

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

HENRIQUE DE CARVALHO SIQUEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PARÂMETROS DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO:
interferência da resolução do MDE em modelagens de ruptura de barragens**

**Ilha Solteira
2021**

HENRIQUE DE CARVALHO SIQUEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PARÂMETROS DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO:
interferência da resolução do MDE em modelagens de ruptura de barragens**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Nome do orientador

Prof. Dr. Artur Pantoja Marques

Nome da coorientadora

MSc. Marielly Gonçalves Anacleto

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S618a Siqueira, Henrique de Carvalho.
Análise comparativa de parâmetros de manchas de inundação: interferência da resolução do mde em modelagens de ruptura de barragens / Henrique de Carvalho Siqueira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
134 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2021

Orientador: Artur Pantoja Marques
Coorientadora: Marielly Gonçalves Anacleto
Inclui bibliografia

1. Modelagem hidrodinâmica. 2. Modelo digital de elevação. 3. Ruptura de barragem.


Raiane da Silva Santos

Henrique de Carvalho Siqueira

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PARÂMETROS DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO:
interferência da resolução do MDT em modelagens de ruptura de barragens**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Câmpus de Ilha Solteira.

Comissão Examinadora



Prof. Dr. Artur Pantoja Marques
UNESP – Câmpus de Ilha Solteira (Orientador)



Prof. Dr. Adriano Souza
UNESP – Câmpus de Ilha Solteira



MSc. Euclides Cestari Junior
GEOMETRISA – Segurança de Barragens Ltda.

Ilha Solteira
03 de agosto de 2021

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, que me possibilitou alcançar o sonho de me tornar quem sou hoje, como pessoa e profissional.

Aos professores, desde o ensino fundamental até a graduação, que me inspiraram e me transmitiram o conhecimento, sem o qual eu não estaria aqui.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Artur Pantoja Marques e MSc. Marielly Gonçalves Anacleto, sem os quais este trabalho não seria possível.

À Geometrisa Serviços de Engenharia, que gentilmente disponibilizou parte dos dados para que este trabalho se tornasse real.

Aos meus colegas de trabalho que me auxiliaram durante a elaboração desse projeto.

Aos meus amigos, que estiveram sempre ao meu lado durante a caminhada me dando forças para continuar, especialmente à Amanda Barbosa, Débora Bertelli, Joice Benfica e Lara Nakamiti.

Ao Ian Matoso Especiato, que leu este trabalho integralmente e opinou em cada etapa desse processo, estando sempre presente comigo.

Por fim, à minha família que sempre me apoiou financeira e psicologicamente, acreditando no meu potencial, me fortalecendo a cada dia e me ajudando a seguir em frente, em especial aos meus pais, Giuliano e Luciane, aos meus avós, Antônio, Teófilo, Vera Lúcia e Waldicléia.

“Assim, chega a neve depois do fogo, e mesmo os dragões chegam ao fim!”

(TOLKIEN, 2009, p.287)

RESUMO

A disponibilidade hídrica brasileira propicia a utilização da energia hidrelétrica no país. Deve-se, no entanto, construir barramentos que atuem no controle hídrico com reservatórios, armazenando água para períodos de estiagem e no amortecimento de cheias durante épocas de chuvas. As barragens, porém, representam mudanças socioambientais nas regiões onde são instaladas. A jusante, por exemplo, deve-se ter o cuidado de definir, para cenários de ruptura dessas barragens, alguns importantes parâmetros como a área potencialmente alagada, profundidade de lâmina d'água, velocidade da onda e seu tempo de chegada, de modo que durante uma emergência se tenha um plano de contingência eficaz para mitigação de danos e perdas de vidas. Para a determinação dessas áreas, utiliza-se das modelagens hidrodinâmicas, que são modelos computacionais de escoamento de fluidos que possibilitam determinar diversos parâmetros da onda de inundação. Para esses processos, são necessários modelos digitais de terreno (MDTs) que fazem a representação do terreno e podem apresentar diferentes precisões. Essa diferença gera manchas com resultados distintos que podem influenciar em tomadas de decisões futuras, sendo necessária uma análise cuidadosa dos resultados obtidos, para que se possa validar as manchas. De modo geral, o estudo teve como objetivo comparar a influência de três MDTs de precisões diferentes (ALOS, LiDAR e SRTM) nos parâmetros gerados por essas manchas, comparando-as e tentando estabelecer uma tendência entre os resultados obtidos, analisando a viabilidade do uso de cada um deles. Pode-se notar que embora houvesse tendências de modelos mais precisos terem menores áreas de alagamento, maiores profundidades e maiores velocidades, houve casos em que a afirmativa não foi verdadeira. Assim, aponta-se que cada modelo pode se comportar de uma determinada maneira, devido a diversos fatores que individualizam um estudo de ruptura, devendo-se analisar com cautela os resultados obtidos.

Palavras-chave: modelagem hidrodinâmica; modelo digital de elevação; ruptura de barragem.

ABSTRACT

Brazilian hydric disponibility leads to the hydroelectric energy use in the country. However, we must build dams that act on the hydrologic control by reservoirs, storing water during dry periods and dampening floods in rainy seasons. Although, dams represent social and environmental impacts to the areas around the building. Downstream, for example, there might have some caution defining, for dam break sceneries of these constructs, some important parameters such as potential flood areas, water depth, wave velocity and its arrival time, so that during an emergency there is an effective contingency plan to mitigation of damage and lives losses. To determine these areas, hydrodynamic modeling is used, which are computational models of fluid flow that allows determining various parameters of the flood wave. For these processes, digital terrain models (DTMs) that represent the terrain and can present different precisions are needed. This difference generates inundations with different results that can influence future decision-making, so that a careful analysis of the obtained results is necessary for them to be validated. In general, the study aimed to compare the influence of three DTMs of different precision (ALOS, LiDAR and SRTM) on the parameters generated by these inundations, in order to compare them and try to establish a tendency between the results obtained, analyzing the viability of using each of them. It can be noted that although there was a tendency for more accurate models to have smaller flood areas, greater depths and greater wave velocity, there were cases where the statement was not true. Thus, it is pointed out that each model can behave in a certain way, due to several factors that individualize a rupture study, and the results obtained should be carefully analyzed.

Keywords: hydrodynamic modeling; digital elevation model, dam break.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de geoide e elipsoide em relação à superfície	25
Figura 2 – Mapa Mundi em projeção UTM com quadrantes	26
Figura 3 – Diferença entre MDT e MDS	28
Figura 4 – Modelo Digital de Elevação ALOS-PALSAR	30
Figura 5 - Tipos de Escaneamento do Sensor LiDAR	31
Figura 6 – Coeficientes de Manning para planícies de inundação	34
Figura 7 – Coeficientes de Manning para canais	35
Figura 8 – Representação de seção longitudinal do modelo 1D	36
Figura 9 – Representação de seções transversais em modelo 1D	37
Figura 10 - Detalhe de malha de escoamento 2D	38
Figura 11 – Coeficiente de Manning em terreno para modelagem 2D	39
Figura 12 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho	41
Figura 13 - Mapa dos Modelos Digitais de Elevação Referentes à Barragem A..	49
Figura 14 - Mapa dos Modelos Digitais de Elevação Referentes à Barragem B..	50
Figura 15 - Mapa dos Modelos Digitais de Elevação Referentes à Barragem C..	51
Figura 16 - Mapa dos Modelos Digitais de Elevação Referentes à Barragem D..	52
Figura 17 - Mapa dos Modelos Digitais de Elevação Referentes à Barragem E..	53
Figura 18 - Mapa dos Modelos Digitais de Elevação Referentes à Barragem F ..	54
Figura 19 – Áreas de inundação de ruptura das barragens de DPA baixo	57
Figura 20 – Áreas de inundação de ruptura das barragens de DPA médio	57
Figura 21 – Áreas de inundação de ruptura das barragens de DPA alto	58
Figura 22 – Profundidades máximas de lâmina d'água das modelagens	59
Figura 23 – Seções transversais das seções de interesse da barragem D.....	60
Figura 24 – Seções transversais das seções de interesse da barragem E.....	60
Figura 25 – Profundidade x distância para modelagens da Barragem A	65
Figura 26 – Profundidade x distância para modelagens da Barragem B	66
Figura 27 – Profundidade x distância para modelagens da Barragem C	66
Figura 28 – Profundidade x distância para modelagens da Barragem D	67
Figura 29 – Profundidade x distância para modelagens da Barragem E	67
Figura 30 – Profundidade x distância para modelagens da Barragem F.....	68
Figura 31 – Velocidade x distância para modelagens da Barragem A.....	68
Figura 32 – Tempo de chegada x distância para modelagens da Barragem A....	69

Figura 33 – Cota do terreno x distância dos MDTs da Barragem A	70
Figura 34 – Velocidade x distância para modelagens da Barragem B	71
Figura 35 – Tempo de chegada x distância para modelagens da Barragem B	72
Figura 36 – Cota do terreno x distância dos MDTs da Barragem B	72
Figura 37 – Velocidade x distância para modelagens da Barragem C	74
Figura 38 – Tempo de chegada x distância para modelagens da Barragem C	74
Figura 39 – Cota do terreno x distância dos MDTs da Barragem C	75
Figura 40 – Detalhamento das regiões de pico de velocidade da modelagem com MDT LiDAR (a) Seção 5 (50,026 km) (b) Seção 6 (63,025 km)	76
Figura 41 – Velocidade x distância para modelagens da Barragem D	77
Figura 42 – Tempo de chegada x distância para modelagens da Barragem D	77
Figura 43 – Cota do terreno x distância dos MDTs da Barragem D	78
Figura 44 – Velocidade x distância para modelagens da Barragem E	79
Figura 45 – Tempo de chegada x distância para modelagens da Barragem E	80
Figura 46 – Cota do terreno x distância dos MDTs da Barragem E	80
Figura 47 – Velocidade x distância para modelagens da Barragem F	82
Figura 48 – Tempo de chegada x distância para modelagens da Barragem F	82
Figura 49 – Cota do terreno x distância dos MDTs da Barragem F	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Faixas de classificação de DPA	20
Quadro 2 - Matriz resumo de classificação de DPA de barragens	20
Quadro 3 - Tipos simplificados de hidrogramas	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características Técnicas das Barragens do Estudo	41
Tabela 2 – Características da brecha por barragem	45
Tabela 3 – Condições de contorno das modelagens	47
Tabela 4 – Cotas máximas e mínimas observadas dos MDTs.....	48
Tabela 5 – Hidrogramas de ruptura das barragens.....	55
Tabela 6 – Área de inundação e profundidade máximas das modelagens	56
Tabela 7 – Resultados de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda - modelagens da barragem A	62
Tabela 8 – Resultados de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda - modelagens da barragem B	62
Tabela 9 – Resultados de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda - modelagens da barragem C.....	63
Tabela 10 – Resultados de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda - modelagens da barragem D.....	63
Tabela 11 – Resultados de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda - modelagens da barragem E	64
Tabela 12 – Resultados de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda - modelagens da barragem F	64

LISTA DE SIGLAS

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASF	Alaska Survey Facility
AVNIR-2	Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2
DPA	Dano Potencial Associado
FSB	Formulário de Segurança de Barragem
GPS	Sistema de Geoposicionamento Global
GRS	Geodetic Reference System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
JAXA	Japanese Aerospace Exploration Agency
LiDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
PAE	Plano de Ação de Emergência
PALSAR	Phase Array type L-band Synthetic Aperture Radar
PRISM	Panchromatic Remote-sensing Instrument Stereo Mapping
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
tif	Tagged Image File
tin	Triangulated Irregular Network
USACE	United States Army Corps of Engineers
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS	World Geodetic System

LISTA DE ABREVIATURAS

1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
h	Hora
hm	Hectômetro
km	Quilometro
m	Metro
N	Norte
s	Segundo
W	Watts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	19
3.1	Barragens.....	19
3.1.1	Cenário brasileiro de barragens.....	19
3.1.2	Ruptura de barragens	21
3.1.2.1	Características da brecha de ruptura.....	21
3.2	Geoprocessamento	25
3.2.1	Cartografia	25
3.2.2	Geoinformação, geoprocessamento e Sistema de Informações Geográficas (SIG)	27
3.2.3	Modelos digitais	27
3.2.3.1	ALOS PALSAR.....	29
3.2.3.2	LiDAR	30
3.2.3.3	SRTM.....	31
3.3	Modelagem Hidrodinâmica.....	33
3.3.1	Modelagem unidimensional	36
3.3.2	Modelagem bidimensional	38
4	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	Materiais.....	40
4.2	Métodos	40
4.2.1	Delimitação das áreas de estudo.....	41
4.2.2	Aquisição dos modelos digitais de terreno.....	42
4.2.3	Processamento dos modelos digitais de terreno	43
4.2.4	Determinação dos hidrogramas de ruptura.....	45
4.2.5	Modelagem hidrodinâmica.....	46
4.2.6	Finalização do processamento e análise das manchas.....	47

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1	Processamento do MDT.....	48
5.2	Hidrograma de ruptura	55
5.3	Manchas de Inundação e Confecção de Mapas	56
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO	85
6.1	Sugestões para pesquisas futuras	86
7	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICE A – Mapas de elevação dos modelos digitais de terreno	91
	APÊNDICE B – Mapas de seções transversais das modelagens.....	98
	APÊNDICE C – Mapas de profundidade da água das modelagens.....	105
	APÊNDICE D – Mapas de velocidade da onda das modelagens.....	112
	APÊNDICE E – Mapas de tempo de chegada da onda das modelagens	119
	APÊNDICE F – Mapas de área de inundação das modelagens	126

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que o Brasil tem grande parte de sua energia gerada a partir de recursos renováveis. Isso se deve à abundância de recursos naturais disponíveis ao longo de todo o país, em especial os hídricos, que representam cerca de 19% do montante mundial (LIMA, 2001). Desse modo, o cenário de barragens de usos múltiplos no Brasil é amplo, registrando cerca de 900 empreendimentos de produção de energia elétrica com fontes hidrelétricas (ANEEL, 2021) e representando grande parte da geração do país.

As barragens, no entanto, representam alterações do meio físico e social podendo, em cenários emergenciais, representar riscos ao vale a jusante, sendo necessário um plano de ação para mitigação de danos ambientais e socioeconômicos, com planos de alerta e evacuação bem definidos para as zonas afetadas. Esses danos podem ser classificados através de matriz disponibilizada por órgãos fiscalizadores, que determinam o tamanho do impacto gerado, dividindo-os em três níveis: baixo, médio ou alto.

Nesse contexto, as modelagens hidrodinâmicas são ferramentas eficazes para simulações de defluências, sendo o principal produto comumente nomeado por mancha de inundação. Amplamente aceitas, as modelagens computacionais hidrodinâmicas são utilizadas não somente para eventos extremos, mas também servem como base para estudos de influência da construção de obstáculos no rio, simulações de influência de canais laterais e barramentos para controle de cheias e análise de qualidade da água (USACE, 2016d).

Esses cenários complexos de modelagem exigem modelos bidimensionais, com parâmetros bem definidos de montante e jusante. Comumente, utiliza-se como primeiro parâmetro de saída, o hidrograma de defluência, que simula uma onda provocada por ruptura da barragem, sendo necessárias análises das características da ruptura e o segundo, a declividade média do curso d'água pela extensão definida para a modelagem. Ressalta-se, porém, que podem ser utilizadas outras condições de contorno para modelagem, como curvas-chave de reservatórios.

A precisão de uma modelagem depende de diversos fatores, podendo atingir valores muito próximos aos observados em campo quando se dispõe de

levantamentos de campo e registros precisos para sua calibração. Parte importante na confecção das modelagens, portanto, são os levantamentos de campo de representação do terreno, chamados Modelos Digitais de Terreno (MDT), que podem advir de bases de dados gratuitas ou não, variando os níveis de precisão.

Discutido desde a metade do século passado, os MDTs vêm evoluindo constantemente, porém, os mais precisos ainda demandam grandes investimentos podendo ser inviáveis para aquisição por determinados empreendedores. Assim, existem hoje outros modelos gratuitos, porém menos precisos que também podem ser utilizados com algumas ressalvas.

A diferença de acurácia dos modelos digitais influencia nos resultados de manchas de inundação e podem gerar imprecisões e divergências significativas. Faz-se necessária, portanto, uma análise detalhada dessas divergências para determinação de resultados. Em geral, modelos menos precisos tendem a apresentar áreas de inundação que podem não ser representativas de cenários reais, podendo ser superestimadas ou subestimadas.

Além da área de inundação, outros parâmetros como profundidade de lâmina d'água, velocidade e tempo de chegada da onda tem divergências quando analisados com modelos mais ou menos precisos, devendo-se analisar com cautela os resultados obtidos. Em seu manual sobre segurança de barragens, ANA (2016) pontua que na impossibilidade de se obter modelos mais precisos, aqueles com menor precisão podem ser aceitos para utilização em modelagens hidrodinâmicas, mas faz-se necessária uma análise das manchas geradas para que não se tenha resultados fora da realidade.

Para a análise desses dados, os softwares de geoprocessamento, também chamados de Sistema de Informação Geográfica (SIG) têm grande importância, uma vez que realizam a amostragem de dados de maneira clara e de fácil entendimento, possibilitando a construção de mapas com informações georreferenciadas na projeção que melhor atenda as demandas do usuário.

Utilizou-se no presente trabalho, seis barragens, divididas pelo Dano Potencial Associado, sendo duas de cada classificação, de modo que se pudesse ter uma ideia mais abrangente da diferença causada nos impactos dependendo do modelo utilizado para o processamento das manchas, uma vez que precisões

diferentes causam mudanças em parâmetros da mancha, visto o diferente detalhamento que se tem da representação de um terreno.

O presente trabalho teve, portanto, por objetivo, fazer uma análise comparativa de parâmetros de manchas de inundação importantes para elaboração de planos de contingência para cenários extremos de ruptura de barragens, geradas com base em três MDTs de precisões distintas, sendo esses modelos provenientes dos satélites ALOS PALSAR, SRTM e de aerolevanteamento, com tecnologia LiDAR. Visou-se ainda criar mapas comparativos dos terrenos e dos parâmetros, para se entender e tentar apontar um comportamento típico de modelagens nesses terrenos.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo geral comparar os parâmetros gerados das manchas de inundação de seis barragens, de Dano Potencial Associado (DPA) baixo, médio e alto, obtidas a partir de modelagem hidrodinâmica com três modelos digitais de terreno (MDT) de precisões distintas, a fim de determinar as diferenças de cada um no resultado final, além de tentar estabelecer uma tendência dos comportamentos das modelagens com essas representações de terreno.

E como objetivos específicos, tem-se:

- Tratar e analisar os MDTs para utilização nas modelagens hidrodinâmicas;
- Realizar modelagem bidimensional para obtenção das manchas de inundação finais;
- Elaborar gráficos e tabelas comparativas dos parâmetros analisados.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Barragens

Segundo a Lei nº 14.066, definem-se barragens as estruturas construídas com a finalidade de conter líquidos ou misturas de sólidos e líquidos dentro ou fora de cursos d'água, podendo ser temporárias ou permanentes (BRASIL, 2020). Esses reservatórios podem ser destinados a diferentes usos, como abastecimento de água, regularização de vazão, aproveitamento hidrelétrico, amortecimento de cheias, contenção de rejeitos, entre outros.

Cada barragem apresenta suas peculiaridades de projeto, podendo variar em tamanho, largura, comprimento, órgão extravasor (vertedouros e descarregadores), formato e material. Dentre os principais tipos de barragens, podem-se citar como as mais comuns as de aterro, construídas com solo compactado e as de concreto, que podem ser de gravidade, em arco etc.

3.1.1 Cenário brasileiro de barragens

Segundo Lima (2001), o Brasil possui cerca de 19% da disponibilidade hídrica do mundo, tornando o cenário de construção de barragens para aproveitamentos múltiplos uma boa opção para o país. Observa-se, portanto, grande quantidade de usinas hidrelétricas ao longo do território nacional, sendo esse método de geração de energia, responsável por boa parte da demanda energética brasileira.

A classificação de barragens de uso hidrelétrico é feita de acordo com a Resolução nº 696 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2015), que estabelece um quadro de pontuações que levam em consideração aspectos ambientais e socioeconômicos, além do volume do reservatório, que somadas geram o chamado Dano Potencial Associado (DPA), considerando-se os níveis baixo, médio e alto (ANEEL, 2015). Apresenta-se no Quadro 1 a matriz de pontuação e no Quadro 2, os limites de classificação desses níveis.

Quadro 1 – Faixas de classificação de DPA

FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	> = 16
	MÉDIO	10 < DPA < 16
	BAIXO	< = 10

Fonte: ANEEL, 2015

Quadro 2 - Matriz resumo de classificação de DPA de barragens

Volume Total do Reservatório (a)	Potencial de perdas de vidas humanas (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto sócio-econômico (d)
Pequeno < = 5 milhões m ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (3)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem) (0)
Médio 5 milhões a 75 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (4)	MUITO SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) (5)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (4)
Grande 75 milhões a 200 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (8)	-	ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8)
Muito Grande > 200 milhões m ³ (5)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (12)	-	-
DPA = ∑ (a até d):			

Fonte: ANEEL, 2015

As barragens de uso hidrelétrico são fiscalizadas pela ANEEL, em âmbito nacional, e precisam ser reclassificadas todo ano, seus documentos entregues via Formulário de Segurança de Barragem (FSB). De acordo com o levantamento da ANEEL (2021), existem no Brasil 899 barragens cadastradas no Sistema FSBWeb, sendo 652 delas avaliadas com DPA médio ou alto. A aprovação da Lei nº 14066, de 30 de setembro de 2020, obriga empreendedores a implantarem o Plano de

Ação de Emergência (PAE) em barragens com estas classificações (BRASIL, 2020).

Pereira (2019) aponta que cerca de 35% dos incidentes e acidentes em barragens brasileiras entre 2010 e 2017 tem como motivo eventos relacionados a cheias. Torna-se, portanto, necessário um estudo detalhado e eficiente dessas ocorrências em barragens, de modo que, em caso de emergência e iminente rompimento do barramento, sejam realizadas ações de mitigação de perda de vidas e minimização de impactos pela previsão de tais acontecimentos.

3.1.2 Ruptura de barragens

A ruptura de uma barragem pode acontecer por diversos fatores internos ou externos, sendo os principais deles: erosão, galgamento, deslizamento, tombamento, terremotos, falhas de projeto, execução ou operação, entre outros. (SARAIVA, 2014).

De acordo com Mascarenhas (1990), o evento de ruptura de barragem advém de causas materiais, naturais ou em decorrência de intervenção humana. Além disso, aponta-se que barragens de concreto tem maior suscetibilidade a problemas estruturais e de fundação, enquanto barragens de terra são mais sensíveis a condições de galgamento ou erosão.

3.1.2.1 Características da brecha de ruptura

As características mais importantes a serem conhecidas da brecha de ruptura são: as configurações geométricas de base e altura, dimensões do reservatório e o tempo de ruptura, pois esses fatores influenciam no hidrograma final de ruptura que será propagado pelo vale a jusante, podendo alterar parâmetros como tempo de chegada, altura da lâmina d'água etc. Segundo Viseu (2006), a configuração geométrica da brecha depende principalmente do tipo da barragem e do material com a qual é construída.

As barragens de gravidade, têm sua ruptura ocasionada, em geral, por tombamento ou deslizamento devido à deterioração do concreto e diminuição da

resistência da fundação. Em estruturas de alvenaria, as brechas tendem a se formar por tombamento de blocos da estrutura (CAMPOS et al., 2018). Já nas de concreto, o deslizamento ocorre na fundação sendo a geometria aproximadamente retangular e considerando a altura igual ao valor da altura total do barramento.

As barragens de aterro têm, em geral, a ruptura ocasionada por galgamento ou erosão interna (*piping*). No galgamento, a água ultrapassa os níveis máximos da barragem, escoando a água pela estrutura, causando um corte do material do aterro, geralmente na zona central. O cenário de galgamento está ligado a variações repentinas de vazão e chuvas extremas, de forma que não se tem tempo hábil para um controle hidráulico de esvaziamento do reservatório para espera desse volume d'água (VISEU, 2006). Além disso, a altura da brecha é equivalente a aproximadamente a altura do barramento.

Em estudos de ruptura de barragens, Viseu (2006) realizou uma comparação entre formulações de diversos autores, de modo que ao final chegou em uma simplificação de cálculos para valores de brecha em barragens de terra, chegando na Equação 1, e definindo uma geometria da brecha típica trapezoidal, com inclinação aproximadamente de 2V:1H. Já para barragens de concreto, USBR (1989 *apud* VISEU, 2006) define a largura média da brecha como sendo metade do comprimento da barragem e o formato da brecha, retangular.

$$B_{bre} \cong 2,5H_{barr} \quad (1)$$

Considera-se que o tempo de ruptura é o intervalo entre o surgimento da primeira brecha na barragem até a sua formação completa. A partir de um estudo em que foram levantados dados de 43 barragens, Froehlich (1987 *apud* VISEU, 2006) apresenta a Equação 2, que pode ser utilizada em estudos de ruptura de barragens de terra.

$$t_{rup} = 0,007 \left(V_{res} / H_{bre}^2 \right)^{0,5} \quad (2)$$

Para determinar a vazão de pico de um evento de ruptura, deve-se considerar os valores característicos da brecha completamente formada. Para Singh (1996 *apud* VISEU, 2006), pode-se considerar que o escoamento máximo d'água pela brecha é semelhante ao escoamento de um vertedouro de soleira

espessa, utilizando-se, portanto, a Equação 3 com os valores máximos das características da brecha para definição da máxima vazão.

$$Q_{max} = 1,7B_{bre}H_{bre}^{3/2} \quad (3)$$

Sendo:

B_{bre} = largura característica da brecha [m];

H_{bar} = altura da barragem [m];

T_{rup} = tempo de formação completa da brecha (h)

V_{res} = volume do reservatório da barragem no momento da ruptura [m³];

H_{bre} = altura da brecha [m];

$Q_{máx}$ = descarga máxima defluente da barragem em ruptura [m³/s];

O hidrograma de ruptura de uma barragem depende de diversas características do barramento, entre elas as dimensões do reservatório, da brecha formada, devendo-se primeiramente determinar a vazão de pico no momento da ruptura. Ainda, segundo Viseu (2006), deve-se considerar o efeito de um hidrograma afluente sobre o estudo de ruptura de uma barragem para o cenário mais provável, sendo este, uma vazão de projeto da barragem ou de chuva de tempo de recorrência elevado, condizente com um cenário de galgamento.

Escoamentos reais podem ser complexos para serem demonstrados, de forma que se pode realizar sua simplificação em hidrogramas triangulares ou parabólicos (BRASIL, 2005). Os hidrogramas devem ter um pico de vazão, seguido de sua diminuição, representando o esvaziamento do reservatório. Apresenta-se no Quadro 3, duas representações simplificadas possíveis de serem utilizadas para confecção dos hidrogramas.

Quadro 3 - Tipos simplificados de hidrogramas

Hidrograma	Representação	Equações
Triangular Simplificado		$Q_p = \frac{2V}{T_b}$ $Q(t) = Q_p \left(\frac{t}{T_p} \right), \text{ para } 0 \leq t \leq T_p$ $Q(t) = Q_p - Q_p \left(\frac{t - T_p}{T_b - T_p} \right), \text{ para } t \geq T_p$
Parabólico		$Q(t) = Q_p \left[\left(\frac{t}{T_p} \right) e^{\left(1 - \left(\frac{t}{T_p} \right) \right)} \right]^k$

Fonte: Adaptado de Brasil (2005)

Sendo:

Q_p = descarga máxima defluente da barragem em ruptura [m^3/s];

V_r = volume do reservatório da barragem no momento da ruptura [m^3];

T_p = tempo de pico [s];

T_b = tempo de base [s];

k = coeficiente ligado a calibração de volume do reservatório.

3.2 Geoprocessamento

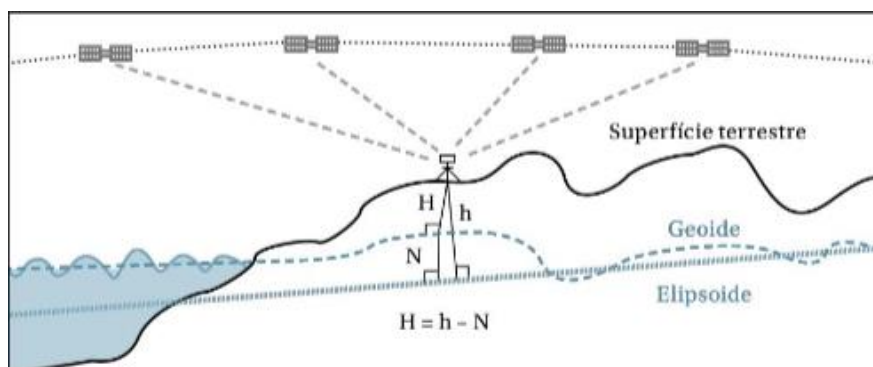
3.2.1 Cartografia

A superfície terrestre está em constante mudança seja por processos erosivos, movimentação de placas tectônicas ou ações humanas, de forma que sua representação real não é perfeitamente esférica (IBGE, 1999). Por conta disso, muito se estuda sobre uma melhor forma de representação plana da superfície de modo que não se tenham grandes distorções em mapas planos.

A partir desses estudos, foram adotados elipsóides de revolução, sendo eles diferentes em determinadas regiões geográficas, de forma que melhor representem a superfície de determinado continente ou país em específico (IBGE, 1999). Esses elipsóides possuem diferentes tamanhos e posições em relação ao geóide, e definem, portanto, um sistema geodésico, também conhecido como *datum* horizontal (IBGE, 1999).

Esse geóide é uma forma irregular que representa as anomalias da superfície terrestre e segundo Menezes e Fernandes (2013) pode ser definida como “a superfície do nível médio dos mares supostamente prolongada sob os continentes”. Desse modo, faz-se necessária a correção do elipsóide em relação ao geóide para que se tenha uma altimetria mais acurada e próxima ao valor real. Apresenta-se na Figura 1 uma representação do elipsóide e de um geóide.

Figura 1 – Representação de geóide e elipsóide em relação à superfície



Fonte: Cubas e Taveira (2020)

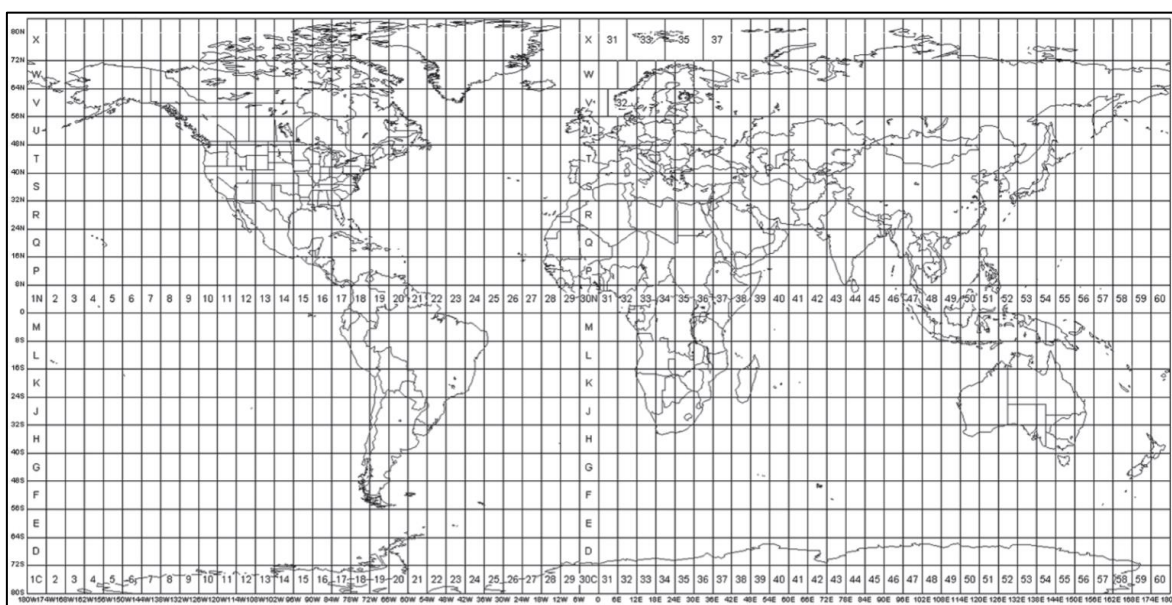
Para se trabalhar com dados geográficos é necessário, portanto, a definição de um *datum* horizontal que corresponda à região estudada, uma vez que ele está

diretamente atrelado a um sistema de coordenadas (IBGE, 1999). É importante ainda que os dados utilizados estejam sempre em um mesmo *datum* horizontal, uma vez que podem acontecer deslocamentos de pontos na conversão (CUBAS; TAVEIRA, 2020).

Desde 2005, utiliza-se no Brasil o *datum* horizontal SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), conforme resolução 01/2005 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2005). Esse elipsóide tem como parâmetros originais o sistema GRS80, de modo que se assemelha ao *datum* horizontal WGS 84, também baseado neste sistema, com diferenças entre eles de até 1 cm (GALDINO, 2006).

As representações geográficas podem ser feitas por mapas, cartas etc. Para isso são utilizados os Sistemas de Coordenadas Planas, comumente adotando-se a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), que divide o globo em fusos enumerados de 1 a 60, com início do eixo no Meridiano de Greenwich (IBGE, 1999). A projeção UTM usa como outro eixo a Linha do Equador e, por ser uma projeção cilíndrica, tem pequenas deformações em áreas próximas ao polo. O sistema de projeção utiliza, ainda, o Norte da Quadrícula, que coincide com aquele do Meridiano Central (IBGE, 1999). Representa-se na Figura 2 um mapa com as quadrículas referentes à projeção UTM.

Figura 2 – Mapa Mundi em projeção UTM com quadrantes



Fonte: Carvalho e Araújo (2008)

3.2.2 Geoinformação, geoprocessamento e Sistema de Informações Geográficas (SIG)

O conceito de geoinformação é dado por Cubas e Taveira (2020) como um conjunto de informações atreladas a um ou mais referenciais geográficos. Essas informações ficam armazenadas em uma base de dados e podem ser processadas a fim de se formar uma representação gráfica do fenômeno. As autoras ainda apontam que esses dados “[...] são alienados do uso de técnicas computacionais, o que significa que ao analisar ou representar dados geográficos por meio da Geoinformação, é preciso “traduzir” esses dados para uma linguagem computacional.” (CUBAS; TAVEIRA, 2020, p. 18).

Essa tradução, pode ser chamada de geoprocessamento, definindo-se como uma tecnologia para obtenção e análise de dados georreferenciados, para estruturá-los de forma que se tenha um entendimento simplificado deles (SILVA, 2006). Cubas e Taveira (2020) apontam que o geoprocessamento é parte essencial do processo de análise da geoinformação, a partir do qual se pode converter dados em informações.

Da necessidade de processamento desses dados geográficos, aponta-se então a existência de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que são *softwares* que realizam de forma automatizada as etapas do geoprocessamento, armazenando os dados e representando-os em mapas com sistemas de coordenadas geográficas. Um SIG, no entanto, não é composto apenas por *softwares*. Segundo Cubas e Taveira (2020), o sistema é composto também por *hardwares*, pessoas capacitadas a modelar e desenvolver o projeto, uma base de dados e uma metodologia que seja compatível e aplicável à finalidade.

3.2.3 Modelos digitais

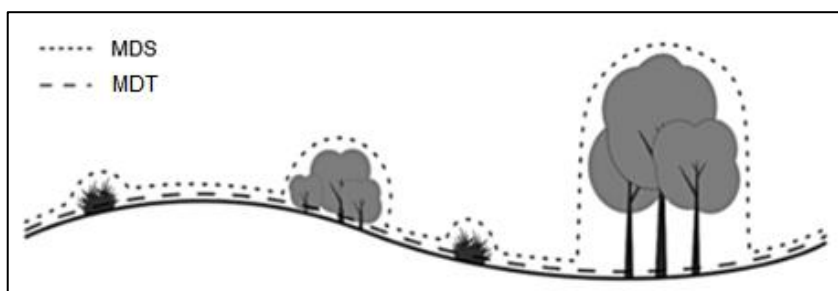
A representação digital de terreno vem sendo discutida há mais de 60 anos, tendo surgido o conceito no final da década de 50, no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT, em inglês), Li (2005). Desde então, vem sendo aprimorada e utilizada em diversas áreas como a geologia e engenharia, tendo aplicações em

campos como construção de rodovias, barragens e estudos geológicos e hidrológicos.

Essas representações de terreno podem ser apresentadas como Modelos Digitais de Superfície (MDS) em que, segundo Cruz et al. (2011), os dados de altimetria são apresentados considerando a vegetação e outras estruturas como edificações presentes, como Modelos Digitais de Elevação (MDE).

Estes, segundo Tighe (2009), são representações digitais da topografia do solo exposto com dados de altimetria, sem vegetação, edificações e outras estruturas, que são digitalmente removidas. Os modelos podem ser chamados também de Modelo Digital de Terreno (MDT), em que se tem a amostragem contínua de dados do terreno, formando-se uma malha. Os MDTs podem apresentar informações variadas sobre o terreno que não necessariamente traduzem-se em dados de altimetria. Sabe-se que existe uma diferença entre os conceitos de MDE e MDT, porém, por se referirem ao mesmo produto de representações de altimetria no Brasil, ambos os termos serão utilizado ao longo do trabalho, para se referir a tal. Mostra-se, portanto, na Figura 3 a diferença entre o MDS e MDT.

Figura 3 – Diferença entre MDT e MDS



Fonte: Adaptado de Mirosław-Świątek et al (2016)

Os modelos digitais podem ser obtidos de diversas formas, gerando também diferentes níveis de precisão, podendo variar de ordem métrica a centimétrica. Uma delas é o sensoriamento remoto, método em que as informações são obtidas por sensores instalados em satélites que orbitam o globo terrestre. Hutchinson e Gallant (2000) dizem que o sensoriamento remoto via satélite possibilita a aquisição de dados de grandes áreas, porém possuem limitações, pois não são capazes de medir elevações corretamente em regiões com cobertura vegetal.

Dong e Chen (2018) apontam que o sensoriamento pode ser passivo ou ativo. O primeiro é aquele que não emite energia própria, mas capta ondas da radiação solar refletidas na superfície ou atmosfera terrestre. Já o sensoriamento ativo, emite radiação própria que atinge o solo e é refletida de volta ao equipamento que então capta os sinais de leitura. Segundo os autores, o segundo método possui a vantagem de não depender de condições climáticas ou iluminação solar para obtenção de resultados.

Além dos sensoriamentos orbitais, existem aqueles que são feitos com veículos aéreos, tripulados ou não, que fazem sua trajetória a níveis mais baixos e com áreas mais restritas ao estudo desejado, os chamados aerolevantamentos.

Os modelos digitais podem ter diferentes precisões, ou seja, diferentes graus de detalhamento e erro de altimetria em relação ao valor real em campo. Nesse contexto, divide-se a precisão em horizontal e vertical, a primeira tendo relação com a quantidade de pontos obtidos dentro de uma área, formando assim uma malha de pontos com altimetria mais espaçada ou mais justa, e a segunda, referindo-se ao erro máximo obtido em um ponto em relação ao nível de fato observado em campo.

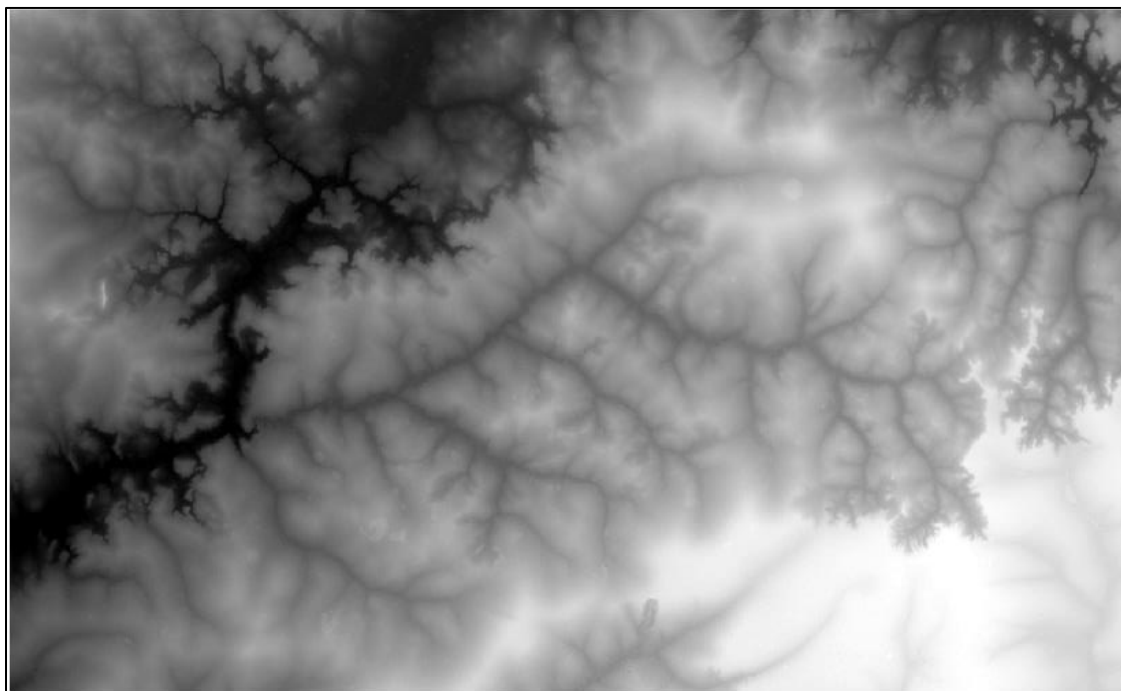
3.2.3.1 ALOS PALSAR

A missão ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) foi lançada em janeiro de 2006, com o propósito de coletar dados em alta resolução da superfície terrestre, que pudessem contribuir em áreas como a cartografia e monitoramento de desastres. O satélite foi equipado com três sensores: PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument Stereo Mapping*), AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2*) e PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*), esse último, com o intuito de realizar medições de elevação da superfície (JAXA, 2008).

O processamento dos dados desses sensores foi realizado pela *Alaska Survey Facility* (ASF) e posteriormente disponibilizado online gratuitamente. Os MDTs resultantes do processamento dos dados do satélite PALSAR têm como base, modelos digitais de terreno da missão SRTM que foram ortorretificados e corrigidos com o novo imageamento e, então, reamostrados em células de precisão

horizontal de 12,5 m. Além disso, segundo JAXA (2008), modelos ALOS apresentam erros de precisão vertical da ordem de até 5 m. Para a América do Sul, utilizou-se os MDTs SRTM GL1, de resolução média (30 m), que tiveram seus dados convertidos para alturas elipsoidais (ASF ENGINEERING, 2015). Apresenta-se na Figura 4 uma representação de carta com dados brutos obtida do MDT ALOS.

Figura 4 – Modelo Digital de Terreno ALOS-PALSAR

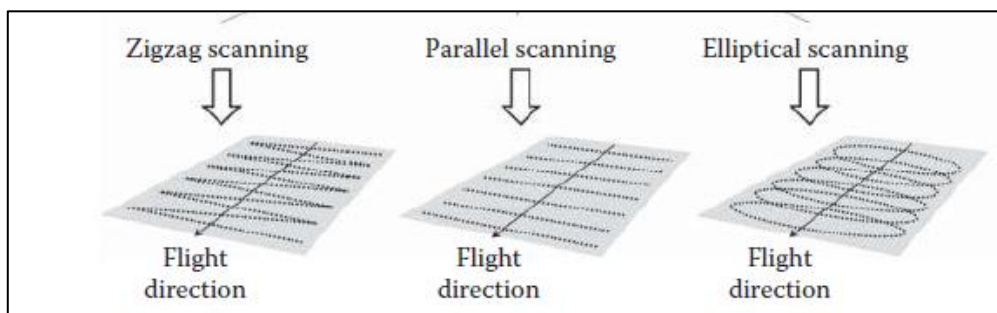


Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3.2 LiDAR

O sistema de sensoriamento remoto do LiDAR (*Light Detection and Ranging*) é composto por um scanner a laser, equipamentos de controle e monitoramento do sensor, além de sistema de geoposicionamento global (GPS) e unidade de medida inercial. O escaneamento do terreno pode seguir padrões de varredura em zig-zag, paralelos ou elípticos (Chen e Dong, 2018), conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Tipos de Escaneamento do Sensor LiDAR



Fonte: Adaptado de Chen e Dong, 2018

O princípio de funcionamento do LiDAR é a emissão de pulsos e ondas de laser a partir do equipamento, que ao atingir a superfície retorna ao receptor em quatro fases dos quais “[...] os primeiros pulsos são caracterizados como vegetação ou edificação, se o terreno as possui e os últimos pulsos são classificados como o solo ou as feições de relevo do terreno” (AMORIM, 2012, p. 7).

O sistema requer pontos de controle em campo, dos quais calcula-se os desvios médios e a raiz média quadrada, determinando-se, então, a precisão do levantamento (EVANS et al. 2009, apud CHEN E DONG, 2018). Ainda, segundo Chen e Dong (2018), o padrão mínimo de precisão vertical do modelo gerado deve considerar um erro menor do que 15 cm, podendo estes serem provenientes de ruídos na emissão dos lasers ou problemas nos sistemas de coordenadas e navegação. A tecnologia possui alta densidade de pontos por metro quadrado, possibilitando amostragem digital mais detalhada em relação a outras tecnologias de captação, AMORIM (2012).

3.2.3.3 SRTM

O *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi uma missão da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), em conjunto com outras agências estadunidenses, alemãs e italianas, que ocorreu no ano de 2000, com o intuito de fazer uma varredura da Terra para aquisição de dados de altimetria para geração de um MDT. A missão durou 11 dias, nos quais foram realizadas ao total 176 órbitas ao redor do planeta,

cobrindo cerca de 80% de sua área, que gerou dados posteriormente processados e ajustados (VALERIANO, 2004).

Ainda segundo Valeriano (2004) os dados foram planejados, originalmente, para apresentarem resoluções de até 1 arco de segundo (30 m) no território dos Estados Unidos e 3 arcos de segundo (90 m) no restante do mundo. Em um de seus trabalhos, no entanto, Valeriano e Rossetti (2010) utilizaram coeficientes geoestatísticos para refinamento de dados por krigagem para obter, então, o MDT de 1 arco de segundo (30 m) para o território nacional.

Atualmente, a USGS (*United States Geological Survey*) já disponibiliza gratuitamente em seu site, modelos digitais de terreno com resolução espacial de até 30 m para regiões fora do território estadunidense, observando-se erros médios de acurácia vertical de até 16 m para áreas com grandes declives, podendo ser menor em áreas mais planas (MILIARESIS; PARASCHOU, 2005).

Em estudos realizados por Ludwig e Schneider (2006), aponta-se que a utilização do MDT proveniente do radar SRTM é válida para modelagens hidrológicas, porém ressalta-se que podem haver divergências de ordem métrica no resultado final, gerando picos superestimados de vazão, podendo ser ainda mais acentuados em regiões montanhosas. Também, segundo manual da ANA sobre Segurança de Barragens, aponta-se que:

Não havendo outra topografia disponível, a informação sobre altimetria pode ser obtida com o modelo digital de elevação obtido a partir da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), relativo à totalidade da América do Sul (altimetria à escala 1:250 000 com resolução planimétrica de 90 m). (ANA, 2016, p. 35).

3.3 Modelagem Hidrodinâmica

Segundo Rosman (2001), a modelagem computacional hidrodinâmica pode ser definida como a representação de um escoamento de fluídos, feita para estudo de projetos de gestão de recursos hídricos. Esse escoamento pode ser permanente ou não permanente, uniforme ou variado, laminar ou turbulento e pode nos dar informações de lâmina d'água, tempo de chegada de onda, velocidade de escoamento e até mesmo apontar índices de transporte de sedimentos e qualidade da água a partir de manchas de inundação.

Atualmente, a modelagem tem aplicações em projetos de amortecimento de ondas de cheia, problema crescente em áreas com impermeabilização dos solos e áreas com retificação de rios, uma vez que pode representar o impacto da construção de reservatórios, estudos da influência de alterações em geometrias de seções do rio, como construção de pontes e canalização, além de ter grande aplicação em cenários de cheias excepcionais de barragens (USACE, 2016b).

As representações das manchas de inundação são feitas a partir de softwares de modelagem, como HEC-RAS e Tuflow, que utilizam de iterações computacionais e equações da hidrodinâmica para simular cenários de diferentes vazões.

No software HEC-RAS, em sua versão 5.0.7, tem-se a possibilidade de construção da geometria do modelo em 1D, 2D ou misto (parte da modelagem em 1D e parte em 2D) (USACE, 2016b). Cada uma delas apresenta suas peculiaridades, aplicabilidades, vantagens e desvantagens, devendo-se escolher sempre o que melhor se aplica para cada uma das situações estudadas. Em cálculos de estudos de ruptura, onde serão considerados acréscimos abruptos de vazões, recomenda-se utilização de modelo final em 2D, devido a demasiada simplificação que pode ocorrer nos modelos 1D (Betsholtz e Nordlöf, 2017).

Para as modelagens devem ser estabelecidas ao menos duas condições de contorno, uma de entrada, chamada condição de montante, e outra de saída, chamada condição de jusante. A primeira deve conter informações de vazão para o escoamento que será processado, correspondendo, portanto, a um hidrograma equivalente ao cenário que será analisado. Para a segunda, condição de jusante da modelagem, pode-se utilizar a declividade média do curso d'água, onde se

considera o desnível entre o pé da barragem e uma fronteira física, definida pelo Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – Volume IV da Agência Nacional de Águas (ANA) como “[...] a foz do rio no oceano, a seção de confluência com outro rio de maior dimensão ou um reservatório a jusante” (ANA 2016, p. 40).

Recomenda-se ainda, que sejam feitas calibrações do coeficiente de rugosidade do rio sempre que houver informações disponíveis, para que se tenha uma mancha de inundação com valores mais próximos a situações reais da barragem (USACE, 2016c). Existem determinações de valores mínimos e máximos de rugosidade para variadas coberturas do solo, estabelecendo assim coeficientes de Manning, que fazem parte das equações de processamento das modelagens no HEC-RAS. Mostra-se na Figura 6 coeficientes para planícies de inundação e na Figura 7 os valores para canais.

Figura 6 – Coeficientes de Manning para planícies de inundação

Tipos de Planície de Inundação		n		
		Mínimo	Médio	Máximo
Pastagem	Gramma Baixa	0,025	0,030	0,035
	Gramma alta	0,030	0,035	0,050
Áreas cultivas	Nenhum cultivo	0,020	0,030	0,040
	Colheita desenvolvida	0,030	0,040	0,050
Mato	Esparso, com muitas plantas rasteiras	0,035	0,050	0,070
	Ralo	0,040	0,060	0,080
	Mediano a denso	0,070	0,100	0,160
Árvores	Grande porte (salgueiro, mangueira etc)	0,110	0,150	0,200
	Terreno limpo, com tocos e com algumas plantas rasteiras	0,030	0,040	0,050
	Terreno limpo, com tocos e com muitas plantas rasteiras	0,050	0,060	0,080
	Fileira densa, com nível de inundação abaixo dos galhos	0,080	0,100	0,120
	Fileira densa, com nível de inundação acima dos galhos	0,100	0,120	0,160

Fonte: adaptado por ANA (2018)

Figura 7 – Coeficientes de Manning para canais

Tipo de Canal		Tamanho médio das partículas do leito (mm)	n	
			Benson e Dalrymple (1967) Apud Jarret (1985)	Chow (1959)
Leito móvel		0,2 até 0,4	0,012 até 0,020	-
		0,4 até 0,6	0,020 até 0,023	-
		0,6 até 1,0	0,023 até 0,026	-
Leito estável	Terra firme	1,0 até 2,0	0,025 até 0,032	0,020
	Areia Grossa	2,0 até 64,0	0,025 até 0,032	-
	Cascalho	64 até 256,0	0,025 até 0,032	-
		>256,0	0,030 até 0,050	-
	Pedra arredondada (seixo)		0,040 até 0,070	-

Fonte: adaptado por ANA (2018)

Segundo USACE (2016d), uma das partes mais importantes da modelagem é o intervalo computacional, parâmetro do escoamento não permanente que pode afetar diretamente nos resultados de escoamento, uma vez que define a precisão das variações de subidas e descidas do hidrograma, devendo ser escolhido com cautela. O tempo computacional deve ser pequeno o bastante para representar pequenas variações no hidrograma, de modo que recomenda-se que esse valor seja equivalente ou menor ao tempo de pico do hidrograma dividido por 20.

Outro aspecto relevante é o tempo de saída do hidrograma, que estabelece a discretização de tempo dos resultados nas manchas de inundação, podendo detalhar os resultados em um determinado tempo de escoamento. As configurações iniciais tem amostragem de 1 hora, mas recomenda-se que sejam escolhidos valores menores para melhor discretização dos resultados.

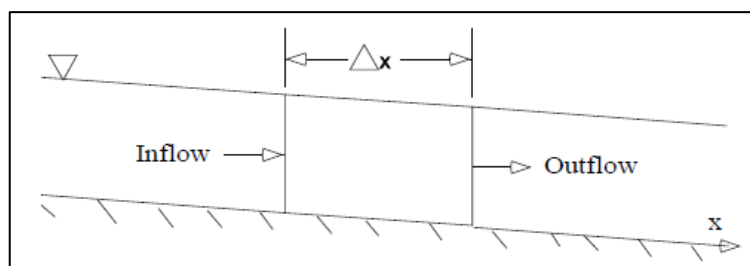
Ao final da modelagem, o HEC-RAS traz como produtos finais da modelagem: profundidade, nível de lâmina d'água, velocidade da onda e tempo de chegada em determinado ponto, área e perímetro de inundação, entre outras informações a respeito da mancha que possam ser úteis a determinados estudos.

3.3.1 Modelagem unidimensional

A modelagem unidimensional (1D) é a fase inicial do estudo no software HEC-RAS, uma vez que determina os parâmetros iniciais de modelagem. Os cálculos desta são simplificados, considerando seções transversais que irão determinar o escoamento em um determinado comprimento (Δx) do rio (Figura 8), e utilizam, segundo USACE (2016c), as equações de Saint-Venant da continuidade (Equação 1) e da conservação de momento (Equação 2), tomando como hipóteses para simplificação dos cálculos:

- Fluido incompressível;
- Pressão é hidrostática (não há variação vertical de aceleração);
- Comprimento do escoamento bem maior que a largura;
- Declividade média do canal é baixa;
- Coeficiente de Manning da seção simplificado.

Figura 8 – Representação de seção longitudinal do modelo 1D



Fonte: USACE (2016c)

Desse modo, o programa utiliza, para modelagens 1D, as equações:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} - gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (5)$$

Onde:

Q = Vazão (m^3/s);

A_T = Área total de escoamento (m^2);

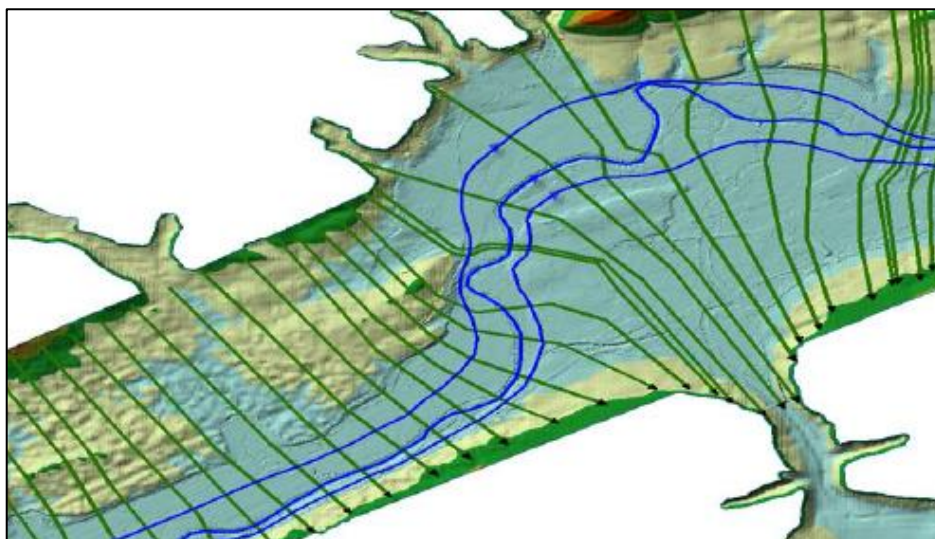
$\frac{\partial z}{\partial x}$ = declividade da superfície d'água (m/m);

q_1 = Vazão lateral de saída (m^3/s);

S_f = coeficiente de atrito.

De acordo com Betsholtz e Nordlöf (2017), esses modelos são sensíveis a pequenas mudanças de parâmetros como espaçamento entre seções, coeficientes de Manning e intervalo computacional, podendo sofrer alterações bruscas com pequenas alterações do mapa. Espaçamentos curtos entre seções originais ou interpoladas podem gerar aproximações superestimadas dos gradientes hidráulicos, enquanto espaçamentos maiores podem ter grandes variações de propriedades hidráulicas, que também causarão instabilidade ao modelo. Desse modo, a modelagem 1D, é realizada para estabilização de determinados parâmetros utilizados em modelagens hidrodinâmicas.

Figura 9 – Representação de seções transversais em modelo 1D



Fonte: USACE (2016c)

Além disso, aponta-se também o baixo tempo de processamento e a demanda de memória para cálculos de manchas em 1D como uma vantagem de se utilizar o modelo para estabilização de parâmetros, embora saliente-se que não são recomendadas para amostragem final de resultados devido a simplificação extrema do escoamento, que pode não ser condizente ao comportamento real de campo (ANDERSSON; BATES, 1993, apud BETSHOLTZ; NORDLÖF, 2017).

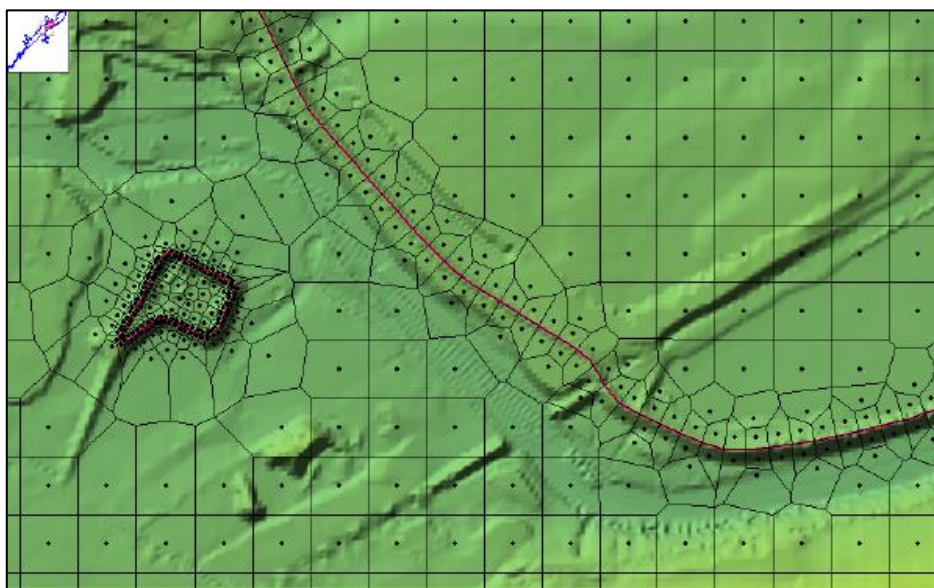
O modelo 1D considera a primeira e a última seções como condições de contorno, onde serão indicados o hidrograma que será defluído e a declividade média do terreno, respectivamente. Outras condições de contorno podem ser adicionadas às seções intermediárias conforme necessidade (identificação de outras barragens ou pontes no curso d'água).

3.3.2 Modelagem bidimensional

De modo semelhante ao modelo 1D, utiliza-se as equações de Saint-Venant para solução da modelagem bidimensional (2D). Esta distingue-se, porém, pelo uso de um algoritmo implícito de solução por volume finito que permite considerar o início da modelagem com canal seco, seguida de uma inundação repentina com maior estabilidade. Além disso, este algoritmo ainda suporta regimes subcríticos e supercríticos e mistos (USACE, 2016a).

O escoamento é calculado dentro de um limite de malha que pode ter tamanhos e formatos variados. A formação desses polígonos prioriza a criação de células ortogonais que se comunicam entre si de maneira mais eficaz e requerem menor capacidade de processamento, no entanto, a malha suporta polígonos de três a oito lados, que podem causar maior instabilidade e tornar o processamento mais lento (USACE, 2016a).

Figura 10 - Detalhe de malha de escoamento 2D



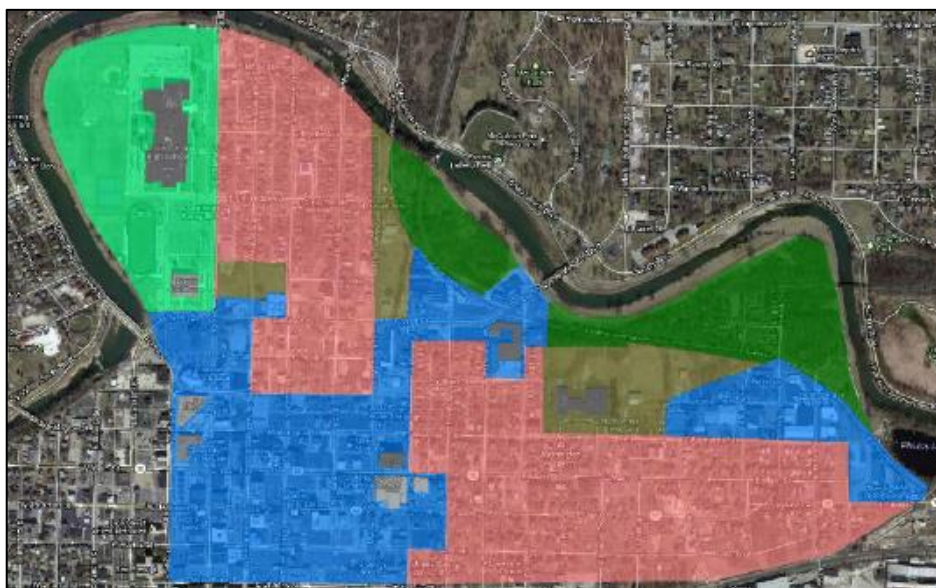
Fonte: USACE (2016a)

Diferente da modelagem 1D, as condições de contorno no modelo 2D devem ser desenhadas na malha e definidas de acordo com a necessidade do usuário, devendo existir ao menos uma condição de entrada e uma de saída.

Outro ponto no qual o modelo 2D difere do 1D é na discretização do coeficiente de Manning. O modelo 2D permite a adição de arquivo de delimitação

de polígonos que podem receber, cada um deles, coeficientes distintos de acordo com a característica do uso do solo. Em projetos onde se tem a necessidade de calibração refinada da mancha, essa ferramenta é de extrema importância, uma vez que Pappenberger (2005) aponta que o coeficiente de rugosidade é um dos importantes parâmetros editáveis no processo de calibração que pode influenciar diretamente na representação da área de inundação e demais produtos da modelagem, como profundidade e velocidade da onda.

Figura 11 – Coeficiente de Manning em terreno para modelagem 2D



Fonte: USACE (2016a)

O modelo 2D é indicado para representação de cheias, uma vez que são eventos mais complexos, porém Pappenberger (2005) salienta que o tempo computacional e a capacidade de processamento exigidos é um dos pontos críticos de se trabalhar com esse tipo de modelagem, em especial quando se tem uma malha mais detalhada e de menor dimensão sobre o MDT, e que não necessariamente se traduzirá em uma melhor exposição dos resultados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Para o presente estudo, realizou-se revisão bibliográfica sobre modelagens hidrodinâmicas, em especial, sobre processamento e reamostragem de modelos digitais de terreno, ruptura de barragem e hidrograma resultante, malha de escoamento entre outros. Também se utilizou de dados de barragens de aproveitamento hidrelétrico, cadastradas no órgão fiscalizador responsável, além dos softwares:

- ArcMap 10.3, com extensão HEC-Geo-RAS;
- HEC-RAS 5.0.7.

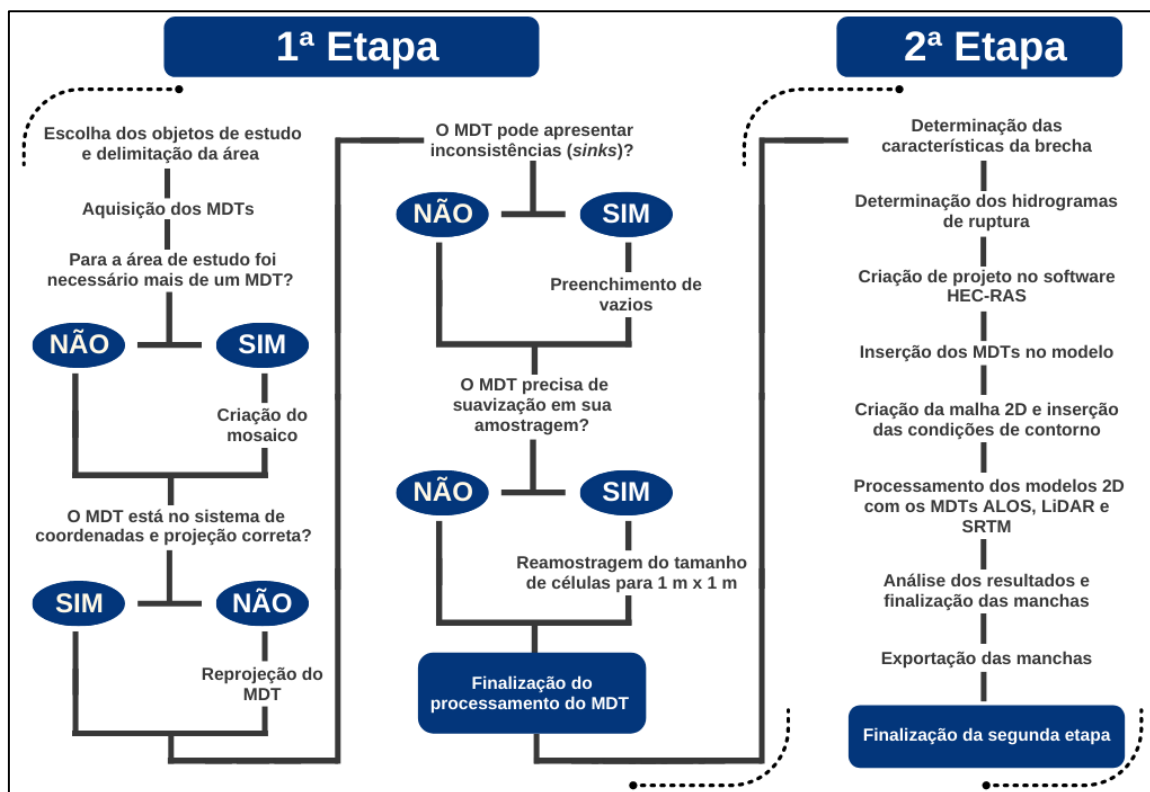
Por fim, foram utilizados os modelos digitais de terreno:

- ALOS PALSAR (precisão vertical de 5 m e resolução espacial de 12,5 m, disponível *online* gratuitamente) (ASF, 2015);
- LiDAR (precisão vertical de 0,10 m e resolução espacial de 0,25 m, disponibilizado gratuitamente pela Geometrisa);
- SRTM (precisão vertical de 16 m e resolução espacial de 30 m, disponível *online* gratuitamente) (USGS, 2021).

4.2 Métodos

O trabalho foi dividido em duas etapas. A primeira delas, consistiu na definição dos objetos de estudo, delimitação das áreas e limites da modelagem, posteriormente, fez-se a aquisição dos MDTs e seu tratamento para inserção na segunda etapa, caracterizada pela modelagem hidrodinâmica. Ambas as etapas foram, no entanto, subdivididas para facilitação do processo. Para a sistematização do processo, criou-se um fluxograma da ordem de atividades para melhor exemplificar o passo a passo utilizado, como apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.1 Delimitação das áreas de estudo

As barragens foram escolhidas de acordo com o Dano Potencial Associado (DPA), uma vez que tal aspecto de classificação está diretamente ligado aos impactos do vale a jusante, razão pela qual o estudo foi proposto. Dessa forma, foram selecionadas duas barragens de cada faixa de classificação de DPA (baixo, médio e alto). A classificação das barragens advém da campanha de fiscalização de barragens do ano de 2020 (ANEEL, 2021). Os dados referentes às barragens são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Características Técnicas das Barragens do Estudo

Barragem	DPA	V (hm ³)	H (m)	L (m)	Q (m ³ /s)	P (MW)
A	Baixo	0,74	8,00	68,00	350,00	2,56
B	Baixo	22,63	14,20	1012,00	530,00	120,00
C	Médio	6,35	10,00	356,00	482,50	15,10
D	Médio	8,77	12,00	630,00	340,00	21,60
E	Alto	1,84	10,40	210,00	431,00	16,20
F	Alto	0,13	5,00	25,00	158,00	3,80

Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo:

- V = Volume máximo do reservatório;
- H = altura da barragem;
- L = comprimento da barragem;
- Q = vazão de projeto dos vertedouros;
- P = Potência instalada.

Os limites da área de estudo foram então definidos, seguindo-se a recomendação do Volume IV do Guia do Empreendedor sobre Segurança de Barragens da ANA, que determina que "Os critérios mais adequados para a fixação da fronteira de jusante são os que se baseiam nas fronteiras físicas, ou seja, a foz do rio no oceano, a seção de confluência com outro rio de maior dimensão ou um reservatório a jusante" (ANA, 2016). Ainda, segundo ANA (2016), o limite da área de estudo pode ser definido também em uma seção na qual a onda de inundação apresente características de uma cheia natural, como a defluência da capacidade do vertedouro do empreendimento.

Posterior à determinação dos critérios de início e parada, criou-se uma delimitação lateral do terreno, além da qual acreditava-se que a água poderia chegar, de modo que não houvesse extrapolação para além da área estabelecida. O critério inicial, contando-se a partir das margens do rio, foi de 500 metros, podendo a curva ser deslocada mais próxima ou mais distante, de acordo com a declividade do terreno. As áreas foram então determinadas e seus limites estabelecidos para cada uma das barragens.

4.2.2 Aquisição dos modelos digitais de terreno

Findo o processo de determinação das áreas de estudo, começou-se a aquisição dos MDTs do SRTM, ALOS e LiDAR, sendo o último disponibilizado pela empresa Geometrisa – Segurança de Barragens.

Os dados SRTM estavam disponíveis na página online da USGS (*United States Geological Survey*), com precisão de até 30 m para a região da América do Sul. Ao entrar no endereço eletrônico, foi realizado o *login*, e em seguida buscou-se pela área de interesse inserindo um arquivo georreferenciado da região nos

formatos .kml ou .shp. Após a definição da área, escolheu-se o produto de interesse na opção "Digital Elevation", na qual pode-se ver o subitem SRTM. Para o estudo, foram adquiridos os dados referentes ao item "SRTM 1 Arc-Second Global" no formato GeoTIFF. A base de dados é disponibilizada gratuitamente pelo órgão.

Os dados provenientes do satélite ALOS, foram processados e distribuídos pela ASF (*Alaska Survey Facility*) e disponibilizados por eles em plataforma online. De maneira semelhante aos dados SRTM, fez-se cadastro e login no site e pode-se encontrar os produtos para a região escolhida com a inserção de arquivos .kml ou .shp para filtragem de produtos. Escolheu-se os produtos "High-Res Terrain Corrected", que oferecem MDTs de até 12,5 m de precisão.

Os dados LiDAR foram disponibilizados pela Geometrisa e previamente processados por empresa especializada em geoprocessamento, de modo que esse produto foi adquirido em sua versão final com precisão de 10 cm e tamanho de pixel de 2,0 m.

4.2.3 Processamento dos modelos digitais de terreno

Os modelos provenientes do SRTM e ALOS extrapolavam a área de estudo, uma vez que a carta é feita em uma área quadrada de maior dimensão. Houve, no entanto, situações em que esta não englobou completamente a área de estudo, devendo-se, portanto, juntar dois ou mais produtos a fim de se ter a área desejada. Para isso utilizou-se a ferramenta "*mosaic to new raster*", em software SIG. Esse processo ocorreu com os MDTs das barragens A, B, C, D e F para os dados SRTM e barragens B e F para os dados ALOS. Para MDTs provenientes do sensoriamento LiDAR esse processo não foi necessário.

Segundo Oliveira et al. (2010), os dados SRTM podem apresentar falhas nas elevações de terreno, com valores de células extrapolados em picos ou depressões, de modo que para aplicações em modelos hidrológicos podem prejudicar o escoamento, sendo necessárias correções. Desse modo, utilizou-se o processo de preenchimento dessas falhas com o comando "*fill*" para continuidade do estudo. O processo foi realizado também para dados do ALOS, cuja necessidade foi apontada por Carvalho (2014).

Segundo Kitts et al. (2020), quanto mais detalhada é a apresentação do terreno, maior é a suavidade do escoamento, que produz menores erros de continuidade da mancha e valores menos extrapolados de velocidade, podendo melhorar a previsão de cheias e alagamentos. Além disso, há maior facilidade na calibração dos modelos, que seguem de maneira mais eficiente os coeficientes de rugosidade do solo impostos. Ressalta-se que o método não muda a precisão do modelo, mas produz uma malha mais suavizada que pode trazer benefícios à modelagem. Dessa forma, optou-se por reamostrar os dados dos MDTs provenientes dos satélites SRTM e ALOS em células de 1 m x 1m.

Para o processo de interpolação, escolheu-se realizar a transformação do *raster* para a *tin* (*Triangulated Irregular Network*), que segundo Viviani e Manzato (2005) faz a representação do terreno em 3D por interpolação entre vértices, que são os pontos do MDT, gerando um terreno triangulado, sendo seus polígonos mais próximos possíveis a um triângulo equilátero. Com o terreno interpolado, seguiu-se então o passo de transformação da *tin* gerada para um novo *raster* com tamanho de célula de 1 m x 1 m.

Após as interpolações e tratamentos dos MDTs, a fim de diminuir a demanda de processamento de terreno no software de modelagem, extraiu-se as áreas excedentes dos terrenos, com base nos limites estabelecidos previamente, de modo que se obtivesse apenas regiões adjacentes ao curso hídrico de interesse.

Com a finalização do processamento, foram gerados os terrenos para posterior utilização em software de modelagem hidrodinâmica. Comparou-se então os resultados das elevações máximas e mínimas dos terrenos para cada uma das áreas de estudo.

4.2.4 Determinação dos hidrogramas de ruptura

Para a simulação da onda de inundação, devem ser considerados parâmetros de início e final na modelagem. O primeiro, também chamado de condição de montante, deve ser considerado como o hidrograma de ruptura da barragem. Para seu cálculo, são necessárias primeiramente as características da brecha de ruptura, que são ligadas diretamente as características de construção da barragem, levando em consideração altura do barramento, material de construção e volume do reservatório.

De início, calculou-se as características de base, definida de acordo com o material da barragem, a altura da brecha, seguindo-se para o tempo de ruptura possibilitando assim o cálculo de vazão máxima, com base nas Equações 1,2 e 3, respectivamente. A ela se acresceu o valor da vazão de projeto do vertedouro, compondo por fim, a vazão de pico do hidrograma. Com todos os valores calculados, definiu-se o estilo de simplificação do hidrograma para além do tempo de discretização das vazões, de forma que ao final obteve-se a tabela do hidrograma. As características calculadas da brecha foram apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características da brecha por barragem

Barragem	Hbar (m)	Vres (hm ³)	Bbre (m)	Hbre (m)	Trup (h)	Qp (m ³ /s)
A	8,00	0,74	20,00	4,00	1,51	622,00
B	14,20	22,63	35,50	12,70	2,35	3261,38
C	10,00	6,35	25,00	10,00	1,44	2565,33
D	12,00	8,77	30,00	12,00	1,43	2013,62
E	10,40	1,84	27,00	5,20	1,09	879,42
F	5,00	0,13	12,50	5,00	1,00	395,58

Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizou-se desses resultados e da equação de hidrograma parabólico, para que fossem possíveis as gerações dos hidrogramas de defluência da brecha calculada. Os resultados foram, então, amostrados em tabelas e foram gerados gráficos que representam a onda de cheia provocada. Os hidrogramas constituíram parte da modelagem, sendo as condições de montante dos escoamentos.

4.2.5 Modelagem hidrodinâmica

Utilizou-se o software HEC-RAS para as modelagens hidrodinâmicas, na versão 5.0.7. Primeiramente, criou-se o projeto para os barramentos e definiu-se o sistema de coordenadas para cada um deles. Com auxílio da plataforma SIG do HEC-RAS, importou-se então os MDTs que serviram de base para as modelagens das barragens.

Finalizadas as importações dos MDTs, seguiu-se para a construção das geometrias do escoamento. A modelagem 2D é feita a partir da construção de um polígono que delimita as margens externas da malha de escoamento. Essa malha pode ter tamanhos variados de célula que, em geral, possuem quatro lados iguais, podendo apresentar até oito lados, sendo estes menos estáveis devido ao maior número de iterações com células vizinhas para realização dos cálculos.

Uma malha é mais simplificada e eficiente quando se tem suas células ortogonais e uniformes. Monteiro (2015) aponta que malhas de 20 m de lado tendem a ter resultados com pouca difusão numérica e que, apesar de aparecerem oscilações, estas ainda não são expressivas, podendo-se utilizar esse valor para sua construção. Malhas menores podem ser utilizadas e apresentam oscilações inferiores, porém têm maiores demandas de processamento e tempo de cálculo. Optou-se, portanto, pela utilização de malhas de 20 m x 20 m.

Foram, então, adicionadas as *BC Lines*, que são elementos com os quais se definem as condições de montante e jusante, no início e final da malha, respectivamente. Adicionou-se, a montante, os hidrogramas de ruptura de cada barragem e, ao final, a declividade média do canal, obtida a partir do perfil longitudinal do modelo LiDAR. A obtenção da declividade média do canal foi possível pelo desenho do perfil longitudinal do curso d'água, de modo que o software realizou o cálculo do desnível do terreno dividido pelo comprimento da linha.

Para este estudo, não foram realizados levantamentos de campo e não foram encontradas literaturas que apontassem dados dos coeficientes de rugosidade dos rios e margens das áreas estudadas, não sendo possível realizar a calibração das modelagens com dados de campo. Valeu-se, portanto, dos coeficientes médios apontados pela ANA (2018), de modo que se fez uma

simplificação desses valores, considerando-se um valor único para a calha do rio e outro para as margens, que em sua maioria são compostas por vegetação alta. Além das calibrações, recomenda-se realizar também a estabilização do modelo, definindo o tempo computacional de cálculo que mais se adeque a ele de modo a gerar menores erros e maiores estabilidades para este.

Optou-se por padronizar também os valores de estabilização dos modelos, para que todas as modelagens tivessem o mesmo intervalo computacional e intervalo de saída dos resultados, tendo assim processamento similar e a mesma discretização de resultados finais, em especial das manchas de tempo de chegada de onda, discretizada de 5 em 5 minutos. Cada barragem teve os parâmetros de modelagem dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições de contorno das modelagens

Barragem	A	B	C	D	E	F
Declividade média do terreno (m/m)	0.00125	0.0035	0.0039	0.0046	0.018	0.0034
Coefficiente de rugosidade da calha do rio	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
Coefficiente de rugosidade das margens	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
Intervalo computacional (s)	10	10	10	10	10	10
Intervalo de saída de dados (min)	5	5	5	5	5	5

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.6 Finalização do processamento e análise das manchas

Com a finalização do processamento, as manchas foram exportadas em formato .tif para análise em software SIG, onde foram obtidas as informações de área máxima inundada, e profundidade máxima, além de serem construídas 10 seções ao longo de cada curso, das quais foram analisadas profundidade máxima, velocidade máxima e tempo de chegada da onda.

Finalizado o processo de análise das manchas e extração de resultados, foram então elaborados mapas comparativos, de velocidade e profundidade, além de um terceiro onde houve a sobreposição dos perímetros de inundação gerados dos MDTs para cada uma das barragens estudadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Processamento do MDT

Os resultados foram analisados em etapas de modo que, inicialmente, foram feitas observações sobre possíveis inconsistências nos MDTs que pudessem gerar erros ou instabilidades nas modelagens. Buscou-se por variações de elevação que pudessem representar estruturas construídas ou relevos naturais, como cachoeiras.

As análises foram feitas também através de mapas gerais, que serviram de auxílio para demonstração do refinamento do terreno. Apresenta-se o resumo de cotas máximas e mínimas dos MDTs para comparação facilitada dos modelos, na Tabela 4.

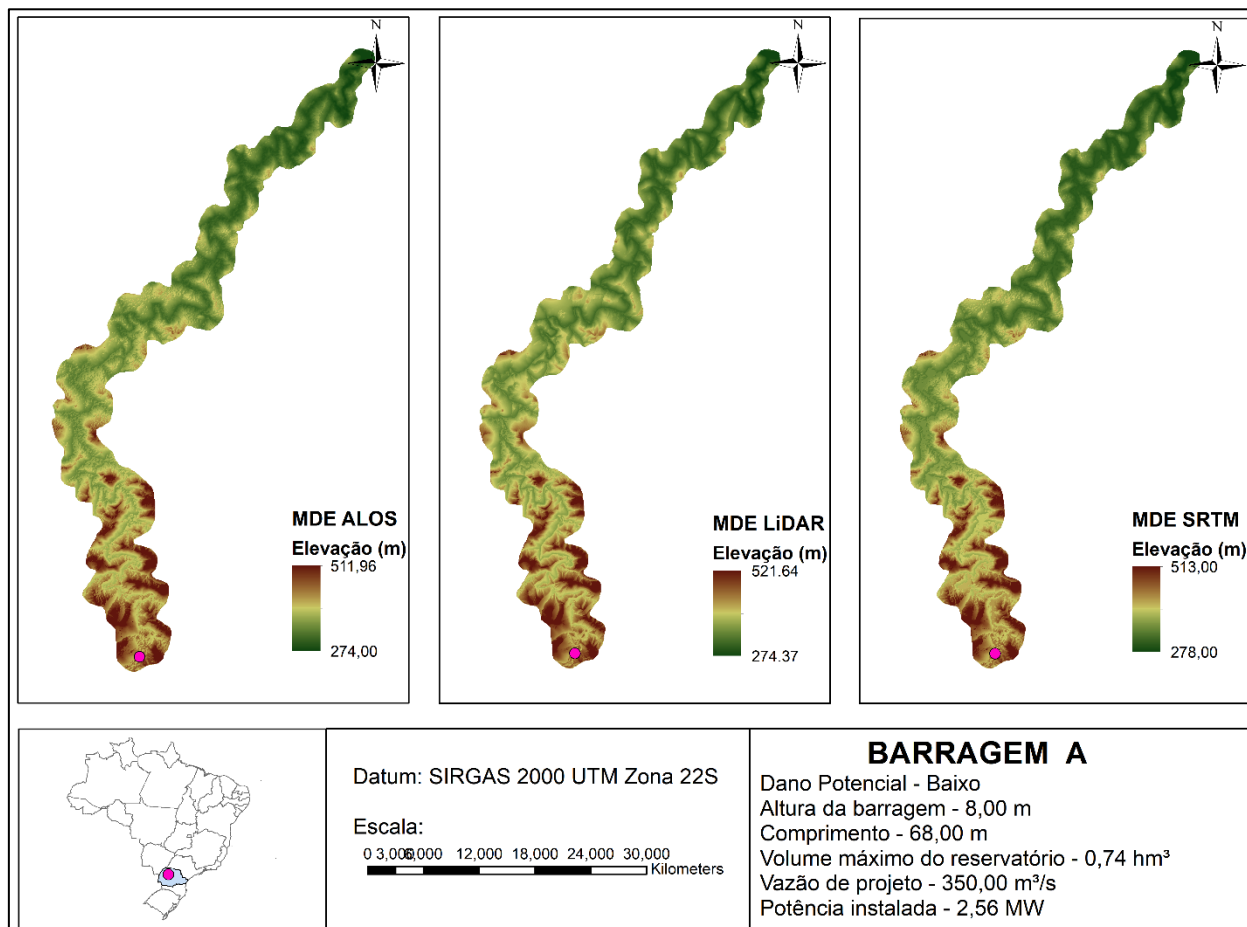
Tabela 4 – Cotas máximas e mínimas observadas dos MDTs

Barragem	Cotas mínimas (m)			Cotas máximas (m)		
	ALOS	LiDAR	SRTM	ALOS	LiDAR	SRTM
A	274,00	274,36	278,00	511,96	521,64	513,00
B	213,00	216,71	227,00	497,00	496,56	511,956
C	274,00	274,47	278,00	622,00	616,50	621,99
D	460,00	448,53	464,00	577,00	572,31	578,99
E	466,00	459,04	461,06	790,00	791,66	787,99
F	834,00	833,18	840,10	1116,96	1116,42	1118,99

Fonte: Elaborado pelo autor

Mostra-se então, na Figura 13, o mapa referente à elevação das representações de terreno da barragem A.

Figura 13 - Mapa dos Modelos Digitais de Terreno Referentes à Barragem A

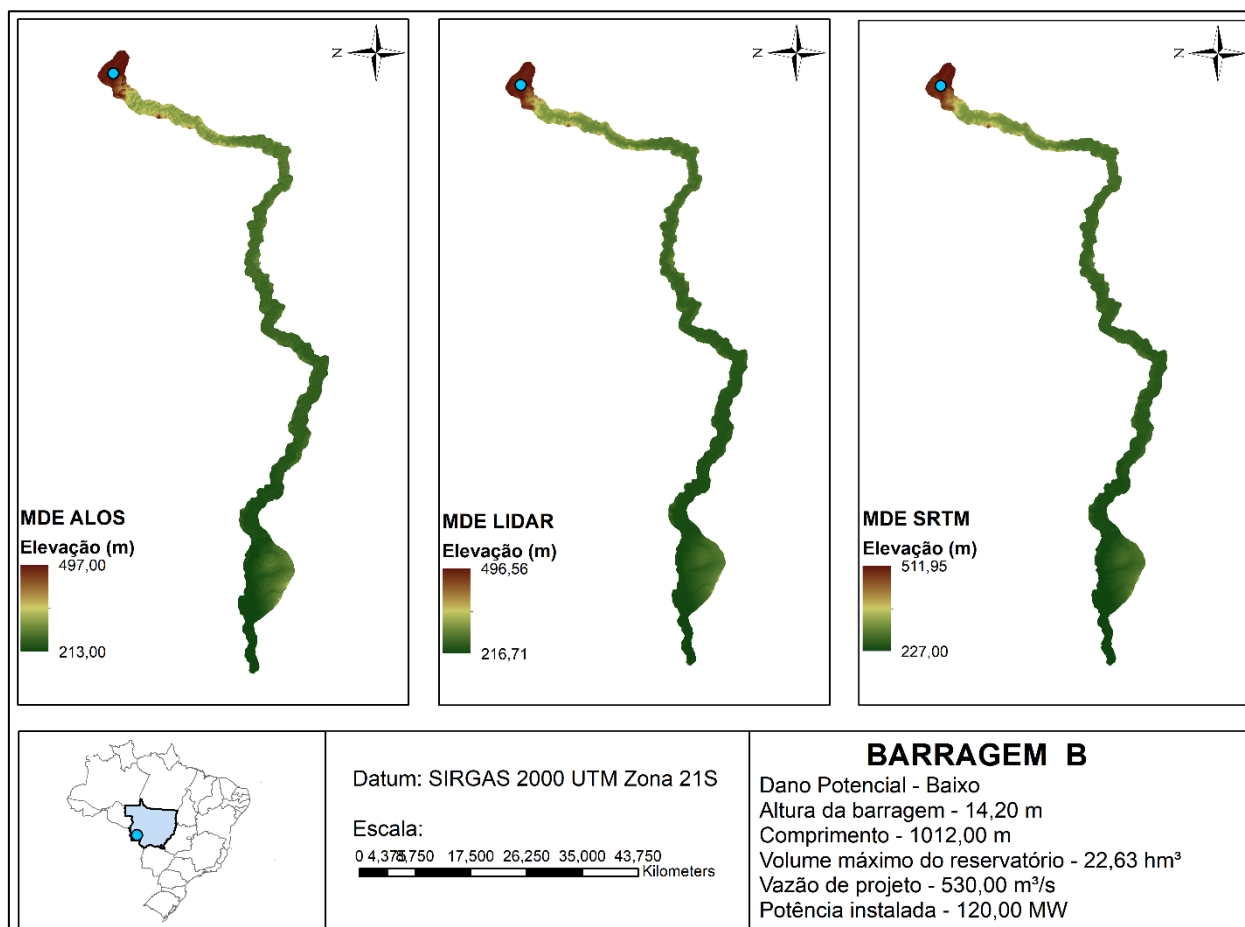


Fonte: Elaborado pelo autor

Os três modelos da barragem A apresentaram-se semelhantes, não sendo observados grandes deslocamentos de pontos. Em relação às cotas, observou-se ainda que, de modo geral, os MDTs apresentam valores satisfatórios, de modo que com exceção do ponto máximo de altimetria do ALOS, que apresentou diferença da cota máxima próxima aos 10 m, os demais apresentaram variação menores de desvio da precisão vertical, em relação ao modelo LiDAR, que os especificados pelos manuais dos terrenos ALOS e SRTM (5 m e 16 m, respectivamente). Ao longo do MDT LiDAR, observou-se, ainda, a presença de três pontes no curso do rio que podem apresentar problemas para estabilidade do modelo. Essas estruturas não foram observadas nos demais MDTs.

Em seguida, analisou-se os modelos de terrenos da barragem B, representados na Figura 14.

Figura 14 - Mapa dos Modelos Digitais de Terreno Referentes à Barragem B

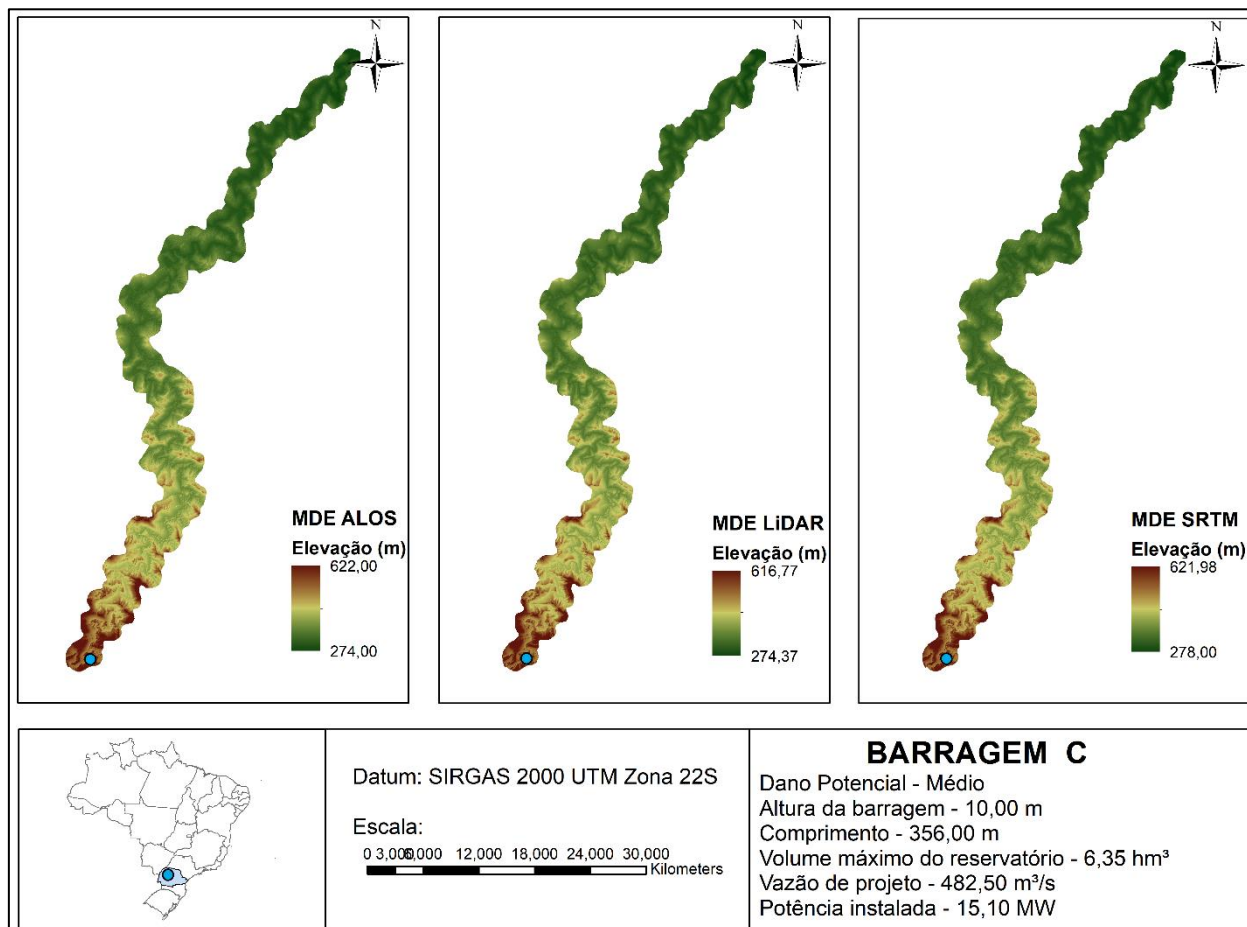


Fonte: Elaborado pelo autor

Para a barragem B percebeu-se os terrenos ALOS e SRTM tiveram valores próximos aos observados com o MDT LiDAR, e suas as variações de alturas máximas e mínimas ficaram próximas do modelo de base. Vale ressaltar que a maior diferença observada entre eles foi de 15,39 m, desvio observado entre os modelos LiDAR e SRTM, porém, a diferença se encontrava dentro do limite esperado de 16 m, como aponta a literatura.

Finalizou-se as considerações acerca dos MDTs da barragem B, e fez-se a análise das representações de terreno referentes à barragem C, representados na Figura 15.

Figura 15 - Mapa dos Modelos Digitais de Terreno Referentes à Barragem C

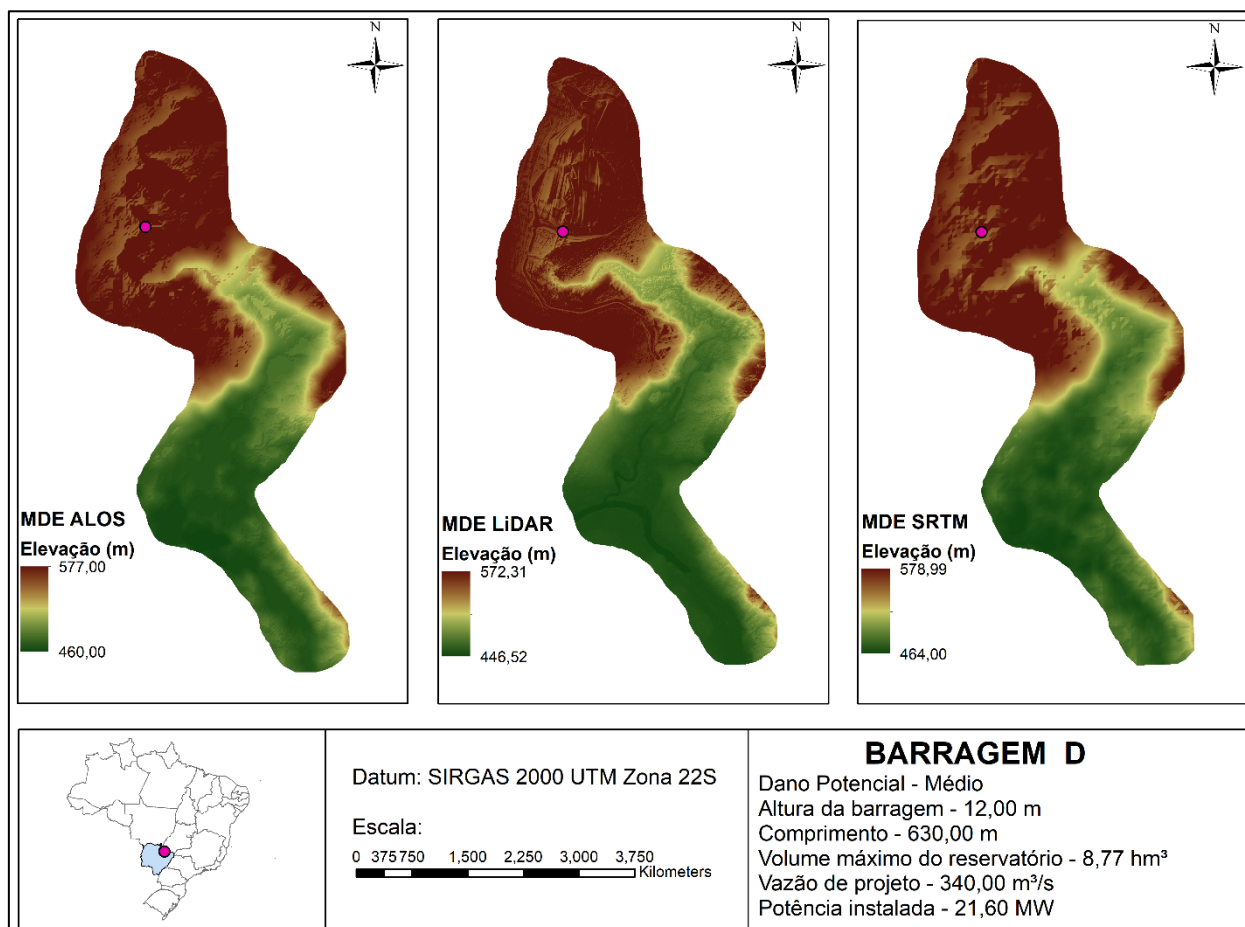


Fonte: Elaborado pelo autor

Para os terrenos da barragem C, observou-se que, em geral, os valores máximos e mínimos dos terrenos ficaram próximos, com desvios dentro do padrão observado em literatura. Apontou-se, no entanto, uma diferença dos valores máximos do MDT ALOS maiores que 5 m em relação ao MDT LiDAR. Esse desvio pode vir das etapas de processamento, nas quais pode-se ter falhas que geram divergências no terreno, de modo que foi realizada uma análise na etapa final das modelagens em que foram apontadas eventuais discrepâncias nas manchas de inundação.

Com o fim da análise dos MDTs da área a jusante da barragem C, foi então feita a análise das representações de terreno barragem D, representadas na Figura 16.

Figura 16 - Mapa dos Modelos Digitais de Terreno Referentes à Barragem D

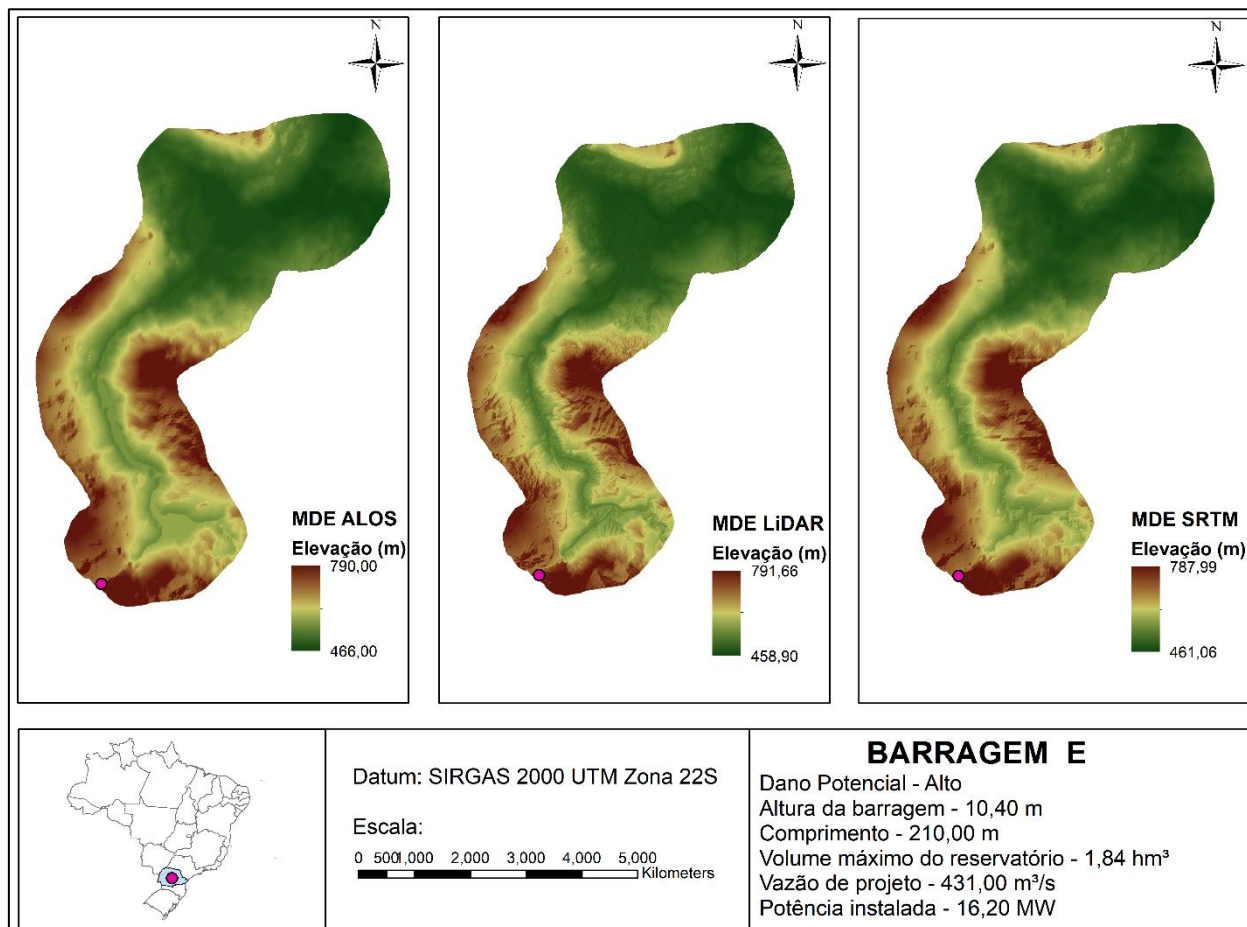


Fonte: Elaborado pelo autor

Para os modelos de terreno da barragem D, percebeu-se desvios maiores que os previstos em literatura para os MDTs ALOS e SRTM, em relação ao modelo base LiDAR, obtendo-se valores de aproximadamente 16,5 m e 17,5 m. De modo semelhante, fez-se uma análise das manchas finais a procura de inconsistências que possam ocorrer na mancha, apesar dos valores poderem representar diferenças nas margens não inundáveis do modelo. Ressaltou-se, ainda, que os valores máximos de altimetria se apresentaram dentro dos desvios esperados.

Em seguida, analisou-se os modelos de terrenos da barragem C, apresentados na Figura 17.

Figura 17 - Mapa dos Modelos Digitais de Terreno Referentes à Barragem E

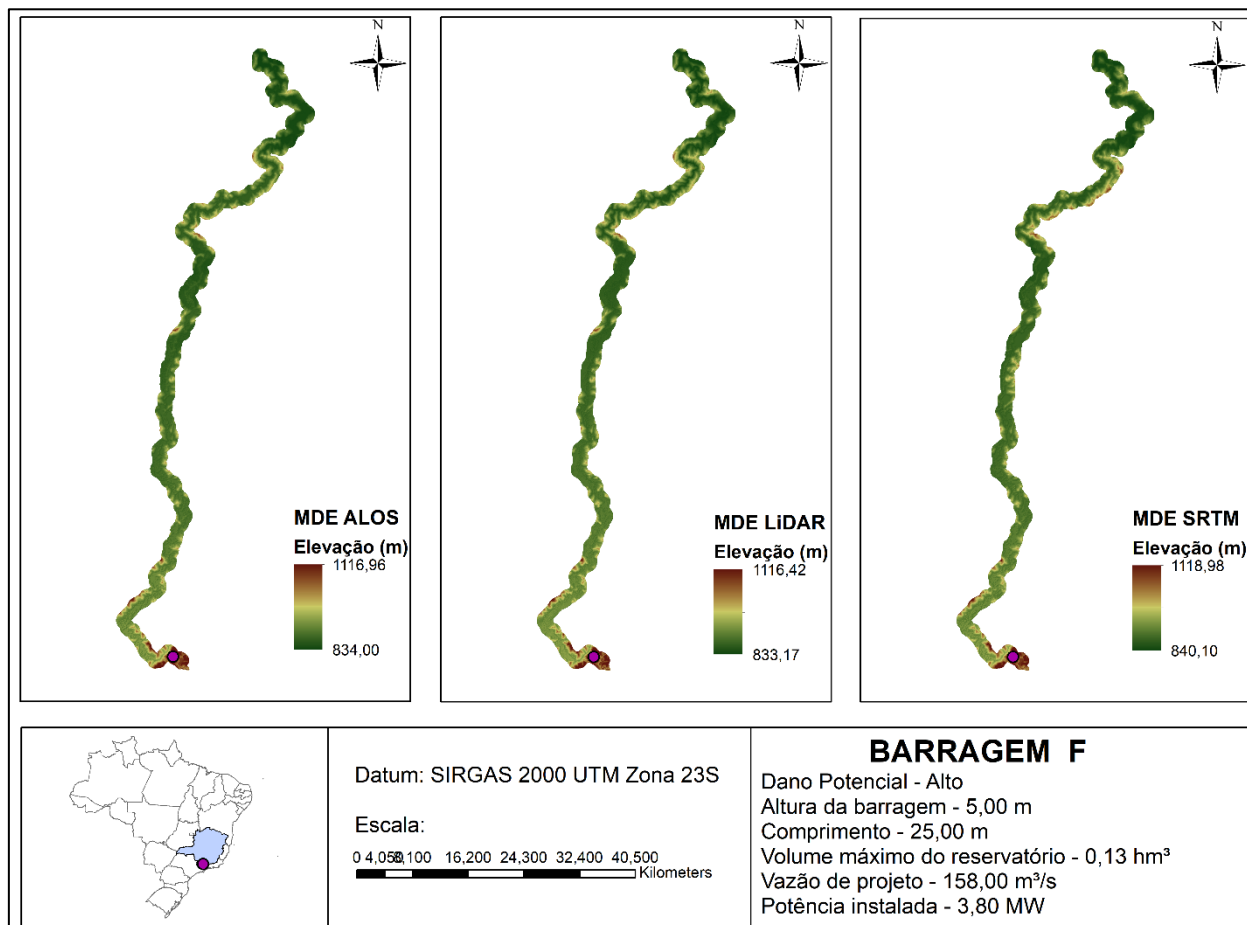


Fonte: Elaborado pelo autor

Observou-se que, em sua maioria, os valores de altimetria máximos e mínimos da área de modelagem referente à barragem E apresentaram-se próximos uns dos outros, e apontou-se apenas a cota mínima do MDT ALOS com desvio de aproximadamente 7 metros. Tal diferença pode ser consequência da falta de batimetria desse modelo, enquanto o modelo LiDAR foi integrado com batimetria, podendo a diferença observada advir deste fato.

Por fim, fez-se a análise das representações de terreno da barragem F, representadas na Figura 18.

Figura 18 - Mapa dos Modelos Digitais de Terreno Referentes à Barragem F



Fonte: Elaborado pelo autor

Os MDTs do vale a jusante da barragem F mostraram-se consistentes, com desvios das cotas máximas e mínimas bem inferiores ao especificado em seus manuais, com uma diferença entre os terrenos LiDAR e SRTM de aproximadamente 7 m. Analisou-se o terreno LiDAR em sua extensão em busca de obstáculos no modelo, de modo que foram encontradas quatro pontes e uma cachoeira. Esses obstáculos não foram observados nos demais modelos.

Foram gerados ainda mapas comparativos dos MDTs de todas as áreas de estudo com maior detalhamento dos terrenos, disponíveis no Apêndice A.

5.2 Hidrograma de ruptura

A partir das características da brecha de ruptura da barragem, foi possível o cálculo do hidrograma parabólico, de modo que se obteve a tabela de vazões por tempo para cada uma das barragens. Esses hidrogramas são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Hidrogramas de ruptura das barragens

Barragem A		Barragem B		Barragem C		Barragem D		Barragem E		Barragem F	
T (h)	Vazão (m ³ /s)	T (h)	Vazão (m ³ /s)	T (h)	Vazão (m ³ /s)	T (h)	Vazão (m ³ /s)	T (h)	Vazão (m ³ /s)	T (h)	Vazão (m ³ /s)
0,10	350,00	0,25	530,00	0,10	482,50	0,25	340,00	0,20	431,00	0,10	158,00
0,20	350,00	0,50	530,00	0,20	482,50	0,50	340,00	0,40	431,00	0,20	158,00
0,30	350,00	0,75	530,00	0,30	482,50	0,75	468,02	0,60	491,26	0,30	158,00
0,40	350,00	1,00	530,00	0,40	577,67	1,00	825,54	0,80	742,97	0,40	173,42
0,50	350,00	1,25	800,12	0,50	722,08	1,25	1124,84	1,00	868,00	0,50	235,21
0,60	350,00	1,50	1203,56	0,60	866,50	1,50	1301,76	1,20	879,42	0,60	291,16
0,70	350,00	1,75	1594,88	0,70	1010,91	1,75	1347,09	1,40	839,15	0,70	336,92
0,80	350,00	2,00	1926,15	0,80	1155,33	2,00	1219,08	1,60	639,96	0,80	369,97
0,90	350,00	2,25	2167,08	0,90	1299,75	2,25	974,28	1,80	431,00	0,90	389,38
1,00	350,00	2,50	2305,59	1,00	1444,16	2,50	704,97	2,00	431,00	1,00	395,58
1,10	350,00	2,75	2344,78	1,10	1588,58	2,75	470,70	2,20	431,00	1,10	374,52
1,20	381,67	3,00	2296,65	1,20	1733,00	3,00	340,00	2,40	431,00	1,20	323,26
1,30	553,70	3,25	2180,33	1,30	1877,41	3,25	340,00	2,60	431,00	1,30	259,14
1,40	622,00	3,50	2015,36	1,40	2021,83	3,50	340,00	2,80	431,00	1,40	195,39
1,50	559,21	3,75	1820,48	1,50	1604,48	3,75	340,00	3,00	431,00	1,50	158,00
1,60	413,41	4,00	1611,81	1,60	776,34	4,00	340,00	3,20	431,00	1,60	158,00
1,70	350,00	4,25	1402,14	1,70	482,50	4,25	340,00	3,40	431,00	1,70	158,00
1,80	350,00	4,50	1200,87	1,80	482,50	4,50	340,00	3,60	431,00	1,80	158,00
1,90	350,00	4,75	1014,29	1,90	482,50	4,75	340,00	3,80	431,00	1,90	158,00
2,00	350,00	5,00	846,06	2,00	482,50	5,00	340,00	4,00	431,00	2,00	158,00
2,10	350,00	5,25	697,84	2,10	482,50	5,25	340,00	4,20	431,00	2,10	158,00
2,20	350,00	5,50	569,73	2,20	482,50	5,50	340,00	4,40	431,00	2,20	158,00
2,30	350,00	5,75	530,00	2,30	482,50	5,75	340,00	4,60	431,00	2,30	158,00
...
40,00	350,00	75,00	530,00	50,00	482,50	10,00	340,00	10,00	431,00	120,00	158,00

Fonte: Elaborado pelo autor

O tempo dos hidrogramas foi prolongado até o final do modelo, para uma duração que se considerava necessária para a chegada da onda de inundação ao final da modelagem. Assim, aquelas com maior comprimento do vale tiveram maiores tempos de duração.

5.3 Manchas de Inundação e Confecção de Mapas

Ao final do processamento hidrodinâmico, as manchas foram exportadas em formato .tif do HEC-RAS para análise em software SIG. Optou-se por fazer dois tipos de análise. Na primeira, considerou-se valores máximos de profundidade e área inundada, sendo então comparados e analisados. Para essa primeira verificação, não foi considerado o parâmetro de velocidade máxima, visto que foram observados, em algumas das manchas, valores discrepantes advindos de instabilidades que tornariam a comparação imprecisa. Apresenta-se, portanto, na Tabela 6 os dados de profundidade máxima e área de inundação das modelagens por barramento estudado.

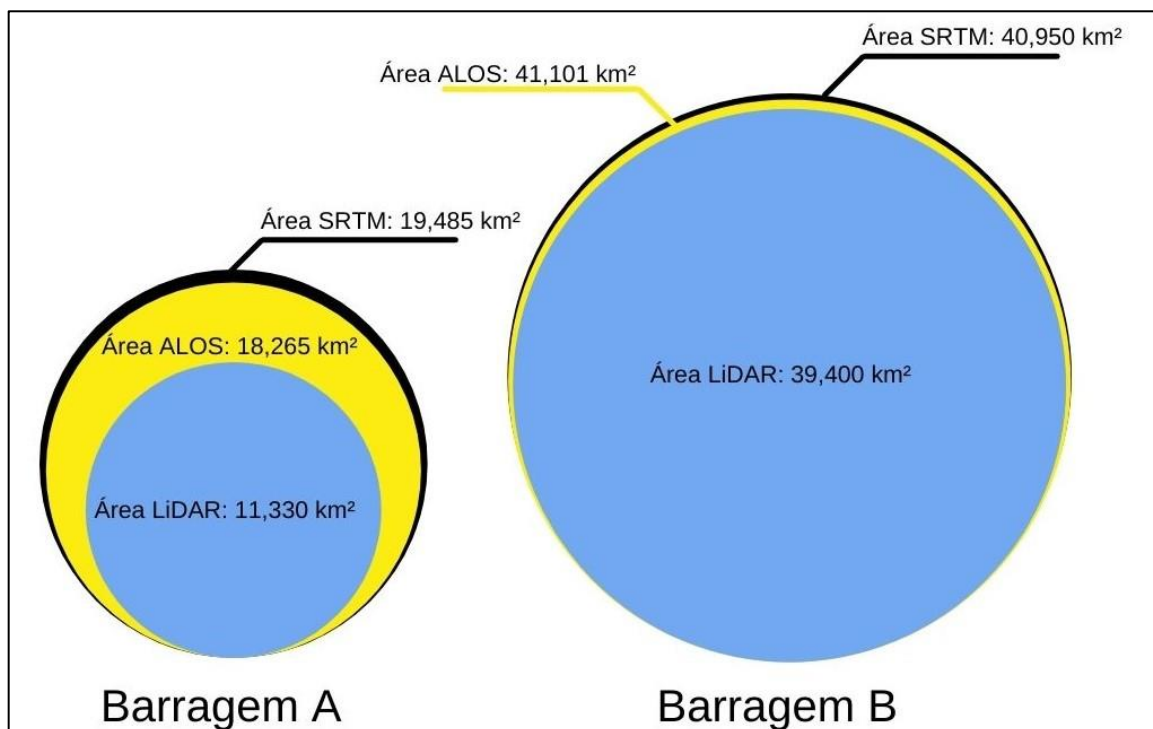
Tabela 6 – Área de inundação e profundidade máximas das modelagens

ALOS						
Barragem	A	B	C	D	E	F
Área inundada (km ²)	18.265	41.101	24.824	0.668	0.908	18.857
Profundidade Máxima (m)	11.68	30.05	19.24	23.38	42.03	10.86
LiDAR						
Barragem	A	B	C	D	E	F
Área inundada (km ²)	11.330	39.400	21.157	0.644	1.063	20.642
Profundidade Máxima (m)	12.49	40.12	32.54	16.75	68.78	13.49
SRTM						
Barragem	A	B	C	D	E	F
Área inundada (km ²)	19.458	40.950	26.401	0.695	0.873	18.79
Profundidade Máxima (m)	6.51	29.67	17.95	24.43	52.79	10.26

Fonte: Elaborado pelo autor

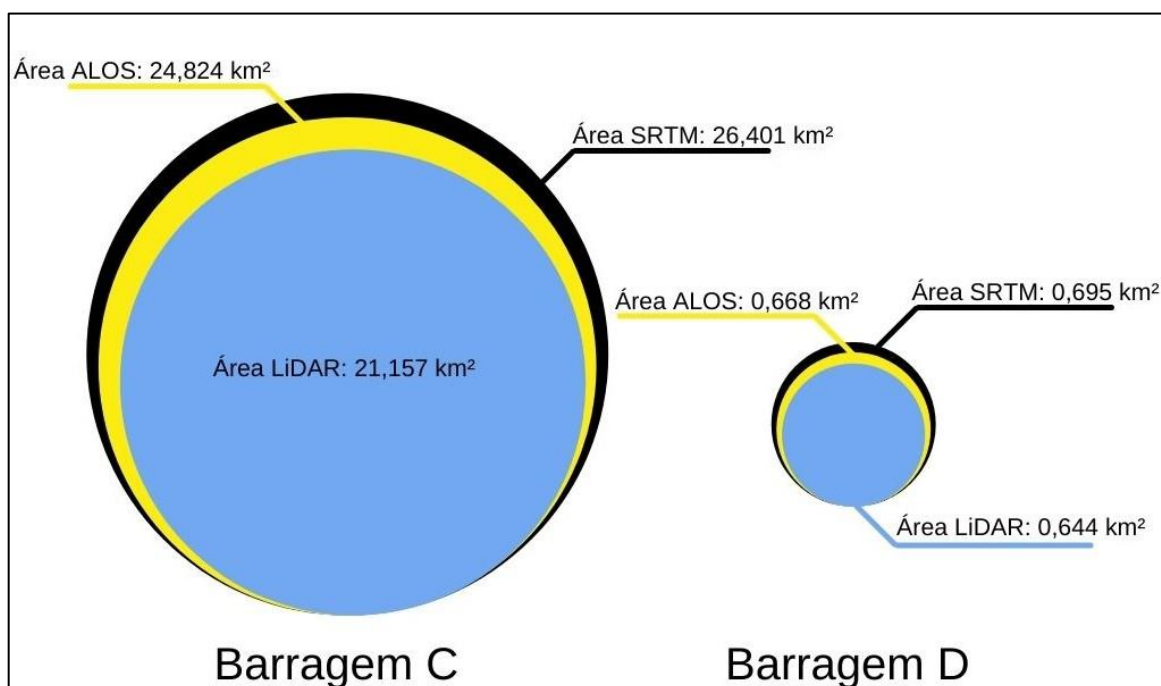
Foram feitos também, gráficos de comparação dos parâmetros máximos de área de inundação e profundidade da água, de modo que fosse possível ter uma visualização dinâmica dos resultados. Mostra-se na Figura 19 um comparativo das áreas de inundação para barragens de Dano Potencial baixo, na Figura 20, para barragens de DPA médio e, por fim, na Figura 21, para barragens de DPA alto.

Figura 19 – Áreas de inundação de ruptura das barragens de DPA baixo



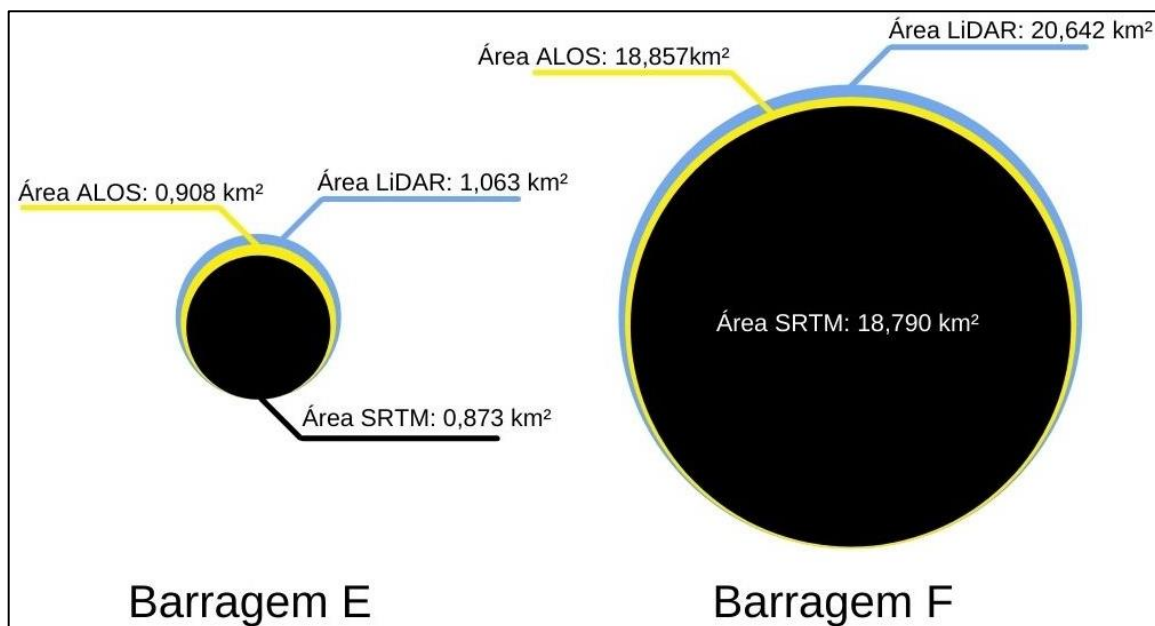
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 – Áreas de inundação de ruptura das barragens de DPA médio



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 – Áreas de inundação de ruptura das barragens de DPA alto



Fonte: Elaborado pelo autor

Comparou-se as áreas de inundação por DPA, nas quais se observou que para barragens de classificação baixa, o modelo LiDAR apresentou áreas menores de inundação, com uma diferença média de 21,05% em relação às modelagens com MDT ALOS e 22,78% em relação ao SRTM.

De modo semelhante, as manchas geradas para barragens de DPA médio apresentaram modelagens com MDT LiDAR com menores áreas de inundação, tendo uma diferença média de 9,18% comparando-se com resultados obtidos com MDT ALOS e 13,60% em relação aos resultados obtidos com modelagem que utilizaram MDT SRTM.

Foram observadas exceções nas modelagens das barragens E e F, cujo DPA foi alto, nas quais as modelagens LiDAR tiveram áreas de inundação maiores em 17,07% e 9,47%, respectivamente, comparando-se com as modelagens com MDT ALOS. Quando se compararam as modelagens advindas de terrenos LiDAR e SRTM, o primeiro apresentou valores de áreas 21,76% e 9,86% maiores que o segundo para os barramentos E e F, respectivamente. Nesse caso, houve uma inversão da tendência, onde o terreno mais preciso apresentou maior área de inundação.

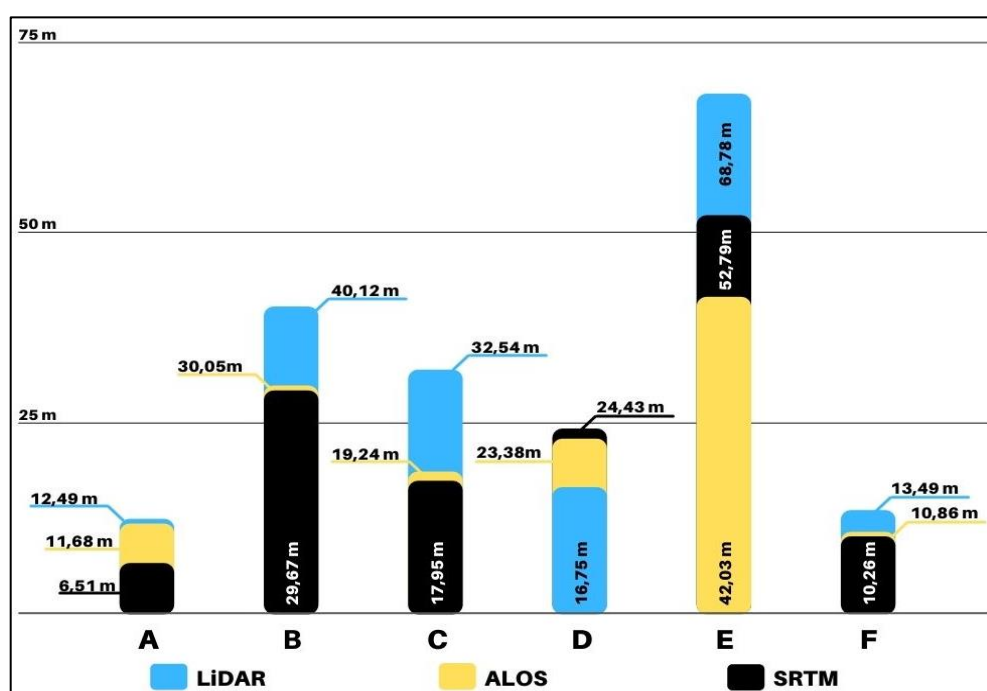
Observou-se, no geral, uma redução média de 5,66% e 6,86% na área de inundação nas modelagens com o MDT LiDAR quando comparado às modelagens

associadas aos MDTs ALOS e SRTM, respectivamente. Destaca-se, ainda, que esse decréscimo da área pode alcançar até 37,97% (LiDAR/ALOS) e 41,77% (LiDAR/SRTM).

Na comparação das áreas, observou-se que ambos os barramentos cuja área de inundação foi maior para terrenos mais precisos eram de DPA alto. Não se pode afirmar, no entanto, que a classificação de Dano Potencial pode estabelecer a tendência de área alagada dos terrenos, podendo a modelagem de outros barramentos ter comportamento inverso, dada a complexidade desses estudos.

Em seguida, foram feitos gráficos que compararam de modo semelhante as profundidades máximas observadas das manchas de inundação. Na Figura 22, mostrou-se os resultados obtidos por barragem para as modelagens, que tiveram comparados seus valores simultaneamente, analisando-se a tendência dos modelos e, naquelas onde foram observados resultados divergentes das demais, fez-se uma análise pontual, para melhor entendimento do resultado.

Figura 22 – Profundidades máximas de lâmina d'água das modelagens



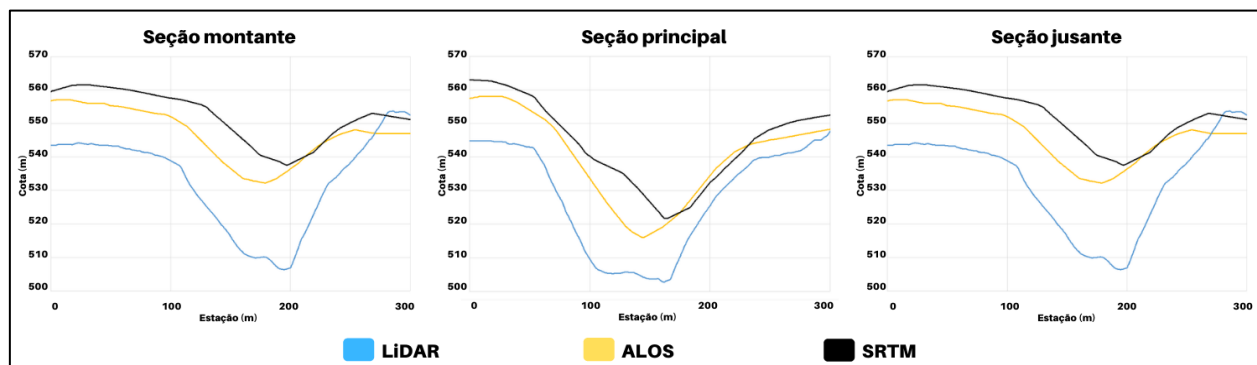
Fonte: Elaborado pelo autor

Em geral, percebeu-se que modelagens realizadas em terrenos com maior acurácia produzem profundidades máximas maiores do que aqueles menos precisos, por terem uma melhor representação do terreno, tendo sua calha mais

“encaixada”. Ressalta-se, porém, que a modelagem da barragem D teve resultado diferente das demais, tendo a modelagem com MDT LiDAR uma diminuição de 28,36% de profundidade em relação ao MDT ALOS e 31,44% em relação ao SRTM. Observou-se também que na modelagem do barramento E, os resultados obtidos com modelo SRTM apresentaram valores de profundidade da lâmina d’água maiores do que aqueles com modelo ALOS.

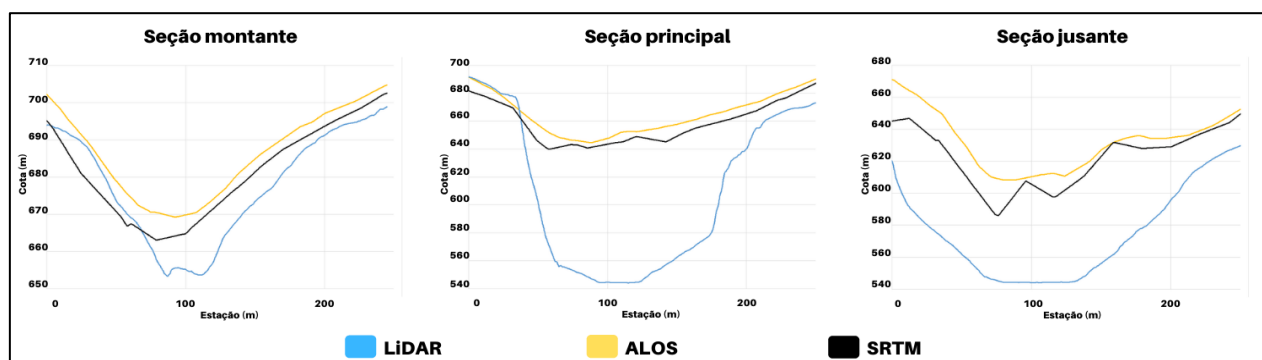
Fez-se, portanto, uma análise da seção dos modelos de modo que se pudesse entender as divergências observadas nas ondas de inundação provocadas pelos hidrogramas dos barramentos D e E. Optou-se por analisar a seção com maior lâmina d’água observada, para que se pudesse entender o comportamento das seções, assim justificando-se o fenômeno. Além disso, foram feitas análises de outras duas seções, uma a montante e outra a jusante da seção escolhida para se ter maior entendimento do comportamento do terreno no trecho estudado. Mostra-se, portanto, na Figura 23 as seções da barragem D, e na Figura 24 as seções da barragem E.

Figura 23 – Seções transversais das seções de interesse da barragem D



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 – Seções transversais das seções de interesse da barragem E



Fonte: Elaborado pelo autor

Em geral, as profundidades nas modelagens com terrenos mais precisos tenderam a ser maiores por terem uma melhor representação do terreno, sendo sua calha mais “encaixada” do que aquelas com menor precisão, que tenderam a espriar a água pela seção, aumentando a área de alague e diminuindo a profundidade.

Para a barragem D, no entanto, ocorreu o inverso. O modelo mais preciso mostrou a seção transversal com uma base mais ampla, com uma ascensão rápida do terreno aos lados, enquanto os outros modelos não foram capazes de representar tal efeito, com uma calha de largura menor, que forçou o escoamento a atingir maiores alturas de lâmina d’água, explicando, portanto, os maiores valores nos modelos menos precisos.

Já para as modelagens da barragem E, notou-se uma queda d’água, ao longo do trecho do MDT LiDAR, de modo que se teve um aumento expressivo do valor de profundidade da água. Tratava-se de um trecho que tinha uma grande depressão natural. Percebeu-se que o MDT SRTM teve melhor representação da queda do terreno em comparação ao MDT ALOS, de modo que o primeiro apresentou valores maiores de altura de lâmina d’água que o segundo, justificando, portanto, o terreno SRTM ter a segunda maior profundidade.

Para as demais barragens, as profundidades máximas de lâmina d’água dos resultados obtidos com modelagem em MDT LiDAR, apresentaram valores até 69,13% maiores em modelo ALOS, com parâmetro de base os resultados de modelagem obtidos a partir do levantamento LiDAR, e até 91,86% maiores em comparações do modelo LiDAR com o SRTM. Esses valores tiveram relação direta com a precisão do modelo, uma vez que calhas do rio mais estreitas e depressões naturais do terreno foram melhores representadas em MDTs mais precisos, que contribuíram para menor espriamento da onda, elevando conseqüentemente a profundidade da água.

Além das comparações entre valores máximos do modelo, foram feitas análises dos parâmetros de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda em seções ao longo do rio, considerando-se 10 seções para cada uma das modelagens, buscando-se ter um espaçamento uniforme entre elas. As seções foram compostas por: a) uma no início da modelagem; b) uma no final e c) outras

oito intermediárias. Os mapas de detalhamento das seções encontram-se no Apêndice B. Optou-se também por padronizar o ponto de obtenção dos resultados na intersecção entre a linha central do rio e a seção transversal. Os resultados por barragem foram mostrados nas Tabela 7 a Tabela 12.

Tabela 7 – Resultados de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda
- modelagens da barragem A

FID	Dist (km)	Profundidade (m)			Velocidade (m/s)			Tempo de chegada (h)		
		ALOS	LiDAR	SRTM	ALOS	LiDAR	SRTM	ALOS	LiDAR	SRTM
1	0,000	1,70	3,45	2,37	3,45	3,59	3,75	0,08	0,08	0,08
2	2,770	3,05	4,69	2,81	3,53	5,46	3,38	0,67	0,50	0,42
3	12,770	4,44	5,29	3,15	1,22	3,10	1,20	5,33	2,00	3,58
4	22,770	4,76	6,14	2,26	4,09	3,72	2,47	10,58	3,58	7,17
5	32,770	4,37	5,17	2,97	1,85	2,77	1,31	15,92	5,08	11,25
6	42,770	3,37	5,19	2,91	2,62	3,59	1,93	22,25	6,83	15,58
7	52,770	1,74	3,03	1,55	2,62	3,48	3,78	27,42	8,50	20,00
8	62,770	2,16	3,44	2,09	0,73	3,08	0,89	33,92	10,25	25,33
9	72,770	2,59	4,41	2,83	0,65	1,91	1,11	39,67	12,08	29,92
10	82,770	2,18	5,39	3,77	4,53	1,31	48,51	45,25	13,92	34,33

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 – Resultados de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda
- modelagens da barragem B

FID	Dist (km)	Profundidade (m)			Velocidade (m/s)			Tempo de chegada (h)		
		ALOS	LiDAR	SRTM	ALOS	LiDAR	SRTM	ALOS	LiDAR	SRTM
1	0,000	5,97	7,68	3,38	25,85	4,61	15,71	0,08	0,08	0,08
2	11,880	1,13	7,57	0,76	0,86	5,09	0,43	2,92	1,33	3,08
3	23,660	4,41	6,80	4,50	1,03	4,04	1,21	4,17	2,92	4,17
4	35,440	Sem dados	6,17	Sem dados	Sem dados	4,22	Sem dados	Sem dados	5,00	Sem dados
5	47,220	2,17	5,45	1,17	0,08	2,39	0,09	10,92	7,25	11,08
6	59,000	3,66	2,79	3,66	0,94	1,21	0,87	16,58	10,25	16,67
7	70,780	3,02	4,79	3,08	1,87	2,71	2,09	22,92	12,33	23,25
8	82,560	3,62	4,11	3,51	0,43	2,71	0,54	28,75	14,83	29,25
9	94,340	4,87	5,37	5,50	0,80	1,22	0,72	38,50	19,67	38,00
10	106,180	2,69	4,10	2,87	3,46	4,26	3,51	49,75	22,50	49,75

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 9 – Resultados de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda
- modelagens da barragem C

FID	Dist (km)	Profundidade (m)			Velocidade (m/s)			Tempo de chegada (h)		
		ALOS	LiDAR	SRTM	ALOS	LiDAR	SRTM	ALOS	LiDAR	SRTM
1	0,000	2,30	12,14	2,15	6,68	18,02	6,33	0,08	0,08	0,08
2	11,030	3,84	11,51	1,23	9,44	7,04	7,14	1,67	1,50	1,67
3	24,029	4,76	11,01	2,25	1,04	4,02	1,15	3,50	3,00	3,33
4	37,028	Sem dados	8,94	4,04	Sem dados	3,27	1,43	Sem dados	4,58	6,08
5	50,026	4,79	9,45	3,68	3,06	6,34	2,47	12,33	6,33	9,83
6	63,025	2,76	6,76	3,08	0,87	11,56	0,70	18,17	8,17	14,17
7	76,024	6,14	6,76	2,64	2,51	3,76	1,88	24,75	10,00	19,33
8	89,023	6,39	5,39	4,30	1,87	2,84	1,02	29,83	12,17	23,83
9	102,021	3,61	5,47	2,52	2,37	2,42	3,21	36,83	14,25	29,92
10	115,020	4,13	6,12	4,01	4,31	1,98	3,74	43,00	16,50	34,83

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 10 – Resultados de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda - modelagens da barragem D

FID	Dist (km)	Profundidade (m)			Velocidade (m/s)			Tempo de chegada (h)		
		ALOS	LiDAR	SRTM	ALOS	LiDAR	SRTM	ALOS	LiDAR	SRTM
1	0,000	5,88	7,52	7,39	2,96	4,44	3,05	0,08	0,08	0,08
2	0,435	3,77	16,15	3,41	12,35	9,59	12,21	0,17	0,08	0,25
3	0,870	8,97	12,97	8,52	18,55	10,74	28,63	0,17	0,17	0,42
4	1,305	8,66	8,96	10,38	13,55	10,84	22,76	1,08	0,25	0,83
5	1,740	2,46	10,84	4,53	11,16	7,67	11,16	1,04	0,33	0,75
6	2,175	8,74	10,36	5,09	37,32	3,99	8,52	1,00	0,33	0,60
7	2,610	5,82	9,23	5,69	7,35	5,81	7,85	0,42	0,33	0,50
8	3,045	5,35	7,15	6,18	2,98	3,80	3,36	0,42	0,42	0,50
9	3,480	4,10	6,81	5,71	1,94	1,95	1,65	0,50	0,50	0,58
10	3,915	5,54	5,12	5,60	5,70	9,59	5,43	0,58	0,58	0,75

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11 – Resultados de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda - modelagens da barragem E

FID	Dist (km)	Profundidade (m)			Velocidade (m/s)			Tempo de chegada (h)		
		ALOS	LiDAR	SRTM	ALOS	LiDAR	SRTM	ALOS	LiDAR	SRTM
1	0,000	4,44	6,40	5,51	7,82	29,81	7,10	0,08	0,08	0,08
2	0,764	8,06	12,09	12,04	9,98	13,30	28,60	0,17	0,17	0,17
3	1,518	3,48	7,81	6,07	6,96	5,79	9,52	0,25	0,25	0,25
4	2,272	5,36	13,53	8,25	2,51	5,40	2,27	0,33	0,33	0,58
5	3,026	Sem dados	15,60	Sem dados	Sem dados	5,46	Sem dados	Sem dados	0,50	Sem dados
6	3,780	13,25	25,45	12,24	93,38	12,18	20,27	0,67	0,58	0,92
7	4,534	4,42	11,33	6,60	2,05	3,80	1,33	0,75	0,75	1,00
8	5,288	Sem dados	6,13	Sem dados	Sem dados	2,95	Sem dados	Sem dados	0,83	Sem dados
9	6,042	2,91	7,83	Sem dados	2,30	4,26	Sem dados	1,00	0,83	Sem dados
10	6,784	2,61	5,40	2,43	3,90	11,22	4,65	1,17	0,92	1,42

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 12 – Resultados de profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda - modelagens da barragem F

FID	Dist (km)	Profundidade (m)			Velocidade (m/s)			Tempo de chegada (h)		
		ALOS	LiDAR	SRTM	ALOS	LiDAR	SRTM	ALOS	LiDAR	SRTM
1	0,000	3,68	4,25	1,27	2,06	3,50	1,71	0,08	0,08	0,08
2	7,030	1,71	3,78	1,54	1,10	0,86	1,12	2,58	1,25	2,75
3	19,081	1,36	3,14	1,31	0,07	0,62	0,08	19,42	3,92	20,50
4	31,133	Sem dados	3,34	Sem dados	Sem dados	0,90	Sem dados	Sem dados	7,83	Sem dados
5	43,184	Sem dados	3,49	Sem dados	Sem dados	0,93	Sem dados	Sem dados	11,00	Sem dados
6	55,235	Sem dados	4,23	Sem dados	Sem dados	0,94	Sem dados	Sem dados	14,75	Sem dados
7	67,286	Sem dados	3,85	Sem dados	Sem dados	0,54	Sem dados	Sem dados	18,58	Sem dados
8	79,338	7,27	4,57	4,61	0,24	0,66	0,36	58,67	22,17	60,25
9	91,389	Sem dados	3,71	3,27	Sem dados	0,95	0,31	Sem dados	26,67	78,67
10	103,440	Sem dados	4,93	Sem dados	Sem dados	0,63	Sem dados	Sem dados	29,67	Sem dados

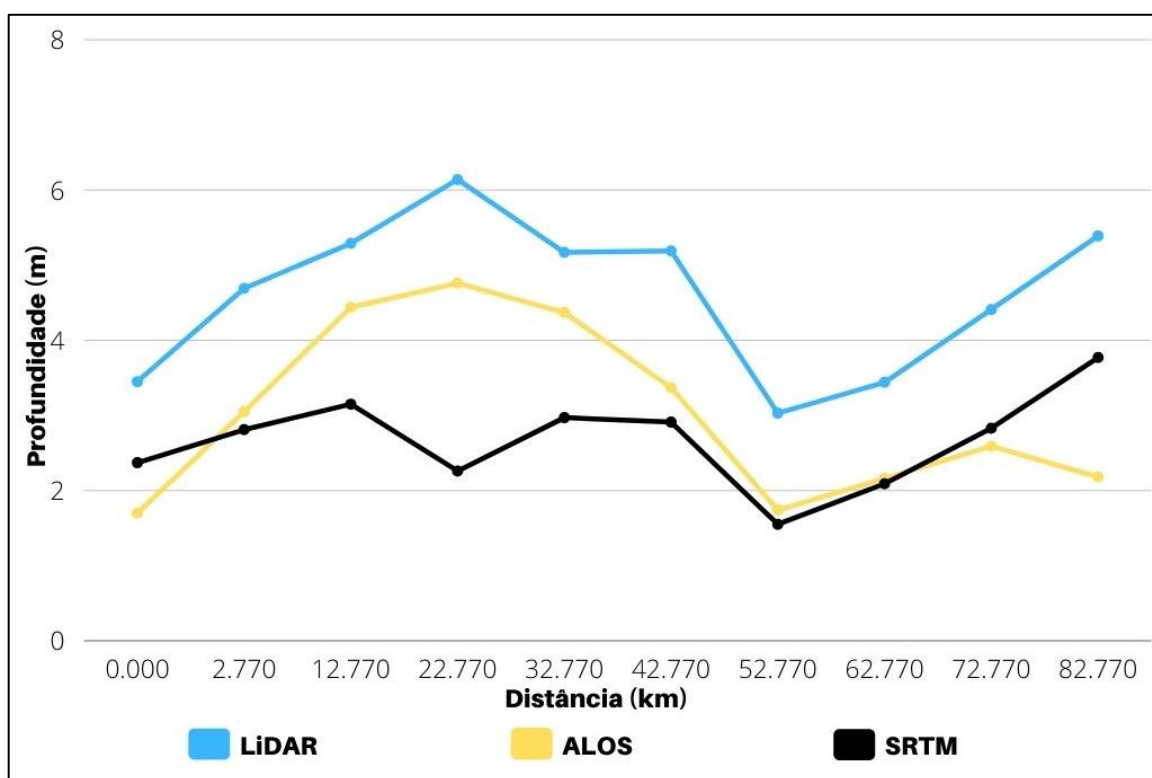
Fonte: Elaborado pelo autor

Observou-se que existem seções nas quais não foram observados dados na intersecção da linha central do rio, nos pontos definidos para obtenção de resultados. Ressalta-se que, nesses casos, os MDTs ALOS e SRTM tiveram um

desvio da área central do rio, por conta de não haver batimetria no curso d'água. Isso fez com que o escoamento preferencial ocorresse por outros caminhos que não a calha principal, que resultou em áreas de alague que não necessariamente corresponderam à área de inundação observada na modelagem obtida a partir do modelo LiDAR. Os mapas de profundidade, velocidade e tempo de chegada de cada barragem foram expostos nos Apêndices C, D e E, respectivamente.

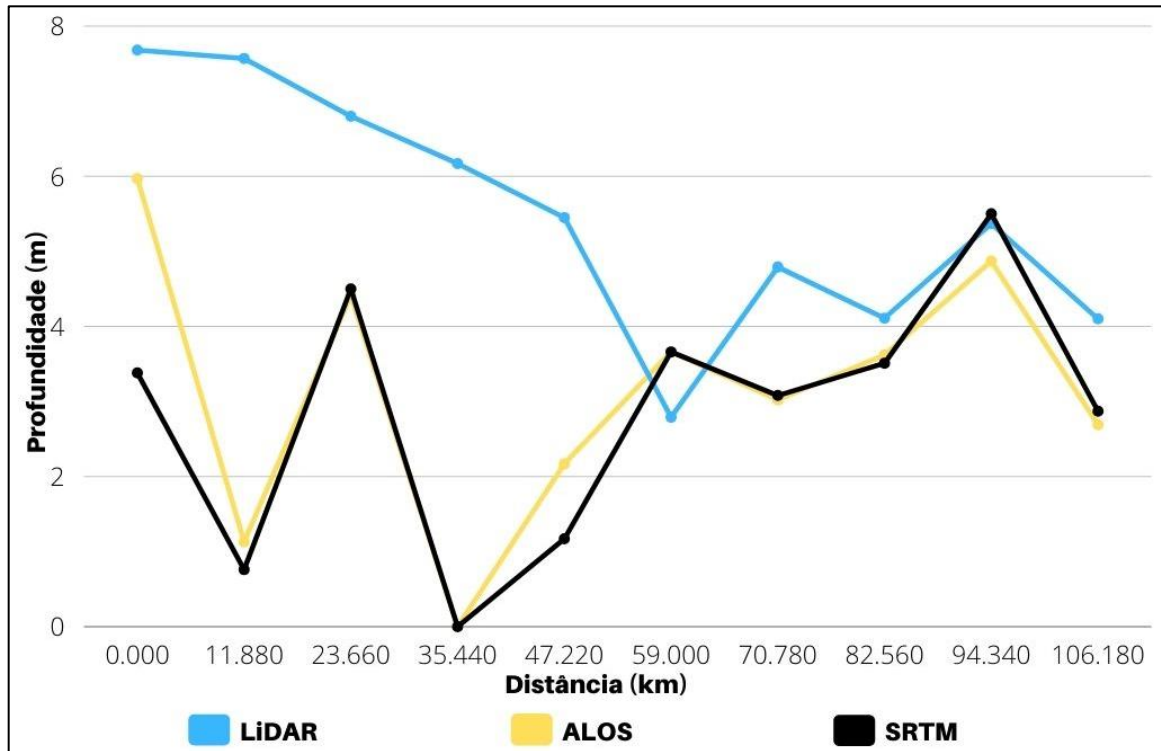
Fez-se, ainda, a análise dos parâmetros obtidos das seções por meio de gráficos, analisando-se a tendência ao longo do rio. Foram feitas comparações de profundidade, velocidade e tempo de chegada de onda pela distância das seções entre os três modelos de terreno de cada barragem simulados. Mostrou-se, portanto, os resultados de profundidade da Figura 25 a Figura 30.

Figura 25 – Profundidade x distância para modelagens da Barragem A



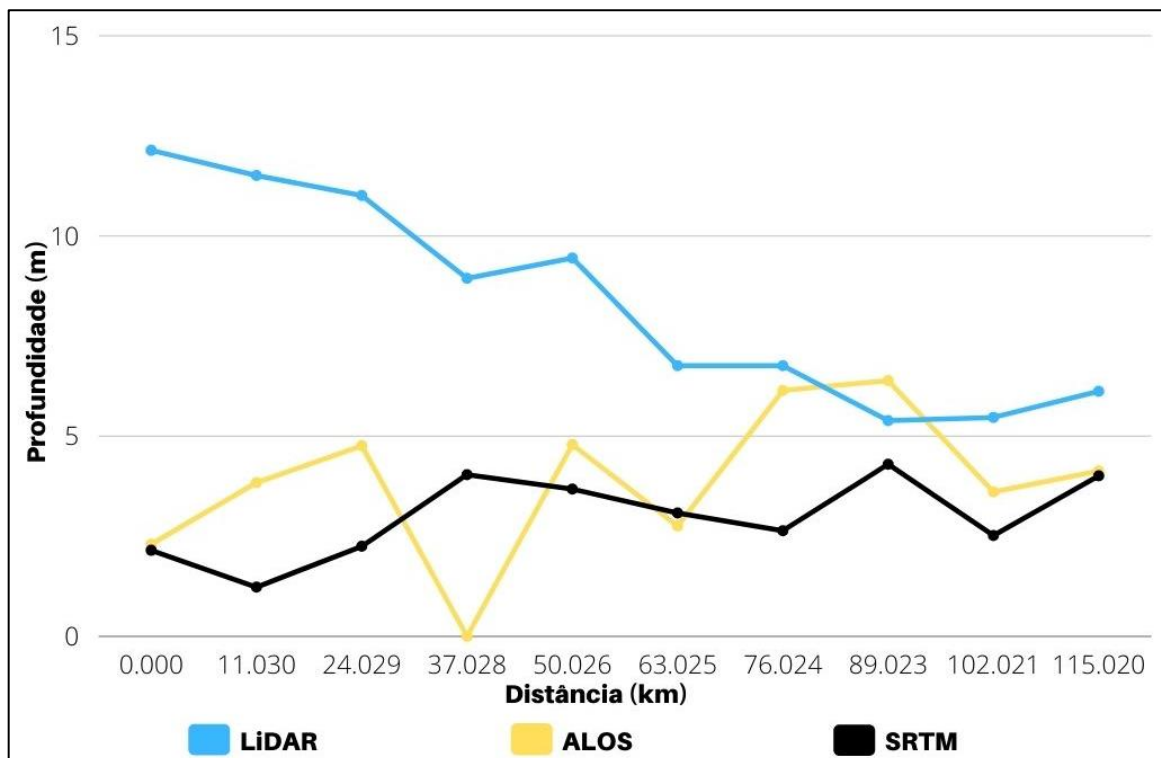
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 – Profundidade x distância para modelagens da Barragem B



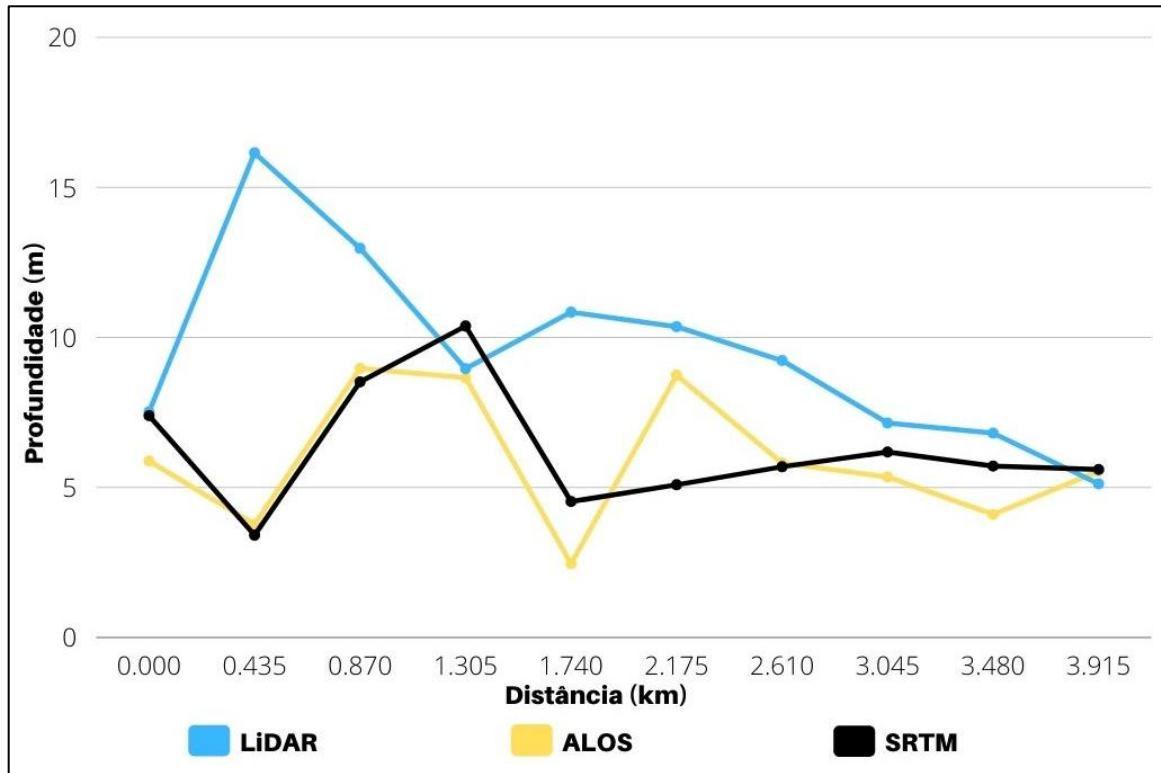
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27 – Profundidade x distância para modelagens da Barragem C



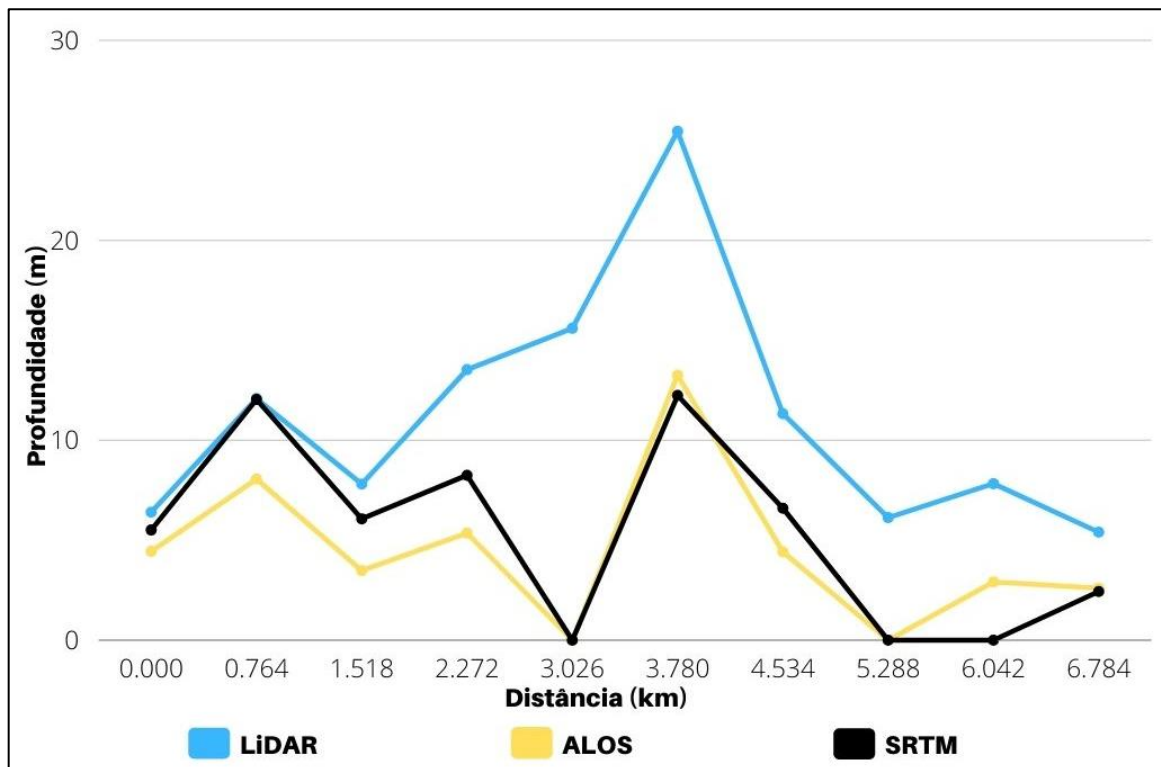
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28 – Profundidade x distância para modelagens da Barragem D



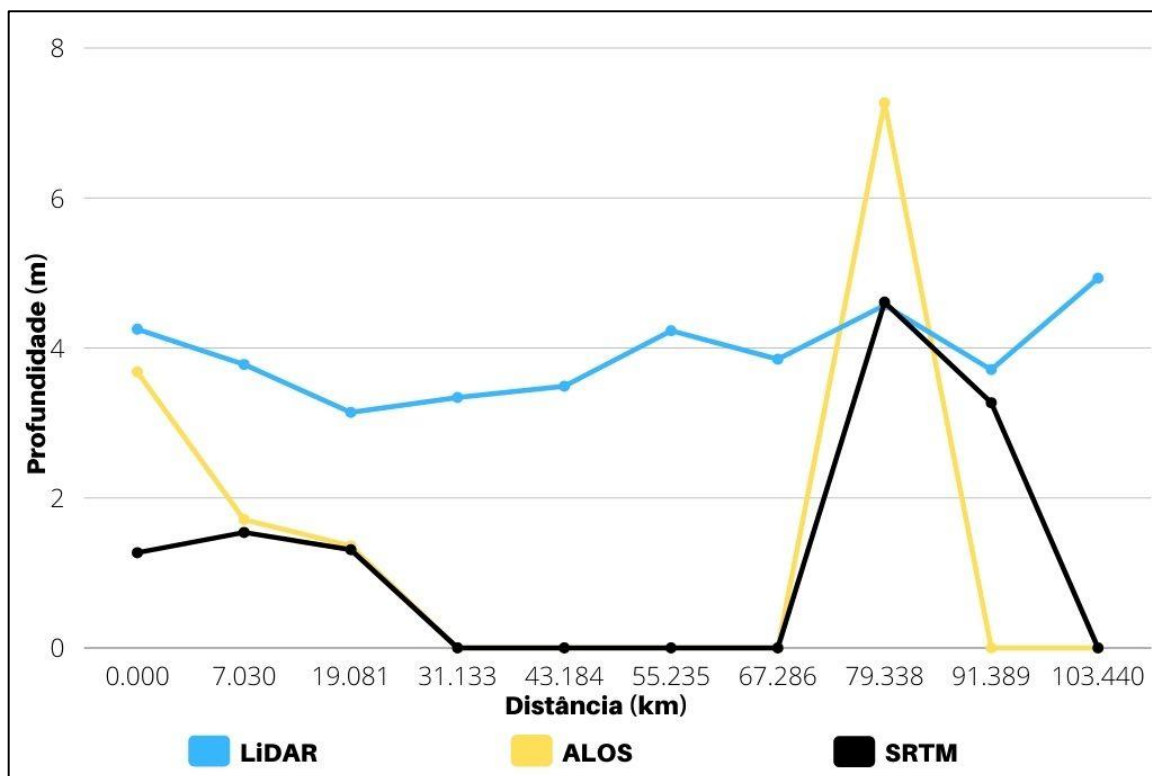
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 – Profundidade x distância para modelagens da Barragem E



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30 – Profundidade x distância para modelagens da Barragem F

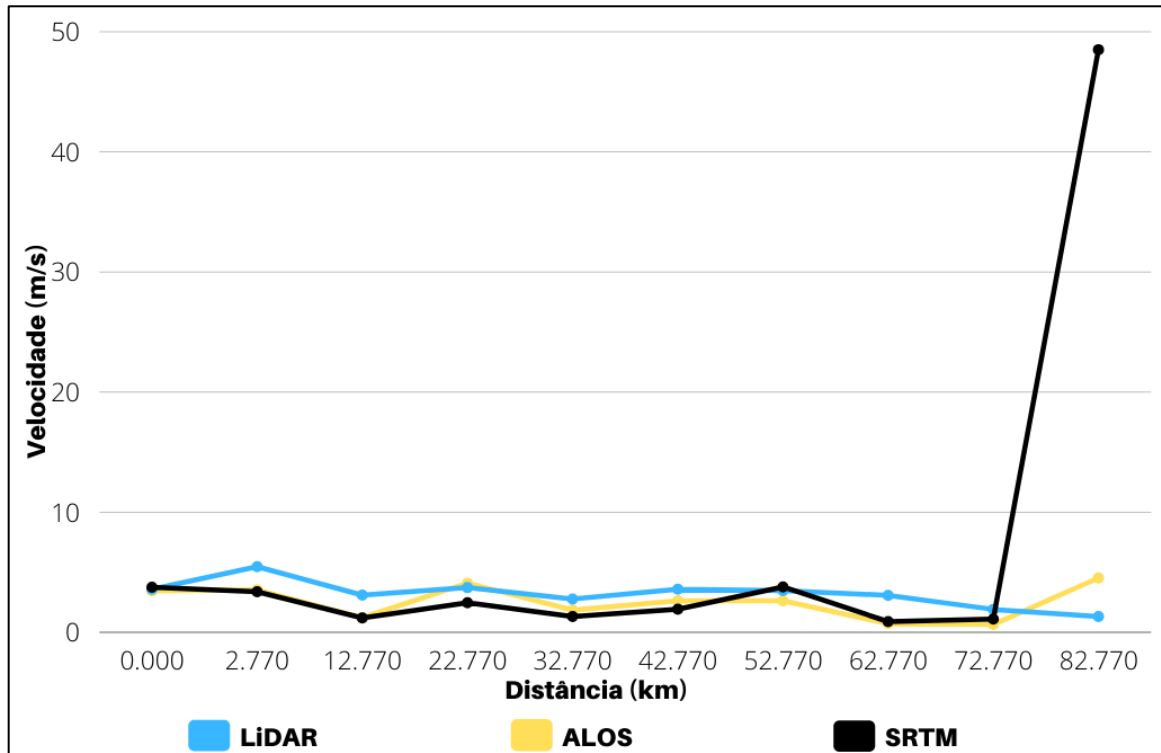


Fonte: Elaborado pelo autor

Observou-se que as profundidades seguem a tendência dos valores máximos da Figura 22, que foram maiores para modelagens com MDT mais preciso. Existem, no entanto, exceções, que assim como nos casos das barragens D e E, podem se traduzir em uma representação do terreno menos acurada em relação ao campo, devido à resolução espacial. Nota-se ainda que nas seções próximas aos pontos onde foram observados aos valores máximos de profundidade, nas barragens D e E, foi observado o mesmo comportamento nos gráficos de profundidade por distância. No geral, observou-se que a profundidade da modelagem com modelo LiDAR foi 91% maior do que as com MDEs ALOS e 122% maior do que aquelas com MDE SRTM.

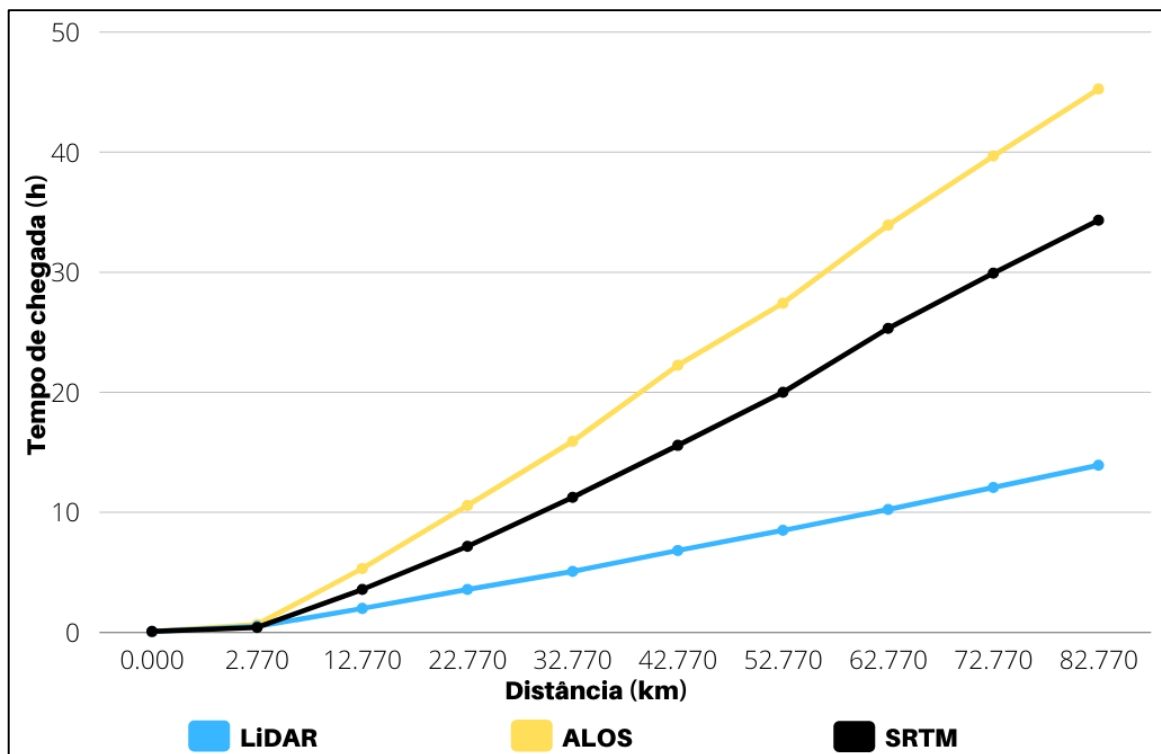
Para a velocidade e tempo de chegada da onda, utilizou-se do perfil longitudinal do terreno para a análise dos resultados, além disso, em algumas situações foi feita uma correlação entre velocidade e tempo de chegada. Foram plotados os gráficos e em seguida, feitas as discussões. Começou-se com a barragem A, apresentando os gráficos de velocidade, tempo de chegada e perfil longitudinal nas Figuras 31 a 33.

Figura 31 – Velocidade x distância para modelagens da Barragem A



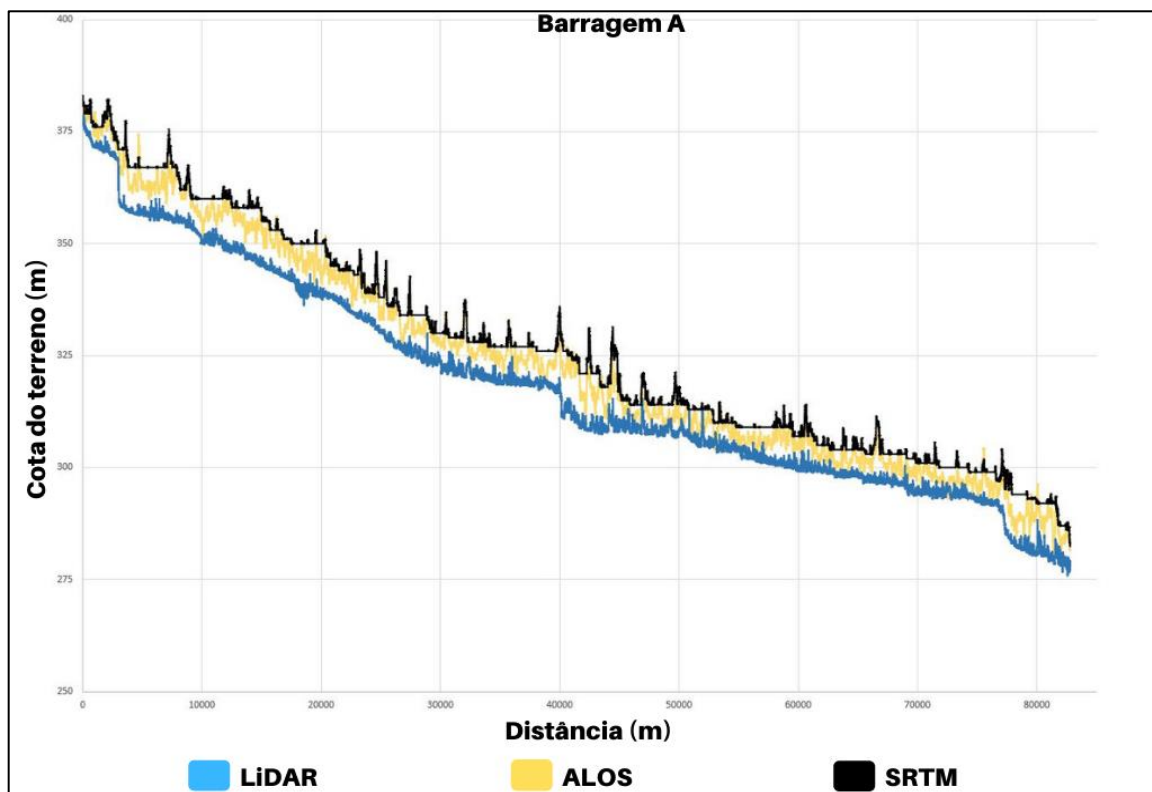
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 32 – Tempo de chegada x distância para modelagens da Barragem A



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33 – Cota do terreno x distância dos MDTs da Barragem A



Fonte: Elaborado pelo autor

Percebeu-se na seção longitudinal, que o terreno SRTM apresentou regiões de planície, tendo uma tendência de apresentar terrenos planos ao longo de sua extensão, de modo que pode ser justificada a velocidade do escoamento abaixo das outras na maioria das seções. Constatou-se, no entanto, um aumento significativo da velocidade na última seção, ao passo que também se notou uma maior declividade observada do terreno, com região de queda mais pronunciada da água.

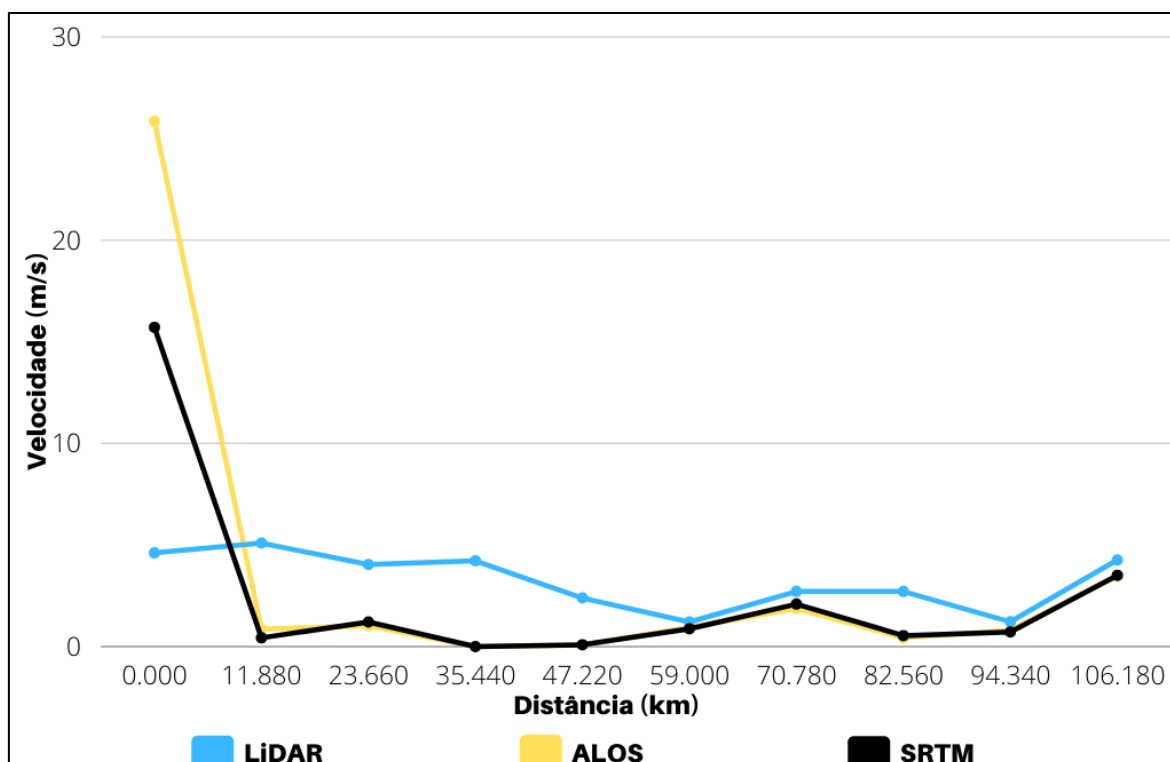
Quanto à modelagem do terreno ALOS, observou-se uma velocidade ligeiramente maior que as do SRTM, porém, perceberam-se maiores variações de altimetria no terreno, não se observando as mesmas planícies. Essas variações causaram a formação de depressões ao longo do curso do rio que acumularam a água, fenômeno que retardou o tempo de chegada da onda fazendo o escoamento do modelo ALOS ter maior tempo de chegada que o SRTM. Atentou-se, ainda, para um aumento da velocidade na seção final, semelhante ao ocorrido na modelagem com MDE SRTM, mesmo que em menores proporções, percebeu-se ali também

uma declividade mais acentuada ao final do curso do rio, que justificou o ligeiro aumento de velocidade.

Por fim, o terreno LiDAR apresentou uma declividade mais uniforme ao longo do curso d'água, contribuindo assim para uma constância maior da velocidade da onda, bem como uma tendência na curva do tempo de chegada, aproximando-se de uma reta. Isso ocorreu pelo escoamento preferencial se dar na calha do rio, que teve sua batimetria integrada ao terreno. Apontou-se, ademais, uma diminuição da velocidade de escoamento no final do modelo, que diverge das outras duas modelagens.

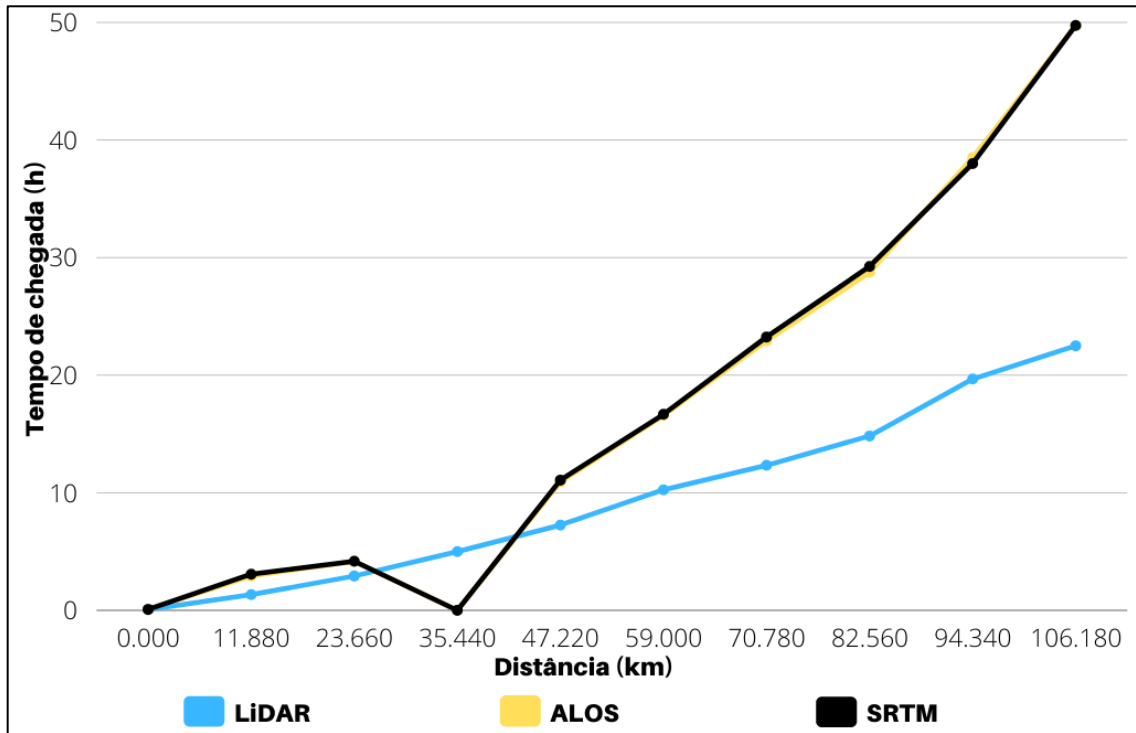
Seguiu-se, então, para a análise dos resultados da barragem B, com os dados de velocidade e tempo de chegada representados nas Figuras 34 e 35, respectivamente e o perfil longitudinal do terreno representado na Figura 36.

Figura 34 – Velocidade x distância para modelagens da Barragem B



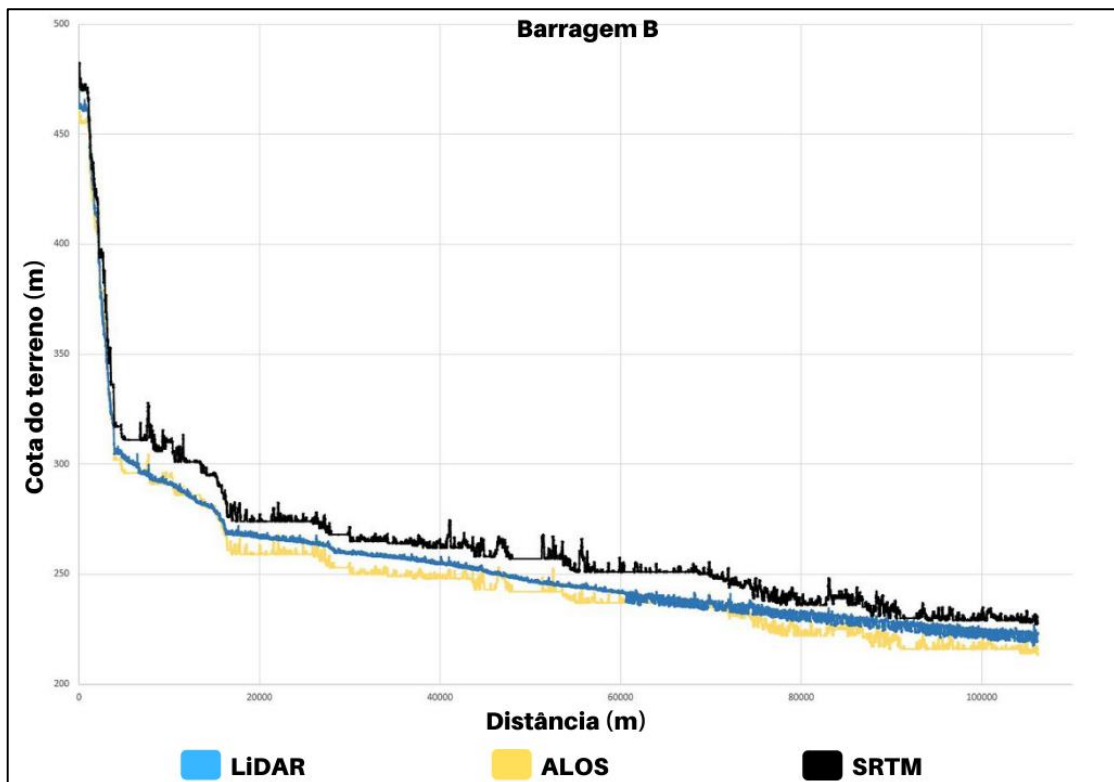
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35 – Tempo de chegada x distância para modelagens da Barragem B



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 36 – Cota do terreno x distância dos MDTs da Barragem B



Fonte: Elaborado pelo autor

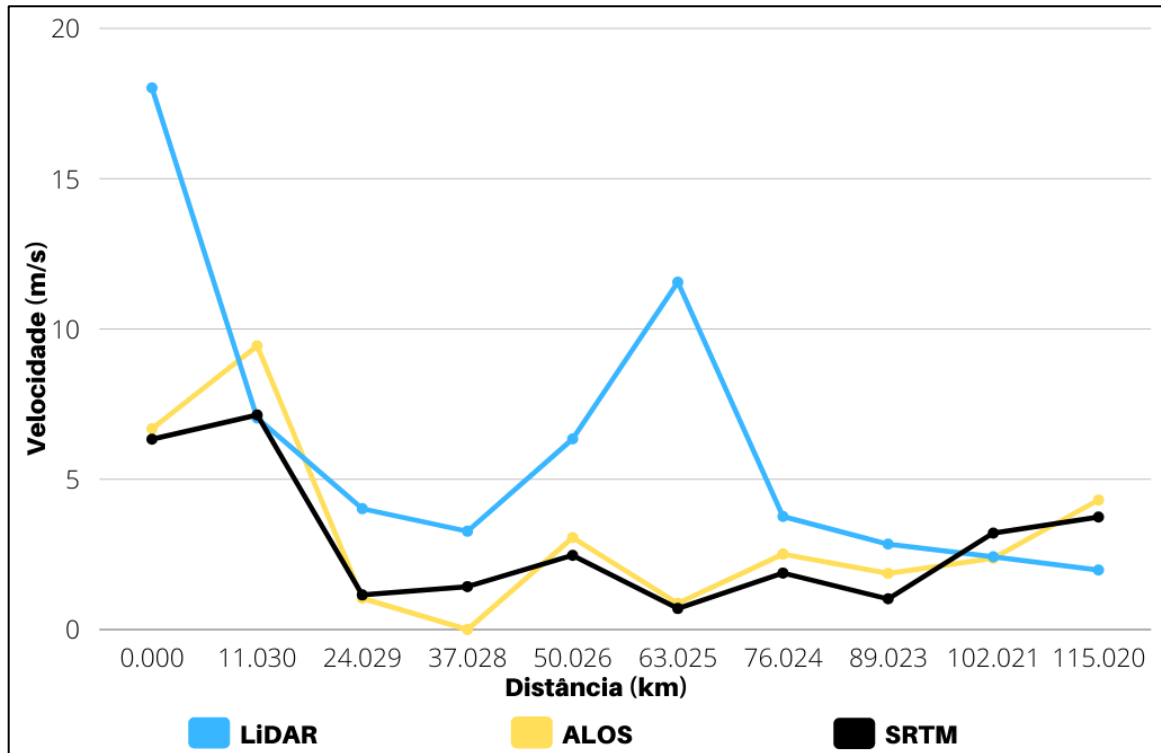
Para as modelagens da barragem B, percebeu-se grande proximidade dos resultados processados com ALOS e SRTM de velocidade e tempo de chegada, tendo diferenças pequenas entre si. Observou-se, que ambos os terrenos possuíam regiões planas que resultaram em velocidades baixas nos pontos de controle. Além disso, percebeu-se que seus tempos de chegada foram mais altos que os observados no modelo LiDAR, fato que pode ser justificado pela declividade do terreno, constante no modelo com maior precisão, que resultou em maiores velocidades e maior facilidade do escoamento.

Percebeu-se, ainda, pelas Figuras 34 e 35 que em uma das seções não foi possível obtenção de resultados para as modelagens dos MDTs ALOS e SRTM, de modo que se analisou os terrenos da Figura 36 e foi constatada, em ambos, a presença de uma elevação, não observada no modelo LiDAR. Dessa forma a manchas de inundação para modelagens ALOS e SRTM não atingiram o ponto de intersecção do rio e com a seção, visto que sofreram desvio da calha principal.

Quanto ao modelo LiDAR, observou-se, de modo semelhante ao da barragem A, uma maior constância da declividade do canal, que se traduziu também em mudanças menos acentuadas de velocidade e, sendo a calha principal do rio caminho principal do escoamento, percebeu-se que o tempo de chegada para modelagem processada com terreno mais preciso foi reduzido nas seções ao longo do rio. Além disso, percebeu-se, com exceção da primeira seção, uma velocidade da onda maior no modelo LiDAR que nas outras modelagens.

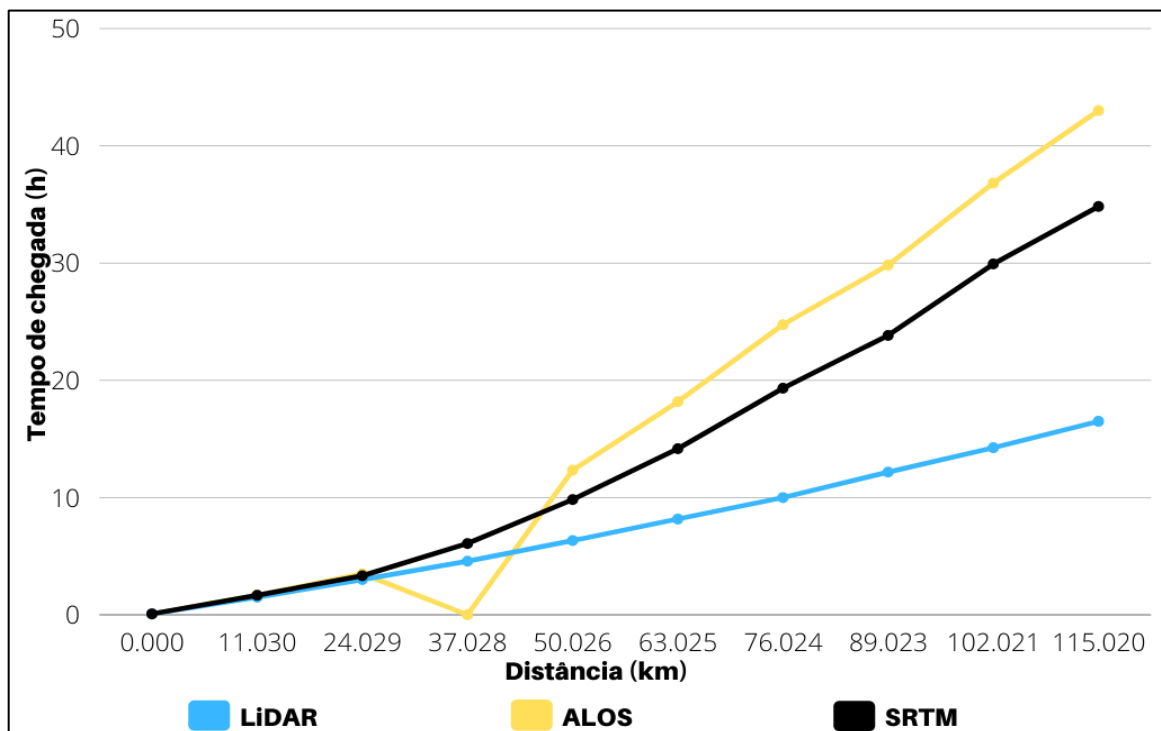
Para a análise de resultados da barragem C, foram dispostos nas Figuras 37 e 38, a velocidade da onda nas seções e o tempo de chegada da mancha de inundação, respectivamente, enquanto mostrou-se na Figura 39 a elevação do terreno no perfil longitudinal referente ao curso do rio a jusante da barragem C.

Figura 37 – Velocidade x distância para modelagens da Barragem C



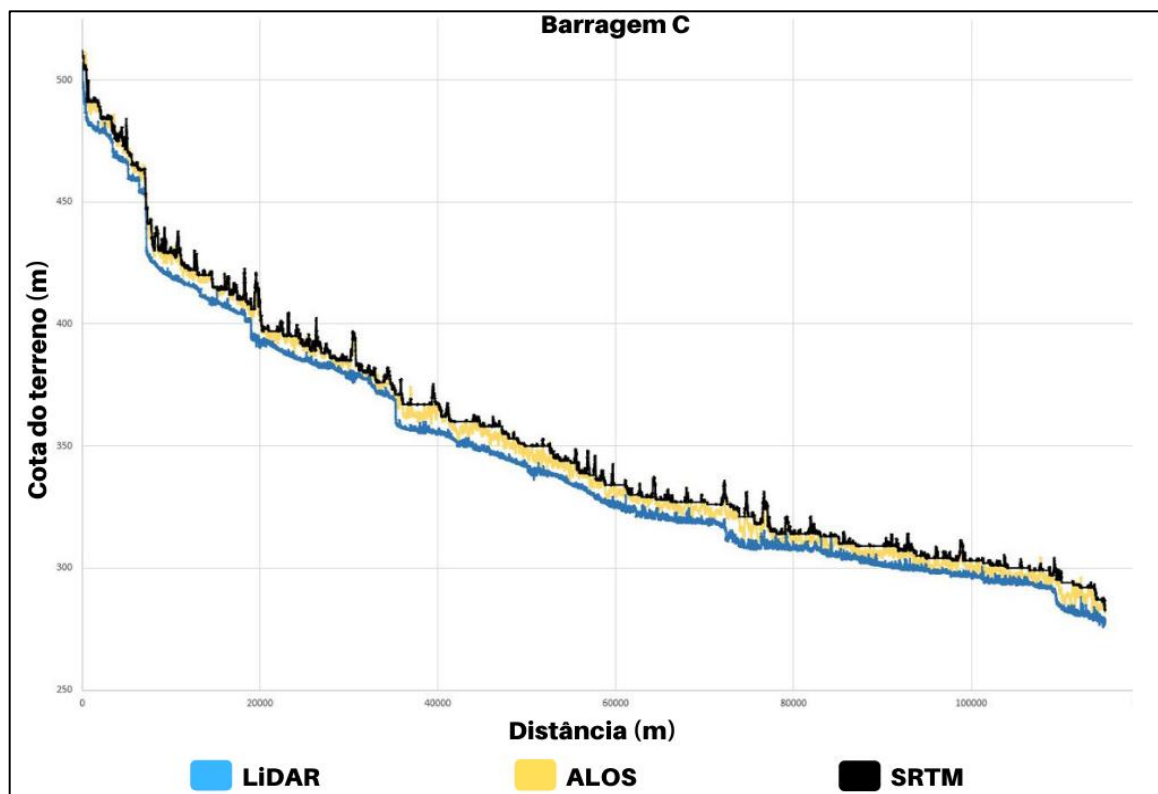
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38 – Tempo de chegada x distância para modelagens da Barragem C



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 39 – Cota do terreno x distância dos MDTs da Barragem C



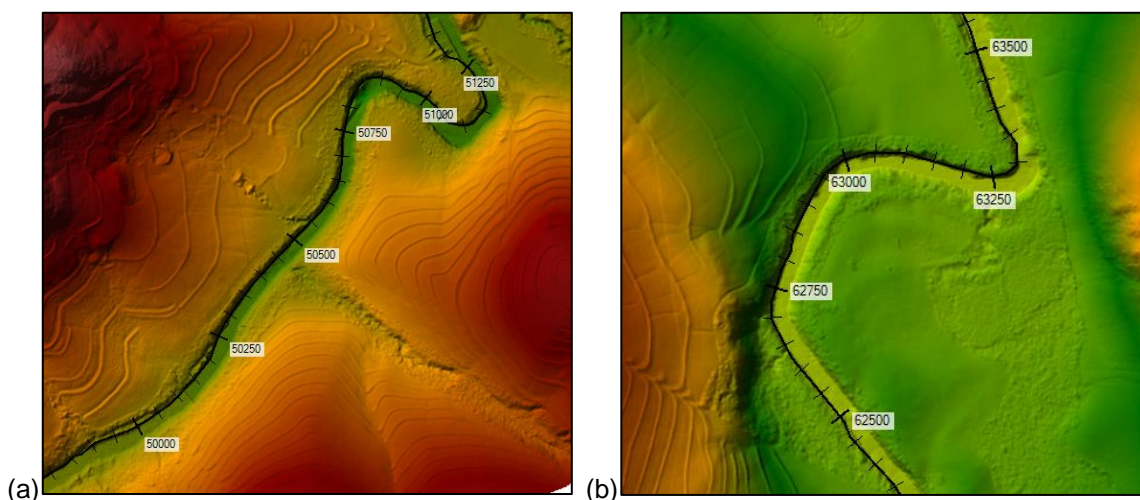
Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto aos resultados obtidos nas modelagens da barragem C, constatou-se que o modelo ALOS teve um maior atraso do tempo de chegada que os outros dois MDTs. No entanto, esse não apresentou planícies como o MDT SRTM. Apontou-se, então, entre as razões para esse comportamento, uma grande variação da altimetria ao longo do curso, que fez com que se tivesse maior retenção da água em depressões do terreno ou então que o caminho preferencial do escoamento sofreu maiores deslocamentos em relação ao MDT SRTM.

Analisou-se os valores de velocidade obtidos com as modelagens e se percebeu que, em geral, a com MDT ALOS teve maiores velocidades máximas nas seções que o modelo SRTM, apesar do maior tempo de chegada da onda. Atribuiu-se tal fato à presença de depressões no terreno e grandes variações que acabam por atrasar a chegada da onda nos pontos mais a jusante, enquanto o MDT LiDAR apresentou maior constância na declividade do canal, sem variações bruscas e, em relação ao SRTM, observou-se regiões planas que atrasam o escoamento, embora não com a mesma intensidade das depressões com as do MDT ALOS.

A modelagem com MDT LiDAR apresentou um gráfico de tempo de chegada aproximando-se de uma reta, de modo que se pode ser explicado novamente pela maior constância da declividade do canal que teve poucas alterações bruscas, como as observadas no modelo SRTM, por exemplo. Percebeu-se, no entanto, uma leve ascensão dos valores de velocidade entre as seções 5 e 6 (50,026 km e 63,025 km, respectivamente). Analisando-se o MDT, percebeu-se que a região possui muitos meandros e um estrangulamento da seção, que pode causar esse fenômeno, detalhamento esse que não pode ser propriamente representado em terrenos com menor precisão. Os detalhes do MDT nessa região foram mostrados na Figura 40.

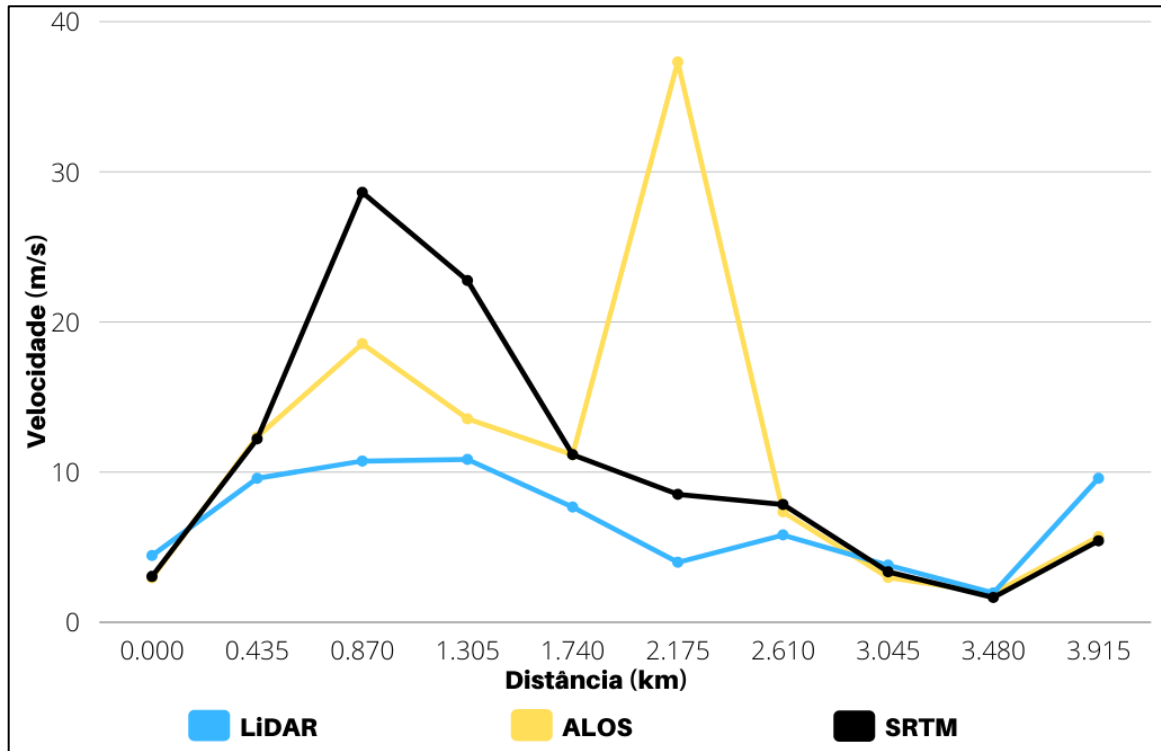
Figura 40 – Detalhamento das regiões de pico de velocidade da modelagem com MDT LiDAR (a) Seção 5 (50,026 km) (b) Seção 6 (63,025 km)



Fonte: Elaborado pelo autor

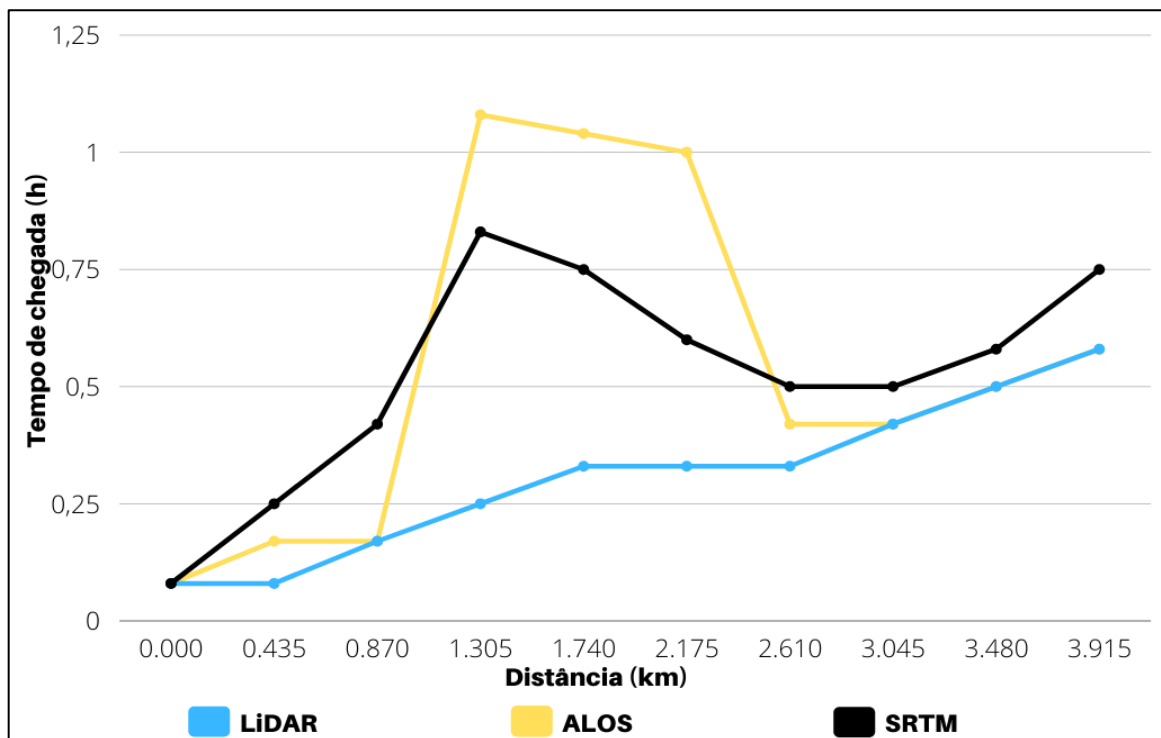
Seguiu-se, então para as análises dos resultados de velocidade e tempo de chegada do barramento D, dispostos nas Figuras 41 e 42, bem como o perfil longitudinal do curso do rio na Figura 43.

Figura 41 – Velocidade x distância para modelagens da Barragem D



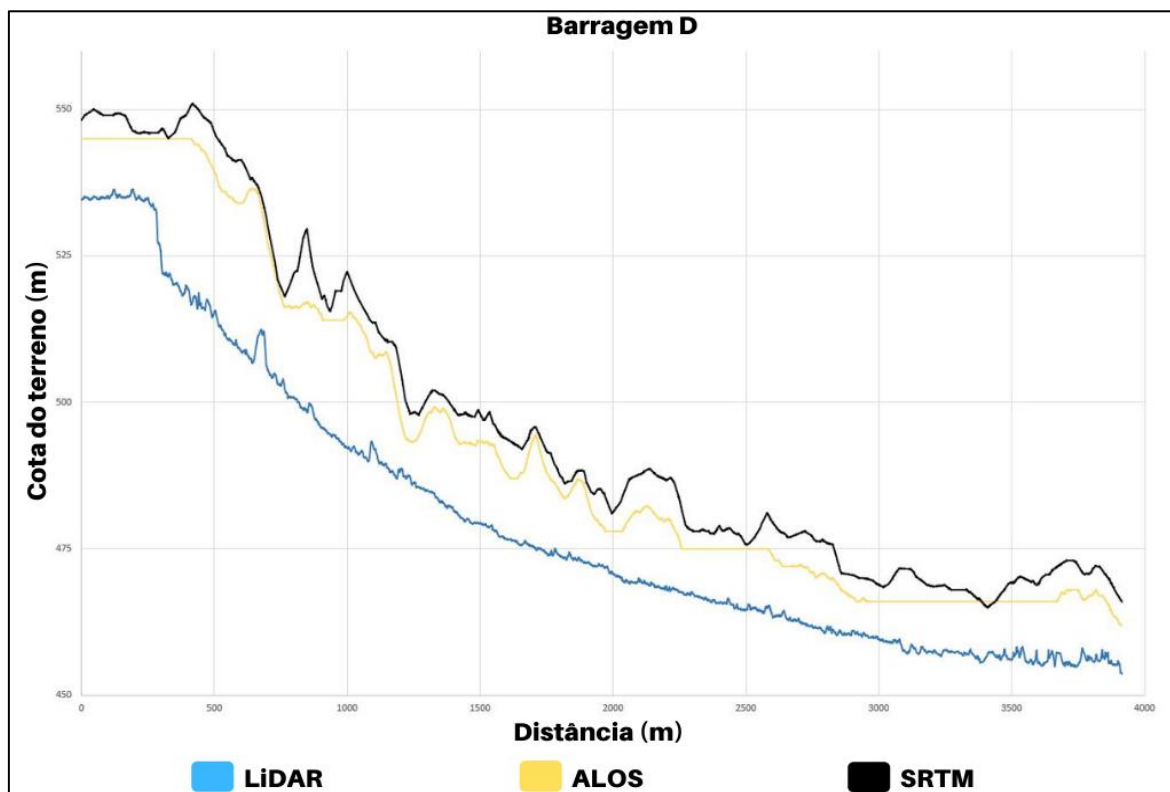
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 42 – Tempo de chegada x distância para modelagens da Barragem D



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 43 – Cota do terreno x distância dos MDTs da Barragem D



Fonte: Elaborado pelo autor

Para as modelagens do barramento D, observou-se picos de velocidade em seções diferentes dos modelos ALOS e SRTM, e buscou-se entender o comportamento pela seção longitudinal dos terrenos. Para os picos de velocidade das Seções 3 e 4 da mancha processada com MDT SRTM, percebeu-se que a primeira, coincidiu com a área de profundidade máxima de lâmina d'água observada, que, como visto nas seções transversais da Figura 23 tem um estrangulamento da seção, dessa maneira, pode-se justificar a alta velocidade do escoamento. Já na Seção 4, observou-se uma queda mais acentuada no MDT, de modo que, por esse fenômeno, justificou-se a velocidade.

Para o MDT ALOS, a seção que apresentou pico de velocidade foi a sexta (2,175 km). A seção longitudinal apresentou na região uma queda abrupta na cota do terreno que pode justificar esse pico de velocidade.

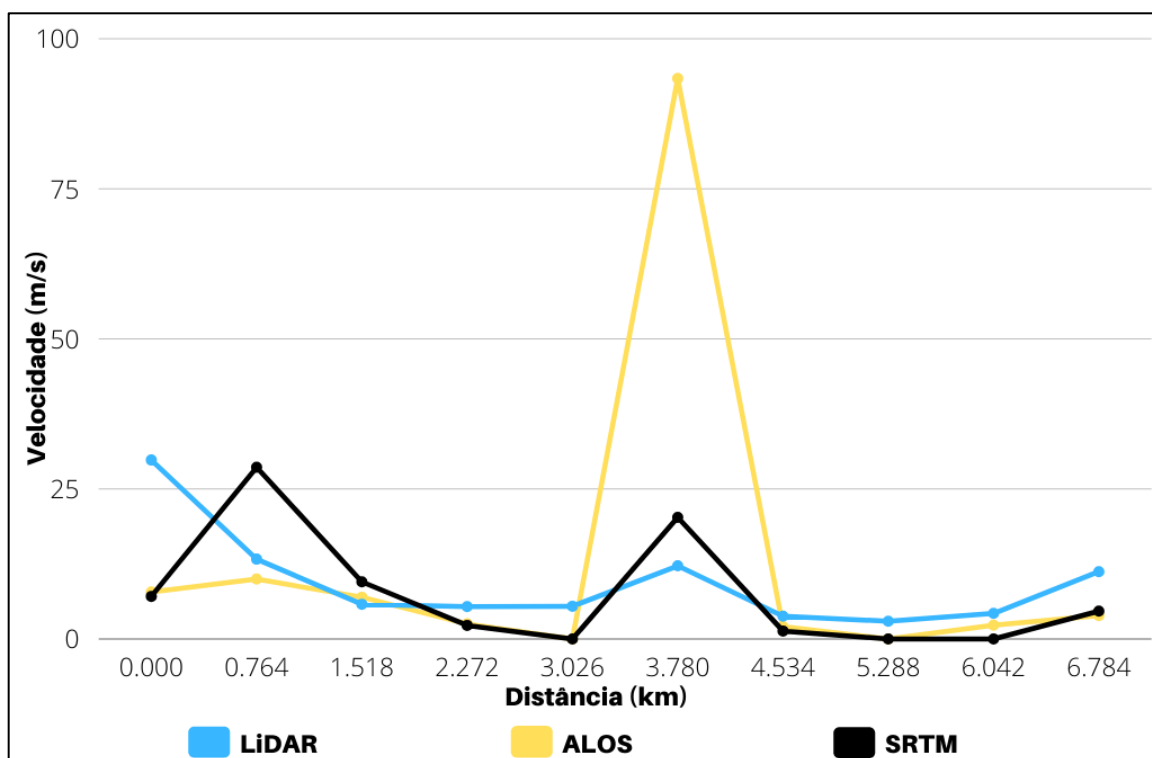
Houve, ainda, um comportamento atípico do tempo de chegada da onda, entre as seções 4 a 6, que apresentaram valores maiores que as seções subsequentes. Pelo MDT LiDAR, observou-se que a região possui muitos

meandros, fenômeno não observado nos outros dois MDTs, sendo a região representada nesses por zonas mais altas do que a primeira. Desse modo, pode-se dizer que o tempo de chegada da seção teve valores mais altos que os demais, pois os pontos de controle estavam em regiões mais altas do MDT.

Quanto à modelagem com terreno LiDAR, observou-se velocidades com menor variação, quando comparada as outras duas modelagens e altas ao longo do curso, que puderam ser explicadas pela presença de algumas elevações do terreno e maior declividade do MDT. O tempo de chegada de algumas seções apresentaram valores iguais entre si, devido à distância entre as seções serem pequenas (menos de 1,00 km), de modo que para essa modelagem, seria interessante que se diminuísse o tempo de saída do hidrograma para melhor representar os valores do tempo de chegada.

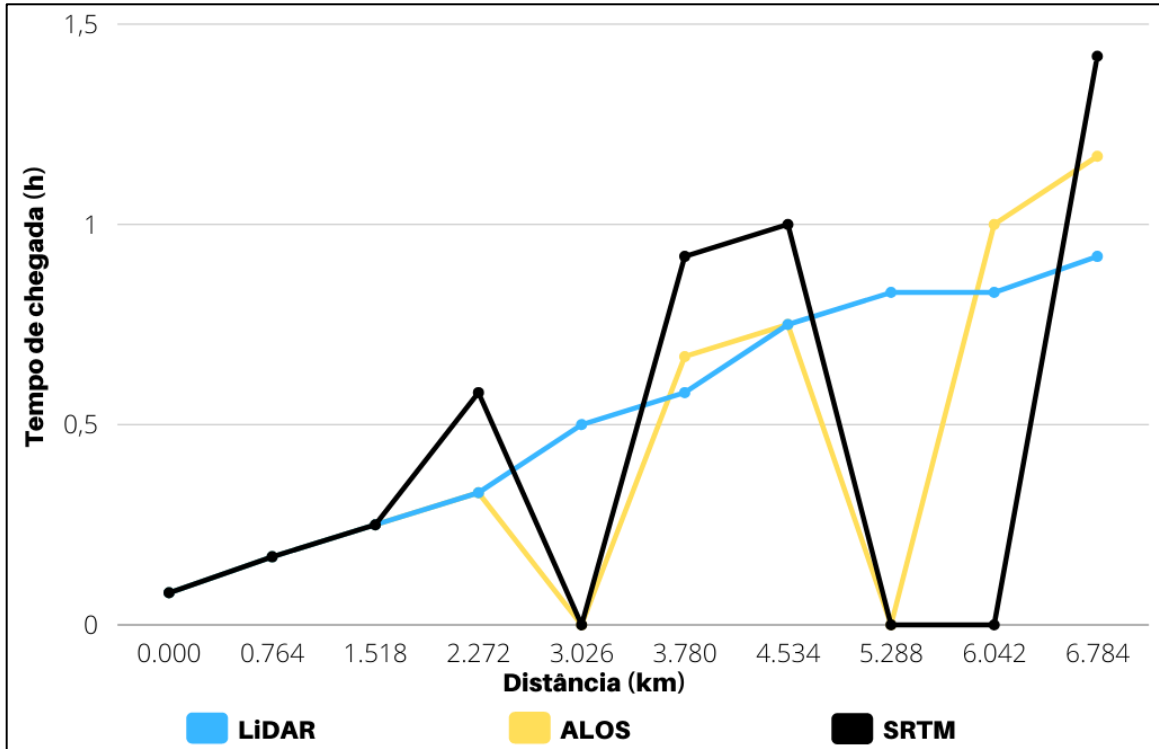
Com a finalização da análise das modelagens da barragem D, passou-se então para a análise dos dados de velocidade, tempo de chegada e perfil longitudinal barragem E, expostos nas Figuras 44 a 46.

Figura 44 – Velocidade x distância para modelagens da Barragem E



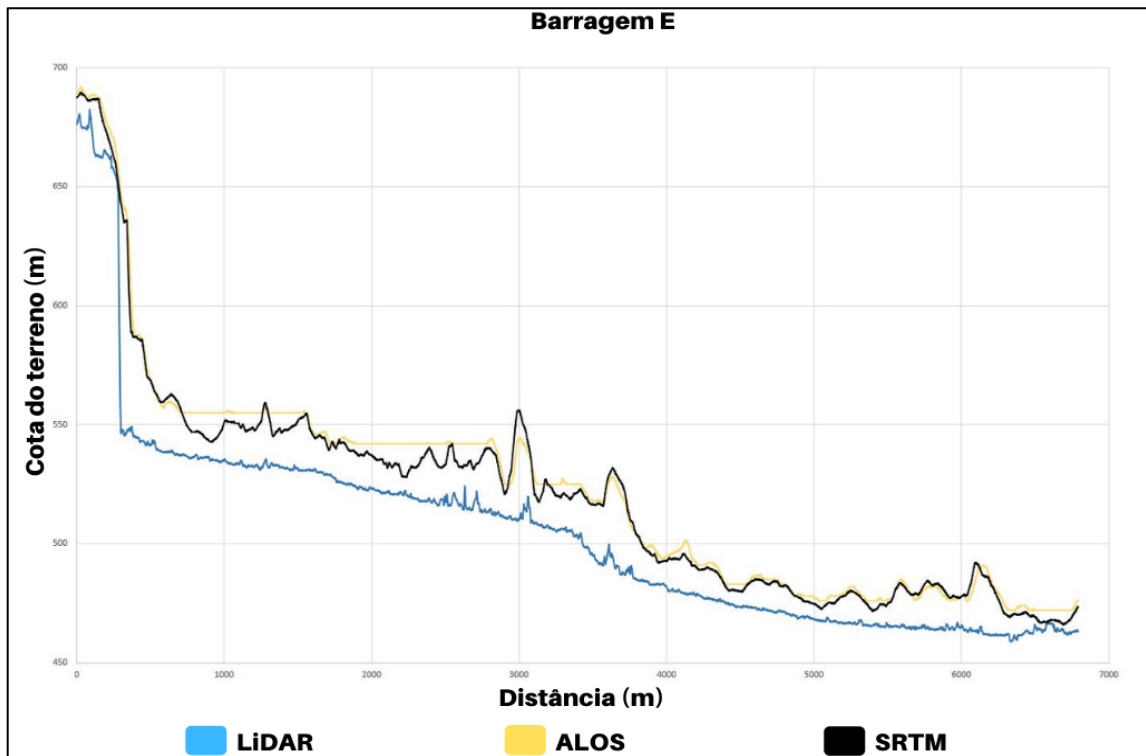
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 45 – Tempo de chegada x distância para modelagens da Barragem E



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 46 – Cota do terreno x distância dos MDTs da Barragem E



Fonte: Elaborado pelo autor

Para as modelagens da barragem E, na Seção 6, observou-se picos de velocidade para as três modelagens realizadas. Nos três MDEs, percebeu-se a presença de queda acentuada do terreno, em diferentes proporções, tendo a velocidade acompanhado essa tendência.

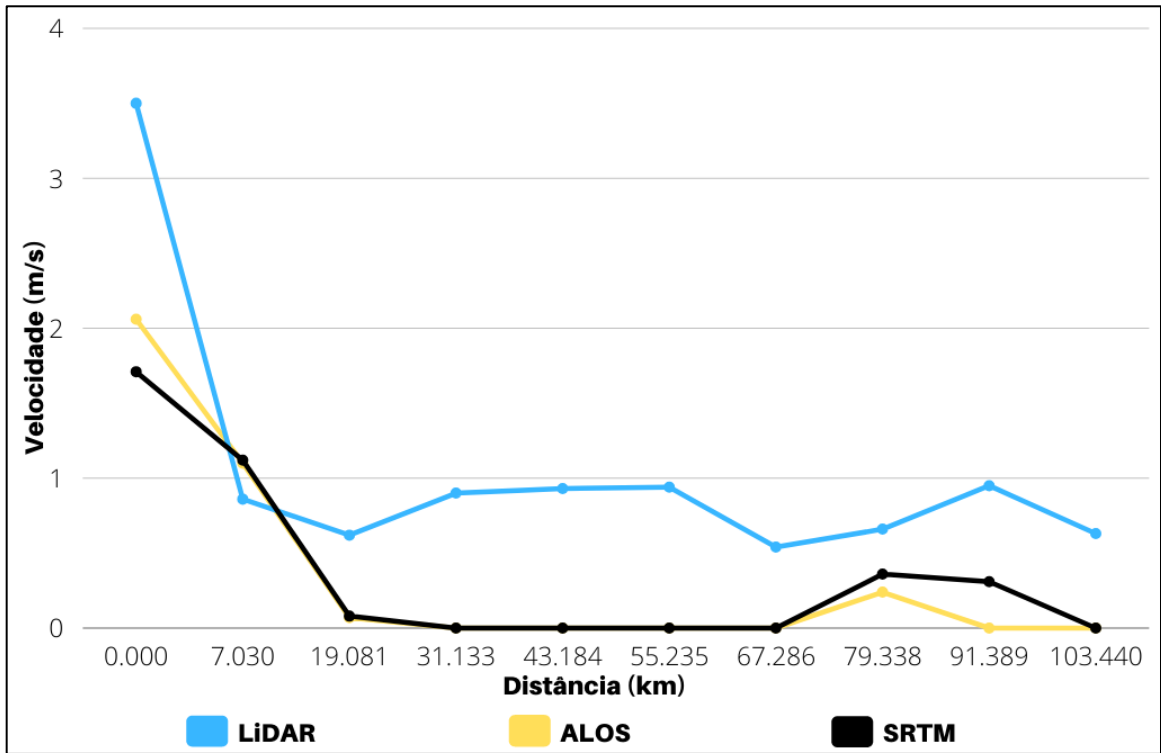
Houve também, nessas modelagens, algumas seções nas quais não foram possíveis coletar dados, uma vez que as manchas não atingiram os pontos de controle destas seções. Pela seção longitudinal do curso d'água, percebeu-se que se tratavam de pontos onde foram identificadas altimetrias do terreno mais elevadas, que advinham da amostragem pouco precisa de dados de altimetria. Ressaltou-se que a região apresentava terreno íngreme onde, segundo a literatura, apresentam-se os maiores erros de altimetria para o terreno SRTM.

Analisou-se para o tempo de chegada, os pontos onde foram possíveis as coletas de dados, que tiveram a tendência observada em outras modelagens, de se aumentar do tempo de chegada conforme se diminui a precisão do modelo. Notou-se ainda que o modelo LiDAR apresentou, novamente, uma constância da velocidade e do tempo de chegada, bem como uma declividade mais uniforme ao longo do curso do d'água.

A seção longitudinal do rio permitiu ainda uma análise da região onde foi observada a cachoeira a aproximadamente 300 metros do pé da barragem. Observou-se que o modelo LiDAR representou a queda d'água sem interferências, enquanto os outros MDEs representaram a queda em duas etapas, tendo, portanto, uma menor diferença na queda do terreno, que justificou as profundidades máximas observadas anteriormente.

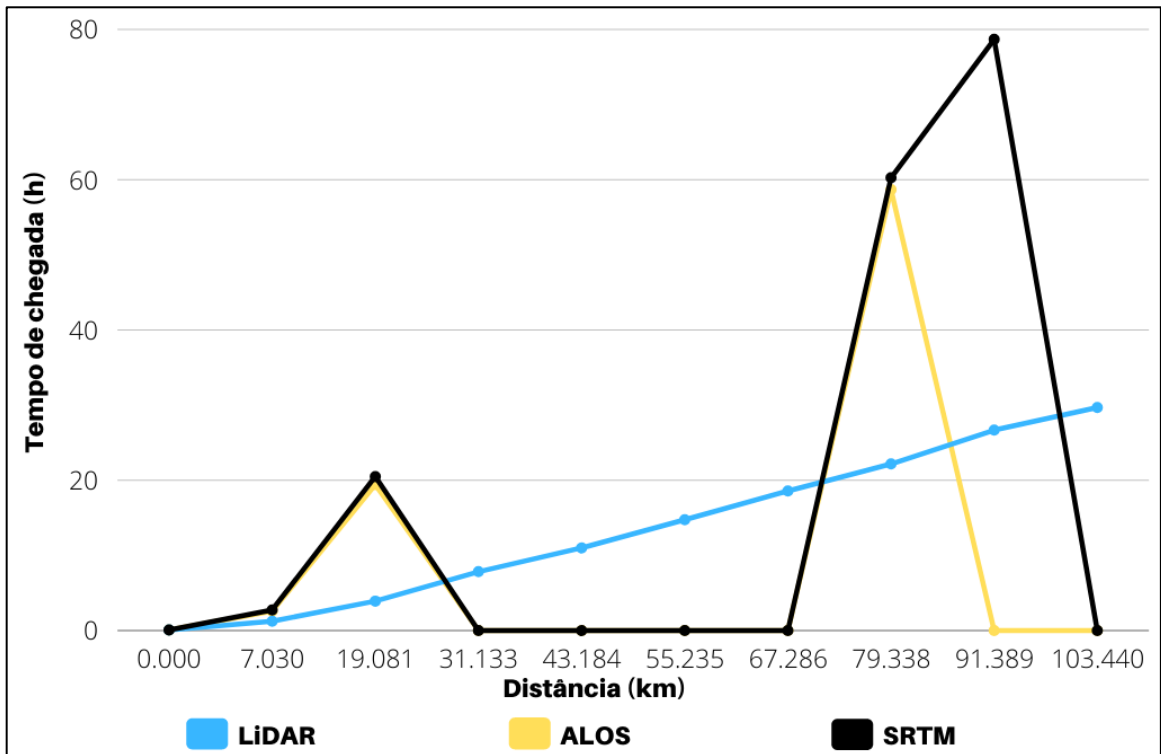
Partiu-se, então para a análise das velocidades e tempos de chegada nas seções da barragem F, resultados mostrados nas Figuras 47 e 48, bem como o perfil longitudinal do rio, na Figura 49.

Figura 47 – Velocidade x distância para modelagens da Barragem F



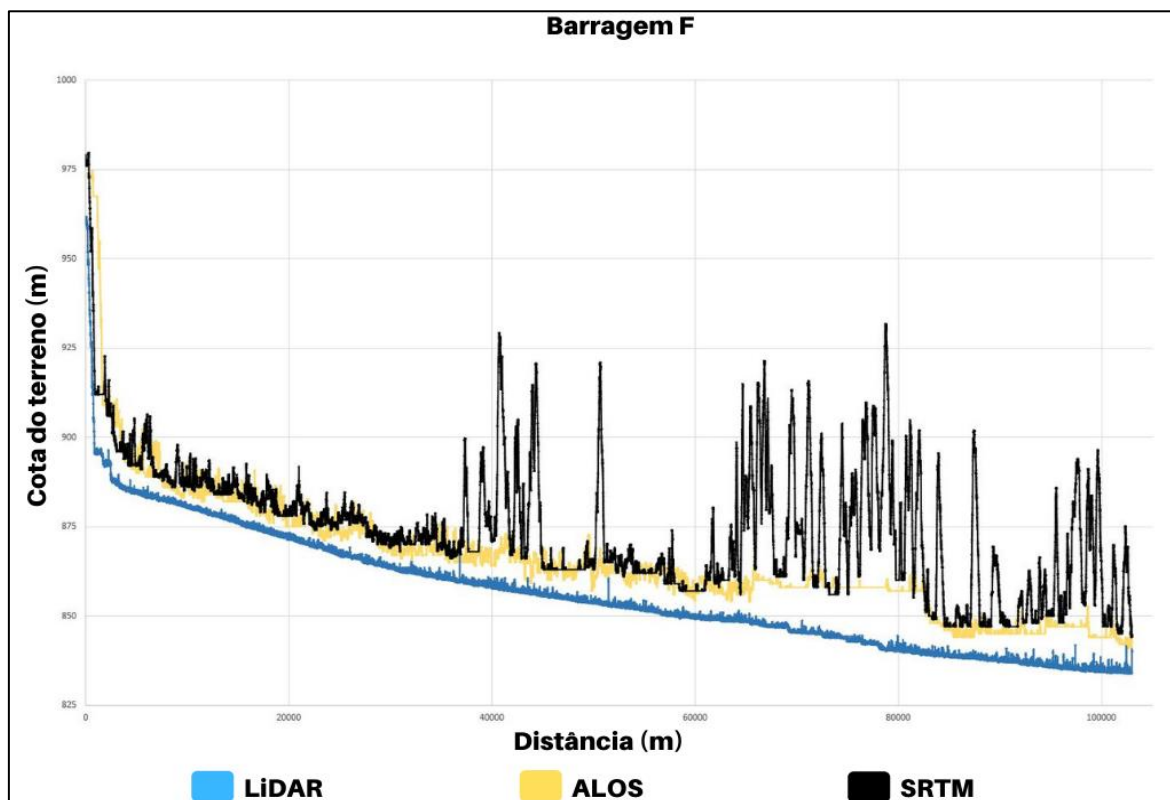
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 48 – Tempo de chegada x distância para modelagens da Barragem F



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 49 – Cota do terreno x distância dos MDTs da Barragem F



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a barragem F, em seis dos dez pontos das seções transversais escolhidas não foram obtidos resultados dos processamentos provenientes dos MDTs ALOS e SRTM, que apresentaram grande diferença de altimetria em relação ao MDT LiDAR. Observou-se, no entanto, que o fluxo preferencial da água seguiu outro caminho que não a calha principal do rio, e avaliou-se que os MDTs menos precisos apresentaram valores deslocados, com relevos que não correspondem à uma representação acurada da região.

Nos pontos onde foi possível extração de dados, observou-se a mesma tendência das demais modelagens de outras barragens, com menores velocidades dos terrenos menos precisos e maior tempo de chegada, devido ao desvio do fluxo preferencial do escoamento da calha para regiões que não correspondiam ao curso d'água. Já a modelagem com MDT LiDAR apresentou valores mais uniformes de velocidade e tempo de chegada, quando comparado com as demais modelagens, exceto pela primeira seção, devido à maior constância da declividade do terreno ao longo da seção longitudinal.

De modo geral, constatou-se que escoamentos em MDTs LiDAR com batimetria integrada apresentaram valores de velocidade maiores na seção da calha do rio, uma vez que, melhor representada, teve o escoamento preferencial, enquanto MDTs com menor precisão tenderam a representar o terreno com maiores áreas de planície, sem a calha do rio, e mudaram seu fluxo, além de espriarem a onda de inundação, gerando, assim, menores profundidades e maiores áreas.

As barragens de DPA baixo e médio apresentaram a tendência de diminuição das áreas de escoamento conforme se aumentava a precisão dos terrenos, enquanto as barragens com DPA alto tiveram uma inversão desse fato. Foram criados mapas de área de inundação de cada um dos barramentos, dispostos no Apêndice F.

Como um dos importantes fatores para a classificação do DPA é a presença de edificações habitadas no vale a jusante, vale-se considerar para barragens com essa classificação a aquisição de um modelo mais preciso para garantia de que a mancha de inundação represente de fato a área inundada, de modo que em situações de emergência sejam mobilizadas as áreas corretas, sem que haja subdimensionamento das manchas, que podem provocar em casos extremos a perda de vidas humanas.

Ademais, percebeu-se que os MDTs menos precisos apresentaram picos no terreno e deslocamentos de regiões mais altas, principalmente em áreas onde existiam muitos meandros, alterando o caminho natural do rio, devido a deslocamentos do terreno.

Valeu-se considerar, no entanto, que as modelagens com MDT ALOS apresentaram valores intermediários dos parâmetros estudados em comparação com as modelagens com MDT LiDAR e SRTM, de modo que na impossibilidade de se adquirir um modelo de alta precisão como o LiDAR, convém dar preferência ao modelo ALOS do que ao SRTM, que, mesmo tendo sido base para o processamento do primeiro, apresentou resultados de qualidade inferior, podendo ser muitas vezes superestimado, para os casos das barragens com DPA baixo e médio ou subestimados para barragens com DPA alto.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Embora se possa estabelecer uma tendência entre modelagens, os resultados não podem ser tidos como absolutos, devendo-se considerar todas as particularidades de cada terreno, barragem e modelo. Fatores como cachoeiras a jusante da barragem, planícies e áreas mais íngremes no modelo, se mostraram importantes elementos de análise, uma vez que produziram diferenças nas tendências observadas, devendo ser levadas em consideração.

Ratifica-se as afirmações acima, uma vez que são observadas exceções de alguns parâmetros em diferentes barragens. A afirmação de que as áreas inundadas são menores em modelos mais precisos é válida para os modelos de DPA baixo e médio, mas não para o modelo das barragens E e F, cujo DPA é alto. De forma semelhante, pode-se apontar também a tendência com relação à altura máxima de lâmina d'água que tende a ser maior em terrenos mais precisos, porém há modelos em que isso não é válido, como nas modelagens das barragens D e E, com DPA médio e alto, respectivamente.

Pode-se afirmar, no entanto, que modelos mais precisos geram manchas mais verossímeis e que garantem dimensionamento correto das ações de mitigação de danos em situações emergenciais, sem que haja sub ou superdimensionamento. Em média, as manchas resultantes de modelagem com modelo ALOS geraram áreas 5,66% maiores que as do MDT LiDAR, podendo chegar até 37,97% maiores, enquanto as modelagens com SRTM tiveram áreas em média 6,86% maiores que as modelagens com LiDAR, com máximo de 41,77%.

Em locais onde as áreas inundadas representam, em sua maioria, regiões rurais e de vegetação natural, a diferença de área pode não ser tão significativa ao ponto de se tornar imprescindível terrenos de precisão elevada cujo valor de levantamento pode requerer grandes investimentos. No entanto, em casos onde se têm áreas urbanas, onde a área de inundação pode representar perda de vidas humanas e danos materiais, além de serem necessários treinamentos da população afetada, o investimento em um modelo preciso pode justificar, no longo prazo, sua aquisição.

Atenta-se, também, para outros parâmetros das manchas que tiveram grande divergência de resultados, e podem alterar as avaliações de risco do vale a

judante. Existiram seções, nas modelagens com MDTs menos precisos, onde a mancha de inundação encontrava-se fora da calha principal do rio, indicando que houve deslocamento do terreno. Faz-se, necessária, portanto, uma análise detalhada ao final da modelagem para validação dos resultados, de forma que se forem utilizados modelos menos precisos, estes tenham resultados coerentes com os estudos.

Vale ressaltar que o MDT ALOS apresentou resultados mais razoáveis quando se comparou as três representações de terreno, de maneira que seus dados se apresentaram intermediários entre os modelos LiDAR e SRTM, concluindo-se que, na impossibilidade de aquisição de dados mais precisos como levantamentos de perfilamento a laser, deve-se priorizar seu uso uma vez que em todas as modelagens os dados SRTM tiveram maiores extrapolações em relação ao MDT LiDAR. Recomenda-se, no entanto, para barragens de DPA alto a aquisição de MDTs precisos com os quais se garantem manchas de inundação mais próximas às que podem ocorrer em cenários emergenciais de ruptura.

6.1 Sugestões para pesquisas futuras

Para estudos posteriores, recomenda-se fazer análises da influência da integração de batimetria em MDTs de menor precisão para se comparar os resultados obtidos com MDT de alta precisão como o LiDAR.

Além disso, recomenda-se uma investigação mais detalhada da influência de precisão de MDTs em manchas de inundação para cenários de ruptura de barragens, exclusivamente naquelas de DPA alto, a fim de se fazer uma análise dos fenômenos apresentados no presente trabalho, confirmando-se ou refutando-se a afirmação de que para essas barragens terrenos mais precisos geram manchas de inundação maiores.

7 REFERÊNCIAS

AMORIM, D.; SILVA, P. **Sensoriamento remoto e suas técnicas de análise: uma comparação entre novas e velhas tecnologias, um estudo de caso sobre a tecnologia lidar (o mapeamento de território através das árvores)**. XXI Encontro Nacional de Geografia Agrária – “Territórios em disputa: Os desafios da Geografia Agrária nas contradições do desenvolvimento brasileiro”, Uberlândia, p. 15-19, 2012.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual Básico HEC-RAS 5.0.3: Ruptura de barragem**. 2018.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual do Empreendedor para Segurança de Barragens. Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE. Volume IV**. Brasília - DF, 2016.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Painel de Monitoramento**. 2021. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiZDNhZjdiZjEtZjJlZC00NDk3LTg1YTMtNmIzMjgzN2RkM2RlliwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em 11 fev. 2021.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório de Classificação das Barragens – Ciclo 2020**. Brasília – DF, 2021.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução normativa nº 696, de 15 de dezembro de 2015. **Estabelece critérios para classificação, formulação do Plano de Segurança e realização da Revisão Periódica de Segurança em barragens fiscalizadas pela ANEEL de acordo com o que determina a Lei nº 12.334**, de 20 de setembro de 2010.

ASF ENGINEERING – ALASKA SURVEY FACILITY. ASF Radiometricver Terrain Corrected ALOS PALSAR Products: Product Guide. 2015. Disponível em: <https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rtc_product_guide_v1.2.pdf>. Acesso em 28 abr. 2021.

BETSHOLTZ, A., NORDLÖF, B. **Potentials and limitations of 1D, 2D and coupled 1D-2D flood modelling in HEC-RAS**. TVVR17/5003, 2017.

BRASIL. Lei nº 14066, de 30 de setembro de 2020. **Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração)**. Brasília, DF.

BRASIL, L. S. S. et al. **Modelagem unidimensional de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem-estudo de caso: barragem de Rio de Pedras, Minas Gerais, Brasil.** XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS João Pessoa - PB, 20 a 24 de novembro de 2005.

CAMPOS, R. G. D et al. **Modelagem física para determinação de parâmetros de brechas em rupturas de barragens em cascata.** In: Anais do XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Ezeiza, Argentina: Instituto del Agua, 2018.

CARVALHO, E. A.; ARAÚJO, P. A. **Localização:** coordenadas planas – UTM. Natal, 2008. Disponível em: http://www.ead.uepb.edu.br/ava/arquivos/cursos/geografia/leituras_cartograficas/Le_Ca_A09_J_GR_260508.pdf. Acesso em: jun. 2021.

CARVALHO, O. A. de et al. **Karst Depression Detection Using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-Derived Digital Elevation Models in the Bambuí Group, Brazil.** Remote Sensing, v. 6, n. 1, p. 330-351, 2014.

CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics.** New York: McGraw-Hill Book Company, 1959.

CRUZ, C. B. M. ET AL. **Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR.** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Curitiba: INPE, v. 2011, p. 5463, 2011.

CUBAS, M. G.; TAVEIRAS, B. D. de A. **Geoprocessamento: fundamentos e técnicas.** Curitiba: Intersaberes, 2020. 201 p. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/186536/pdf/0?code=5OfafoscHXy0OkIEGG4oQ256KDMB+JY63J0U1vzxk+ql41q8Obn7ePLbNnE6s7KE6l3BE/+vb/SCxb7GfVJqfg==>. Acesso em: 20 jun. 2021.

DONG, P.; CHEN, Q. **LiDAR remote sensing and applications.** CRC Press, 2017.

GALDINO, Carlos Alberto Pessoa Mello et al. **Cadastro de parcelas territoriais vinculado ao Sistema de Referência Geocêntrico-SIRGAS2000.** Florianópolis, 2006.

HUTCHINSON, M. F.; GALLANT, J. C. **Digital elevation models and representation of terrain shape.** Nova York: John Wiley & Sons, 2000. p.29-50.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Noções Básicas de Cartografia.** Rio de Janeiro: IBGE/Departamento de Cartografia, 1999. (Manuais Técnicos em Geociências, n. 8). Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=282505>>. Acesso em: 23 jun 2021.

JAXA – JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. **ALOS Data Users Handbook.** Earth Observation Research and Application Center, 2008.

KITTS, D. et al. **Mesh orientation and cell size sensitivity in 2D SWE solvers.** IAHR 10th Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow. 2020.

LI, Z., ZHU, Q., GOLD, C. M. **Digital Terrain Modelling Principles and Methodology.** Nova York. 2005.

LIMA, J. E. F. W. **Recursos hídricos no Brasil e no mundo.** Embrapa Cerrados-Documentos (INFOTECA-E), 2001.

LUDWIG, R., SCHNEIDER, P., **Validation of Digital Elevation Models from SRTM X-SAR for Applications in Hydrologic Modeling.** ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. nº 60, p. 339-358, 2006.

MASCARENHAS, F. C. B. (1990). **Modelação matemática de ondas provocadas por ruptura de barragens.** Tese de doutorado em engenharia civil. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 291 p.

MENEZES, P. M. L. de; FERNANDES, M. do C. **Roteiro de Cartografia.** São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

MIROSŁAW-ŚWIĄTEK, D. et al. **Developing an algorithm for enhancement of a digital terrain model for a densely vegetated floodplain wetland.** Journal of Applied Remote Sensing, v. 10, n. 3, p. 036013, 2016.

MILIAREISIS, G. C.; PARASCHOU, C. V. E. **Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 7, n. 1, p. 49-59, 2005.

MONTEIRO, L. R. et al. **Simulação da onda superficial provocada pelo fechamento de comportas utilizando uma aproximação inercial da Equação de Saint-Venant.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, n. 4, p. 927-936, 2015.

OLIVEIRA, Paulo T. S. de et al. **Caracterização Morfométrica de Bacias Hidrográficas Através de Dados SRTM.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 819-825, 2010.

PAPPENBERGER, F., Et. al. **Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations.** Journal Of Hydrology, [S.L.], v. 302, n. 1-4, p. 46-69, fev. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.036>.

PEREIRA, L. F. **Segurança de barragens no Brasil: um breve comparativo com a legislação internacional e análise da influência da cobertura do solo de APPs sobre manchas de inundação (estudo de caso da PCH Pedra Furada, Ribeirão-PE).** 2019. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019.

ROSMAN, P. C. C. ET AL. **Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental. Métodos Numéricos Em Recursos Hídricos,** v. 5, p. 1-166, 2001.

SARAIVA, Lorena Silva. **Comparação entre critérios para determinação de hidrogramas de ruptura de barragens**. 2014. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SILVA, J. A. **Gestão de Recursos Hídricos e Sistemas de Informações Geográficas**: Contribuições para a organização sócio-espacial do pontal do Paranapanema-SP. 2006. 225 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/101421/silva_ja_dr_prud.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 20 jun. 2021.

TIGHE, M. L.; CHAMBERLAIN, D. **Accuracy comparison of the SRTM, ASTER, NED, NEXTMAP® USA digital terrain model over several USA study sites**. ASPRS/MAPPS 2009 Fall Conference. 2009.

TOLKIEN, J. R. R. **O Hobbit**, 3. Ed. São Paulo: Editora Intrínseca, 2014.

USACE – United States Army Corps of Engineers. **2D User's Manual**. 2016a.

USACE – HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. **HEC-RAS: River Analysis System**. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA, 2016b.

USACE – United States Army Corps of Engineers. **Hydraulic Reference Manual**. 2016c.

USACE – United States Army Corps of Engineers. **User's Manual**. 2016d.

U.S. Geological Survey. **Digital Elevation SRTM 1 Arc-Second Global**. Disponível em: < <https://earthexplorer.usgs.gov/> >. Acesso em 04 abr. 2021.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2004.

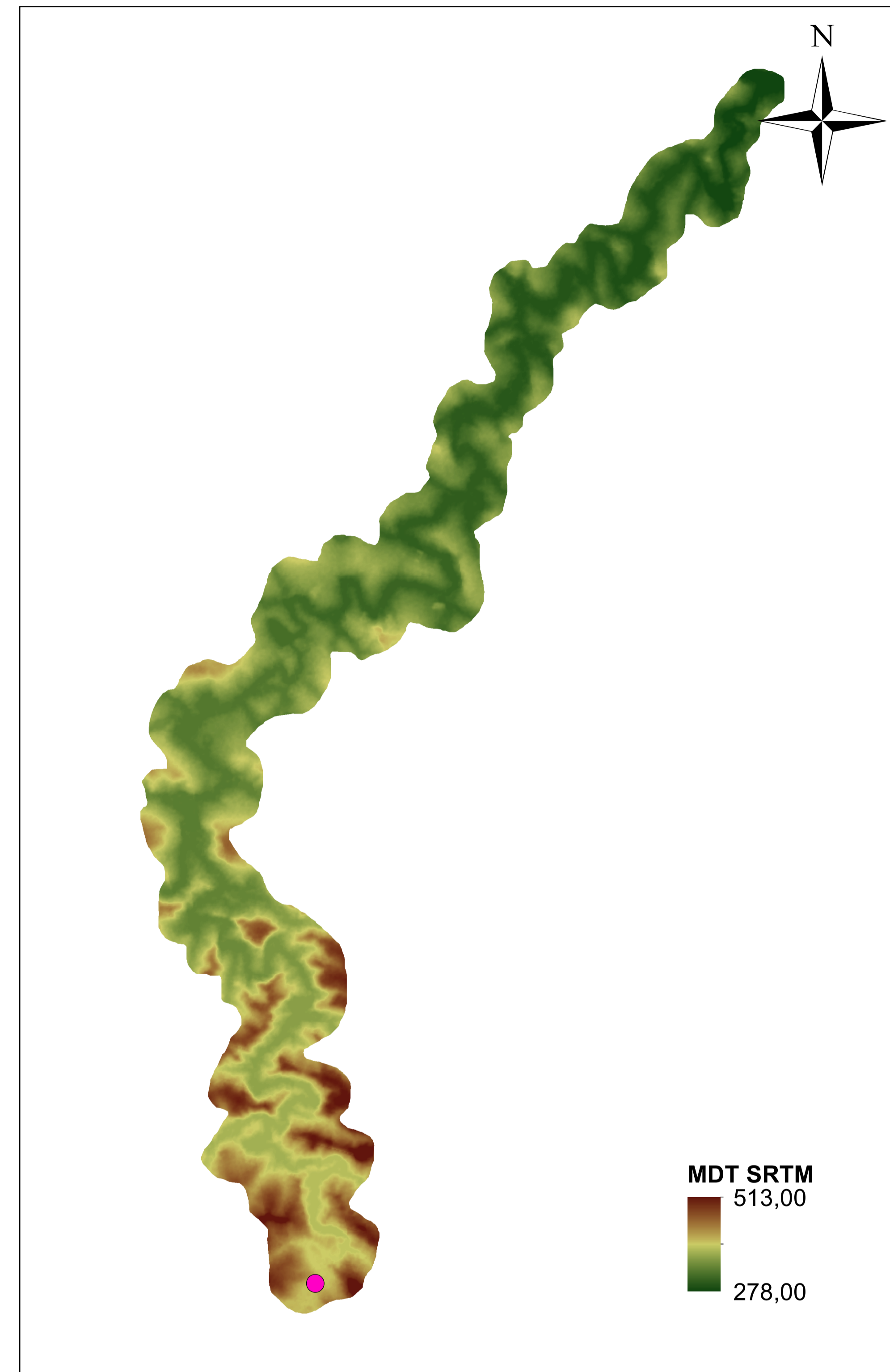
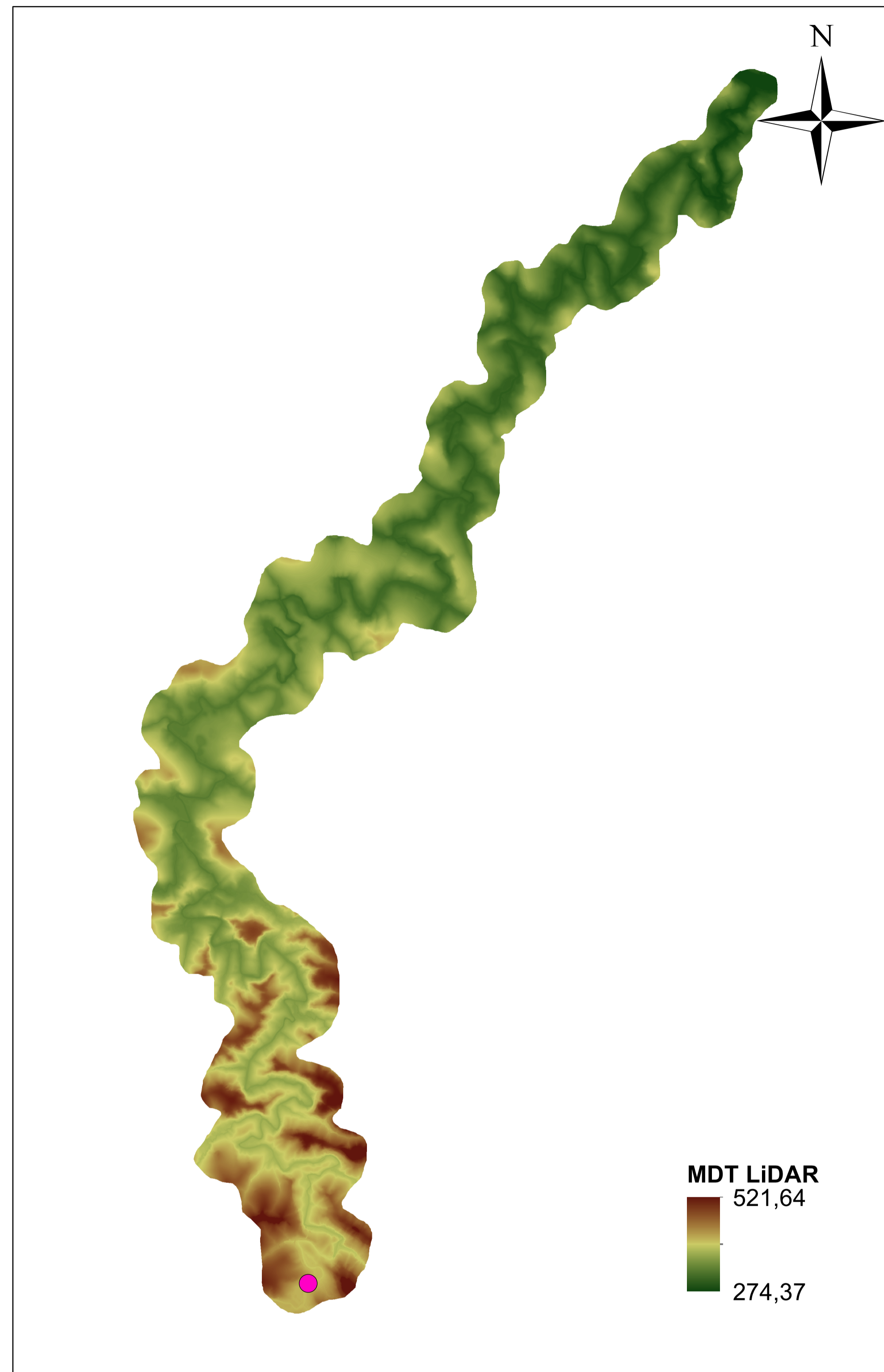
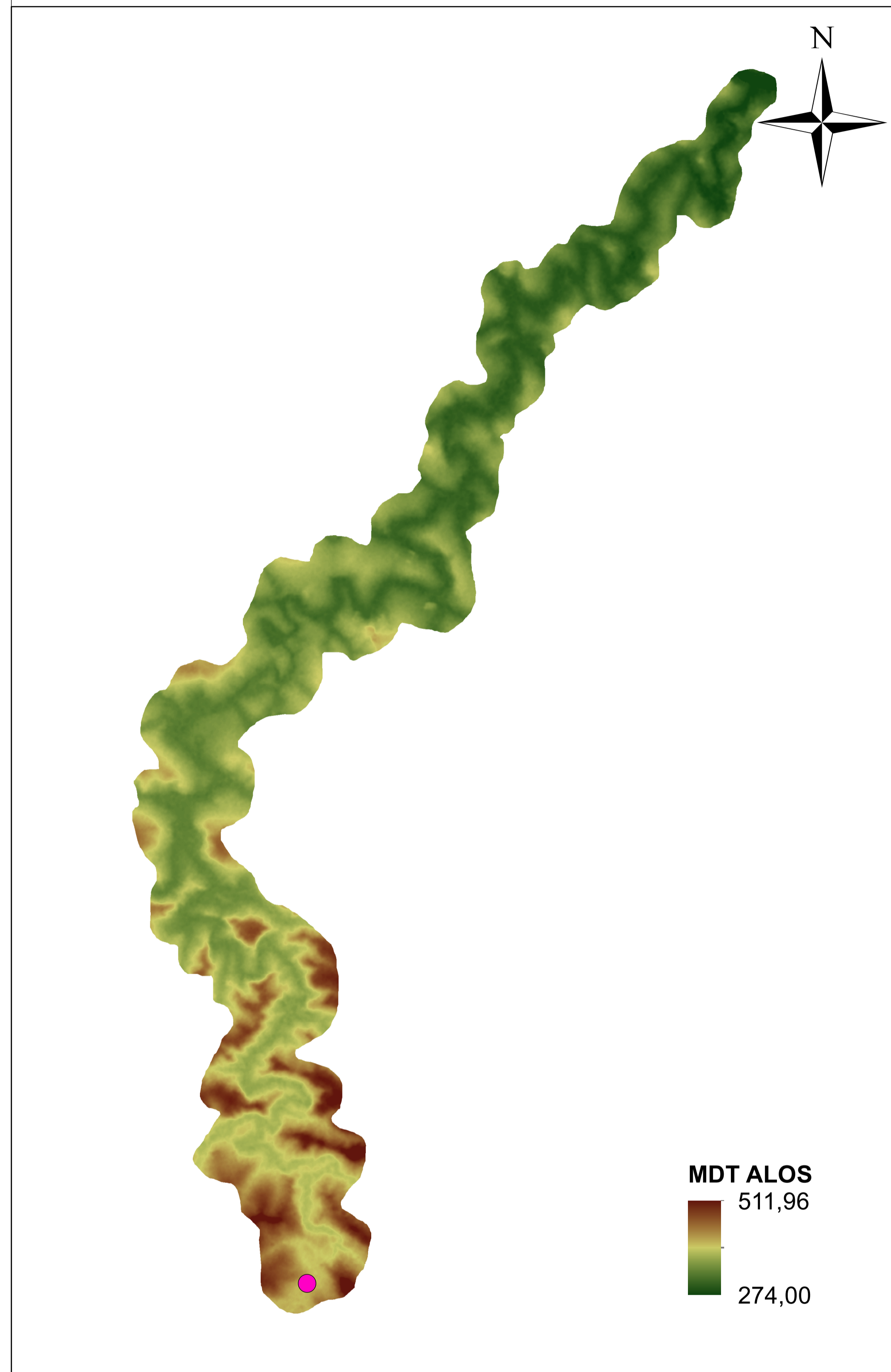
VALERIANO, M. M., ROSSETTI, D. F. **TOPODATA: Seleção de Coeficientes Geoestatísticos para o Refinamento Unificado de Dados SRTM**. São José dos Campos: INPE, 2010.

WISEU, T. **Segurança dos vales a jusante de barragens – Metodologia de apoio à gestão dos riscos**. Tese de doutorado – Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2006.

VIVIANI, E., MANZATO, G. G. **Geração de modelos digitais de superfície por meio de plataformas computacionais com estrutura vetorial e raster**. Ciencia y Engenharia/Science and Engineering Journal, p. 27-33, 2005.

APÊNDICE A – Mapas de elevação dos modelos digitais de terreno

Mapa de Elevação do Modelo Digital de Terreno - Barragem A



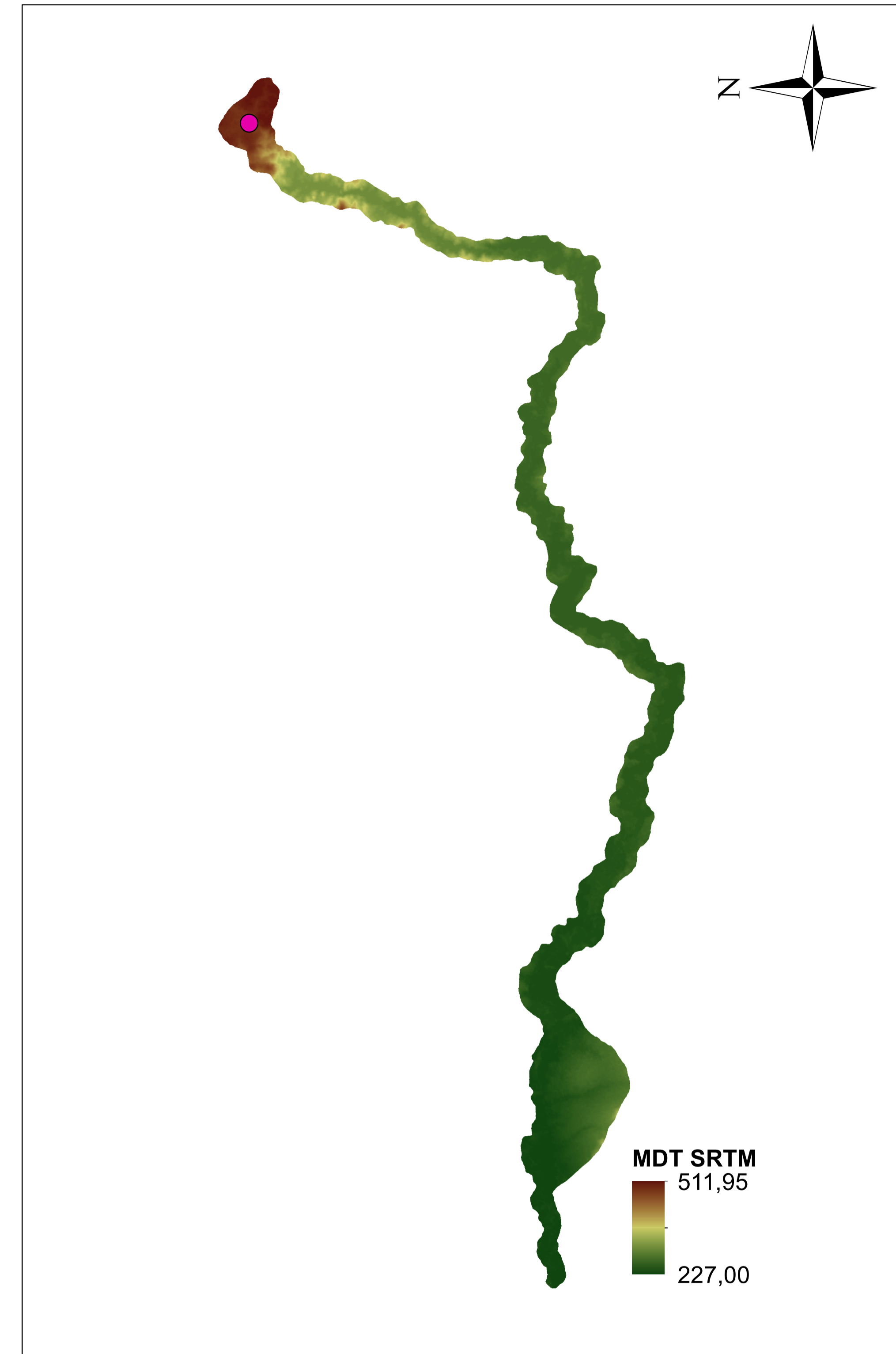
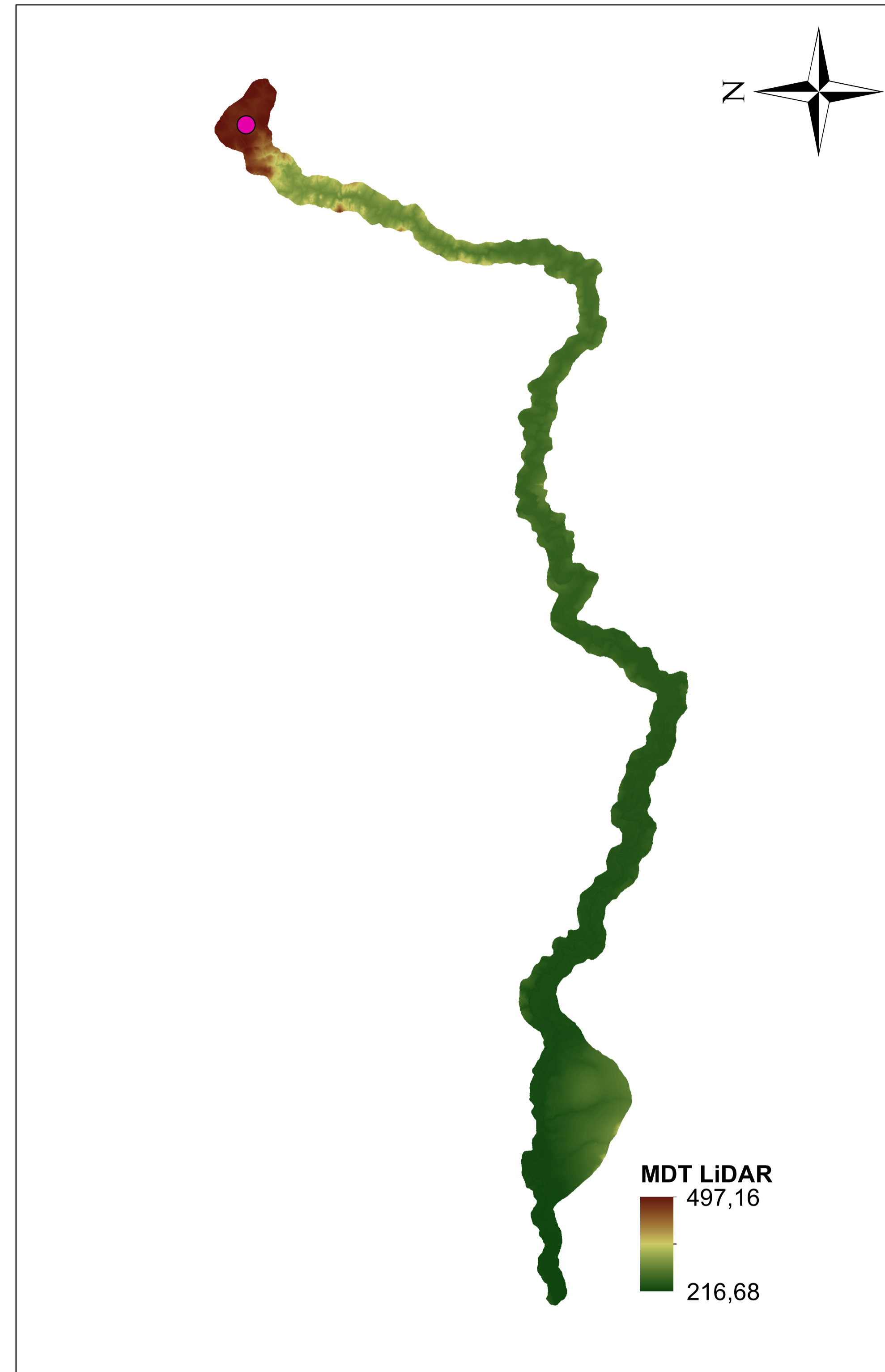
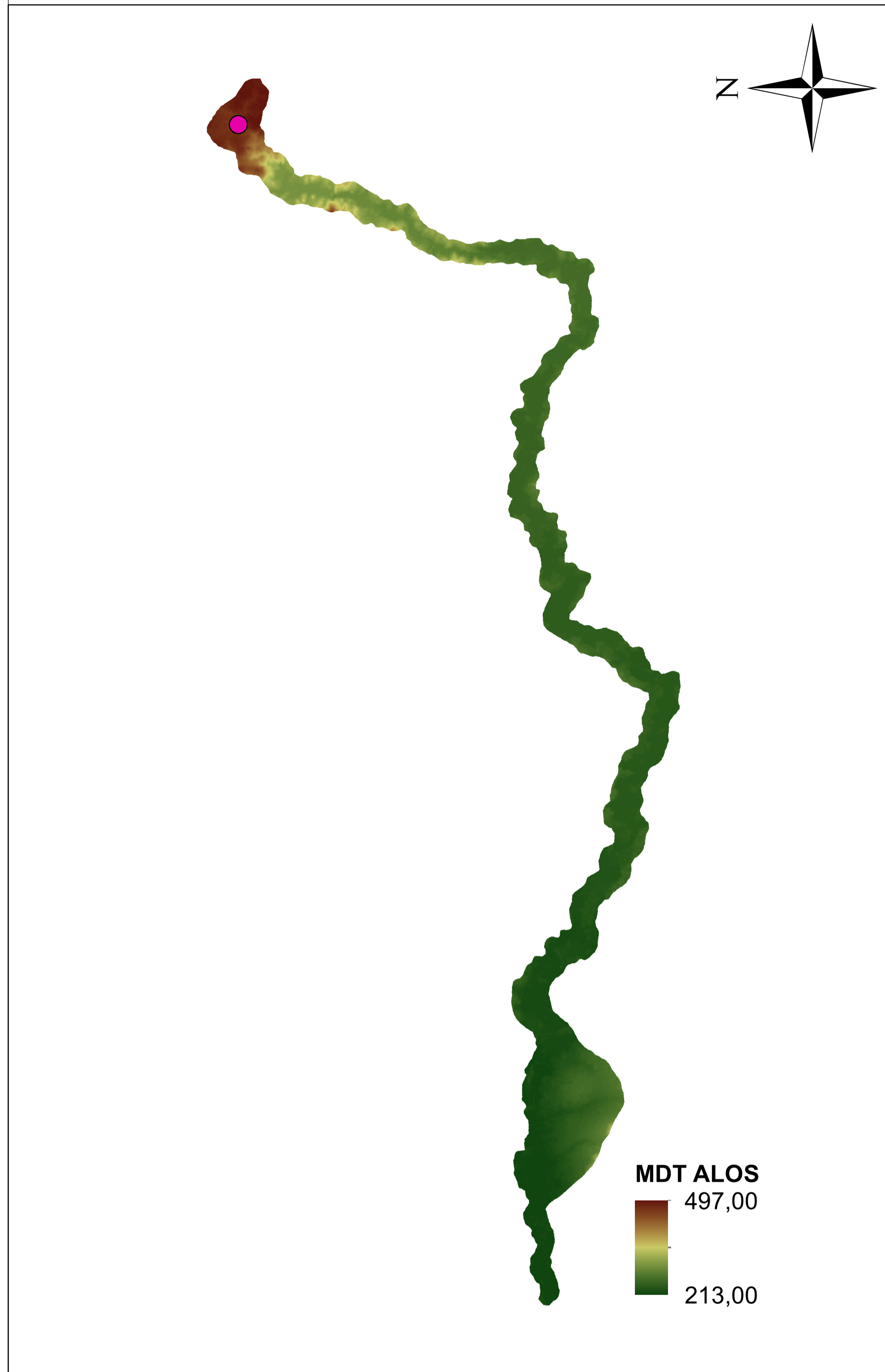
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



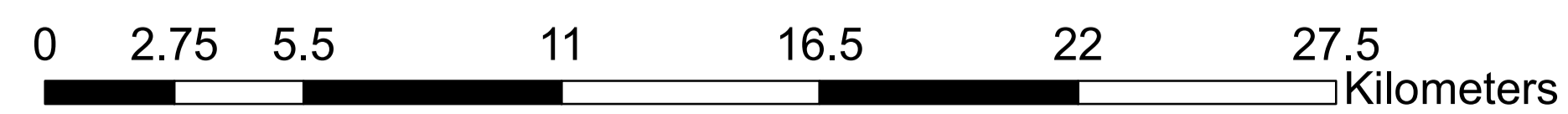
Dano Potencial - Baixo
Altura da barragem - 8,00 m
Comprimento - 68,00 m
Volume máximo do reservatório - 0,74 hm³
Vazão de projeto - 350,00 m³/s
Potência instalada - 2,56 MW

Mapa de Elevação do Modelo Digital de Terreno - Barragem B



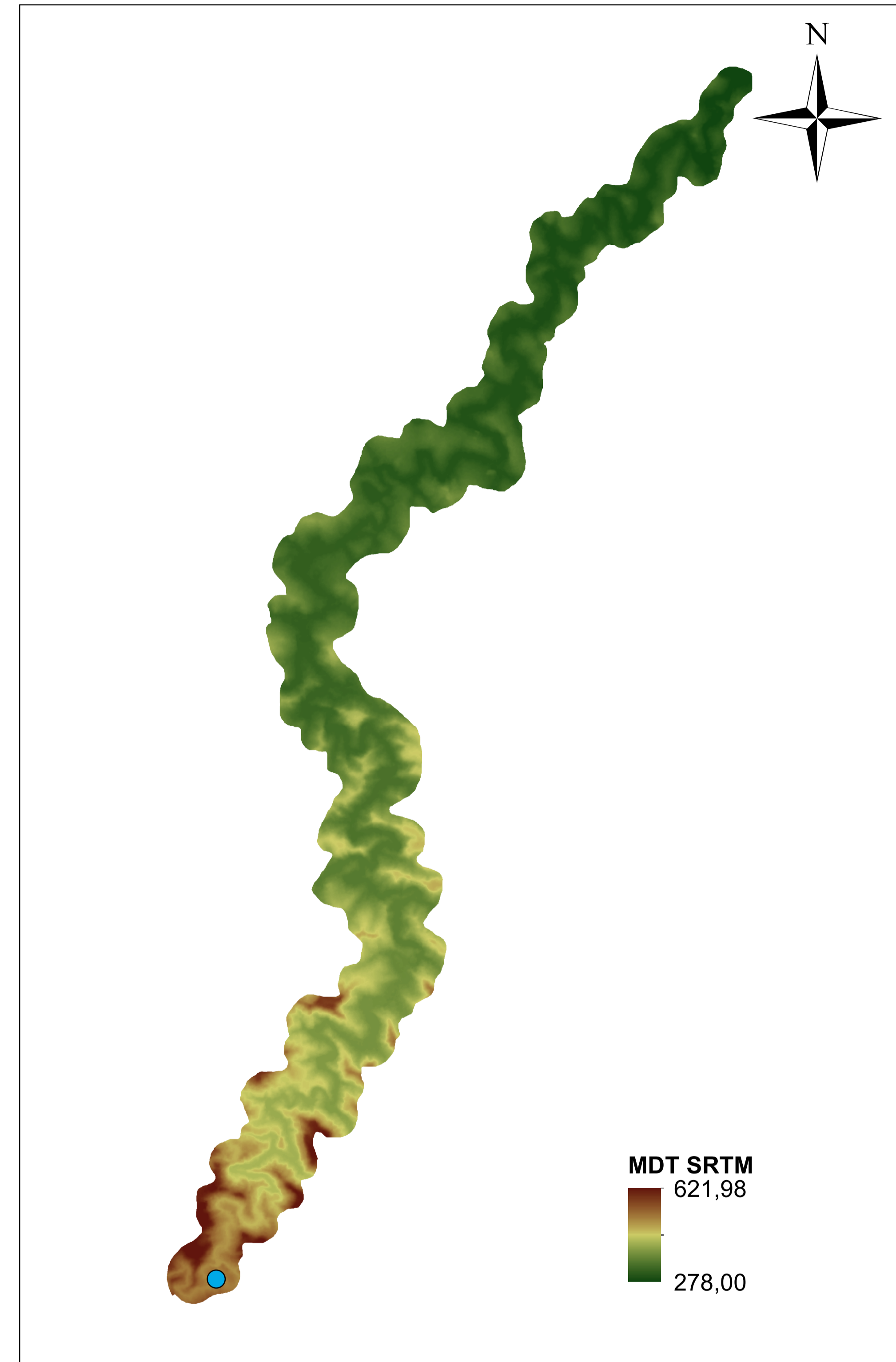
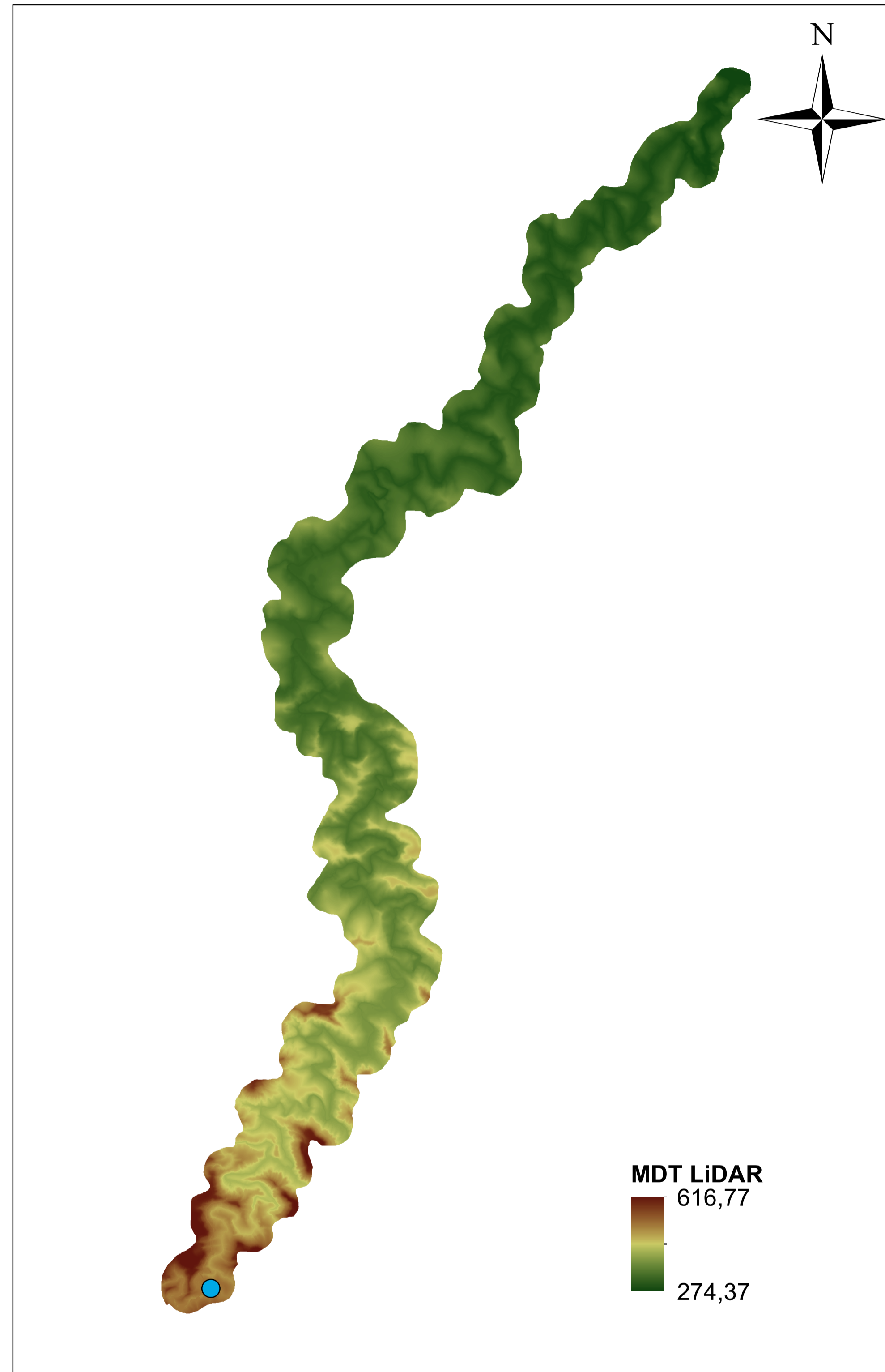
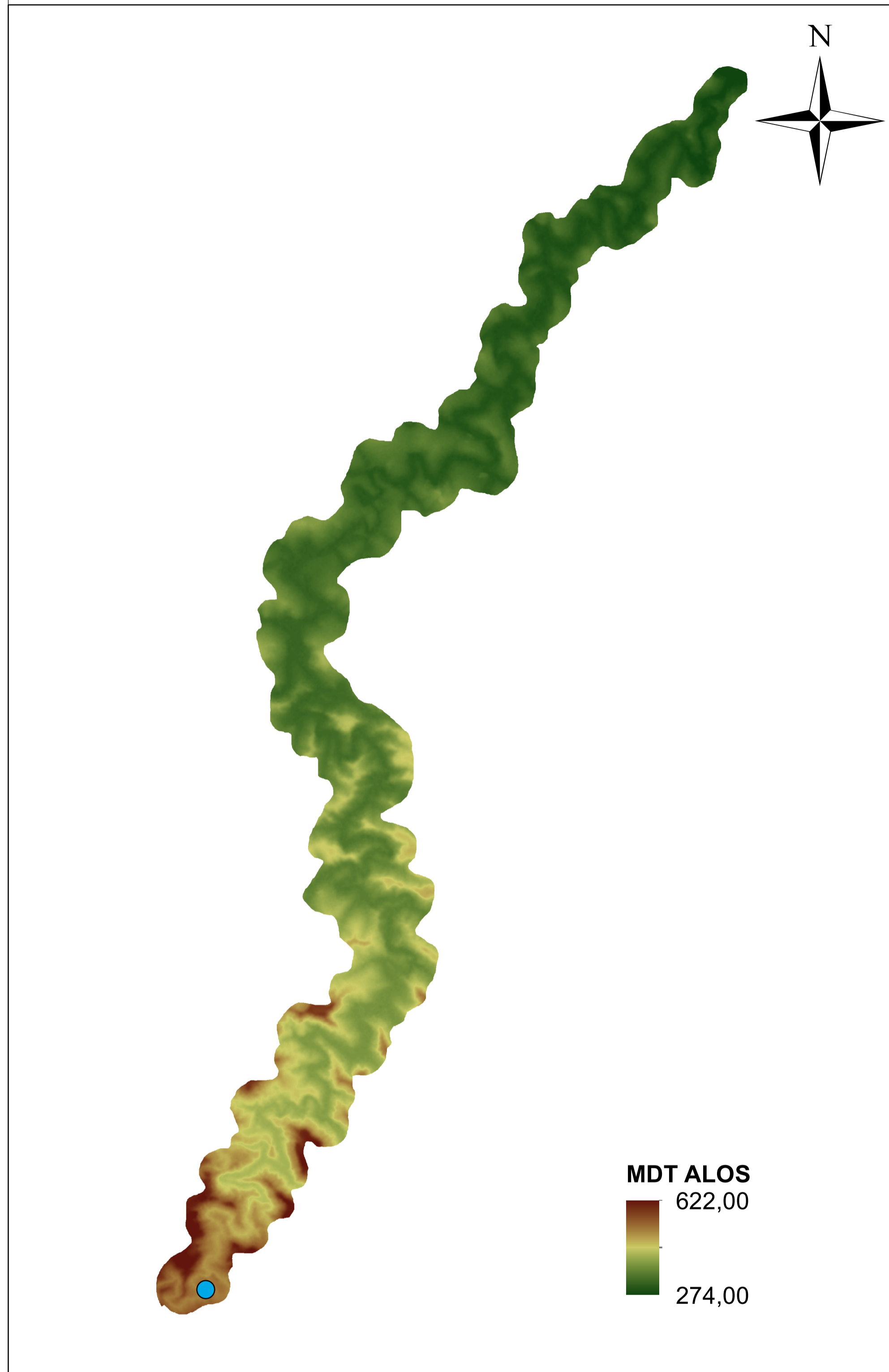
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 21S

Escala:



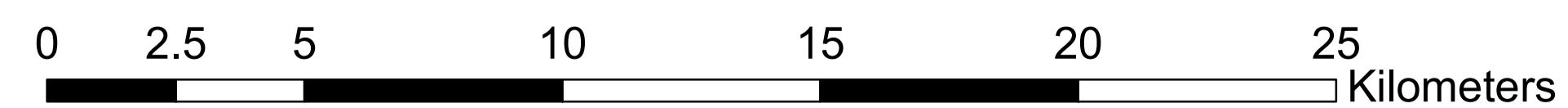
Dano Potencial - Baixo
Altura da barragem - 14,20 m
Comprimento - 1012,00 m
Volume máximo do reservatório - 22,63 hm³
Vazão de projeto - 530,00 m³/s
Potência instalada - 120,00 MW

Mapa de Elevação do Modelo Digital de Terreno - Barragem C



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Médio

Altura da barragem - 10,00 m

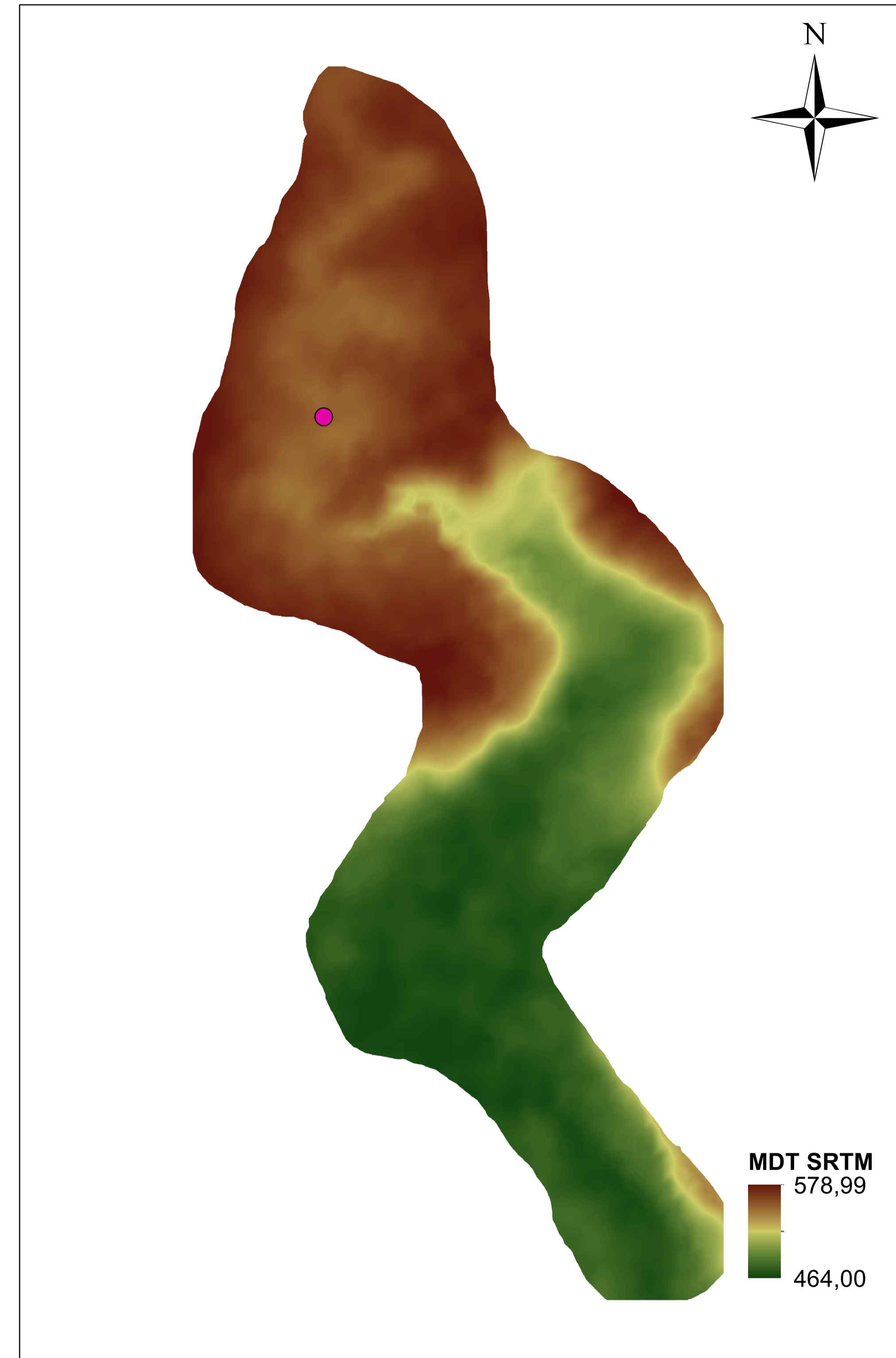
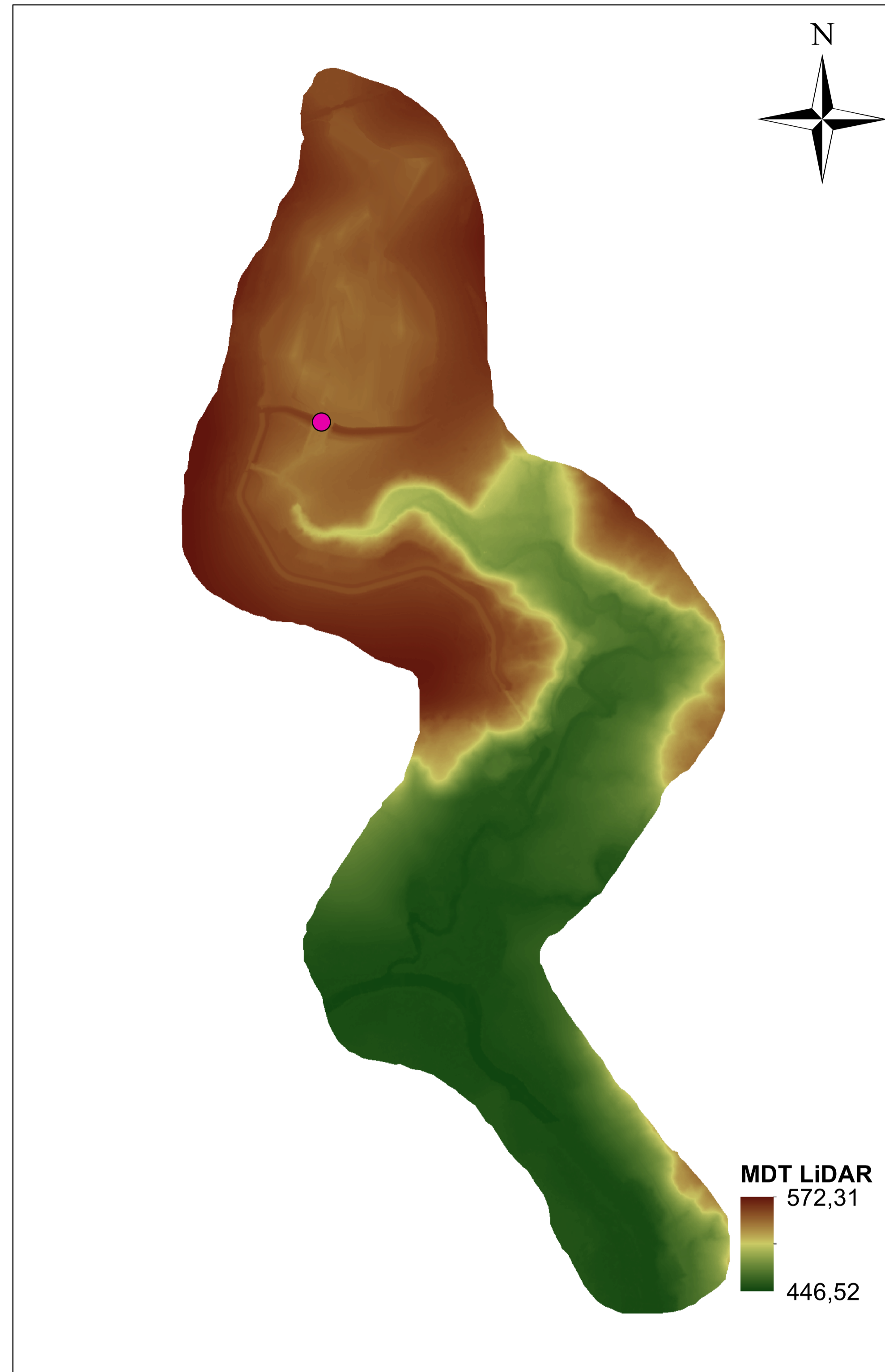
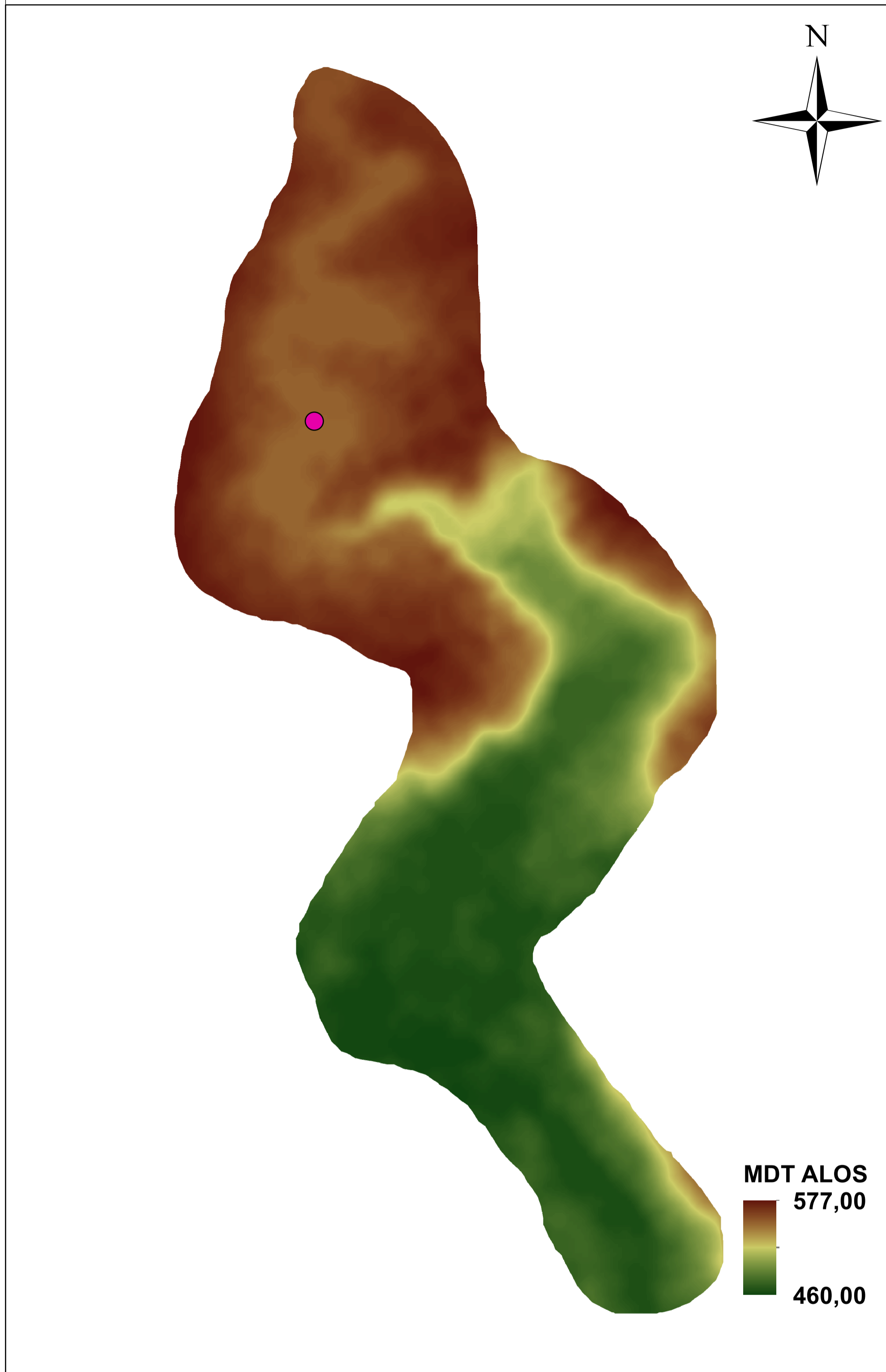
Comprimento - 356,00 m

Volume máximo do reservatório - 6,35 hm³

Vazão de projeto - 482,50 m³/s

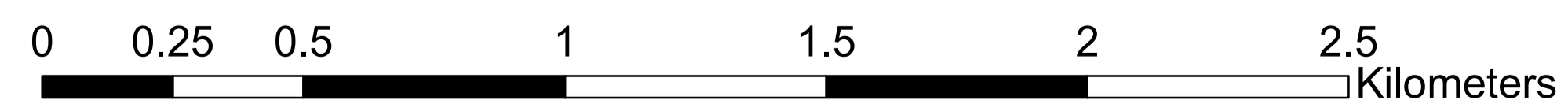
Potência instalada - 15,10 MW

Mapa de Elevação do Modelo Digital de Terreno - Barragem D



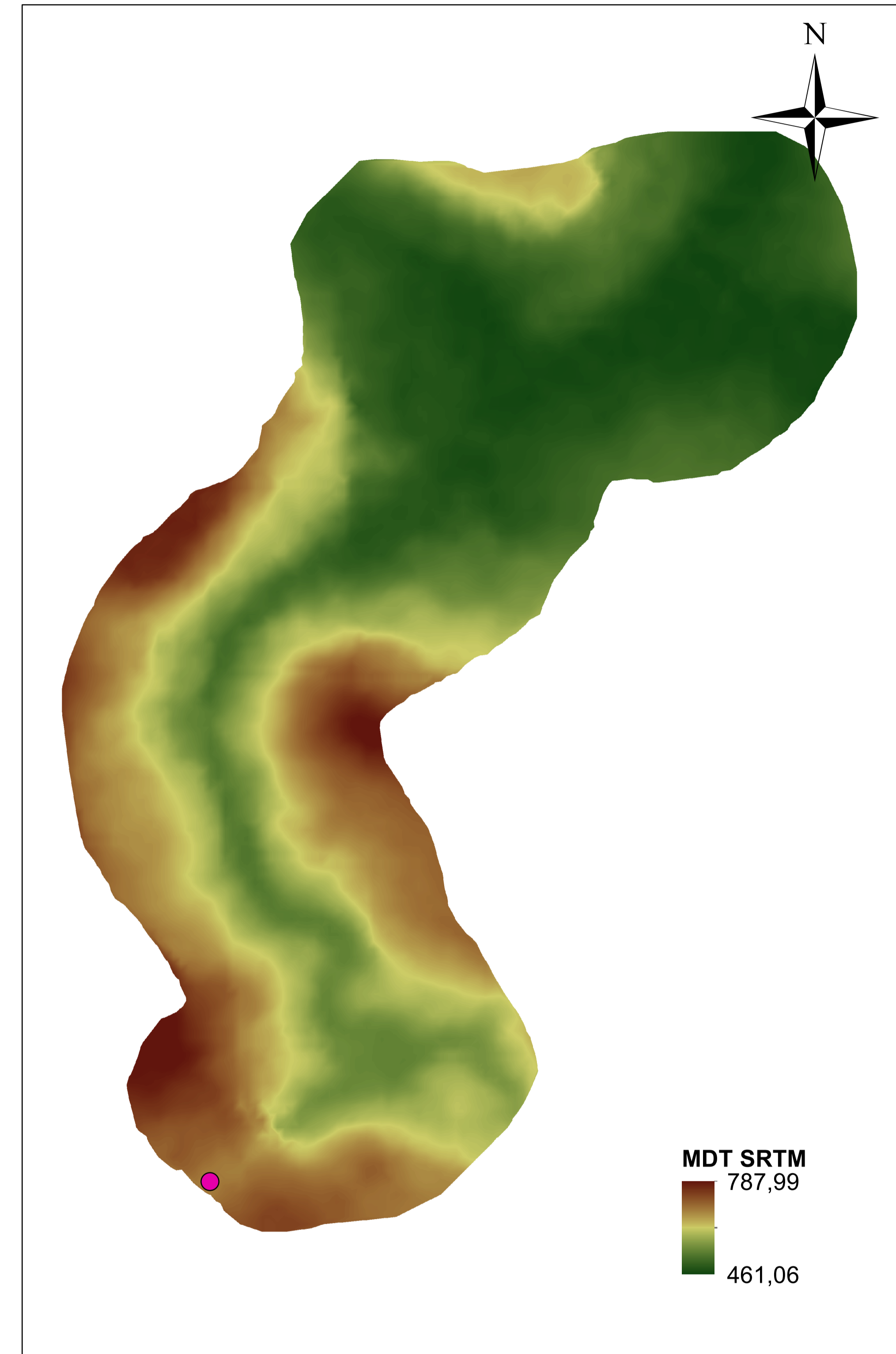
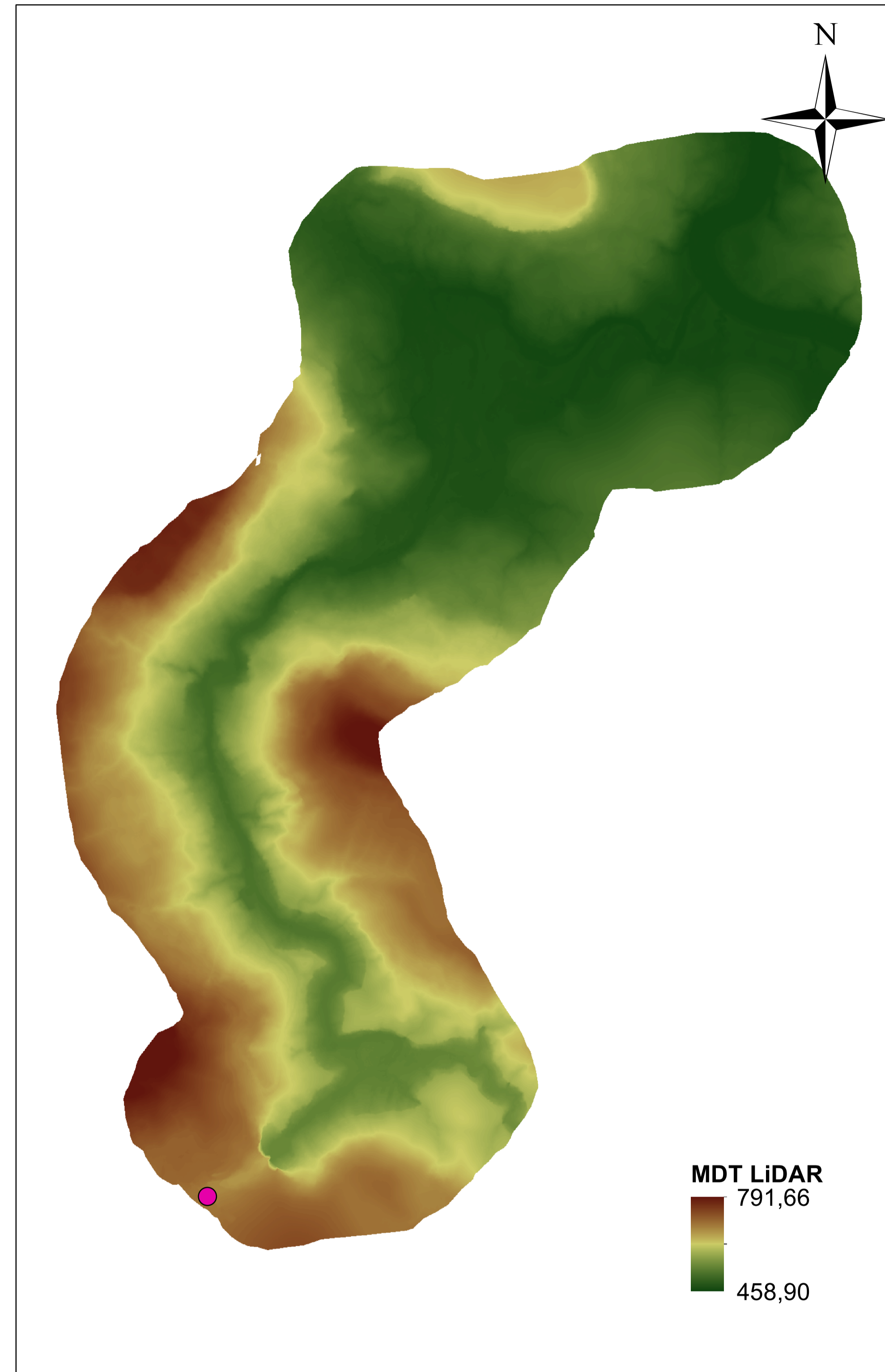
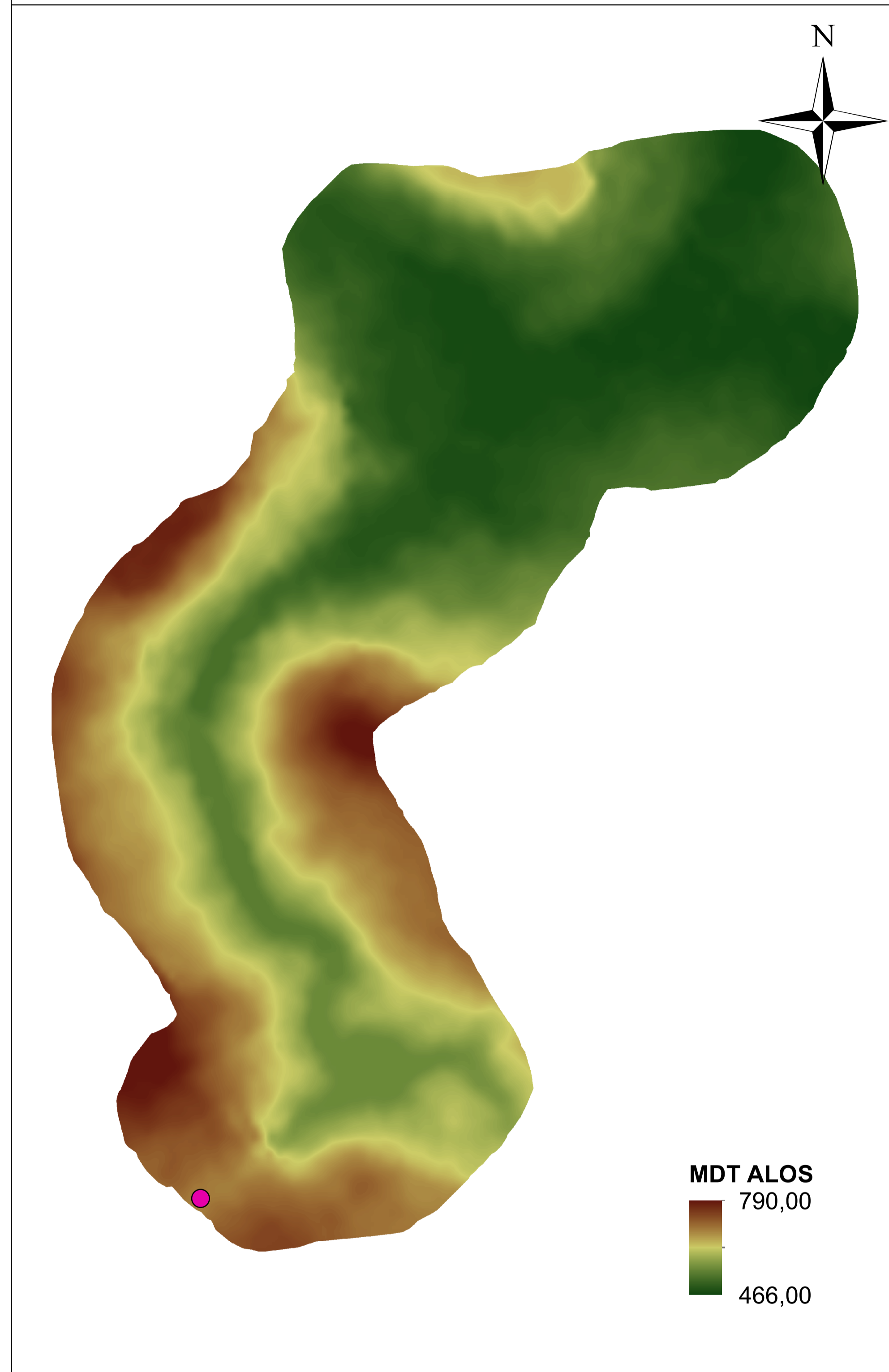
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



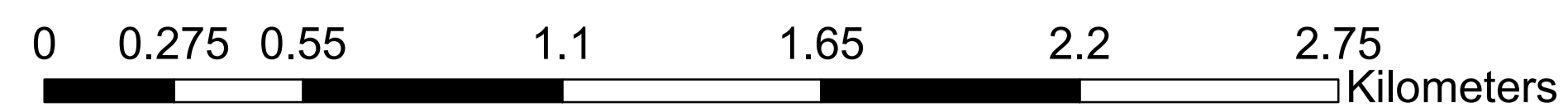
Dano Potencial - Médio
Altura da barragem - 12,00 m
Comprimento - 630,00 m
Volume máximo do reservatório - 8,77 hm³
Vazão de projeto - 340,00 m³/s
Potência instalada - 21,60 MW

Mapa de Elevação do Modelo Digital de Terreno - Barragem E



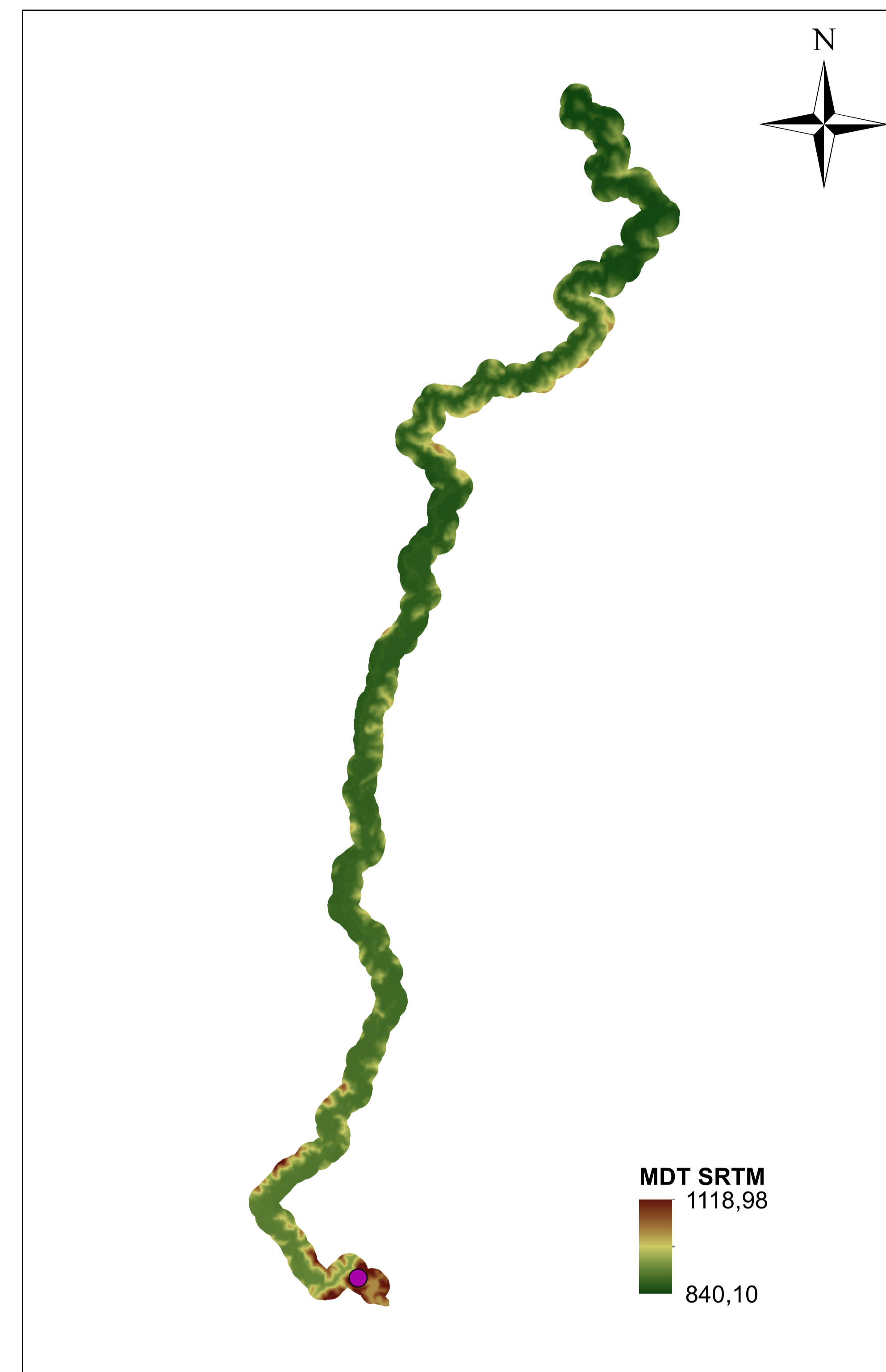
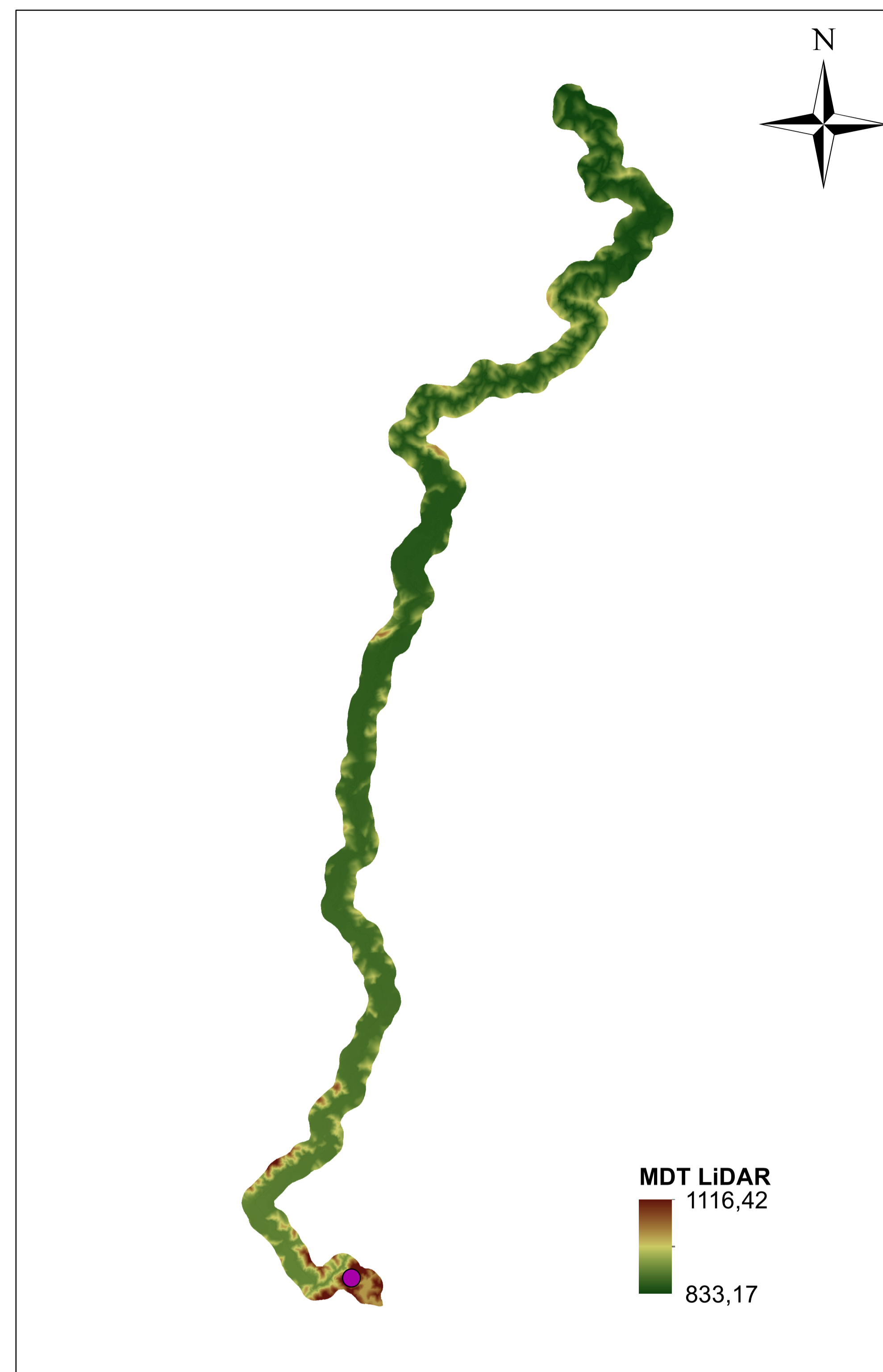
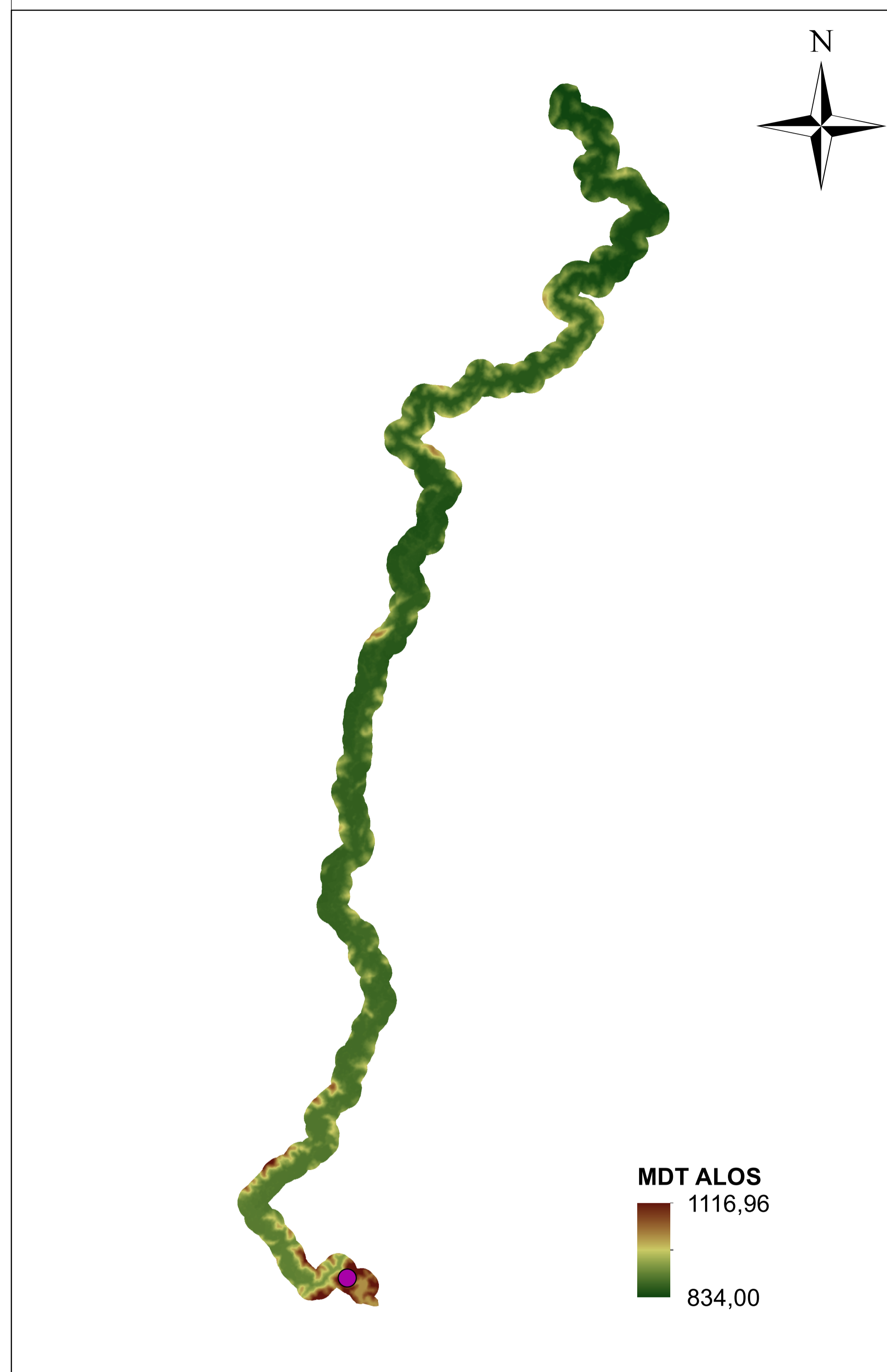
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



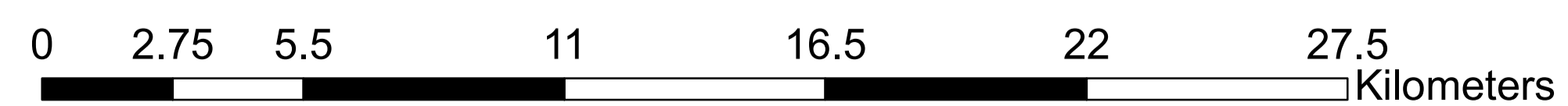
Dano Potencial - Alto
Altura da barragem - 10,40 m
Comprimento - 210,00 m
Volume máximo do reservatório - 1,84 hm³
Vazão de projeto - 431,00 m³/s
Potência instalada - 16,20 MW

Mapa de Elevação do Modelo Digital de Terreno - Barragem F



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 23S

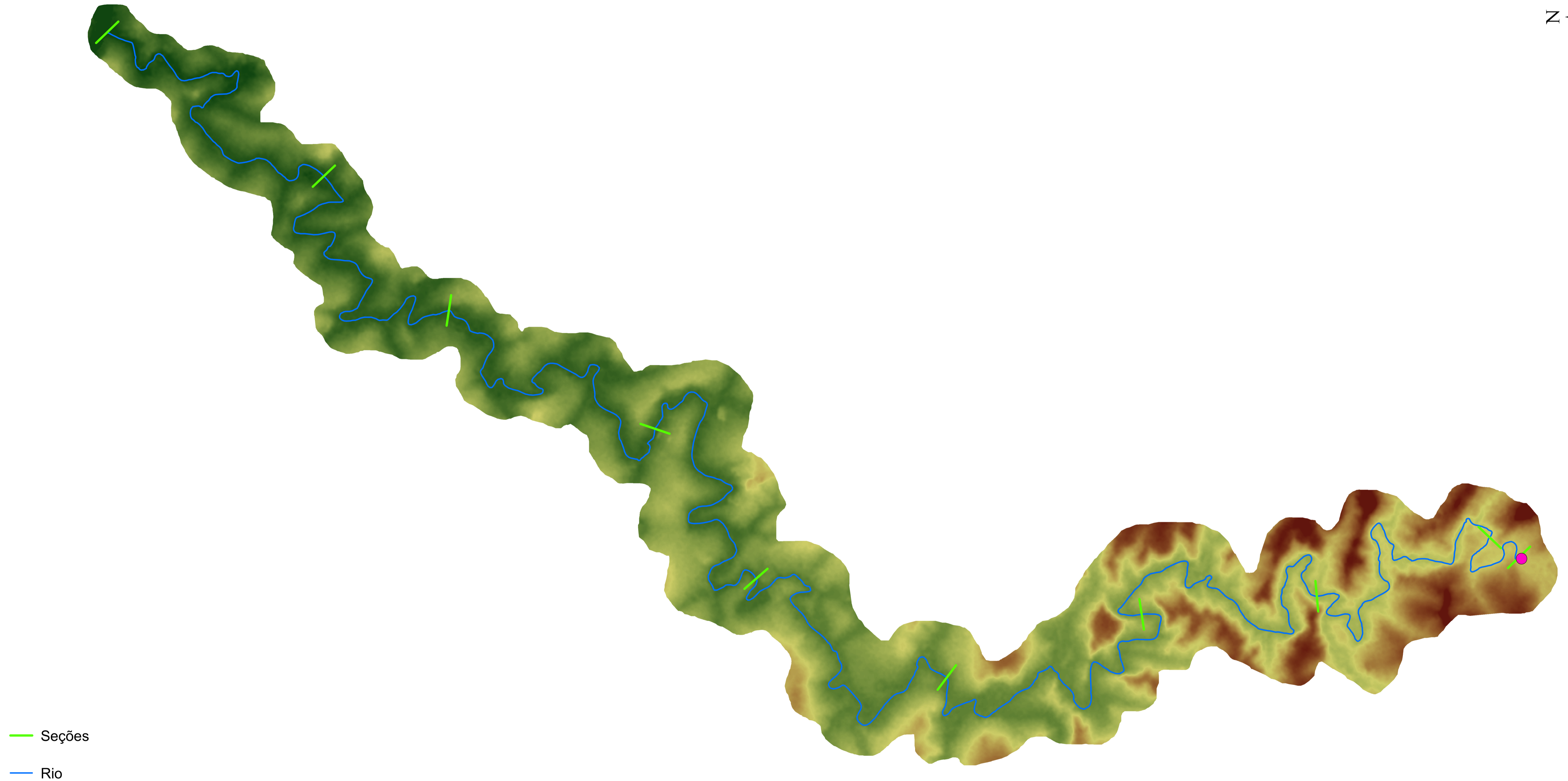
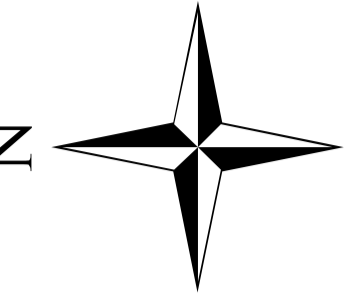
Escala:



Dano Potencial - Alto
Altura da barragem - 5,00 m
Comprimento - 25,00 m
Volume máximo do reservatório - 0,13 hm³
Vazão de projeto - 158,00 m³/s
Potência instalada - 3,80 MW

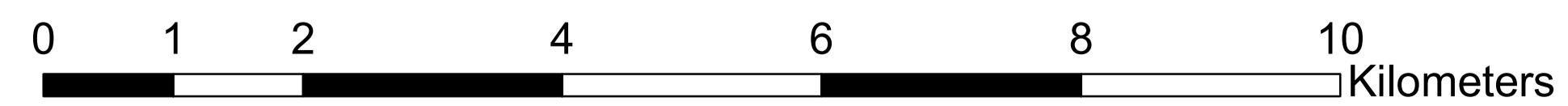
APÊNDICE B – Mapas de seções transversais das modelagens

Mapa de Seções Transversais - Barragem A



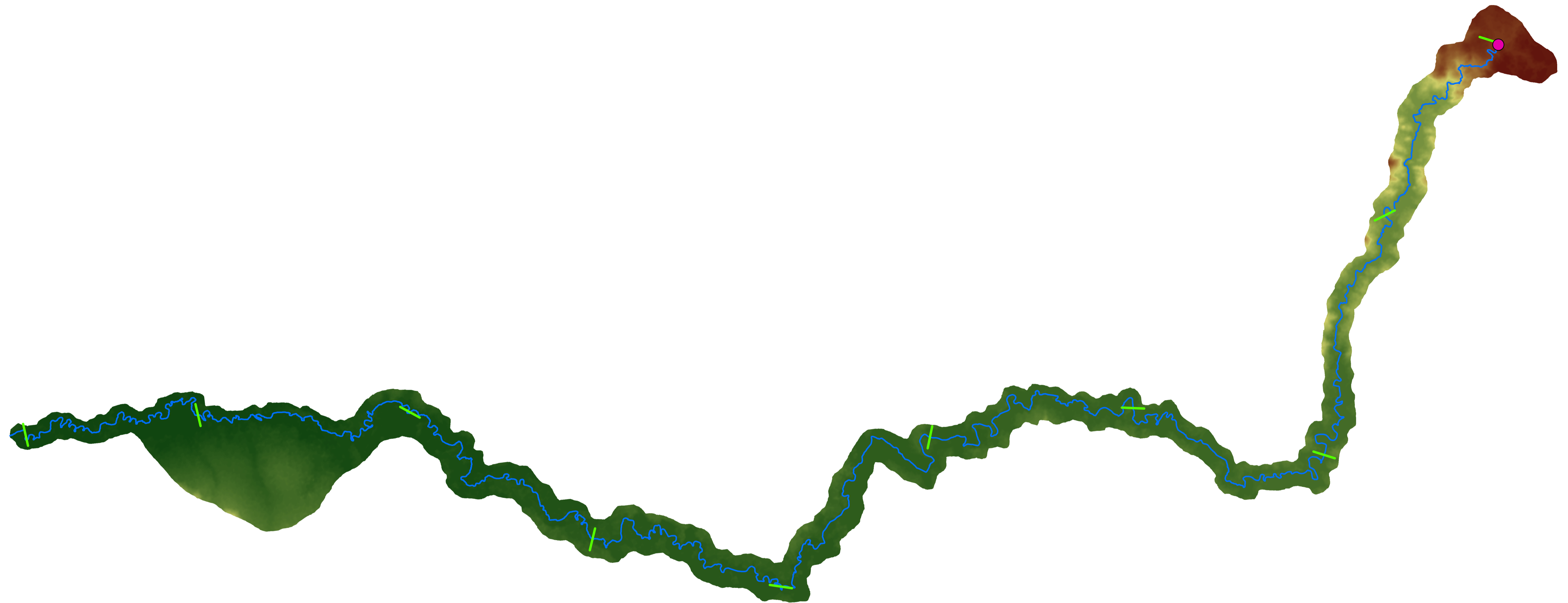
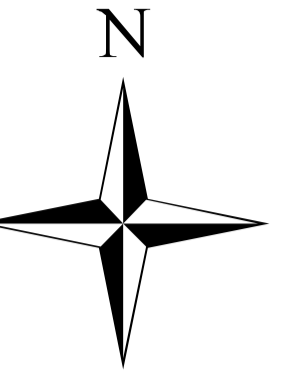
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Baixo
Altura da barragem - 8,00 m
Comprimento - 68,00 m
Volume máximo do reservatório - 0,74 hm³
Vazão de projeto - 350,00 m³/s
Potência instalada - 2,56 MW

Mapa de Seções Transversais - Barragem B



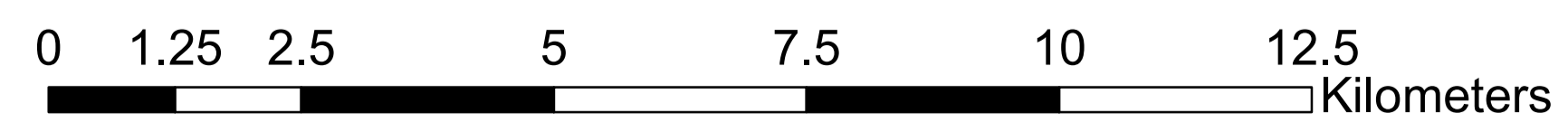
Seções

Rio



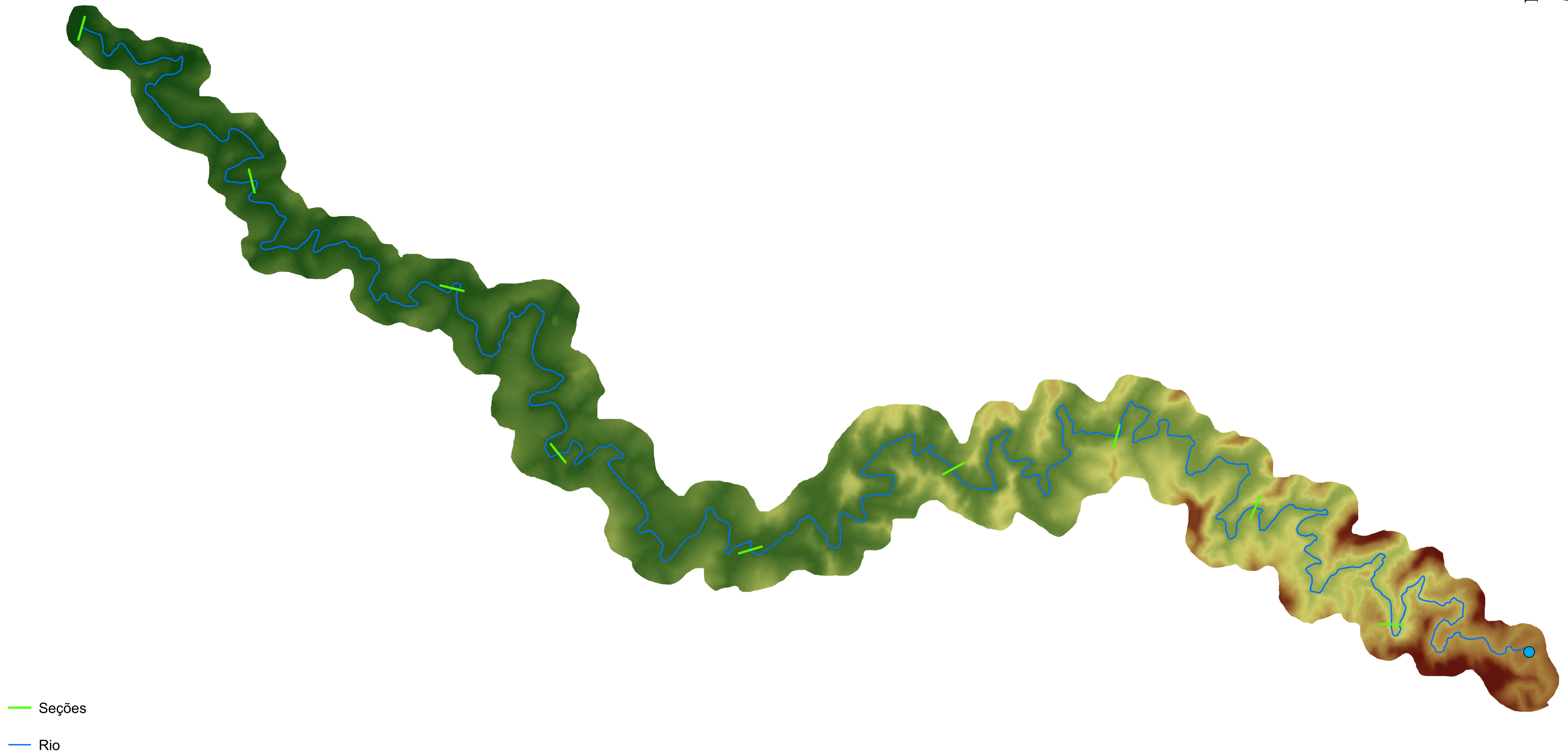
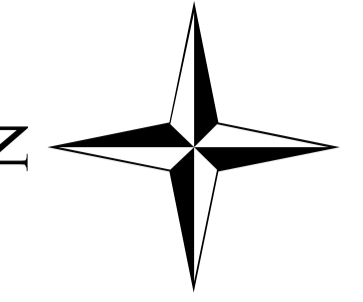
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 21S

Escala:



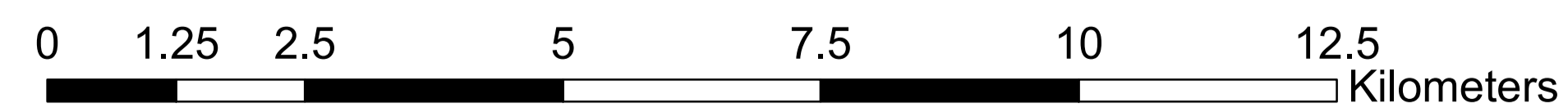
Dano Potencial - Baixo
Altura da barragem - 14,20 m
Comprimento - 1012,00 m
Volume máximo do reservatório - 22,63 hm³
Vazão de projeto - 530,00 m³/s
Potência instalada - 120,00 MW

Mapa de Seções Transversais - Barragem C



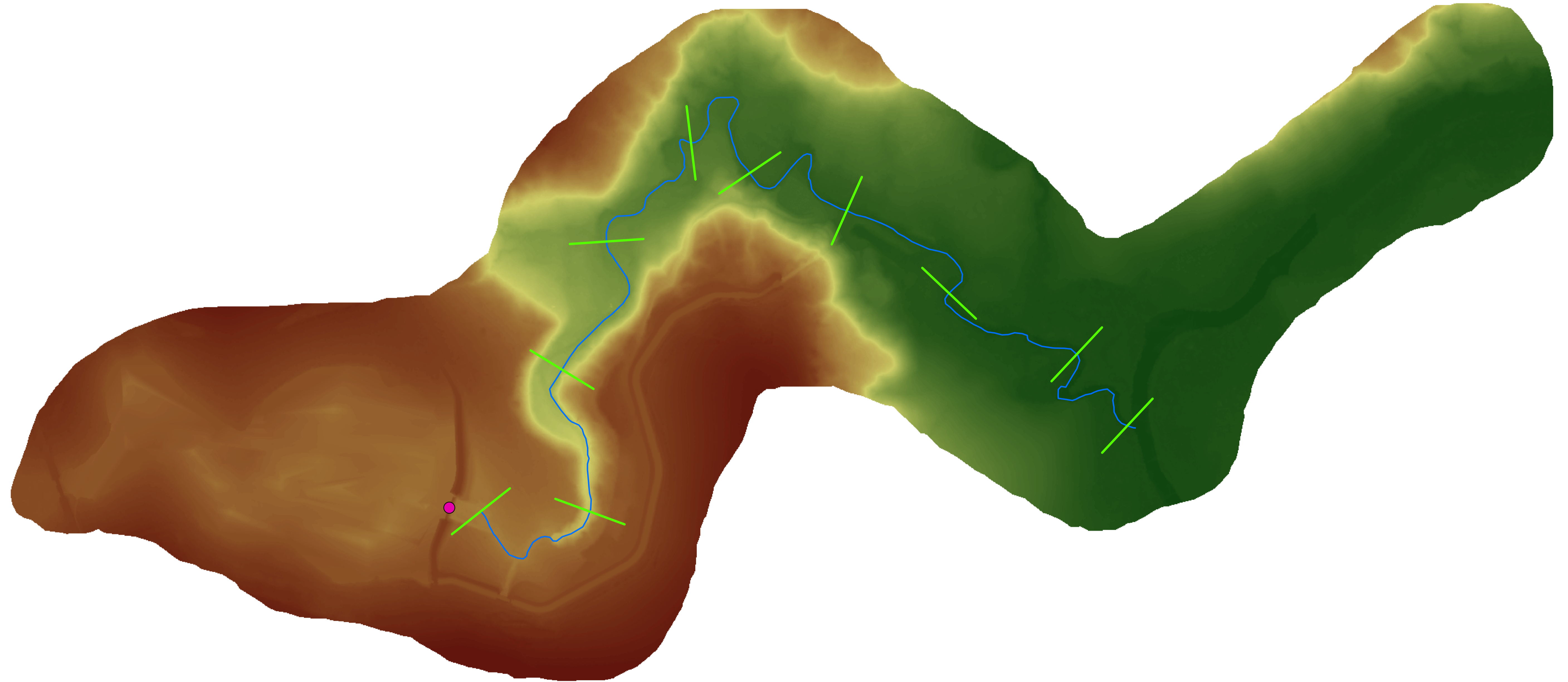
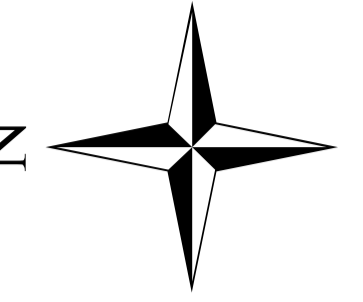
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Médio
Altura da barragem - 10,00 m
Comprimento - 356,00 m
Volume máximo do reservatório - 6,35 hm³
Vazão de projeto - 482,50 m³/s
Potência instalada - 15,10 MW

Mapa de Seções Transversais - Barragem D



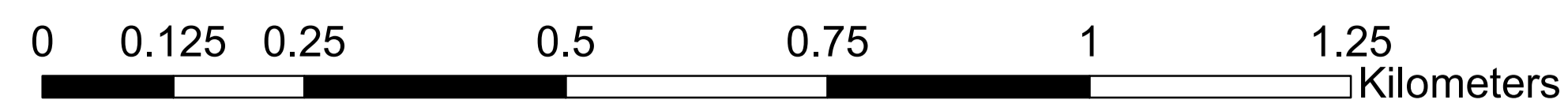
Seções

Rio



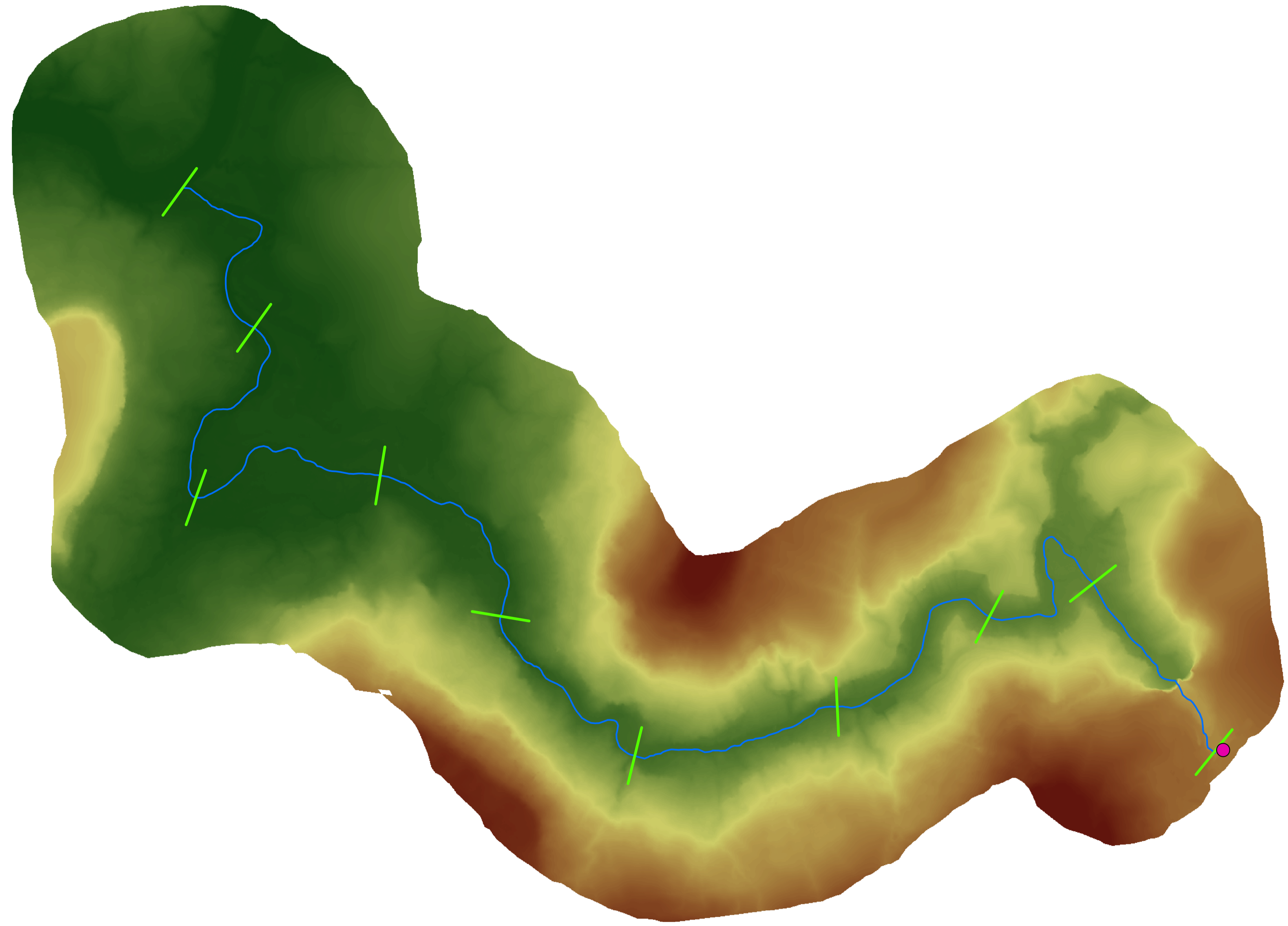
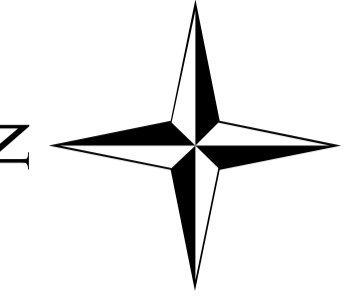
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Médio
Altura da barragem - 12,00 m
Comprimento - 630,00 m
Volume máximo do reservatório - 8,77 hm³
Vazão de projeto - 340,00 m³/s
Potência instalada - 21,60 MW

Mapa de Seções Transversais - Barragem E



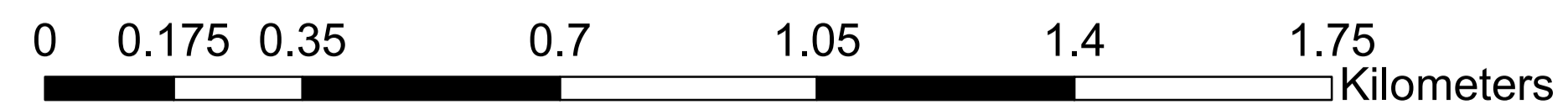
Seções

Rio



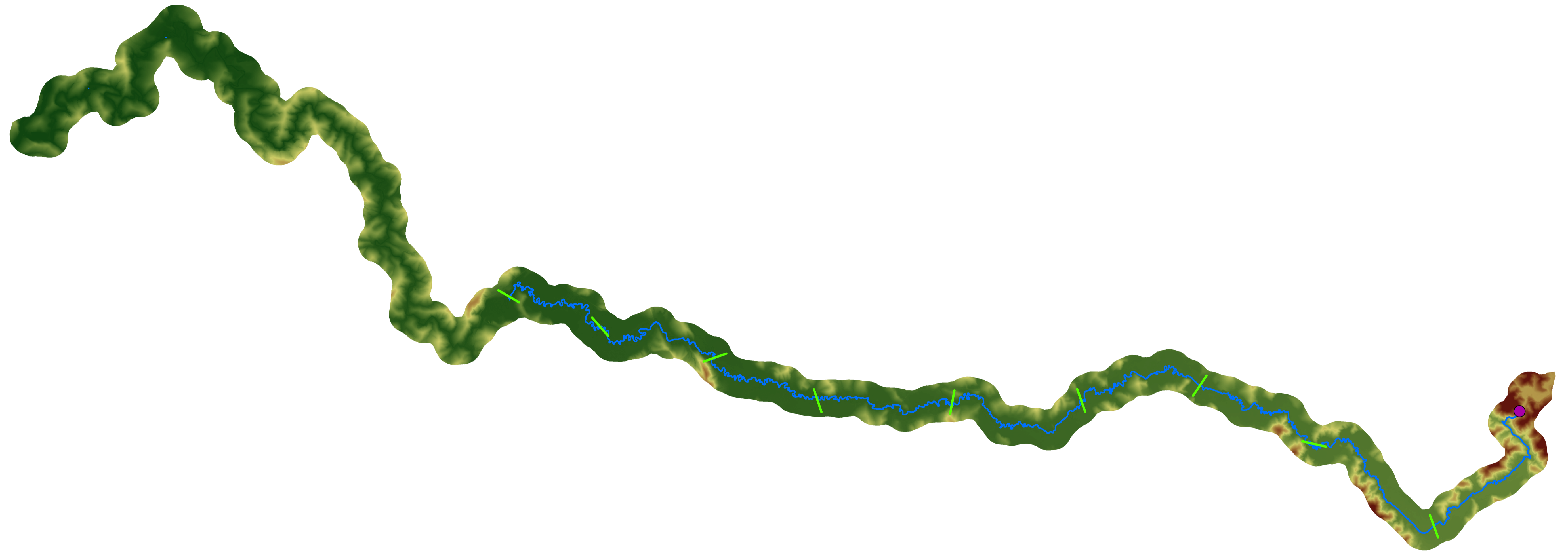
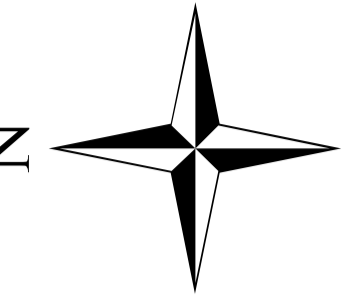
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Alto
Altura da barragem - 10,40 m
Comprimento - 210,00 m
Volume máximo do reservatório - 1,84 hm³
Vazão de projeto - 431,00 m³/s
Potência instalada - 16,20 MW

Mapa de Seções Transversais - Barragem F



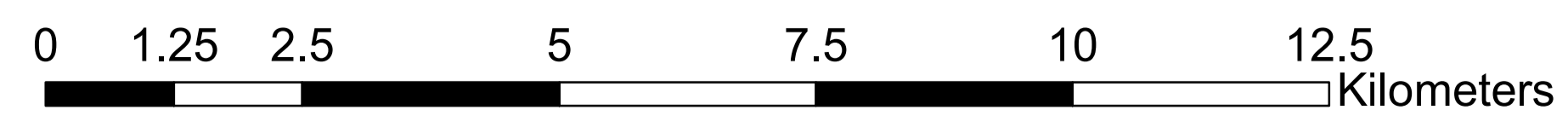
Seções

Rio



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 23S

Escala:

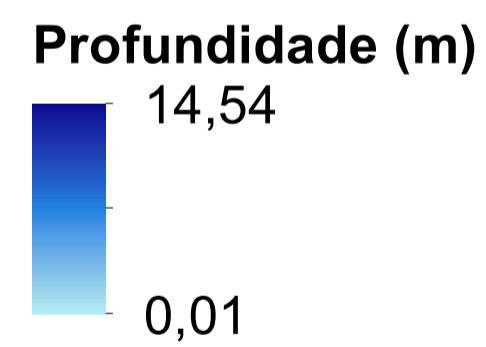
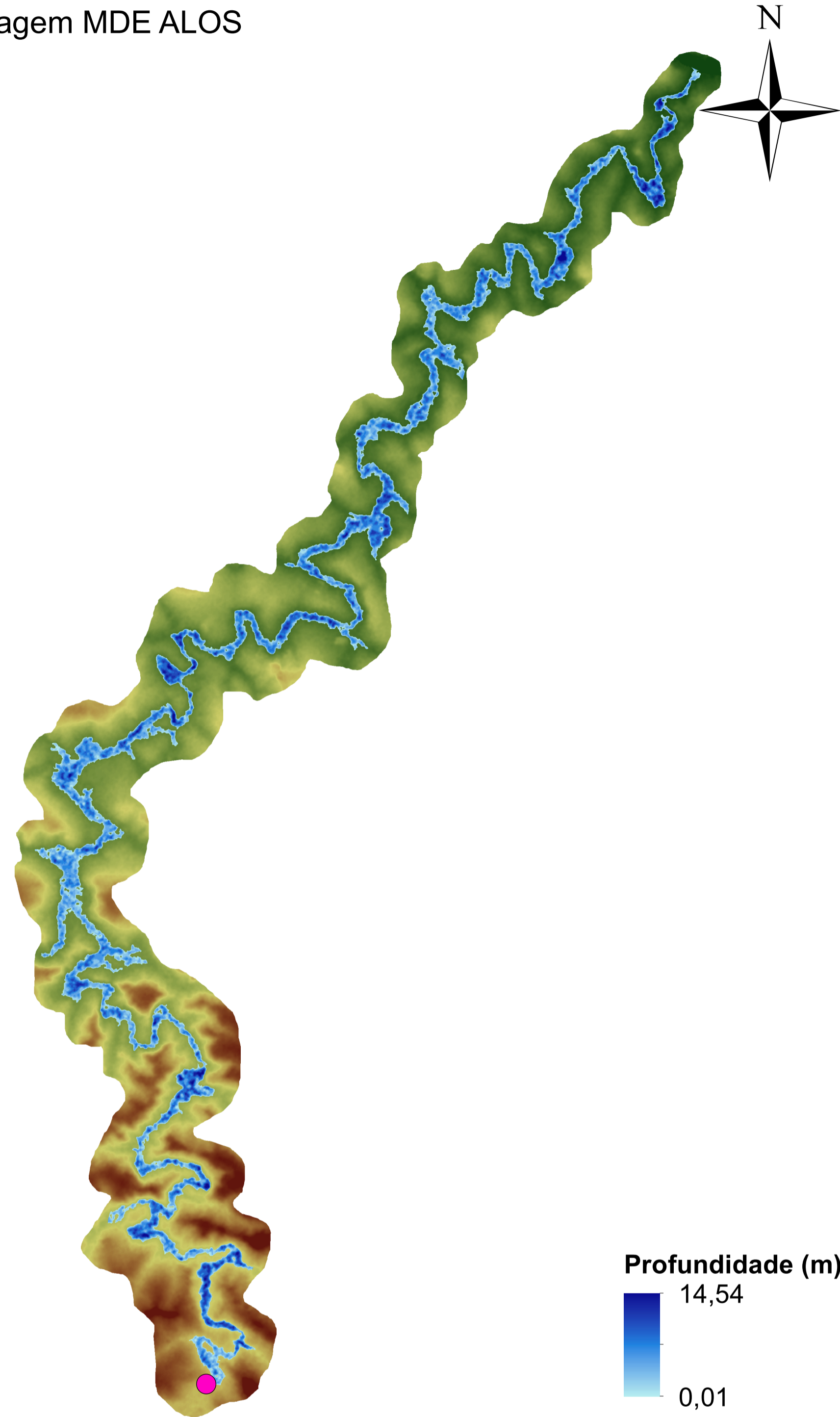


Dano Potencial - Alto
Altura da barragem - 5,00 m
Comprimento - 25,00 m
Volume máximo do reservatório - 0,13 hm³
Vazão de projeto - 158,00 m³/s
Potência instalada - 3,80 MW

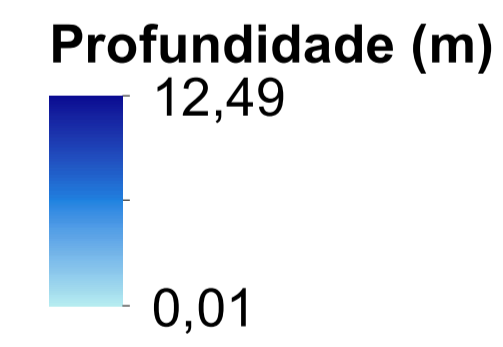
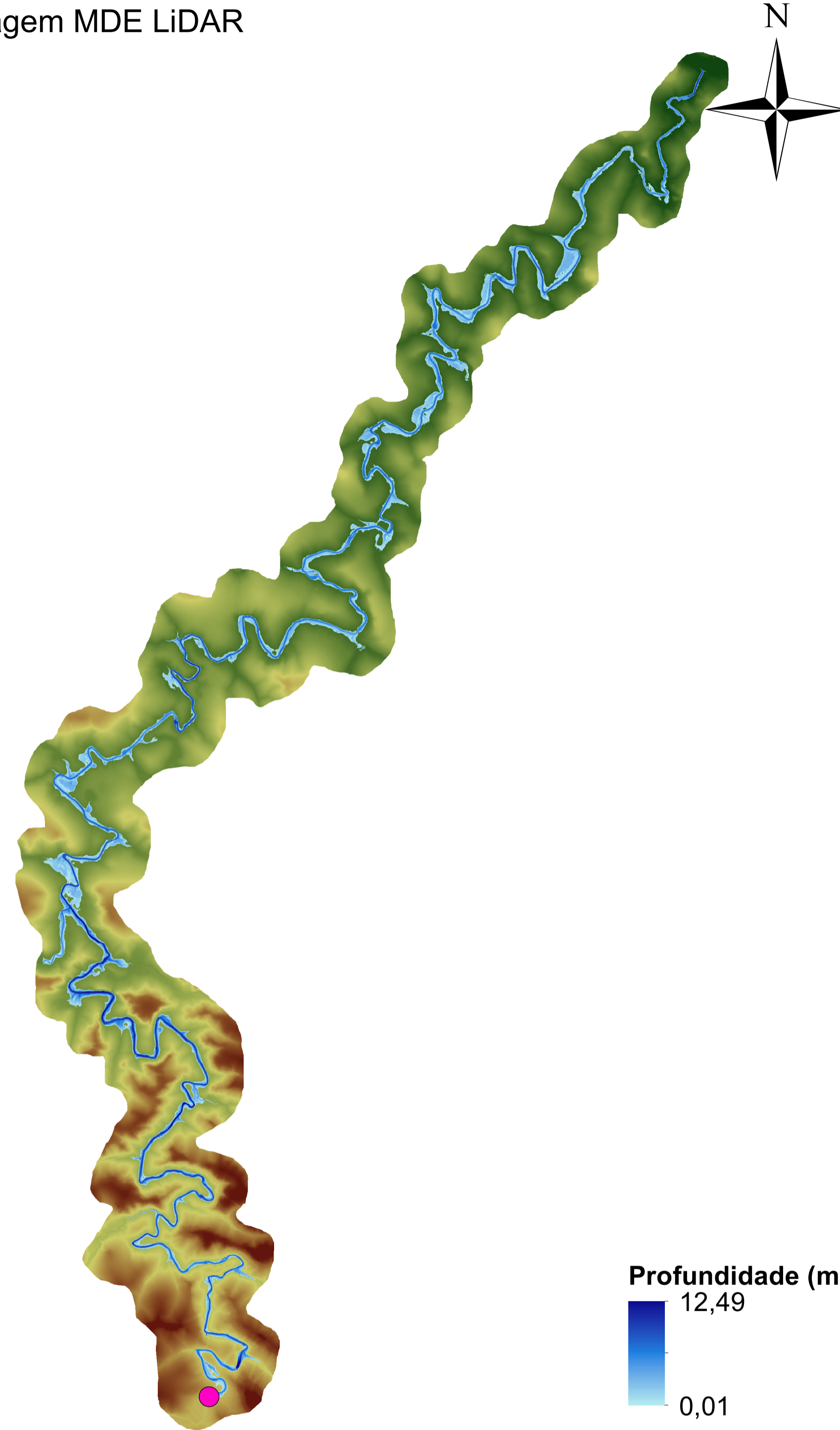
APÊNDICE C – Mapas de profundidade da água das modelagens

Mapa de Profundidade de Lâmina d'Água - Barragem A

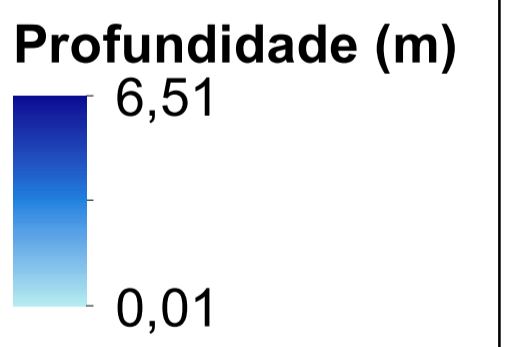
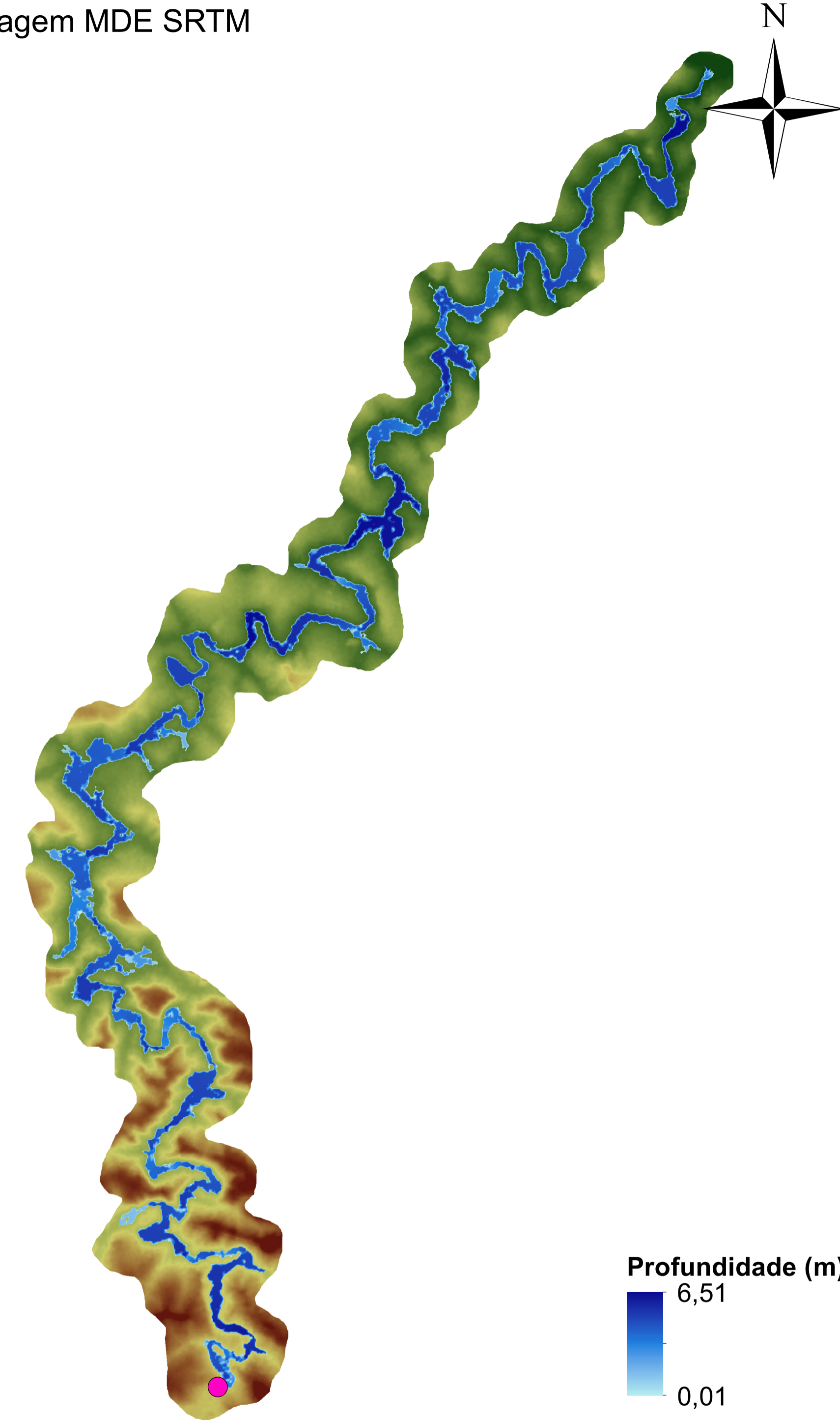
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

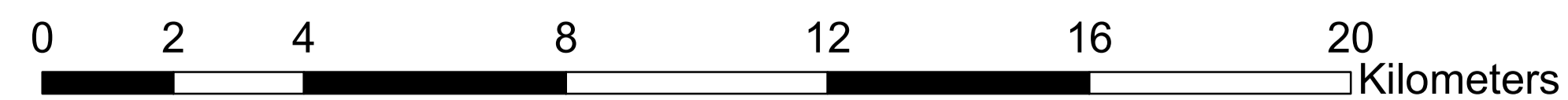


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Baixo

Altura da barragem - 8,00 m

Comprimento - 68,00 m

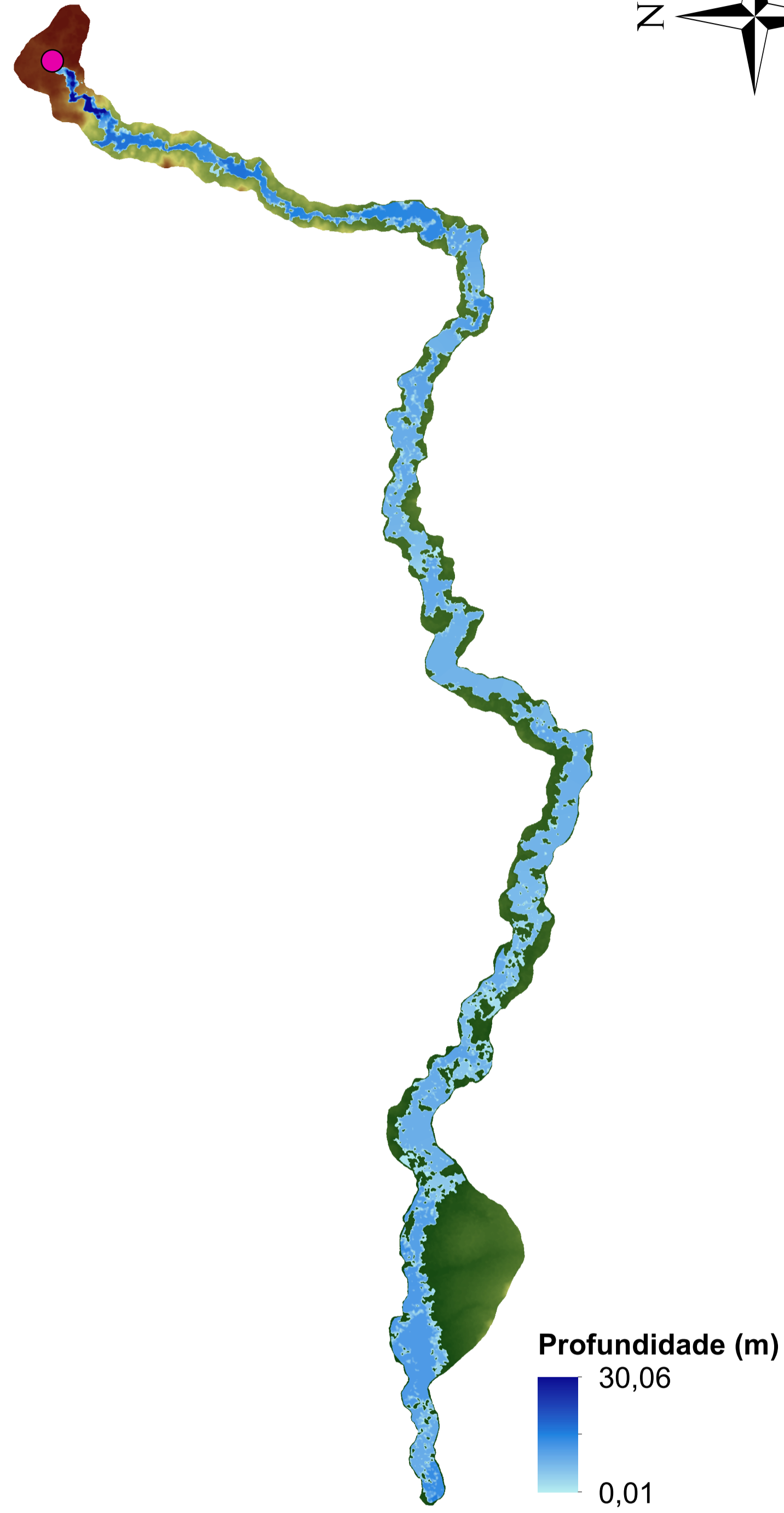
Volume máximo do reservatório - 0,74 hm³

Vazão de projeto - 350,00 m³/s

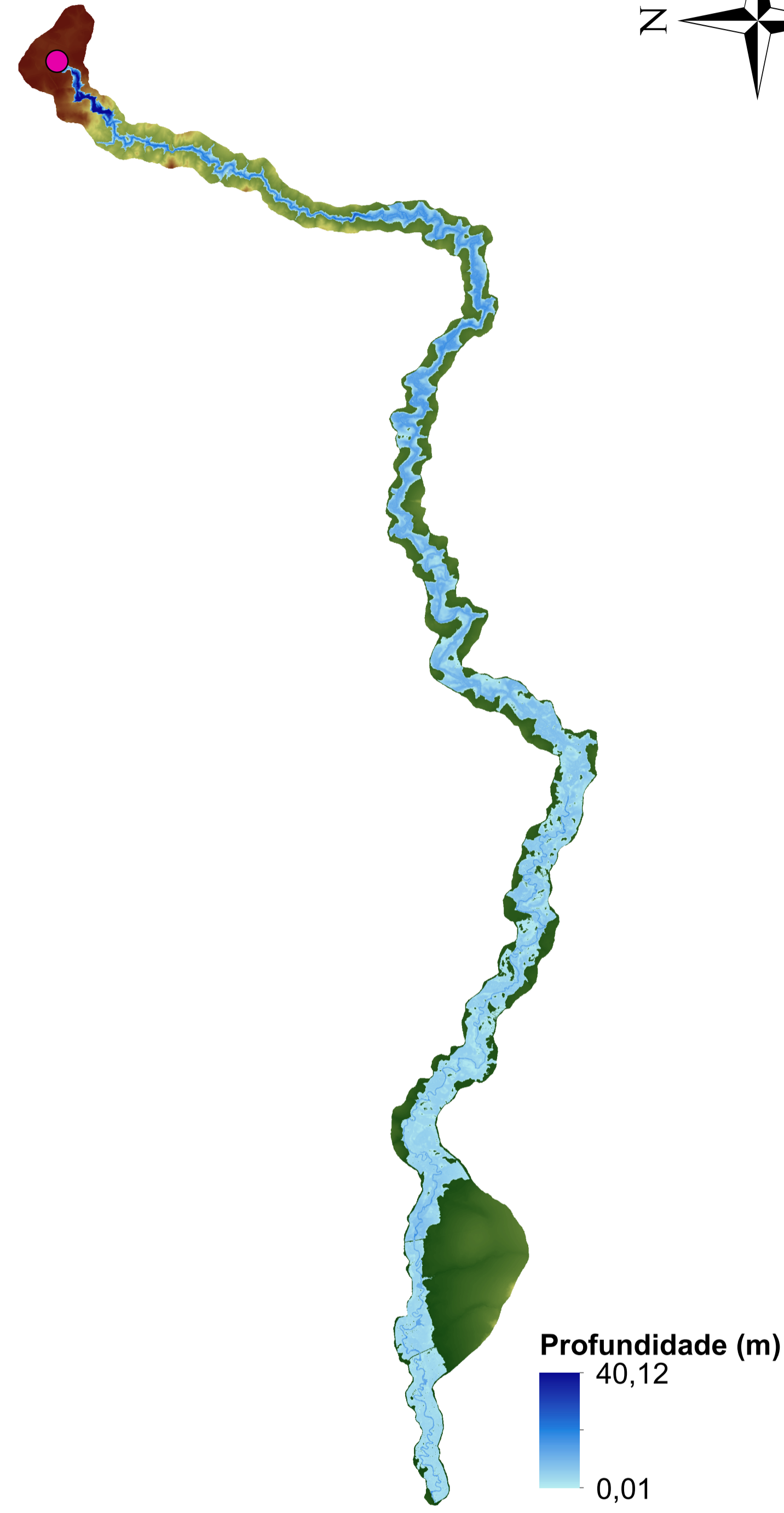
Potência instalada - 2,56 MW

Mapa de Profundidade de Lâmina d'Água - Barragem B

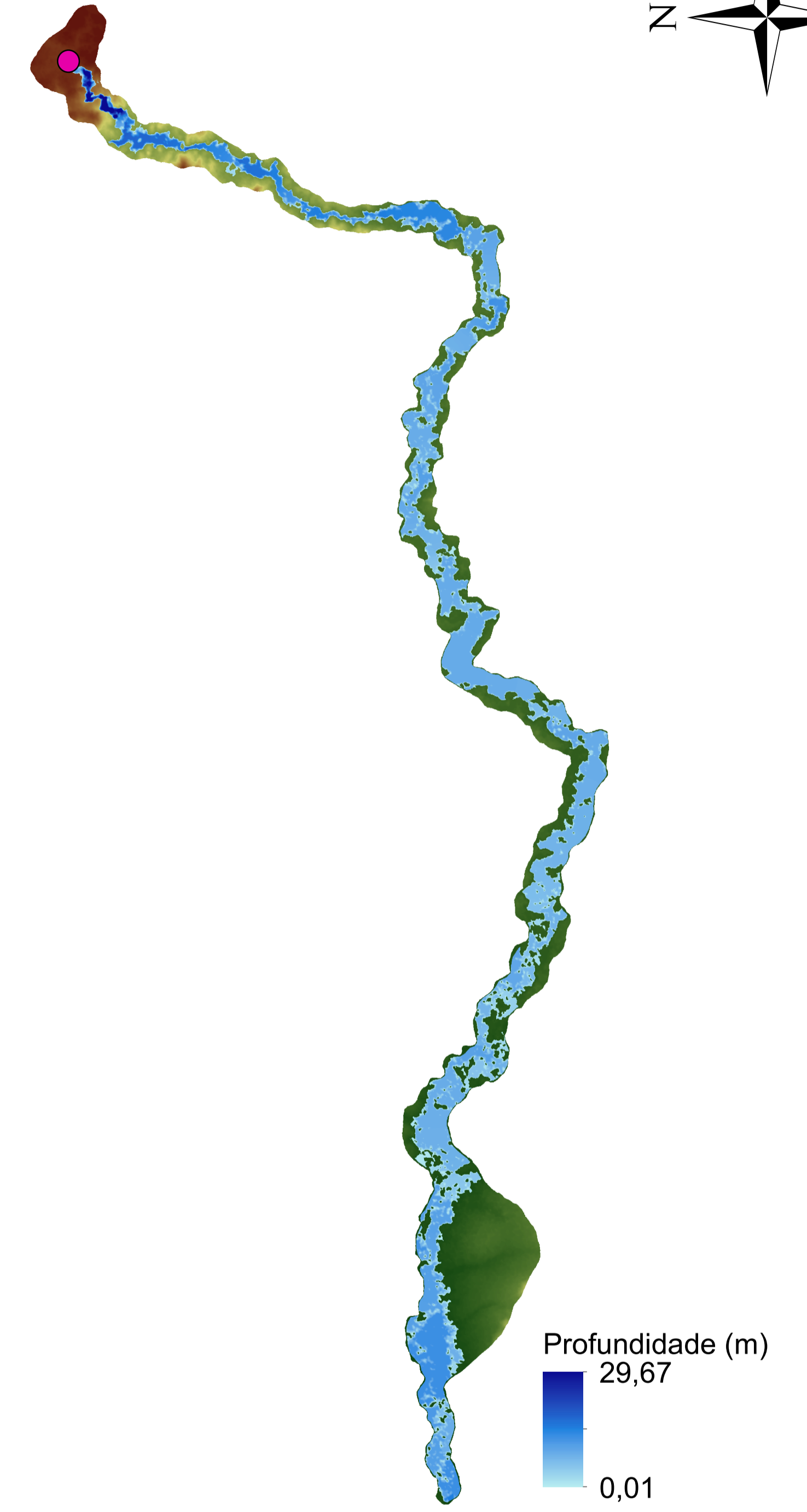
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

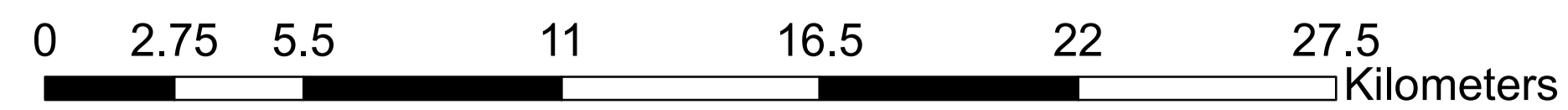


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 21S

Escala:



Dano Potencial - Baixo

Altura da barragem - 14,20 m

Comprimento - 1012,00 m

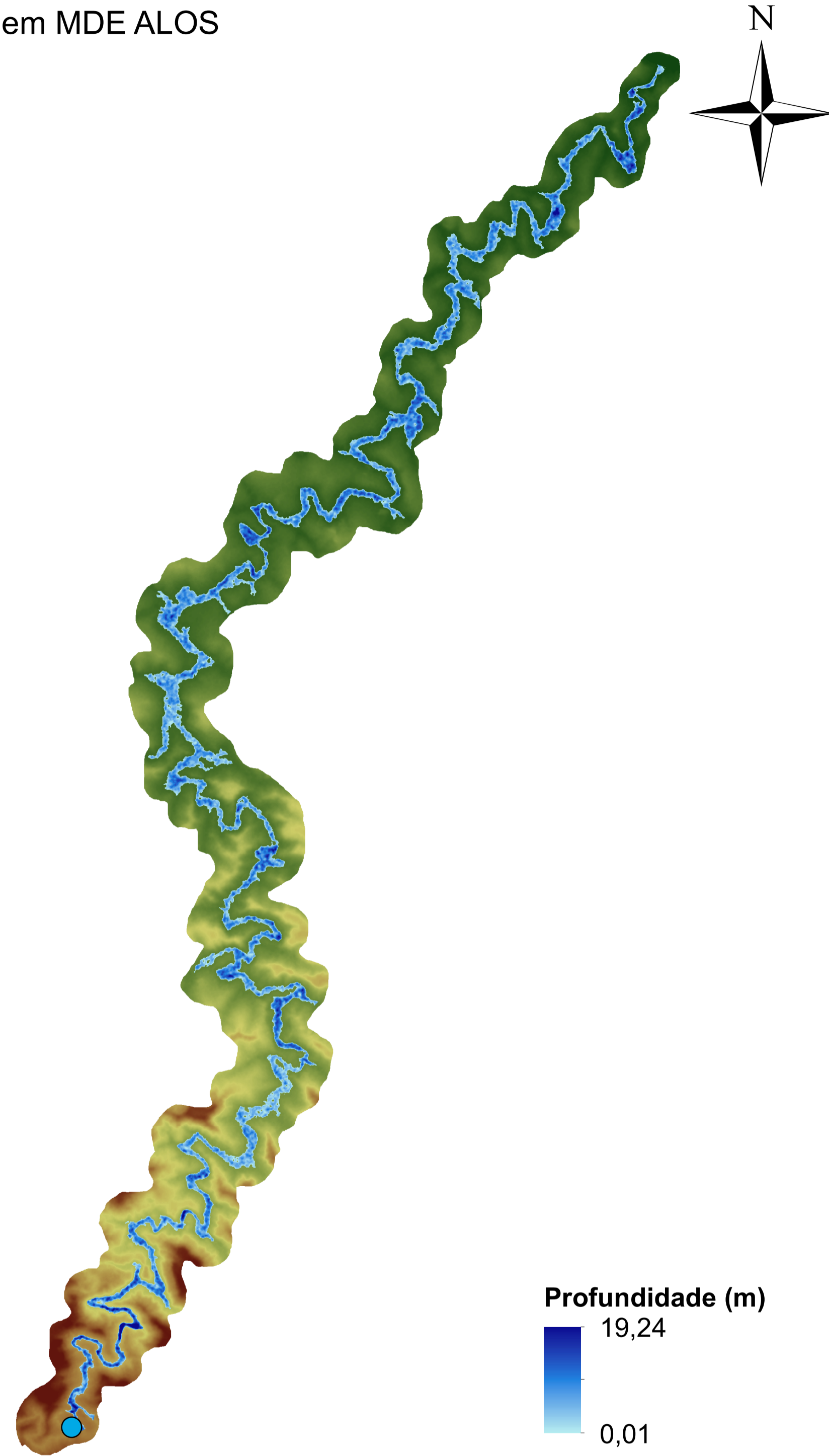
Volume máximo do reservatório - 22,63 hm³

Vazão de projeto - 530,00 m³/s

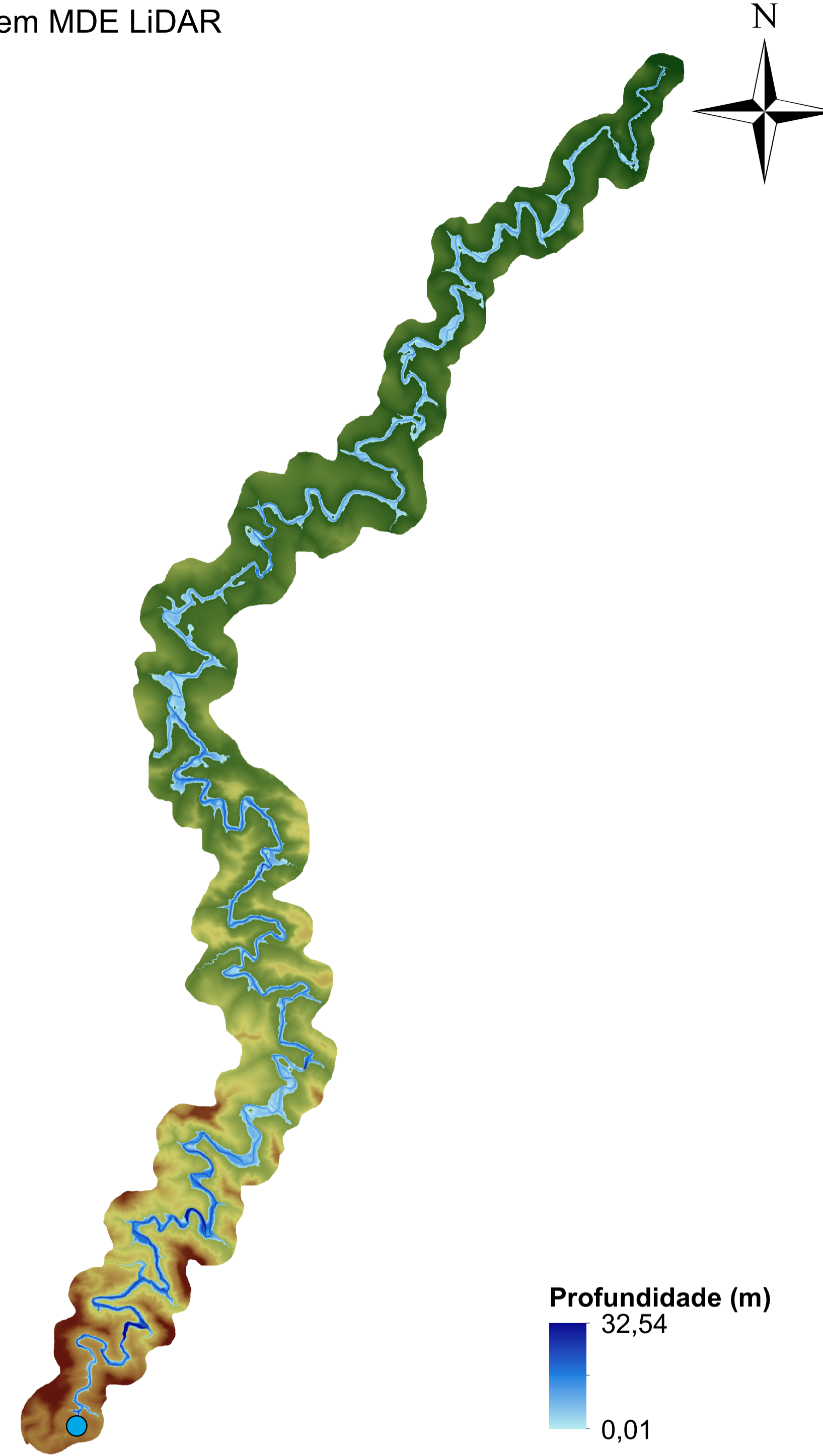
Potência instalada - 120,00 MW

Mapa de Profundidade de Lâmina d'Água - Barragem C

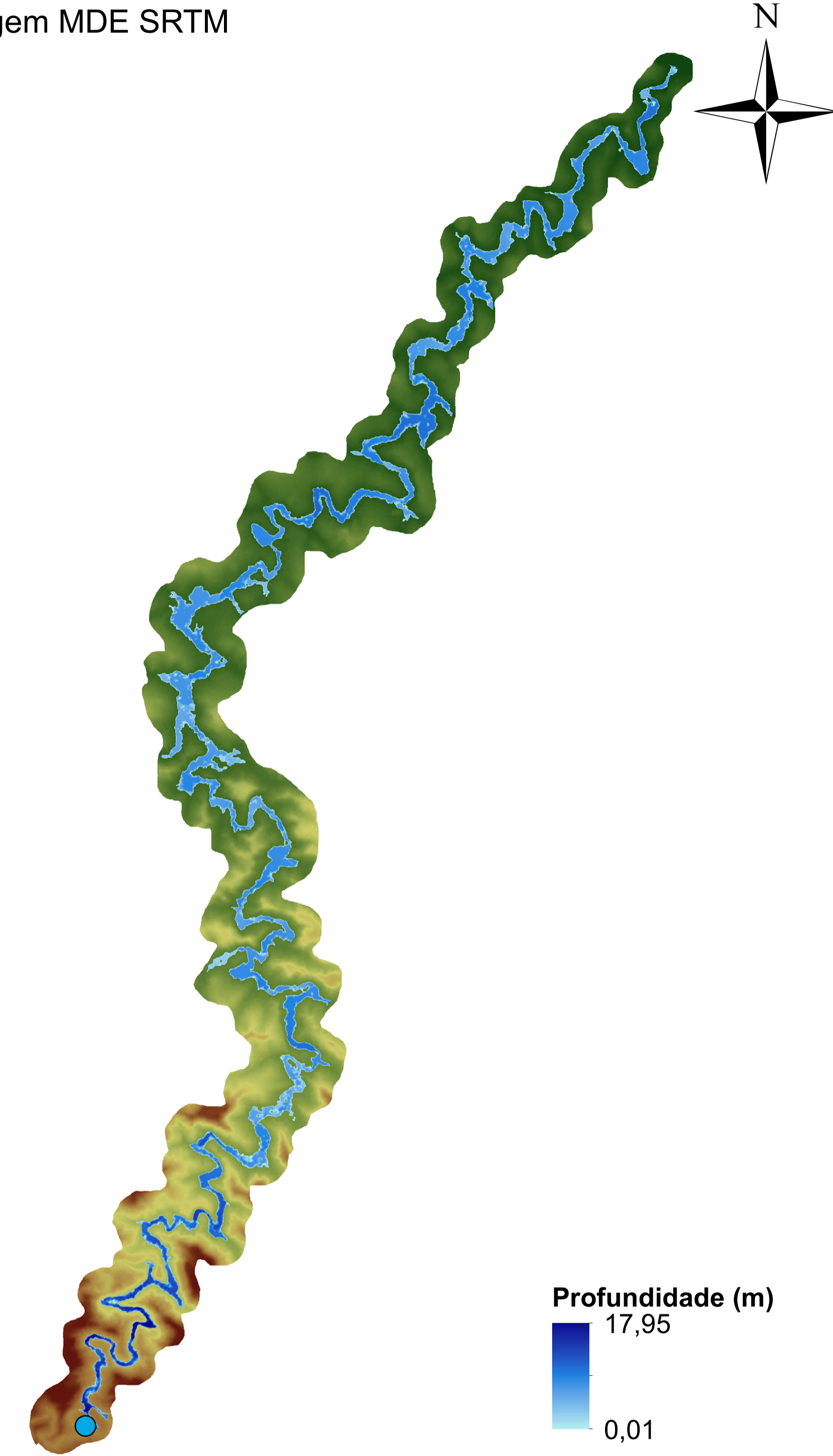
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

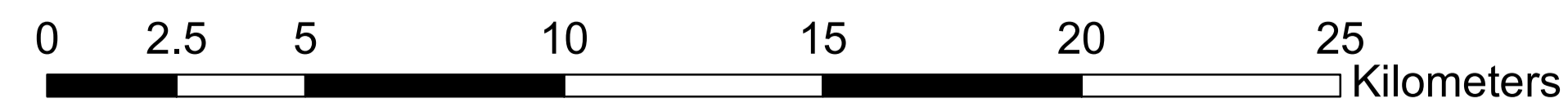


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Médio

Altura da barragem - 10,00 m

Comprimento - 356,00 m

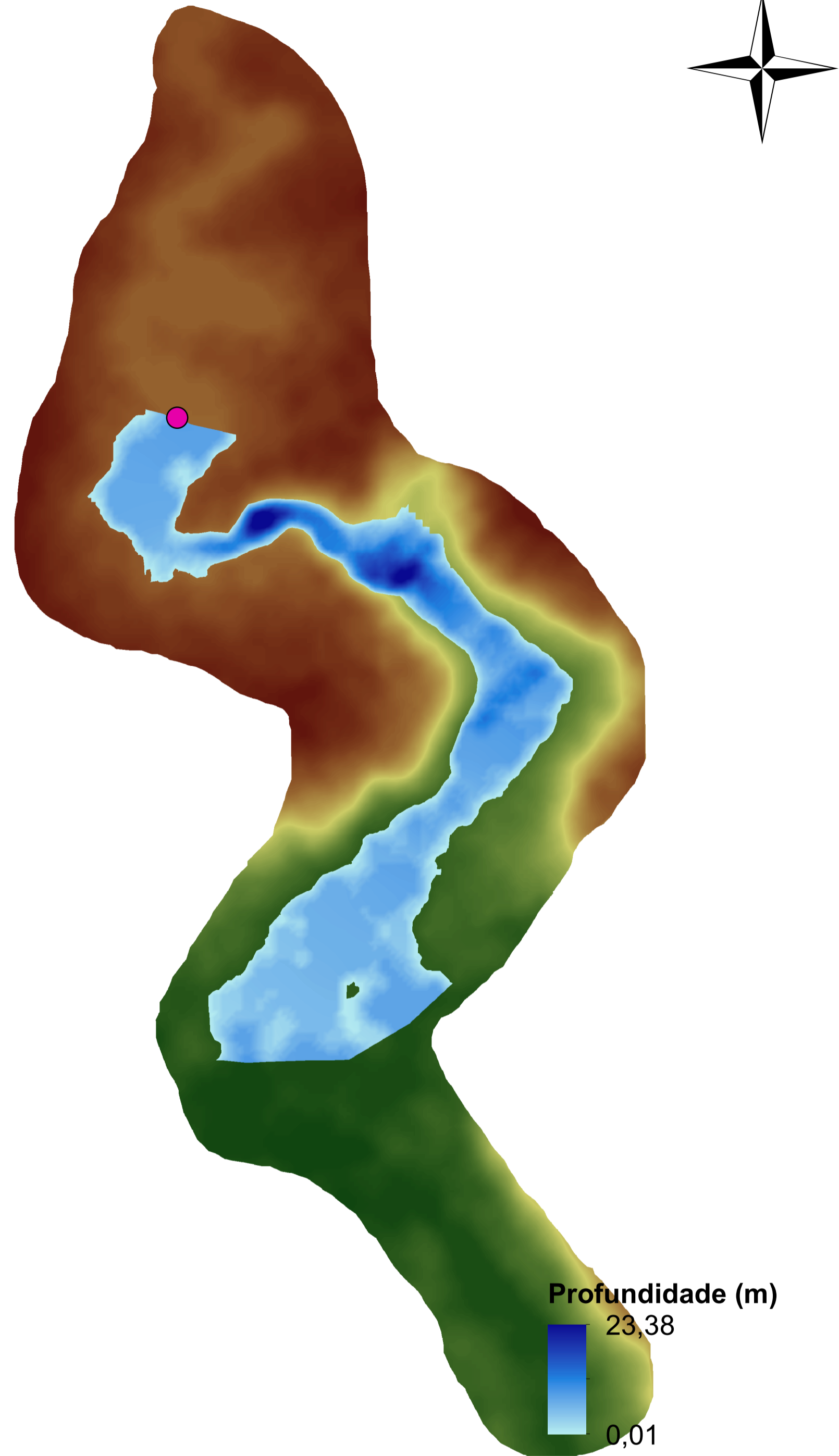
Volume máximo do reservatório - 6,35 hm³

Vazão de projeto - 482,50 m³/s

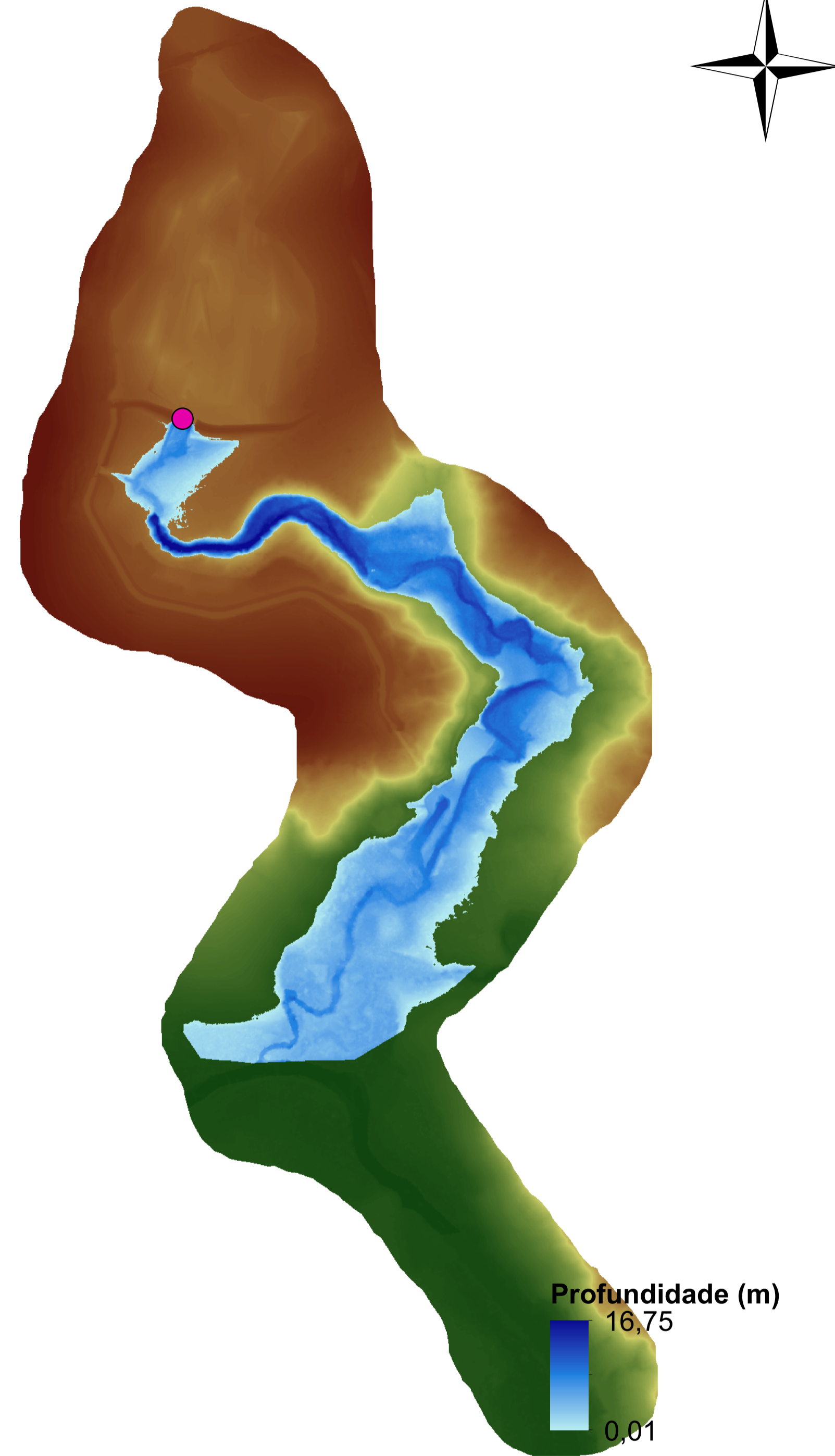
Potência instalada - 15,10 MW

Mapa de Profundidade de Lâmina d'Água - Barragem D

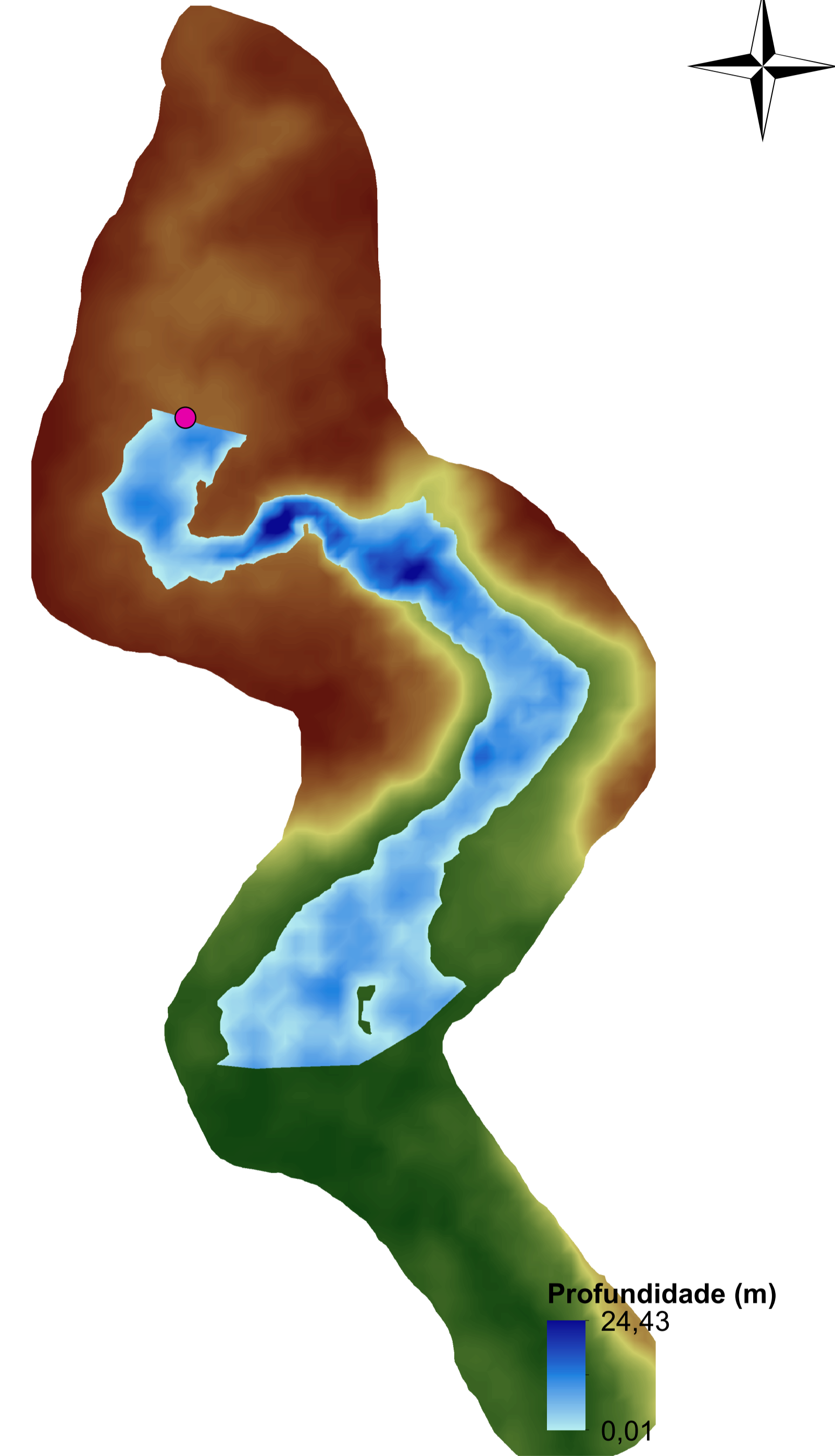
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

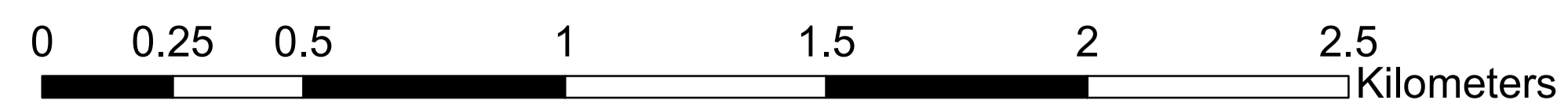


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Médio

Altura da barragem - 12,00 m

Comprimento - 630,00 m

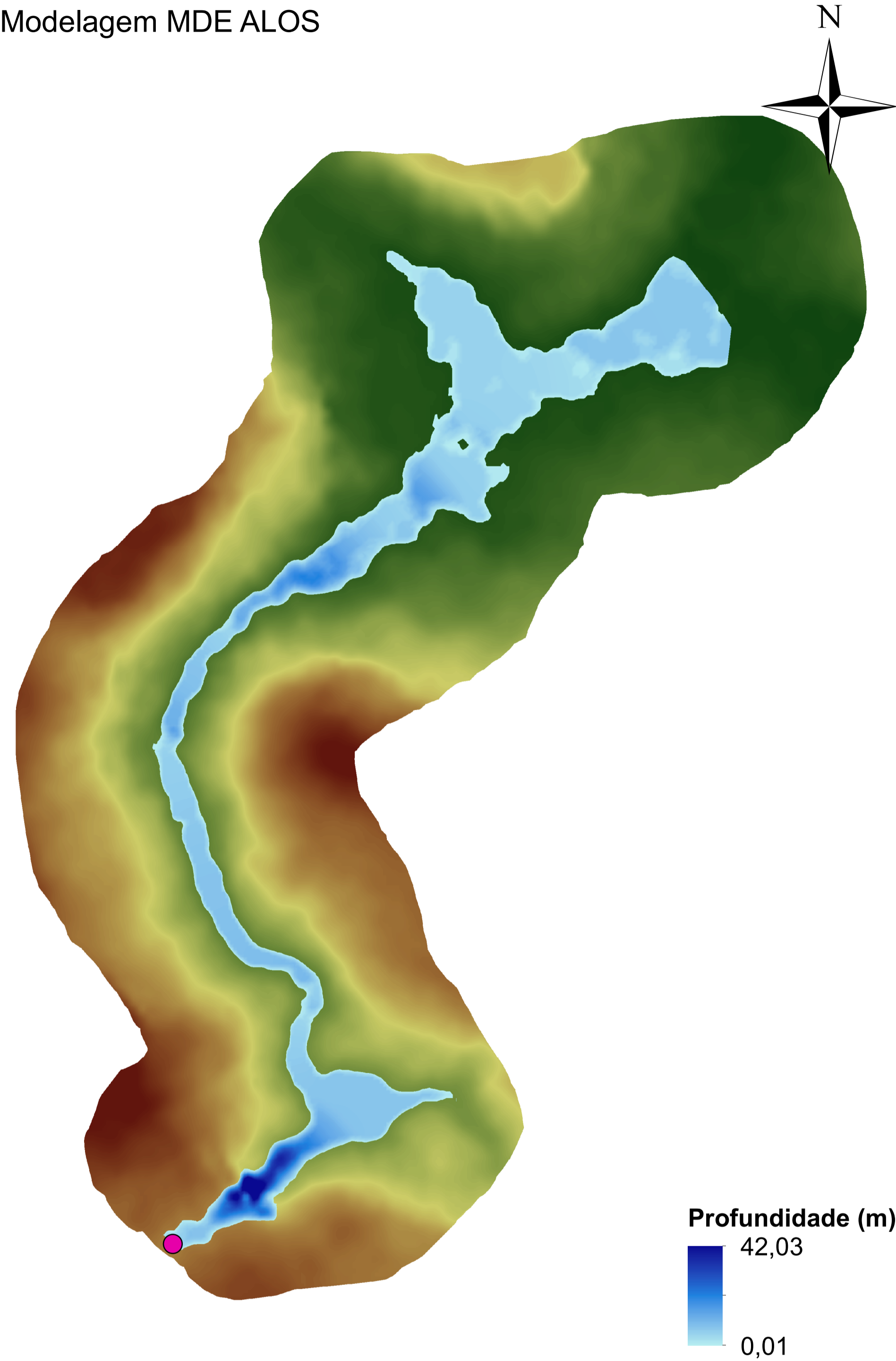
Volume máximo do reservatório - 8,77 hm³

Vazão de projeto - 340,00 m³/s

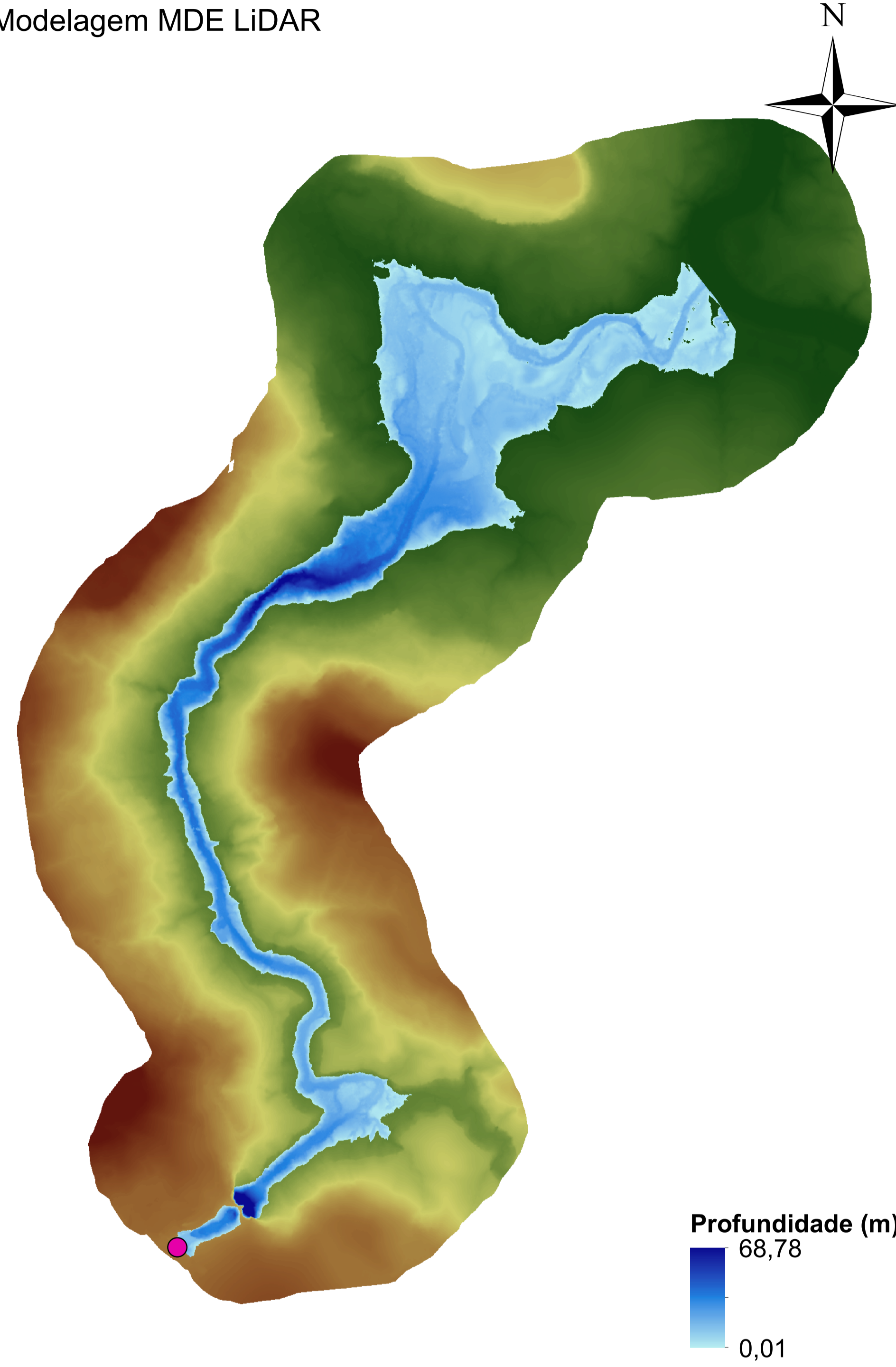
Potência instalada - 21,60 MW

Mapa de Profundidade de Lâmina d'Água - Barragem E

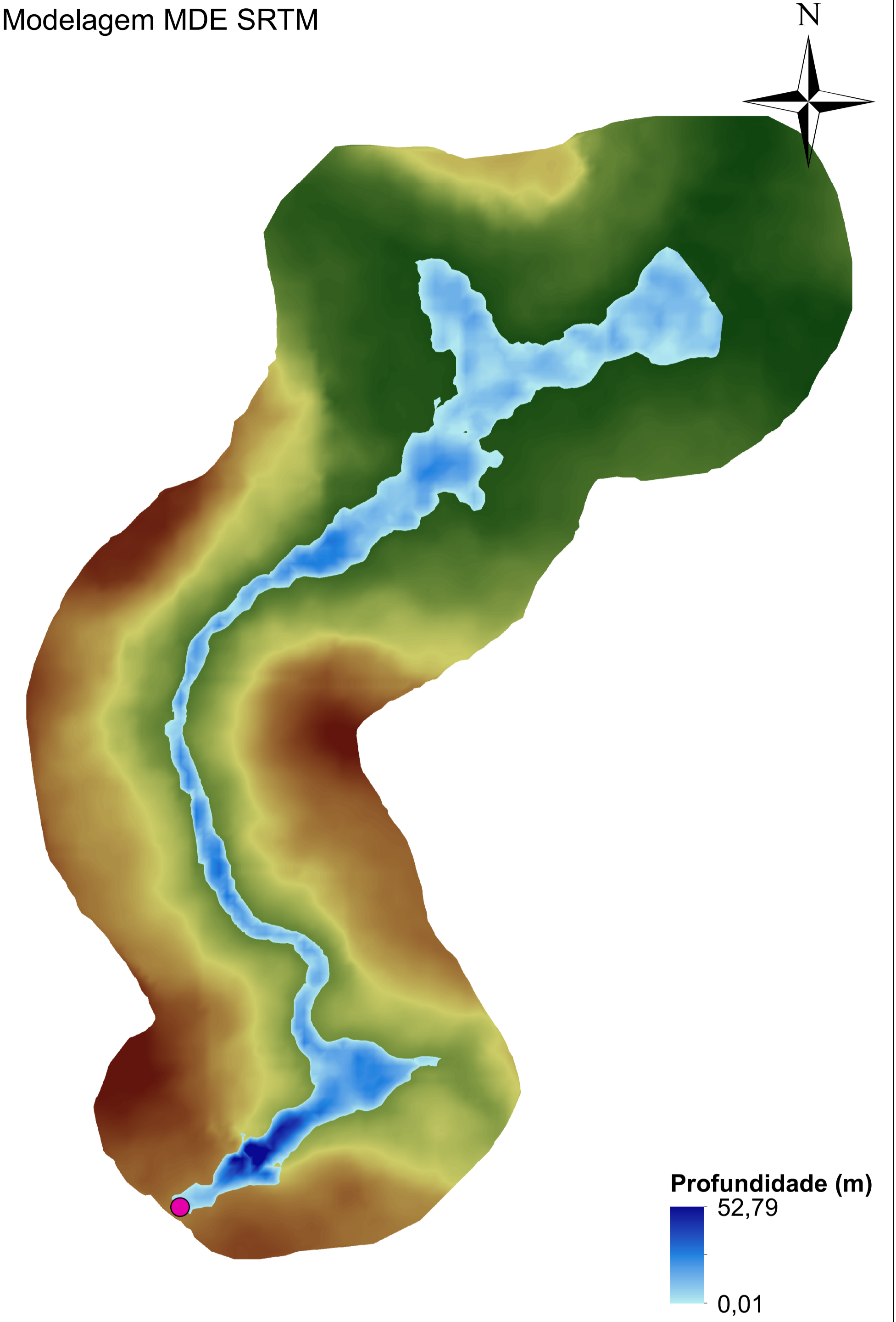
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

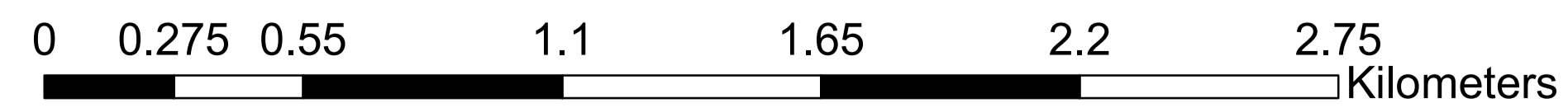


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Alto

Altura da barragem - 10,40 m

Comprimento - 210,00 m

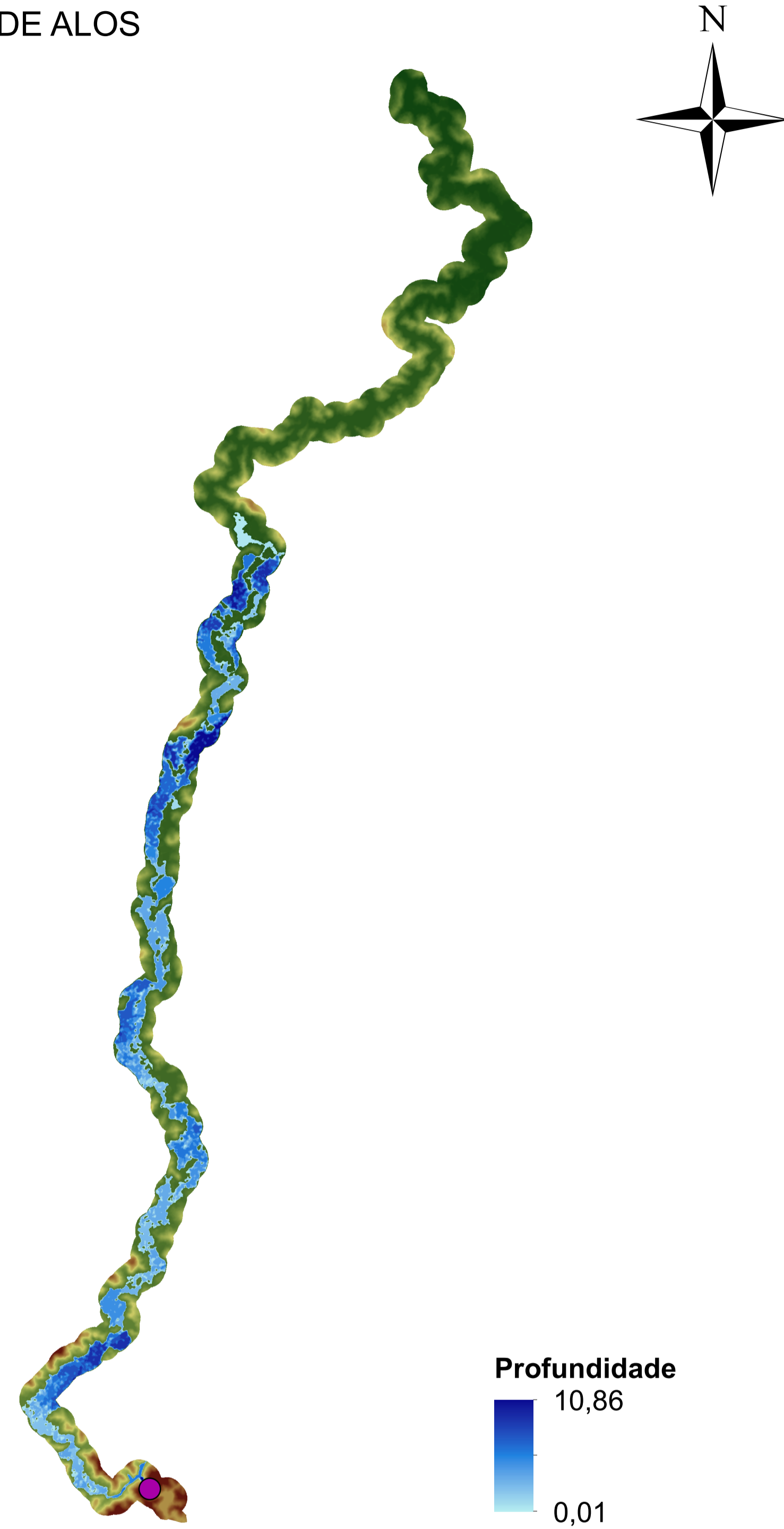
Volume máximo do reservatório - 1,84 hm³

Vazão de projeto - 431,00 m³/s

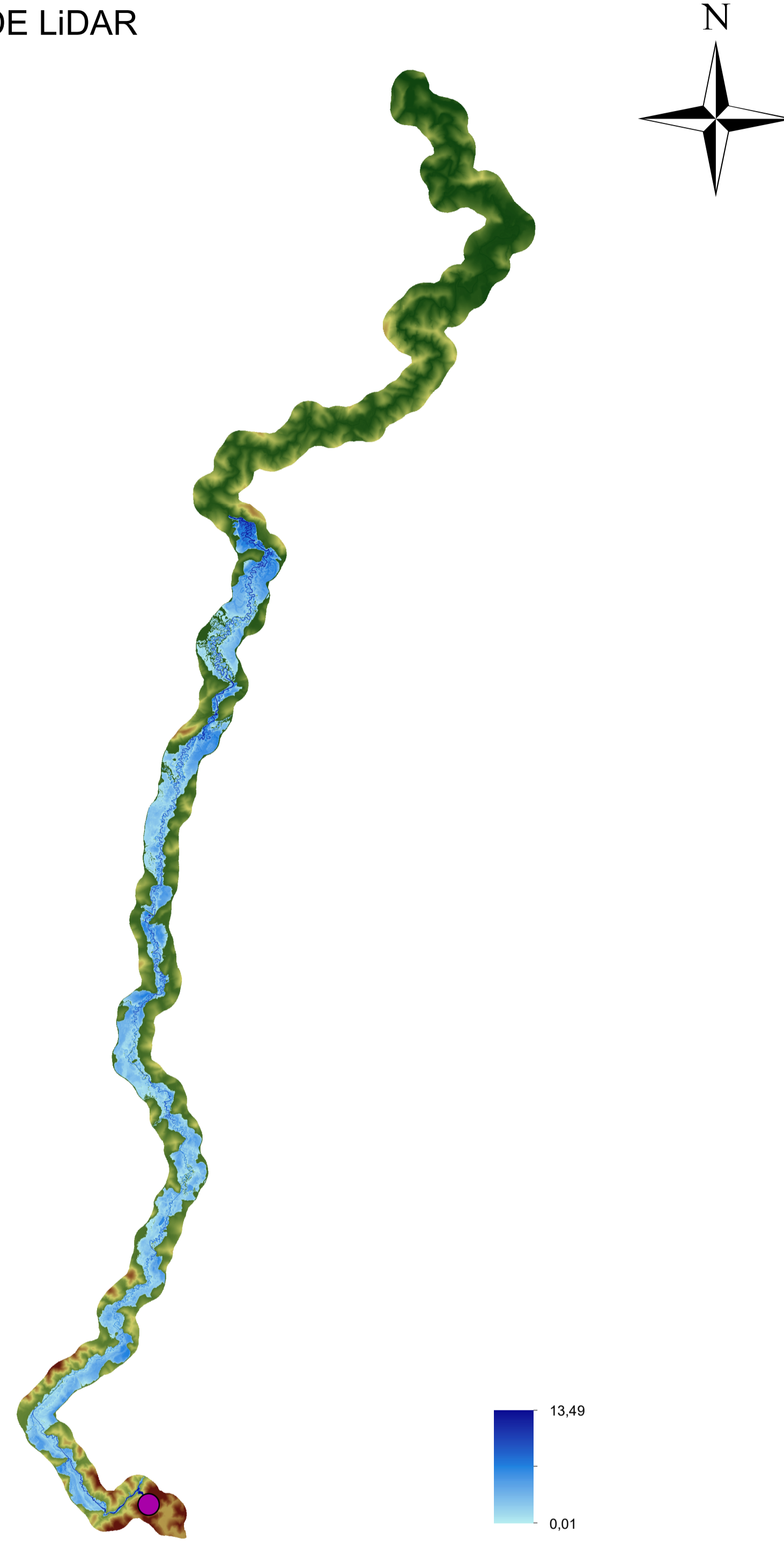
Potência instalada - 16,20 MW

Mapa de Profundidade de Lâmina d'Água - Barragem F

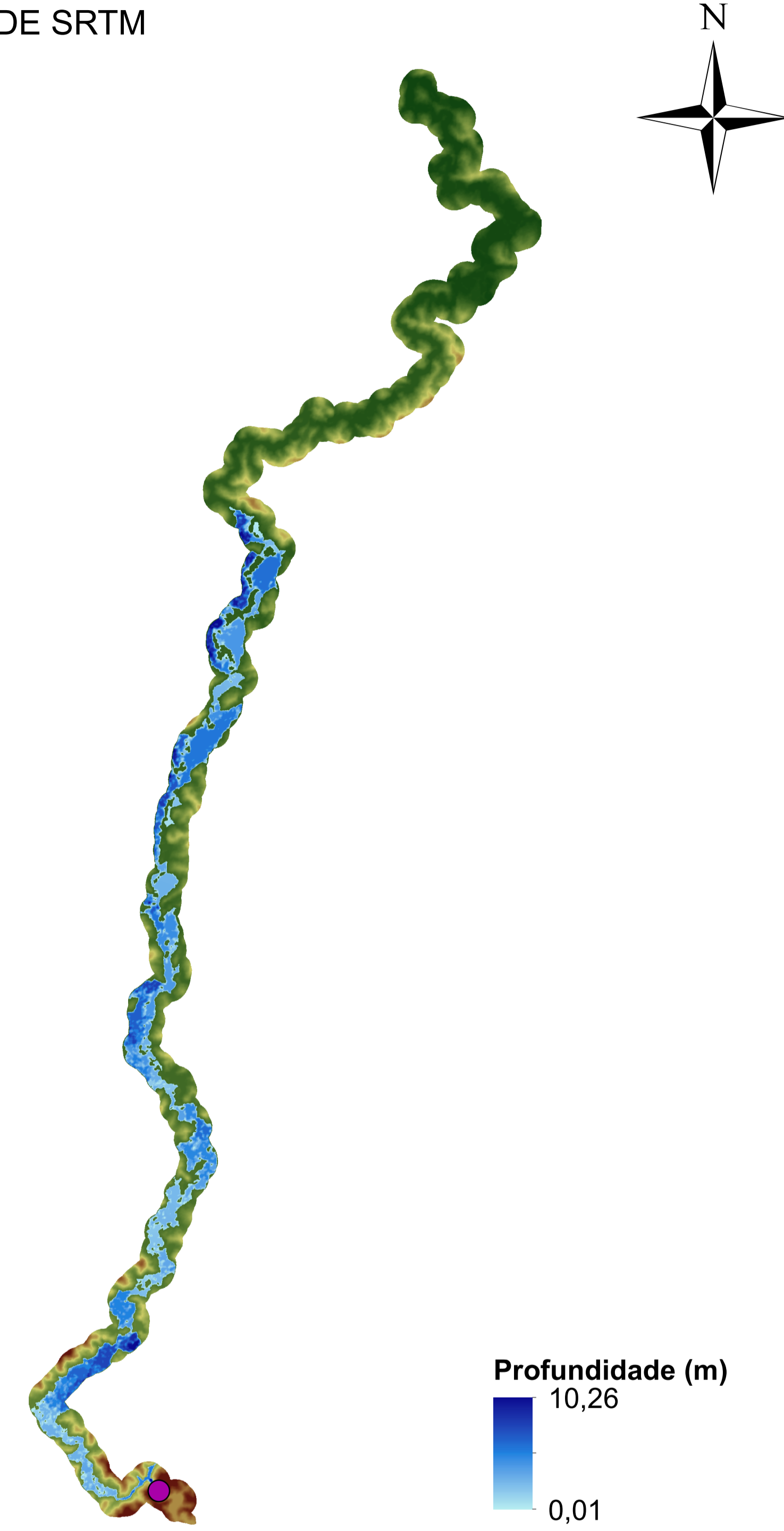
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

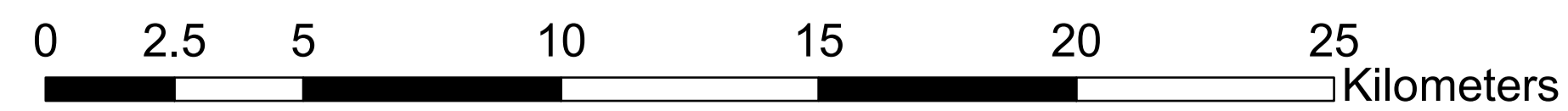


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 23S

Escala:

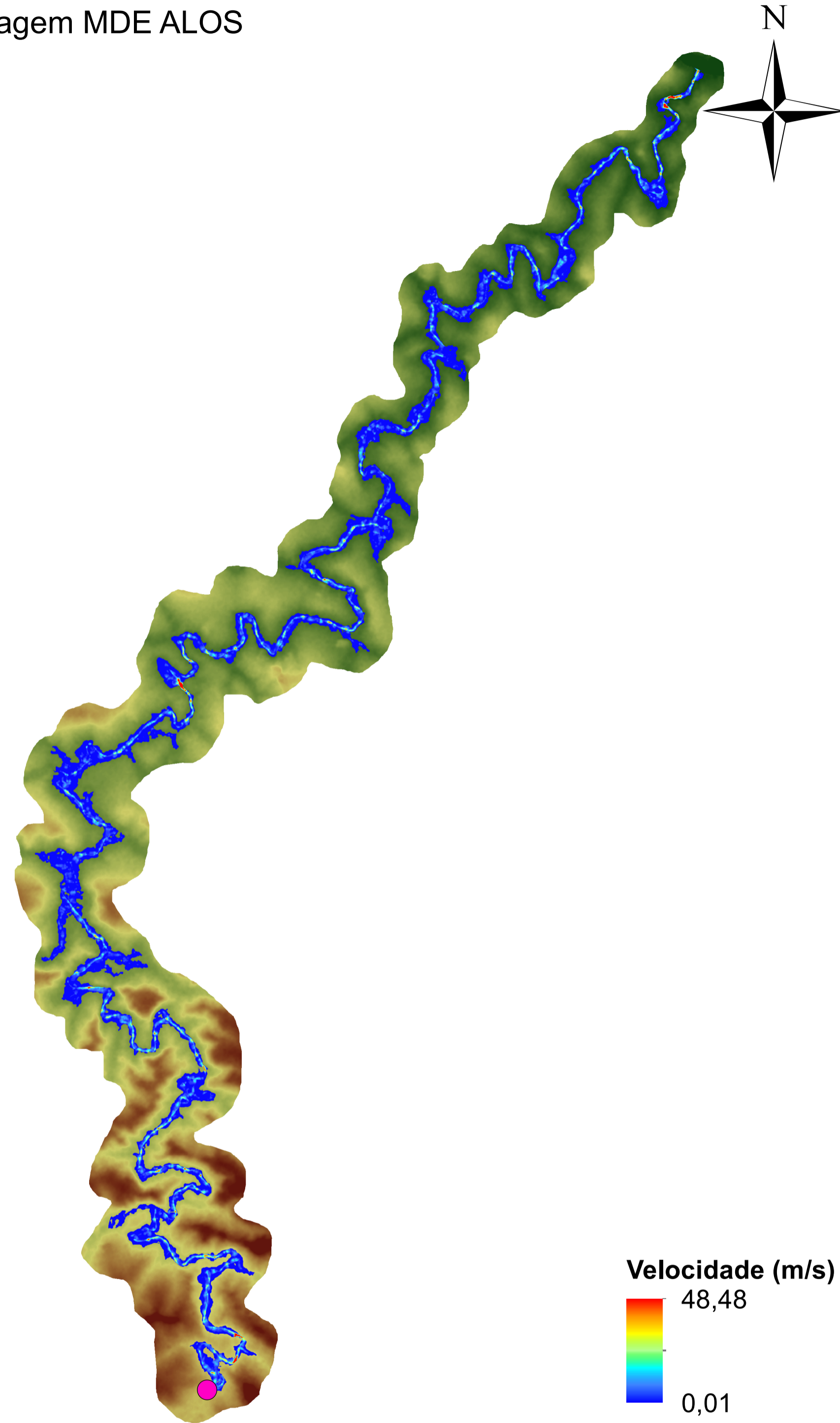


Dano Potencial - Alto
Altura da barragem - 5,00 m
Comprimento - 25,00 m
Volume máximo do reservatório - 0,13 hm³
Vazão de projeto - 158,00 m³/s
Potência instalada - 3,80 MW

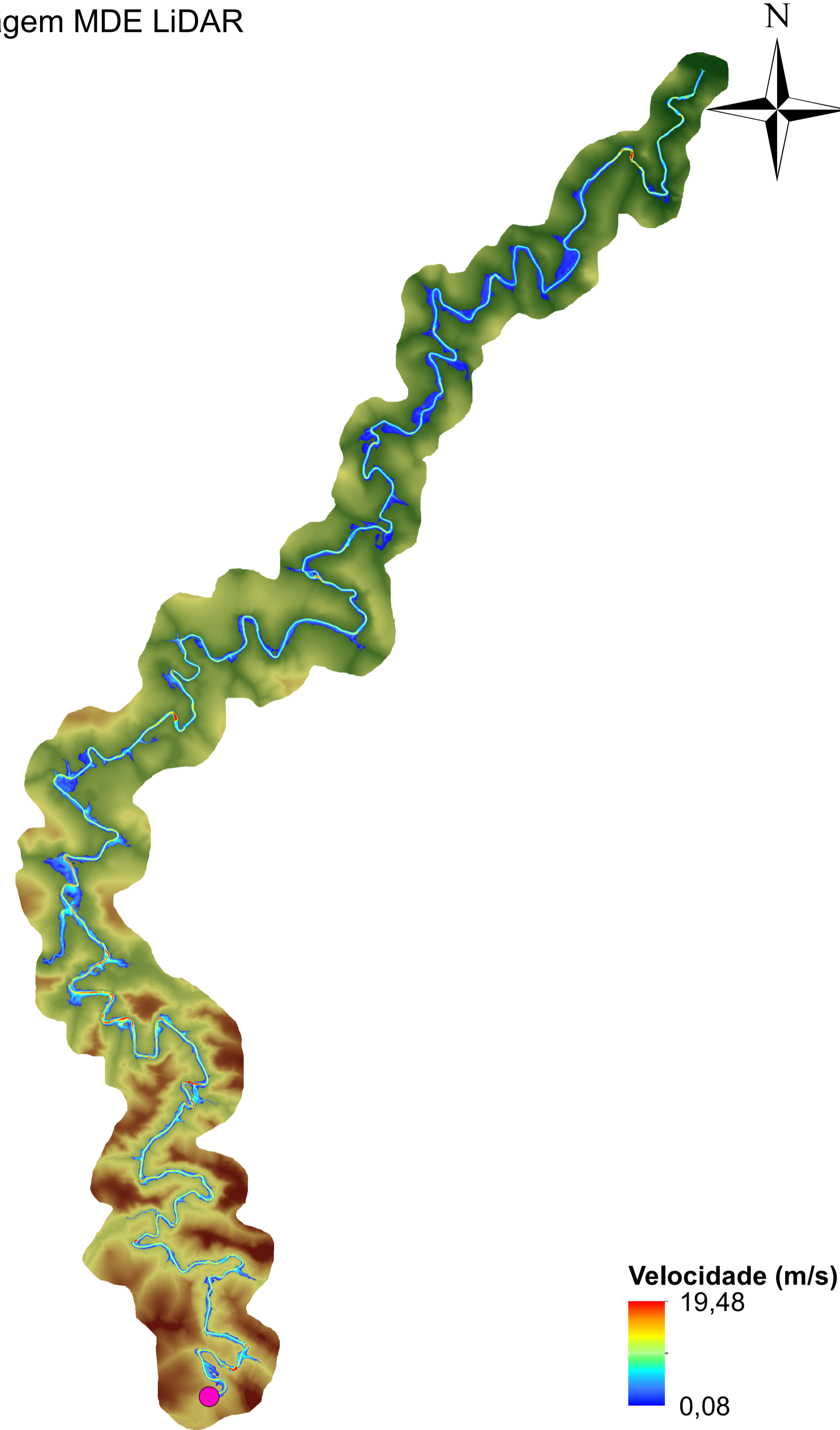
APÊNDICE D – Mapas de velocidade da onda das modelagens

Mapa de Velocidade de Onda - Barragem A

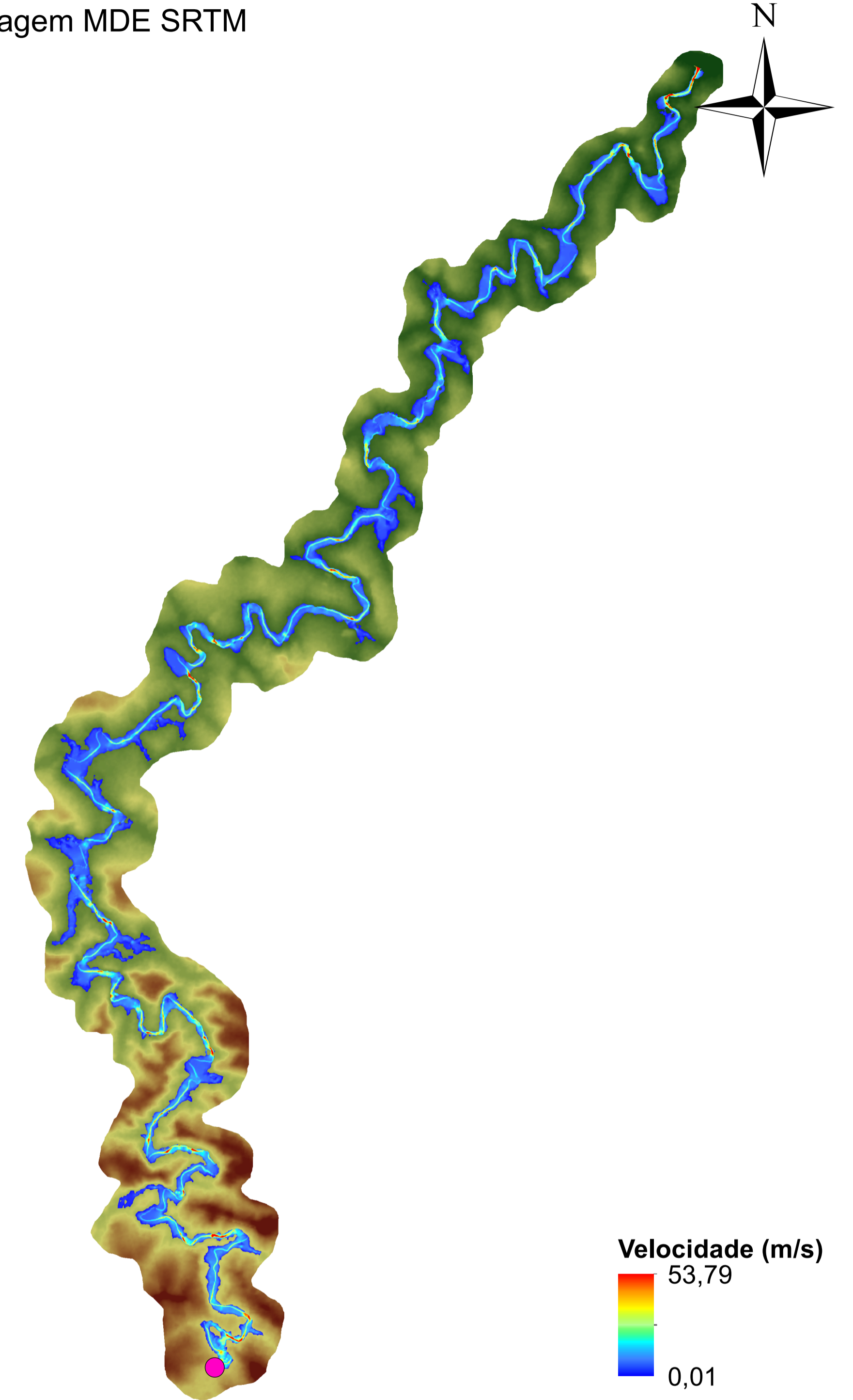
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR



Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Baixo

Altura da barragem - 8,00 m

Comprimento - 68,00 m

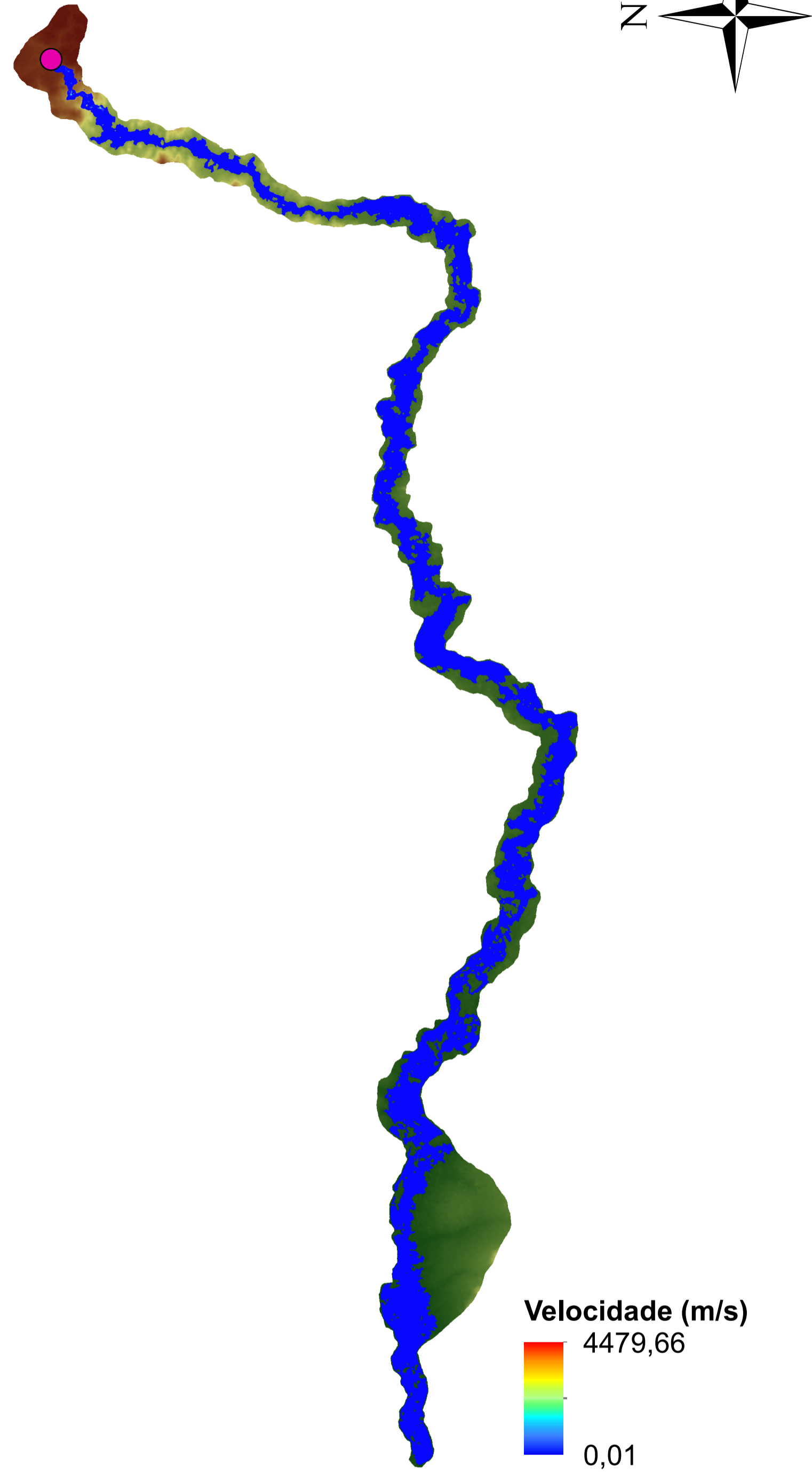
Volume máximo do reservatório - 0,74 hm³

Vazão de projeto - 350,00 m³/s

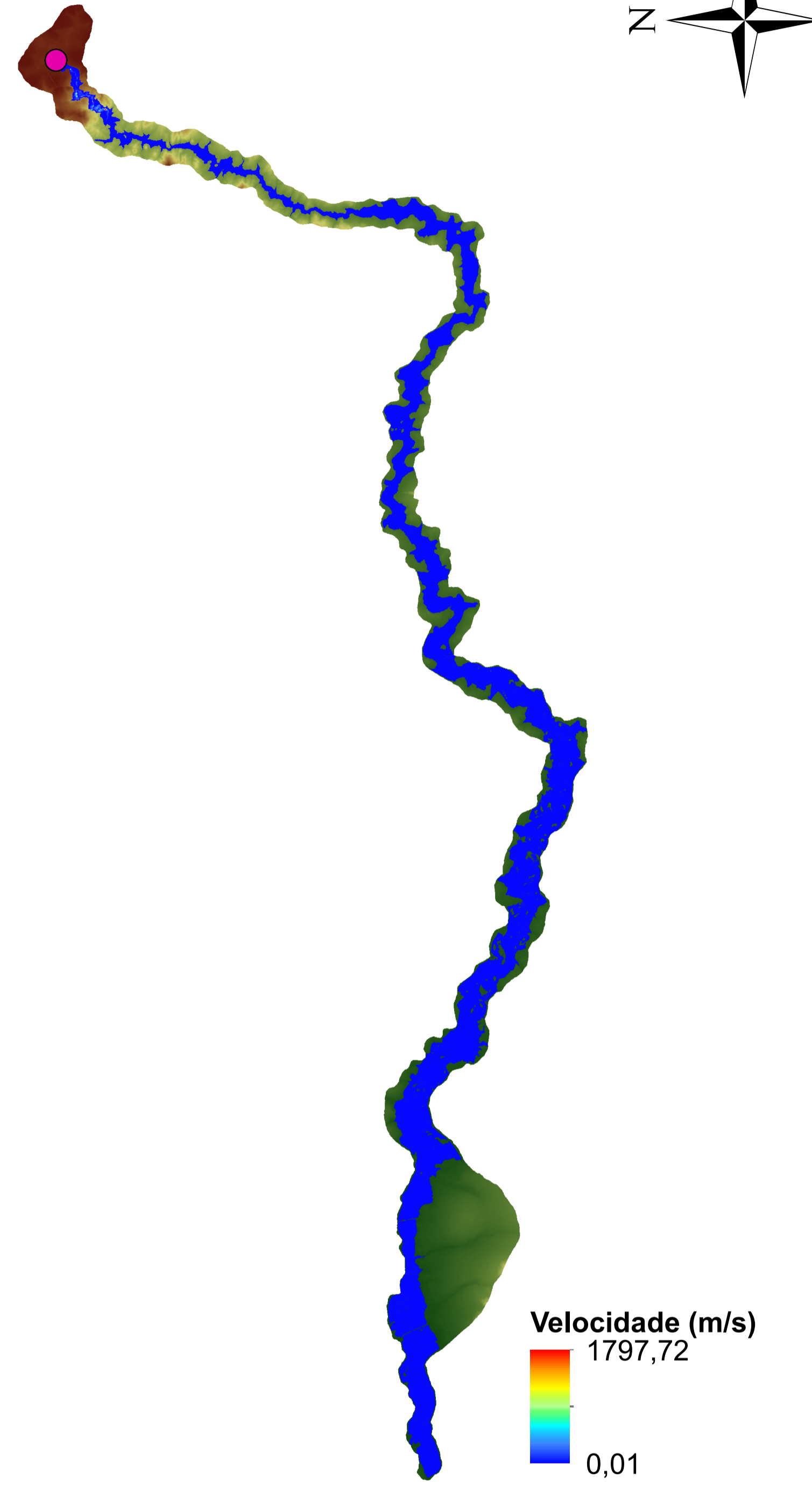
Potência instalada - 2,56 MW

Mapa de Velocidade de Onda - Barragem B

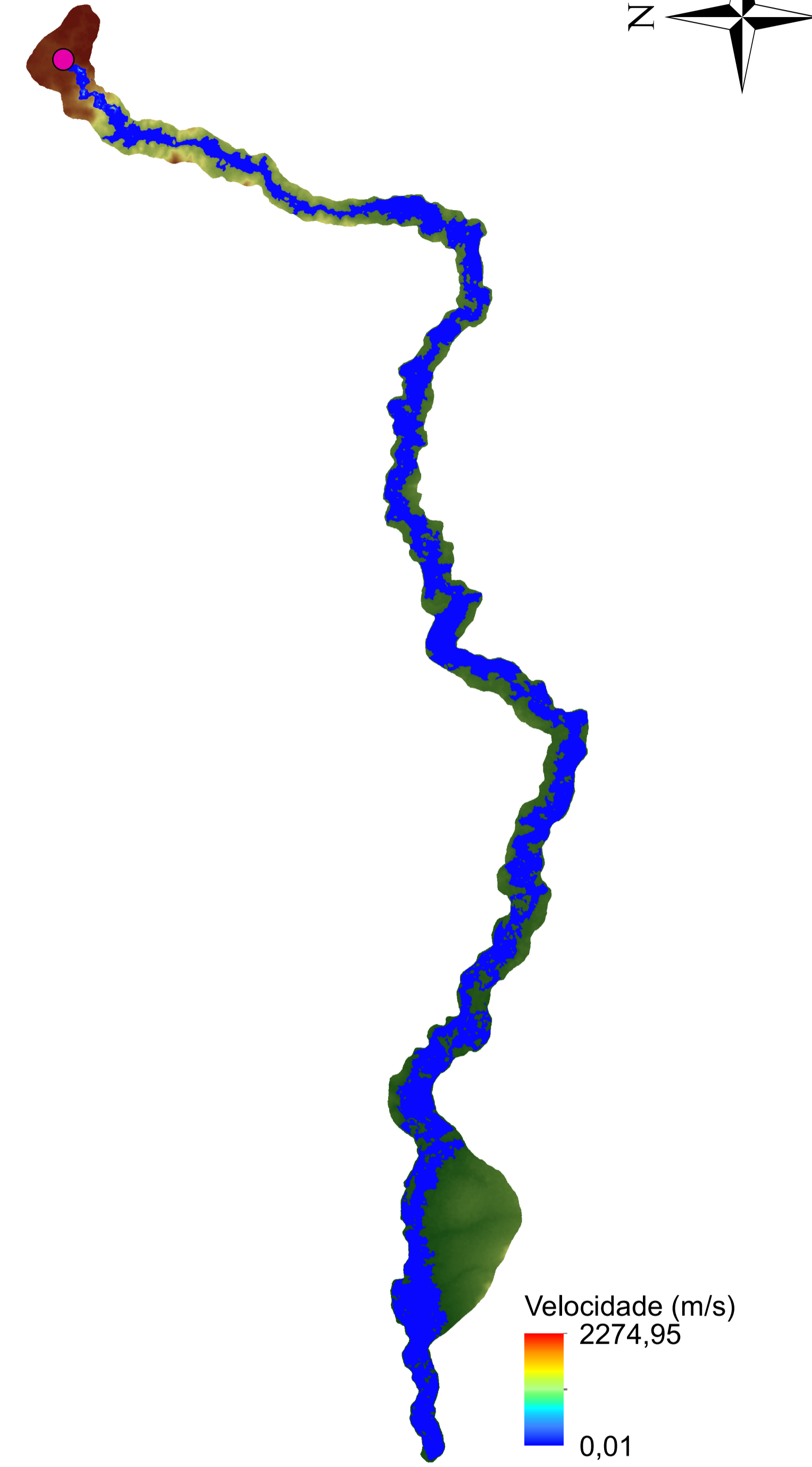
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

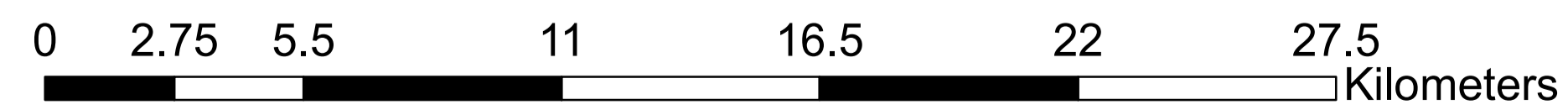


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 21S

Escala:



Dano Potencial - Baixo

Altura da barragem - 14,20 m

Comprimento - 1012,00 m

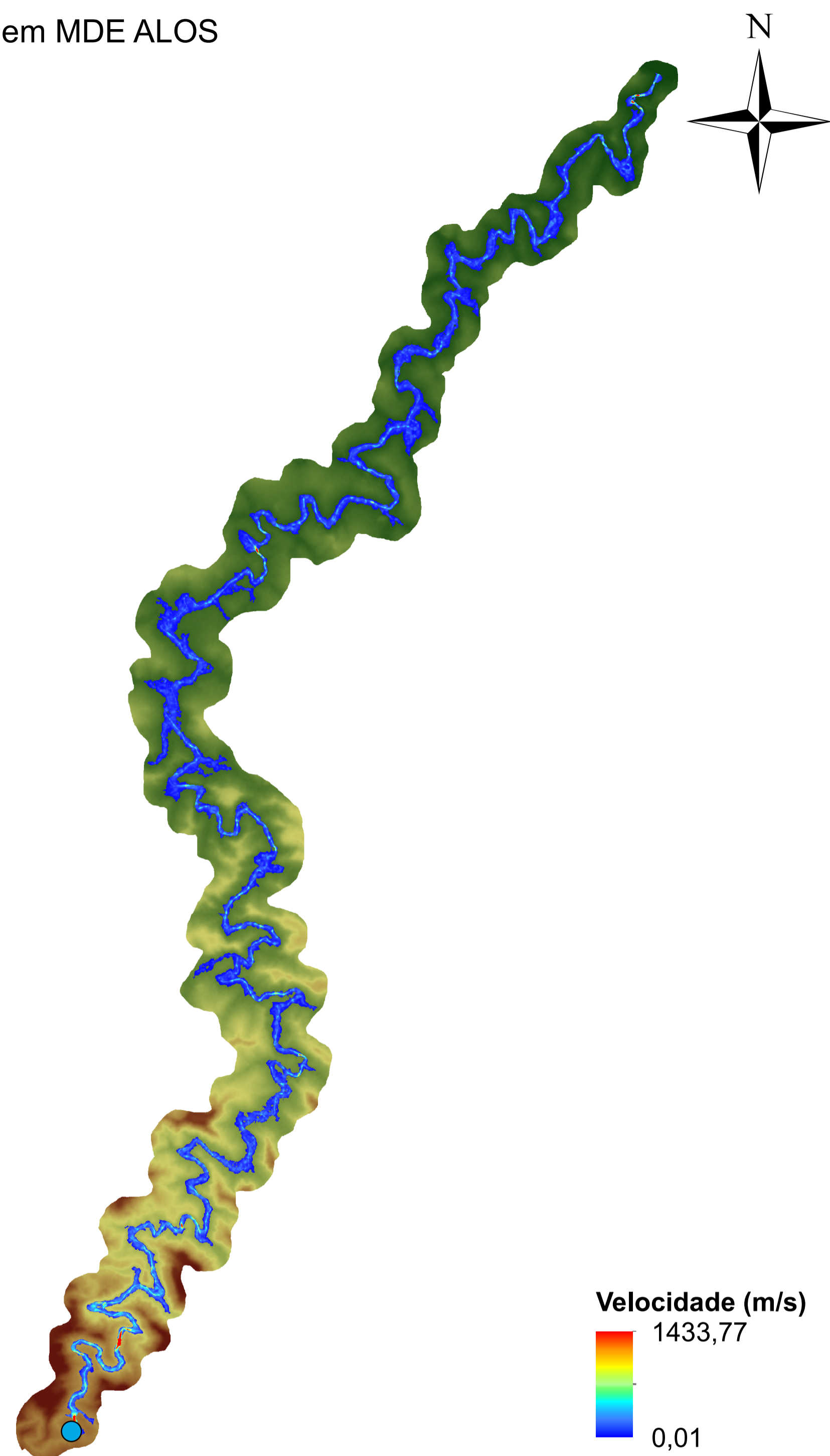
Volume máximo do reservatório - 22,63 hm³

Vazão de projeto - 530,00 m³/s

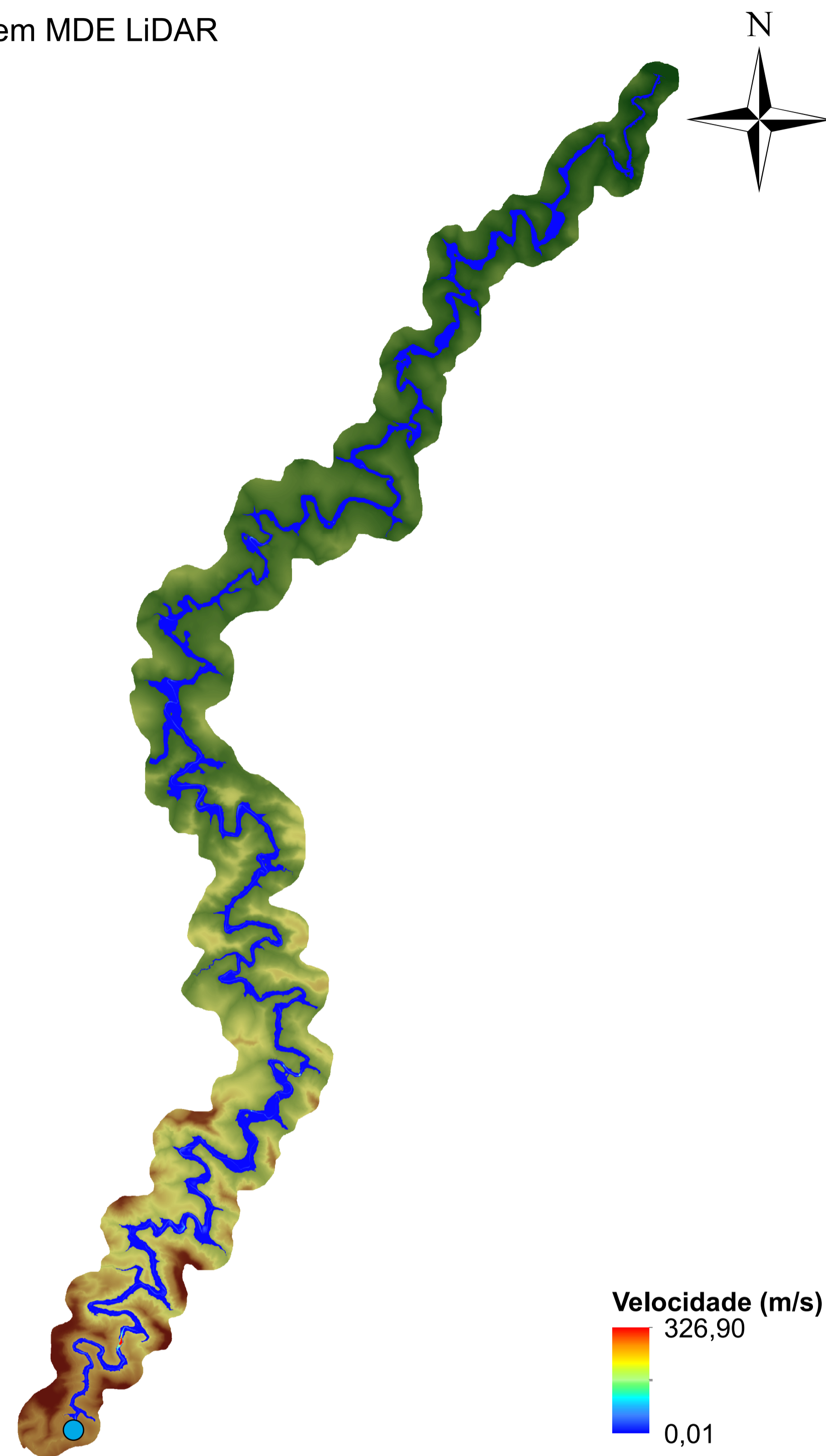
Potência instalada - 120,00 MW

Mapa de Velocidade de Onda - Barragem C

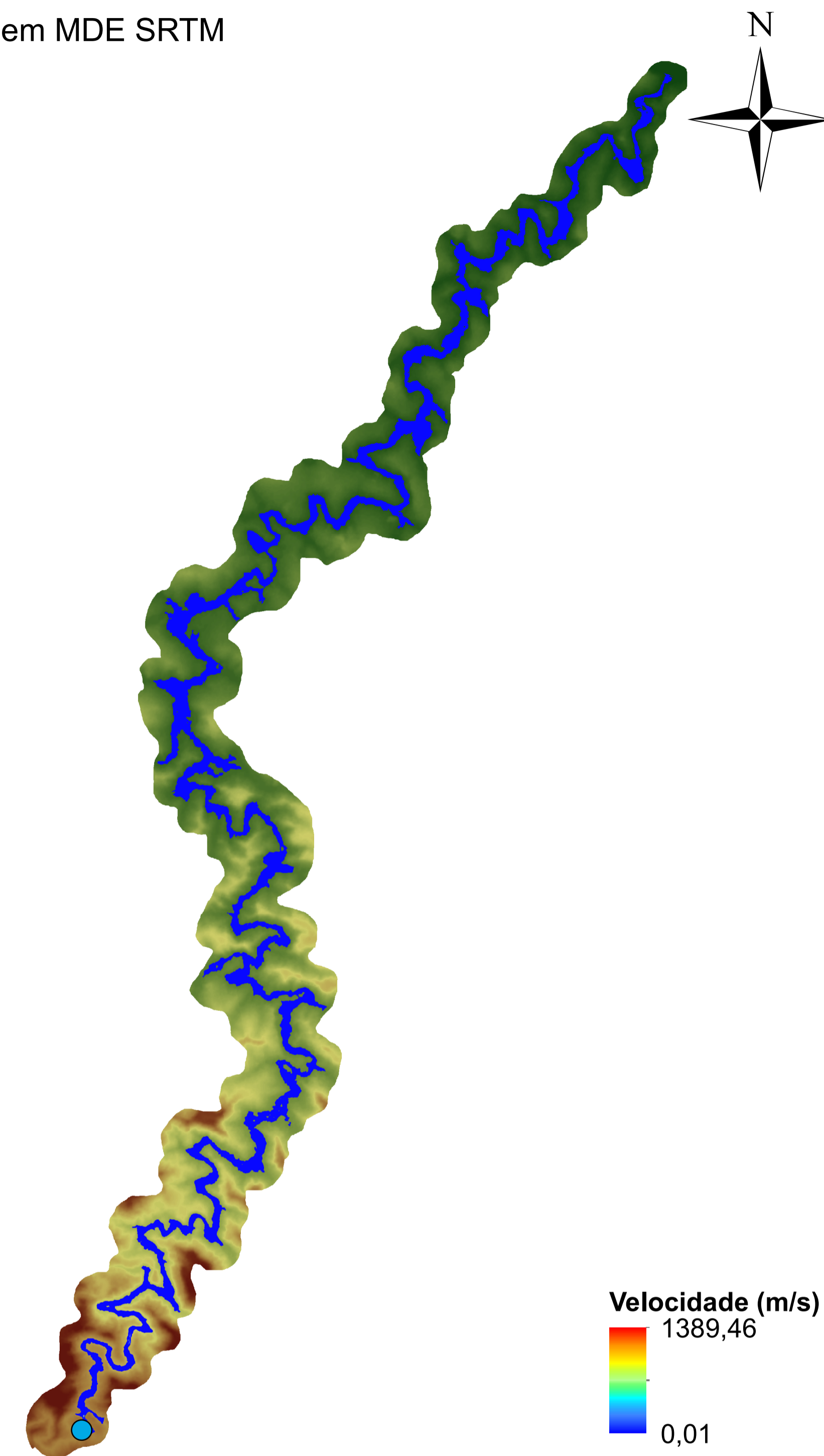
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

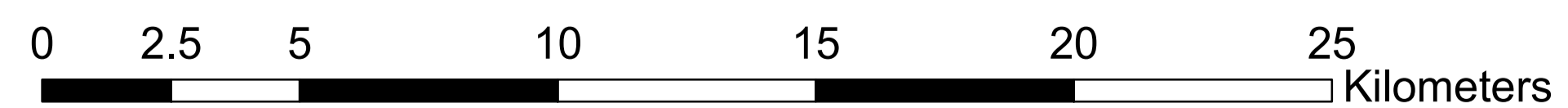


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Médio

Altura da barragem - 10,00 m

Comprimento - 356,00 m

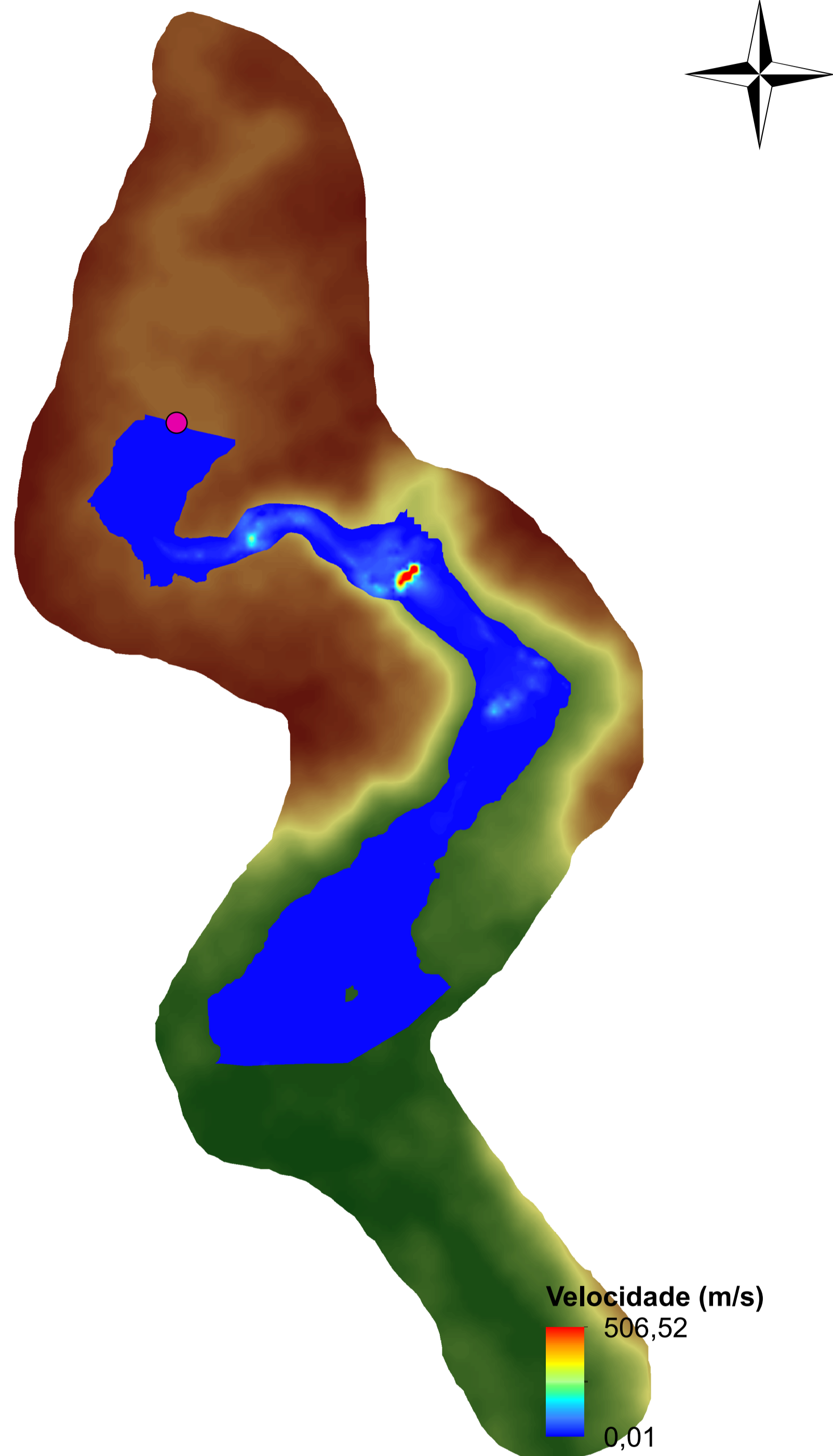
Volume máximo do reservatório - 6,35 hm³

Vazão de projeto - 482,50 m³/s

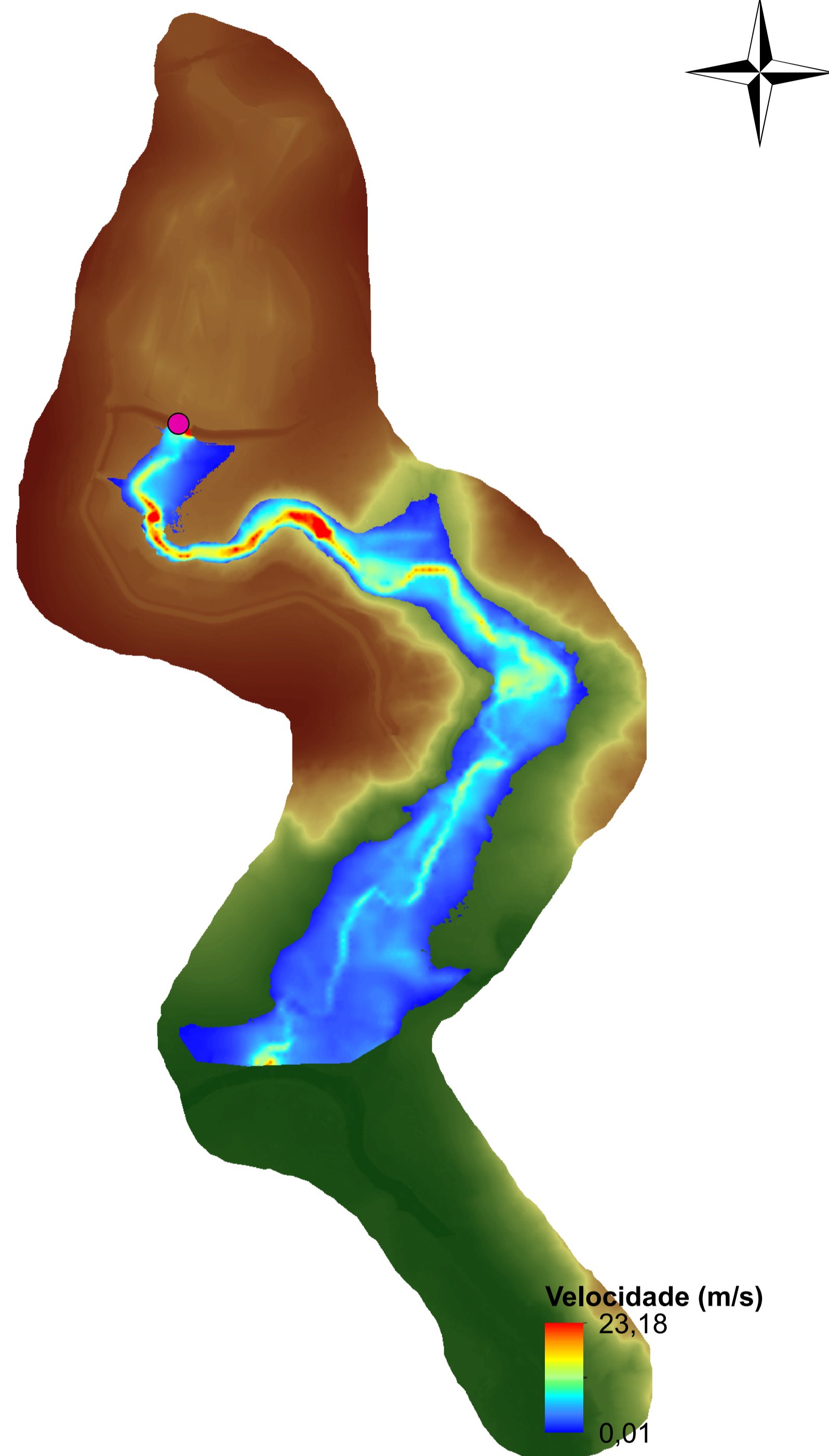
Potência instalada - 15,10 MW

Mapa de Velocidade de Onda - Barragem D

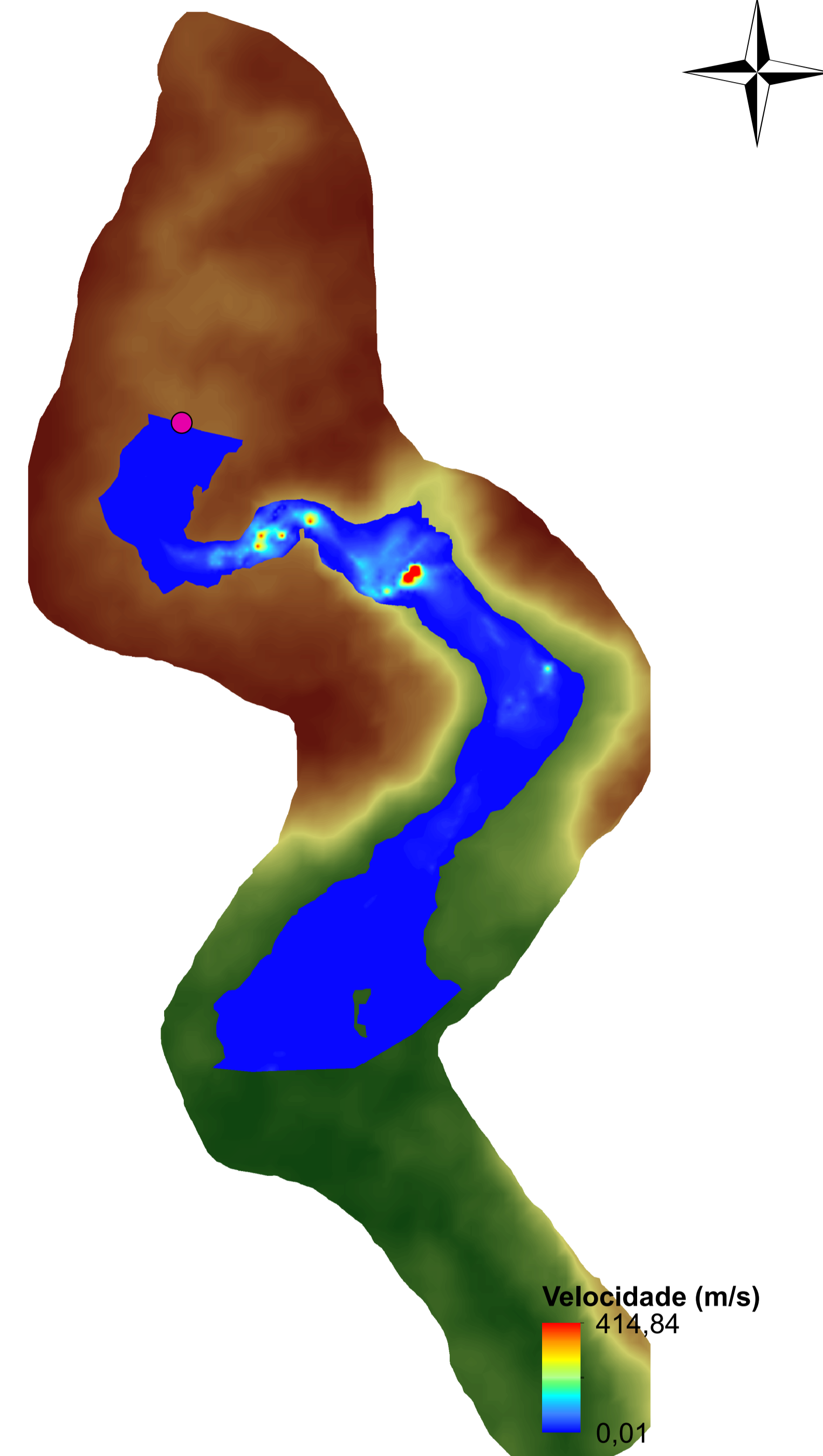
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

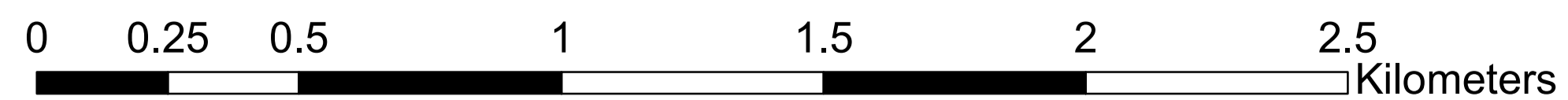


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

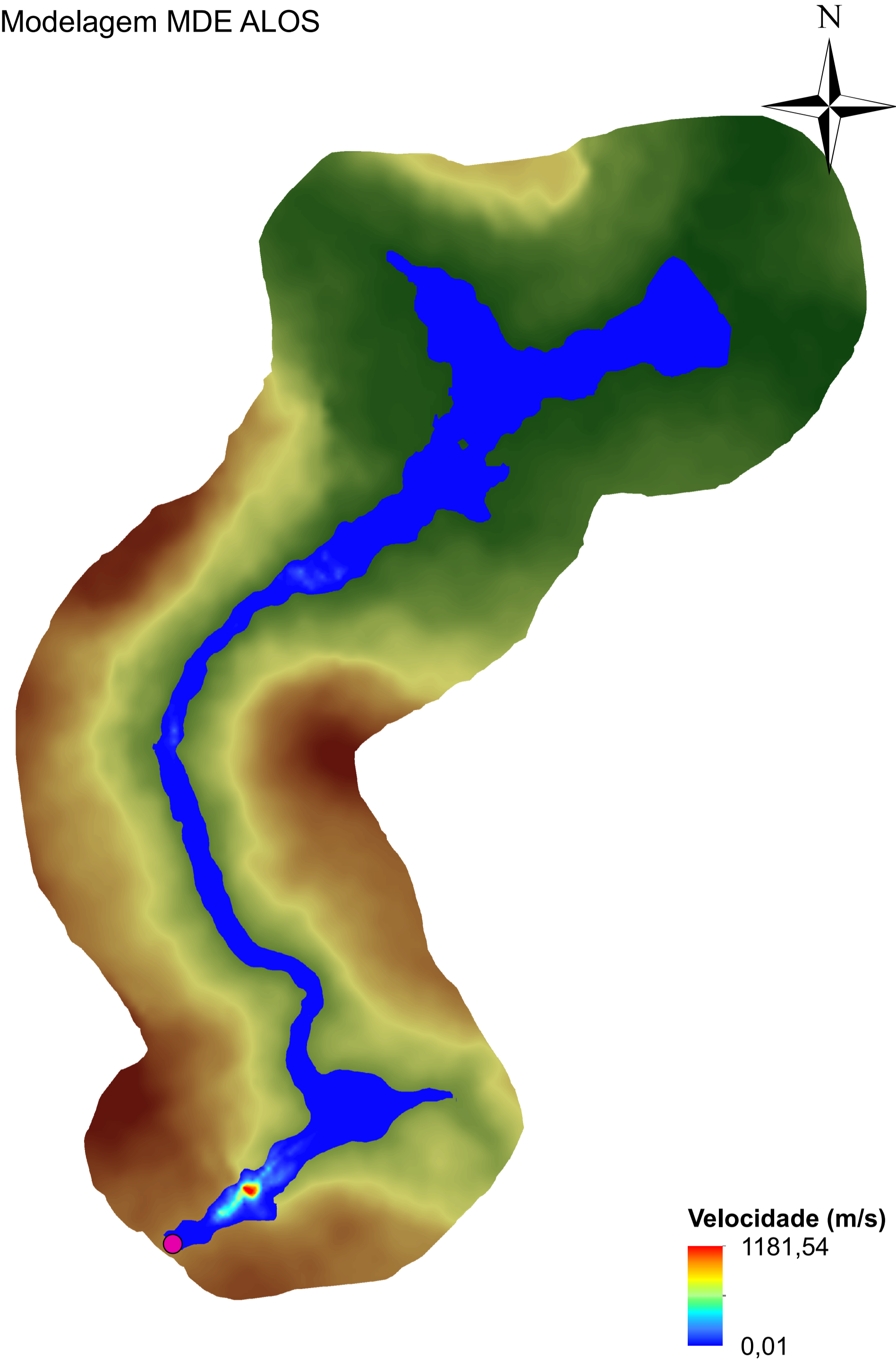
Escala:



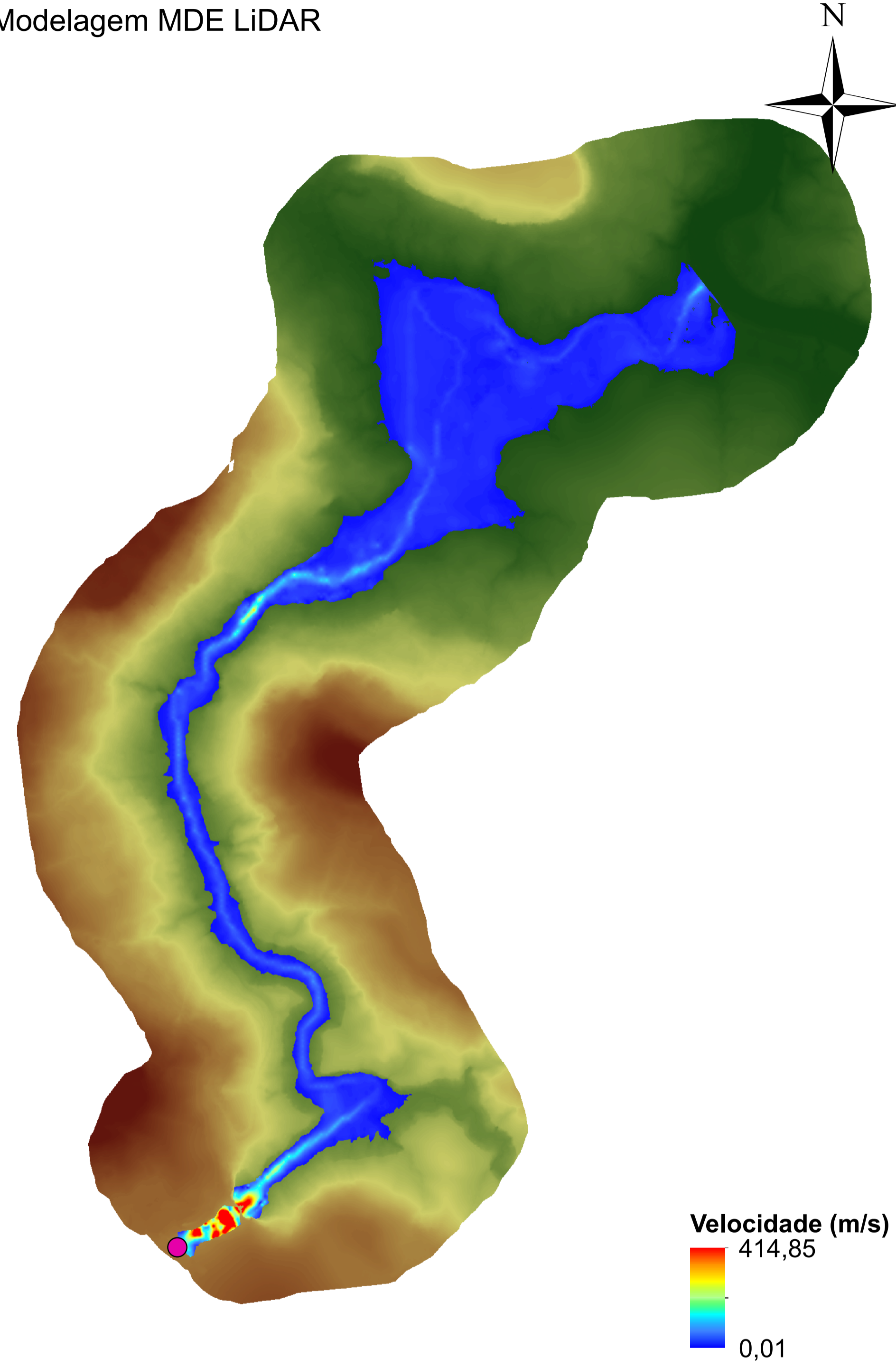
Dano Potencial - Médio
Altura da barragem - 12,00 m
Comprimento - 630,00 m
Volume máximo do reservatório - 8,77 hm³
Vazão de projeto - 340,00 m³/s
Potência instalada - 21,60 MW

Mapa de Velocidade de Onda - Barragem E

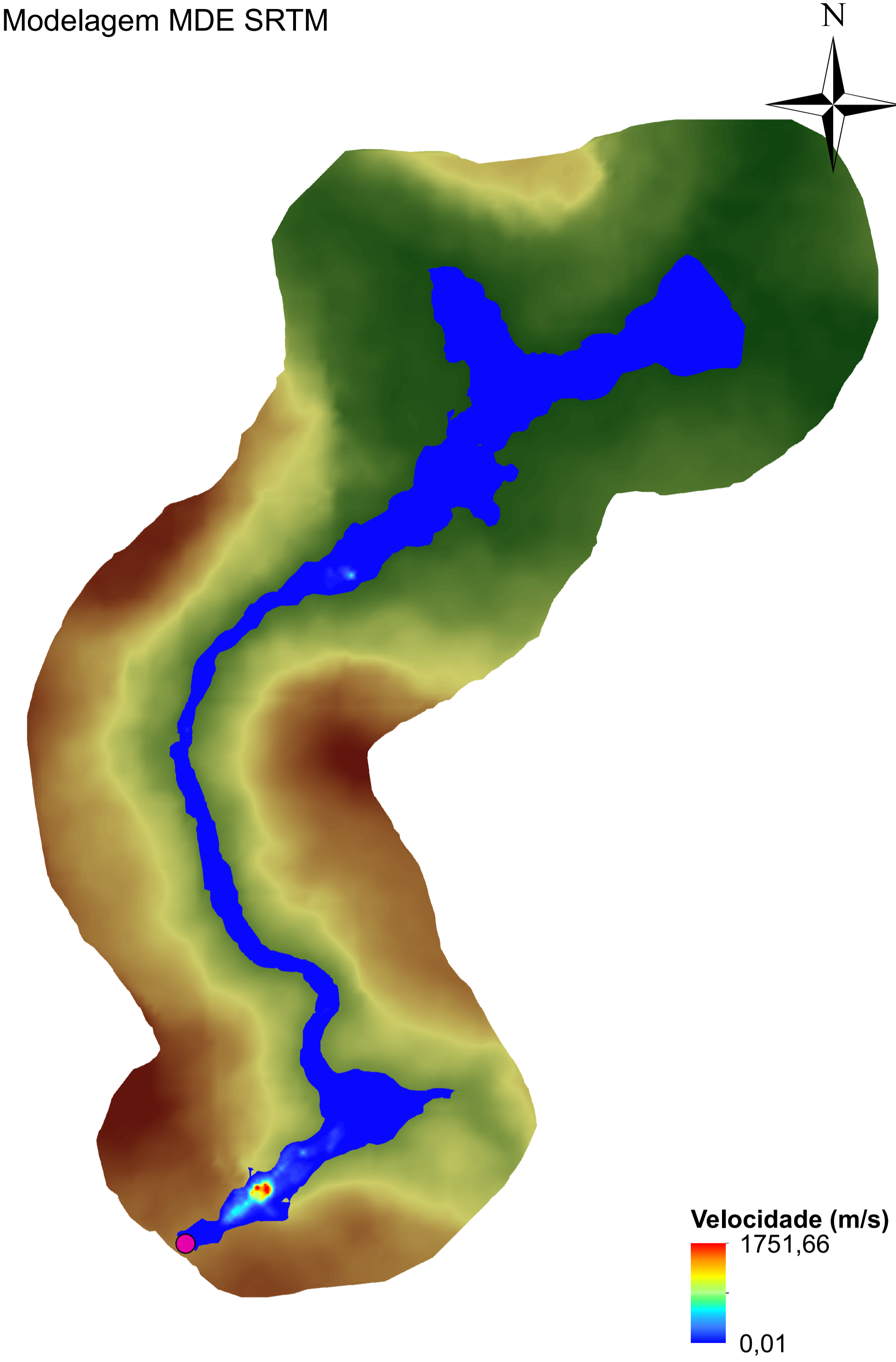
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

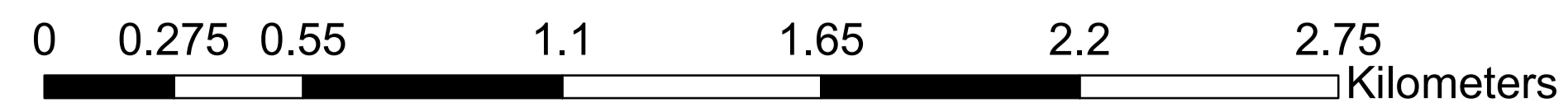


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

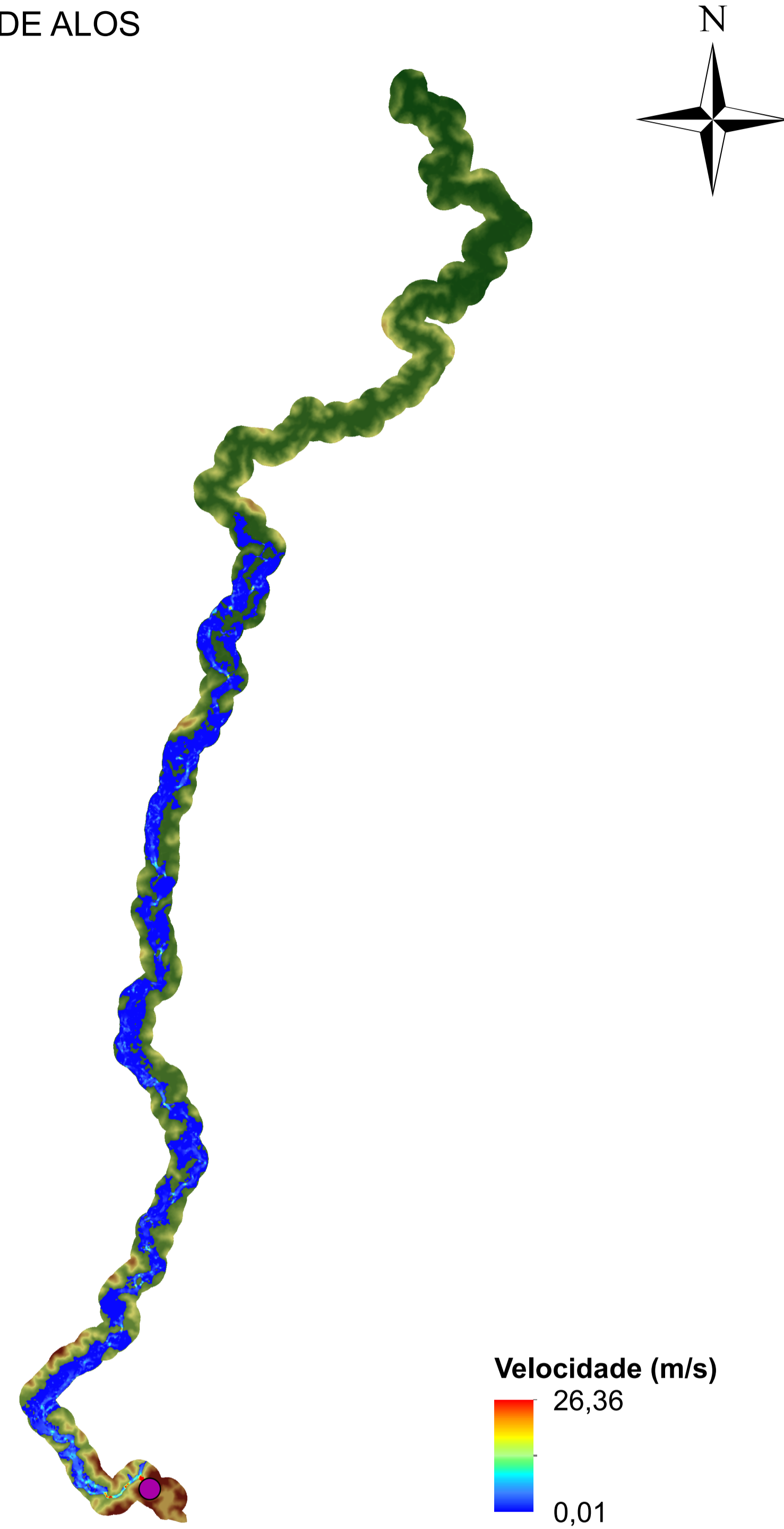
Escala:



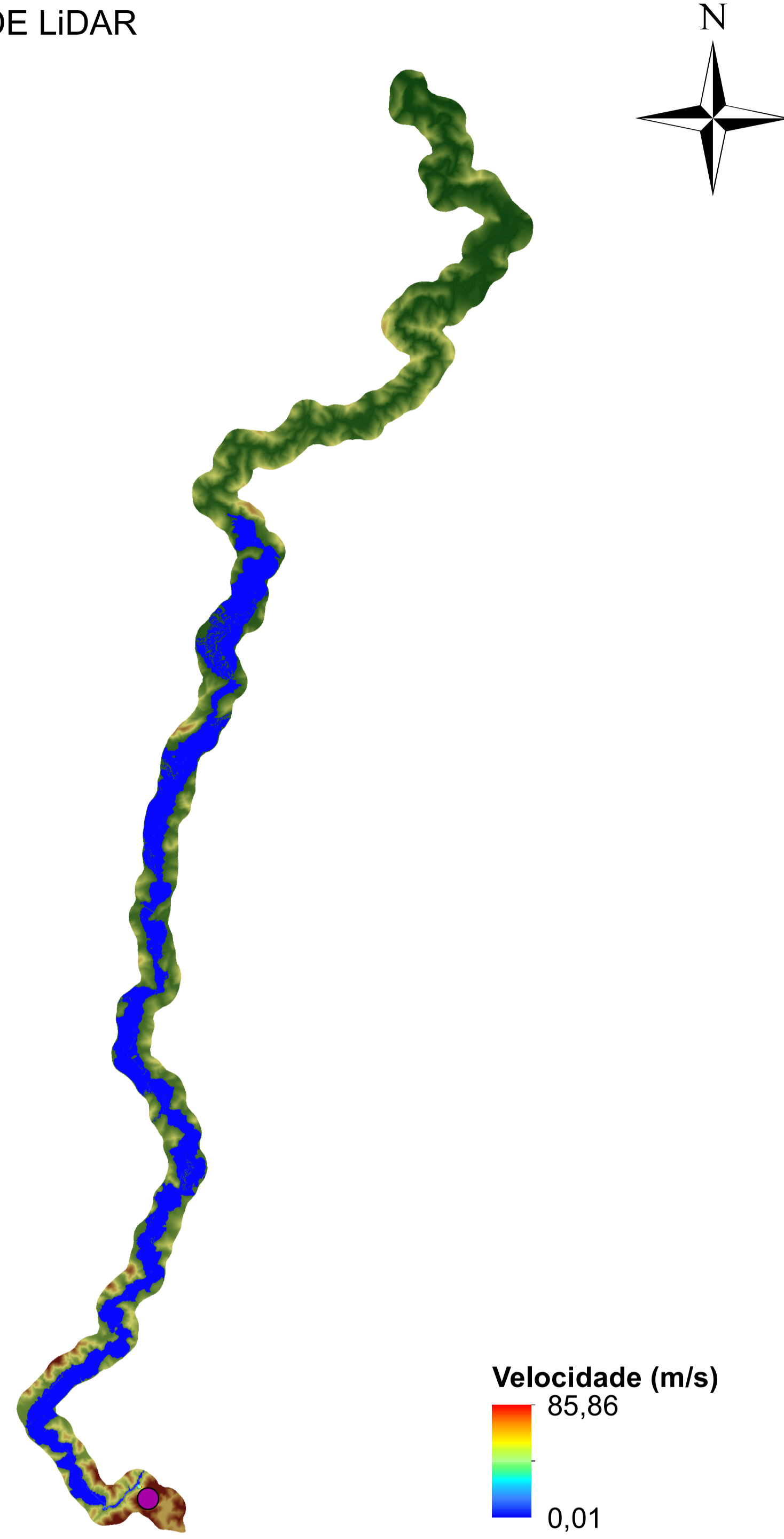
Dano Potencial - Alto
Altura da barragem - 10,40 m
Comprimento - 210,00 m
Volume máximo do reservatório - 1,84 hm³
Vazão de projeto - 431,00 m³/s
Potência instalada - 16,20 MW

Mapa de Velocidade de Onda - Barragem F

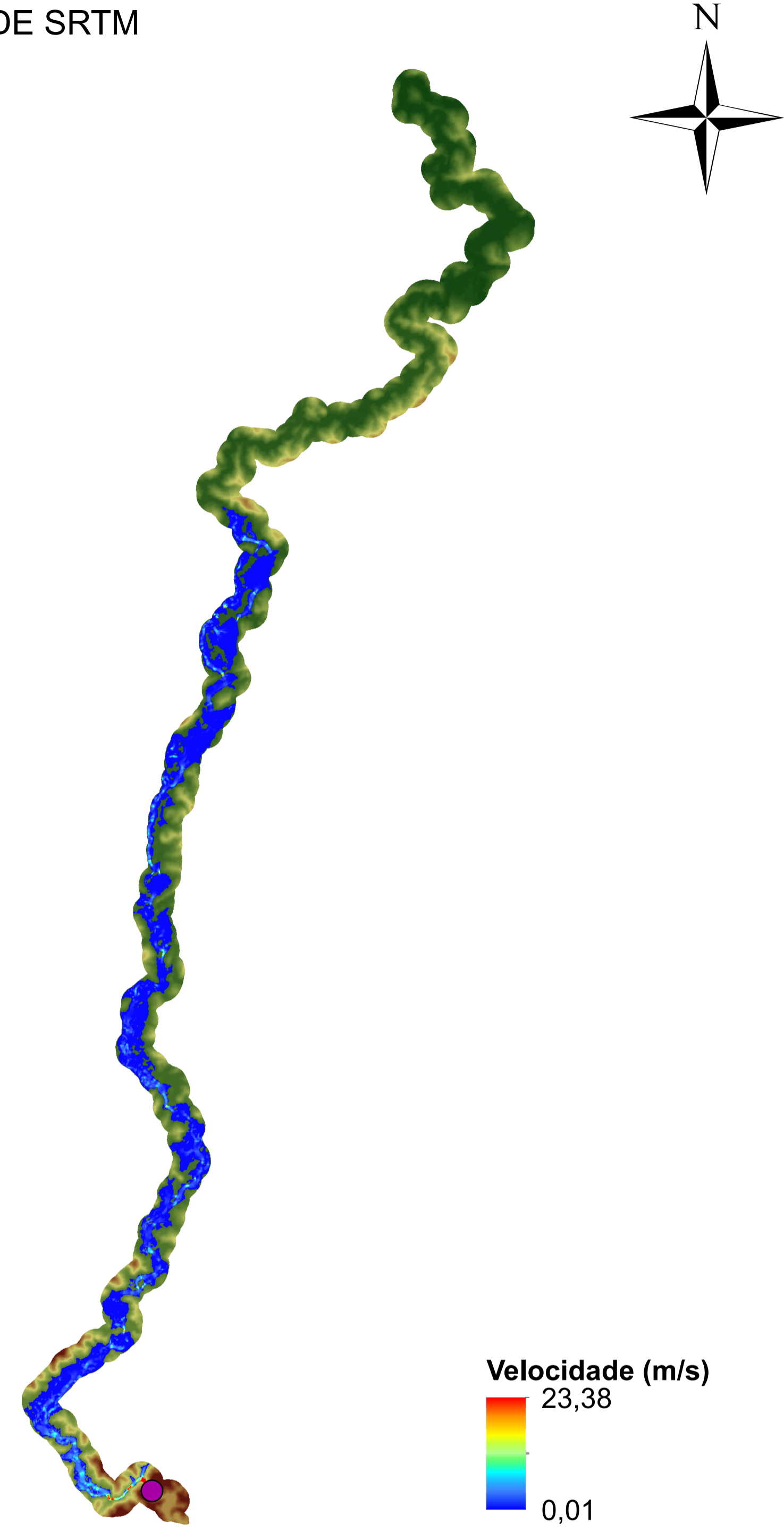
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

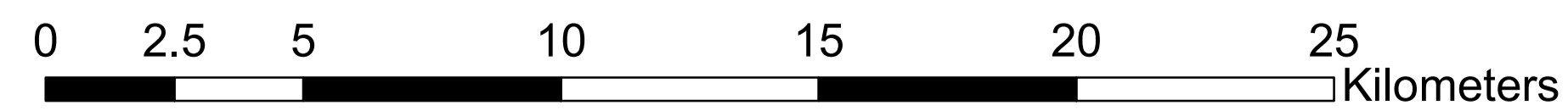


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 23S

Escala:

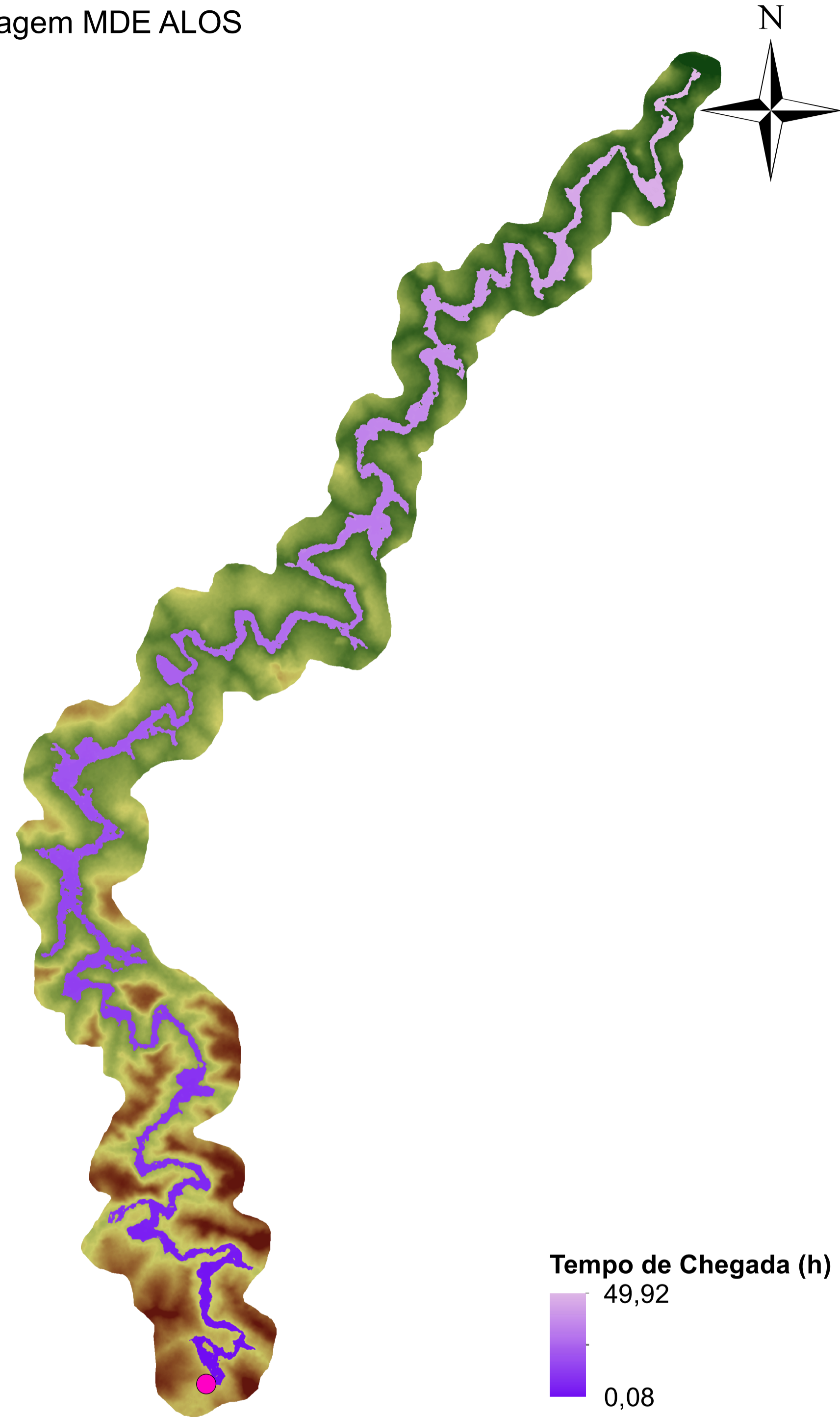


Dano Potencial - Alto
Altura da barragem - 5,00 m
Comprimento - 25,00 m
Volume máximo do reservatório - 0,13 hm³
Vazão de projeto - 158,00 m³/s
Potência instalada - 3,80 MW

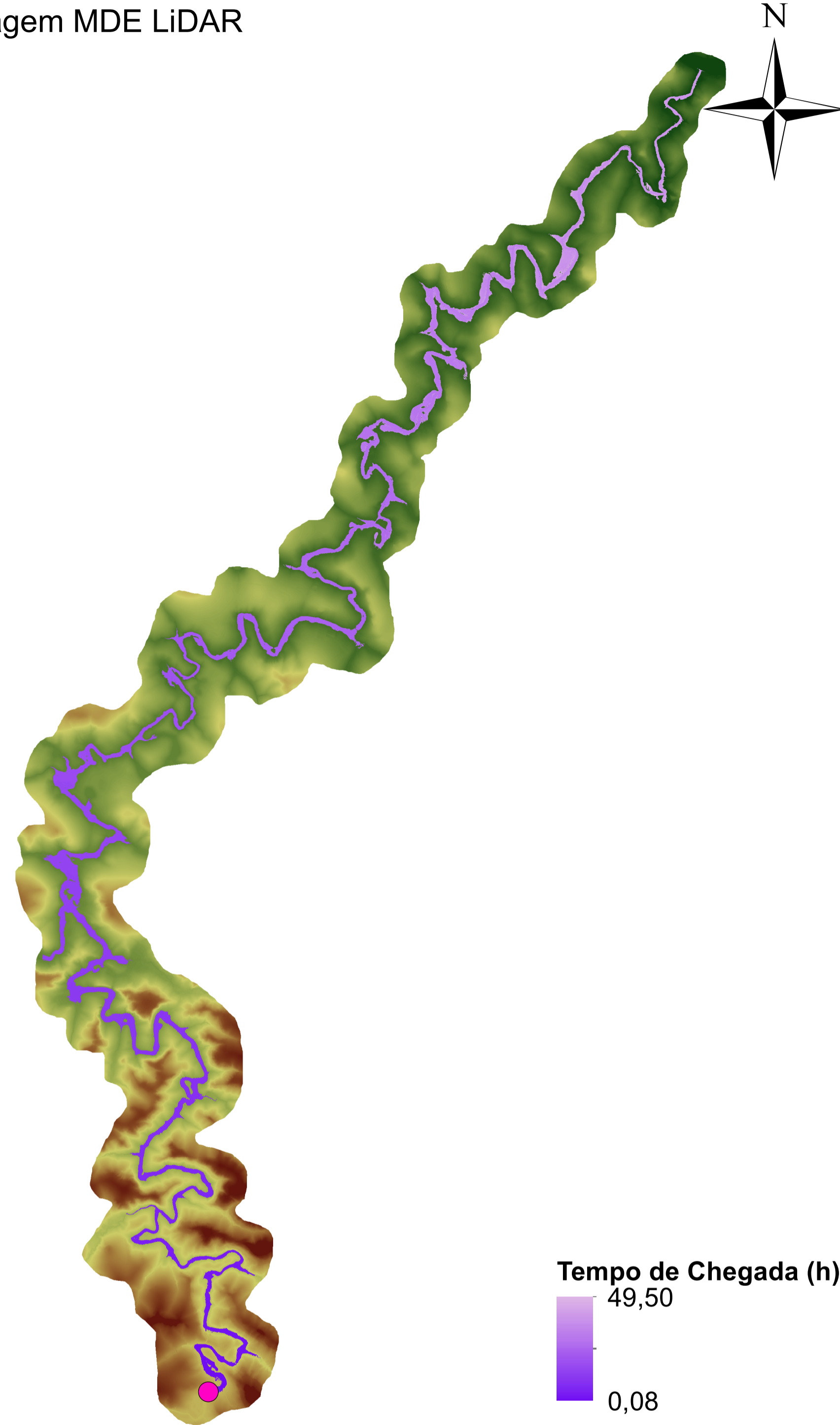
APÊNDICE E – Mapas de tempo de chegada da onda das modelagens

Mapa de Tempo de Chegada da Onda - Barragem A

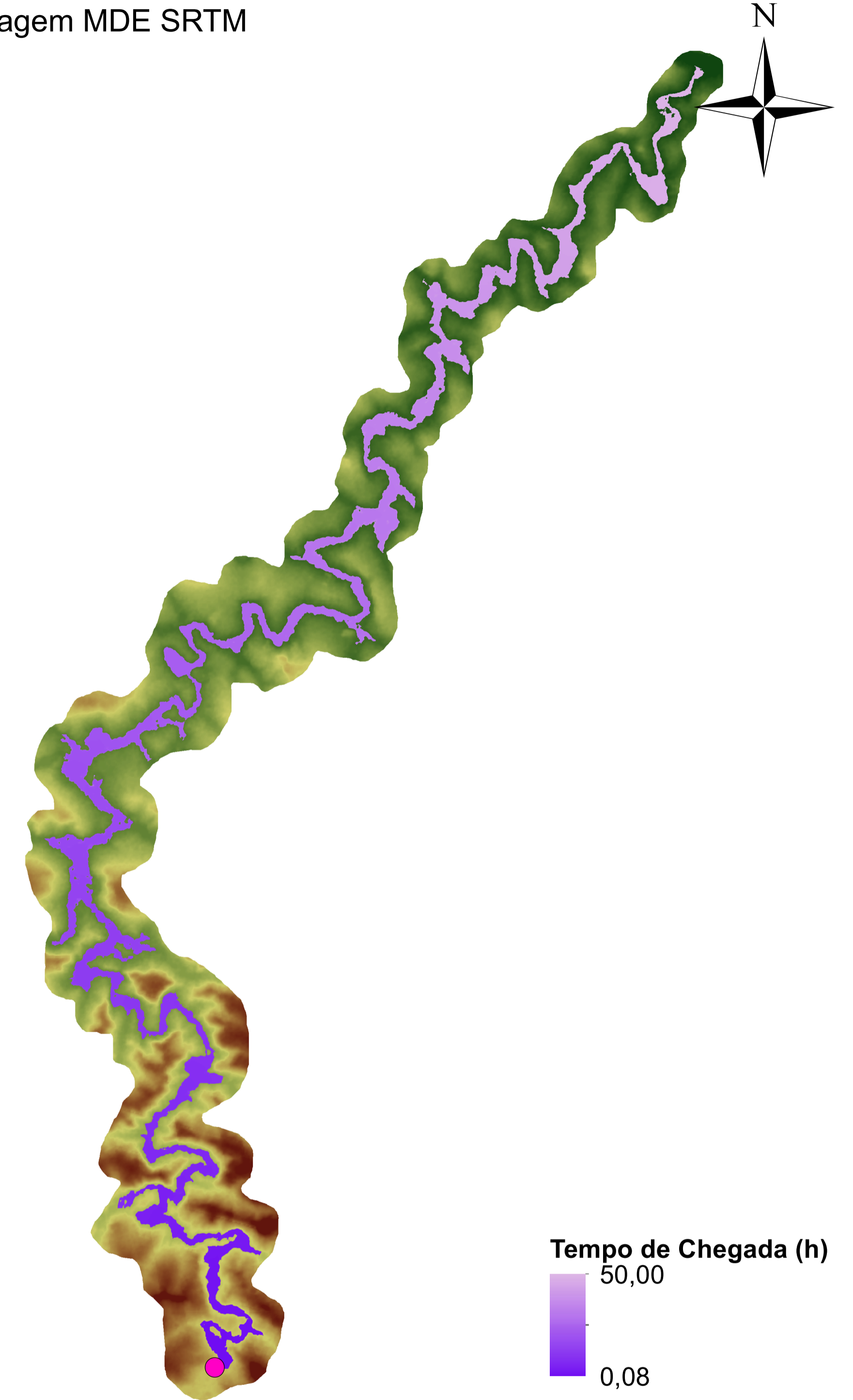
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

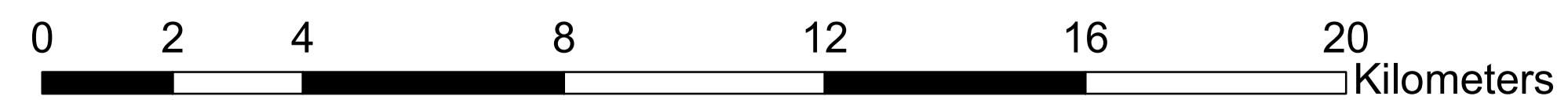


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Baixo

Altura da barragem - 8,00 m

Comprimento - 68,00 m

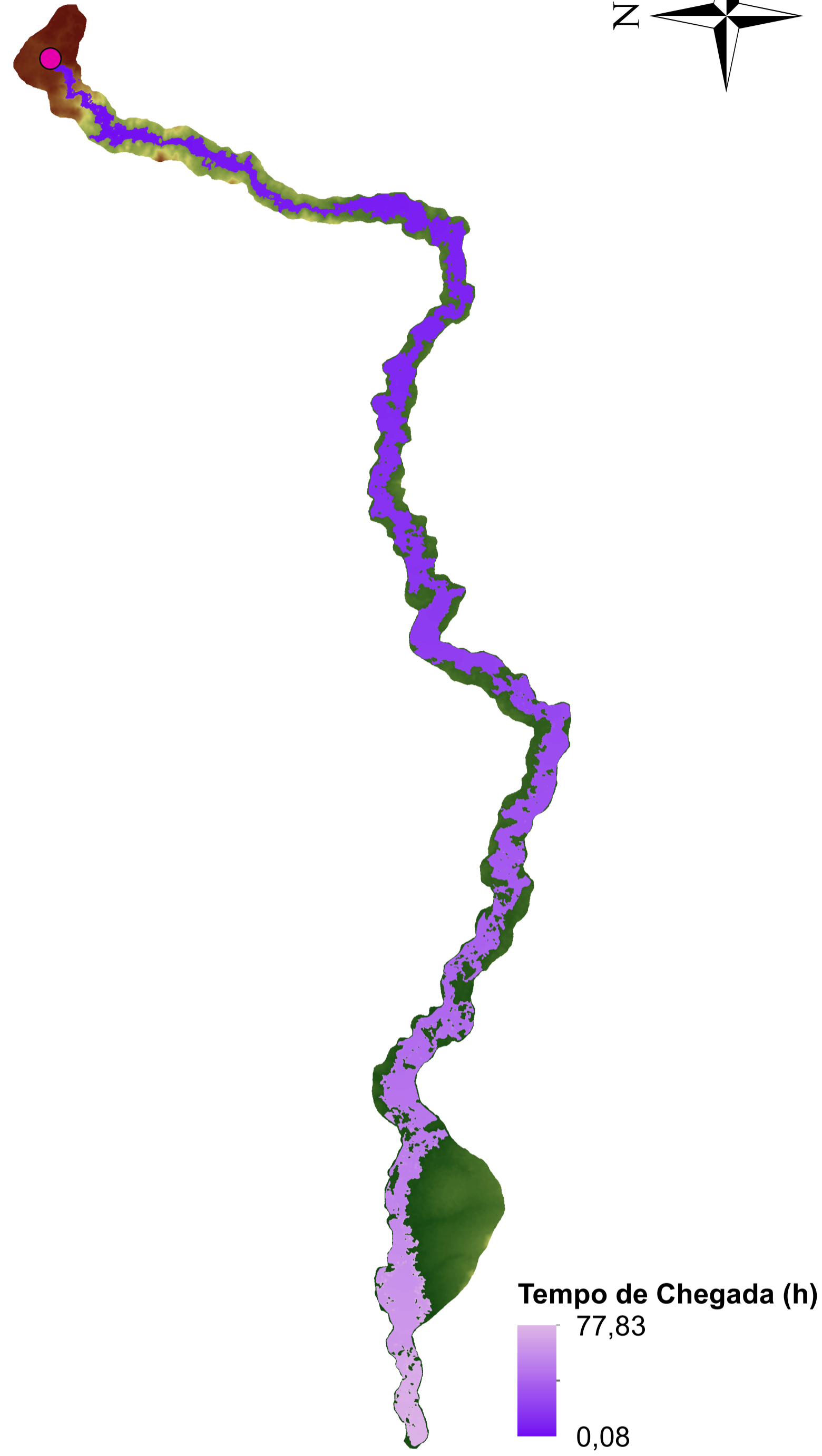
Volume máximo do reservatório - 0,74 hm³

Vazão de projeto - 350,00 m³/s

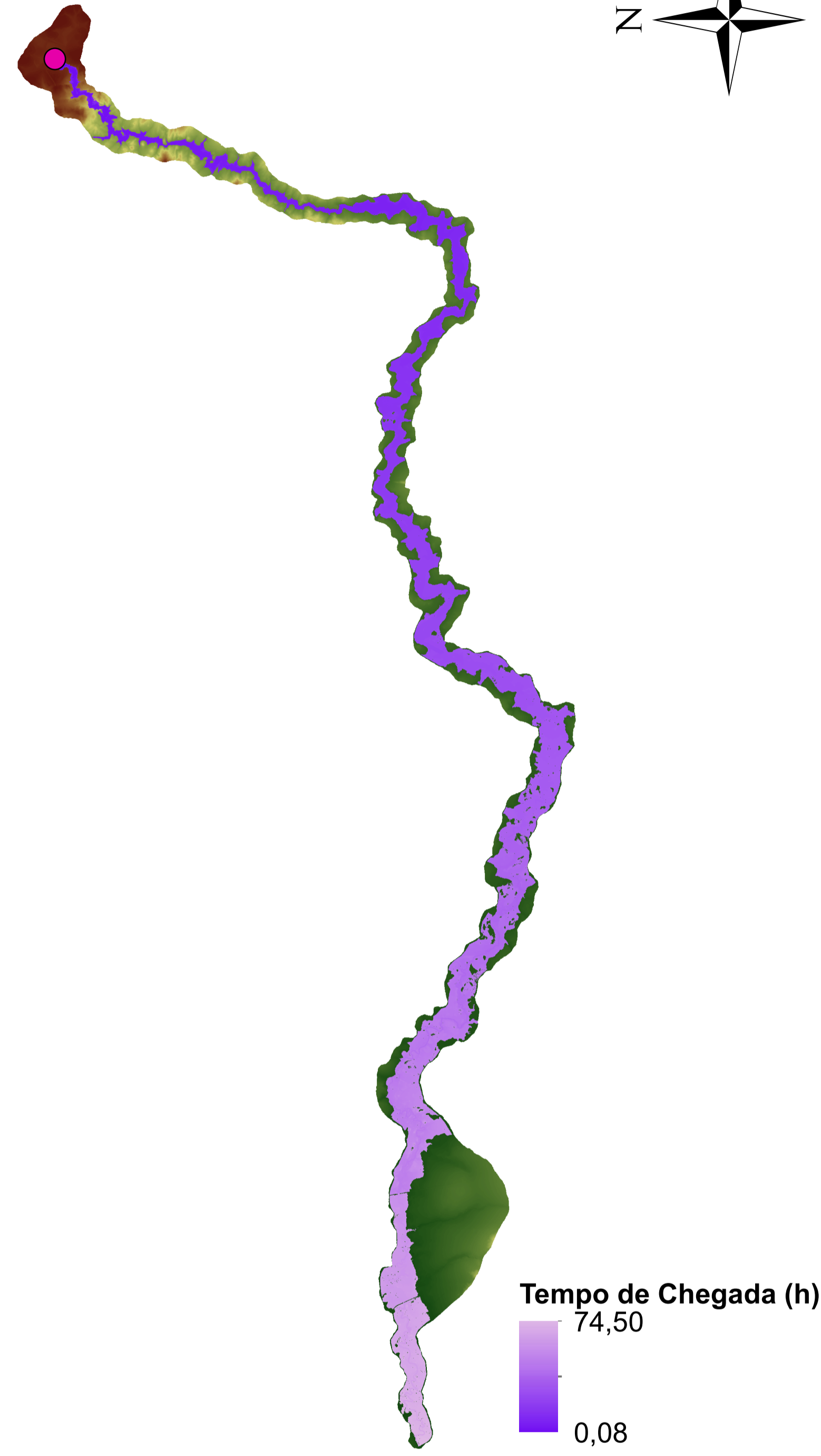
Potência instalada - 2,56 MW

Mapa de Tempo de Chegada da Onda - Barragem B

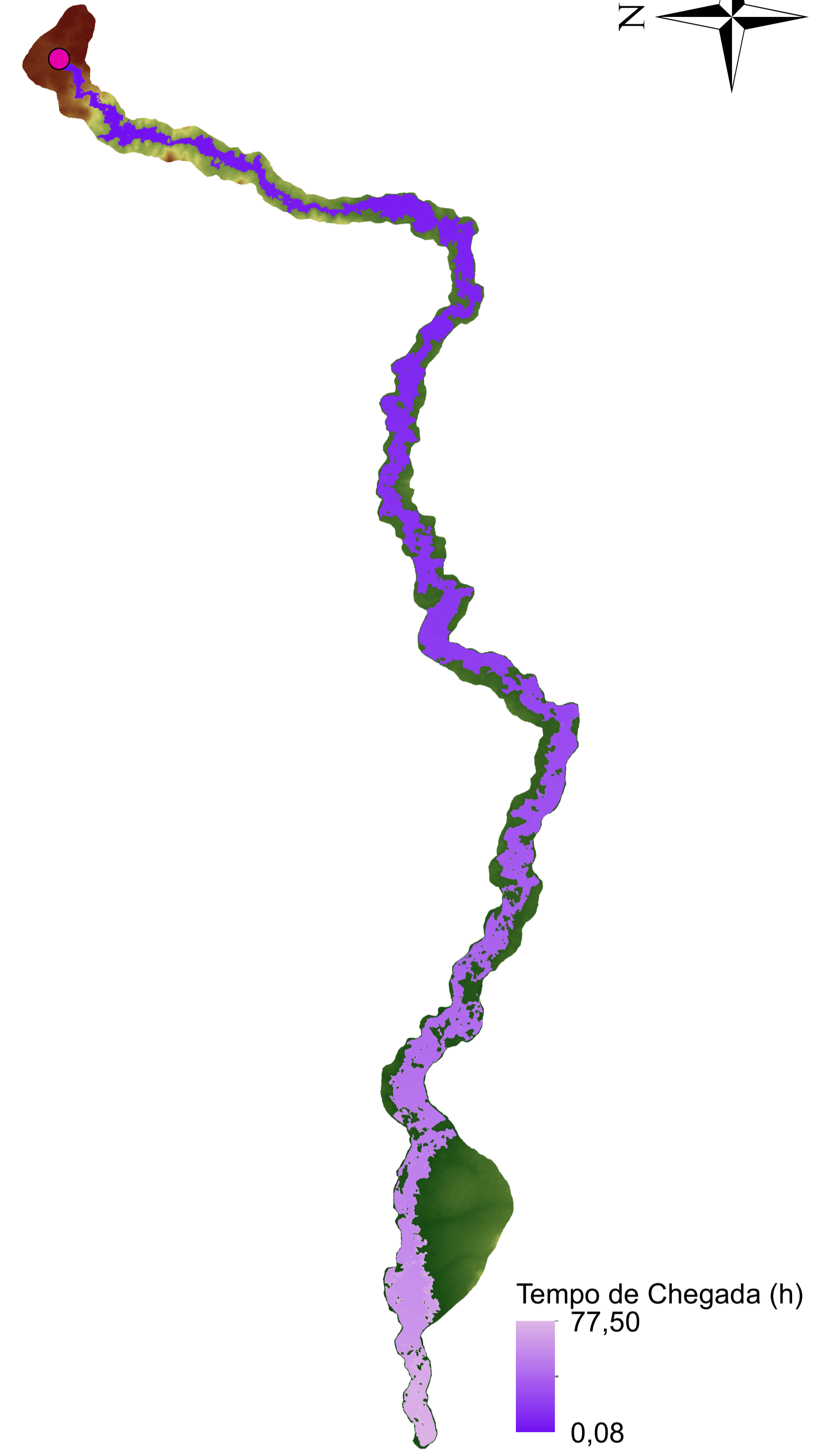
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

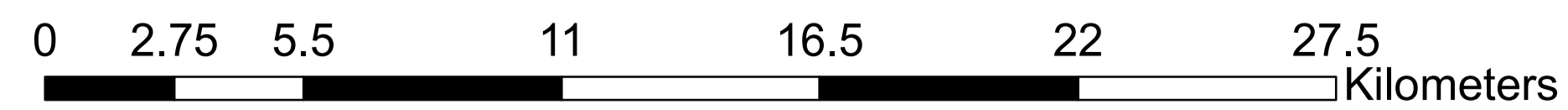


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 21S

Escala:



Dano Potencial - Baixo

Altura da barragem - 14,20 m

Comprimento - 1012,00 m

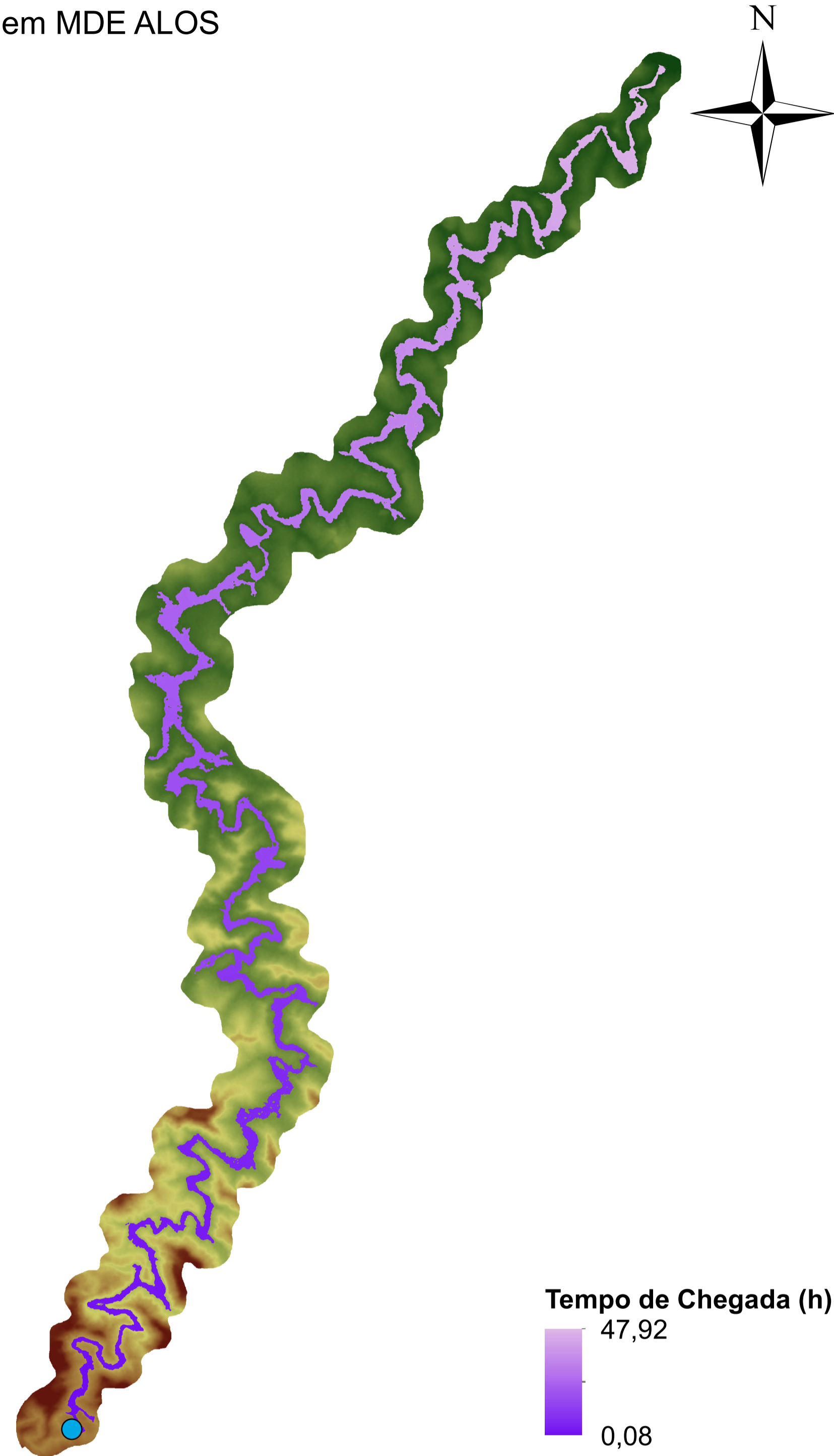
Volume máximo do reservatório - 22,63 hm³

Vazão de projeto - 530,00 m³/s

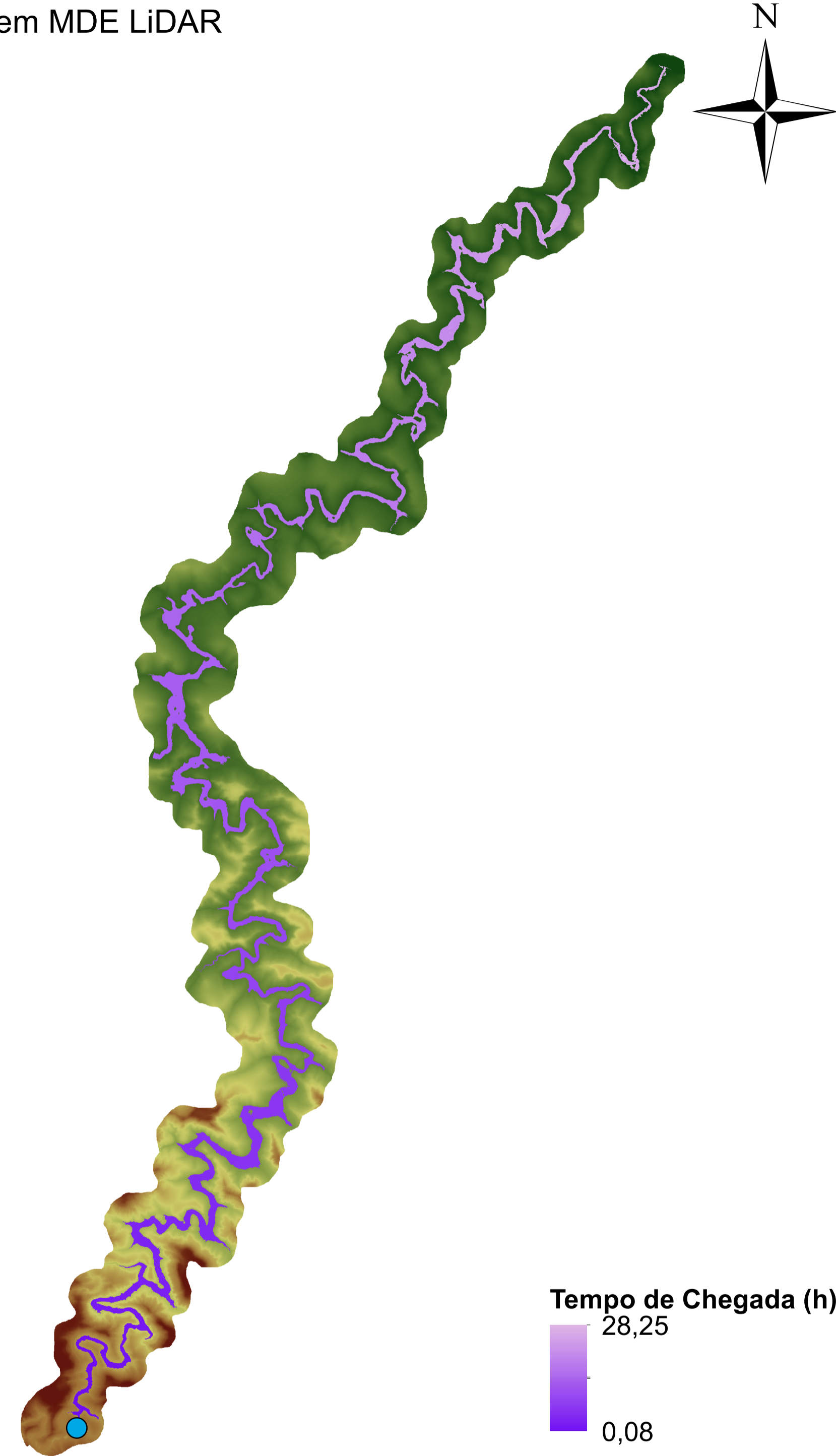
Potência instalada - 120,00 MW

Mapa de Tempo de Chegada da Onda - Barragem C

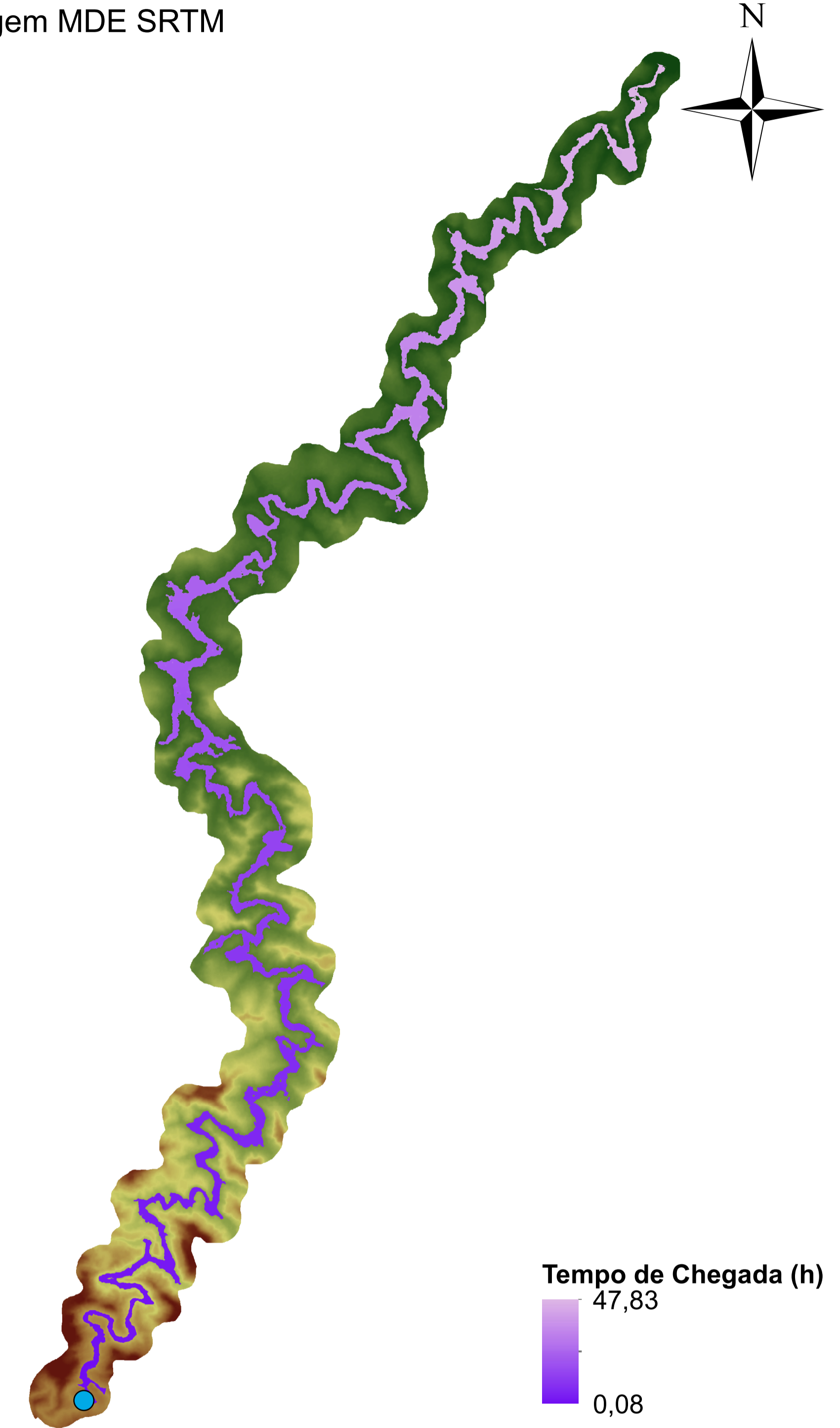
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

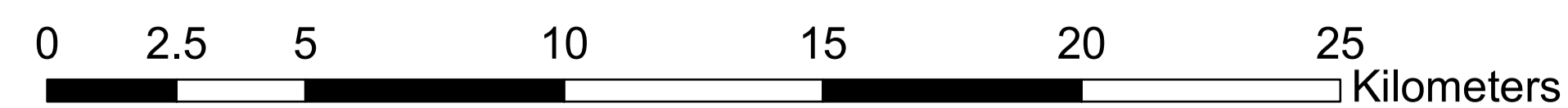


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Médio

Altura da barragem - 10,00 m

Comprimento - 356,00 m

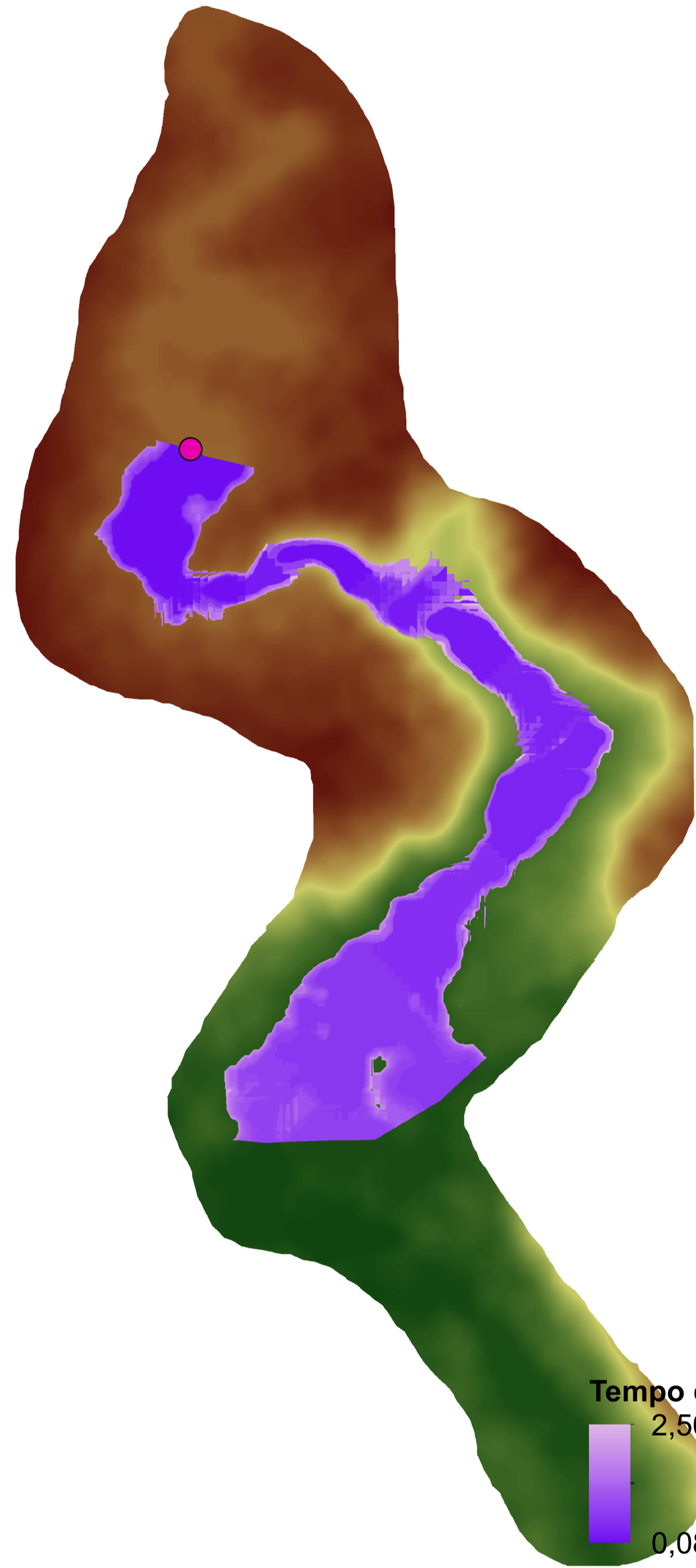
Volume máximo do reservatório - 6,35 hm³

Vazão de projeto - 482,50 m³/s

Potência instalada - 15,10 MW

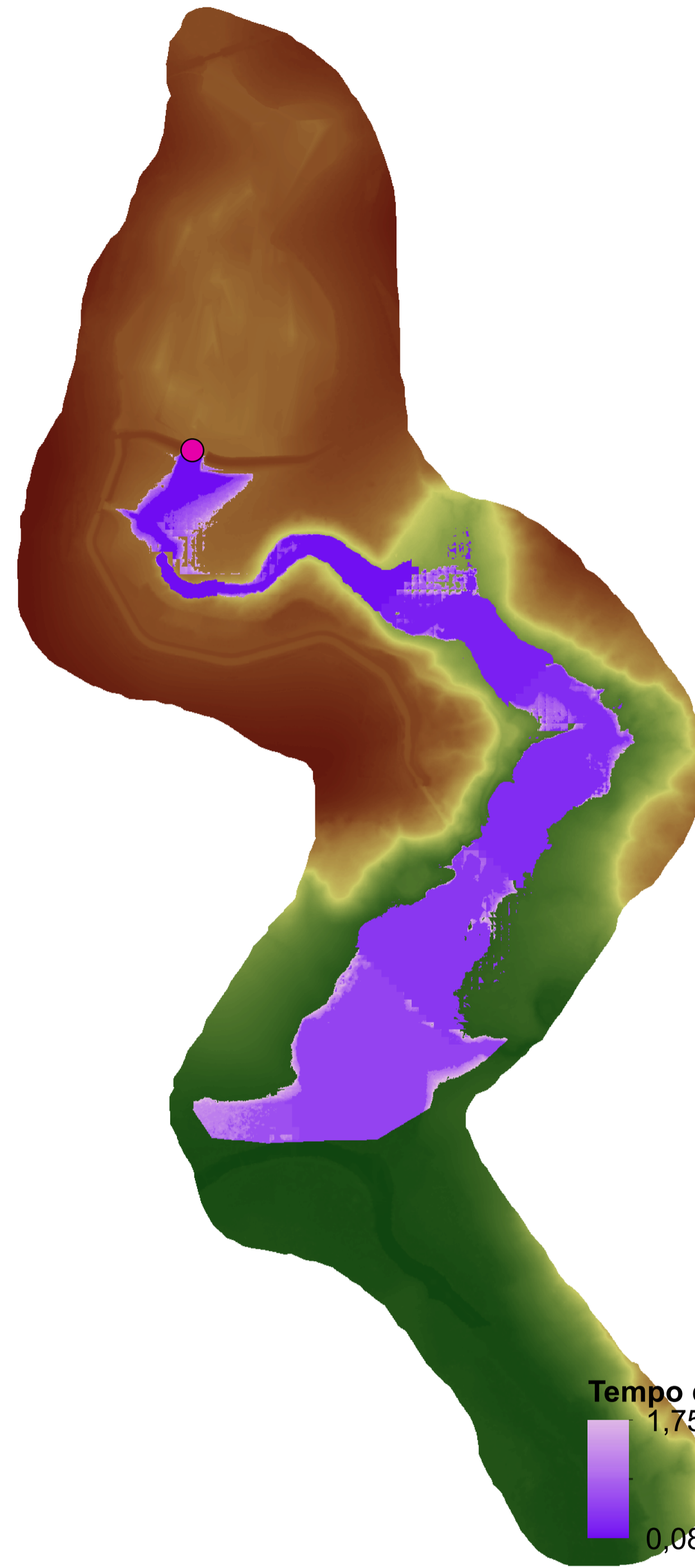
Mapa de Tempo de Chegada da Onda - Barragem D

Modelagem MDE ALOS



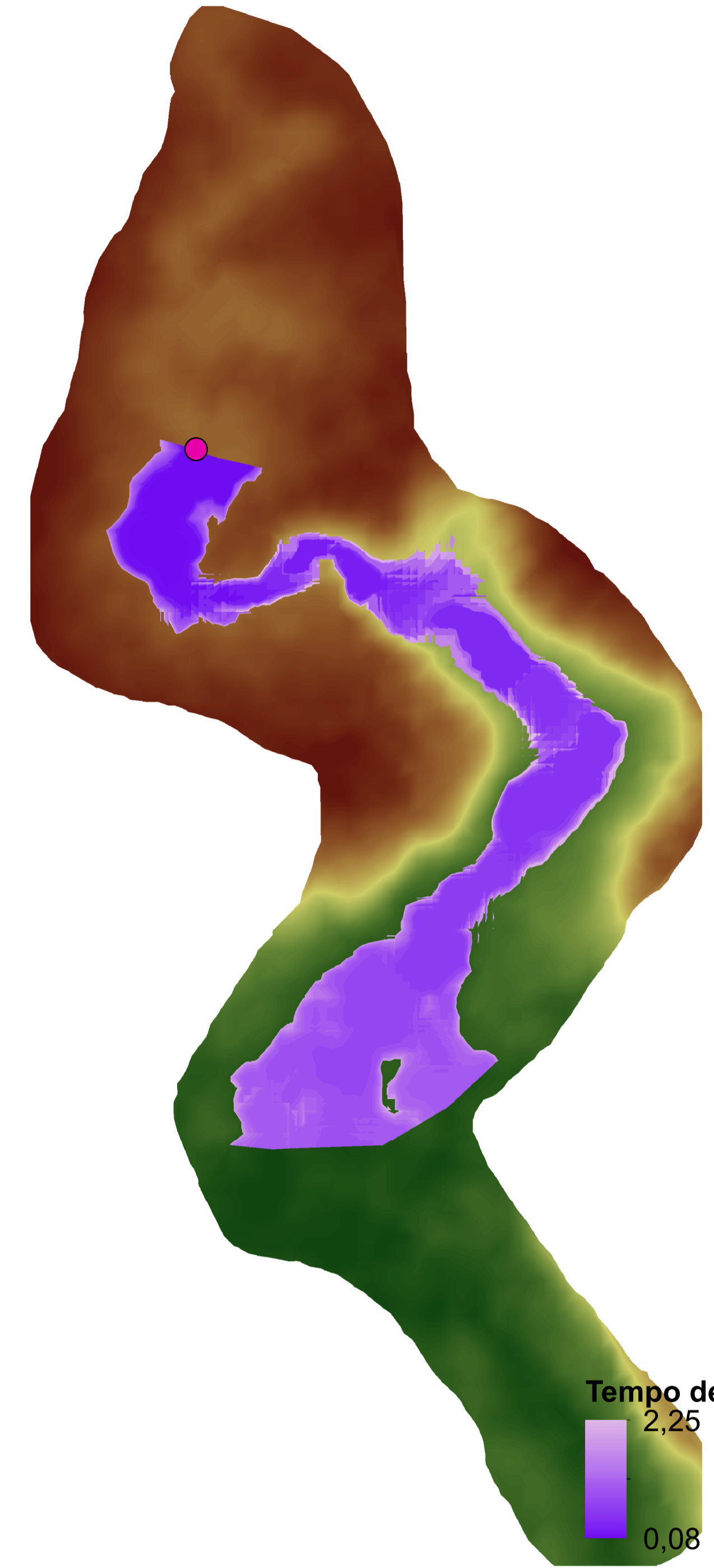
Tempo de Chegada (h)
2,50
0,08

Modelagem MDE LiDAR



Tempo de Chegada (h)
1,75
0,08

Modelagem MDE SRTM

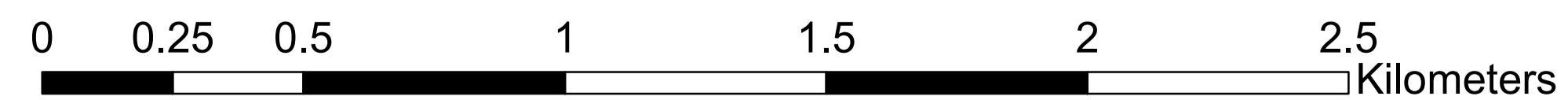


Tempo de Chegada (h)
2,25
0,08



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

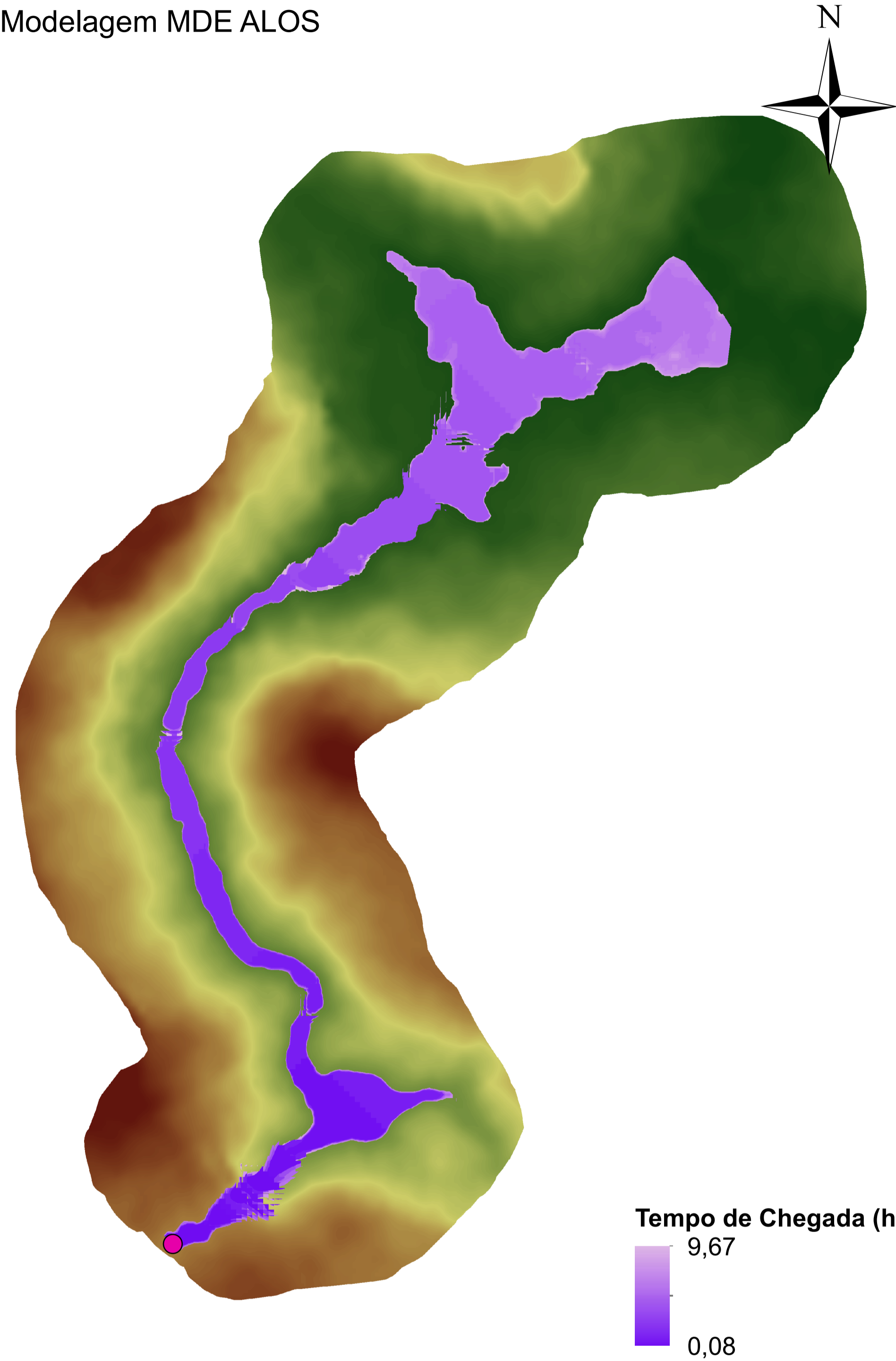
Escala:



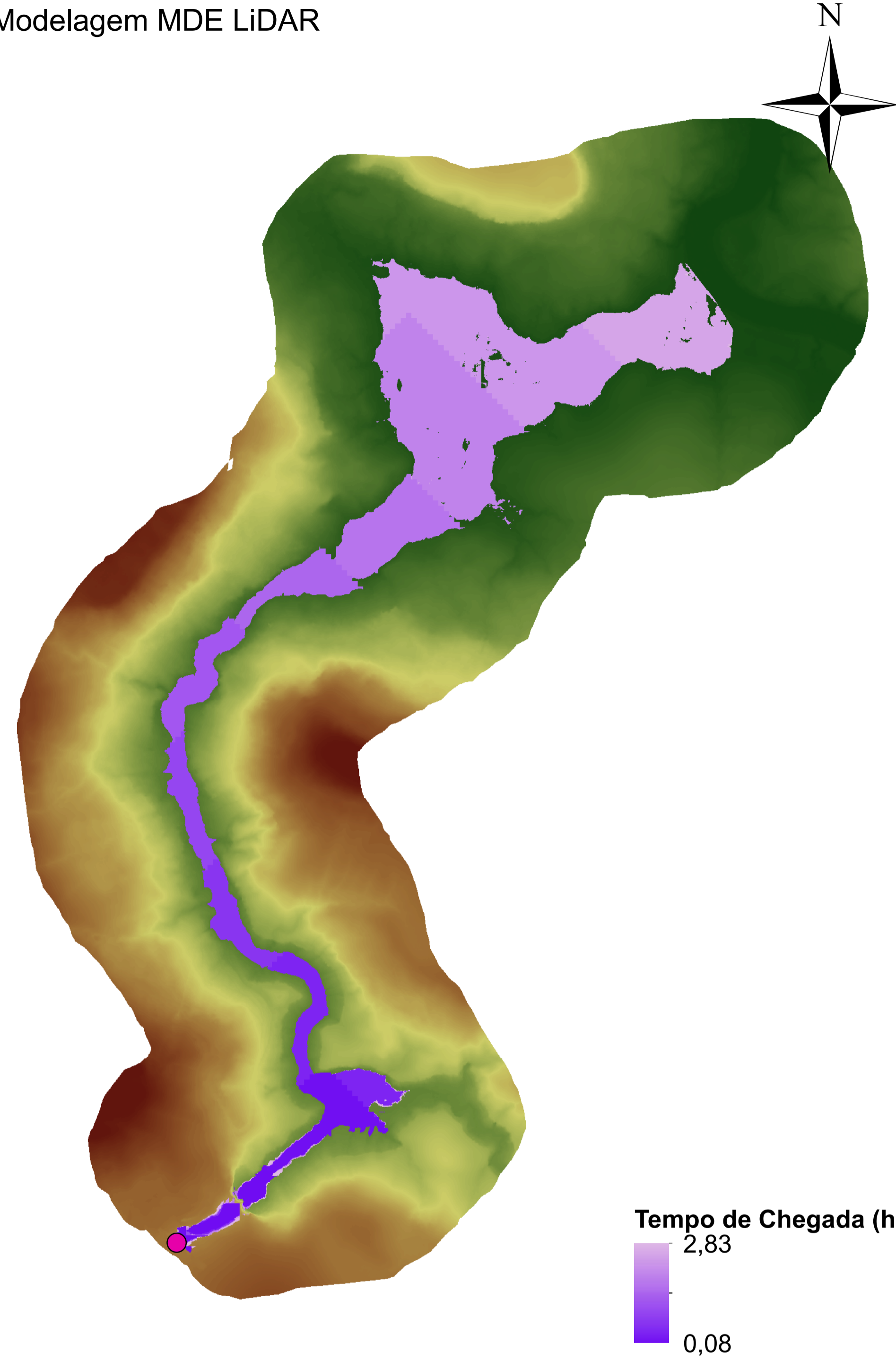
Dano Potencial - Médio
Altura da barragem - 12,00 m
Comprimento - 630,00 m
Volume máximo do reservatório - 8,77 hm³
Vazão de projeto - 340,00 m³/s
Potência instalada - 21,60 MW

Mapa de Tempo de Chegada da Onda - Barragem E

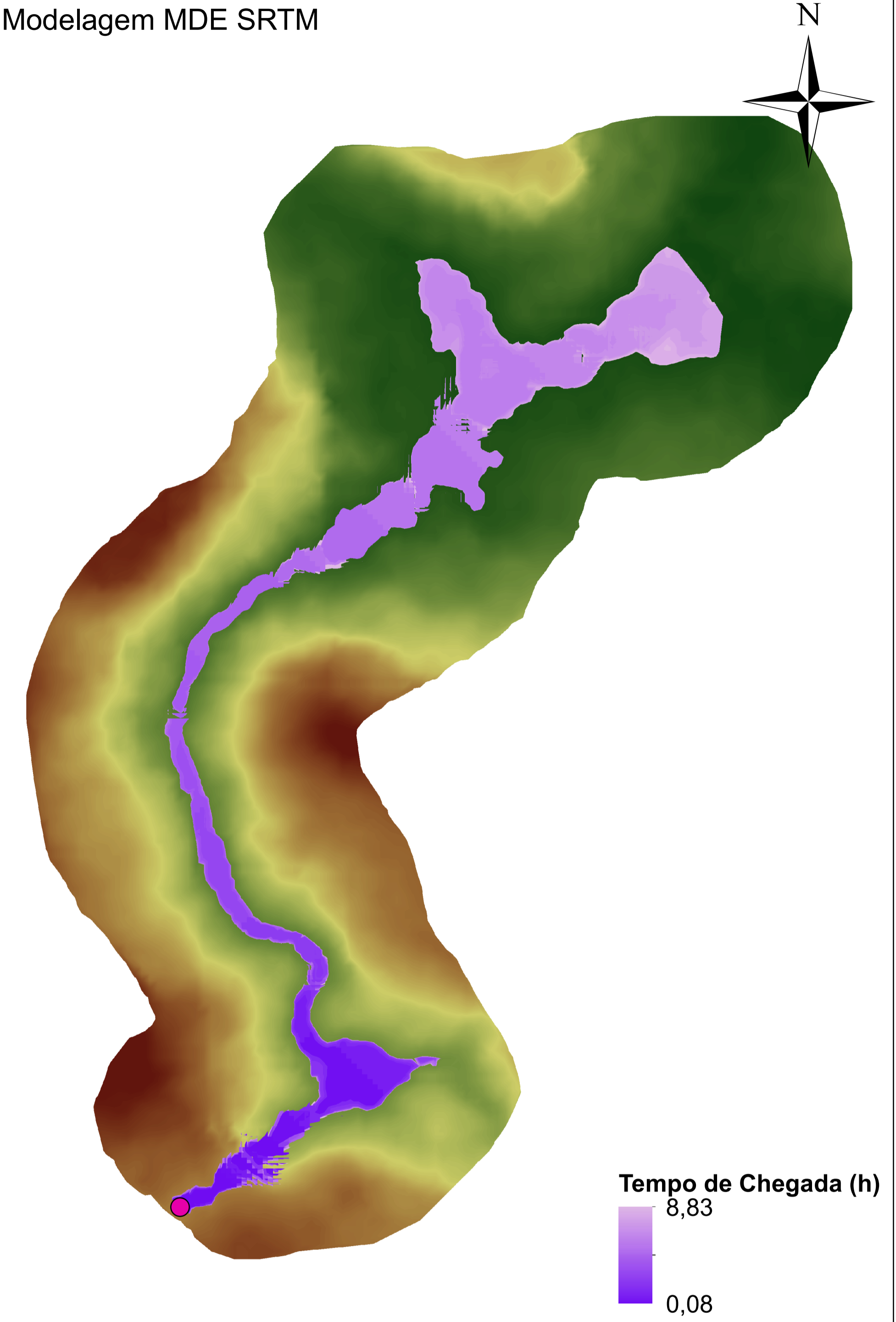
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

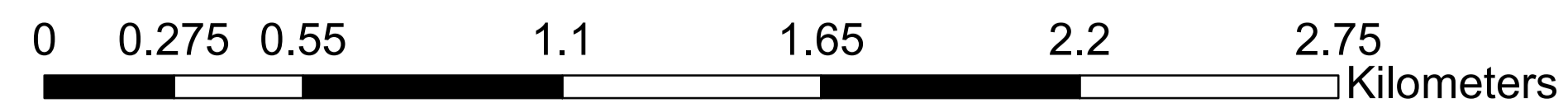


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

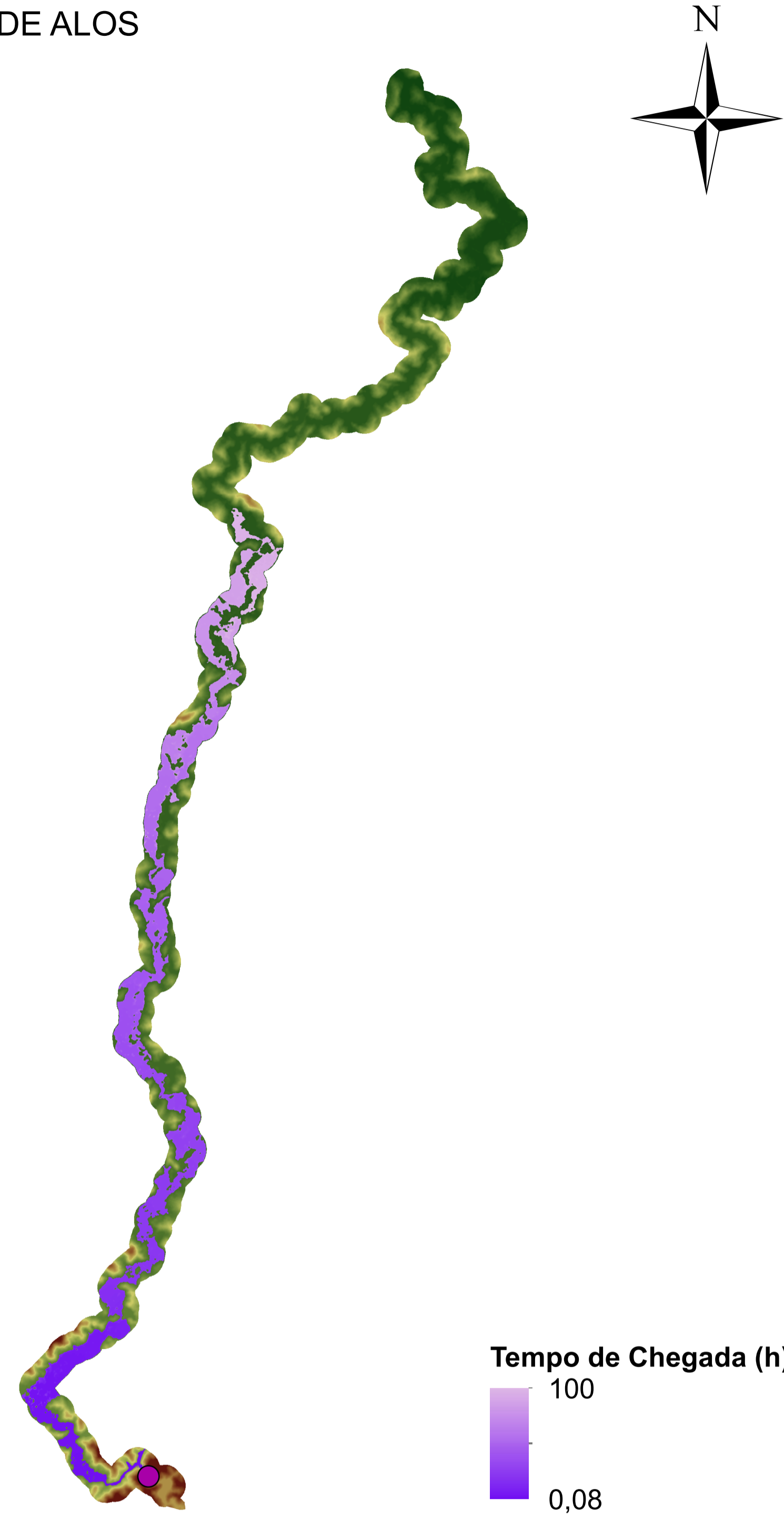
Escala:



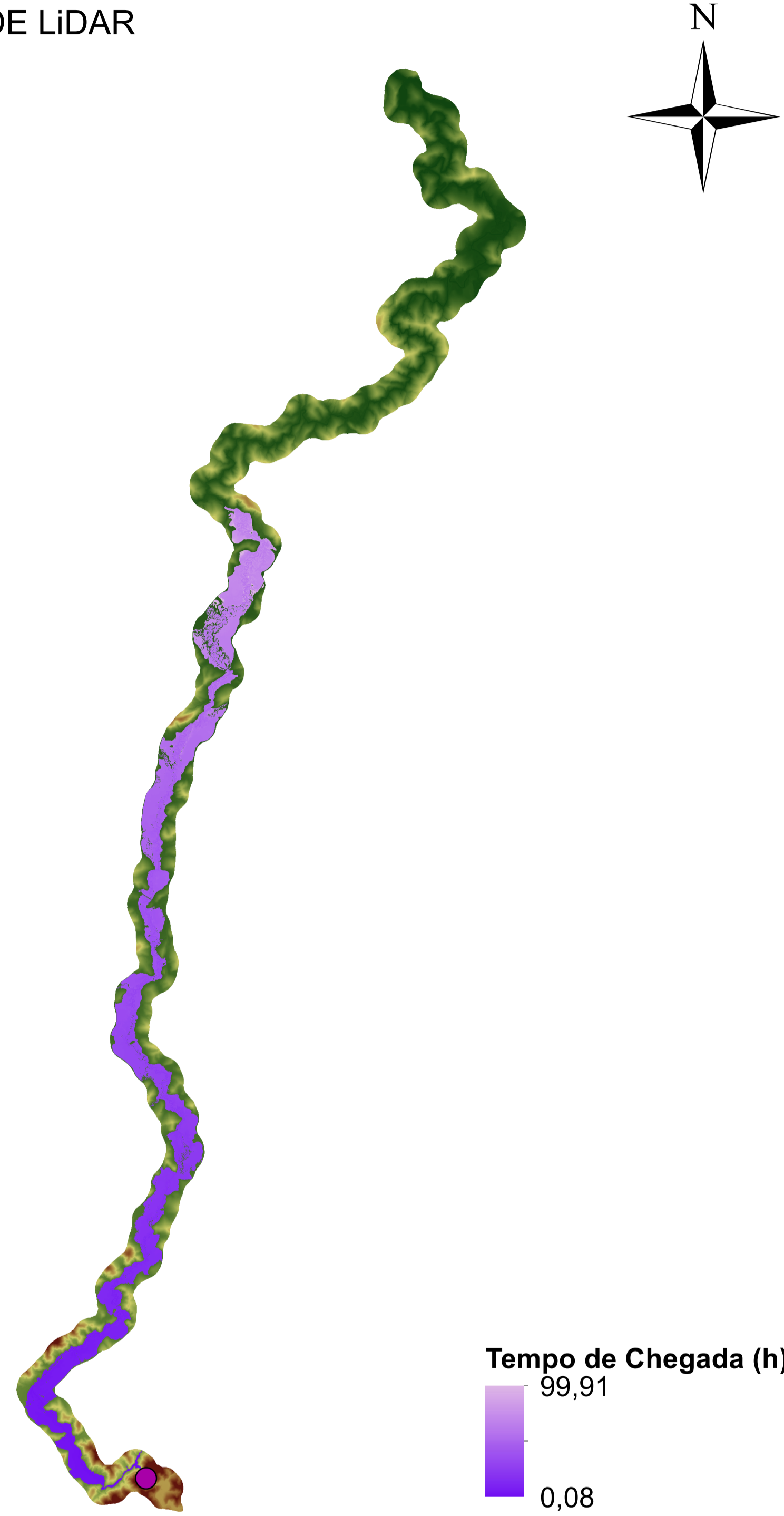
Dano Potencial - Alto
Altura da barragem - 10,40 m
Comprimento - 210,00 m
Volume máximo do reservatório - 1,84 hm³
Vazão de projeto - 431,00 m³/s
Potência instalada - 16,20 MW

Mapa de Tempo de Chegada da Onda - Barragem F

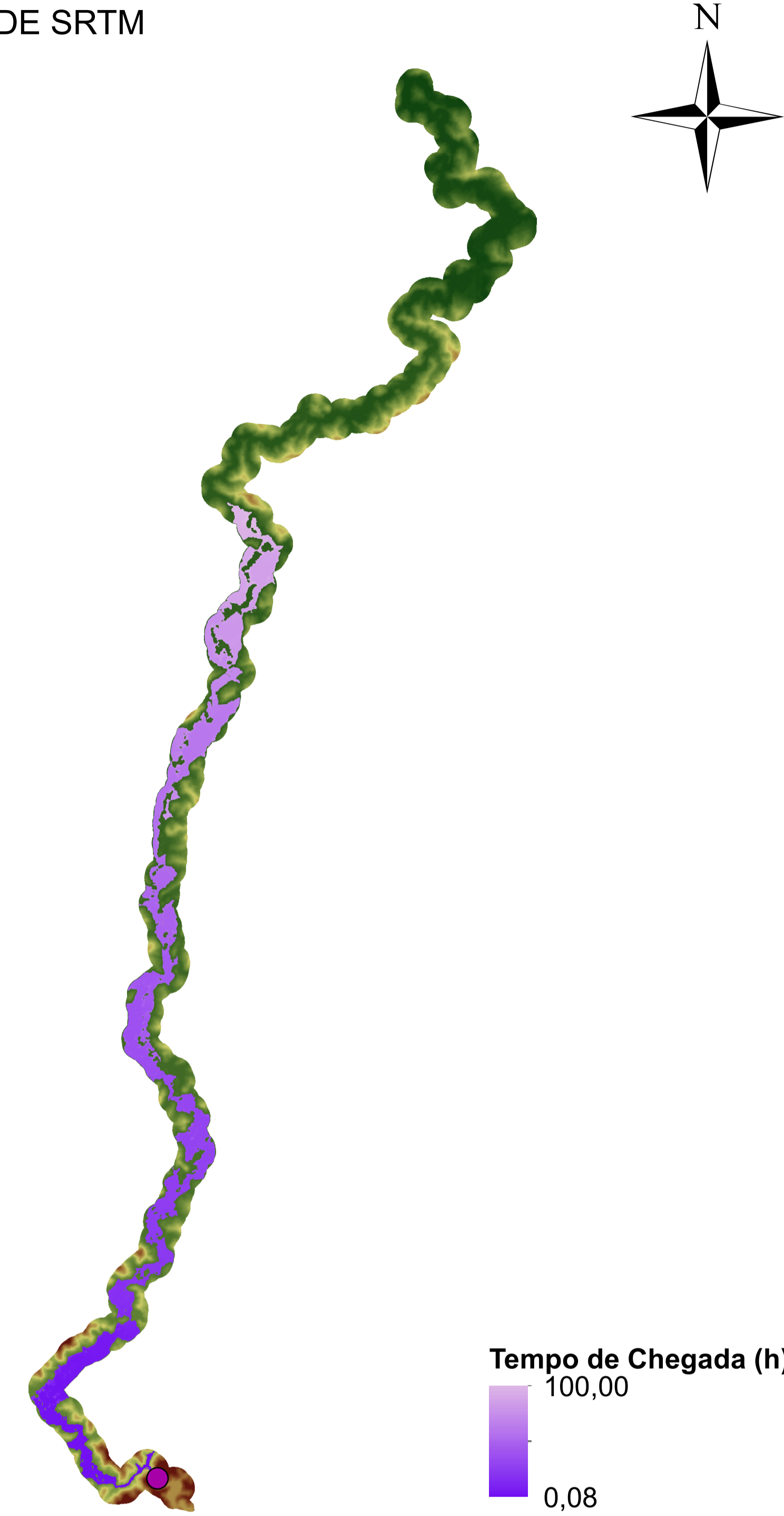
Modelagem MDE ALOS



Modelagem MDE LiDAR

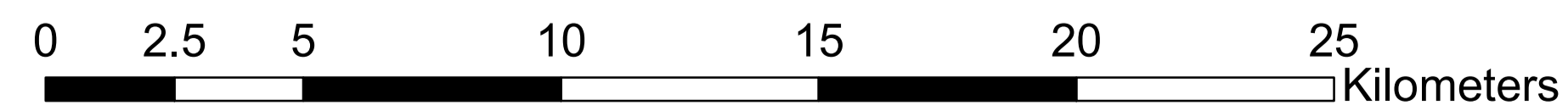


Modelagem MDE SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 23S

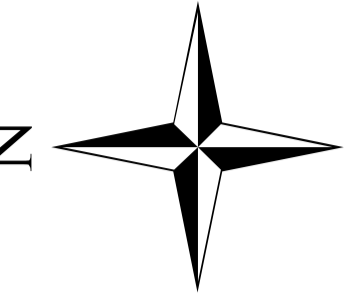
Escala:



Dano Potencial - Alto
Altura da barragem - 5,00 m
Comprimento - 25,00 m
Volume máximo do reservatório - 0,13 hm³
Vazão de projeto - 158,00 m³/s
Potência instalada - 3,80 MW

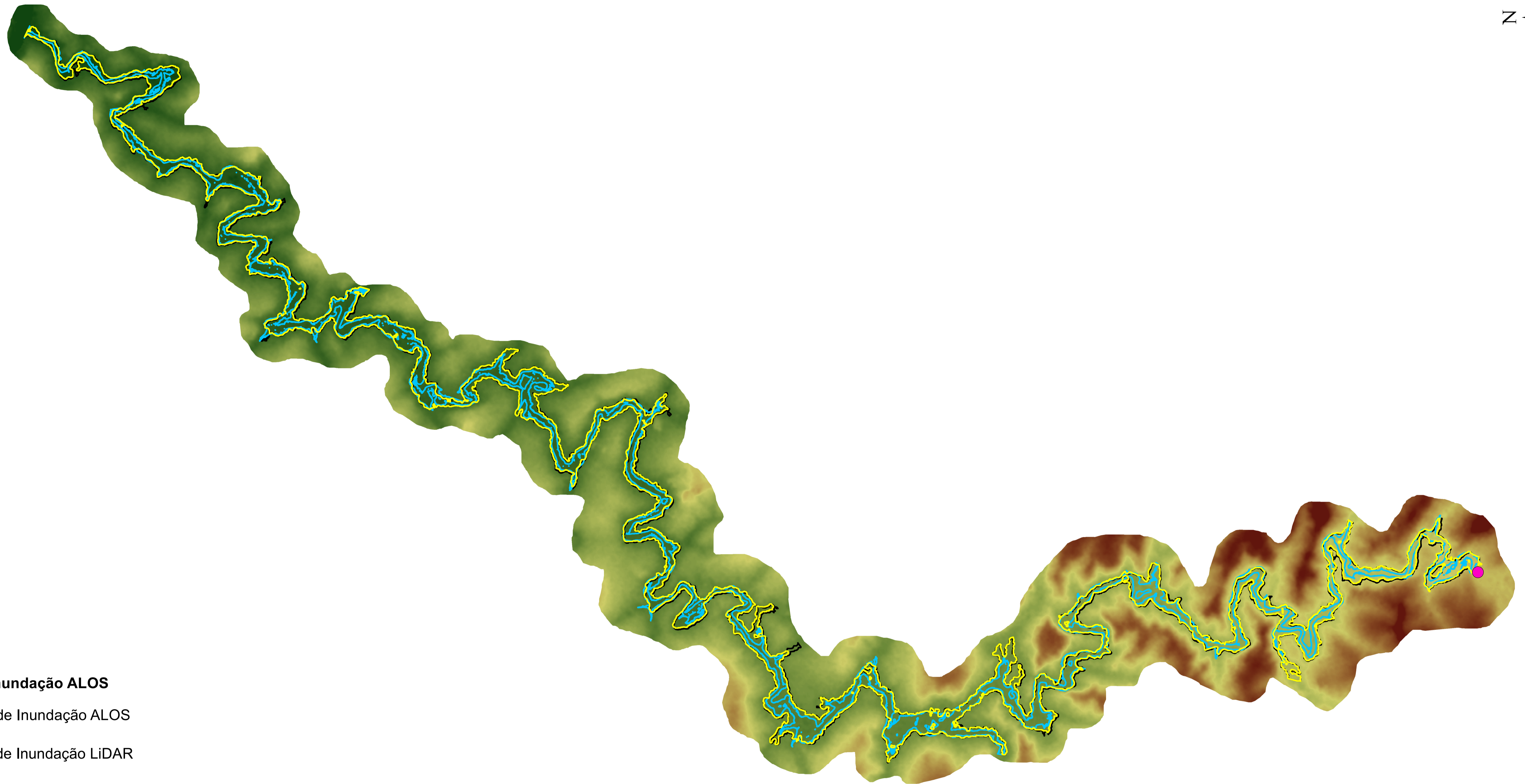
APÊNDICE F – Mapas de área de inundação das modelagens

Mapa de Área de Inundação - Barragem A



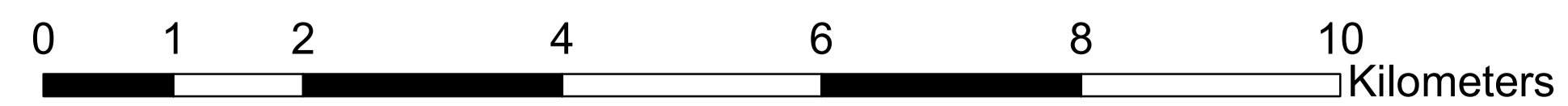
Área de Inundação ALOS

- Área de Inundação ALOS
- Área de Inundação LiDAR
- Área de Inundação SRTM



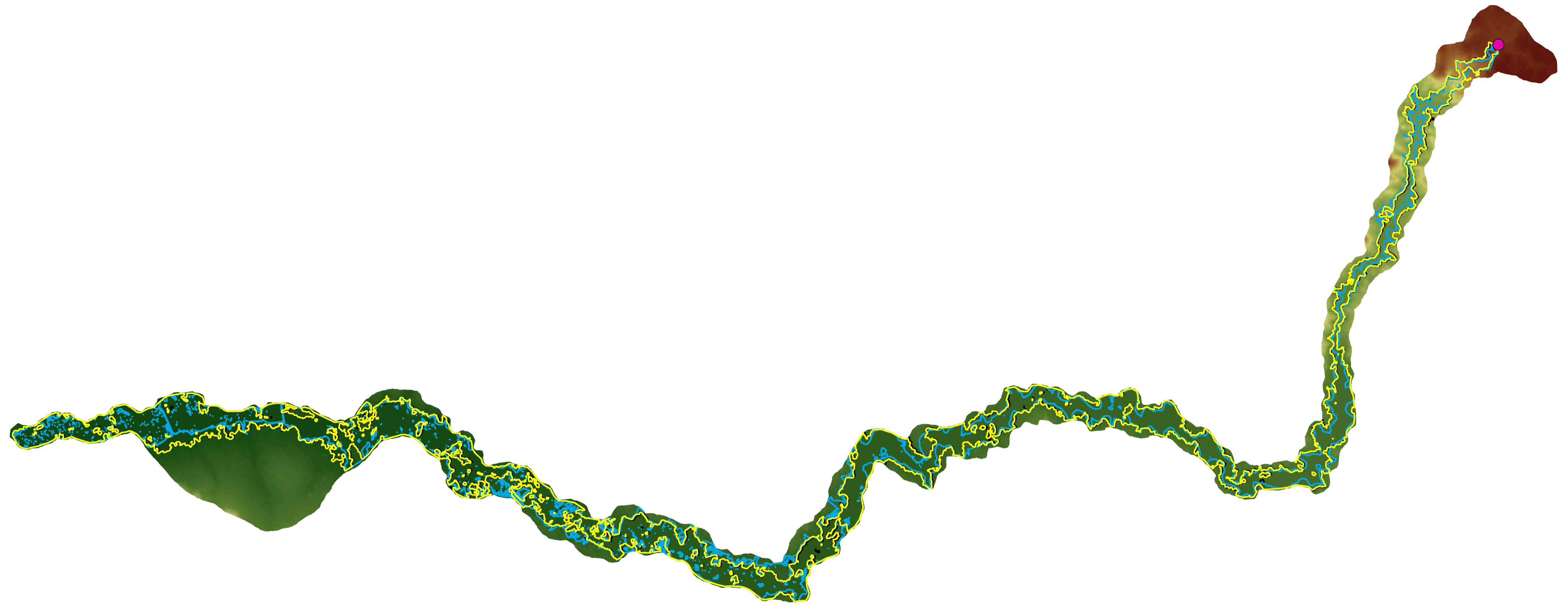
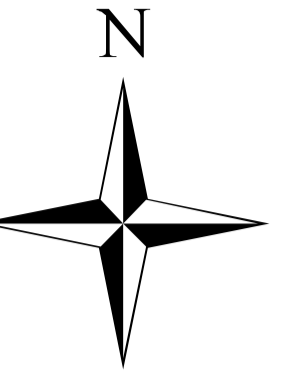
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S




Escala:



Dano Potencial - Baixo
Altura da barragem - 8,00 m
Comprimento - 68,00 m
Volume máximo do reservatório - 0,74 hm³
Vazão de projeto - 350,00 m³/s
Potência instalada - 2,56 MW

Mapa de Área de Inundação - Barragem B

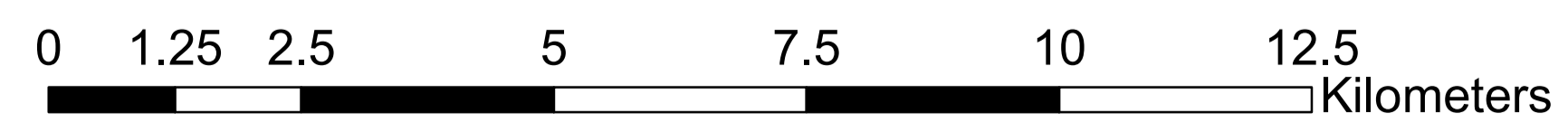


-  Área de Inundação ALOS
-  Área de Inundação LiDAR
-  Área de Inundação SRTM



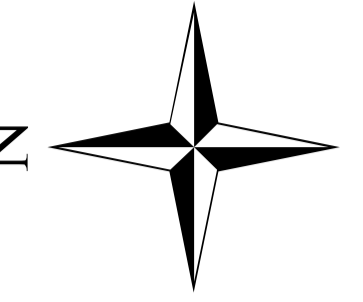
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 21S

Escala:



Dano Potencial - Baixo
Altura da barragem - 14,20 m
Comprimento - 1012,00 m
Volume máximo do reservatório - 22,63 hm³
Vazão de projeto - 530,00 m³/s
Potência instalada - 120,00 MW

Mapa de Área de Inundação - Barragem C

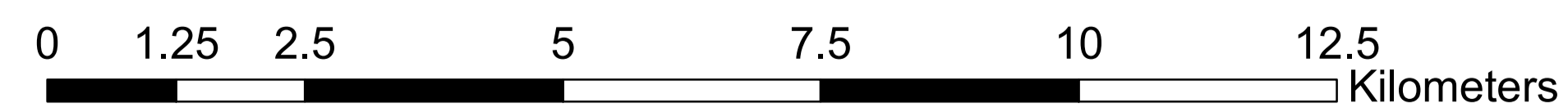


- Área de Inundação ALOS
- Área de Inundação LiDAR
- Área de Inundação SRTM



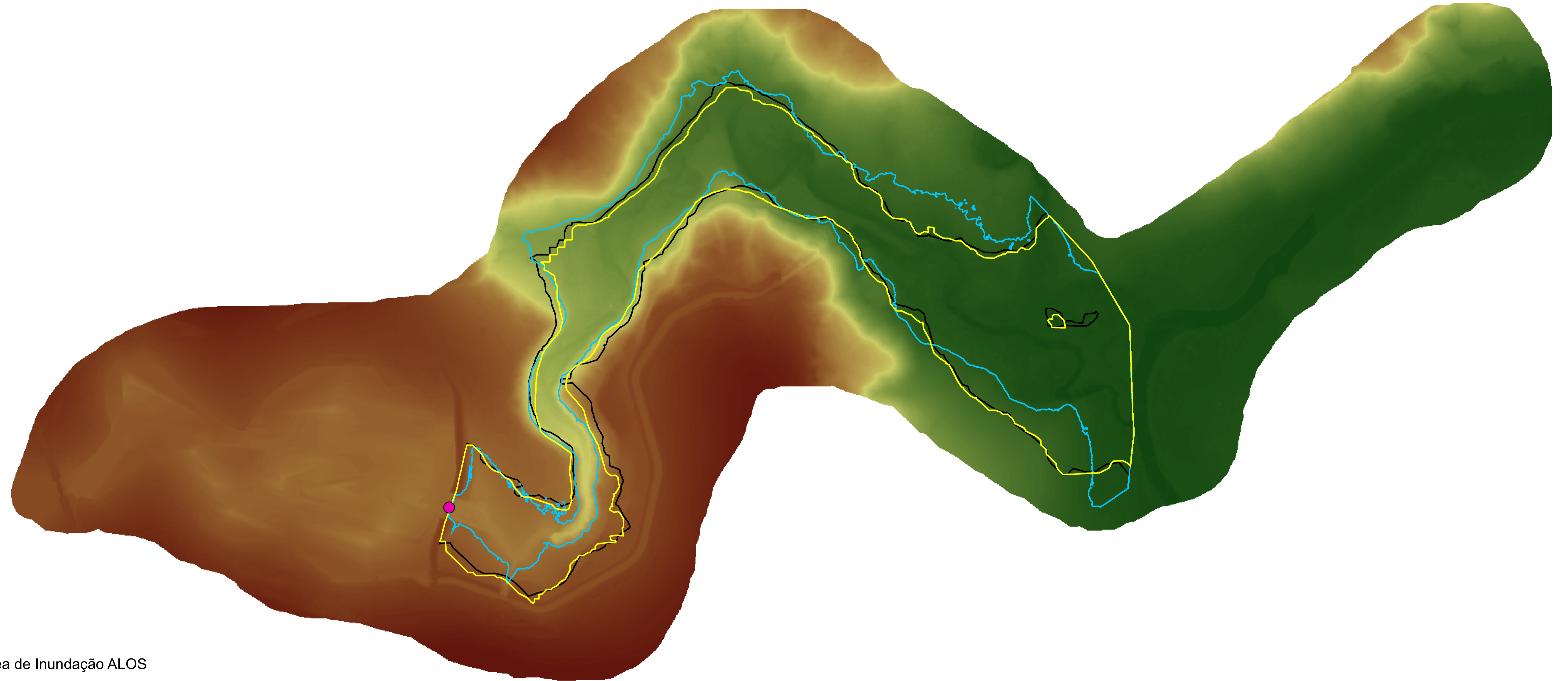
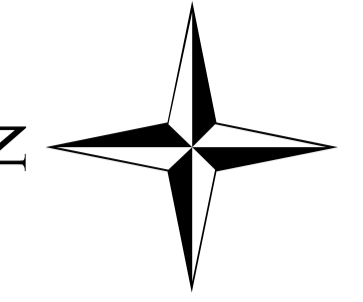
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Médio
Altura da barragem - 10,00 m
Comprimento - 356,00 m
Volume máximo do reservatório - 6,35 hm³
Vazão de projeto - 482,50 m³/s
Potência instalada - 15,10 MW

Mapa de Área de Inundação - Barragem D

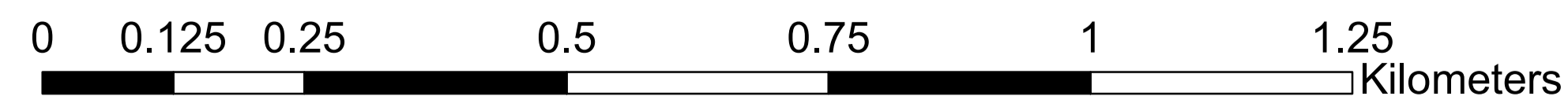


- Área de Inundação ALOS
- Área de Inundação LiDAR
- Área de Inundação SRTM



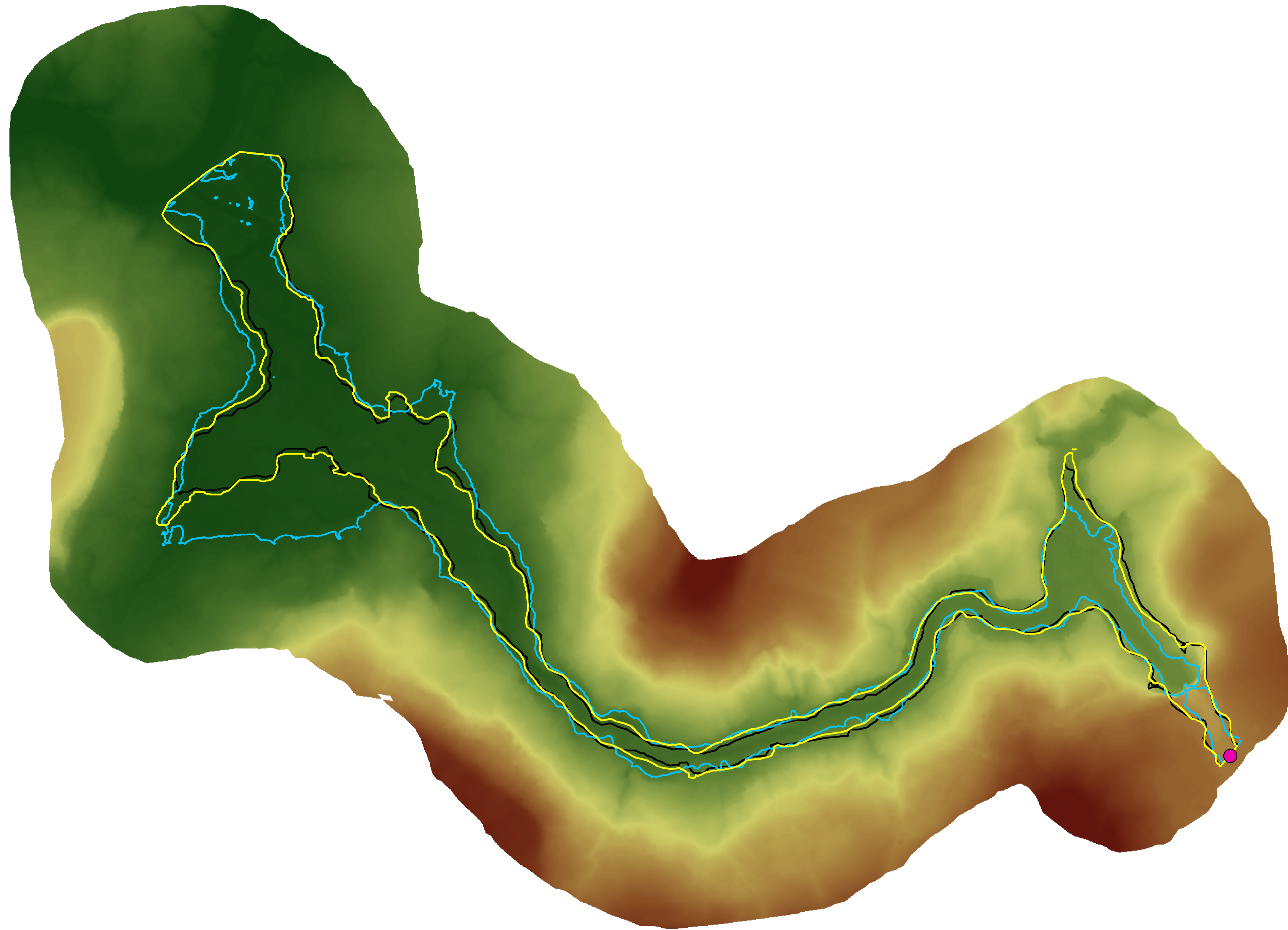
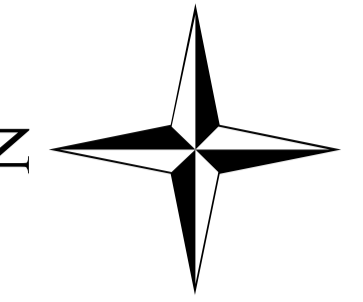
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

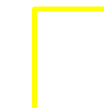


Escala:



Dano Potencial - Médio
Altura da barragem - 12,00 m
Comprimento - 630,00 m
Volume máximo do reservatório - 8,77 hm³
Vazão de projeto - 340,00 m³/s
Potência instalada - 21,60 MW

Mapa de Área de Inundação - Barragem E

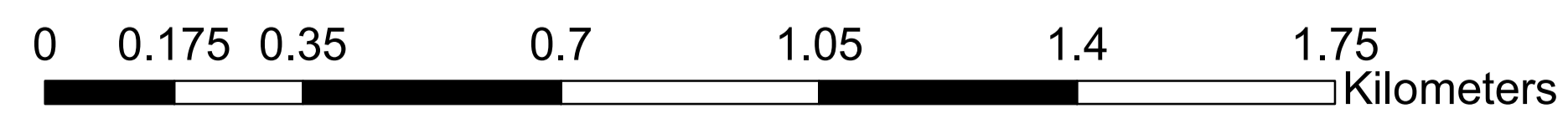


-  Área de Inundação ALOS
-  Área de Inundação LiDAR
-  Área de Inundação SRTM



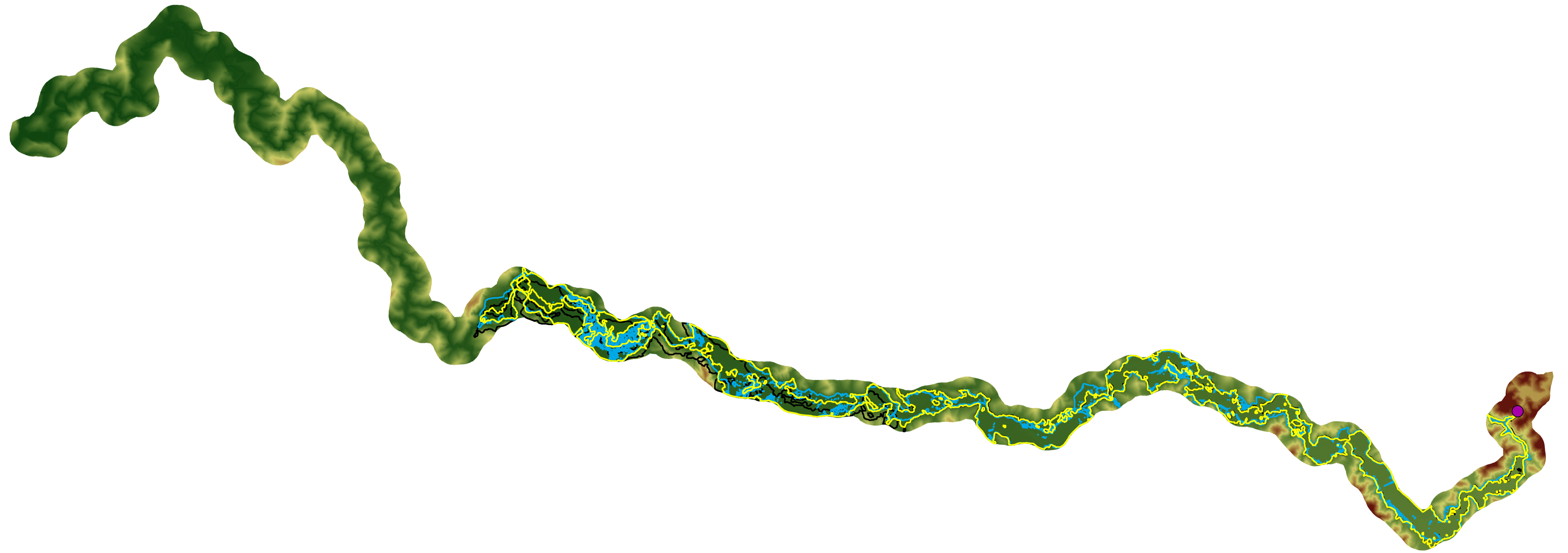
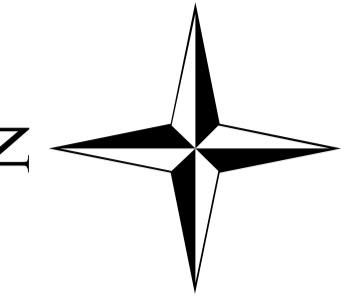
Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 22S

Escala:



Dano Potencial - Alto
Altura da barragem - 10,40 m
Comprimento - 210,00 m
Volume máximo do reservatório - 1,84 hm³
Vazão de projeto - 431,00 m³/s
Potência instalada - 16,20 MW

Mapa de Área de Inundação - Barragem F

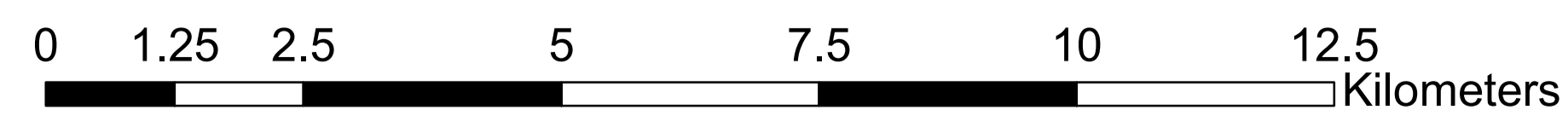


- Área de Inundação ALOS
- Área de Inundação LiDAR
- Área de Inundação SRTM



Datum: SIRGAS 2000 UTM Zona 23S

Escala:



Dano Potencial - Alto
Altura da barragem - 5,00 m
Comprimento - 25,00 m
Volume máximo do reservatório - 0,13 hm³
Vazão de projeto - 158,00 m³/s
Potência instalada - 3,80 MW