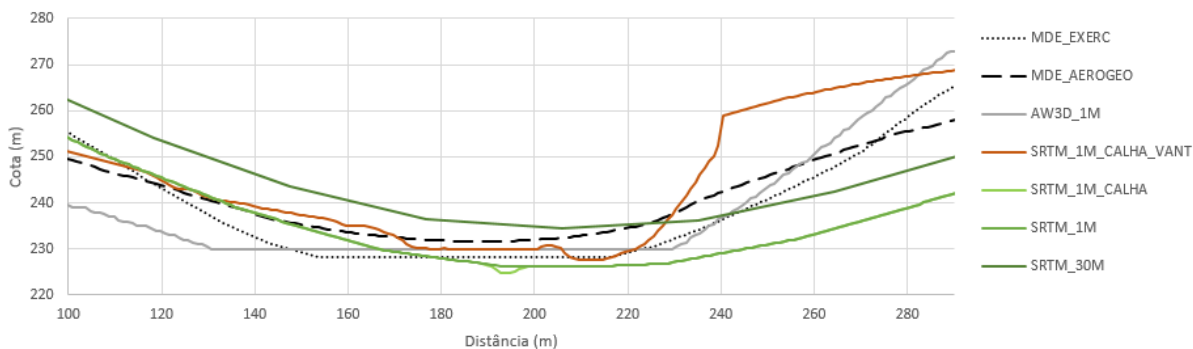


Figura 46 – Topobatimetria da Seção 05 para os diversos MDEs considerados

4.2.2 CENÁRIOS ADOTADOS

No total, foram simulados 182 cenários de rompimento de barragem para a UHE Canastra. Estas simulações se referem à perturbação de alguns dados de entrada em conjunto com a fixação dos demais, o que permitiu, portanto, uma avaliação individualizada de como cada dado de entrada influencia as diferentes variáveis de saída do modelo. Sendo assim, foram admitidos 7 cenários de topografia de jusante (1 para cada MDE apresentado anteriormente), de modo que para cada MDE foi admitido um cenário de referência, somado a mais 4 cenários quanto ao volume do reservatório, 4 quanto à formação da brecha e 4 quanto ao coeficiente de Manning, totalizando 91 $(\{1+4+4+4\} \times 7)$ cenários simulados. Estes cenários foram inicialmente simulados considerando o Modelo Difusivo 2D (Equação 07) e depois simulados novamente considerando as equações de Saint Venant 2D (Equações 03 a 05),

totalizando em $91+91= 182$ cenários para esta área de estudo. Nesse sentido, existe um dado de referência para cada tipo de dado de entrada (o cenário de referência é obtido utilizando todos dados de entrada de referência), sendo os mesmos destacados em negrito e apresentados em conjunto com os demais valores adotados nas simulações. Os demais valores adotados foram obtidos a partir da multiplicação dos valores de referencia por fatores de multiplicação (F_m) que variaram de 0,5 a 2,0. Estes dados são apresentados para a topografia (Tabela 12), para a curva cota-volume do reservatório (Tabela 13 e Figura 47), para o coeficiente de Manning (Tabela 14) e para a configuração da brecha (Tabela 15). Ressalta-se ainda que os cenários aqui simulados não consideraram a existência de uma possível onda de cheia vinda de montante.

Tabela 12 – Identificação dos MDEs

MDE
SRTM_30M
SRTM_1M
SRTM_1M_CALHA
MDE_AEROGEO
SRTM_1M_CALHA_VANT
MDE_EXERC
AW3D_1M

Tabela 13 – Identificação do volume do reservatório

Volume do reservatório	
Fator multiplicador	Volume máximo (1.000 m ³)
1	661
0,6	397
1,4	926
0.80	529
1,2	794

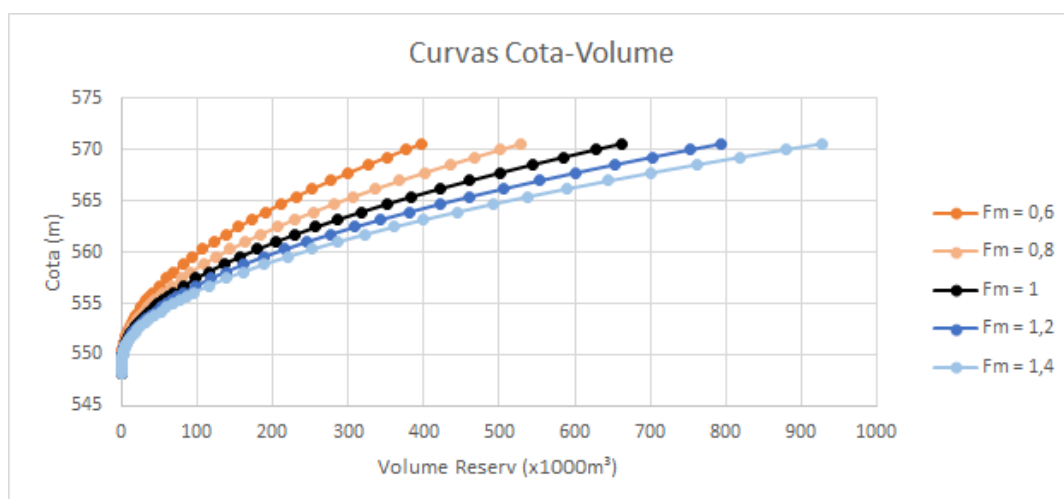


Figura 47 – Diferentes Curvas Cota-Volume

Tabela 14 – Valores relativos aos parâmetros avaliados para o coeficiente de Manning.

Coeficiente de Manning		
Fator Multiplicador	Canal Principal	Margens
1	0,075	0,15
2	0,15	0,3
0,5	0,0375	0,075
1,25	0,09375	0,1875
0,75	0,05625	0,1125

Tabela 15 – Valores relativos aos parâmetros avaliados para a configuração da brecha.

Configuração de Brecha					
Cota da base (m)	Cota Máxima (m)	Altura (m)	Tempo de Formação (h)	Inclinação da Brecha	Largura da Brecha
548	570,5	22,5	0,1	45°	68
548	570,5	22,5	0,3	45°	68
548	570,5	22,5	0,5	45°	68
548	570,5	22,5	0,5	45°	85
548	570,5	22,5	0,1	45°	102

A consideração de determinados valores do coeficiente de Manning para o “canal” ou para as “margens” de um curso hídrico passa necessariamente pela definição da largura do canal principal, o que muitas vezes é complicado quando imagens orbitais são utilizadas. Mesmo isso sendo um tipo de incerteza que pode ser considerada neste tipo de estudo, partiu-se do pressuposto que o Rio Paranhana tem algo em torno de 8 metros de largura em toda sua extensão para as simulações realizadas.

O mesmo ocorre para o volume do reservatório. Por trás da informação do volume máximo do mesmo está não só a definição da curva-volume, que é muito importante para estudos de rompimento de barragens, mas também a geometria da barragem. Sendo assim, diferentes curvas cota-volume geram diferentes hidrogramas de rompimento para uma mesma configuração de brecha. A variação das curvas cota-volume apresentadas na Figura 47 passariam, portanto, por modificações principalmente quanto ao assoreamento considerado no reservatório. No âmbito da abstração aqui realizada, a curva cota-volume de referência foi obtida a partir da topografia representada pelo MDE_AEROGEO.

Por fim, uma vez que se identificou que o hidrograma de saída da barragem está atrelado diretamente ao volume do reservatório e à formação da brecha do maciço, os mesmos foram fixados para todos os cenários simulados. Ou seja, com exceção das simulações envolvendo o modelo digital de elevação MDE_AEROGEO em conjunto com as equações do Modelo Difusivo 2D, todos os cenários aqui simulados não consideraram uma barragem como condição de contorno de montante, e sim apenas um hidrograma de ruptura. Partiu-se do

pressuposto, portanto, que a variação dos coeficientes de Manning do vale de jusante não alteram significativamente o hidrograma formado por diferentes brechas no barramento. A Figura 48 mostra todos os hidrogramas de ruptura utilizados como condição de contorno de montante neste estudo, destacando-se em laranja o hidrograma gerado utilizando todos os dados de entrada como de referência, os hidrogramas pretos gerados variando-se a curva cota volume e os hidrograma marrons gerados variando-se a brecha e mantendo todos os outros dados de entrada como os de referencia.

Ainda, a condição de contorno de jusante foi a mesma para todas as simulações realizadas, considerando-se a profundidade normal com declividade medida em campo, no valor de 0,0052.

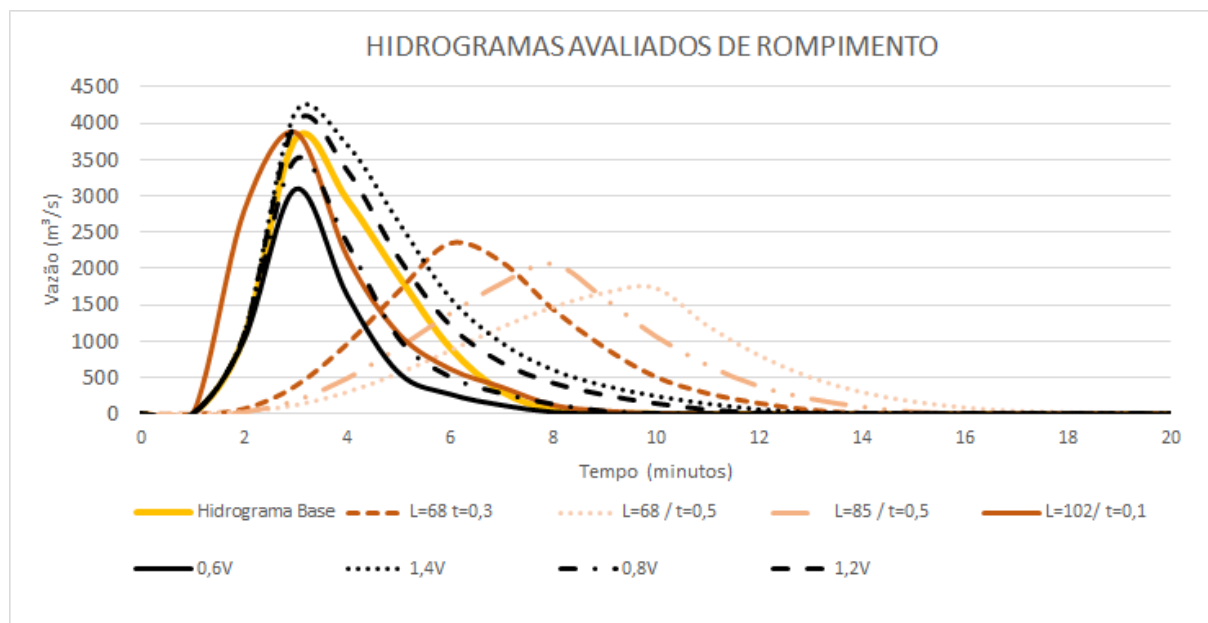


Figura 48 – Hidrogramas de ruptura considerados como condição de contorno de montante

4.2.3 MANIPULAÇÃO DOS CENÁRIOS

Muitas simulações foram realizadas neste estudo, sendo a avaliação dos resultados passível de muitos cruzamentos. Inicialmente, buscou-se avaliar como a modificação do MDE intervém em parâmetros como vazão de pico, tempo de pico, velocidade máxima e profundidade máxima em algumas seções de controle. Foram avaliadas, para esta área de estudo, 4 seções de controle: Seção 01, Seção 04, Seção 05 e Seção 07. A metodologia utilizada para obter resultados conclusivos se baseou na comparação de estatísticas de mesmos grupos de variação para diferentes MDEs. Isso permitiu avaliar quais as faixas de variação, médias e medianas para diferentes MDEs quando um determinado dado de entrada é perturbado. Exemplificando, a Figura 49 mostra os resultados quanto à vazão de pico para

uma igual faixa de variação do coeficiente de Manning aplicada a diferentes MDEs. A referida figura mostra, portanto, que neste exemplo seria possível obter iguais valores de vazão de pico para diferentes MDEs quando a incerteza frente ao coeficiente de Manning é considerada nas simulações.

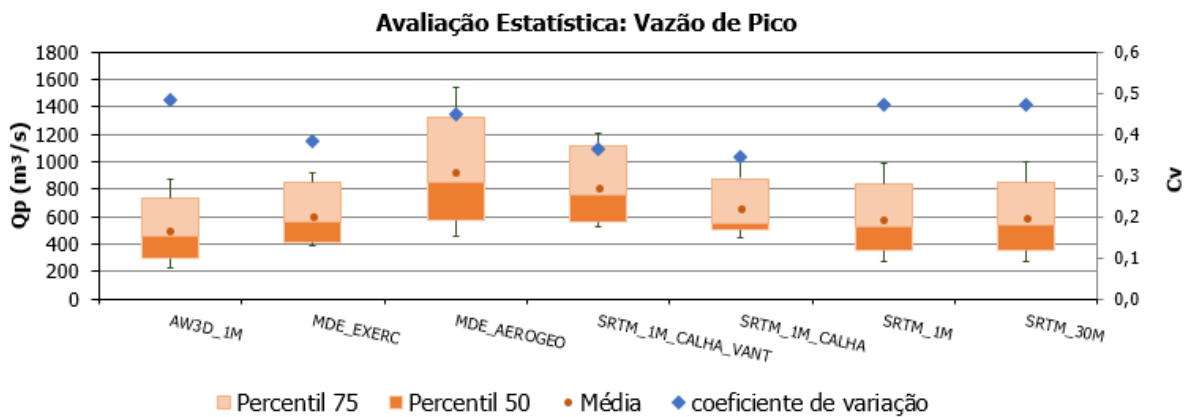


Figura 49 – Metodologia utilizada para comparar resultados por seção

Esperou-se, a partir da aplicação desta metodologia, identificar quais são as diferenças ocasionadas nos parâmetros de avaliação (Q_p , T_p , V_m e P_m) no caso de: (i) interpolação linear do MDE SRTM, aumentando a resolução espacial de 30 metros para 1 metro ($SRTM_{30M} \times SRTM_{1M_CALHA}$); (ii) adição de calha fictícia de rio no modelo SRTM interpolado ($SRTM_{1M} \times SRTM_{1M_CALHA}$); (iii) adição de seções topográficas em locais de controle, obtidas via aerofotogrametria e VANTs ($SRTM_{1M_CALHA} \times SRTM_{1M_CALHA_VANT}$); (iv) utilização de MDE bruto de diferentes fontes ($AW3D_I, \times SRTM_{1M}$) e; (v) diferenças entre a utilização de MDE SRTM processado e MDE proveniente de aero restituição em escala 1:30.000 ($MDE_AEROGEO \times SRTM_{1M_CALHA_VANT}$).

O segundo método de avaliação utilizado para a UHE Canastra foi o estudo conjunto de todas as seções de análise para um dado MDE, que parte da identificação de quais parâmetros de avaliação têm mais relação com quais dados de entrada, buscando-se avaliar, por exemplo, se para o local de estudo as incertezas relativas ao coeficiente de Manning são mais ou menos importantes do que as incertezas relativas à formação da brecha quando se considera o tempo de chegada do pico numa seção distante do barramento. Essa avaliação foi realizada para os todos os MDEs apresentados, considerando o modelo Difusivo 2D, a partir da análise dos conjuntos estatísticos por seção de avaliação, considerando-se principalmente o coeficiente de variação (C_v) dos grupos estatísticos, que é dado na equação 9. Esta

abordagem gerou 4 observações (uma para cada parâmetro de avaliação) por MDE em cada uma das 7 seções analisadas.

$$Cv = \frac{\text{Desvio Padrão}}{\text{Média}} \quad (09)$$

A terceira avaliação realizada no âmbito desta dissertação foi a comparação entre os resultados advindos da utilização das equações de Saint-Venant 2D e as equações do Modelo Difusivo 2D, a partir da comparação de hidrogramas em seções de jusante, e comparação entre os coeficientes de variação obtidos para ambos conjuntos de simulações.

4.3 BARRAGEM LOMBA DO SABÃO

A segunda área de estudo avaliada no âmbito desse trabalho tem características consideradas distintas da UHE Canastra, tanto em termos de barramento como também em termos de vale de jusante. Nesse sentido, a barragem localizada à montante da cidade de Porto Alegre/RS, aqui intitulada de Barragem Lomba do Sabão, é do tipo enrocamento, apresentando 10 metros de altura e 290 metros de extensão longitudinal. O volume do reservatório da barragem, construída na década de 1940 é estimado em 3 hm³, segundo Maizonave *et al.* (2005), apresentando uma área de lâmina média d'água da ordem de 1 km². A Figura 51 apresenta a área de entorno do reservatório com a delimitação máxima do mesmo, com base na cota máxima da barragem. A barragem Lomba do Sabão, ainda, dá origem ao Arroio Dilúvio, que é um canal de grande porte que corta a cidade no sentido leste-oeste. Na Figura 50 pode ser observado, além do referido canal, a intensa urbanização de possíveis áreas de alague em um hipotético rompimento da barragem Lomba do Sabão. Da mesma forma que realizado para a primeira área de estudo, serão primeiramente apresentados os MDEs utilizados no âmbito da barragem Lomba do Sabão.

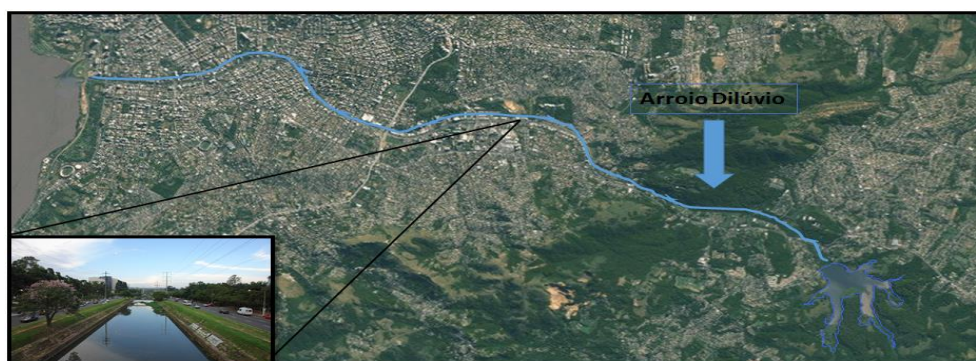


Figura 50 – Ocupação do vale de jusante e arroio Dilúvio



Figura 51 – Reservatório da barragem Lomba do Sabão

A seguir, no item **4.3.1** são apresentados os MDEs utilizados como dados de entrada nas simulações realizadas, enquanto que o item **4.3.2** se refere às especificações dos outros dados de entrada e dos cenários adotados. Já o item **4.3.3** explana como as simulações realizadas foram manipuladas a fim de se obter resultados conclusivos.

4.3.1 MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO UTILIZADOS

Desde o ano de 2010 o município de Porto Alegre conta com um levantamento LiDAR realizado, o que possibilitou a utilização de um Modelo Digital de Superfície de alta precisão, com resolução espacial de 1 metro (Zanardi *et al.*, 2013). A hipsometria do vale de jusante da barragem Lomba do Sabão é, portanto, caracterizada a partir deste MDS, como pode ser visualizado na Figura 52.

Nota-se que o vale de jusante dessa área de estudo apresenta pequena declividade quando comparada às declividades encontradas na área de estudo referente à UHE Canastra. Enquanto para a primeira área de estudo as declividades médias são da ordem de 40 metros/km, o vale da barragem Lomba do Sabão apresenta uma declividade da ordem 4 metros/km.

Como pode ser observado, o MDS apresentado na Figura 52 conta com a presença de prédios e casas, sendo intitulado no âmbito deste trabalho de MDT_cp. Esse MDS foi então modificado a partir da exclusão destas estruturas a fim de representar um MDT de alta precisão, fidedigno ao terreno real. Essa exclusão foi realizada a partir de aplicação de

técnicas de geoprocessamento no software ArcGis 10.2, e deu origem ao modelo chamado MDT_sp, que é apresentado na Figura 53.

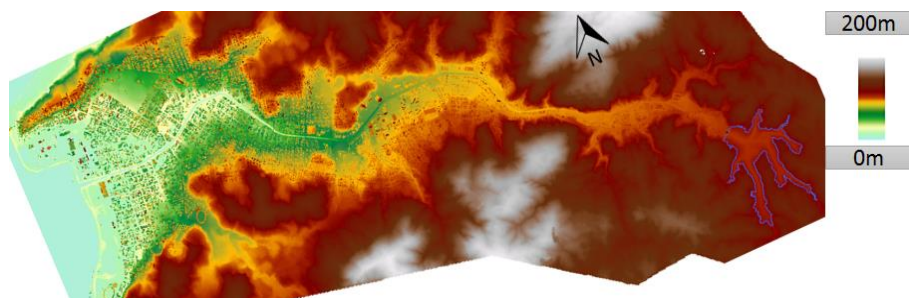


Figura 52 – Modelo Digital de Superfície do vale de jusante para a barragem Lomba do Sabão

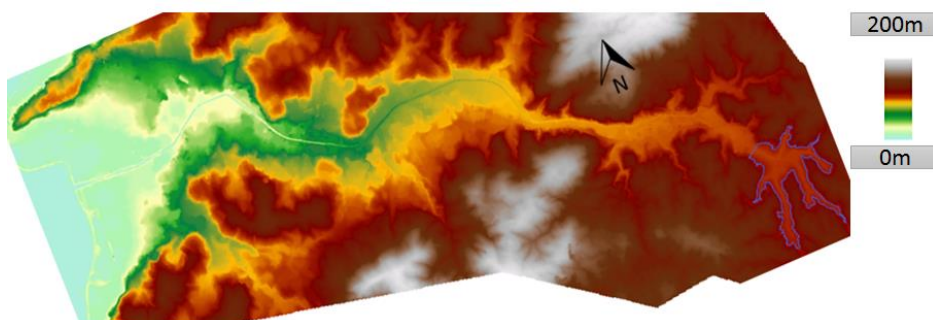


Figura 53 – Modelo Digital de Superfície do vale de jusante para a barragem Lomba do Sabão sem prédios e sem vegetação

Além destes dois modelos digitais de elevação, também foi utilizado o MDE proveniente do SRTM 30 metros e um MDE processado, que nada mais é que o próprio MDE SRTM 30 metros com a adição de uma calha representativa do arroio Dilúvio. Estes dois MDEs são apresentados na Figura 54 para o SRTM 30 metros e na Figura 55 para o SRTM30 com calha. A adição da calha no SRTM30 foi feita a partir de técnicas de geoprocessamento, considerando-se características geométricas muito similares ao que realmente é observado para o canal: profundidades que variam de 1 a 4 metros e larguras que variam de 3 a 40 metros no sentido de montante para jusante.

Sendo assim, estes são os 4 modelos digitais de elevação utilizados no âmbito das simulações realizadas para esta área de estudo, que serão mais bem apresentadas no item 4.3.2

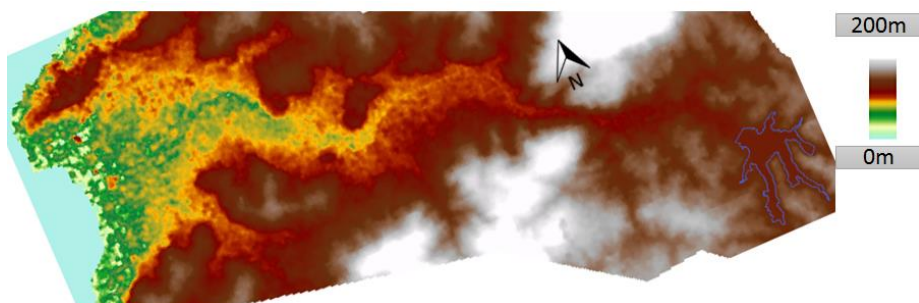


Figura 54 – Topografia do vale de jusante da barragem Lomba do Sabão – SRTM 30

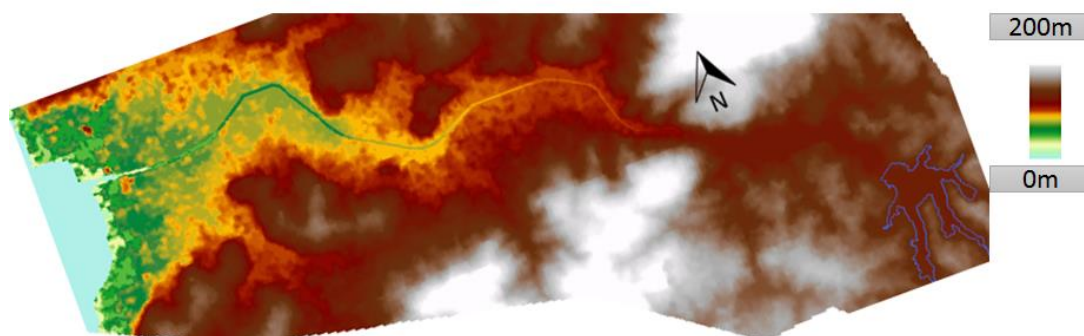


Figura 55 – Topografia do vale de jusante da barragem Lomba do Sabão – SRTM30_c

A avaliação das variáveis hidráulicas de interesse, como vazão de pico, tempo de pico, velocidade máxima e profundidade máxima, foram realizadas para 7 seções localizadas ao longo do arroio Dilúvio ilustradas na Figura 56.

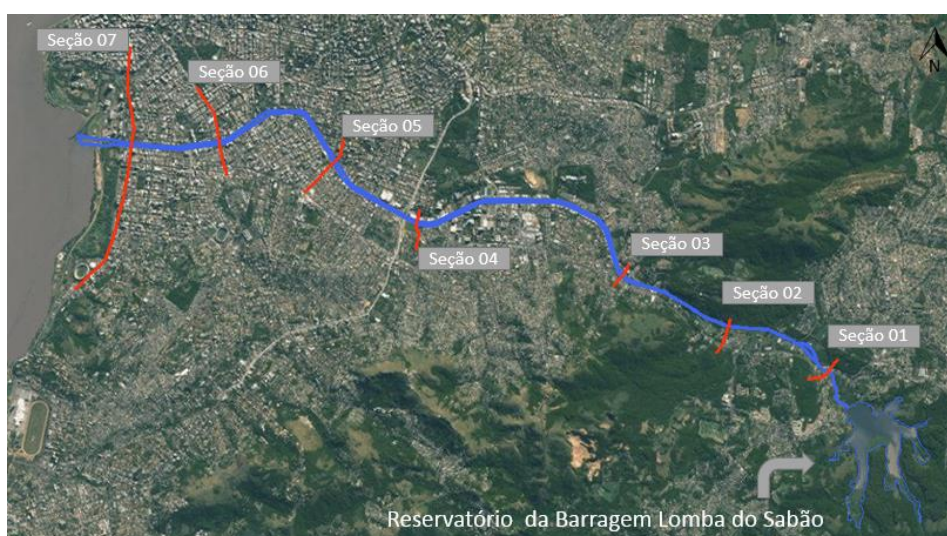


Figura 56 – Localização das seções consideradas ao longo do arroio Dilúvio

A partir da avaliação dos quatro MDEs utilizados neste estudo, foi possível averiguar as diferenças hipsométricas existentes entre a primeira e a última seção considerada para cada um deles. Observa-se, a partir da Tabela 16, que o comprimento do curso hídrico principal varia de 14,29 km à 12,93 km, sendo que a declividade média entre montante e jusante varia de 2,66 m/km à 3,17 m/km, correspondente à uma variação da ordem de 20%. Já na Tabela 17 são apresentadas as distâncias de outras seções em relação à barragem.

Tabela 16 – Comparação entre as hipsometrias para cada MDE avaliado para Lomba do Sabão

Modelo Digital de Elevação	Cota de Montante (Barragem)	Cota de Jusante (Seção 07)	Queda bruta (m)	Comprimento (km)	Declividade (m/km)
SRTM30	46	8	38	14,29	2,66
SRTM30c	45	4	41	12,93	3,17
MDT_cp	39	2	37	13,61	2,72
MDT_sp	39	2	37	13,61	2,72

Tabela 17 – Distância entre as seções transversais consideradas para a barragem Lomba do Sabão

Seção	1	2	3	4	5	6	7
Distância acumulada (m)	650	2450	4268	8223	9842	12142	13610

A diferença existente entre os MDEs considerados pode ser também observada a partir de suas respectivas seções transversais para um mesmo local. A partir da Figura 57 (referente à Seção 01) e da Figura 58 (Referente à Seção 07), percebe-se como diferem os modelos oriundos do levantamento LiDAR e oriundos da missão SRTM, havendo sutis diferenças entre os pares MDT_sp e MDT_cp e os pares SRTM30_C e SRTM30.

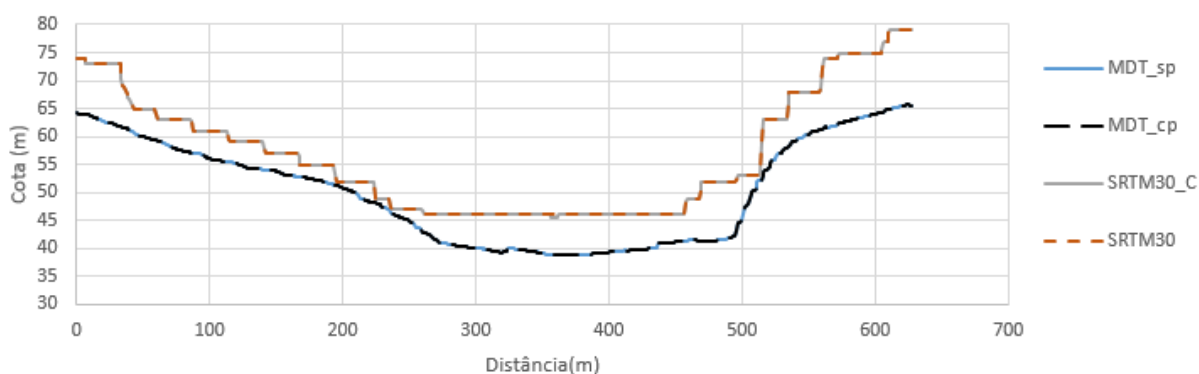


Figura 57 – Diferentes Topobatimetrias para a Seção 01

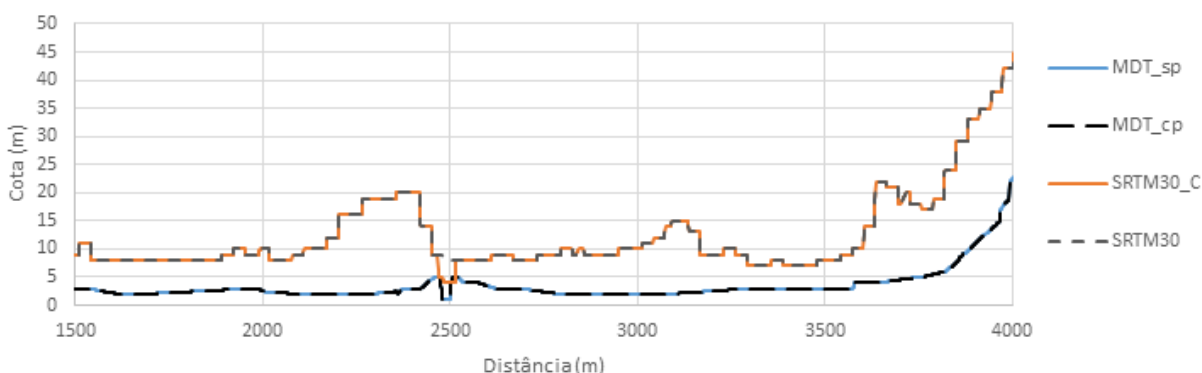


Figura 58 – Diferentes Topobatimetrias para a Seção 07

4.3.2 CENÁRIOS ADOTADOS

Diferentemente da primeira área de estudo, para a barragem Lomba do Sabão mantiveram-se fixos a curva cota-volume do reservatório e o conjunto de equações utilizadas para prever como ocorre o deslocamento da onda de cheia, adotando-se o Modelo Difusivo 2D. A curva cota-volume do reservatório da Lomba do Sabão foi obtida a partir da metodologia explanada na Figura 29, que elimina o reservatório do MDE considerado a partir de uma interpolação linear das cotas existentes entre a barragem e o final da lâmina d'água do

reservatório. Esta técnica permitiu obter a curva cota-volume apresentada na Figura 59, cujo volume para o nível normal esperado, de 52 metros, superestimou em 16% o volume do reservatório citado nas literaturas utilizadas (Maizonave *et al.*, 2005). Para fins de simulação, entretanto, considerou-se o volume estimado máximo do reservatório, para a cota de 56 metros, que é correspondente a aproximadamente 7,7 hm³.

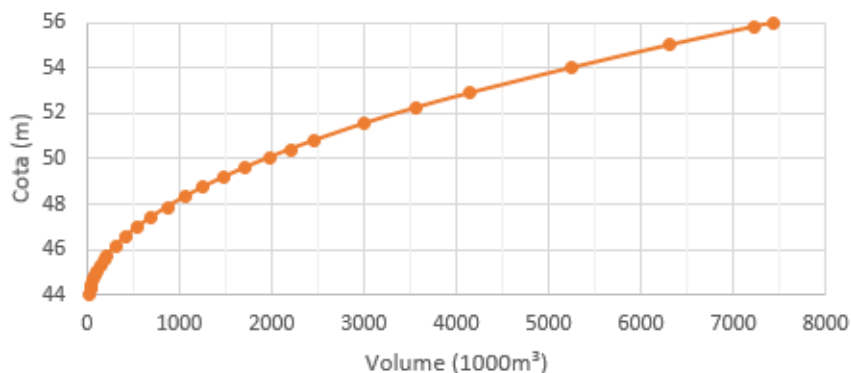


Figura 59 – Curva cota-volume do reservatório Lomba do Sabão

Uma vez fixados o volume do reservatório e o tipo de equacionamento considerado nas simulações, foram simulados um total de 13 cenários para a barragem Lomba do Sabão, que englobaram um cenário de referência (em que todos dados de entrada são dados de entrada de referência) adicionado de 3 variações do MDE representativo da topografia de jusante, 6 variações nas configurações da brecha da barragem e 3 variações no coeficiente de Manning de jusante ($\{1+3+6+3=13\}$). Diferentemente do adotado para a primeira área de estudo, todas as variações realizadas nos dados de entrada foram aplicadas em simulações considerando apenas a topografia de referencia, representada pelo MDT_cp. Para todas as simulações, os dados de entrada não variados foram fixados como os dados de entrada de referência (em negrito nas tabelas seguintes), tanto para as características da brecha formada (Tabela 18), como para os valores do coeficiente de Manning (Tabela 19). Ainda, a condição de contorno de jusante foi a mesma para todas as simulações realizadas, considerando-se a profundidade normal com declividade obtida via levantamento LiDAR, no valor de 0,0005.

Tabela 18 – Cenários quanto a Formação da Brecha da barragem Lomba do Sabão

Cota da base (m)	Cota Máxima (m)	Configuração de Brecha			
		Altura (m)	Tempo de Formação (h)	Inclinação da Brecha	Largura da Brecha
45	55	10	0,3	19	100
45	55	10	0,1	3	100
45	55	10	0,5	3	100
45	55	10	1	3	100
45	55	10	0,3	1	125
45	55	10	0,3	1	75
45	55	10	0,3	1	50

Tabela 19 – Cenários quanto ao Coeficiente de Manning para o vale de jusante da barragem Lomba do Sabão

Coeficiente de Manning		
Fator Multiplicador	Canal Principal	Margens
1	0,020	0,030
0,75	0,015	0,023
1,25	0,025	0,038
1,50	0,030	0,045

Por fim, a Figura 60 mostra as variações dos hidrogramas considerados como condições de contorno de montante, em que os hidrogramas pretos são referentes a variações na largura da brecha, os hidrogramas marrons são referentes a mudanças no tempo de formação de brecha e o hidrograma amarelo é o cenário base, ou seja, aquele formado utilizando todos os dados de entrada como dados de referência.

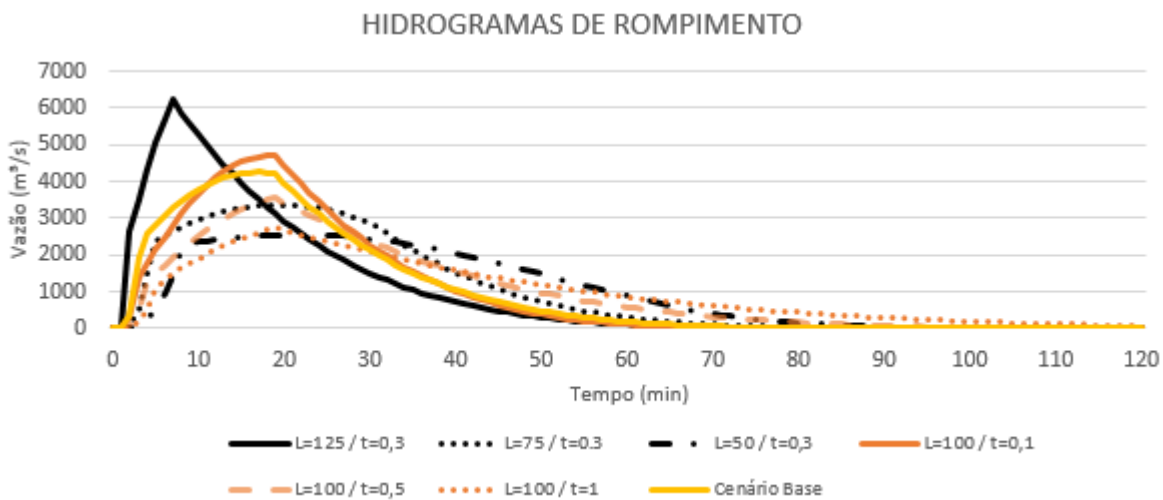


Figura 60 – Hidrogramas de ruptura considerados como condição de contorno de montante

4.3.3 MANIPULAÇÃO DOS CENÁRIOS

Da mesma forma que para a primeira área de estudo, as simulações se basearam na variação de apenas um dado de entrada e fixação dos outros, utilizando-se o coeficiente de variação para avaliar como as incertezas oriundas da determinação de três dados de entrada (coeficiente de Manning, configurações de brecha e topografia do vale de jusante) interferem nos parâmetros de avaliação considerados nesta dissertação: vazão de pico, tempo de pico, profundidade máxima e velocidade máxima.

Esses resultados foram analisados em diferentes seções localizadas ao longo do arroio Dilúvio (Figura 56), buscando identificar quais são as diferenças de pesos dos dados de entrada em vales abertos e de baixa declividade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo é dividido em três partes, sendo a primeira referente aos resultados obtidos para a UHE Canastra, a segunda referente aos resultados obtidos para a Barragem Lomba do Sabão e na terceira apresenta-se uma avaliação conjunta dos resultados obtidos nas duas áreas de estudo. De forma global, entretanto, ressalta-se que todas as 195 simulações realizadas no âmbito deste trabalho apresentaram erros de volume médios da ordem de 0,25%, sendo que o erro máximo observado foi equivalente a 6%, dando confiabilidade aos resultados obtidos quanto ao balanço hídrico. Todos os dados gerados neste trabalho são apresentados de forma individual no ANEXO.

5.1 RESULTADOS PARA A UHE CANASTRA

Os resultados obtidos para a UHE Canastra permitiram mapear como a modificação dos dados de entrada no modelo HEC-RAS 5.03 alteram valores dos parâmetros de avaliação, como, por exemplo, a vazão de pico e o tempo de pico dos hidrogramas formados. A fim de ilustrar esses resultados, a Figura 61, Figura 62, Figura 63, Figura 64 e Figura 65 mostram como o hidrograma varia, para uma mesma seção, quando são trocados, respectivamente, o MDE representativo da topografia de jusante, as curvas cota-volume, as configurações da brecha formada, os coeficientes de Manning e o tipo de equacionamento utilizado.

A variação do MDE permite observar uma defasagem de 9 minutos relativa ao tempo de pico para os hidrogramas formados na Seção 05, enquanto que a vazão de pico apresenta variação da ordem de 350 m³/s, para uma mesma seção, segundo a Figura 61. Esse gráfico foi construído fixando-se todos os dados de entrada como de referência, variando-se apenas a topografia e considerando o modelo Difusivo 2D.

A partir da Figura 62, pode-se observar como a variação do volume da curva cota-volume, multiplicada pelos fatores que variam de 0,6 a 1,4 detalhados no capítulo de Material e Métodos, altera significativamente a vazão de pico, muito mais intensamente do que observado quando o MDE é perturbado. Variando o volume para esta seção e fixadas as outras condições de contorno, o hidrograma chega a variações da vazão de pico que diferem em até 200%. Entretanto, as variações relativas ao tempo de pico não são tão significativas, havendo uma defasagem de 5 minutos entre os cenários estudados. Esse gráfico foi construído considerando o MDE_AEROGEO em conjunto com o Modelo Difusivo 2D. Os demais dados de entrada utilizados foram os de referência.

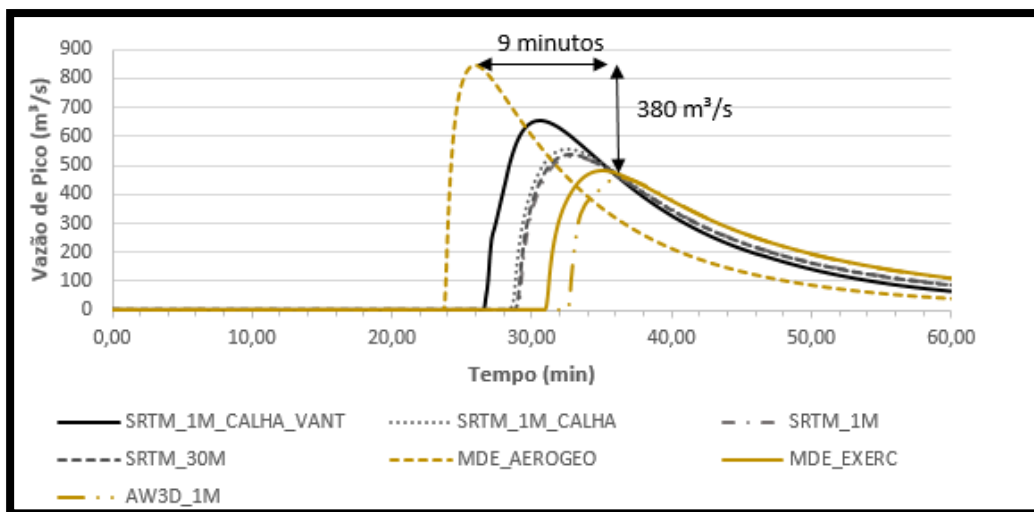


Figura 61 – Modificações no hidrograma a partir de variação no MDE a 7,2 km da barragem

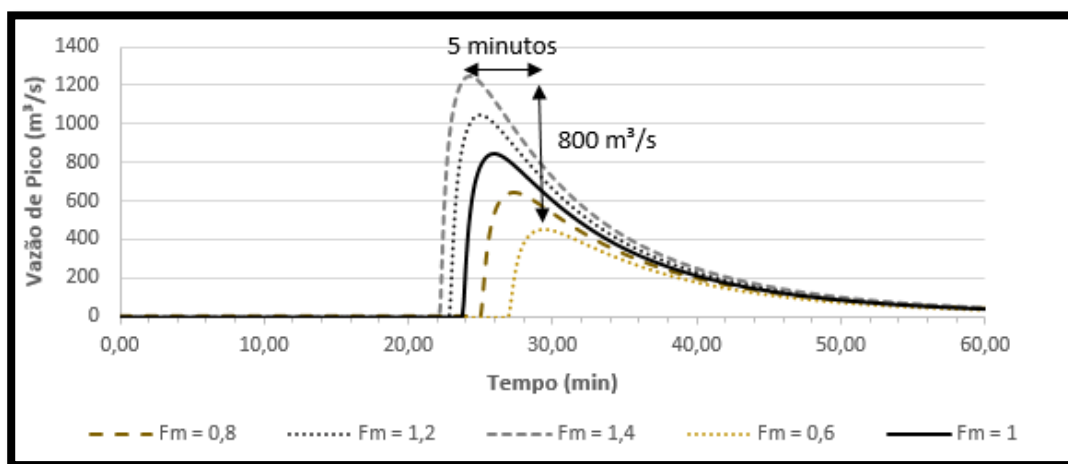


Figura 62 – Modificações no hidrograma a partir de variação no volume a 7,2 km da barragem

É interessante notar como as variações da brecha alteram muito pouco o hidrograma em locais com altas declividades. Neste sentido, a Figura 63 mostra variações de baixa magnitude, principalmente para a vazão de pico, que gira em torno de 800 m³/s para o cenário mais brando e 850 m³/s para o cenário mais catastrófico. Já o tempo de pico, relacionado diretamente ao tempo de formação da brecha, varia de forma um pouco mais considerável, sendo o mesmo da ordem de 7 minutos. Esse gráfico foi construído considerando o MDE_AEROGEO em conjunto com o Modelo Difusivo 2D. Os demais dados de entrada utilizados foram os de referência.

A variação no coeficiente de Manning para todos os fatores avaliados, entretanto, se mostrou de grande influência no hidrograma de jusante, mais inclusive do que as influências ocasionadas pela troca do MDE e do que pela variação do volume do reservatório. Neste sentido, diferentes valores do coeficiente de Manning podem ocasionar variação na vazão de

pico em uma ordem de até 300%, enquanto que para os tempos de pico são observadas defasagens de até 32 minutos. Esse gráfico foi construído considerando o MDE_AEROGEO em conjunto com o Modelo Difusivo 2D. Os demais dados de entrada utilizados foram os de referência.

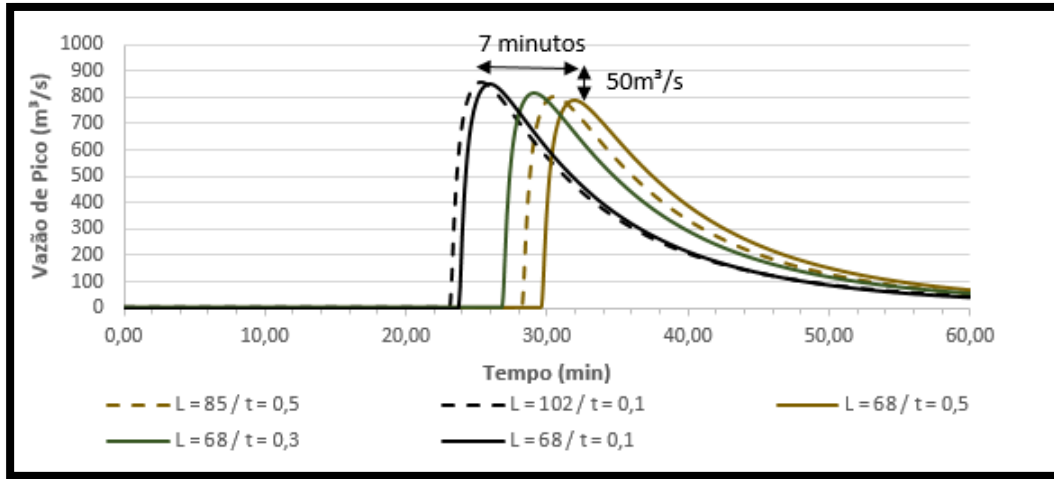


Figura 63 – Modificações no hidrograma a partir de variação na variação da brecha a 7,2 km da barragem

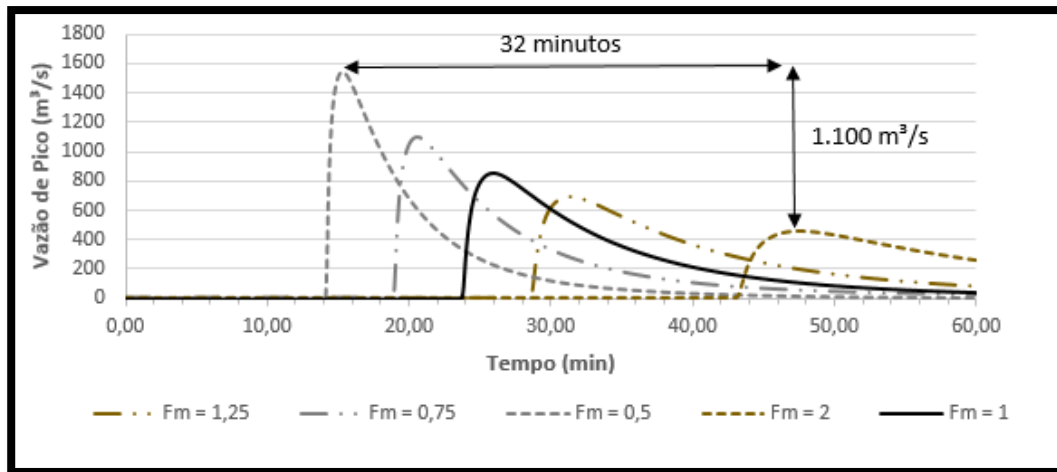


Figura 64 – Modificações no hidrograma a partir de variação na variação do coeficiente de Manning a 7,2 km da barragem

Ainda, o tipo de equacionamento considerado para modelar a onda de cheia também resulta em hidrogramas diferentes, sendo que o Modelo Difusivo 2D se mostra com tempo de pico menor e vazão de pico maior do que quando consideradas as Equações de Saint Venant 2D (Figura 65). Desse modo, observa-se que a escolha do tipo de equacionamento pode impactar diretamente no resultado, uma vez que foram encontradas diferenças da ordem de 420 m³/s para a vazão de pico do hidrograma e de 15 minutos para o tempo de pico. Os demais dados de entrada utilizados foram os de referência.

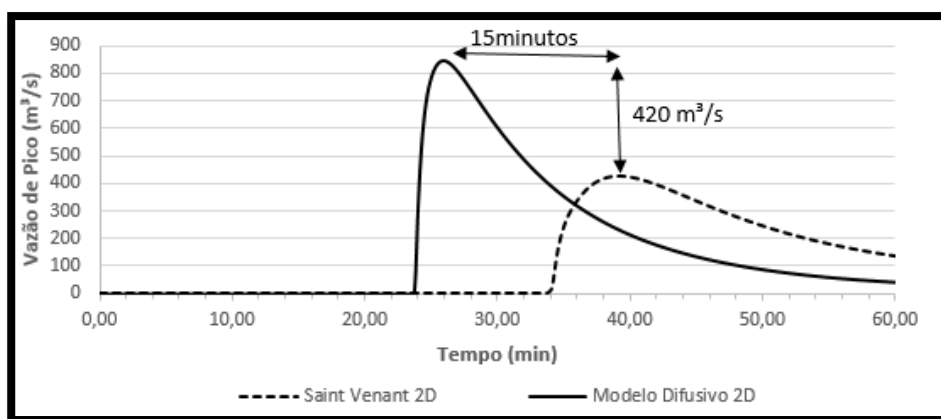


Figura 65 – Modificações no hidrograma a partir de variação na variação do equacionamento a 7,2 km da barragem

As figuras anteriores mostram como a perturbação de dados de entrada afeta a vazão de pico e o tempo de pico apenas para a Seção 05, considerando-se 24 cenários no total. Entretanto, foram estudadas 7 seções e simulados 182 cenários no total (13 cenários referentes à variação do coeficiente de Manning, Volume e Brecha, considerando o Modelo Difusivo 2D somados de mais 13 cenários considerando as Equações de Saint Venant 2D, somando 26 cenários para cada um dos 7 MDEs estudados)

A avaliação conjunta de todos esses dados seguiu os delineamentos apresentados no item 4.2.3 e são subdivididos do seguinte modo: (i) resultados obtidos para diferentes MDEs; (ii) estudo conjunto das seções; (iii) comparação entre Modelo Difusivo 2D e Saint Venant 2D e; (iv) impactos da onda de cheia.

5.1.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA DIFERENTES MDEs

A seguir são expostas observações quanto a como modificações nas configurações topográficas do vale de jusante, para a UHE Canastra, refletem em parâmetros observados (vazão de pico, tempo de pico, velocidade máxima e profundidade máxima) em seções de interesse.

5.1.1.1 Interpolação linear do MDE SRTM, diminuindo a resolução espacial de 30 metros para 1 metro (SRTM_30M x SRTM_1M)

A interpolação do MDE de 30 metros para 1 metro não gera quase nenhuma diferença nos resultados obtidos nas simulações. No âmbito dos testes realizados, são comparados em conjunto todos os 13 cenários rodados para o MDE SRTM_1M com os 13 cenários rodados para o MDE SRTM_30M, considerando o Modelo Difusivo 2D. Os resultados são

apresentados na Figura 66, Figura 67, Figura 68 e Figura 69 para a seção 01 (distante 30 metros do barramento) e para a seção 05, distante 7.270 metros do barramento.

A partir da interpretação dos resultados, percebe-se que a interpolação realizada altera, mesmo que tal alteração seja de baixa magnitude, apenas a avaliação estatística da velocidade máxima. Nesse sentido, o SRTM_30M apresenta potencial para resultar velocidades maiores em seções mais distantes do barramento quando comparado ao modelo SRTM_1M, uma vez que a velocidade máxima na seção, obtida para o SRTM_30M foi de aproximadamente 7m/s, enquanto que para o SRTM_1M foi de aproximadamente 4,5m/s.

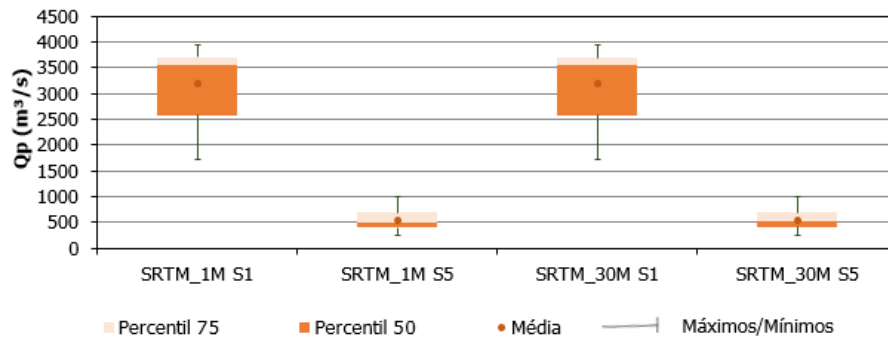


Figura 66 – SRTM_1M x SRTM_30M quanto à vazão de pico para a seção 01 e seção 05

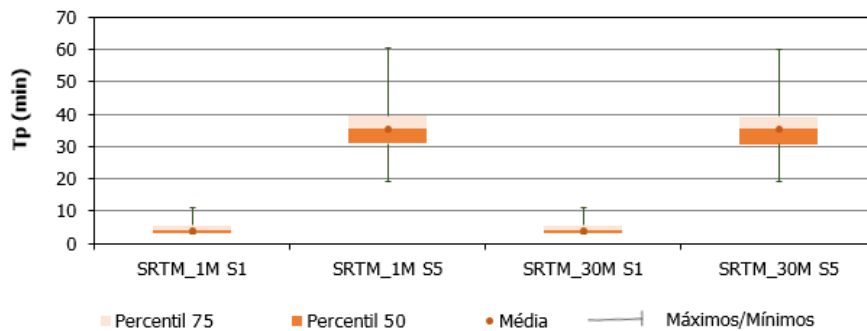


Figura 67 – SRTM_1M x SRTM_30M quanto ao tempo de pico para a seção 01 e seção 05

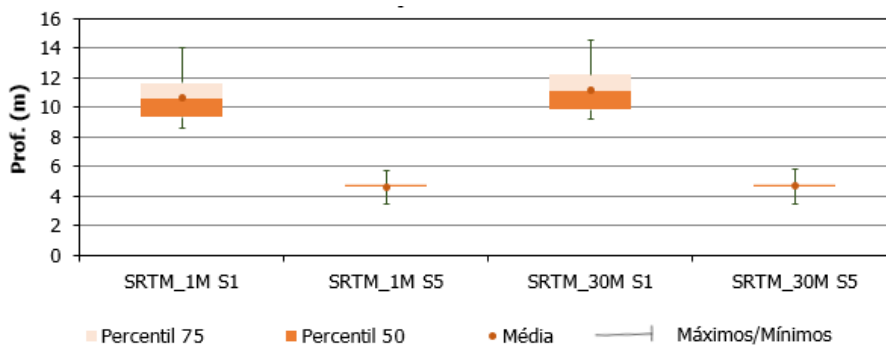


Figura 68 – SRTM_1M x SRTM_30M quanto à profundidade máxima para a seção 01 e seção 05

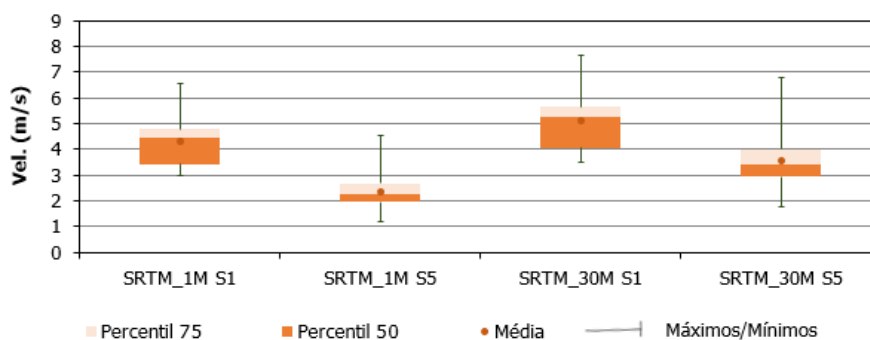


Figura 69 – SRTM_1M x SRTM_30M quanto à velocidade máxima para a seção 01 e seção 05

5.1.1.2 Adição de calha fictícia de rio no modelo SRTM interpolado (SRTM_1M x SRTM_1M_CALHA)

Quando se decidiu por avaliar um cenário em que o MDE apresentava uma calha fictícia esperava-se resultados como menor tempo de pico nas seções de jusante e realmente isso foi observado. De modo geral, o conjunto relativo a variações no tempo de pico para todas as seções sempre foi igual ou ligeiramente menor no modelo SRTM_1M_CALHA do que no modelo SRTM_1M, principalmente para os cenários em que o coeficiente de Manning foi alterado. Quanto à vazão de pico, não foram observadas variações bruscas no conjunto de cenários avaliados. Já para a profundidade máxima, observou-se valores sempre maiores no MDE com a calha do que no MDE sem a calha, com diferença da ordem da profundidade da calha. Para o parâmetro velocidade máxima observou-se o mesmo comportamento: valores ligeiramente maiores no MDE com calha do que no MDE sem calha. Conclui-se, portanto, que a adição de uma calha fictícia para o caso em estudo não altera significativamente a vazão de pico, mas pode gerar ondas ligeiramente mais rápidas para jusante, com a velocidade passando de uma média de 2,5 m/s à 3,5 m/s quando são considerados os 13 cenários simulados, para a seção 05. Ainda, dependendo dos dados de entrada utilizados para realizar a simulação, podem existir diferenças da ordem de 50% no valor do tempo de pico para seções mais distantes da barragem. Estes resultados são observados na Figura 70, Figura 71, Figura 72 e Figura 73.

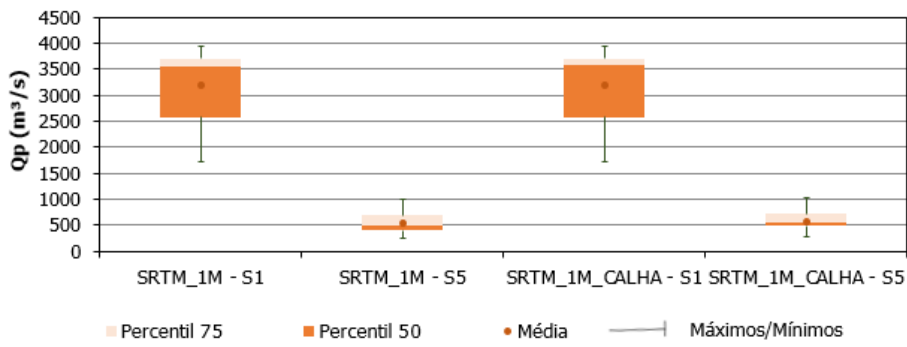


Figura 70 – SRTM_1M x SRTM_1M_CALHA quanto à vazão de pico para a seção 01 e seção 05

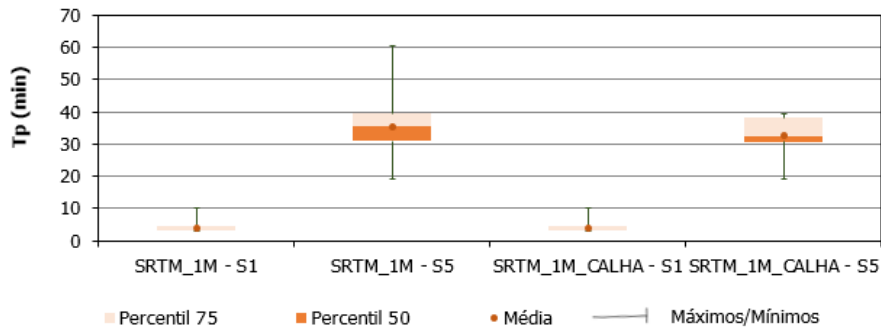


Figura 71 – SRTM_1M x SRTM_1M_CALHA quanto ao tempo de pico para a seção 01 e seção 05

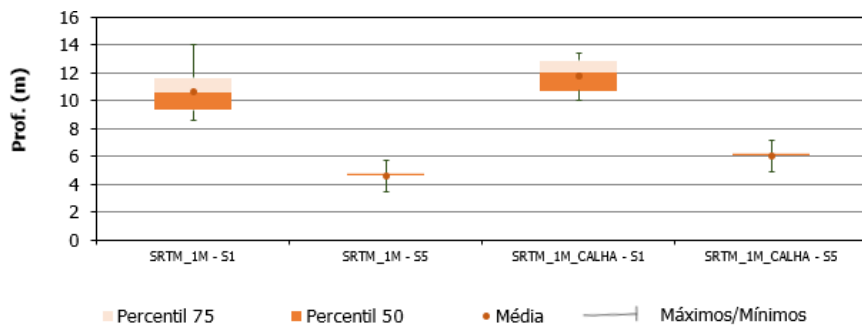


Figura 72 – SRTM_1M x SRTM_1M_CALHA quanto à profundidade máxima para a seção 01 e seção 05

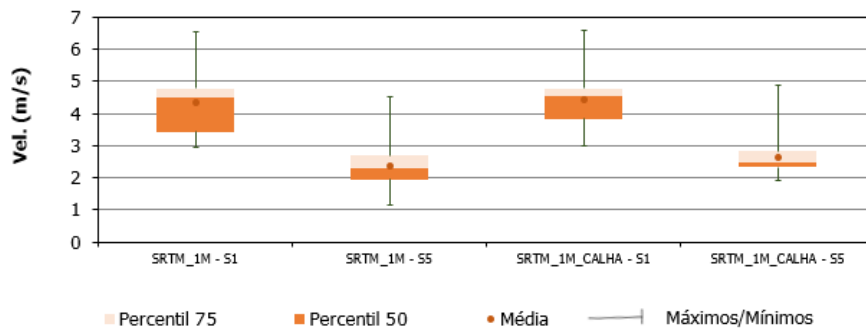


Figura 73 – SRTM_1M x SRTM_1M_CALHA quanto à velocidade máxima para a seção 01 e seção 05

5.1.1.3 Adição de seções topográficas em locais de controle obtidas via aerofotogrametria e VANTs (SRTM_1M_CALHA x SRTM_1M_CALHA_VANT)

O SRTM_1M_CALHA_VANT nada mais é que o SRTM_1M_CALHA adicionado de algumas seções de controle obtidas via VANTs, conforme anteriormente citado. A vazão de pico desse modelo sempre foi ligeiramente maior do que o modelo SRTM_1M_CALHA, para as seções de controle avaliadas, principalmente no grupo estatístico relativo à variação nas configurações de brecha. Essas mudanças, entretanto, não são de grande magnitude, sendo a maior variação a observada para a seção 05, com 100 m³/s de diferença entre os máximos apontados pelos dois grupos de cenários. O tempo de pico observado nos grupos estatísticos do modelo SRTM_1M_CALHA_VANT é ligeiramente menor ou igual ao tempo no modelo SRTM_1M_CALHA, representando, portanto, uma onda um pouco mais rápida. Entretanto, essa mudança é da ordem de 2 minutos, não sendo tão representativa. O principal parâmetro influenciado pela inserção de modelos digitais de superfície obtidos via VANTs no modelo SRTM_1M_CALHA está relacionado à profundidade máxima e velocidades máximas em seções de interesse. Devido à baixa resolução de modelos digitais de elevação globais gratuitos, a inserção de informações mais precisas em locais de interesse pode ser muito interessante e tem a finalidade de melhor representar a onda de cheia nesses locais, sem, entretanto, alterar significativamente outros parâmetros da onda de cheia, como o tempo de pico e/ou vazão de pico. Os gráficos gerados para esta comparação são apresentados na Figura 74, Figura 75, Figura 76 e Figura 77.

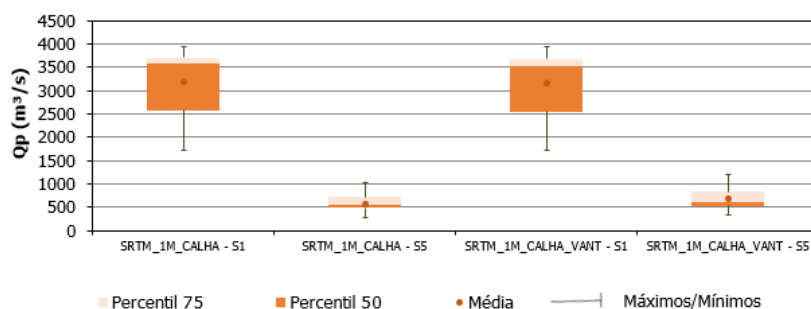


Figura 74 – SRTM_1M_CALHA_VANT x SRTM_1M_CALHA quanto à vazão de pico para a seção 01 e seção 05

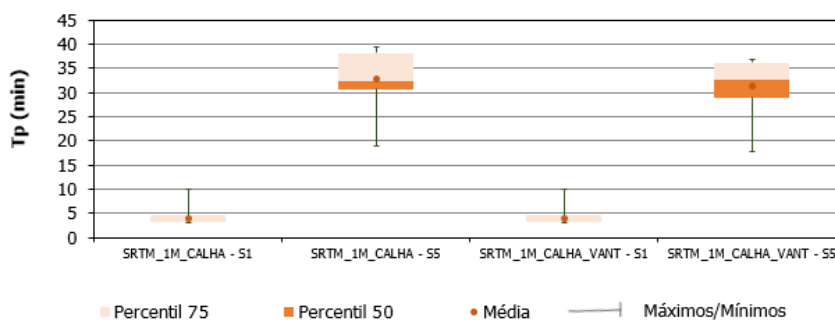


Figura 75 – SRTM_1M_CALHA_VANT x SRTM_1M_CALHA quanto ao tempo de pico para a seção 01 e seção 05

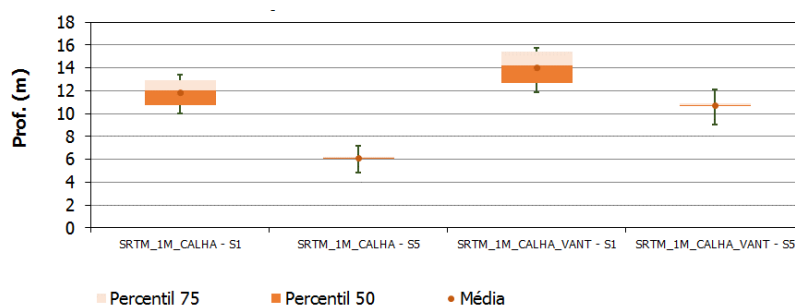


Figura 76 – SRTM_1M_CALHA_VANT x SRTM_1M_CALHA quanto à prof. máxima para a seção 01 e seção 05

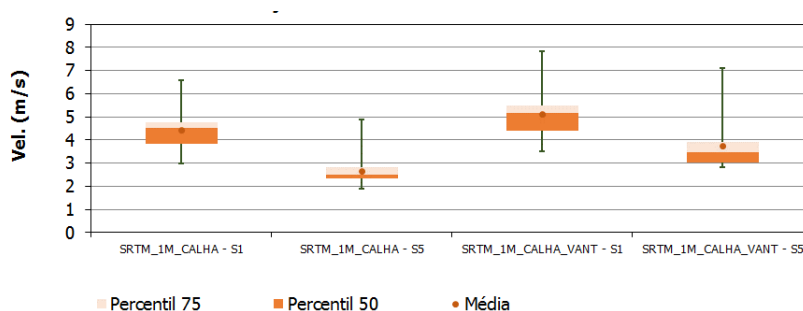


Figura 77 – SRTM_1M_CALHA_VANT x SRTM_1M_CALHA quanto à velocidade máxima para a seção 01 e seção 05

5.1.1.4 Utilização de MDE bruto de diferentes fontes (AW3D_1M x SRTM_1M)

Neste caso, é interessante notar que o modelo AW3D30, que originou o modelo AW3D_1M, foi obtido por uma metodologia diferente do MDE SRTM, e devido a esse fato, as características hipsométricas do vale para os dois modelos diferem consideravelmente, apesar de terem a mesma resolução espacial. Enquanto o modelo MDE SRTM_1M se apresenta mais suave, o modelo AW3D_1M apresenta configuração com mais declives e quebras bruscas de relevo no que seria o caminho natural da onda de cheia. Essas diferentes características de relevo refletem distintos resultados nas seções observadas. Neste sentido, o modelo AW3D_1M subestimou os picos de vazão máxima para quase todos os cenários quando comparado com o modelo SRTM_1M, com valores que representam até mesmo a

metade da vazão obtida pelo modelo proveniente do SRTM. Exceção a essa questão são as perturbações realizadas no volume do reservatório, que tendem a manter uma variação similar entre os dois MDEs. Isso levou ao modelo SRTM_1M apresentar tempos de picos menores na média de todas as simulações, o que reflete ondas mais rápidas e menos atenuadas. Ao mesmo tempo, em geral os valores de profundidade máxima e velocidade máxima variam de forma aleatória, mas mantendo-se sempre próximas, dependendo da seção de análise.

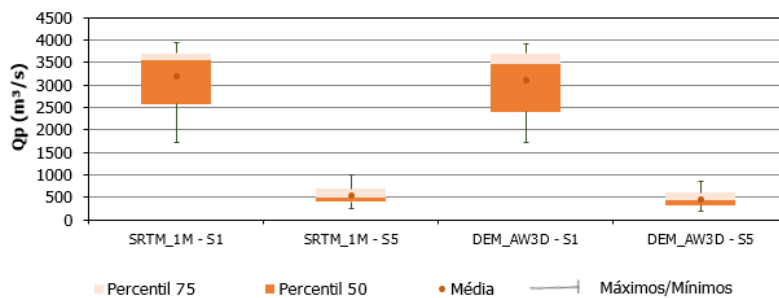


Figura 78 – SRTM_1M x AW3D_1M quanto à vazão de pico para a seção 01 e seção 05

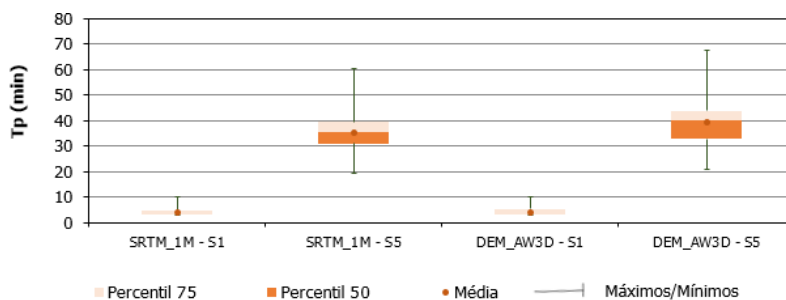


Figura 79 – SRTM_1M x AW3D_1M quanto ao tempo de pico para a seção 01 e seção 05

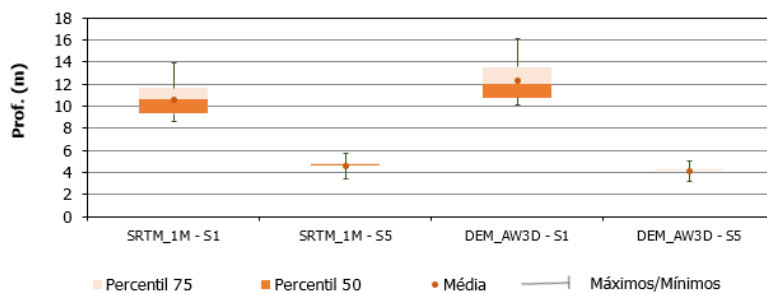


Figura 80 – SRTM_1M x AW3D_1M quanto à profundidade máxima para a seção 01 e seção 05

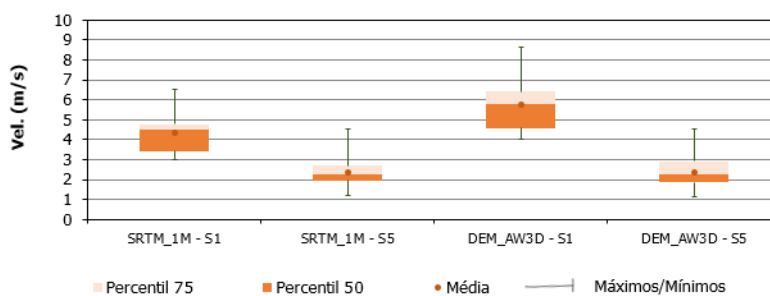


Figura 81 – SRTM_1M x AW3D_1M quanto à velocidade máxima para a seção 01 e seção 05

5.1.1.5 Diferenças entre a utilização de MDE SRTM processado e MDE proveniente de aero restituição em escala 1:30.000 (MDE_AEROGEO x SRTM_1M_CALHA_VANT)

Em média a vazão de pico observada para os cenários rodados utilizando o SRTM_1M_CALHA_VANT foi ligeiramente menor do que a vazão de pico gerada através da utilização do MDE_AEROGEO. Em relação ao tempo de pico, o modelo MDE_AEROGEO apresentou respostas mais rápidas, com diferenças da ordem de 5 minutos em média. Isso era de se esperar uma vez que o MDE_AEROGEO foi concebido a partir de uma escala mais detalhada do vale de jusante. Em termos comparativos, portanto, pode-se dizer que a adição de uma calha fictícia e de seções de controle a partir do uso de VANTs em modelos provenientes do SRTM podem ser o suficiente para representar o tempo de pico obtido em um modelo com maior precisão na escala de 1:30.000, desde que seja considerado um erro agregado da ordem de 20% na determinação do tempo de pico, para vales rápidos e encaixados. Quanto às profundidades máximas, observou-se que as mesmas sempre são maiores quando o modelo SRTM_1M_CALHA_VANT é utilizado, em comparação com as simulações realizadas utilizando o MDE_AEROGEO. Ainda, observou-se não ser possível obter valores de profundidade máxima comuns entre os cenários gerados a partir da utilização destes dois MDEs para a seção 05. As velocidades máximas observadas na seção 05, quando é utilizado o SRTM_1M_CALHA_VANT, se mostraram em média correspondentes à 75% das velocidades máximas observadas quando são simulados os cenários a partir da utilização do MDE_AEROGEO.

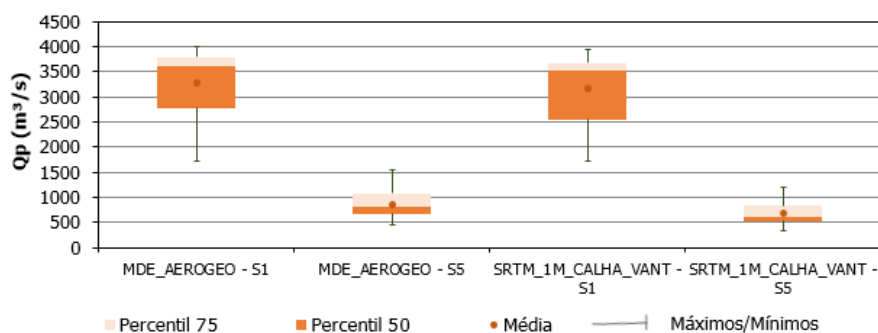


Figura 82 – MDE_AEROGEO x SRTM_1M_CALHA_VANT quanto à vazão de pico para a seção 01 e seção 05

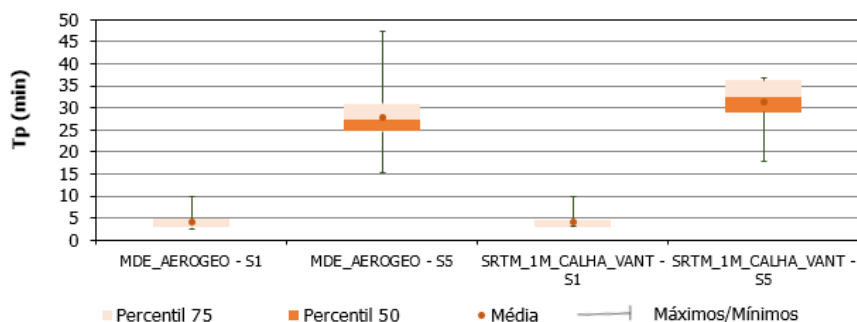


Figura 83 – MDE_AEROGEO x SRTM_1M_CALHA_VANT quanto ao tempo de pico para a seção 01 e seção 05

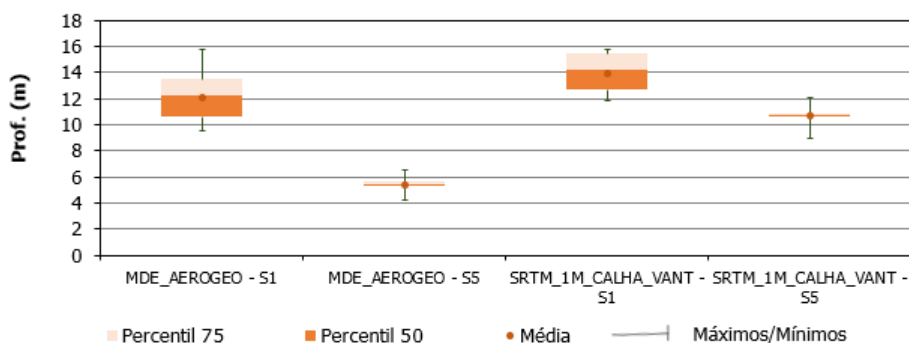


Figura 84 – MDE_AEROGEO x SRTM_1M_CALHA_VANT quanto à prof. máxima para a seção 01 e seção 05

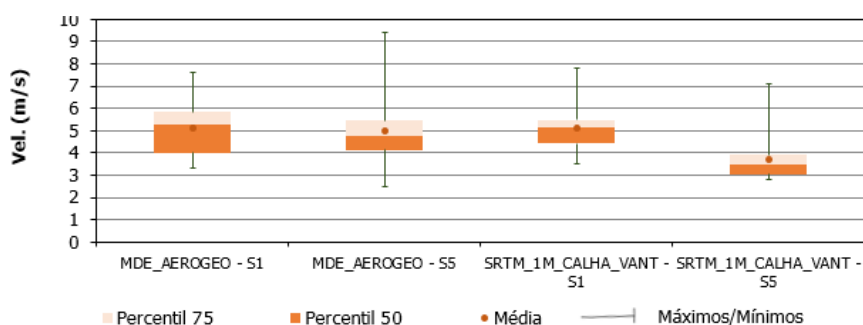


Figura 85 – MDE_AEROGEO x SRTM_1M_CALHA_VANT quanto à velocidade máxima para a seção 01 e seção 05

5.1.2 ESTUDO CONJUNTO DAS SEÇÕES

O estudo conjunto das seções procurou avaliar quais são as relações existentes entre os parâmetros de avaliação (vazão de pico, tempo de pico, profundidade máxima e velocidade máxima) e os dados de entrada do modelo em seções localizadas a diferentes distâncias da barragem, considerando o MDE_AEROGEO e o Modelo Difusivo 2D. Na Figura 86 é possível observar como a vazão de pico varia nas diferentes seções para diferentes grupos de perturbações de dados de entrada. Nesse sentido, nota-se que diferentes valores no coeficiente de Manning são importantes para a determinação da vazão de pico em seções mais a jusante, de forma que uma variação de 100% no coeficiente de Manning, para mais ou para menos,

pode gerar em torno de 100% da vazão de pico em uma seção distante aproximadamente 8,5 km do local de rompimento (Seção 07). O coeficiente de Manning, desse modo, tem maior impacto na vazão de pico quanto mais distante for a seção da barragem, como pode ser observado no coeficiente de variação do gráfico, que aumenta gradativamente de 0,02 (na seção mais de montante) à 0,48 na seção mais de jusante.

Esse comportamento é diferente quando se trata das configurações de brecha da barragem, que tem muito mais impacto no valor da vazão de pico para as seções mais a montante, estabilizando-se nas seções mais de jusante. O coeficiente de variação nesse cenário começa alto nas seções de montante e termina próximo de zero nas seções de jusante. Dos quatro dados de entrada perturbados, o único que mantém coeficientes de variações não nulos, porém com tendência crescente de montante para jusante em todos os cenários avaliados, é o volume de reservatório. A variação de 40% do volume do reservatório para mais ou para menos é responsável por variações da ordem de 100% da vazão de pico na Seção 07. Enquanto isso, a variação no MDE se demonstrou mais importante para as seções localizadas mais distantes do barramento, com coeficiente de variação variando de 0 a valores próximos de 0,35.

As incertezas relativas à estimativa do tempo de pico da onda de cheia, segundo apresentado na Figura 87, estão muito mais relacionadas com o coeficiente de Manning e ao MDE do que com a variação no volume do reservatório. Nesse sentido, o tempo de pico para diferentes variações do coeficiente de Manning é mais sensível em seções localizadas a maiores distâncias do barramento, assim como observado para a vazão de pico. Já as incertezas relativas à configuração da brecha, resultam em variação constante do tempo de pico ao longo das seções estudadas, sendo mais representativa, entretanto, nas seções mais próximas do barramento.

A profundidade máxima não é tão afetada quando se realizam modificações bruscas nos valores do coeficiente de Manning para seções mais distantes ao barramento, sendo o MDE o parâmetro mais importante para determinação desse parâmetro. Entretanto, para as primeiras seções, perturbações no coeficiente de Manning podem resultar em diferenças consideráveis na profundidade. O mesmo comportamento ocorre quando são perturbadas as configurações de brecha da barragem. Embora a profundidade seja bastante sensível a esse parâmetro nas duas primeiras seções, após uma certa distância, a profundidade máxima passa a convergir para um patamar constante, de modo que a consideração do rompimento da barragem em 0,1 hora ou 0,5 horas pode ocasionar a mesma cota de lâmina d'água em determinadas seções. A modificação no volume do reservatório, variando o mesmo em 40%

para mais ou para menos, pode gerar, entretanto, variações que chegam a mais de dois metros de profundidade máxima na última seção avaliada.

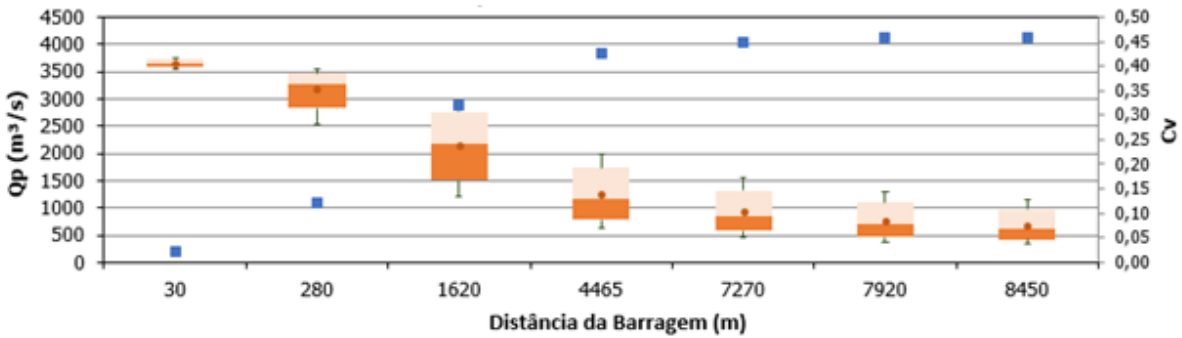
A velocidade máxima nas seções avaliadas varia consideravelmente com as incertezas no âmbito da determinação do coeficiente de Manning e das características da topografia. A partir da modificação do coeficiente de Manning, as velocidades máximas em alguns locais podem variar significativamente de 3m/s a 8 m/s na última seção. Do mesmo modo, a partir de modificações no MDE, a velocidade máxima pode variar de 1 a 7 m/s em algumas seções. Ainda, assim como observado para a profundidade máxima, variações ocasionadas nas configurações de brecha do barramento são importantes apenas nos primeiros quilômetros de rio, de forma que a partir da quarta seção, localizada a aproximadamente 4,5 km à jusante do barramento, os valores observados de velocidade máxima passam a convergir em diferentes patamares. A perturbação do volume do reservatório, entretanto, tem papel importante nas variações observadas na velocidade máxima, com o coeficiente de variação no sentido montante – jusante variando de zero a aproximadamente 0,2.

Observa-se também que o coeficiente de variação relativo às variações da topografia não apresenta comportamento linear, havendo picos e vales em alguns casos. Esse comportamento muito provavelmente está atrelado ao fato de que a incerteza da topografia está presente não só na condição de contorno de montante (como no caso da brecha formada e do volume do reservatório), mas em todo o trajeto percorrido pela onda de cheia, exercendo portanto diferentes pesos em distintas seções ao longo dos cursos hídricos analisados.

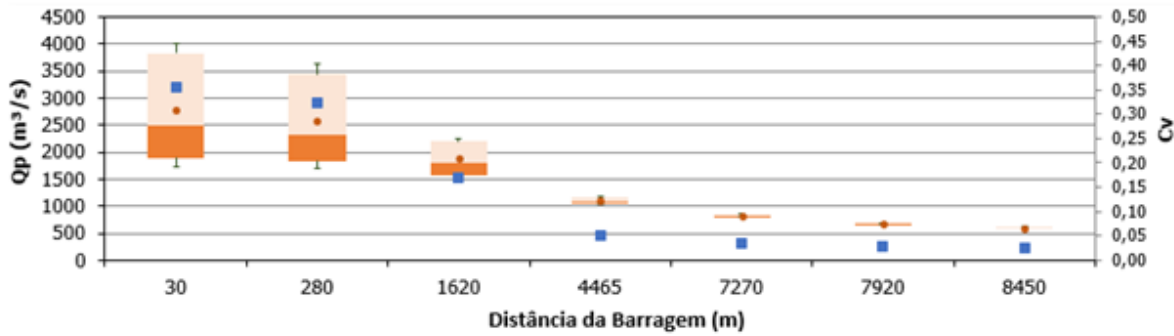
Avaliação Estatística para Vazão de Pico

LEGENDA: ■ Percentil 75 ■ Percentil 50 ● Média ■ coeficiente de variação

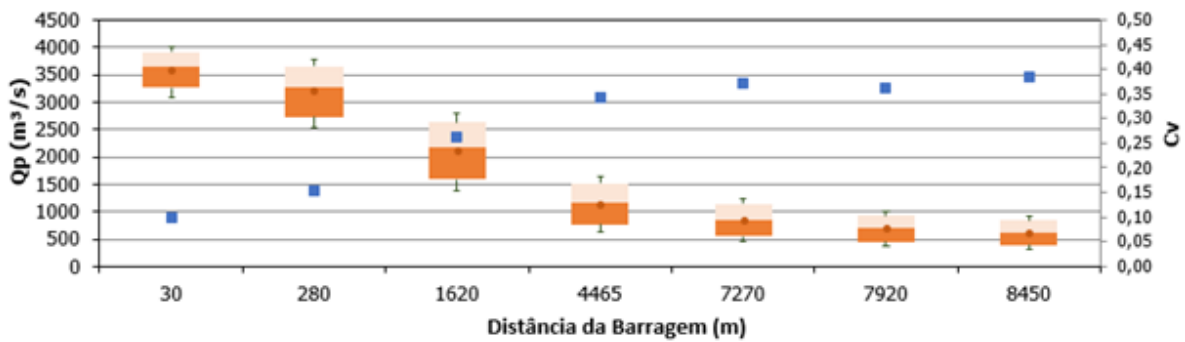
Variações no Coeficiente de Manning:



Variações na Configuração da Brecha:



Variações na Curva Cota-Volume:



Variações no Modelo Digital de Elevação:

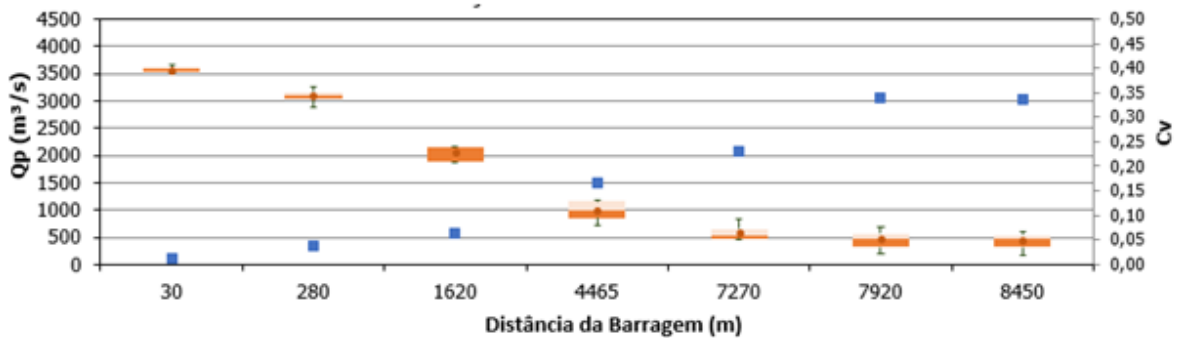
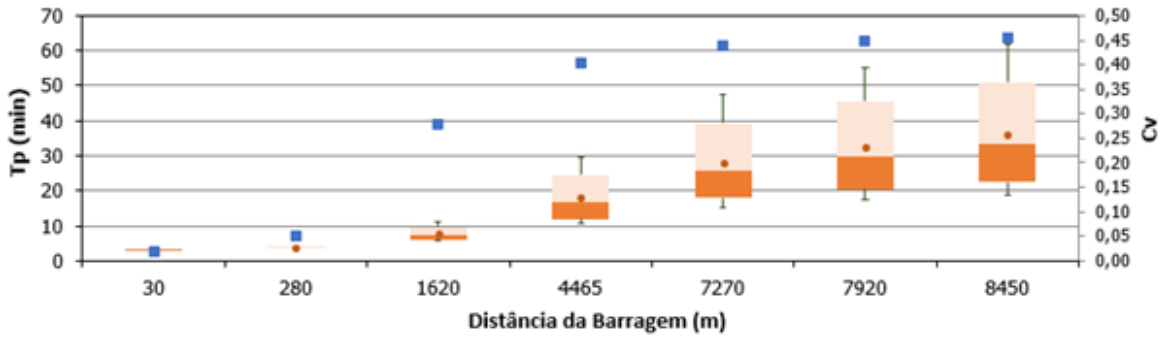


Figura 86 – Variações na Vazão de Pico: Modelo Difusivo para o MDE_AEROGEO

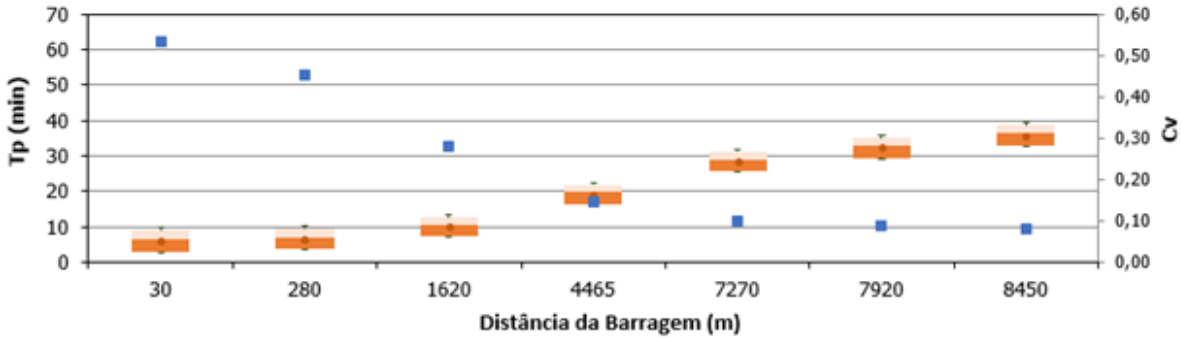
Avaliação Estatística para Tempo de Pico

LEGENDA: ■ Percentil 75 ■ Percentil 50 ● Média ■ coeficiente de variação

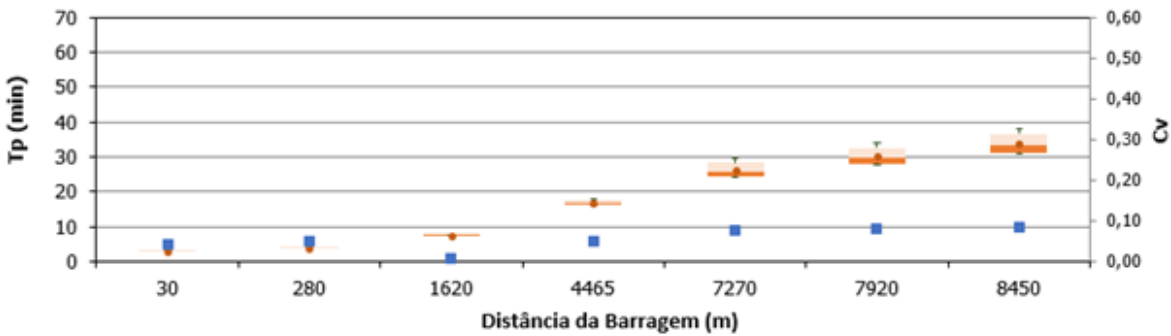
Variações no Coeficiente de Manning:



Variações na Configuração da Brecha:



Variações na Curva Cota-Volume:



Variações no Modelo Digital de Elevação:

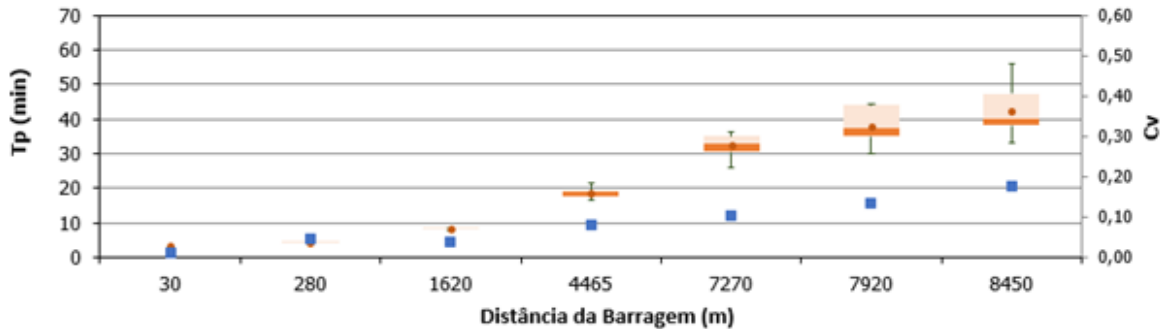
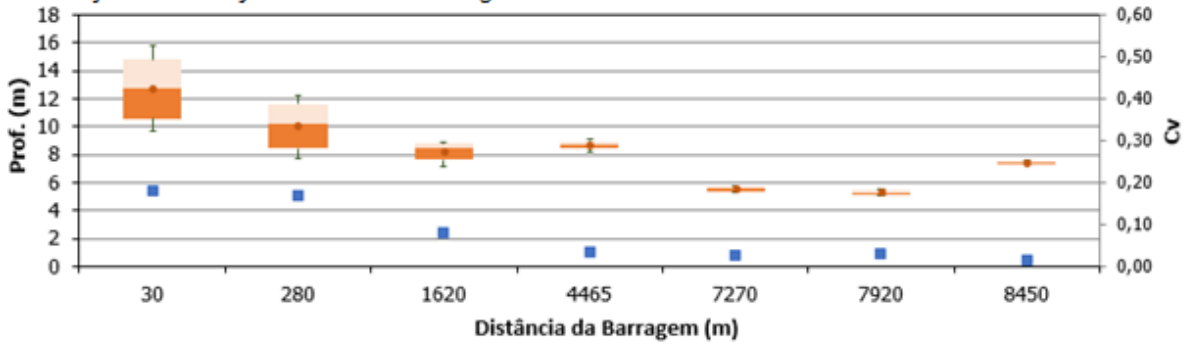


Figura 87 –Variações no Tempo de Pico: Modelo Difusivo para o MDE_AEROGEO

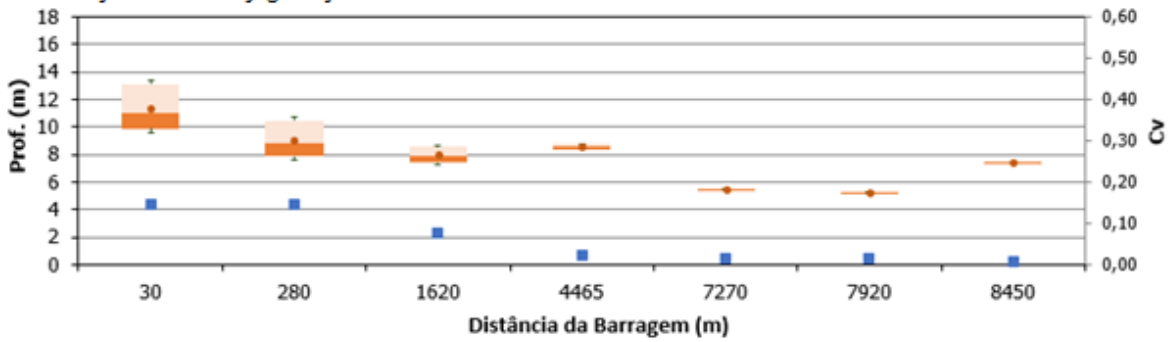
Avaliação Estatística para Profundidade Máxima

LEGENDA: ■ Percentil 75 ■ Percentil 50 ● Média ■ coeficiente de variação

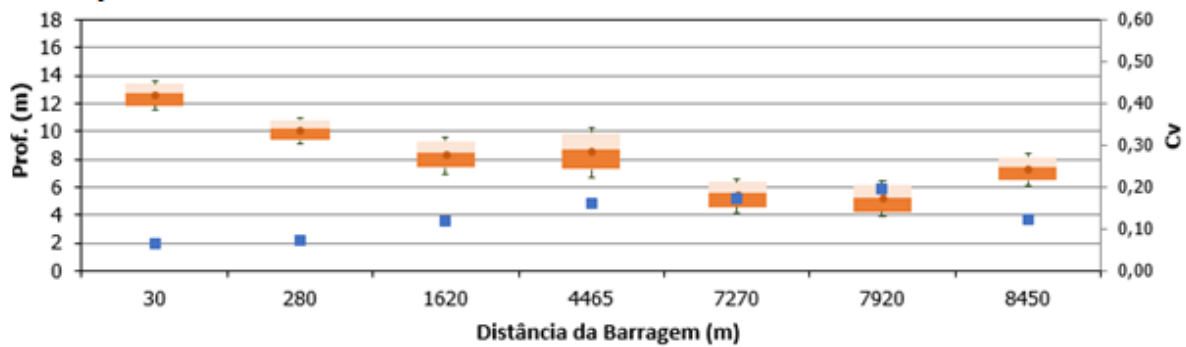
Variações no Coeficiente de Manning:



Variações na Configuração da Brecha:



Variações na Curva Cota-Volume:



Variações no Modelo Digital de Elevação:

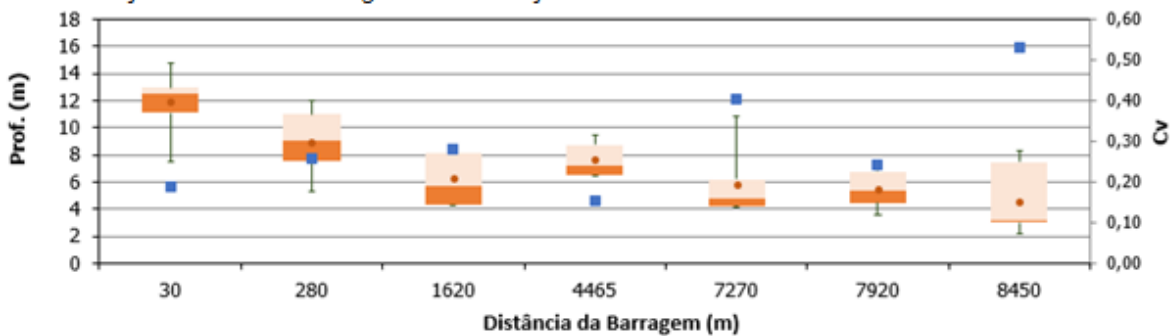
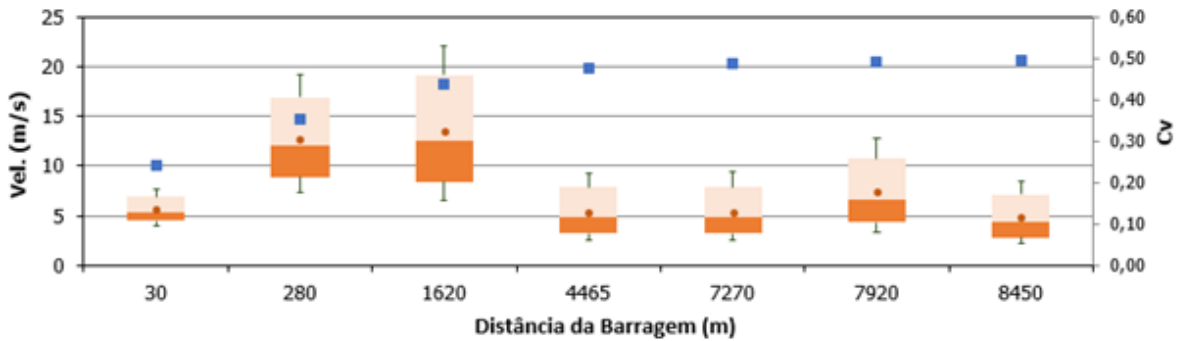


Figura 88 –Variações na Profundidade Máxima: Modelo Difusivo para o MDE_AEROGEO

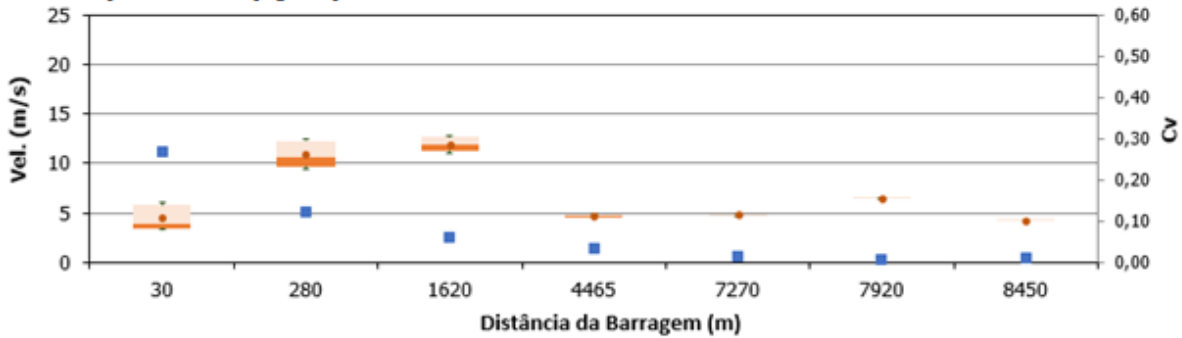
Avaliação Estatística para Velocidade Máxima

LEGENDA: ■ Percentil 75 ■ Percentil 50 ● Média ■ coeficiente de variação

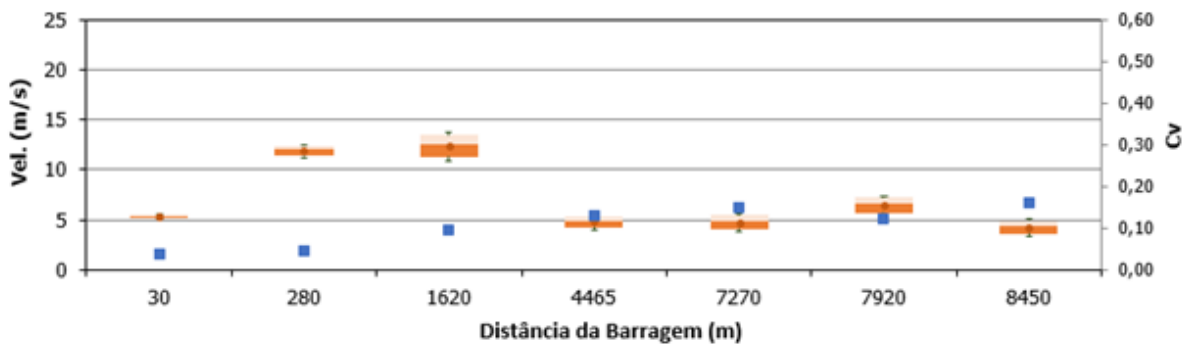
Variações no Coeficiente de Manning:



Variações na Configuração da Brecha:



Variações na Curva Cota-Volume:



Variações no Modelo Digital de Elevação:

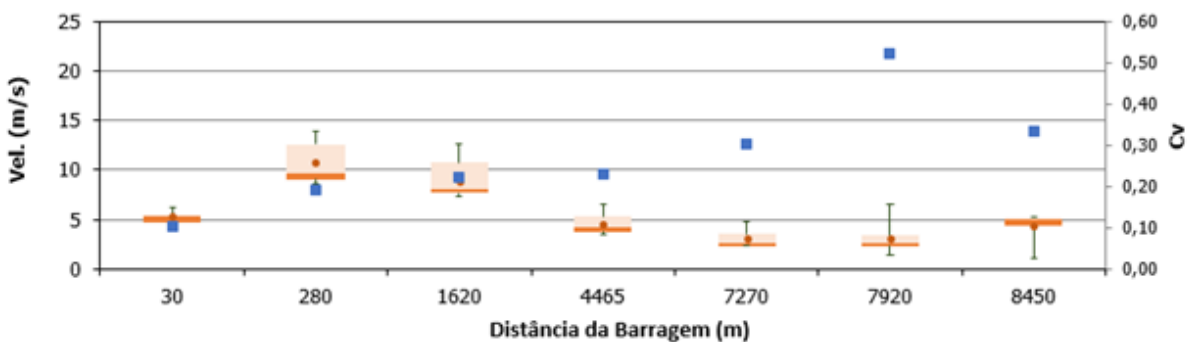


Figura 89 – Variações na Velocidade Máxima: Modelo Difusivo para o MDE_AEROGEO

Todas as informações expostas anteriormente podem ser compiladas conjuntamente em apenas 4 gráficos, sendo um para cada parâmetro de avaliação. A Figura 90 apresenta os coeficientes de variação para o parâmetro vazão de pico (eixo y) por uma relação entre o comprimento do curso hídrico até a seção de interesse dividido pela altura da barragem. É interessante notar que a estimativa de vazão de pico a partir de distâncias 200 vezes maior do que a altura da barragem é minimamente influenciada por perturbações realizadas na brecha da barragem, sendo, entretanto, essa incerteza muito mais importante para as seções mais próximas do barramento. Os parâmetros mais importantes para a determinação da vazão de pico em seções distantes do barramento são, de maneira similar, o coeficiente de Manning e o volume do reservatório. As incertezas frente perturbações do MDE a partir dos 7 modelos utilizados neste estudo se mostram com igual grau de importância ao tipo de equação utilizada, porém suas incertezas impactam menos do que as incertezas quanto ao coeficiente de Manning e quanto ao volume do reservatório.

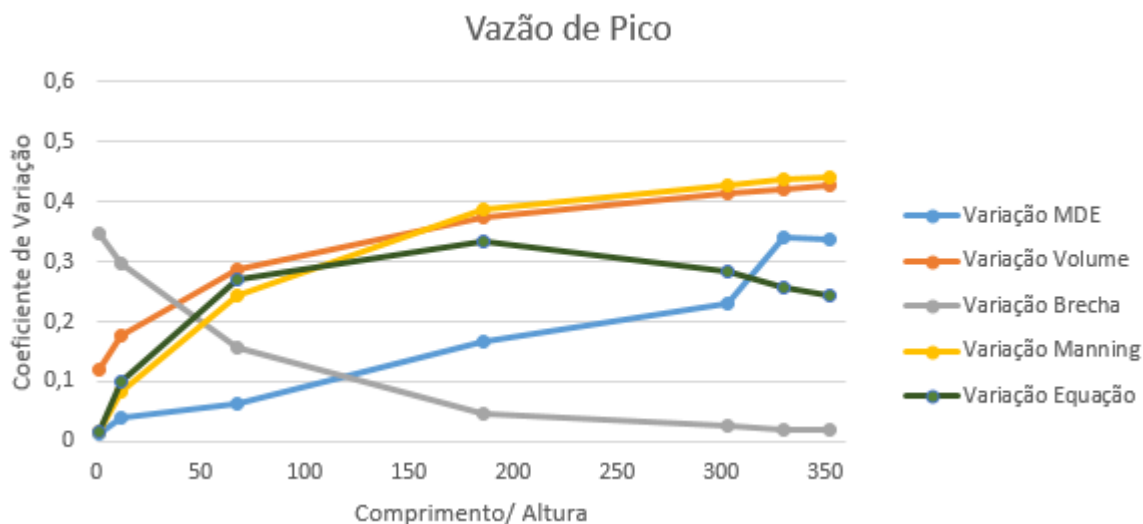


Figura 90 – Coeficientes de variação para vazão de pico

A influência das configurações de brecha utilizadas para a determinação da vazão de pico é observada da mesma forma para o tempo de pico. As perturbações relativas a como ocorre a brecha são importantes para o tempo de pico apenas para os primeiros quilômetros a jusante do barramento, mais especificamente para distâncias de até 100 vezes o tamanho da barragem, para o local estudado. A partir desse ponto, as incertezas no tempo de pico passam a estar condicionadas muito mais com os valores do coeficiente de Manning utilizado para o leito e margens do rio Paranhana. Em seções mais distantes, as perturbações quanto ao MDE se mostram mais importantes e muito semelhantes às incertezas obtidas pela variação no volume do reservatório. Para grandes distâncias, a partir de 200 vezes o tamanho do barramento, a escolha do tipo de equacionamento (Modelo Difusivo 2D x Saint Venant 2D)

impacta mais nos resultados do que parâmetros como configuração de brecha, volume do reservatório e configuração da topografia de jusante. Estas informações são visualizadas Figura 91.

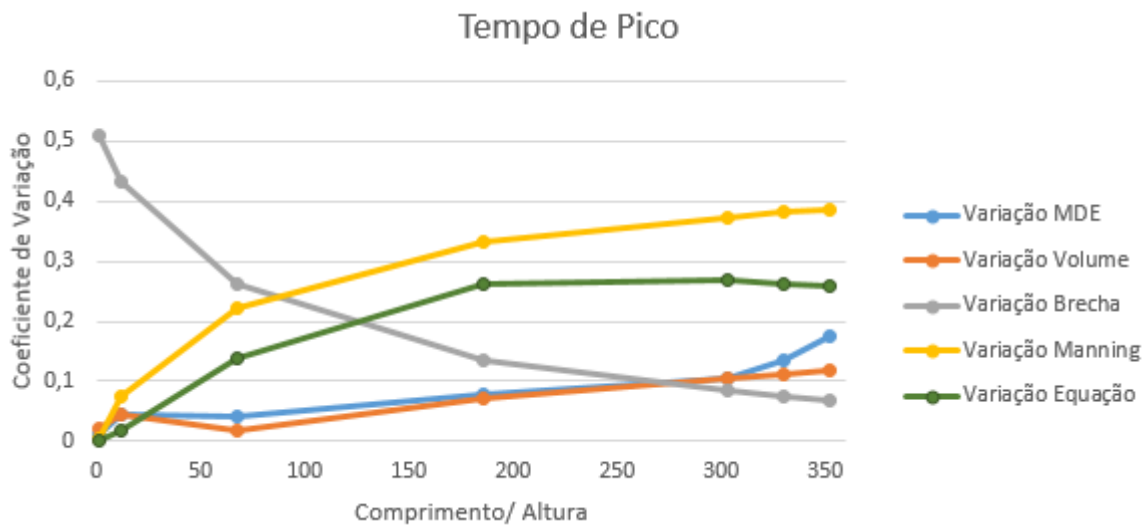


Figura 91 – Coeficientes de Variação para Tempo de Pico

Erros na profundidade máxima na seção, como era de se esperar, estão muito atrelados à forma do MDE utilizado. Mesmo que apenas alterações sensíveis nas seções avaliadas tenham ocorrido, uma vez que todos os MDEs utilizados neste estudo são produtos consolidados, a profundidade máxima chegou a coeficientes de variação de até 0,6 a partir da variação da topografia. Variações relativas à configuração da brecha, ao coeficiente de Manning e ao tipo de equação utilizada resultaram em incertezas na profundidade de 10% a 20% apenas próximo da barragem, em pontos distantes em até 50 vezes a altura do barramento, sendo a incerteza quanto ao volume do reservatório o segundo parâmetro que mais influencia a determinação da profundidade máxima em distâncias superiores a 50 vezes o tamanho da barragem. Estas informações são visualizadas na Figura 92. Ainda, mudanças bruscas do coeficiente de variação relativo à topografia ocorrem devido às diferenças entre os MDEs existentes. Estas diferenças estão presentes ao longo de todo o trecho estudado, diferentemente de outros dados de entrada em que as mudanças ocorrem apenas a montante, como volume do reservatório e formação de brecha, por exemplo.

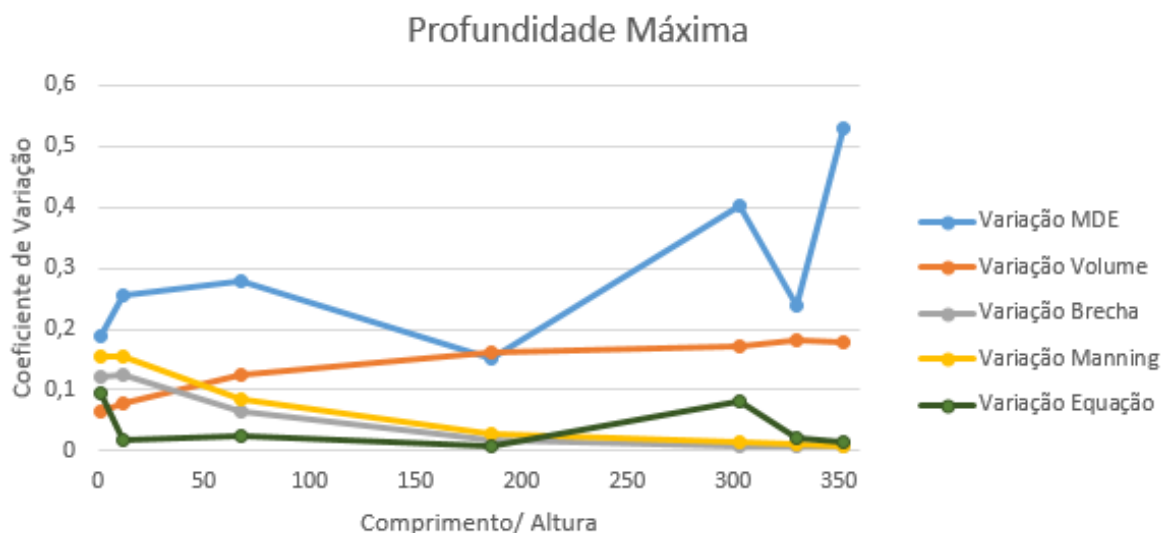


Figura 92 – Coeficientes de variação para profundidade máxima

Ao contrário do observado para a profundidade máxima, em que o coeficiente de Manning não se mostra tão importante quanto a outros parâmetros, para a velocidade máxima, perturbações desse dado de entrada são tão ou mais importantes que perturbações no MDE utilizado. Nesse sentido, a configuração da brecha é o parâmetro que menos causa influência nas velocidades máximas ao longo do trecho estudado. Perturbações quanto ao volume do reservatório são parâmetros importantes nas seções mais de jusante, mas a incerteza quanto ao MDE e quanto ao tipo de equacionamento utilizado ainda são maiores.

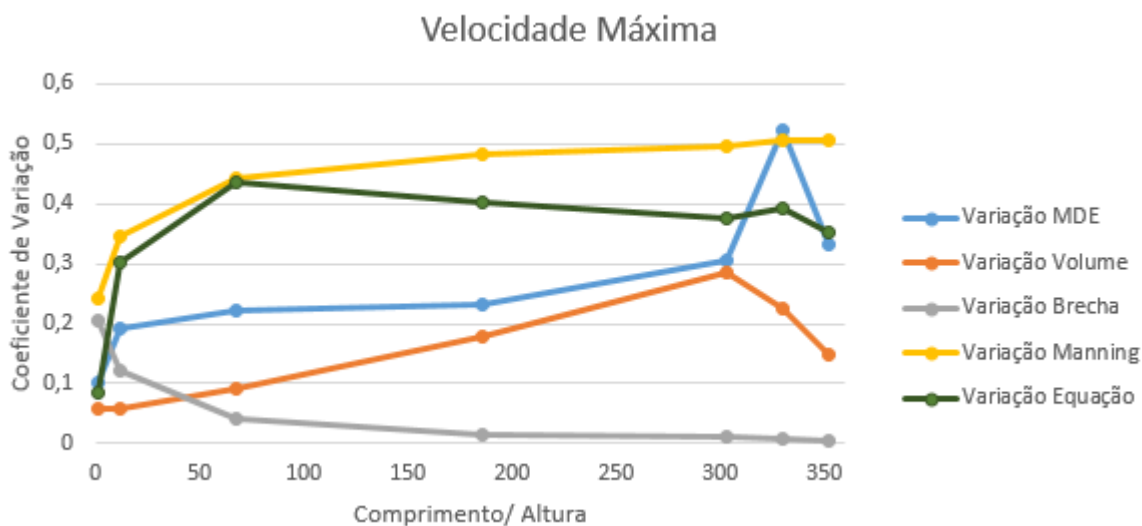


Figura 93 – Coeficientes de variação para velocidade máxima

5.1.3 COMPARAÇÃO ENTRE MODELO DIFUSIVO E SAINT VENANT

Diferenças consideráveis foram encontradas na comparação realizada entre o modelo Difusivo 2D e o modelo de Saint Venant 2D, observando-se que a consideração das equações completas de Saint Venant sob uma abordagem bidimensional tende a apresentar menores valores relativos a vazão de pico e maiores valores relativos ao tempo de pico nas seções avaliadas. Para realizar tal avaliação, foram realizados 105 cruzamentos de simulações. Esses cruzamentos foram feitos para cenários com idênticas condições de contorno, entretanto com distintos equacionamentos considerados: Um a partir da consideração das equações completas de Saint Venant 2D (Equações 3 à 5) e outro a partir da consideração do modelo difusivo 2D (Equação 7), conforme exposto no capítulo de Material e Métodos.

Na Figura 94 observa-se a comparação dos hidrogramas para 4 seções ao longo do rio Paranhana, obtidos via utilização do Modelo Difusivo 2D e das Equações de Saint Venant 2D. Para construção desse gráfico considerou-se todos os dados de entrada de referência.

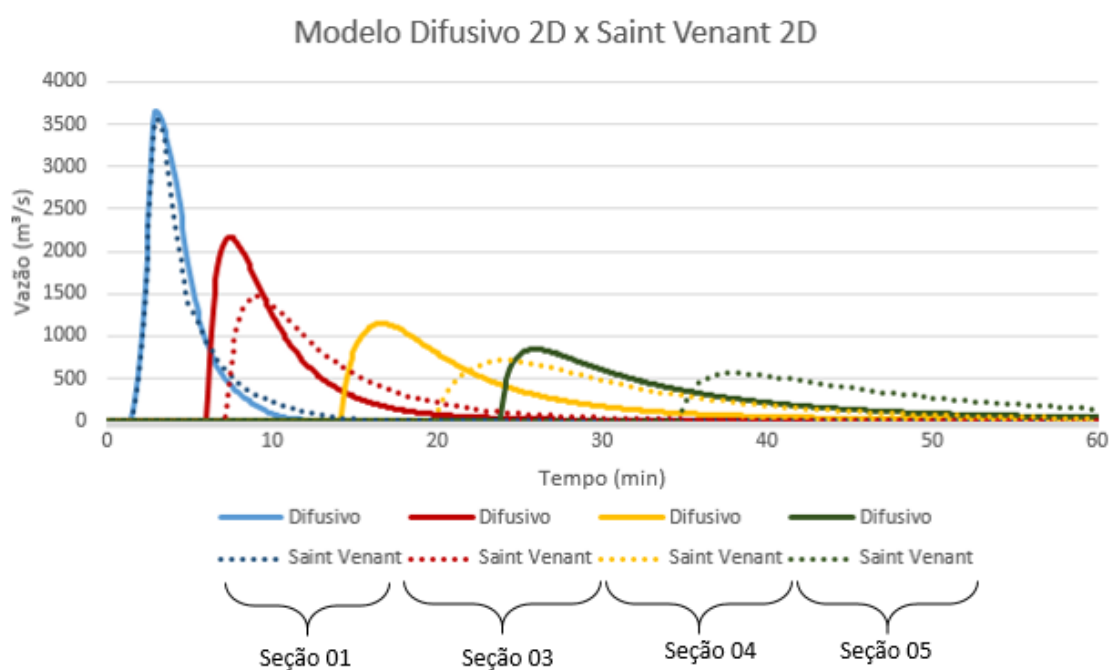


Figura 94 – Comparação entre hidrogramas Saint Venant x Difusivo 2D para algumas seções

Comportamento semelhante aos resultados observados para os dois cenários que deram origem à Figura 94 também foram observados em todos os outros 105 cruzamentos realizados para diferentes MDEs: menor vazão de pico e maior tempo de pico.

Observou-se nesse sentido que quando são realizadas as perturbações no coeficiente de Manning, a vazão de pico para uma dada seção pode variar numa ordem de 100% dependendo do conjunto de equações utilizadas. Essa constatação está diretamente relacionada às velocidades encontradas quando é utilizado o Modelo Difusivo 2D, que podem chegar ao

dobro quando comparadas às velocidades obtidas via modelo de Saint Venant 2D. Os testes realizados, entretanto, mostram que a profundidade máxima não é tão influenciada pela escolha de um ou outro conjunto de equações, principalmente para as seções mais distantes da barragem (Figura 92). Ainda, percebeu-se que as variações dos resultados geradas a partir da perturbação dos dados de entrada permanecem muito semelhantes, tanto quando se utiliza o Modelo Difusivo 2D ou quando se utiliza as Equações de Saint Venant 2D.

5.1.4 IMPACTOS DA ONDA DE CHEIA

Muitas simulações de onda de cheia foram realizadas referente ao hipotético rompimento da barragem da UHE Canastra, de forma que a propagação da onda de cheia foi estudada até a chamada Seção 07, que se refere, como exposto anteriormente, ao local em que o Rio Paranhana encontra a usina.

Ao longo do percurso estudado, que tem por volta de 8,5 km de extensão, muitas manchas de inundação foram obtidas (182 no total), sendo mostrada na Figura 95 a mancha de inundação considerada como conservadora no âmbito deste estudo, considerando o modelo digital de elevação AW3D_1M e as equações de Saint Venant 2D).

Já a Figura 96 apresenta a mancha de inundação considerada como mais catastrófica caso ocorra o rompimento da barragem de Canastra, visto que foi obtida a partir da utilização das equações do Modelo Difusivo para o MDE_AEROGEO, volume multiplicado pelo $F_m=1,4$ e baixo coeficiente de Manning.

É interessante notar, ainda, que caso um projeto de PAE (Plano de Ação Emergencial) fosse realizado apenas utilizando os cenários originados a partir do MDE de maior precisão regional, que é o MDE_AEROGEO, referente à restituição aerofotogramétrica da região em escala de 1:30.000, a mancha de inundação seria menor em algumas seções quando comparada à mancha gerada pelas simulações em que se utilizou o modelo digital de elevação SRTM_1M_CALHA_VANT. Isto ocorreria devido a características contrastantes entre os dois modelos digitais de elevação comparados, principalmente no quesito de maior representatividade de condições topográficas nas seções em que se obteve os resultados das simulações, por parte do SRTM_1M_CALHA_VANT. A mancha de inundação obtida a partir do SRTM_1M_CALHA_VANT e da utilização dos dados de entrada condizentes ao cenário mais catastrófico é apresentada na Figura 97.



Figura 95 – Mancha de inundação utilizando o MDE AW3D_1M e as equações de Saint Venant 2D

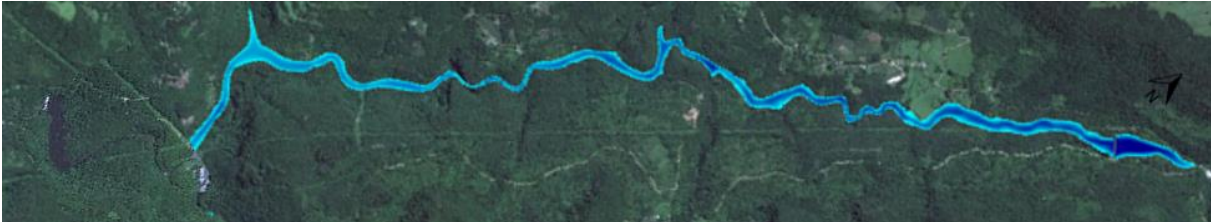


Figura 96 – Mancha de inundação utilizando o MDE_AEROGEO e as equações do Modelo Difusivo



Figura 97 – Mancha de inundação utilizando o SRTM_1M_CALHA_VANT e as equações do Modelo

Difusivo

Uma informação de grande relevância para os operadores da barragem Canastra se refere não só às residências que podem sofrer impacto pela possível onda de cheia mas também quais seriam as características tanto da vazão de pico quanto ao tempo de pico na seção 07, ou seja, no encontro do Rio Paranhana com a UHE Canastra. Para tentar caracterizar esses parâmetros de avaliação sob o âmbito da probabilidade, apresenta-se, na Figura 98 as probabilidades acumuladas relativas à vazão de pico possível de chegar na seção 07, interpretando-se o gráfico de forma que é 100% provável que a vazão de pico nessa seção seja maior do que o valor mínimo do eixo y, e pouco provável que este valor seja superior ao valor máximo do eixo y. A interpretação do gráfico permitiria considerar que uma vazão de pico da ordem superior a 400 m³/s nesta seção tem altas probabilidades de ocorrência. Entretanto, vazões pico superiores a 1200 m³/s são muito pouco prováveis.

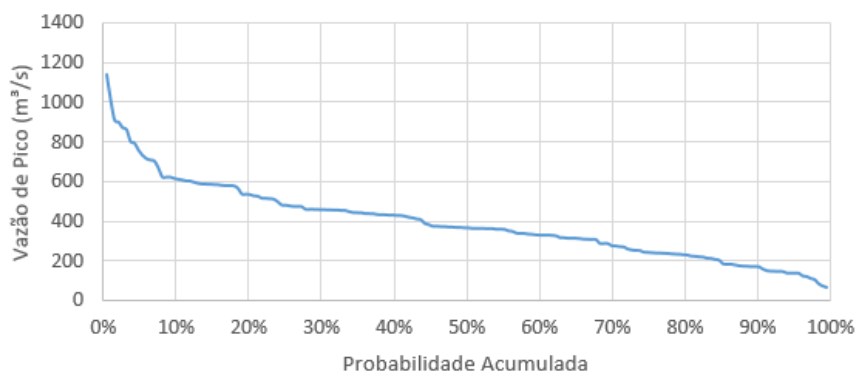


Figura 98 – Probabilidades acumuladas de vazão de pico para a Seção 07

Da mesma forma, estimou-se o tempo mínimo e máximo esperado para chegada da onda de cheia na seção 07, ou seja, na usina da UHE Canastra, a partir da construção de um gráfico de probabilidade acumulada similar ao que mostra as probabilidades para a vazão de pico. Nesse sentido, num rompimento hipotético da barragem da UHE Canastra, espera-se que a onda mais rápida chegue ao local em algo em torno de apenas 17 minutos, com um tempo de ascensão do hidrograma que varia entre prováveis 2 aos 5 minutos. Este cenário, entretanto, parece ser um tanto conservador, uma vez que para chegar em 20 minutos na UHE Canastra a onda de cheia desenvolveria uma celeridade média da ordem de 7 m/s ao longo do vale.

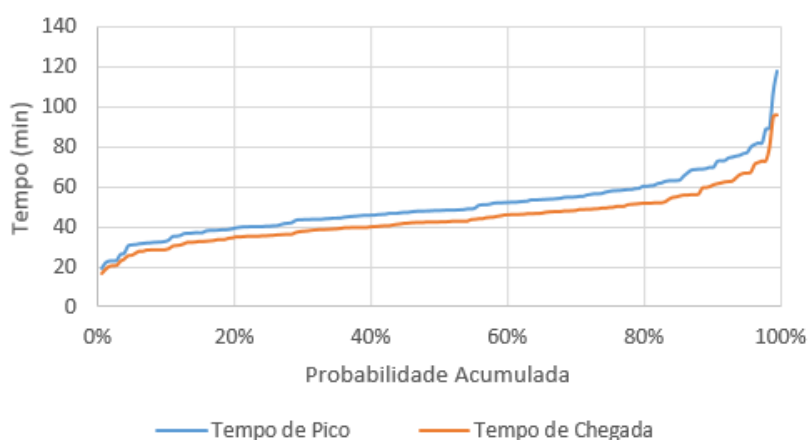


Figura 99 – Probabilidades acumuladas de tempo de chegada e de pico para Seção 07

5.2 RESULTADOS PARA A BARRAGEM LOMBA DO SABÃO

Os resultados para a Barragem Lomba do Sabão são aqui apresentados seguindo os tópicos discutidos no capítulo de Material e Métodos, sendo dividido em (i) estudo conjunto das seções e; (ii) impactos da onda de cheia.

5.2.1 ESTUDO CONJUNTO DAS SEÇÕES

Este item visa identificar alguns pontos para o vale de jusante da barragem Lomba do Sabão: (i) como a modificação do coeficiente de Manning influencia parâmetros como vazão de pico, tempo de pico, velocidade máxima e profundidade máxima em algumas seções de controle; (ii) como a modificação na brecha da barragem influencia parâmetros como vazão de pico, tempo de pico, velocidade máxima e profundidade máxima em algumas seções de controle e; (iii) como modificações no MDE impactam nestes parâmetros de avaliação.

Avaliando-se inicialmente como as incertezas das condições de contorno consideradas impactam na vazão de pico, pode-se observar que as perturbações realizadas no coeficiente de Manning resultam em coeficientes de variação em ordem crescente para o parâmetro vazão de pico, no sentido de montante para jusante. Isso significa que as modificações nos valores do coeficiente de Manning resultam em variações mais significativas na vazão de pico em seções mais distantes do barramento, de forma que uma variação da ordem de 100% no coeficiente de Manning pode resultar em valores de pico de vazão que variam de 1.000 m³/s à 2.000 m³/s na seção 07. Já as incertezas relativas às configurações da brecha se mostram de grande impacto na determinação da vazão de pico para todas as seções avaliadas, muito embora as incertezas relativas à determinação da topografia de jusante pareçam ser as que mais impactam na vazão de pico para esta área de estudo (Figura 100).

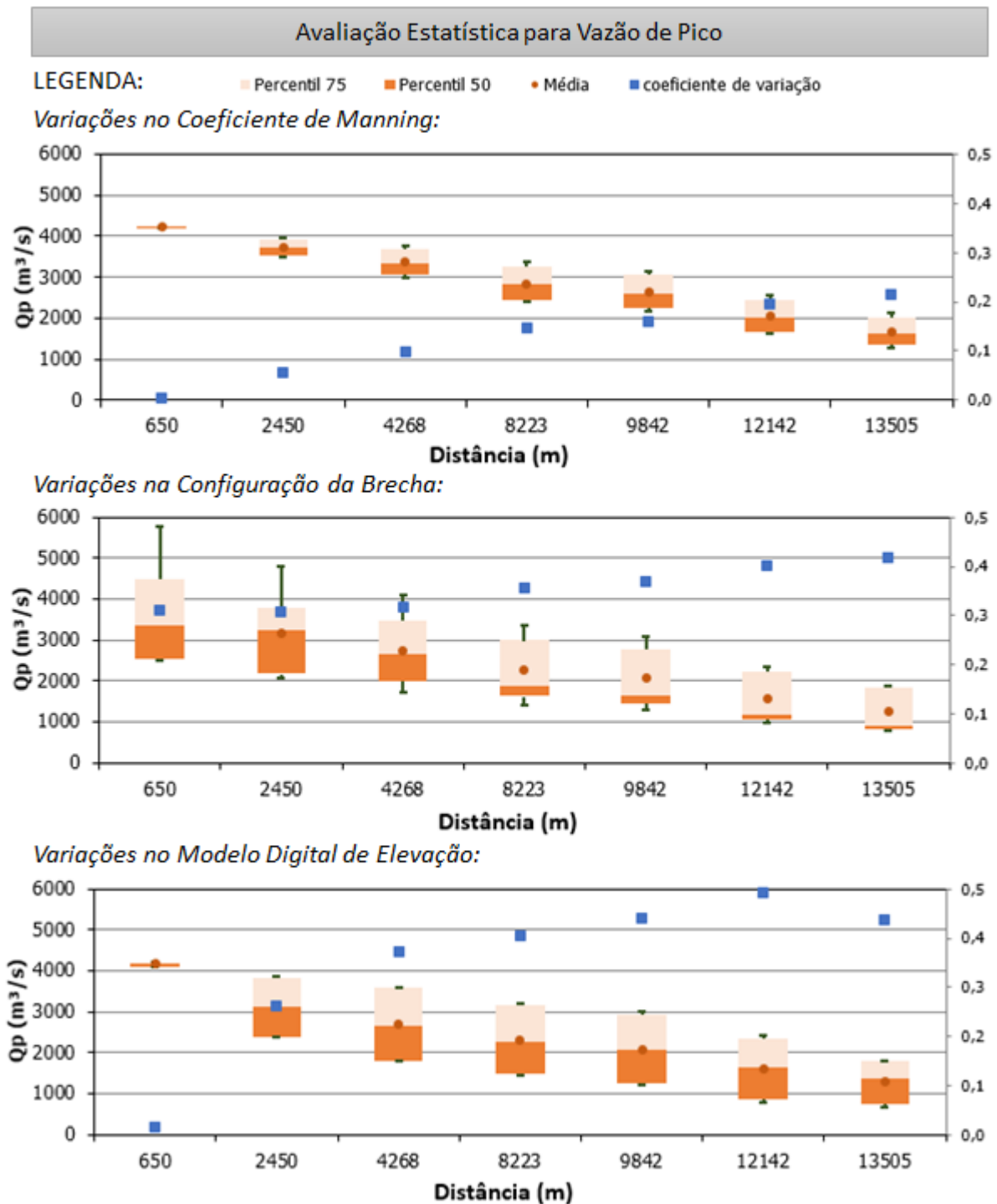


Figura 100 – Variações na vazão de pico

Em se tratando do parâmetro tempo de pico, percebe-se que as incertezas relativas à determinação do coeficiente de Manning impactam menos na determinação deste parâmetro, quando comparadas às incertezas relativas à determinação das configurações de brecha. A configuração de brecha, nesse sentido, evidencia-se como um dado de entrada de extrema importância, cujas incertezas impactam diretamente o tempo de chegada da onda de cheia nas

seções avaliadas. Em relação ao MDE, nota-se que as incertezas associadas resultam em tempos de pico que podem variar de 70 a 140 minutos na última seção avaliada (Figura 101).

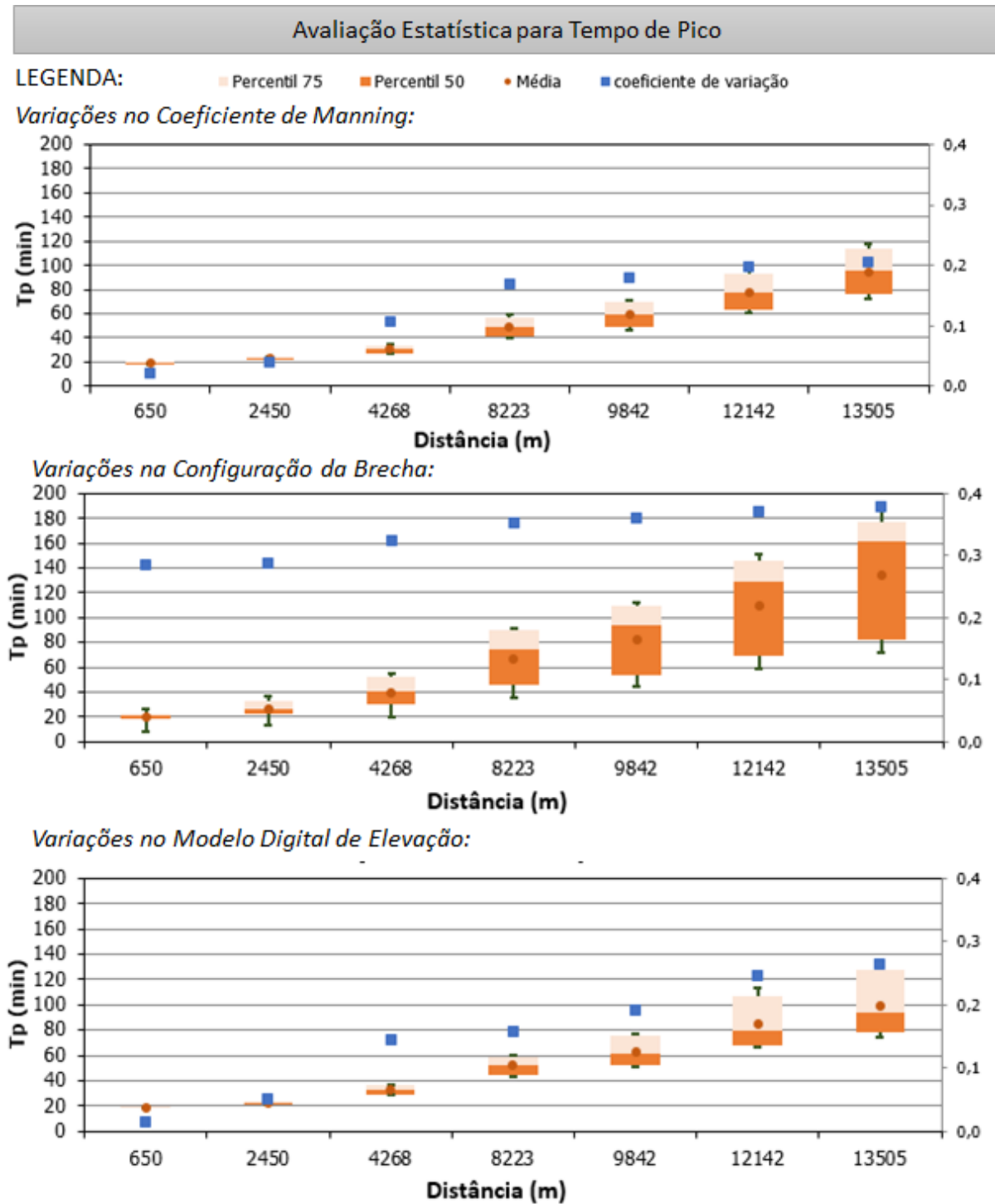


Figura 101 – Variações no tempo de pico

Avaliando-se como as incertezas dos dados de entrada impactam na profundidade máxima para vales de menor declividade, percebe-se que as perturbações referentes ao coeficiente de Manning e da configuração da brecha resultam em coeficientes de variação muito pequenos frente às incertezas relativas às características topográficas do vale de jusante

para a maior parte do trecho estudado. Em contrapartida, para seções próximas à barragem, as incertezas relativas à brecha podem resultar em profundidades máximas com maior variação do que as incertezas relativas à topografia do vale de jusante (Figura 102).

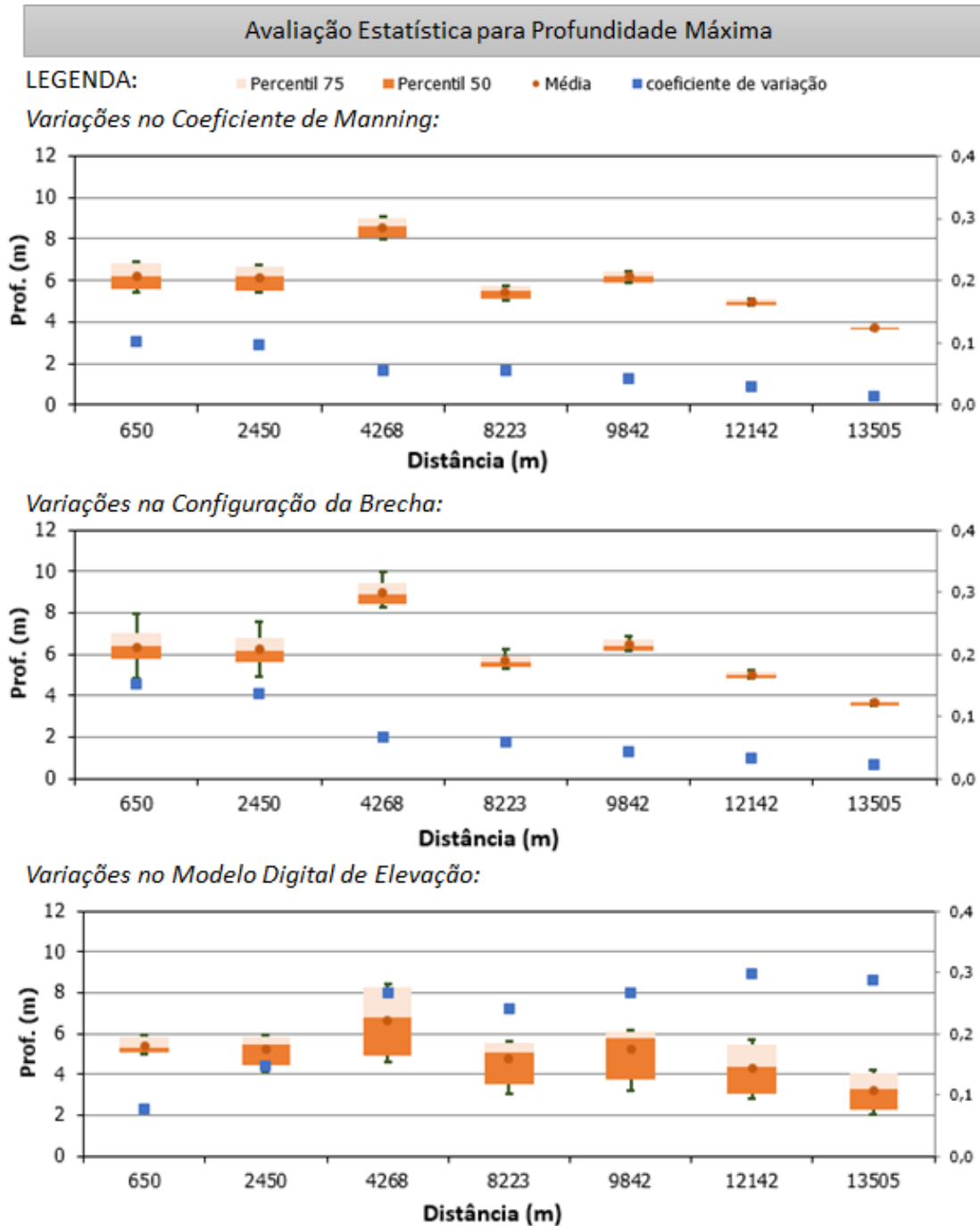


Figura 102 – Variações na Profundidade Máxima

Por fim, as velocidades máximas obtidas parecem sofrer grandes influências para todos os dados de entrada variados, independentemente da localização da seção de avaliação, devido aos altos coeficientes de variação obtidos. Observa-se, entretanto, que as incertezas relativas à configuração da brecha podem ser determinantes para resultar em velocidades máximas muito discrepantes nos pontos avaliados, podendo variar de 2 a 6 m/s na última

seção do trecho. A perturbação do coeficiente de Manning, por outro lado, gera coeficientes de variação crescentes de montante para jusante, enquanto que para a topografia, uma linha de tendência não é claramente observada.

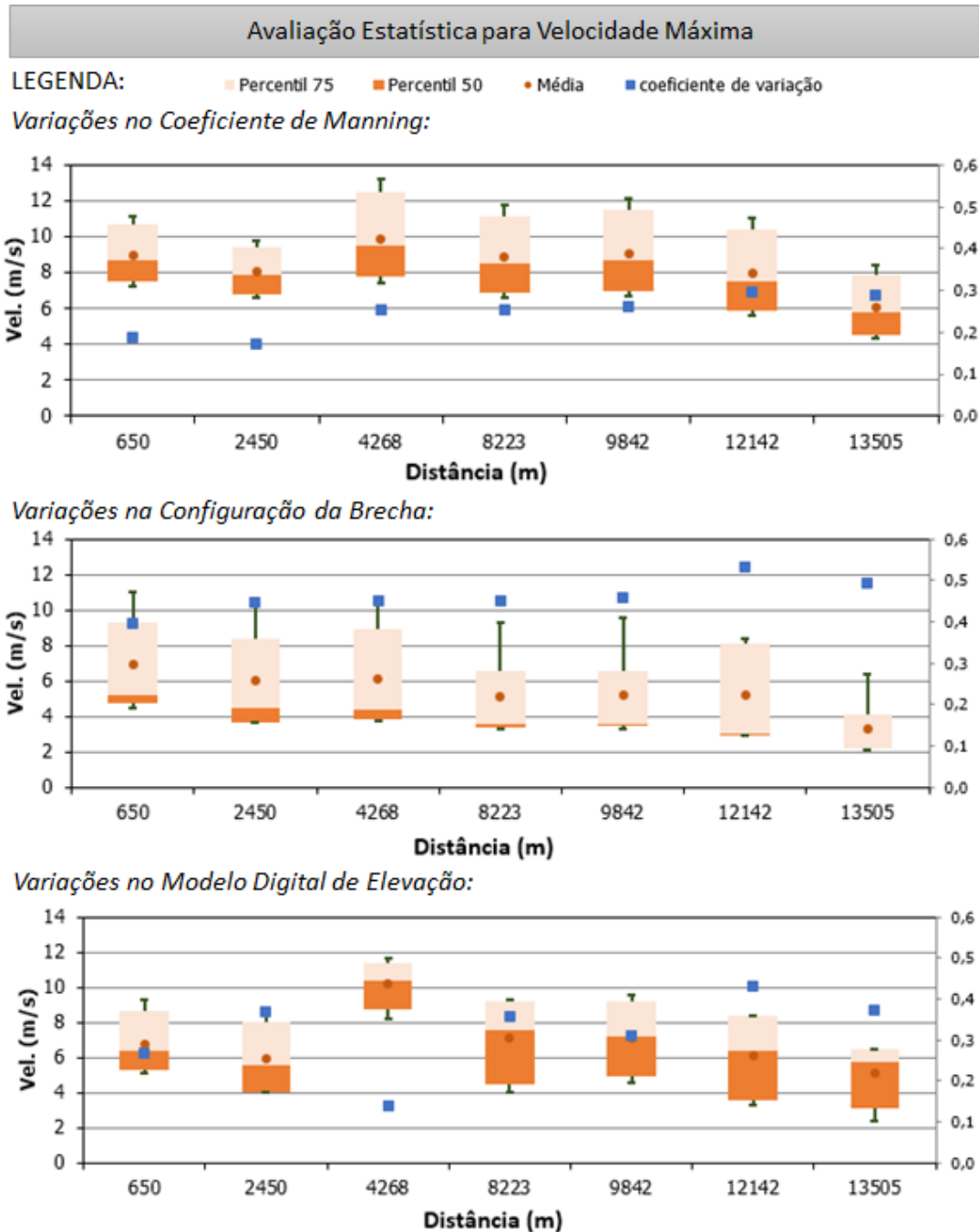


Figura 103 – Variações na Velocidade Máxima

Os diferentes coeficientes de variação obtidos para os parâmetros de avaliação a partir da perturbação dos dados de entrada podem ser visualizados na Figura 104, Figura 105, Figura 106 e Figura 107. Neste sentido observa-se que as incertezas relativas à topografia de jusante impactam de forma mais consistente nos parâmetros vazão de pico e profundidade máxima para esta área de estudo. Enquanto isso, as incertezas relativas à determinação das

configurações da brecha geram resultados mais dispersos para o tempo de pico e para a velocidade máxima. Dos três parâmetros avaliados, as perturbações realizadas no coeficiente de Manning resultaram em variações menores quando comparados aos outros dados de entrada para todos os parâmetros de avaliação.

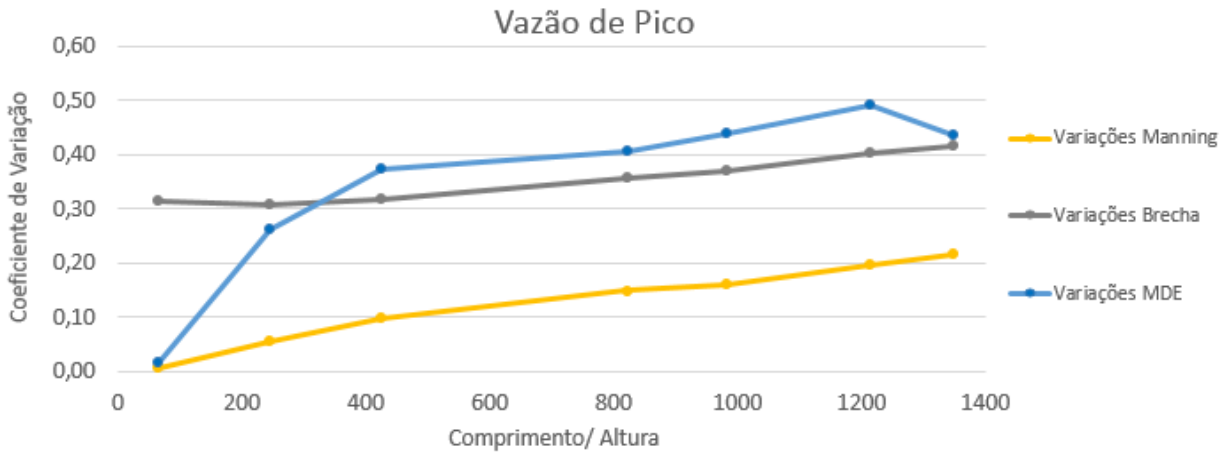


Figura 104 – Coeficiente de variação para vazão de pico

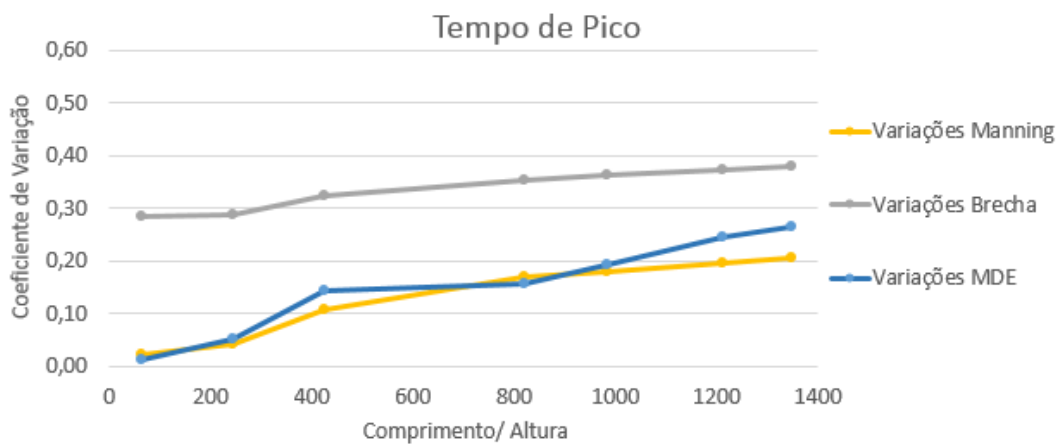


Figura 105 – Coeficiente de variação para tempo de pico,

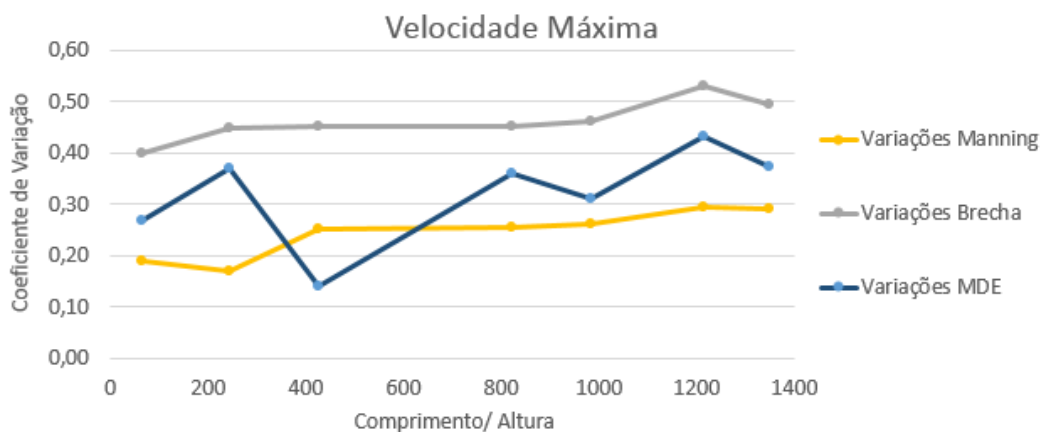


Figura 106 – Coeficiente de variação para velocidade máxima

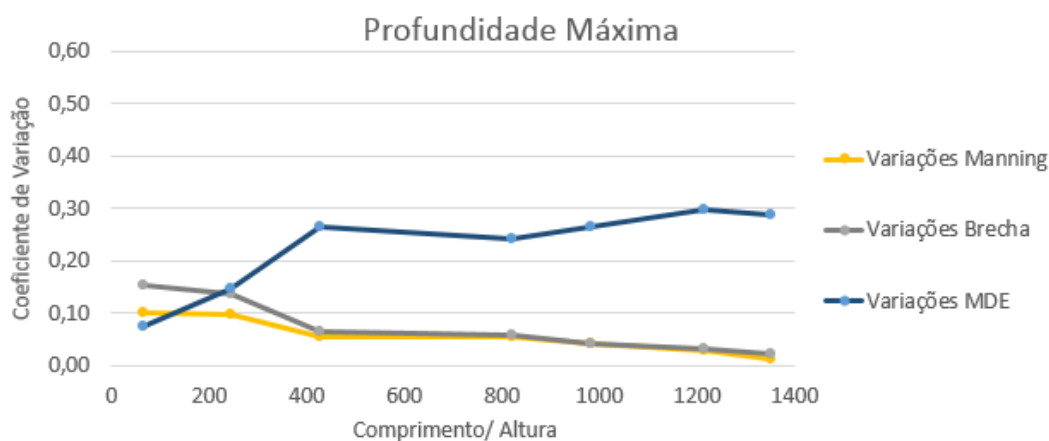


Figura 107 – Coeficiente de variação para profundidade máxima

5.2.2 IMPACTOS DA ONDA DE CHEIA

Caso o rompimento da barragem Lomba do Sabão venha a ocorrer, o potencial de dano para os habitantes da zona de jusante é enorme. Todos os cenários foram simulados considerando que o hipotético rompimento da barragem ocorresse em um período de baixos índices pluviométricos, de modo a manter baixa a cota da lâmina d'água no interior do arroio Dilúvio. Mesmo com espaço livre para onda se deslocar dentro do canal, que em alguns locais chega a apresentar largura da ordem de 30 metros e profundidade da ordem de 5 metros, a onda extravasaria a calha, inundando grande porção da cidade de Porto Alegre, como pode ser visto na Figura 108. Essa figura apresenta uma composição das manchas de inundação em Porto Alegre considerando os cenários de mudança do MDE. Desse modo, pode-se observar que, embora visualmente haja pouca diferença entre o MDE obtido via LiDAR e o MDE obtido via SRTM, no que diz respeito à configuração geral do vale de jusante, localmente um MDE de maior representatividade para vales com pouca declividade aparenta ser muito importante. Os modelos obtidos via SRTM, tanto o bruto como o corrigido, subestimam muito a mancha de inundação obtida no vale de jusante e superestimam a mancha mais para montante.

Ressalta-se, ainda, que essas simulações não consideram alguns aspectos importantes quando se trata de simulações de rompimentos de barragem em grandes centros urbanos: (i) a rede de drenagem da cidade; (ii) o represamento por remanso; (iii) as capacidades de infiltração dos solos e; (iv) a possibilidade de entrada da água nos prédios alagados. Esses podem ser, portanto, fatores limitantes às simulações realizadas.

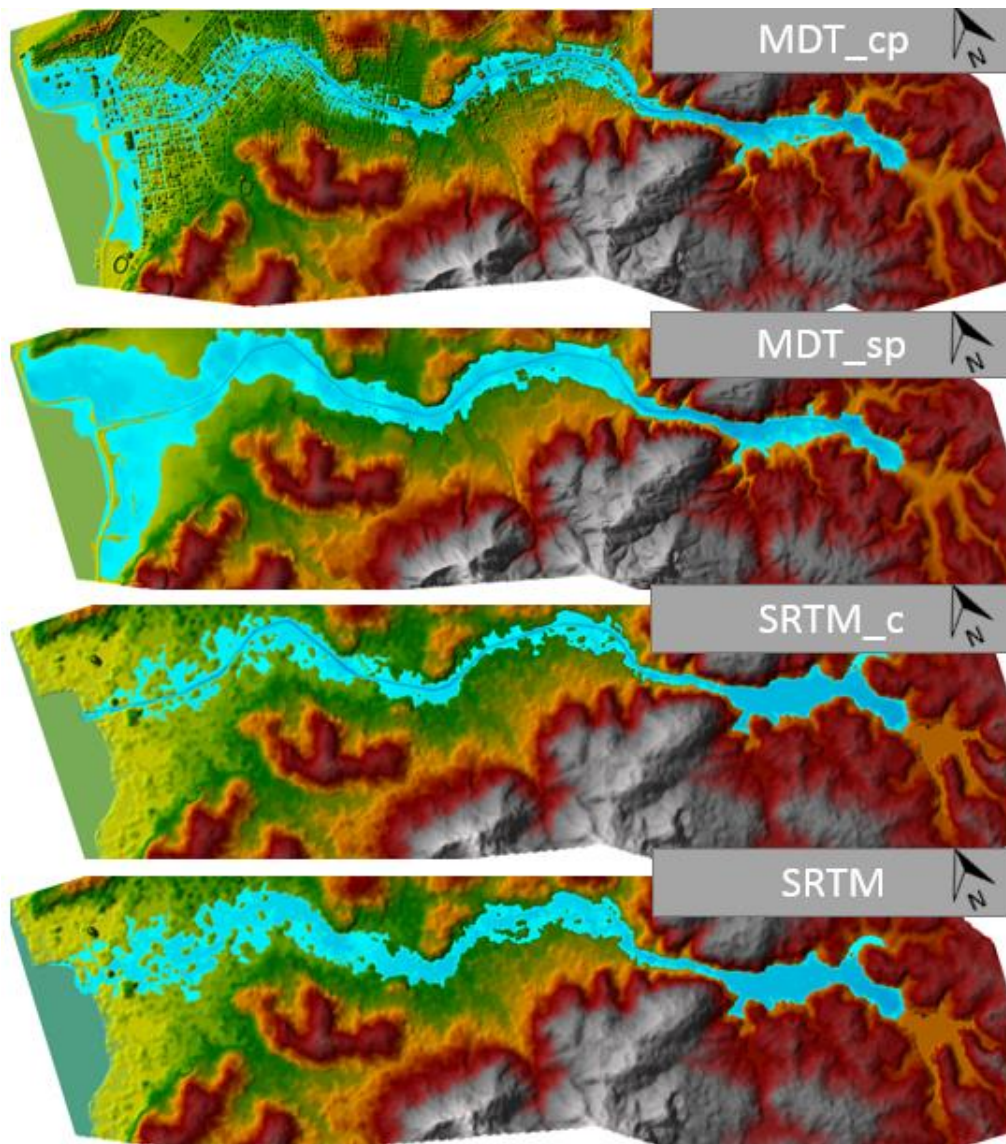


Figura 108 – Manchas de inundação para Porto Alegre

5.3 AVALIAÇÃO CONJUNTA

A fim de se comparar os coeficientes de variação obtidos para duas configurações contrastantes, tanto de barramento como de vale de jusante, este item tem o objetivo de confrontar os resultados obtidos para o vale de jusante da UHE Canastra e para a barragem Lomba do Sabão, para os 4 parâmetros de avaliação estudados. Desse modo, pode-se observar, na Figura 109, o comportamento dos coeficientes de variação para diferentes dados de entrada, considerando-se como parâmetro de avaliação, a vazão de pico. Nesse sentido, observa-se que as incertezas relativas ao MDE perdem em importância para o coeficiente de Manning em vales muito declivosos, ou “rápidos”, quando está sendo analisada a vazão de pico. Para vales menos declivosos, ou “lentos”, entretanto, a constatação quanto a esses dois

parâmetros é oposta. Para este tipo de vale, as incertezas relativas às imprecisões do MDE impactam mais na vazão de pico do hidrograma do que as incertezas relativas à definição do coeficiente de Manning. Ao mesmo tempo, para vales menos declivosos, as incertezas relativas ao MDE variam mais a vazão de pico resultante do que as incertezas quanto à formação da brecha da barragem.

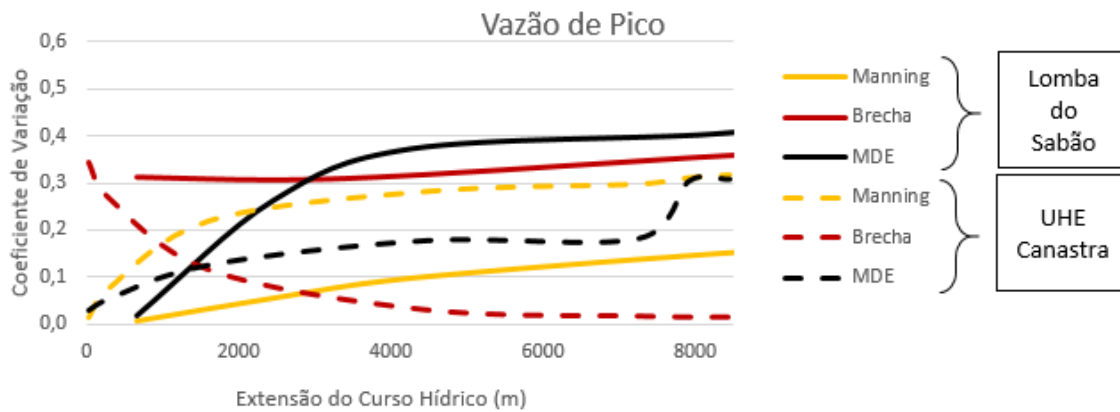


Figura 109 – Coeficientes de variação para vazão de pico

Quanto ao tempo de pico, os coeficientes de variação para ambas áreas de estudo também apresentaram comportamento diferenciado. Em vales mais lentos, espera-se que as configurações de brecha sejam o principal influenciador quanto a este parâmetro, enquanto que para vales mais rápidos esse parâmetro é o de menor importância em seções localizadas a maiores distâncias do barramento. A semelhança encontrada entre as duas áreas de estudo, quanto ao tempo de pico, se refere ao aumento do coeficiente de variação relativo ao coeficiente de Manning no sentido montante jusante, mesmo que para vales mais lentos este parâmetro tenha maior influência na determinação do tempo de pico do que em vales mais rápidos. Outro comportamento semelhante é observado quanto às incertezas relativas ao MDE, que não alteraram os tempos de pico tão significativamente quanto se esperava para vales pouco declivosos. Estas informações são visualizadas na Figura 110.

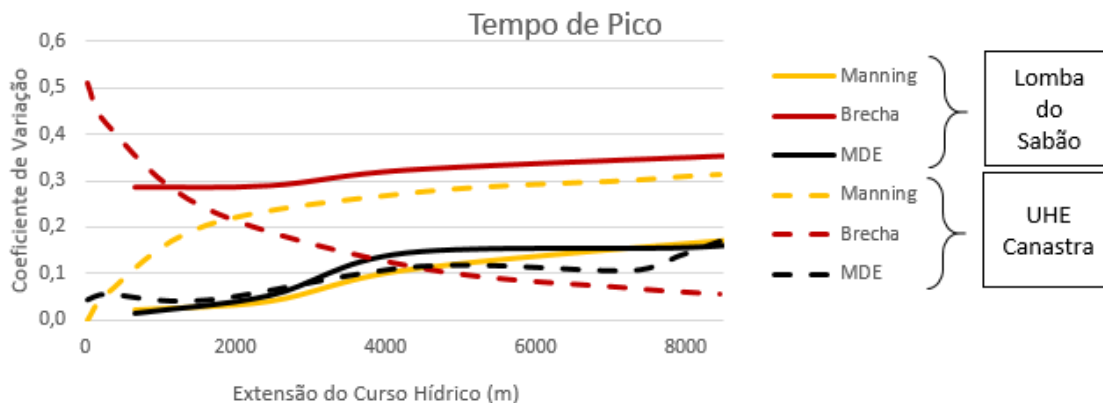


Figura 110 – Coeficientes de variação para tempo de pico

A velocidade máxima também apresentou comportamentos distintos para ambos os vales de inundação estudados. Chama a atenção o fato de que os parâmetros relativos à brecha para vales rápidos apresentam coeficientes de variação perto de zero para seções mais distantes do barramento ao passo que para vales lentos, as diferentes configurações de brecha aplicadas à barragem são a principal fonte de incerteza quanto às velocidades máximas, sendo superiores inclusive às incertezas relativas ao coeficiente de Manning. As incertezas relativas ao coeficiente de Manning, por sua vez, apresentam impacto relativamente de igual magnitude para ambos os tipos de vale, ao passo que as variações impostas ao MDE parecem ter seu coeficiente de variação crescente no sentido montante jusante, independentemente do tipo de vale, mas sem apresentar clara linha de tendência.

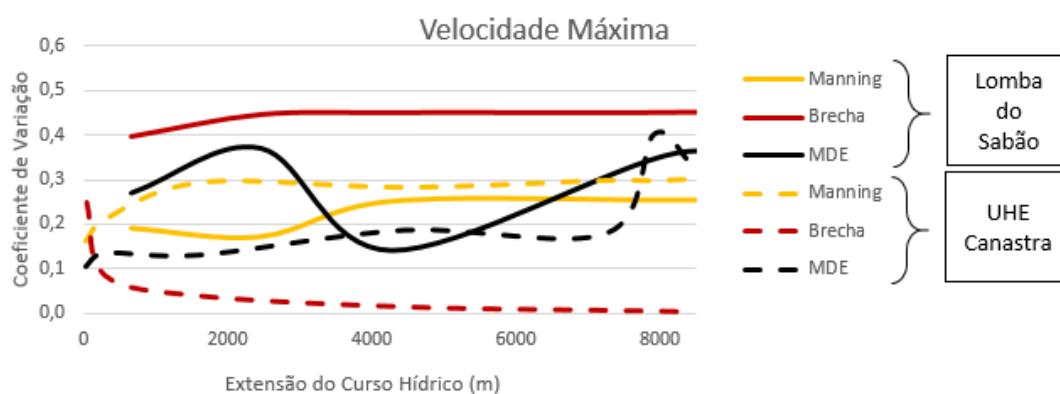


Figura 111 – Coeficientes de variação para velocidade máxima

Dos quatro parâmetros de avaliação estudados no âmbito deste trabalho, destacam-se os coeficientes de variações obtidos a partir da perturbação dos dados de entrada para a profundidade máxima. Independentemente do tipo de vale, pode-se observar que no âmbito das incertezas do coeficiente de Manning e das configurações de brecha, a profundidade máxima parece não ser tão afetada em seções distantes da barragem, uma vez que para seções a mais de 4 km são esperados coeficiente de variações menores que 0,1 para vales lentos, e coeficientes de variação muito próximos da nulidade em vales mais rápidos. No quesito da profundidade máxima, as incertezas relativas à topografia de jusante, representada pela perturbação no MDE, se apresentam mais importantes para seções distantes a mais de 2 km do barramento para vales lentos, ao passo que para vales rápidos esse é o dado de entrada cuja variação gera os mais dispersos resultados.

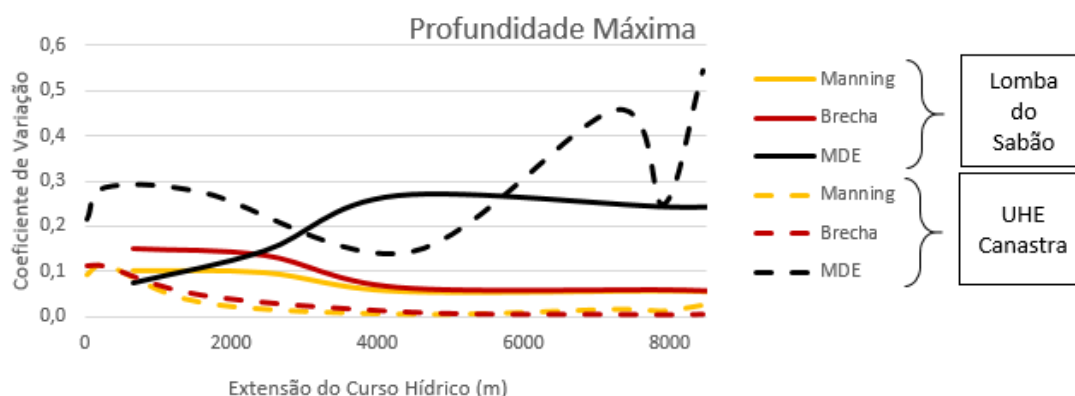


Figura 112 – Coeficientes de variação para profundidade máxima

Por fim, as análises realizadas nesta avaliação conjunta permitem a confecção de uma única tabela, que pode servir como indicativo preliminar de qual é a influência exercida pelos dados de entrada nos resultados gerados em estudos rompimentos de barragens para áreas com características contrastantes. Para tal, considerou-se os resultados obtidos para a topografia de referência, em que as seções localizadas nos primeiros 4 km a jusante da barragem como trechos “Perto da Barragem”, enquanto que as demais seções (localizadas entre 4 e 8,5 km, para a UHE Canastra e 4 a 13,5 km, para a barragem Lomba do Sabão) foram definidas como trecho “Longe da Barragem”. Sendo assim, a média dos coeficientes de variação obtidos em ambos intervalos foi utilizada para caracterizar cada trecho. Assumiu-se que para coeficientes de variação médios inferiores à 10%, a influência exercida pelo dado de entrada é pequena, enquanto que para valores superiores a 30% a influência exercida é alta. Entre 10 e 30% considerou-se uma influência média. Este resumo é apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – Influência que variações nos dados de entrada causam nos resultados

Distância da Barragem	Parâmetro de Avaliação	Vales encaixados e declivosos					Vales abertos e de baixa declividade		
		Manning	Brecha	Topografia	Volume	Modelo	Manning	Brecha	Topografia
Perto da barragem (Primeiros 4 Km)	Vazão de pico	Médio	Médio	Baixo	Médio	Médio	Baixo	Alto	Médio
	Tempo de pico	Médio	Alto	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Médio	Baixo
	Profundidade	Médio	Baixo	Médio	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Médio
	Velocidade	Alto	Médio	Médio	Baixo	Alto	Médio	Alto	Médio
Longe da barragem (4 a 12 Km)	Vazão de pico	Alto	Baixo	Alto	Alto	Médio	Médio	Alto	Alto
	Tempo de pico	Alto	Baixo	Médio	Baixo	Médio	Médio	Alto	Médio
	Profundidade	Baixo	Baixo	Alto	Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Médio
	Velocidade	Alto	Baixo	Alto	Médio	Alto	Médio	Alto	Alto

*Baixo < 10%, Médio: 10% - 30%, Alto > 30%,

Fazendo a correlação cruzada entre os dois tipos de áreas estudadas chega-se à conclusão que em seções localizadas a maiores distâncias do local do barramento as incertezas associadas à determinação da profundidade máxima têm origens iguais, independentemente se o vale se apresente com grandes ou pequenas declividades. Neste

sentido, para essas condições, as incertezas quanto à correta determinação da topografia do vale de jusante são as que mais alteram esse parâmetro de avaliação.

Assim, quando são analisadas as respostas obtidas para seções distantes do barramento, nota-se que a configuração do vale de jusante tem papel muito importante na distribuição das incertezas. Enquanto que, para vales rápidos, a vazão e o tempo de pico são altamente relacionados à determinação do coeficiente de Manning, para vales lentos esses parâmetros estão altamente relacionados à formação da brecha.

Ainda, a velocidade máxima vales lentos sofre grande influência das configurações da brecha, enquanto que para vales rápidos, diferentes configurações de brecha resultam em valores de velocidade máxima muito similares a jusante.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma avaliação de fontes de incerteza em simulações de onda de cheia de rompimentos de barragens para áreas de características contrastantes: uma em vale encaixado e altas declividades e outro com vale aberto e baixas declividades. A determinação destas incertezas foi realizada a partir da avaliação de sensibilidade do módulo bidimensional do modelo hidrodinâmico HEC-RAS 5.03, em que se perturbou dados de entrada (coeficiente de Manning, configurações da brecha, volume do reservatório, topografia do vale de jusante e tipo de equacionamento considerado) e se observou como essa perturbação alterava algumas variáveis hidráulicas de interesse, como vazão de pico, tempo de pico, profundidade máxima e velocidade máxima em diferentes seções localizadas ao longo dos cursos hídricos. Essas variáveis hidráulicas foram chamadas, no âmbito deste trabalho, de “parâmetros de avaliação”.

O mapeamento da importância dessas incertezas para diferentes áreas é muito importante em estudos de rompimento de barragens, uma vez que estudos desta natureza dificilmente contam com grandes exatidões na determinação de dados de entrada.

Este trabalho contou com 182 simulações hidrodinâmicas realizadas para a área de estudo considerada como “rápida”, referente à barragem da UHE Canastra (que tem declividade média da ordem de 40m/km) e 13 simulações realizadas para a área de estudo lenta (que conta com declividades médias da ordem de 4m/km), referente à barragem da Lomba do Sabão. Além disso, se concentrou em duas grandes áreas de influência: seções transversais localizadas próximas à barragem e seções transversais mais distantes das barragens. Sendo assim, percebeu-se que para seções mais próximas de barragens que estão à

beira de colapsos, as incertezas de alguns dados de entrada exercem igual influência em alguns parâmetros de avaliação, independentemente do tipo de vale.

Observou-se que para vales encaixados e declivosos, as configurações da brecha estão altamente correlacionadas com o tempo de pico para locais próximos ao barramento, enquanto que para locais mais distantes, alterações neste dado de entrada não são tão relevantes. Em contrapartida, incertezas nas configurações da brecha da barragem são as que mais impactam na onda de cheia para vales pouco declivosos e abertos, tanto para locais próximos da barragem quanto para locais distantes, principalmente quanto à vazão de pico.

A vazão de pico é consideravelmente influenciada também pelo tipo de equacionamento considerado. Perebeu-se que é importante usar o modelo hidrodinâmico completo (Equações de Saint Venant 2D) em estudos de rompimento de barragem, uma vez que a aplicação do Modelo Difusivo 2D superestimam as vazões de pico.

A incerteza relativa à determinação do coeficiente de Manning, por outro lado, tem alta relevância em seções distantes de barramentos localizados em vales encaixados e declivosos para a vazão de pico e tempo de pico. Ao mesmo tempo, variações do coeficiente de Manning exercem influência classificada como média em locais perto da barragem para vales encaixados e declivosos. Para vales abertos e de baixa declividade, este dado de entrada não é tão relevante quanto às incertezas na determinação da brecha da barragem.

As diferentes configurações topográficas aplicadas para caracterizar o vale rápido e declivoso permitiram concluir que é possível utilizar MDEs de baixa resolução para estimar o tempo de pico sem altos erros agregados, para vales destas características. Isto quer dizer que a incerteza associada à determinação da topografia é menos importante nos resultados finais do que a incerteza associada à determinação de outros dados de entrada, como configurações de brecha (para locais próximos ao barramento) e de coeficiente de Manning (para locais longe do barramento). Então para realizar estimativas rápidas do tempo de pico de uma onda de cheia gerada por rompimento de barragem, poderiam ser utilizados MDEs globais disponíveis para caracterizar a topografia, desde que sejam aplicando fatores para corrigir a incerteza dos resultados de saída. Essa correção, no âmbito deste trabalho, se restringe a subestimativas e superestimativas de outros dados de entrada marcados como “ALTO” ou “MODERADO” na Tabela 20. Por outro lado, a utilização de MDEs globais de baixa precisão para caracterizar outras variáveis, como vazão de pico, profundidade máxima e velocidade máxima, deve ser realizado com parcimônia.

A alternância entre superestimativas e subestimativas de um dado de entrada para compensar as incertezas de outro está embasada no fato de que, para a barragem da UHE

Canastra, os parâmetros de avaliação obtidos a partir da utilização de curvas de nível locais oriundas de aere restituição fotogramétrica realizada numa escala de 1:30.000 (MDE_AEROGEO) também foram passíveis de obtenção a partir da utilização de MDEs globais com resolução de 30 metros processados, para todos os parâmetros de avaliação considerados, como o SRTM_1M e o AW3D_1M.

Da mesma forma, comparando-se o MDE mais impreciso utilizado (MDE_EXERC) com o MDE considerado de maior precisão local (SRTM_1M_CALHA_VANT, por ter sido gerado a partir da utilização de VANTs), notou-se que para alguns casos foi possível compensar as incertezas relativas à topografia do MDE_EXERC a partir da adoção de uma superestimativa em 40% do volume do reservatório, principalmente para a vazão e o tempo de pico. Sendo assim, topografias precisas em locais de interesse são importantes para se mapear com exatidão a mancha de inundação local.

Por fim, incertezas na determinação da curva cota-volume são as mais importantes de serem consideradas principalmente na avaliação da vazão de pico, para vales rápidos e declivosos em seções distantes. Para outros parâmetros, como profundidade máxima e velocidade máxima, a correta definição do volume do reservatório tem relevância moderada, sendo os mesmos mais vinculados ao dado de entrada topografia (para ambos) e coeficiente de Manning (apenas para a velocidade).

Outro resultado interessante obtido neste trabalho foi o teste relativo à potencial contribuição de seções topográficas obtidas via Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) em estudos relativos a rompimentos de barragem sem que haja a necessidade de levantamento de todo o vale de inundação. A comparação entre os resultados oriundos a partir da utilização do modelo adaptado com seções levantadas com VANTs mostrou que é altamente viável e recomendável a utilização desta técnica, pois a caracterização mais exata de algumas seções de interesse pode ser determinante para que uma ou outra residência seja ou não incluída no Plano de Ação Emergencial da barragem. As mudanças em termos de vazão de pico e tempo de pico não diferem quando se utiliza o MDE com calha sem inserção das seções. Entretanto, localmente, pode-se estimar muito mais precisamente profundidades máximas, velocidades máximas e extensão da lâmina d'água.

Por fim, a caracterização da onda de cheia para as duas áreas de estudo permitiu obter informações importantes relativas ao potencial impacto de ocasionar danos a vidas humanas. Desse modo, para o rompimento hipotético da barragem Lomba do Sabão, observou-se que existe um enorme potencial de perdas de vidas humanas na cidade de Porto Alegre, que seria diretamente impactada pela onda de cheia (com vazão de pico entre 1.000 m³/s e 2.000 m³/s e

tempo de pico entre 70 e 90 minutos no exutório do Arroio Dilúvio), mesmo considerando-se o Arroio Dilúvio parcialmente vazio. O extravasamento do canal, em qualquer um destes cenários, seria praticamente certo, uma vez que em cheias raras foram observadas vazões da ordem de 250 m³/s no canal (Porto Alegre, 2012). Em relação à UHE Canastra, ressalta-se que um hipotético rompimento poderia gerar onda de cheia que poderia chegar à casa de força da UHE Canastra com uma vazão de pico que variaria entre 100 m³/s e 1.200 m³/s e com um tempo de pico variando entre 20 e 120 minutos. Aconselhar-se-ia, ainda, para fins de elaboração de futuros PAEs nesta área a adoção de um pico de onda de cheia da ordem de 600 m³/s e um tempo de chegada da ordem de 20 minutos.

Sugere-se, para trabalhos futuros, a utilização dos dados e informações geradas neste trabalho para inferir coeficientes de segurança a serem aplicados em estudos de rompimento de barragens, quando não for possível realizar avaliações de sensibilidade nos modelos, por qualquer motivo. Não foi realizado neste estudo uma avaliação de como a alteração de diferentes dados de entrada impacta na extensão da mancha de inundação, ou como alterações no volume e no equacionamento considerado impactam os resultados para bacias lentas e abertas. A identificação destas influências são, portanto, indicação para trabalhos futuros.

Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos a partir do estudo de dois barramentos. Portanto, a interpretação de como os dados de entrada se relacionam com os resultados das simulações é válida apenas para barragens e bacias de jusante com características similares aos dois estudos de caso. Esta é uma das limitações deste trabalho, sendo recomendado, portanto, a replicação da metodologia aqui apresentada para áreas de estudos diferentes, a fim de averiguar se o comportamento aqui encontrado se mantém para um universo maior de barramentos.

Avalia-se, por fim, que é possível realizar rápidos estudos de rompimento de barragens com dados de entrada sem total exatidão, desde que os mesmos sejam superestimados em favor da segurança. Recomenda-se também a utilização da metodologia delineada neste trabalho como referência inicial em análises de sensibilidade a serem aplicadas em estudos de rompimento de barragens que estejam localizadas em vales similares aos estudados neste trabalho. Principalmente no sentido de aplicação de fatores de multiplicação nos dados de entrada definidos e na avaliação de como essas perturbações alteram os resultados obtidos através das simulações.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERMAN, C. T.; BRUNNER, G. W. *Dam Failure Using Hec-Ras and GeoRAS*. In: III Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference. USA. 2006.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (ANA). *Relatório de Segurança de Barragens 2012/2013. Superintendência de Regulação (SRE)*. Brasília, DF. 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (ANA) b. *Relatório de Segurança de Barragens 2014. Superintendência de Regulação (SRE)*. Brasília, DF. 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (ANA) c. *Manual do Empreendedor Volume V: Guia Para a Elaboração de Projetos de Barragens*. Brasília. DF. 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (ANA). *Relatório de Segurança de Barragens 2015. Superintendência de Regulação (SRE)*. Brasília, DF. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (ANA) b. *Agência Nacional de Água. Manual do Empreendedor Sobre Segurança de Barragens: Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação Emergencial – PAE*. DF. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Capacidade de Geração do Brasil*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 02/02/2016.
- AGISOFT. *Agisoft Photoscan User Manual. Professional Edition, Version 1.2*. Agisoft LLC. 2016.
- AGUIAR, O. P. D. *Contribuição ao Estudo do Índice de Segurança de Barragens – ISB*. 2014 Dissertação. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2014.
- ALCÂNTARA, E.; NOVO, E.; STECH, J.; ASSIREU, A.; NASCIMENTO, R.; *Integrating historical topographic maps and SRTM data to derive the bathymetry of a tropical reservoir*. Journal of Hydrology. 2010.
- ALMEIDA, A. B.; FRANCO, A. B. *Modeling of dam-break flow*. In: Computer modeling of free-surface and pressurized flows. Kluwer Academic Publishers. Holanda. 1994.
- ALMEIDA, A. R. R.; FREITAS, J. C. P.; MACHADO, M. M. M. *Topografia: Fundamentos, Teoria e Práticas*. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/145284581/TOPOGRAFIA-Fundamentos-Teoria-e-Pratica>> Acesso em: 01.02.2017.

- ALSDORF D. E.; DUNNE T.; MELACK J.; SMITH L.; HESS L. *Diffusion modelling of recessional flow on central Amazonian floodplains*. Geophysical Research Letters. 2005.
- ARAÚJO, F. F. S. *Distribuição da temperatura do ar mensal e anual no estado do rio de janeiro baseada em modelos lienares*. 2010. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Seropédica. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE TUBOS DE CONCRETO (ABTC). *História da Pesquisa dos Valores do Coeficiente de Manning*. 2004. Disponível em: < http://www.abtc.com.br/site/download/historia_coeficiente_Manning.pdf> Acesso em: 21.02.2017
- BAPTISTA, M.; LARA, M. *Fundamentos de Engenharia Hidráulica*. Belo Horizonte. Ed. UFMG, 2014.
- BARBOSA, J. M. C.; PINTO, M. R.; CASTRO, M. A. H. *Erosão e assoreamento em reservatórios*. XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal. 2014.
- BARROS, R. S.; CRUZ, C. B. D.; REIS, R. B.; JUNIOR, N. A. C. *Avaliação do modelo digital de elevação do SRTM na ortorretificação de imagens Landsat 7 – Área de Aplicação: Angra dos Reis – RJ*. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia. 2005.
- BOGGIONE, G. A.; SILVA, M. V. A.; JUNIOR, N. R. C.; TELES, T. L.; NAZARENO, N. R. X. *Definição da escala em imagens de sensoriamento remoto: uma abordagem alternativa*. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Natal. 2009.
- BOLOGNESI, M.; FURINI, A.; RUSSO, V.; PELLEGRINELLI, A.; RUSSO, P. *Testing the low cost rps Potential in 3D cultural Heritage Reconstruction*. The international archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015
- BRANDALIZE, A. A. *Perfilamento a LASER: comparação com métodos Fotogramétricos*. In: XX Congresso Brasileiro de Cartografia. Rio Grande do Sul. 2001.
- BRASIL. Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010. *Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984*. Diário Oficial da União, Brasília, 20 set. 2010.
- BRASIL. Projeto de Lei Nº 1.181, de 03 de junho de 2003. *Estabelece diretrizes para a verificação da segurança de barragens de cursos de água para quaisquer fins e para aterros de contenção de resíduos líquidos industriais*. Brasília. 2003.

- BRASIL. Projeto de Lei Nº 436, de 14 de março de 2007. *Torna obrigatória a contratação de seguro contra o rompimento de barragens*. Brasília. 2007.
- BRISBANE. CITY COUNCIL INFORMATION. *Manning Roughness*. Disponível em <https://www.brisbane.qld.gov.au/sites/default/files/ncd_appendixc_part3.pdf>. Acesso em: 01.02.2017
- CARVALHO, E. Segurança de Barragens e Avaliação de Riscos. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu. PR. 2015.
- CHANG, H. C.; GE, X. L. L. Assessment of SRTM, ACE2 and ASTER GDEM using RTK GPS. In: School of Surveying and Spatial Information Systems. Austrália. 2010.
- CHAUHAN, S. S.; BOWLES, D. S.; ANDERSON, L. R. *Do Current Breach Parameter Estimation Techniques Provide Reasonable Estimates for Use in Breach Modeling*. In: Proceedings of the annual conference of the association of state dam safety officials. Phoenix, EUA. 2004.
- COLLE, G. A. *Metodologias de Análise de Risco para Classificação de Barragens Segundo a Segurança*. 2008. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2008.
- COLLISCHONN, B.; CLARKE, R. T. *Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto*. RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 2016.
- COLLISCHONN, W.; DORNELES, F. *Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais*. Porto Alegre. Ed. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). 2013.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. *Simulação hidrológica de grandes bacias*. RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 2001.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. *Análise do Rompimento hipotético da barragem de Ernestina*. RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 1997.
- COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (CBDB). *A História das Barragens no Brasil: Séculos XIX, XX e XXI*. Ed. Corrado Piasentin. Rio de Janeiro. 2011.
- COMPANHIA ESTADUAL DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CEEE). *Plano de Uso e Ocupação do Solo no Entorno do Reservatório da UHE Canastra*. Porto Alegre. 2011.
- CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH). Resolução nº143 de 10 de Julho de 2012. *Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010*. Brasília. 2012.

DAM FAILURE. In: Wikipédia. Disponível em: <
https://en.wikipedia.org/wiki/Dam_failure>. Acesso em 23.03.2017

DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES (DNR). *Guidelines for Dam Breach Analysis*. Disponível em:
 <<http://water.state.co.us/DWRIPub/Documents/GuidelinesForDamBreachAnalysis.pdf>>
 Acesso em: 31.07.2016.

DIGITAL GLOBE. *The DigitalGlobe Constellation*. Disponível em < https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/223/Constellation_brochure_forWeb.pdf>. Acesso em 01.02.2017

EGG, G. C. *Geração de Modelos Digitais de Superfície Compostos Utilizando Imagens do Sensor PRISM/ALOS*. 2012. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2012.

ELETROBRÁS. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Rio de Janeiro. 2003.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Plano Nacional de Energia 2030*. Ministério de Minas e Energia. Brasília. DF. 2007.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). *Software ArcGis 10.2*. Disponível em < <http://www.esri.com/arcgis/about-arcgis>>. Acesso em 10/4/2017.

FAN, F. M.; PONTES, M. R. P.; PAIVA, D. C. R.; COLLISCHONN, W. *Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant*. RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 2014.

FARR, T. G.; ROSEN P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF D. *The Shuttle Radar Topography Mission*. Reviews of Geophysics 45(2). 2007.

FEDERAL GUIDELINES FOR DAM SAFETY (FERC). *Selecting and Accomodating Inflow Design Floods for Dams*. USA. 2004.

FEDERAL GUIDELINES FOR DAM SAFETY (FERC). *Dam Breach Analysis*. USA. 2014.

FERREIRA, A. L. M. *Comparação de métodos de cálculo de ruptura de uma barragem hipotética*. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu. PR. 2015

FILHO, C. R. R. C.; ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F. *Determinação dos Polinômios Cota x Área x Volume utilizando a sonda Accoustic Doppler Profiler (ADP) no Reservatório de Barra Bonita – SP*. Convênio FIPAI/AES. 2003.

FISCHENICH, C. *Robert Manning: A historical perspective*. 2000. Disponível em: <
<http://acwc.sdp.sirsi.net/client/search/asset/1004285>> Acesso em: 12.10.2016

- FLEISCHMANN, A. S.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. *Desenvolvimento do módulo de reservatórios do modelo hidrológico MGB-IPH*. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – SBRH. Brasília. 2015.
- FLENER, C.; VAAJ, M.; JAAKKOLA, A. *Seamless mapping of river channels at high resolution using mobile LiDAR and UAV-Photography*. Remote Sensing Journal. 2013.
- GALLEGOS, A.H.; SCHUBERT, J.E.; SANDERS, B.F. *Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: A case study of Baldwin Hills, California*. Advances in Water Resources. 2009.
- GALINDO, J. R. F. *Análise da reconstrução 3D a partir de um par estereoscópico HR-CDD/CBERS-2 Usando dois modelos matemáticos*. 2008. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual de São Paulo. Presidente Prudente. 2008.
- GEODRONES. *Comparativo entre topografia tradicional e topografia com Drones e VANTs*. Disponível em: <<http://geodrones.com.br/blog/topografia-tradicional-ou-topografia-com-o-uso-de-drones/>>. Acesso em: 20.3.2016.
- GERMAN AEROSPACE CENTER (DLR). *TANDEM-X: DEM Products Specification Document*. Disponível em: <https://tandemx-science.dlr.de/pdfs/TD-GS-PS-0021_DEM-Product-Specification_v3.1.pdf>. Acesso em: 24.12.2016.
- GUPTA, R.P.; BANAJERI, S. *Monitoring of reservoir volume using landsat data*. Journal of Hydrology. 1985.
- HASENACK, H.; WEBER, E. *Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000*. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). ISBN 978-85-63483-00-5 (livreto) e ISBN 978-85-63843-01-2 (DVD).
- HOLMES, R. A. *Advanced sensor systems: Thematic mapper and beyond*. Remote Sensing of Environment Journal. 1984
- HUNTER, G. J.; GOODCHILD, M. F. *Modeling the uncertainty of vector data in geographic information systems*. National Center for Geographic Information & Analysis. USA. 1995.
- HUOKUNA, M. *Determination of the Dam Breach Hydrographs for the Kyrkösjärvi Dam Break Hazard Analysis*. RESCDAM. Finlândia. 2001.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS (IBAMA). *Impactos Ambientais Decorrentes do Desastre Envolvendo o Rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais*. 2015.

- INTERNATIONAL COMISSION ON LARGE DAMS. *Register of Dams: General Synthesis*. Disponível em: <http://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp>. Acesso em: 30.12.2016
- JAGT, B. V.; ALSDORF, D. *The Potential Uses of UAV-Based Remote Sensing in Great Lakes*. The Ohio State University. 2014.
- JENSEN, J. R. *Sensoriamento Remoto do Ambiente – Uma Perspectiva em Recursos Terrestres..* Ed. Parêntese. São Paulo. 2009.
- KALYANAPU, A. J.; BURIAN,S. J; MCPHERSON, T. N. *Effect of land use-based surface roughness on hydrologic model output*. Journal of Spatial Hydrology. 2009
- KIM, B.; SANDERS, B.F. *Dam-Break Flood Model Uncertainty Assessment: Case Study of Extreme Flooding with Multiple Dam Failures in Gangneung, South Korea*. Journal of hydraulic engineering. 2016
- KUHLKAMP, J. F. *Análise do efeito em cascata da propagação da onda de cheia gerada pelo rompimento hipotético de uma das barragens existentes no rio Irani-SC*. 2016. Monografia. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2016.
- LAURIANO, A.W. *Estudo de ruptura da barragem de Funil: Comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS*. 2009. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2009.
- LEITÃO, J. P.; VITRY, M.; SCHEIDEGGER, A.; RIECKERMANN, J. *Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini unmanned aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas*. Hydrology and Earth System Sciences. 2016.
- LIMA, F. N. *Avaliação das probabilidades de falhas em barragens, associadas a eventos de naturezas hidráulicas e hidrológicas: Estudo de caso da PCH Cajuru*. Dissertação. Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2014.
- LINDER, W. *Digital Photogrammetry: Theory and Applications*. Ed. Springer-Verlag. 189p. 2003.
- LIU, Y.; LI, M.; ZHOU, M.; YANG, K.; MAO, L. *Quantitative Analysis of the Waterline Method for Topographical Mapping of Tidal Flats: A Case Study in the Dongsha Sandbank, China*. Journal of Remote Sensing. 2013.
- LOPES, A. U. S. *Aplicação de imagens ASTER e TOPODATA em Estudos de Viabilidade Ferroviária*. In: XIII Curso de Especialização em Geoprocessamento. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.

- LOWE, D. Distinctive Image Features from Scale Invariant Key points. *International Journal of Computer Vision*. 2004.
- LYRA, G. B.; CECILIO, A. R.; ZANETTI, S. S.; LYRA, B. G. *Coefficiente de rugosidade de Manning para o rio Paracatu*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2010.
- MAIZONAVE, C. R. M.; BENDATI, M. M.; WERNER, V. R.; CYBIS, L. F. A.; CARVALHO, E. N. *Avaliação planctônica do reservatório da Lomba do Sabão (Porto Alegre/RS) com ênfase na ocorrência de cianobactérias: implicações para o abastecimento público*. In: XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro. 2005.
- MARTIN, J. L.; MCCUTCHEON, S. C. *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*. Ed. Lewis Publishers. 1998.
- MASCARENHAS, F. C. B. *Modelação matemática de ondas provocadas por rupturas de barragens*. 1990. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1990.
- MCCOOK, D. K. *A Comprehensive discussion of piping and internal erosion failure mechanisms*. In: XXI Annual Conf. of the Association of State Dam Safety Officials, ASDSO, EUA. 2004
- MEDEIROS, A. C. H. C; RAMOS, S.C. *Um novo conceito de segurança de barragens baseado na análise de probabilidade de risco*. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro. 1999
- MENESCAL R. *A Segurança de Barragens e a Gestão de Recursos Hídricos no Brasil*. Ed. ProÁgua. DF. 2005.
- MONTEIRO, S. A. *Metodologia de mapeamento aéreo com fotografias de pequeno formato aplicadas no planejamento e gerenciamento de unidades de conservação*. 2000. Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2000.
- MONTE-MOR, R. C. A. *Mapeamento de Áreas Inundáveis Associadas à Ruptura de Barragens; Estudo de Caso: Barragem de Ninho da Águia - MG*. 2004. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2004.

- NAVARRO, R. P.; BERNAL, C.; MANIEL, P. *Aplicaciones de la cámara gopro pra la toma de datos de arquitectura*. In: XII Congreso Internacional de Expresión Gráfica aplicada a la edificación. Perú. 2014.
- OLIVEIRA, M. V. N.; FIGUEIREDO, E. O.; PAPA, D. A. *Uso do LIDAR como Ferramenta para o Manejo de Precisão em Florestas Tropicais*. EMBRAPA. DF. 2014.
- PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. *Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach*. Journal of Hydrology. 2011.
- PALERMO, R. A.; LEITE, T. C. *Integração de levantamento fotogramétrico aéreo com uso de VANT e levantamento fotogramétrico terrestre para o mapeamento tridimensional das ruínas de São Miguel das Missões*. Monografia. Faculdade de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2016.
- PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; SILVA, G. G. *Radares imageadores (SAR) orbitais: Tendências em sistemas e aplicações*. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. João Pessoa. 2015.
- PEIXOTO, E. B. A.; CENTENO, J. A. *Análise comparativa de resultados altimétricos obtidos por perfilamento a LASER e topografia convencional*. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife. 2010.
- POLI, D.; REMONDINO, F.; ANGIULI, E.; AGUGIARO, G. *Radiometric and geometric evaluation of Geoeye1, Worldview-2 and Pléiades 1A Stereo Images for 3D information extraction*. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. *Programa de Revitalização da Bacia do Arroio Dilúvio – Plano de Ação*. 2012. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/arroiodiluvio/plano-de-acao>> Acesso em: 21.2.2017
- QI, H.; MUSTAFA, S. *GIS Based decision support system for dam break flood management under uncertainty with two-dimensional numerical simulations*. Journal of Water Resources Planning and Management. 2012.
- REBERTE, J. C.; MOREIRA, M. F.; PEREIRA, M. A.; BOTELHO, F.; SILVA, J. M.; MOLINA, P. C. *Avaliação da influência da altura de voo de um drone na geração de ortofoto utilizando o software Photoscan*. In: V Simpósio de Pós Graduação do Instituto Federal Sul de Minas. Belo Horizonte. 2016.
- RENDON, S. H.; ASHWORTH, C. E.; SMITH, J. *Dam-Breach analysis and flood inundation Mapping for Lakes Ellsworth and Lawtonka near Lawton, Oklahoma*. USGS. 2012.

- ROCHA, F. F. *Retroanálise da Ruptura da Barragem São Francisco - Mirai, Minas Gerais, Brasil*. 2015. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.
- RODRÍGUEZ, E., MORRIS, C. S.; BELZ, J. E. *A Global Assessment of the SRTM Performance*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 72, n. 3, p. 249-260, 2006.
- SANDERS B. F. *Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling*. *Advances in Water Resources*. 2007.
- SANTILLAN, J. R.; SANTILAN, M. M. *Vertical accuracy assessment of 30-M resolution ALOS, ASTER and SRTM global DEMs over northeastern Mindanao, Philippines*. In: *Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Scineces*. 2016.
- SARAIVA, L. S. *Comparação entre critérios para determinação de hidrograma de ruptura de barragens*. 2014. Monografia. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.
- SCHUMANN, G.; Di BALDASSARRE, G.; ALSDORF, D.; BATES, P. D. *Near realtime flood wave approximation on large rivers from space: application to the River Po, Italy*. *Water Resources Research*. 2010.
- SCHUMANN, G. J. P; MOLLER, D. K.; MENTGEN, F.; *High-Accuracy Elevation Data at Large Scales from Air borne Single-Pass SAR Interferometry*. *Journal of Frontier in Earth Science*. 2016.
- SILVA, G.P.; GONÇALVES, R.M. TANAJURA, E. L. X. *Levantamento Geodésico GNSS-RTK para o Mapeamento da Linha de Costa*. In: *IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*. Recife. 2012.
- SILVEIRA, J. F.; MACHADO, J. A. A. *Construção das árvores de eventos e análise de risco da barragem João Leite da Saneago*. In: *XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens*. Goiânia. 2005.
- SILVEIRA, M. T.; FEITOSA, R. Q.; JACOBSEN, K.; BRITO, J. L. N. S.; HECKEL, Y. *Um método híbrido para localização automática de pontos homólogos em pares de imagens estereoscópicas*. In: *Simpósio Brasileiro De Ciências Geodésicas E Tecnologias Da Geoinformação*. Recife. 2008.
- TANDEM-X. *The Earth In Three Dimensions*. Disponível em: http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10378/566_read-426/#/gallery/345>. Acesso em 10/4/2017.

- SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*. Disponível em: <<http://srtm.usgs.gov/>>. Acesso em 01/02/2016
- TACHIKAWA, T.; HATO, M.; KAKU, M.; IWASAKI, A.. *The characteristics of ASTER GDEM version 2*. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. EUA. 2011.
- TADONO, T.; ISHIDA, H.; ODA, F.; NAITO, S.; MINAKAWA, K.; IWAMOTO, H. *Precise Global DEM Generation by ALOS Prism*. In: Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014.
- TAKAKU, J.; TADONO, T.; TSUTSUI, K.; ICHIKAWA, M. *Validation of “AW3D” Global DSM Generated From ALOS PRISM*. In: Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998.
- UNESCO. *Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura - O Manejo dos Recursos Hídricos em Condições de Incerteza e Risco*. Brasília, 2012.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). *HEC-RAS River Analysis System – 2D Modeling User’s Manual*. Hydrologic Engineering Center. California, EUA. 2015.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center. California, EUA. 2016.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). *Using HEC-RAS for a Dam Break Studies*. Hydrologic Engineering Center. California, EUA. 2014.
- VERÓL, A. P. *Simulação da propagação de onda decorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional*. 2010. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010
- VRICON. *Data Pricing Effective as of 22 June 2016*. Disponível em <http://www.vricon.com/wp-content/uploads/2015/12/Vricon_Data_Pricing_print.pdf>. Acesso 20.2.2017.
- WANG W.; YANG, X.; YAO, T. *Evaluation of ASTER GDEM and SRTM and their suitability in hydraulic modelling of a glacial lake outburst flood in Southeast Tibet*. Hydrological Processes. 2012.
- WANG, X.; CHEN, Y.; SONG, L.; CHEN, X.; XIE, H.; LIU, L. *Analysis of lengths, water areas and volumes of the Three Gorges Reservoir at different water levels using Landsat images and SRTM DEM Data*. Quaternary International Journey. 2013.

- WELLER, M. P. E. *Using LiDAR to performing Dam Breach Inundation Studies*. WRC. EUA. 2012.
- WILLINGHOEFER, M. *Avaliação do Risco de Rompimento da Barragem de uma Pequena Central Hidrelétrica na Bacia do Rio do Peixe*. 2015. Monografia. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.
- YAN, K.; BALDASSARRE, G. D.; SOLOMATINE, D. P.; SCHUMANN, G. J. P. *A review of low-cost space-borne data for flood modelling: topography, flood extent and water level*. Hydrological Processes. 2015.
- ZANARDI, R. P.; SCHNEIDER, A. H.; SALOMONI, T. R.; SALOMONI, C. S.; REISS, M. L. L. *Validação da Qualidade do Perfilamento a Laser aerotransportado da cidade de Porto Alegre*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Foz do Iguaçu. 2013.
- ZHANG, L. M.; XU, Y. *Analysis of Earth Dam Failures - A database approach*. In: First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk. Shanghai. China. 2007.
- ZHEN-GANG, J. *Hydrodynamics and Water Quality – Modeling Rivers, Lakes and Estuaries*. Ed Wiley. 2008.

8 ANEXO

ANEXO A - Cenários utilizados para a UHE Canastra e resultados subsequentes:

Cenário	F _m do C. Manning	F _m da Curva Volume	Brecha		
			T (h)	L (m)	Inclinação da Brecha
A	1	1	0,1	68	45°
B	2	1	0,1	68	45°
C	0,5	1	0,1	68	45°
D	1,25	1	0,1	68	45°
E	0,75	1	0,1	68	45°
F	1	1	0,3	68	45°
G	1	1	0,5	68	45°
H	1	1	0,1	85	45°
I	1	1	0,1	102	45°
K	1	0,6	0,1	68	45°
L	1	1,4	0,1	68	45°
M	1	0,8	0,1	68	45°
N	1	1,2	0,1	68	45°

Cenário			Qp (m³/s)							Tp (min)							Profundidade Máxima (m)							Velocidade Máxima (m/s)						
Equacionamento	MDE	Cenário	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Difusivo	AW3D_1M	A	3536	3163	1881	711	454	323	315	3,1	4,0	8,2	21,4	36,3	44,0	47,3	12,9	11,0	5,4	6,5	4,2	4,5	3,0	6,2	12,6	10,8	3,5	2,3	2,6	5,0
Difusivo	AW3D_1M	B	3413	2673	1154	365	230	163	159	3,2	4,6	11,8	37,6	67,4	82,5	89,2	16,1	13,5	6,0	6,5	4,2	4,5	3,0	4,5	7,7	5,7	1,8	1,2	1,3	2,5
Difusivo	AW3D_1M	C	3628	3447	2571	1291	867	627	613	3,1	3,6	6,1	13,2	20,9	24,8	26,5	10,2	8,5	4,6	6,2	4,1	4,4	3,0	8,6	19,8	19,3	6,7	4,5	5,2	9,9
Difusivo	AW3D_1M	D	3497	3023	1640	576	365	259	253	3,1	4,1	9,1	25,4	44,1	53,6	57,8	13,9	11,8	5,6	6,5	4,2	4,5	3,0	5,6	10,8	8,8	2,8	1,8	2,1	4,0
Difusivo	AW3D_1M	E	3579	3306	2186	922	598	428	418	3,1	3,8	7,2	17,3	28,6	34,4	36,9	11,7	9,9	5,1	6,4	4,2	4,5	3,0	7,0	15,2	13,8	4,6	3,1	3,5	6,6
Difusivo	AW3D_1M	F	2268	2169	1547	671	440	316	309	6,1	7,0	11,1	24,9	40,0	47,8	51,1	11,1	9,4	5,0	6,3	4,1	4,4	3,0	4,7	10,8	10,2	3,4	2,3	2,6	5,0
Difusivo	AW3D_1M	G	1726	1685	1364	663	440	317	310	10,0	10,4	14,0	27,7	42,9	50,6	53,9	10,1	8,5	4,7	6,3	4,1	4,4	3,0	4,0	9,8	9,8	3,4	2,3	2,6	5,0
Difusivo	AW3D_1M	H	2023	1932	1457	668	441	317	310	8,0	8,6	12,5	26,3	41,4	49,2	52,5	10,6	9,0	4,8	6,3	4,1	4,4	3,0	4,4	10,3	10,0	3,4	2,3	2,6	5,0
Difusivo	AW3D_1M	I	3734	3336	1826	702	456	326	318	3,0	3,5	7,6	21,1	36,0	43,7	47,0	13,2	11,2	5,4	6,4	4,2	4,5	3,0	6,3	12,8	10,7	3,5	2,3	2,6	5,0
Difusivo	AW3D_1M	K	2833	2389	1048	328	199	141	138	3,1	3,7	8,4	25,5	45,8	56,3	60,5	11,7	9,7	4,2	4,4	3,2	3,2	2,1	5,6	11,4	9,1	2,6	1,4	1,8	4,0
Difusivo	AW3D_1M	L	3924	3673	2423	1102	757	553	539	3,3	4,2	8,1	19,9	32,5	38,7	41,6	13,6	11,7	6,1	7,9	5,0	5,5	3,8	6,4	13,2	11,5	4,1	3,0	3,3	5,8
Difusivo	AW3D_1M	M	3246	2821	1443	509	320	229	224	3,1	3,8	8,2	23,1	40,1	48,9	52,6	12,4	10,4	4,8	5,5	3,7	3,9	2,6	6,0	12,1	10,0	3,1	1,9	2,3	4,5
Difusivo	AW3D_1M	N	3746	3432	2130	899	605	437	426	3,2	4,1	8,1	20,6	34,2	41,1	44,1	13,3	11,4	5,7	7,2	4,6	5,0	3,4	6,3	12,9	11,1	3,8	2,7	3,0	5,4
Difusivo	MDE_EXERC	A	3523	2868	1874	851	481	211	173	3,1	4,4	8,1	19,3	35,0	44,4	56,0	7,5	5,3	8,1	7,1	4,2	3,6	2,2	5,5	8,7	7,7	6,5	2,6	1,4	1,2
Difusivo	MDE_EXERC	B	3491	2722	1631	691	387	169	139	3,1	4,6	9,0	22,8	42,5	54,2	68,6	8,2	5,7	8,3	7,2	4,2	3,6	2,2	5,0	7,4	6,5	5,3	2,1	1,2	0,9
Difusivo	MDE_EXERC	C	3610	3218	2577	1518	920	410	341	3,1	3,9	6,1	12,1	20,2	25,1	30,9	5,7	4,1	6,9	6,8	4,2	3,6	2,2	7,4	14,5	13,1	12,4	5,1	2,8	2,3
Difusivo	MDE_EXERC	D	3491	2722	1631	691	387	169	139	3,1	4,6	9,0	22,8	42,5	54,2	68,6	8,2	5,7	8,3	7,2	4,2	3,6	2,2	5,0	7,4	6,5	5,3	2,1	1,2	0,9
Difusivo	MDE_EXERC	E	3561	3030	2181	1098	634	279	230	3,1	4,2	7,1	15,7	27,6	34,7	43,5	6,7	4,8	7,7	7,0	4,2	3,6	2,2	6,2	10,8	9,7	8,6	3,4	1,9	1,5
Difusivo	MDE_EXERC	F	2254	2053	1543	797	467	206	171	6,1	7,4	11,1	22,7	38,7	48,3	60,0	6,4	4,5	7,5	6,9	4,2	3,6	2,2	4,0	7,8	6,9	6,4	2,5	1,4	1,1
Difusivo	MDE_EXERC	G	1722	1631	1358	781	466	207	172	10,0	10,6	14,0	25,5	41,5	51,2	62,8	5,7	4,1	7,1	6,9	4,2	3,6	2,2	3,3	7,3	6,0	6,3	2,5	1,4	1,1

Cenário			Qp (m³/s)							Tp (min)							Profundidade Máxima (m)							Velocidade Máxima (m/s)						
Equacionamento	MDE	Cenário	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Difusivo	MDE_EXERC	H	2015	1837	1453	790	467	207	172	8,0	8,9	12,5	24,1	40,1	49,7	61,4	6,1	4,3	7,3	6,9	4,2	3,6	2,2	3,7	7,6	6,5	6,3	2,5	1,4	1,1
Difusivo	MDE_EXERC	I	3704	2999	1814	838	483	213	176	3,0	3,8	7,5	18,9	34,7	44,1	55,7	7,8	5,4	8,0	7,1	4,2	3,6	2,2	5,4	8,8	7,8	6,5	2,6	1,5	1,2
Difusivo	MDE_EXERC	K	2828	1985	1042	438	237	95	74	3,1	4,1	8,4	22,5	42,6	55,5	72,9	6,6	4,5	6,3	5,2	3,1	2,5	1,5	5,0	7,8	6,5	5,1	1,9	1,0	0,8
Difusivo	MDE_EXERC	L	3903	3454	2441	1242	759	359	309	3,2	4,5	8,0	18,1	31,6	39,7	48,2	8,1	5,7	9,0	8,5	5,2	4,6	2,9	5,7	9,2	8,4	7,5	3,2	1,9	1,5
Difusivo	MDE_EXERC	M	3238	2464	1429	634	356	151	122	3,1	4,3	8,2	20,7	38,2	49,1	62,8	7,1	4,9	7,2	6,2	3,7	3,1	1,9	5,3	8,3	7,2	5,9	2,2	1,2	1,0
Difusivo	MDE_EXERC	N	3731	3176	2131	1041	621	285	241	3,1	4,4	8,0	18,7	33,2	41,7	51,6	7,8	5,5	8,5	7,8	4,8	4,1	2,6	5,6	9,0	8,1	7,0	2,9	1,7	1,3
Difusivo	MDE_AEROGEO	A	3648	3263	2162	1151	847	691	610	3,0	3,8	7,4	16,6	25,9	29,8	33,2	12,8	10,2	8,5	8,7	5,5	5,3	7,5	5,4	12,1	12,6	4,9	4,9	6,6	4,3
Difusivo	MDE_AEROGEO	B	3544	2538	1196	621	459	374	332	3,0	4,0	11,3	29,4	47,5	55,1	61,7	15,8	12,2	8,9	9,0	5,7	5,5	7,7	4,0	7,4	6,5	2,5	2,5	3,4	2,2
Difusivo	MDE_AEROGEO	C	3747	3538	2971	1994	1545	1287	1143	2,9	3,5	5,6	10,5	15,3	17,3	19,0	9,7	7,8	7,2	8,2	5,3	5,1	7,3	7,6	19,3	22,1	9,2	9,4	12,8	8,5
Difusivo	MDE_AEROGEO	D	3616	3121	1811	941	693	565	500	3,0	3,9	8,3	19,8	31,3	36,2	40,3	13,8	11,0	8,7	8,8	5,6	5,4	7,5	4,9	10,4	10,3	4,0	3,9	5,3	3,5
Difusivo	MDE_AEROGEO	E	3691	3396	2558	1484	1102	902	796	2,9	3,7	6,6	13,5	20,6	23,5	26,0	11,5	9,2	8,1	8,6	5,5	5,2	7,4	6,2	14,6	16,1	6,5	6,4	8,7	5,7
Difusivo	MDE_AEROGEO	F	2478	2314	1813	1091	816	671	593	6,4	6,9	10,4	19,7	29,1	33,0	36,4	11,0	8,8	7,9	8,6	5,5	5,2	7,4	4,0	10,6	11,9	4,8	4,8	6,5	4,3
Difusivo	MDE_AEROGEO	G	1732	1697	1502	1035	791	656	581	10,0	10,3	13,4	22,5	31,9	35,9	39,3	9,5	7,6	7,2	8,4	5,4	5,2	7,4	3,3	9,5	11,1	4,6	4,7	6,5	4,2
Difusivo	MDE_AEROGEO	H	2068	1982	1659	1065	804	663	587	8,2	8,6	11,9	21,1	30,5	34,4	37,8	10,2	8,2	7,6	8,5	5,4	5,2	7,4	3,6	10,0	11,5	4,7	4,7	6,5	4,2
Difusivo	MDE_AEROGEO	I	4005	3623	2236	1167	858	700	618	2,6	3,4	6,9	16,0	25,3	29,2	32,5	13,4	10,7	8,6	8,8	5,6	5,3	7,5	6,1	12,5	12,8	5,0	4,9	6,6	4,3
Difusivo	MDE_AEROGEO	K	3091	2523	1382	644	450	374	318	2,9	3,6	7,5	18,1	29,4	33,9	38,0	11,5	9,0	7,0	6,7	4,2	3,9	6,1	5,1	11,2	10,8	4,0	3,8	5,4	3,4
Difusivo	MDE_AEROGEO	L	4004	3767	2783	1632	1248	1006	911	3,2	4,1	7,5	16,0	24,2	27,8	30,8	13,6	10,9	9,5	10,2	6,6	6,5	8,4	5,6	12,5	13,8	5,6	5,6	7,4	5,1
Difusivo	MDE_AEROGEO	M	3423	2937	1796	899	646	531	462	2,9	3,7	7,5	17,2	27,3	31,4	35,1	12,2	9,7	7,8	7,8	4,9	4,6	6,9	5,3	11,7	11,8	4,5	4,4	6,1	3,9
Difusivo	MDE_AEROGEO	N	3836	3534	2489	1396	1049	850	761	3,1	3,9	7,5	16,3	25,0	28,6	31,8	13,2	10,6	9,1	9,5	6,1	5,9	8,0	5,5	12,3	13,3	5,3	5,3	7,0	4,8
Difusivo	SRTM_1M_CALHA_VANT	A	3564	3028	2124	1186	655	572	538	3,1	4,1	8,1	17,6	30,6	35,1	38,3	14,8	11,9	7,3	9,5	10,8	7,5	8,3	5,3	14,0	7,3	5,3	3,6	3,4	4,9
Difusivo	SRTM_1M_CALHA_VANT	B	3536	2885	1860	975	530	462	434	3,1	4,3	9,1	20,9	36,9	42,5	46,5	15,8	12,7	7,5	9,6	10,9	7,6	8,3	4,7	11,9	6,0	4,3	2,8	2,7	3,9
Difusivo	SRTM_1M_CALHA_VANT	C	3631	3379	2824	1985	1209	1075	1016	3,1	3,6	6,0	11,1	17,8	20,2	21,8	11,9	9,6	6,3	9,0	10,6	7,4	8,2	7,8	22,4	12,9	9,9	7,1	6,5	9,7
Difusivo	SRTM_1M_CALHA_VANT	D	3536	2885	1860	975	530	462	434	3,1	4,3	9,1	20,9	36,9	42,5	46,5	15,8	12,7	7,5	9,6	10,9	7,6	8,3	4,7	11,9	6,0	4,3	2,8	2,7	3,9
Difusivo	SRTM_1M_CALHA_VANT	E	3591	3187	2441	1497	853	749	705	3,1	3,9	7,1	14,4	24,2	27,6	30,1	13,5	10,9	6,9	9,3	10,8	7,5	8,2	6,2	17,0	9,3	6,9	4,7	4,5	6,5
Difusivo	SRTM_1M_CALHA_VANT	F	2269	2121	1709	1079	624	550	518	6,1	7,1	11,0	20,8	34,1	38,7	41,9	12,9	10,4	6,7	9,2	10,7	7,4	8,2	4,1	12,2	6,7	5,1	3,5	3,3	4,8
Difusivo	SRTM_1M_CALHA_VANT	G	1725	1671	1458	1034	617	546	515	10,0	10,3	13,9	23,6	36,9	41,5	44,8	11,8	9,5	6,4	9,1	10,7	7,4	8,2	3,5	11,2	6,3	5,0	3,4	3,3	4,8
Difusivo	SRTM_1M_CALHA_VANT	H	2024	1899	1585	1058	621	549	517	8,0	8,5	12,5	22,2	35,5	40,1	43,3	12,4	10,0	6,6	9,2	10,7	7,4	8,2	3,8	11,7	6,5	5,1	3,5	3,3	4,8
Difusivo	SRTM_1M_CALHA_VANT	I	3733	3185	2078	1156	649	570	537	3,0	3,6	7,5	17,2	30,3	34,8	38,0	15,1	12,2	7,2	9,4	10,8	7,5	8,3	5,5	14,2	7,3	5,3	3,5	3,4	4,9
Difusivo	SRTM_1M_CALHA_VANT	K	2846	2262	1265	650	350	309	289	3,1	3,8	8,3	19,5	35,3	40,5	44,1	13,4	10,7	6,1	7,9	9,0	6,0	7,0	4,9	12,6	6,5	4,3	2,8	2,6	4,0
Difusivo	SRTM_1M_CALHA_VANT	L	3938	3560	2702	1631	962	846	804	3,2	4,3	8,1	17,0	28,6	32,6	35,4	15,7	12,7	7,8	10,5	12,1	8,7	9,1	5,5	14,7	7,7	5,9	4,0	4,0	5,6
Difusivo	SRTM_1M_CALHA_VANT	M	3269	2680	1672	898	496	437	409	3,1	3,9	8,1	18,4	32,6	37,5	40,9	14,2	11,4	6,7	8,7	10,0	6,8	7,7	5,1	13,4	6,9	4,8	3,2	3,0	4,5
Difusivo	SRTM_1M_CALHA_VANT	N	3775	3309	2385	1396	806	708	670	3,1	4,2	8,1	17,3	29,5	33,8	36,8	15,2	12,3	7,5	10,0	11,5	8,1	8,7	5,4	14,4	7,5	5,6	3,8	3,7	5,3
Difusivo	SRTM_1M_CALHA	A	3579	3109	2148	1016	554	488	476	3,1	4,0	8,3	18,8	32,5	37,2	39,9	12,5	9,0	5,7	7,8	6,2	6,8	4,5	4,6	9,1	8,2	4,0	2,5	2,4	5,3
Difusivo	SRTM_1M_CALHA	B	3555	2925	1885	843	451	395	385	3,1	4,2	9,3	22,3	39,3	44,9	48,4	13,4	9,6	5,9	7,9	6,2	6,9	4,5	4,0	7,8	6,8	3,3	1,9	1,9	4,2
Difusivo	SRTM_1M_CALHA	C	3654	3383	2869	1732	1033	923	902	3,1	3,6	6,1	11,8	19,0	21,3	22,7	10,1	7,2	5,0	7,4	6,0	6,7	4,4	6,6	14,8	14,6	7,5	4,9	4,7	10,4
Difusivo	SRTM_1M_CALHA	D	3553	2993	1882	834	448	394	384	3,1	4,2	9,3	22,2	39,3	45,1	48,4	13,4	9,7	5,9	7,9	6,2	6,8	4,5	4,2	7,7	6,7	3,3	2,0	1,9	4,2
Difusivo	SRTM_1M_CALHA	E	3612	3238	2473	1288	724	640	625	3,1	3,9	7,3	15,3	25,8	29,3	31,3	11,5	8,2	5,4	7,7	6,1	6,7	4,5	5,3	11,1	10,4	5,3	3,3	3,2	7,0
Difusivo	SRTM_1M_CALHA	F	2278	2142	1740	931	530	470	459	6,1	7,1	11,3	22,2	36,2	40,9	43,6	10,9	7,8	5,3	7,6	6,1	6,7	4,5	3,5	8,0	7,7	3,8	2,4	2,4	5,2
Difusivo	SRTM_1M_CALHA	G	1728	1673	1483	903	527	469	458	10,0	10,4	14,2	25,0	39,1	43,8	46,5	10,0	7,2	5,0	7,5	6,1	6,7	4,5	3,0	7,4	7,4	3,8	2,4	2,4	5,2
Difusivo	SRTM_1M_CALHA	H	2029	1910	1616	918	529	470	459	8,0	8,6	12,7	23,6	37,7	42,4	45,1	10,5	7,5	5,2	7,6	6,1	6,7	4,5	3,2	7,7	7,5	3,8	2,4	2,4	5,2
Difusivo	SRTM_1M_CALHA	I	3745	3287	2101	988	551	487	475	3,0	3,6	7,7	18,4	32,3	36,9	39,6	12,8	9,2	5,7	7,8	6,2	6,8	4,5	4,5	9,2	8,1	4,0	2,5	2,4	5,3
Difusivo	SRTM_1M_CALHA	K	2873	2294	1277	524	271	242	236	3,1	3,8	8,7	21,1	38,6	44,2	47,5	11,4	8,0	4,8	6,2	4,9	5,4	3,6	4,3	8,3	7,1	3,2	1,9	1,9	4,3
Difusivo	SRTM_1M_CALHA	L	3954	3658	2722	1444	854	751	734	3,2	4,2	8,2	17,9	30,1	34,2	36,5	13,2	9,6	6,2	8,9	7,2	7,8	5,2	4,8	9,5	8,7	4,6	2,9	2,8	6,0
Difusivo	SRTM_1M_CALHA	M	3290	2744	1694	751	406	361	353	3,1	3,9	8,4	19,8	35,1	40,2	43,1	12,0	8,6	5,3	7,1	5,6	6,1	4,1	4,5	8,7	7,6	3,6	2,2	2,2	4,8
Difusivo	SRTM_1M_CALHA	N	3790	3399	2412	1217	702	619	604	3,1	4,1	8,2	18,4	31,3	35,6	38,1	12,9	9,3	5,9	8,4	6,7	7,3	4,9	4,7	9,3	8,4	4,3	2,7	2,6	5,7

Cenário			Qp (m³/s)							Tp (min)							Profundidade Máxima (m)							Velocidade Máxima (m/s)						
Equacionamento	MDE	Cenário	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Difusivo	SRTM_1M	A	3580	3114	2148	987	530	467	456	3,1	4,0	8,3	18,9	32,9	37,7	40,4	11,1	7,6	4,3	6,4	4,7	5,3	3,1	4,6	9,2	8,0	3,8	2,3	2,4	5,0
Difusivo	SRTM_1M	B	3489	2697	1338	522	272	238	232	3,1	4,6	12,2	32,6	60,3	69,7	75,1	14,0	9,7	4,7	6,5	4,8	5,4	3,1	3,4	5,7	4,3	1,9	1,2	1,2	2,5
Difusivo	SRTM_1M	C	3654	3388	2870	1685	990	884	865	3,1	3,6	6,1	11,9	19,2	21,6	23,0	8,7	5,8	3,6	6,0	4,6	5,2	3,0	6,5	14,9	14,1	7,0	4,5	4,7	9,8
Difusivo	SRTM_1M	D	3554	2998	1882	810	429	377	367	3,1	4,2	9,3	22,3	39,8	45,7	49,1	12,0	8,3	4,4	6,5	4,8	5,4	3,1	4,2	7,9	6,6	3,1	1,9	1,9	4,0
Difusivo	SRTM_1M	E	3613	3242	2473	1252	693	613	598	3,1	3,8	7,2	15,4	26,1	29,7	31,7	10,0	6,8	4,0	6,3	4,7	5,3	3,1	5,3	11,3	10,2	4,9	3,1	3,2	6,6
Difusivo	SRTM_1M	F	2279	2144	1741	904	507	450	440	6,1	7,1	11,3	22,3	36,7	41,5	44,2	9,5	6,4	3,9	6,2	4,7	5,3	3,1	3,5	8,1	7,5	3,6	2,3	2,3	4,9
Difusivo	SRTM_1M	G	1728	1674	1487	879	505	449	439	10,0	10,4	14,2	25,1	39,5	44,3	47,0	8,6	5,7	3,6	6,1	4,6	5,3	3,1	3,0	7,4	7,1	3,5	2,3	2,3	4,9
Difusivo	SRTM_1M	H	2029	1912	1618	892	506	450	440	8,0	8,6	12,7	23,7	38,1	42,9	45,6	9,1	6,1	3,7	6,1	4,7	5,3	3,1	3,2	7,8	7,3	3,6	2,3	2,3	4,9
Difusivo	SRTM_1M	I	3746	3292	2100	960	527	466	455	3,0	3,6	7,7	18,5	32,7	37,4	40,1	11,4	7,8	4,2	6,3	4,7	5,3	3,1	4,5	9,4	7,9	3,7	2,3	2,4	5,0
Difusivo	SRTM_1M	K	2873	2299	1272	499	254	227	221	3,1	3,8	8,7	21,4	39,5	45,3	48,7	9,9	6,6	3,4	4,8	3,4	4,0	2,2	4,2	8,4	6,8	2,9	1,7	1,8	4,0
Difusivo	SRTM_1M	L	3955	3662	2724	1418	827	727	711	3,2	4,2	8,2	18,0	30,3	34,5	36,8	11,8	8,2	4,7	7,4	5,7	6,4	3,8	4,8	9,6	8,6	4,3	2,8	2,8	5,8
Difusivo	SRTM_1M	M	3290	2750	1692	723	386	343	335	3,1	3,9	8,4	20,0	35,7	40,9	43,8	10,6	7,2	3,8	5,6	4,1	4,7	2,7	4,5	8,9	7,4	3,3	2,0	2,1	4,5
Difusivo	SRTM_1M	N	3791	3404	2413	1189	677	596	583	3,1	4,1	8,2	18,4	31,6	36,0	38,5	11,5	7,9	4,5	6,9	5,3	5,9	3,5	4,7	9,4	8,3	4,0	2,6	2,6	5,4
Difusivo	SRTM_30M	A	3579	3107	2149	976	537	472	461	3,1	4,0	8,3	18,9	32,8	37,5	40,1	11,6	7,7	4,3	7,2	4,8	5,6	3,1	5,5	9,7	8,0	4,2	3,5	3,1	5,2
Difusivo	SRTM_30M	B	3487	2689	1338	517	275	241	235	3,1	4,6	12,2	32,6	59,9	69,3	74,6	14,5	9,8	4,7	7,4	4,8	5,7	3,1	4,0	6,0	4,3	2,1	1,8	1,6	2,6
Difusivo	SRTM_30M	C	3652	3383	2871	1668	1001	894	875	3,1	3,6	6,1	11,9	19,1	21,5	22,8	9,2	5,9	3,6	6,9	4,7	5,5	3,0	7,7	15,8	14,2	7,7	6,8	6,1	10,2
Difusivo	SRTM_30M	D	3551	2990	1882	801	434	381	372	3,1	4,2	9,3	22,3	39,6	45,4	48,7	12,5	8,3	4,5	7,3	4,8	5,7	3,1	4,9	8,3	6,6	3,4	2,8	2,5	4,2
Difusivo	SRTM_30M	E	3612	3236	2474	1239	701	620	605	3,1	3,9	7,2	15,4	26,0	29,5	31,5	10,6	6,9	4,0	7,1	4,7	5,6	3,1	6,3	11,9	10,3	5,4	4,6	4,1	6,9
Difusivo	SRTM_30M	F	2279	2142	1742	895	513	455	445	6,1	7,1	11,3	22,3	36,5	41,3	43,9	10,1	6,5	3,9	7,0	4,7	5,6	3,0	4,1	8,6	7,5	4,0	3,4	3,1	5,1
Difusivo	SRTM_30M	G	1728	1673	1486	870	511	454	444	10,0	10,4	14,2	25,1	39,3	44,1	46,8	9,2	5,8	3,7	7,0	4,7	5,6	3,0	3,5	7,9	7,2	3,9	3,4	3,0	5,1
Difusivo	SRTM_30M	H	2029	1910	1619	883	512	455	445	8,0	8,6	12,7	23,7	37,9	42,7	45,3	9,6	6,2	3,8	7,0	4,7	5,6	3,0	3,8	8,2	7,4	3,9	3,4	3,1	5,1
Difusivo	SRTM_30M	I	3745	3284	2100	950	534	471	460	3,0	3,6	7,7	18,5	32,5	37,2	39,9	11,9	7,9	4,3	7,2	4,8	5,6	3,1	5,3	9,9	8,0	4,1	3,5	3,1	5,2
Difusivo	SRTM_30M	K	2872	2291	1270	488	258	230	225	3,1	3,8	8,7	21,4	39,2	45,0	48,3	10,5	6,7	3,4	5,6	3,5	4,3	2,2	5,0	8,9	6,9	3,2	2,6	2,3	4,1
Difusivo	SRTM_30M	L	3952	3656	2725	1409	835	734	718	3,2	4,2	8,2	17,9	30,1	34,3	36,6	12,3	8,3	4,8	8,3	5,8	6,7	3,8	5,7	10,2	8,6	4,7	4,2	3,7	6,0
Difusivo	SRTM_30M	M	3289	2742	1691	713	391	347	339	3,1	3,9	8,4	20,0	35,5	40,6	43,5	11,1	7,2	3,9	6,5	4,2	5,0	2,7	5,3	9,4	7,5	3,7	3,1	2,7	4,7
Difusivo	SRTM_30M	N	3789	3397	2413	1179	683	602	588	3,1	4,1	8,2	18,4	31,4	35,8	38,3	12,0	8,0	4,5	7,8	5,3	6,2	3,5	5,6	10,0	8,3	4,4	3,8	3,4	5,6
Saint Venant	MDE_AEROGEO	A	3558	2831	1466	712	564	478	430	3,0	3,9	9,0	24,1	38,0	43,4	48,1	14,6	10,5	8,8	8,8	4,9	5,1	7,3	4,8	7,8	6,7	2,7	2,8	3,7	2,6
Saint Venant	MDE_AEROGEO	B	3438	2153	904	444	341	285	253	3,0	4,1	12,9	36,7	59,5	68,5	76,4	16,1	11,8	8,8	8,7	5,2	5,2	7,4	3,9	5,4	4,3	1,8	1,8	2,4	1,7
Saint Venant	MDE_AEROGEO	C	3602	3058	1949	956	786	682	625	3,0	3,9	7,4	18,6	28,3	31,9	35,0	13,4	9,0	8,7	8,9	4,5	5,0	7,1	5,5	10,1	9,0	3,8	4,0	5,3	3,4
Saint Venant	MDE_AEROGEO	D	3530	2664	1280	623	488	411	368	3,0	3,9	9,9	27,2	43,2	49,5	55,0	15,1	11,0	8,8	8,8	5,0	5,2	7,3	4,5	7,0	5,9	2,4	2,5	3,2	2,3
Saint Venant	MDE_AEROGEO	E	3580	2968	1696	822	661	566	513	3,0	3,9	8,2	21,2	33,0	37,5	41,4	14,1	9,8	8,8	8,9	4,8	5,1	7,2	5,1	8,8	7,7	3,2	3,3	4,4	3,0
Saint Venant	MDE_AEROGEO	F	1710	1653	1291	704	562	478	430	9,8	10,4	14,6	29,6	43,4	48,8	53,5	11,7	8,4	8,4	8,8	4,9	5,1	7,3	2,8	6,4	6,4	2,7	2,8	3,7	2,6
Saint Venant	MDE_AEROGEO	G	2436	2171	1412	716	569	483	435	6,4	7,0	11,8	26,9	40,7	46,1	50,8	13,1	9,4	8,7	8,8	5,0	5,2	7,3	3,3	7,1	6,6	2,7	2,8	3,7	2,6
Saint Venant	MDE_AEROGEO	H	2038	1899	1361	710	565	480	432	8,2	8,7	13,2	28,2	42,1	47,5	52,1	12,4	8,9	8,6	8,8	4,9	5,2	7,3	3,0	6,7	6,5	2,7	2,8	3,7	2,6
Saint Venant	MDE_AEROGEO	I	3900	3031	1462	699	553	469	421	2,6	3,4	8,5	23,7	37,6	43,0	47,7	15,0	10,8	8,8	8,8	4,9	5,1	7,3	5,5	8,0	6,7	2,7	2,8	3,7	2,6
Saint Venant	MDE_AEROGEO	K	2996	2148	916	406	316	272	234	2,9	3,7	9,4	26,7	42,9	48,9	54,5	13,1	9,3	7,2	6,8	3,8	3,9	6,2	4,5	7,2	5,7	2,3	2,3	3,2	2,2
Saint Venant	MDE_AEROGEO	L	3911	3292	1916	1011	810	674	624	3,2	4,1	8,9	22,9	35,5	40,5	44,6	15,5	11,2	9,9	10,3	5,8	6,2	8,1	5,0	8,1	7,3	3,1	3,2	4,1	2,9
Saint Venant	MDE_AEROGEO	M	3313	2526	1204	558	439	375	331	2,9	3,8	9,2	25,2	40,1	45,7	50,8	14,0	10,0	8,1	7,9	4,4	4,5	6,8	4,7	7,6	6,3	2,5	2,6	3,5	2,4
Saint Venant	MDE_AEROGEO	N	3752	3081	1704	865	690	578	530	3,1	4,0	9,0	23,4	36,6	41,8	46,1	15,1	10,9	9,4	9,6	5,4	5,7	7,7	4,9	8,0	7,0	2,9	3,0	3,9	2,7
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA_VANT	A	3530	2709	1756	828	394	353	336	3,1	4,4	9,3	22,6	42,4	49,2	53,7	16,6	12,9	7,9	9,5	11,5	7,4	8,3	3,7	7,2	5,4	2,9	2,1	1,8	2,9
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA_VANT	B	3503	2580	1538	681	319	285	271	3,1	4,6	10,4	26,8	51,1	59,6	65,2	17,7	13,8	8,2	9,6	11,5	7,4	8,3	3,3	6,1	4,4	2,3	1,7	1,4	2,3
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA_VANT	C	3575	2865	2162	1143	528	477	461	3,1	4,2	7,6	17,0	31,3	35,9	38,8	15,4	11,5	7,9	9,5	11,6	7,3	8,2	4,6	9,0	8,5	4,0	3,1	2,5	4,1
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA_VANT	D	3502	2627	1574	722	349	311	289	3,1	4,6	10,2	25,7	48,5	56,3	60,0	17,2	13,5	8,0	9,6	11,4	7,4	8,2	3,5	6,5	4,6	2,5	1,9	1,6	2,5
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA_VANT	E	3551	2794	1959	967	452	407	390	3,1	4,3	8,4	19,7	36,7	42,3	46,0	16,0	12,2	7,9	9,5	11,5	7,3	8,2	4,1	8,0	6,5	3,4	2,5	2,1	3,4
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA_VANT	F	2246	1972	1483	783	384	346	330	6,1	7,4	12,3	26,0	45,9	52,9	57,5	15,0	11,7	7,5	9,4	11,4	7,3	8,3	2,7	6,6	5,1	2,8	2,1	1,8	2,9

Cenário			Qp (m³/s)							Tp (min)							Profundidade Máxima (m)							Velocidade Máxima (m/s)						
Equacionamento	MDE	Cenário	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA_VANT	G	1715	1597	1327	769	384	346	331	10,0	10,5	15,1	28,7	48,6	55,7	60,3	14,0	10,9	7,2	9,3	11,4	7,3	8,3	2,3	6,1	4,7	2,8	2,1	1,8	2,9
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA_VANT	H	2006	1776	1408	777	385	346	331	8,0	8,8	13,7	27,4	47,2	54,3	58,9	14,5	11,3	7,3	9,4	11,4	7,3	8,3	2,5	6,3	4,9	2,8	2,1	1,8	2,9
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA_VANT	I	3677	2835	1697	821	396	355	339	3,0	3,8	8,7	22,3	42,2	48,9	53,4	16,9	13,1	7,8	9,5	11,5	7,4	8,3	4,3	7,3	5,3	2,9	2,1	1,8	2,9
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA_VANT	K	2823	2121	1111	503	264	235	220	3,1	3,9	9,0	22,9	43,2	49,6	54,0	14,3	11,2	6,3	8,0	9,0	5,8	6,9	4,0	8,4	4,2	3,0	2,1	2,0	2,6
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA_VANT	L	3894	3291	2306	1211	615	549	528	3,1	4,6	9,1	21,3	38,7	44,4	48,0	17,7	13,7	8,7	10,7	12,9	8,6	9,0	3,8	7,5	5,7	3,3	2,5	2,2	3,3
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA_VANT	M	3241	2321	1343	620	301	270	256	3,1	4,3	9,5	24,1	46,0	53,3	58,4	15,9	12,3	7,2	8,8	10,6	6,7	7,9	3,7	6,9	5,1	2,6	1,9	1,6	2,6
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA_VANT	N	3738	3015	2004	1018	503	450	432	3,1	4,5	9,2	22,0	40,4	46,5	50,5	17,2	13,3	8,3	10,2	12,2	8,0	8,6	3,8	7,4	5,5	3,1	2,3	2,0	3,1
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA	A	3542	2968	1955	806	425	379	370	3,1	4,2	8,9	21,7	39,2	44,8	48,1	13,6	9,6	6,0	8,0	6,2	6,7	4,4	3,8	6,0	5,2	2,8	1,9	1,9	3,4
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA	B	3443	2464	1231	478	249	218	212	3,1	4,6	12,5	34,4	64,3	73,5	79,6	15,5	11,3	6,1	7,9	6,3	6,7	4,4	2,9	4,2	3,3	1,7	1,2	1,2	2,1
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA	C	3587	3154	2512	1171	640	580	568	3,1	3,9	6,9	15,4	26,7	30,2	32,2	12,1	8,2	5,7	8,0	6,2	6,5	4,3	4,7	8,2	7,9	4,2	2,9	2,9	5,3
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA	D	3521	2872	1732	689	362	321	313	3,1	4,3	9,9	25,0	45,7	52,5	56,4	14,2	10,1	6,1	8,0	6,2	6,7	4,5	3,5	5,4	4,5	2,4	1,6	1,6	2,9
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA	E	3564	3063	2218	961	513	460	450	3,1	4,1	7,9	18,4	32,8	37,3	39,9	12,9	8,9	5,9	8,0	6,2	6,6	4,4	4,2	6,9	6,2	3,3	2,3	2,3	4,1
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA	F	2265	2097	1628	753	412	369	360	6,1	7,3	11,9	25,1	42,9	48,6	51,9	12,0	8,4	5,6	7,8	6,1	6,6	4,4	2,8	5,3	5,0	2,7	1,8	1,9	3,3
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA	G	1723	1662	1430	740	411	369	361	10,0	10,5	14,7	28,0	45,8	51,5	54,7	11,0	7,7	5,4	7,8	6,1	6,6	4,4	2,4	5,0	4,8	2,6	1,8	1,9	3,3
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA	H	2018	1882	1534	747	412	369	361	8,0	8,7	13,3	26,5	44,4	50,0	53,3	11,5	8,1	5,5	7,8	6,1	6,6	4,4	2,6	5,2	4,9	2,7	1,8	1,9	3,3
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA	I	3698	3144	1894	792	426	380	372	3,0	3,7	8,3	21,4	38,9	44,5	47,8	13,9	9,8	5,9	7,9	6,2	6,7	4,4	3,9	6,1	5,2	2,8	1,9	1,9	3,4
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA	K	2849	2151	1122	406	204	184	180	3,1	3,9	9,4	24,8	47,2	54,1	58,2	12,2	8,4	5,0	6,3	4,9	5,3	3,6	3,5	5,6	4,5	2,2	1,4	1,5	2,8
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA	L	3906	3538	2513	1183	675	599	586	3,1	4,4	8,7	20,5	35,7	40,7	43,5	14,5	10,3	6,5	9,2	7,3	7,8	5,1	3,9	6,2	5,6	3,1	2,2	2,2	3,8
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA	M	3257	2595	1513	594	311	279	273	3,1	4,1	9,1	23,1	42,5	48,7	52,3	13,0	9,1	5,5	7,2	5,6	6,0	4,0	3,7	5,8	4,9	2,5	1,7	1,7	3,1
Saint Venant	SRTM_1M_CALHA	N	3750	3269	2207	987	550	490	479	3,1	4,3	8,8	21,1	37,4	42,6	45,6	14,1	9,9	6,2	8,6	6,8	7,2	4,8	3,9	6,1	5,4	3,0	2,0	2,1	3,6
Saint Venant	SRTM_1M	A	3543	2970	1963	807	429	383	374	3,1	4,2	8,9	21,7	39,1	44,7	47,9	12,2	8,1	4,6	6,6	4,8	5,3	3,0	3,8	6,0	5,3	2,6	1,8	1,9	3,4
Saint Venant	SRTM_1M	B	3458	2610	1261	474	248	219	213	3,1	4,7	12,7	35,1	65,7	75,9	81,7	14,5	9,9	4,8	6,6	4,8	5,4	3,1	2,8	4,2	3,3	1,6	1,0	1,1	2,1
Saint Venant	SRTM_1M	C	3587	3156	2520	1178	652	593	580	3,1	3,9	6,9	15,3	26,6	30,1	32,1	10,8	6,8	4,3	6,6	4,8	5,2	2,8	4,7	8,2	8,0	4,1	2,9	2,9	5,4
Saint Venant	SRTM_1M	D	3522	2875	1738	689	363	323	315	3,1	4,3	9,9	25,0	45,6	52,4	56,3	12,9	8,7	4,7	6,6	4,8	5,3	3,1	3,4	5,4	4,5	2,2	1,5	1,6	2,9
Saint Venant	SRTM_1M	E	3565	3065	2225	965	521	468	458	3,1	4,1	7,9	18,4	32,7	37,2	39,8	11,5	7,5	4,5	6,6	4,8	5,3	2,9	4,2	6,9	6,3	3,2	2,3	2,3	4,1
Saint Venant	SRTM_1M	F	2266	2098	1632	754	415	372	364	6,1	7,3	11,9	25,1	42,9	48,5	51,8	10,6	6,9	4,2	6,4	4,7	5,2	3,0	2,8	5,4	5,0	2,5	1,8	1,9	3,4
Saint Venant	SRTM_1M	G	1723	1662	1433	741	415	373	365	10,0	10,5	14,7	27,9	45,7	51,4	54,6	9,6	6,2	4,0	6,4	4,7	5,2	3,0	2,4	5,0	4,8	2,5	1,8	1,9	3,4
Saint Venant	SRTM_1M	H	2018	1882	1538	748	415	373	365	8,0	8,7	13,2	26,5	44,3	49,9	53,2	10,1	6,6	4,1	6,4	4,8	5,2	3,0	2,6	5,2	4,9	2,5	1,8	1,9	3,4
Saint Venant	SRTM_1M	I	3698	3146	1902	792	430	384	376	3,0	3,7	8,3	21,3	38,8	44,4	47,6	12,5	8,3	4,5	6,5	4,8	5,3	3,0	3,9	6,1	5,2	2,6	1,8	1,9	3,4
Saint Venant	SRTM_1M	K	2849	2154	1128	408	208	188	184	3,1	3,9	9,4	24,7	47,0	53,9	57,9	10,8	7,0	3,6	4,9	3,5	4,0	2,2	3,5	5,6	4,6	2,1	1,4	1,5	2,8
Saint Venant	SRTM_1M	L	3906	3539	2520	1186	677	602	589	3,1	4,4	8,7	20,5	35,7	40,6	43,4	13,1	8,8	5,1	7,8	5,9	6,4	3,7	3,9	6,3	5,6	2,9	2,2	2,2	3,8
Saint Venant	SRTM_1M	M	3258	2597	1520	595	315	283	277	3,1	4,1	9,0	23,0	42,4	48,5	52,0	11,6	7,6	4,1	5,8	4,2	4,7	2,6	3,7	5,8	4,9	2,3	1,6	1,7	3,1
Saint Venant	SRTM_1M	N	3750	3271	2214	989	553	493	483	3,1	4,3	8,8	21,1	37,3	42,5	45,5	12,7	8,5	4,8	7,2	5,4	5,9	3,4	3,9	6,1	5,4	2,8	2,0	2,1	3,6
Saint Venant	SRTM_30M	A	3541	2966	1958	793	430	383	374	3,1	4,2	8,9	21,7	39,1	44,7	47,9	12,8	8,2	4,6	7,4	4,9	5,6	3,0	3,7	6,0	5,3	2,9	2,2	2,0	3,5
Saint Venant	SRTM_30M	B	3456	2604	1257	466	249	219	214	3,1	4,7	12,8	35,2	65,7	75,9	81,7	15,1	10,0	4,8	7,5	4,9	5,7	3,1	2,8	4,3	3,3	1,7	1,4	1,3	2,1
Saint Venant	SRTM_30M	C	3588	3155	2516	1158	656	594	582	3,1	3,9	6,9	15,4	26,6	30,0	32,0	11,4	6,8	4,3	7,5	4,8	5,6	2,8	4,6	8,3	8,0	4,4	3,2	3,0	5,5
Saint Venant	SRTM_30M	D	3519	2870	1734	677	365	323	315	3,1	4,3	9,9	25,1	45,7	52,4	56,3	13,4	8,7	4,7	7,4	4,9	5,7	3,0	3,4	5,4	4,5	2,5	1,9	1,8	3,0
Saint Venant	SRTM_30M	E	3564	3063	2221	949	523	468	458	3,1	4,1	7,9	18,5	32,7	37,2	39,8	12,1	7,6	4,5	7,5	4,8	5,6	2,9	4,1	6,9	6,3	3,5	2,6	2,4	4,2
Saint Venant	SRTM_30M	F	2266	2097	1630	742	417	373	364	6,1	7,3	11,9	25,2	42,9	48,5	51,8	11,2	7,0	4,2	7,3	4,8	5,6	2,9	2,8	5,4	5,0	2,8	2,2	2,0	3,5
Saint Venant	SRTM_30M	G	1723	1662	1432	729	416	373	365	10,0	10,5	14,7	28,0	45,7	51,4	54,6	10,2	6,3	4,0	7,2	4,8	5,6	2,9	2,3	5,0	4,8	2,7	2,2	2,0	3,5
Saint Venant	SRTM_30M	H	2017	1882	1536	736	417	373	365	8,0	8,7	13,3	26,6	44,3	50,0	53,2	10,7	6,7	4,1	7,2	4,8	5,6	2,9	2,5	5,2	4,9	2,7	2,2	2,0	3,5
Saint Venant	SRTM_30M	I	3698	3142	1897	779	431	385	376	3,0	3,7	8,3	21,4	38,8	44,4	47,6	13,1	8,4	4,5	7,4	4,9	5,7	3,0	3,8	6,2	5,2	2,8	2,2	2,0	3,5
Saint Venant	SRTM_30M	K	2848	2150	1126	396	209	188	184	3,1	3,9	9,4	25,0	47,0	53,9	58,0	11,4	7,1	3,6	5,7	3,5	4,3	2,1	3,4	5,6	4,6	2,3	1,7	1,6	2,9
Saint Venant	SRTM_30M	L	3905	3536	2515	1172	678	602	589	3,1	4,4	8,7	20,6	35,7	40,7	43,4	13,7	8,9	5,2	8,7	5,9	6,7	3,6	3,9	6,3	5,6	3,2	2,6	2,4	3,9
Saint Venant	SRTM_30M	M	3257	2594	1516	582	316	283	276	3,1	4,1	9,1	23,2	42,4	48,6	52,1	12,2	7,7	4,1	6,6	4,2	5,0	2,6	3,6	5,9	4,9	2,6	2,0	1,8	3,2

Cenário			Qp (m³/s)							Tp (min)							Profundidade Máxima (m)							Velocidade Máxima (m/s)						
Equacionamento	MDE	Cenário	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Saint Venant	SRTM_30M	N	3749	3267	2210	975	554	494	483	3,1	4,3	8,8	21,2	37,3	42,6	45,5	13,3	8,6	4,9	8,1	5,4	6,2	3,3	3,8	6,2	5,4	3,0	2,4	2,2	3,7
Saint Venant	AW3D_1M	A	3459	2903	1594	504	338	248	242	3,1	4,3	9,3	28,4	48,7	58,6	62,9	14,7	12,8	5,8	6,9	4,1	4,3	2,9	3,7	6,3	6,9	2,1	1,9	1,8	3,4
Saint Venant	AW3D_1M	B	3376	2549	1023	296	196	142	138	3,1	4,8	13,4	46,1	81,8	99,5	107,3	17,3	15,6	6,1	6,9	4,1	4,4	3,0	2,8	4,4	4,3	1,3	1,2	1,1	2,1
Saint Venant	AW3D_1M	C	3500	3121	1990	694	478	357	350	3,1	4,0	7,7	21,7	35,7	42,3	45,0	13,4	11,9	5,5	7,0	4,0	4,1	2,8	4,4	7,4	9,3	2,8	2,8	2,6	5,4
Saint Venant	AW3D_1M	D	3431	2795	1422	438	292	213	208	3,1	4,4	10,2	32,1	55,8	67,3	72,5	15,3	13,3	5,8	6,9	4,1	4,4	3,0	3,5	5,8	6,1	1,8	1,6	1,5	2,9
Saint Venant	AW3D_1M	E	3481	3016	1789	588	399	294	288	3,1	4,1	8,5	24,9	41,9	50,1	53,6	14,0	12,3	5,7	7,0	4,1	4,2	2,9	4,0	6,8	8,0	2,4	2,2	2,1	4,1
Saint Venant	AW3D_1M	F	2245	2092	1358	486	331	243	238	6,1	7,3	12,3	32,0	52,4	62,4	66,7	12,7	11,3	5,3	6,8	4,1	4,3	2,9	2,9	5,6	6,7	2,0	1,9	1,7	3,3
Saint Venant	AW3D_1M	G	1720	1657	1239	485	333	245	240	10,0	10,5	15,1	34,8	55,1	65,2	69,5	11,6	10,3	5,1	6,8	4,1	4,3	2,9	2,5	5,2	6,5	2,0	1,9	1,8	3,4
Saint Venant	AW3D_1M	H	2008	1877	1301	486	332	245	239	8,0	8,7	13,7	33,4	53,8	63,8	68,1	12,2	10,8	5,2	6,8	4,1	4,3	2,9	2,7	5,4	6,6	2,0	1,9	1,8	3,3
Saint Venant	AW3D_1M	I	3674	3042	1534	505	341	251	245	3,0	3,7	8,8	28,1	48,4	58,2	62,5	15,0	13,0	5,6	6,9	4,1	4,3	2,9	4,3	6,4	6,9	2,1	1,9	1,8	3,4
Saint Venant	AW3D_1M	K	2772	2155	851	236	154	114	112	3,1	4,0	9,9	34,2	60,9	74,5	79,7	13,2	11,4	4,3	4,7	3,1	3,1	2,1	3,6	5,8	6,0	1,6	1,5	1,3	2,9
Saint Venant	AW3D_1M	L	3856	3423	2124	804	566	423	412	3,3	4,5	9,4	26,1	43,1	51,2	55,0	15,6	13,7	6,6	8,6	4,9	5,4	3,7	3,9	6,6	7,4	2,4	2,2	2,2	3,9
Saint Venant	AW3D_1M	M	3171	2569	1193	366	242	178	174	3,1	4,1	9,5	30,9	53,5	64,8	69,6	14,0	12,2	5,0	5,9	3,6	3,8	2,5	3,6	6,1	6,5	1,8	1,7	1,5	3,1
Saint Venant	AW3D_1M	N	3669	3173	1824	653	453	336	327	3,2	4,4	9,2	27,2	45,5	54,4	58,4	15,2	13,3	6,1	7,8	4,5	4,9	3,4	3,8	6,4	7,2	2,3	2,0	2,0	3,6
Saint Venant	MDE_EXERC	A	3536	2745	1561	643	372	174	148	3,1	4,5	9,0	23,8	44,4	55,8	68,9	7,9	5,5	8,0	7,2	4,0	3,4	2,2	3,7	5,4	6,0	3,7	1,8	1,1	0,9
Saint Venant	MDE_EXERC	B	3451	2410	1001	378	215	100	85	3,1	5,0	12,9	38,6	74,6	94,7	117,5	9,3	6,7	8,5	7,2	4,0	3,5	2,3	2,7	3,8	3,8	2,3	1,1	0,7	0,6
Saint Venant	MDE_EXERC	C	3626	3011	1958	921	556	276	244	3,1	4,1	7,3	17,6	31,2	38,7	45,9	6,5	4,6	7,5	7,1	3,7	3,3	2,1	4,9	7,4	9,9	5,1	2,8	1,7	1,4
Saint Venant	MDE_EXERC	D	3500	2622	1395	552	316	146	124	3,1	4,6	9,8	27,1	51,4	65,4	80,9	8,5	5,9	8,3	7,2	4,0	3,5	2,1	3,3	4,8	5,1	3,3	1,5	0,9	0,8
Saint Venant	MDE_EXERC	E	3577	2876	1750	764	448	214	185	3,1	4,3	8,2	20,6	37,6	47,2	57,1	7,2	5,1	7,8	7,2	3,8	3,4	2,2	4,1	6,2	7,5	4,4	2,2	1,3	1,1
Saint Venant	MDE_EXERC	F	2255	2006	1332	617	364	172	147	6,1	7,5	12,1	27,3	48,0	59,9	72,8	6,7	4,8	7,6	7,1	3,9	3,4	2,1	2,7	5,0	5,5	3,7	1,8	1,0	0,9
Saint Venant	MDE_EXERC	G	1718	1615	1216	611	365	173	148	10,0	10,6	14,9	30,0	50,8	62,5	75,5	6,0	4,3	7,3	7,1	3,9	3,4	2,1	2,2	4,7	5,1	3,7	1,8	1,0	0,9
Saint Venant	MDE_EXERC	H	2008	1805	1276	615	365	172	147	8,0	8,9	13,4	28,6	49,4	61,2	74,2	6,4	4,6	7,4	7,1	3,9	3,4	2,1	2,4	4,9	5,3	3,7	1,8	1,0	0,9
Saint Venant	MDE_EXERC	I	3684	2865	1497	641	375	176	151	3,0	3,9	8,4	23,5	44,0	55,8	68,4	8,2	5,6	7,9	7,2	4,0	3,5	2,2	3,7	5,5	6,0	3,7	1,8	1,1	0,9
Saint Venant	MDE_EXERC	K	2849	1894	841	331	187	81	66	3,1	4,2	9,5	28,2	54,1	70,4	88,7	7,0	4,6	6,2	5,3	2,9	2,4	1,4	3,3	5,0	5,0	3,1	1,3	0,7	0,6
Saint Venant	MDE_EXERC	L	3896	3320	2075	971	593	295	260	3,1	4,6	8,8	22,1	39,7	49,4	59,0	8,5	6,0	9,1	8,7	4,9	4,4	2,9	3,8	5,6	6,6	4,2	2,2	1,3	1,1
Saint Venant	MDE_EXERC	M	3255	2353	1167	483	278	126	106	3,1	4,3	9,2	25,7	48,4	62,1	76,9	7,5	5,1	7,1	6,3	3,5	3,0	1,8	3,5	5,2	5,5	3,4	1,6	0,9	0,8
Saint Venant	MDE_EXERC	N	3741	3047	1793	807	484	235	204	3,1	4,5	8,9	23,0	41,8	52,4	63,2	8,2	5,8	8,5	8,0	4,5	4,0	2,5	3,8	5,5	6,3	4,0	2,0	1,2	1,0

ANEXO B - Cenários utilizados para a Barragem Lomba do Sabão e resultados subsequentes:

Cenário	Fm do C. Manning	Brecha Formada		
		T (h)	L (m)	Inclinação da Brecha
A	1	0,3	100	45°
B	1,25	0,3	100	45°
C	1,5	0,3	100	45°
D	0,75	0,3	100	45°
E	1	0,1	100	45°
F	1	0,5	100	45°
G	1	1	100	45°
H	1	0,3	125	19°
I	1	0,3	75	19°
K	1	0,3	50	19°

Cenário			Qp (m³/s)							Tp (min)							Profundidade Máxima (m)							Velocidade Máxima (m/s)						
Equacionamento	MDE	Cenário	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Difusivo 2D	MDT_CP	A	4226	3802	3492	2990	2764	2167	1761	19	23	30	46	55	72	87	4,9	4,3	3,5	3,0	3,2	2,5	0,6	9,3	8,4	10,3	9,3	9,5	8,4	6,4
Difusivo 2D	MDT_CP	B	4205	3634	3220	2649	2421	1851	1486	19	23	32	53	64	84	103	5,4	4,7	3,8	3,2	3,3	2,6	0,7	8,1	7,4	8,6	7,7	7,9	6,7	5,2
Difusivo 2D	MDT_CP	D	4240	3976	3757	3366	3144	2559	2116	18	22	27	40	47	60	72	4,3	4,0	3,0	2,7	2,9	2,4	0,5	11,2	9,8	13,2	11,8	12,1	11,1	8,4
Difusivo 2D	MDT_CP	C	4183	3506	3004	2392	2169	1628	1295	19	24	35	59	72	96	117	5,8	5,0	4,1	3,4	3,3	2,7	0,8	7,3	6,6	7,5	6,6	6,7	5,7	4,3
Difusivo 2D	MDT_CP	E	5779	4799	4094	3370	3084	2344	1887	8	13	20	36	44	59	72	4,7	4,2	3,8	3,2	3,3	2,5	0,6	11,1	10,2	8,9	6,5	6,6	8,1	4,1
Difusivo 2D	MDT_CP	F	3364	3247	3166	2939	2783	2236	1832	21	27	32	46	54	69	82	3,8	3,8	3,3	3,0	3,2	2,5	0,6	9,1	7,8	7,6	6,1	6,3	7,9	4,1
Difusivo 2D	MDT_CP	G	2507	2172	1985	1626	1478	1090	860	26	37	55	90	110	146	178	5,3	4,8	4,3	3,6	3,4	2,8	1,3	4,7	3,7	3,8	3,4	3,5	3,0	2,2
Difusivo 2D	MDT_CP	H	4499	3459	2659	1870	1646	1158	896	20	26	40	75	94	129	161	6,8	5,7	5,0	3,9	3,3	2,9	1,3	5,2	4,5	4,4	3,6	3,6	3,1	2,2
Difusivo 2D	MDT_CP	I	3312	2624	2126	1630	1464	1069	843	21	29	47	84	104	141	173	5,9	5,1	4,4	3,6	3,4	2,7	1,3	4,8	4,0	4,0	3,4	3,5	3,0	2,2
Difusivo 2D	MDT_CP	K	2549	2067	1734	1406	1281	969	778	21	33	52	92	113	151	186	5,3	4,5	4,0	3,3	3,3	2,6	1,2	4,5	3,7	3,8	3,3	3,3	2,9	2,1
Difusivo 2D	SRTM30	A	4113	2422	1822	1451	1233	778	674	19	21	37	60	77	113	136	5,0	4,2	1,6	3,1	3,1	2,8	1,9	5,9	4,0	8,2	4,0	4,6	3,3	2,4
Difusivo 2D	SRTM30_C	A	4108	2391	1815	1548	1366	1118	969	19	21	37	57	68	88	101	5,0	4,1	1,2	2,0	2,5	1,7	0,5	5,1	4,1	11,6	6,0	6,2	4,4	6,5
Difusivo 2D	MDT_SP	A	4222	3849	3614	3217	2999	2430	1803	19	23	29	43	51	67	75	4,2	4,2	3,0	2,6	2,6	1,7	0,0	6,9	7,1	10,5	9,1	8,3	8,3	5,0