



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**
– DOUTORADO –

**MODELO DIGITAL DO TERRENO LIDAR PARA
CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA E DE REDES DE
DRENAGEM**

Por

Rafael Lopes Mendonça

João Pessoa – Paraíba

Dezembro de 2022



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– DOUTORADO –

**MODELO DIGITAL DO TERRENO LIDAR PARA
CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA E DE REDES DE
DRENAGEM**

Rafael Lopes Mendonça

Orientador: Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz

João Pessoa – Paraíba

Dezembro de 2022

M539m Mendonça, Rafael Lopes.

Modelo digital do terreno LiDAR para caracterização topográfica e de redes de drenagem / Rafael Lopes Mendonça. - João Pessoa, 2022.

195 f. : il.

Orientação: Adriano Rolim da Paz.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Topografia e drenagem. 2. Rede de drenagem - Extração. 3. LiDAR. 4. Resolução espacial - Efeito, I. Paz, Adriano Rolim da Paz. II. Título.

UFPB/BC

CDU 528.4+696.12(043)



**MODELO DIGITAL DO TERRENO LIDAR PARA CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA E
DE REDES DE DRENAGEM**

RAFAEL LOPES MENDONÇA

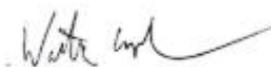
**Tese aprovada em 15 de dezembro de 2022.
Período Letivo: 2022.2**


**Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz – UFPB
Orientador**


**Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida – UFPB
Examinador Interno**


**Prof. Dr. Gerald Nobert Souza – UFPB
Examinador Interno**


**Prof. Dr. José Almir Cirilo – UFPE
Examinador Externo**


**Prof. Dr. Walter Collischonn – UFRGS
Examinador Externo**

**João Pessoa/PB
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta importante etapa da minha vida acadêmica. À minha família, aos meus pais que sempre me incentivaram a estudar e enxergar a realização profissional através dos estudos. Aos meus irmãos pelos exemplos de pessoas e profissionais, cada um na sua maneira e em áreas distintas do conhecimento. À minha esposa que sempre me incentivou, não me deixou desacreditar da minha capacidade. Também pela paciência e compreensão comigo durante todo esse período, além do suporte emocional e na rotina, que fez com que eu pudesse focar nas atividades exigidas pelo doutorado e pelo meu trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz, que durante todo esse período esteve presente, de forma acessível, com entusiasmo e participativo no desenvolvimento de cada etapa. Além disso, não só se preocupou com as questões acadêmica. A preocupação dele com a saúde física e mental dos seus alunos é uma das suas qualidades e foi essencial para a conclusão desta tese.

À CAPES e a FAPESQPB pela bolsa de doutorado que me foi concedida por parte do período do desenvolvimento da tese. Ao CNPq pelos recursos do projeto universal, utilizados para adquirir a *workstation*, utilizada nesta tese. À COMPESA pelos dados do PE3D. Ao setor de informática do Centro de Tecnologia da UFPB, chefiado por Jessé Miranda de Figueiredo, que me forneceu suporte e equipamentos essenciais para o desenvolvimentos das atividades desta tese. Ao LACMA pelos equipamentos cedidos e ao LARHENA pela estrutura, mobiliário e suporte durante boa parte do tempo das pesquisa. À todos os amigos técnicos administrativos e terceirizados do Centro de Tecnologia que me fizeram companhia e me ajudaram de alguma forma durante o período de convívio na UFPB.

Aos alunos do grupo de pesquisa, representados pela aluna Natália Maria Mendes Silva que me ajudou no processamento de parte dos dados.

Aos membros da banca, pelas contribuições e sugestões a tese: Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida – UFPB, Prof. Dr. Gerald Nobert Souza da Silva – UFPB, Prof. Dr. José Almir Cirilo – UFPE e Prof. Dr. Walter Collischonn – UFRGS.

Os meus sinceros agradecimentos a todos.

RESUMO

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma importante fonte de dados para diversas áreas, tais como ecologia, hidrologia, arqueologia e energia renováveis. Em especial para hidrologia, através do processamento desse dado é possível obter a rede de drenagem, delimitação da bacia hidrográfica, caracterização topográfica, perfis longitudinais e transversais, por exemplo. Com o avanço dos sistemas de aquisição desses dados, dentre eles o *Light Detection and Ranging* (LiDAR), modelos com resoluções espaciais cada vez mais detalhadas têm sido disponibilizados.

O aumento da resolução espacial impacta no aumento do custo de armazenamento e no custo de processamento, por dificultar ou impossibilitar a utilização de algoritmos convencionais de extração automática de rede de drenagem. Por essas razões, faz-se necessária a adaptação dos algoritmos para que sejam capazes de lidar com grande quantidade de dados. Outra medida de contorno consiste na degradação da resolução espacial, que pode ser feita através da reamostragem ou através do *upscaling* de direções de fluxo, por exemplo. Tais fatores justificam a análise do impacto do uso de dados de alta resolução espacial proveniente de LiDAR, frente a dados com resoluções espaciais degradadas, na extração automática de rede de drenagem. Além do impacto dos métodos utilizados na extração da rede de drenagem e na degradação do MDE, reamostragem e *upscaling*.

Nesta pesquisa foram utilizados os dados MDT LiDAR 1 m, esse dado reamostrado para 2, 5, 10 e 30 m, o *upscaling* de direções de fluxo do dado original de 1 m para 30 m, e o MDE SRTM, por se tratar de um dado bastante utilizado na literatura. O SRTM apresenta resultados inferiores quando comparado a todos os processamentos realizados utilizando o MDT LiDAR. Além disso, o SRTM apresenta falhas na extração de drenagem significativa. Os resultados também revelam que os dados reamostrados são inferiores ao do *upscaling* de direções de fluxo, tendo como referência a rede de drenagem obtida através do processamento do dado MDT LiDAR 1 m.

PALAVRAS-CHAVE: Topografia e Drenagem, Extração de Rede de Drenagem, LiDAR, Efeito da Resolução Espacial.

ABSTRACT

The Digital Elevation Model (DEM) is an important data source for several areas, such as ecology, hydrology, archeology and renewable energy. Especially for hydrology, by processing this data it is possible to obtain the drainage network, watershed delimitation, topographic characterization, longitudinal and transversal profiles, for example. With the advancement of data acquisition systems, including Light Detection and Ranging (LiDAR), models with increasingly detailed spatial resolutions have become available.

The increase in spatial resolution has an impact on the increase in storage and processing costs, as it makes it difficult or impossible to use conventional algorithms for automatic drainage network extraction. For these reasons, it is necessary to adapt the algorithms to be able to handle large amounts of data. Another contour measure consists of the degradation of the spatial resolution, which can be done through resampling or through the upscaling of flow directions, for example. Such factors justify the analysis of the impact of using high spatial resolution data from LiDAR, compared to data with degraded spatial resolutions, in the automatic extraction of the drainage network. In addition to the impact of the methods used in the extraction of the drainage network and in the degradation of the DEM, resampling and upscaling.

In this research, the 1 m DTM LiDAR data were used, this data resampled to 2, 5, 10 and 30 m, the upscaling of flow directions from the original data from 1 m to 30 m, and the DEM SRTM, as it is a data widely used in the literature. The SRTM presents inferior results when compared to all the processing performed using the DTM LiDAR. Furthermore, the SRTM can present a significant failure to extract drainage.. The results also reveal that the resampled data are inferior to the upscaling of flow directions, having as reference the drainage network obtained through processing the 1 m DTM LiDAR data.

KEYWORDS: Topography and Drainage, Channel network extraction, LiDAR, Effect of spatial resolution.

SUMÁRIO

RESUMO	
ABSTRACT	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
1 INTRODUÇÃO	3
1.1 JUSTIFICATIVA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	3
1.2 OBJETIVOS	9
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO	11
2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO – MDE	11
2.1.1 Fundamentos	11
2.1.2 Aquisição de dados via LiDAR	13
2.1.2.1 Conceitos	13
2.1.2.2 Componentes	15
2.1.2.3 Classificação e tipos de sensores	16
2.1.2.4 Obtenção de MDS e MDT	18
2.1.2.5 Precisão	19
2.1.3 Fontes de dados globais	20
2.1.4 Aplicações de MDE	22
2.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DO MDE	24
2.2.1 Filtragem de dados inválidos	25
2.2.2 Remoção das depressões	25
2.2.2.1 Aspectos gerais	26
2.2.2.2 Abordagem de Marks et al. (1984) e O’Callaghan e Mark (1984)	28
2.2.2.3 Abordagem de Jenson e Domingue (1988)	30
2.2.2.4 Abordagem de Planchon e Darboux (2001)	32
2.2.2.5 Aplicações de dados LiDAR	33
2.2.2.6 Tratamento de área planas	34
2.3 PROCESSAMENTO DO MDE	37
2.3.1 Direções de fluxo	38
2.3.2 Área acumulada de drenagem	41
2.3.3 Rede de drenagem	42
2.3.4 Comprimento da rede de drenagem	43
2.4 ALGORITMOS DE ALTO DESEMPENHO PARA PROCESSAMENTO DO MDE	44
2.4.1 Limitações dos algoritmos convencionais	44
2.4.2 Perspectivas dos algoritmos de alto desempenho	45
2.4.3 Algoritmos de alto desempenho para remoção de depressões	46
2.4.4 Algoritmos de alto desempenho para cálculo de área acumulada de drenagem	49
2.5 DERIVAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM EM RESOLUÇÃO ESPACIAL MENOR QUE A ORIGINAL	52
2.5.1 Reamostragem espacial	52
2.5.2 Upscaling de direções de fluxo	53
2.6 ANÁLISES DE PRODUTOS DERIVADOS DO MDE	57
2.6.1 Efeito de escala nos dados de MDE de alta resolução espacial	57
2.6.2 Efeito de escala devido à reamostragem do MDE	58

	2.6.3	<i>Efeito de escala via upscaling de direções de fluxo</i>	59
dados	2.6.4	<i>Efeito de escala a partir de dados globais e influência da fonte de</i> <i>60</i>	
	2.6.5	<i>Inspeção visual</i>	61
	2.6.6	<i>Percentual dentro do buffer</i>	62
3	MATERIAL E MÉTODOS	64	
	3.1	ÁREA DE ESTUDO	64
	3.1.1	<i>Localização da área de estudo</i>	64
	3.1.2	<i>Caracterização da bacia hidrográfica do Rio Sirinhaém</i>	67
	3.1.3	<i>Caracterização da bacia hidrográfica do Rio das Garças</i>	68
	3.2	VISÃO GERAL DA METODOLOGIA	73
	3.3	RECURSOS COMPUTACIONAIS DISPONÍVEIS	75
	3.4	COLETA DE DADOS LiDAR	76
	3.4.1	<i>MDT LiDAR – PE3D</i>	76
	3.4.2	<i>Identificação das cenas e coleta dos dados do PE3D</i>	77
	3.4.3	<i>Concatenação dos arquivos MDT LiDAR</i>	79
	3.4.4	<i>Filtragem dos pixels sem valores do MDT LiDAR</i>	81
	3.5	ETAPA DE PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS MDT LiDAR	82
	3.5.1	<i>Seleção de algoritmos de remoção de depressões</i>	82
	3.5.2	<i>Reamostragem do MDT</i>	85
	3.5.3	<i>Remoção das depressões</i>	85
	3.6	PROCESSAMENTO DOS DADOS MDT LiDAR	86
	3.6.1	<i>Determinação das direções de fluxo</i>	86
	3.6.2	<i>Seleção de algoritmos de cálculo de áreas acumuladas de drenagem</i>	87
	3.6.3	<i>Cálculo das áreas acumuladas de drenagem</i>	88
quantidade de dados	3.6.4	<i>Adaptação do algoritmo de upscaling de direções de fluxo para grande</i> <i>quantidade de dados</i>	89
	3.6.5	<i>Aplicação do upscaling de direções de fluxo</i>	90
	3.6.6	<i>Obtenção da rede de drenagem derivada do MDT LiDAR</i>	91
	3.7	COLETA E PROCESSAMENTO DO MDE SRTM	91
	3.7.1	<i>Aquisição dos dados SRTM, mosaico e recorte</i>	91
	3.7.2	<i>Filtragem do MDE SRTM</i>	92
	3.7.3	<i>Remoção das depressões do MDE SRTM</i>	92
	3.7.4	<i>Cálculo das áreas acumuladas de drenagem a partir do MDE SRTM</i>	92
	3.7.5	<i>Obtenção da rede de drenagem derivada do MDE SRTM</i>	93
	3.8	AQUISIÇÃO DA REDE DE DRENAGEM DE REFERÊNCIA	93
	3.8.1	<i>Definição dos trechos de rio</i>	93
	3.8.2	<i>Identificação e coleta das ortofotos</i>	94
	3.8.3	<i>Digitalização dos trechos de rio</i>	94
	3.9	ANÁLISE DE RESULTADOS	96
	3.9.1	<i>Análise topográfica</i>	96
	3.9.2	<i>Análise de custo computacional para extração de redes de drenagem</i> <i>97</i>	
	3.9.3	<i>Formas de análise da qualidade das redes de drenagem</i>	99
drenagem	3.9.4	<i>Influência dos algoritmos na qualidade da extração de redes de</i> <i>101</i>	
	3.9.5	<i>Qualidade da rede de drenagem derivada de dados LiDAR e efeito de</i> <i>escala</i> <i>102</i>	
	3.9.6	<i>Análise de upscaling de direções de fluxo a partir de dados LiDAR</i>	103

3.10	SÍNTESE DOS PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DA REDE DE DRENAGEM	103
------	---	-----

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	105
4.1	ANÁLISE TOPOGRÁFICA	105
4.1.1	<i>Perfis topográficos transversais</i>	105
4.1.2	<i>Raster das diferenças</i>	107
4.1.3	<i>Curva hipsométrica</i>	108
4.2	ANÁLISE DE CUSTO COMPUTACIONAL PARA EXTRAÇÃO DE REDES DE DRENAGEM	109
4.2.1	<i>Armazenamento de dados</i>	109
4.2.2	<i>Tempo de processamento do MDT para remoção de depressões</i>	112
4.2.3	<i>Tempo de processamento das áreas acumuladas de drenagem</i>	117
4.2.4	<i>Eficiência computacional no procedimento do upscaling de direções de fluxo</i>	124
4.3	INFLUÊNCIA DOS ALGORITMOS DE REMOÇÃO DE DEPRESSÕES E ATRIBUIÇÃO DE DIREÇÕES DE FLUXO SOBRE A QUALIDADE DA REDE DE DRENAGEM	125
4.3.1	<i>Inspeção visual do traçado das redes de drenagem</i>	126
4.3.2	<i>Percentual dentro do buffer</i>	130
4.3.3	<i>Comprimentos de rio</i>	131
4.4	ANÁLISE DE QUALIDADE DA REDE DE DRENAGEM DERIVADA DO MDT LIDAR E EFEITO DE ESCALA	133
4.4.1	<i>Inspeção visual do traçado das redes de drenagem</i>	134
4.4.2	<i>Percentual dentro do buffer</i>	139
4.4.3	<i>Comprimentos de rio</i>	143
4.4.4	<i>Áreas acumuladas de drenagem</i>	146
4.5	ANÁLISE DO UPSCALING DE DIREÇÕES DE FLUXO A PARTIR DO MDT LIDAR	148
4.5.1	<i>Análise tendo como referência a rede digitalizada</i>	148
4.5.1.1	<i>Percentual dentro do buffer</i>	148
4.5.1.2	<i>Comprimentos de rio</i>	152
4.5.2	<i>Análise tendo como referência a rede derivada do MDT LiDAR 1 m</i>	154
4.5.2.1	<i>Percentual dentro do buffer</i>	154
4.5.2.2	<i>Comprimentos de rio</i>	158
4.5.2.3	<i>Áreas de drenagem</i>	159
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	161
5.1	CONCLUSÕES	161
5.2	RECOMENDAÇÕES	163
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – (a) e (b) MDE representação tridimensional, coordenadas planialtimétricas, da superfície. Fonte Figura 1-a: (TARBOTON, 2003). 11
- Figura 2 – MDE e visualização dos pixels deste. Cada pixel representa o valor médio de elevação da área abrangida por ele. 12
- Figura 3 – Diferenças dos elementos representados no MDS e MDT. Fonte: <https://3dmetrica.it/dtm-dsm-dem/> 13
- Figura 4 – Perfil transversal da nuvem de pontos LiDAR classificada de acordo com os objetos interceptados. Fonte: adaptado de (DONG; CHEN, 2018)..... 14
- Figura 5 – Equipamentos do sistema sensor LiDAR e alguns dos seus parâmetros. Fonte: adaptada de <http://LIDAR.ihrf.fiu.edu/>..... 16
- Figura 6 - Interceptação de objetos e respectivos retornos do pulso laser. Fonte: <https://gisgeography.com/lidar-light-detection-and-ranging/>..... 18
- Figura 7 – Representação das abordagens de remoção de depressões: preencher e rebaixar. (a) Perfil longitudinal de uma região com duas depressões aninhadas, dentro de uma maior. Ponto mais a montante é o ponto A e ponto mais a jusante o ponto H; (b) Preenchimento das depressões; e (c) Rebaixamento das regiões a jusante das depressões..... 27
- Figura 8 – Representação do método de preenchimento de depressões, proposto por Marks et al. (1984) e O'Callaghan e Mark (1984). (i) Perfil longitudinal de uma região com duas depressões aninhadas, dentro de uma maior. Ponto mais a montante é o ponto A e ponto mais a jusante o ponto H; (ii) Duas pequenas depressões são preenchidas na primeira iteração; (iii) A depressão maior, com fundo plano, é preenchida na segunda iteração; e (iv) Perfil longitudinal final, sem depressões. Fonte: adaptado de (WANG; LIU, 2006). 29
- Figura 9 – Representação do método de preenchimento de depressões, proposto por Jenson e Domingue (1988). (a) Perfil longitudinal de uma região com duas depressões aninhadas, dentro de uma maior. Ponto mais a montante é o ponto A e ponto mais a jusante o ponto H; (b) Identificação das depressões, divididas em sub-bacias com suas respectivas áreas de contribuição de drenagem e pontos de escoamento para a sub-bacia adjacente (ponto D); (c) As duas sub-bacias 1 e 2 são mescladas e o ponto de escoamento em comum, ponto D, é suprimido. Os pixels da área de contribuição da depressão maior, formada pela união das depressões menores, que tiverem valor de

altitude menor que o ponto de escoamento F, são elevados para o valor de altitude desse ponto; e (d) Perfil longitudinal final, sem depressões. Fonte: adaptado de (WANG; LIU, 2006).	31
Figura 10 – (a) rede de drenagem derivada do algoritmo original proposto por Jenson e Domingue (1988) com vetores paralelos que não correspondem com a realidade. (b) rede de drenagem derivada pelo método proposto por Fairfield e Leymarie (1991) minimizando o problema de drenagens paralelas com o uso de um fator aleatório no algoritmo proposto por Jenson e Domingue (1988). Fonte: Paz e Collischonn, 2008.	37
Figura 11 – Codificação de direção de fluxo através do método D8 proposto por Marks <i>et al.</i> (1984) e O'Callaghan e Mark (1984). (a) codificação utilizada pelo método; (b) exemplo de uma matriz numérica com dados de elevação; (c) direções de fluxo de acordo com o método simples; (d) raster obtido através da aplicação do D8.	40
Figura 12 – Valores de codificação para o raster de direções de fluxo obtido por diferentes métodos que se baseiam no método D8. (a) codificação do método D8 (JENSON; DOMINGUE, 1988); (b) codificação do método implementado no <i>software</i> TerrSet (CLARCK LABS, 2020); (c) codificação do método implementado no RichDEM (BARNES, 2017); (d) codificação do método implementado no <i>software</i> ArcGis (ESRI, 2020); (e) codificação do método implementado no <i>software</i> SAGA Gis (SAGA GIS, 2020).	41
Figura 13 – a) Reamostragem dos pixels de MDE de alta resolução espacial para obtenção de MDE de baixa resolução e demais produtos para aquisição de rede de drenagem; b) <i>upscaling</i> de direções de fluxo de dados de alta resolução espacial para obtenção de direções de fluxo de baixa resolução espacial e demais produtos para extração automática de rede de drenagem. Fonte: Collischonn & Tucci (2005).	52
Figura 14 – Comparativo de delimitações da bacia do Rio São Francisco na resolução espacial de 50 km, considerando abordagem de reamostragem do MDE (amarelo) e via <i>upscaling</i> de direções de fluxo com algoritmo COTAT+ (verde). Fonte: adaptado de Saraiva e Paz (2014).	53
Figura 15 – Identificação dos pixels potenciais (b) de saída da célula (a), do método COTAT+. Fonte: adaptado de (PAZ; COLLISCHONN; LOPES DA SILVEIRA, 2006).	56
Figura 16 - Procedimento para atribuir a direção do fluxo das células (a) de acordo com o caminho do fluxo traçado a partir de seu pixel de saída, do método COTAT+. A diferença entre as atribuições de direções de fluxo (b) e (c) se deve ao limiar de área	

acumulada de drenagem mínima atribuída pelo usuário. Fonte: adaptado de (PAZ; COLLISCHONN; LOPES DA SILVEIRA, 2006).	56
Figura 17 – Regiões fisiográficas do estado de Pernambuco. Fonte: adaptado de (APAC, 2013).	65
Figura 18 – Caracterização do relevo do estado do Pernambuco. Fonte: adaptado de TOPODATA/INPE/UFPE.	66
Figura 19 - Unidades de planejamento hídrico do estado de Pernambuco. Fonte: adaptado de (SILVA; LIMA MONTENEGRO; SOUZA, 2017).	67
Figura 20 – Classificação de uso e ocupação do solo para a bacia do Rio Sirinhaém. Dados de uso e ocupação do solo do MapBiomas, dados de 2021.	69
Figura 21 - Bacia Hidrográfica do Rio Sirinhaém. Fonte: https://www.apac.pe.gov.br/171-bacias-hidrograficas-rio-sirinhaem/205-bacia-do-rio-sirinhaem	70
Figura 22 – Classificação de uso e ocupação do solo para a bacia do Rio das Garças. Dados de uso e ocupação do solo do MapBiomas, dados de 2021.	71
Figura 23 - Bacia Hidrográfica do Rio das Garças. Fonte: http://200.238.107.184/bacias-hidrograficas/40-bacias-hidrograficas/210-bacia-riacho-das-garcas	72
Figura 24 - Localização da Bacia do Rio das Garças (a) e da Bacia do Rio Sirinhaém (b) – PE, e seus respectivos Modelos Digitais do Terreno - MDT LiDAR.	73
Figura 25 - Fluxograma da metodologia.	74
Figura 26 – Índice de nomenclatura da carta internacional do mundo ao milionésimo, o qual serve de base para a nomenclatura das folhas do mapeamento do PE3D. A folha representada através das indicações das setas é a: SB-24-Y-C-IV-3-SO. Sendo S de Sul, e B referente à faixa de latitude da folha. Fonte: adaptado de (MENEZES & FERNANDES, 2013).	77
Figura 27 – Mapa índice do levantamento de dados espaciais PE3D. Exemplo da obtenção das folhas de uma área de interesse. Utilizando a interseção do polígono que delimita a área e ao mapa índice. A tabela de atributos do resultado dessa operação apresenta o índice de nomenclatura de cada folha.	78
Figura 28 – Casos de agrupamento de dados raster. (a) MDTs adjacentes lateralmente; (b) agrupamento de dois MDTs adjacentes lateralmente e com sobreposição de colunas; (c) MDTs adjacentes diagonalmente; agrupamento de dois MDTs adjacentes diagonalmente e com sobreposição de linhas e colunas.	80
Figura 29 – Representação do pixel do MDE de mais alta resolução espacial, da célula do MDE de mais baixa resolução e da grade 3 x 3 de células.	89

Figura 30 - Redes de referências digitalizadas para cada uma das bacias de estudo.	95
Figura 31 – Digitalização de trecho da drenagem do Rio das Garças, utilizando ortofotos do PE3D, com resolução espacial de 50 cm: A) Ortofoto; B) Ortofoto com rede digitalizada sobreposta.	95
Figura 32 – <i>Percentual dentro do buffer</i> de uma rede de drenagem com comprimento igual a L' e uma rede de referência com comprimento igual a L. Fonte: adaptado de Chen et al., (2012).	100
Figura 33 - Perfis topográficos ao longo de duas regiões da área de estudo, com características distintas, para a análise dos dados de elevação extraídos do MDT e MDS LiDAR e do MDS SRTM.	106
Figura 34 – (a) Área selecionada para análise do raster das diferenças entre MDS LiDAR 1 m e MDT LiDAR 1 m (b), e entre SRTM e MDT LiDAR 1 m (c); (d) e (e) Histogramas de frequência dos rasters das diferenças.	107
Figura 35 - (a) Exemplo de remoção de edifícios do MDS para o MDT em dados LiDAR para parte do município de Santa Maria na região sudeste da bacia do rio Garças; (b) Exemplo de remoção de ponte e árvore do MDS para o MDT.	108
Figura 36 - (a) Curvas hipsométricas da bacia do Rio das Garças derivadas do MDT LiDAR de diferentes resoluções espaciais e do SRTM; b) Diferenças das curvas hipsométricas em relação à derivada do MDT LiDAR 1 m.	109
Figura 37 - Espaço em disco necessário para armazenar MDT e produtos derivados relacionados à extração da rede de drenagem, raster com e sem depressões, de direções de fluxo, áreas acumuladas de drenagem e da rede de drenagem, considerando diferentes resoluções espaciais: (a) bacia do Rio Sirinhaém; (b) bacia do Rio das Garças.	112
Figura 38 - Tempo de processamento dos algoritmos de remoções de depressões (a) para a bacia do Rio Sirinhaém e (b) do Rio das Garças, usando as duas infraestruturas computacionais <i>desktop</i> e <i>workstation</i>	115
Figura 39 – Tempo de processamento dos algoritmos de remoções de depressões para a bacia do Rio Sirinhaém, usando as duas infraestruturas computacionais <i>desktop</i> e <i>workstation</i>	116
Figura 40 - Tempo de processamento dos algoritmos de remoções de depressões para a bacia do Rio das Garças, usando as duas infraestruturas computacionais <i>desktop</i> e <i>workstation</i>	116

Figura 41 - Tempo de processamento dos algoritmos de cálculo de áreas acumuladas de drenagem (a) para a bacia do Rio Sirinhaém e (b) do Rio das Garças, usando as duas infraestruturas computacionais <i>desktop</i> e <i>workstation</i>	121
Figura 42 - Tempo de processamento dos algoritmos de cálculo de áreas acumuladas de drenagem para a bacia do Rio Sirinhaém, usando as duas infraestruturas computacionais <i>desktop</i> e <i>workstation</i>	122
Figura 43 - Tempo de processamento dos algoritmos de cálculo de áreas acumuladas de drenagem para a bacia do Rio das Garças, usando as duas infraestruturas computacionais <i>desktop</i> e <i>workstation</i>	122
Figura 44 – Custo de processamento do método de <i>upscaling</i> de direções de fluxo COTAT+ sequencial e paralelo para uma área teste utilizando duas infraestruturas computacionais, <i>desktop</i> e <i>workstation</i>	124
Figura 45 - Custo de processamento do método de <i>upscaling</i> de direções de fluxo COTAT+ paralelo para as bacias do Rio Sirinhaém e do Rio das Garças, utilizando a <i>workstation</i> com 20 núcleos de processamento, com distinção das duas etapas principais do algoritmo.	125
Figura 46 – A Foz do Rio Sirinhaém é um estuário com grandes áreas alagadas com efeito da maré, fato que fez com que os métodos de extração de redes de drenagens a partir dos dados SRTM apresentassem resultados bastante distintos em relação à rede de referência digitalizada.	126
Figura 47 - Os métodos de extração de redes de drenagens a partir dos dados MDT LiDAR também apresentassem resultados bastante distintos em relação à rede de referência digitalizada para a Foz do Rio Sirinhaém.	127
Figura 48 – (a) Descontinuidade da rede de drenagem do trecho Baixo Rio Sirinhaém obtida com dados SRTM através dos algoritmos TerrSet, ArcMap, RichDEM e SAGA GIS. (b) Rede de referência digitalizada para o mesmo trecho do baixo curso do Rio Sirinhaém.	128
Figura 49 – Análise dos dados de elevação do SRTM (a) e do MDT LiDAR de 1 m para identificação de possíveis causas da interrupção da rede de drenagem do trecho do baixo curso do Rio Sirinhaém através da extração automática da rede de drenagem utilizando os dados provenientes do SRTM.	129
Figura 50 – <i>Percentual dentro do buffer</i> utilizando os dados do SRTM através de diferentes algoritmos, (a) para a bacia do Rio Sirinhaém e (b) do Rio das Garças. ...	131

Figura 51 - Análise da diferença relativa entre os comprimentos das redes de drenagens dos trechos da bacia do Rio Sirinhaém (a) e da bacia do Rio das Garças (b), obtidas através do SRTM, processado pelos algoritmos analisados, em relação à rede de referência digitalizada.....	133
Figura 52 - Trechos da Bacia do Rio das Garças, baixo curso do Rio das Garças com baixo percentual dentro do <i>buffer</i> da rede de drenagem derivada dos dados SRTM. (a) ortofoto, (b) SRTM, <i>buffer</i> da rede de drenagem digitalizada de referência e derivadas dos algoritmos (c) TerrSet, (d) ArcMap, (e) RichDEM e (f) SAGA.....	135
Figura 53 - Trechos da Bacia do Rio das Garças, Riacho São Domingos com baixo percentual dentro do <i>buffer</i> da rede de drenagem derivada dos dados SRTM. (a) ortofoto, (b) SRTM, <i>buffer</i> da rede de drenagem digitalizada de referência e derivadas dos algoritmos (c) TerrSet, (d) ArcMap, (e) RichDEM e (f) SAGA.....	136
Figura 54 - a) Ortofoto e rede de drenagem extraída MDT LiDAR de 1m; b), c), d), e) Sobreposição entre as redes de drenagem derivadas do MDT LiDAR reamostrado e o MDT original de 1 m; f) Sobreposição entre a drenagem derivada da rede SRTM 30m e a rede derivada de MDT LiDAR 1 m.....	137
Figura 55 - Exemplo de canal principal de um trecho de rio intermitente com dois percursos de escoamento paralelos: a) Ortofoto; b) LiDAR DTM 1 m; c) SRTM DEM 30 m; d), e), f) LiDAR DTM redes derivadas de 1m, 10m e 30m, respectivamente; g) Rede SRTM DEM 30m.	139
Figura 56 – <i>Percentual dentro do buffer</i> para a bacia do Rio Sirinhaém: (a) TerrSet; (b) ArcMap; (c) RichDEM; (d) SAGA.	141
Figura 57 - <i>Percentual dentro do buffer</i> para a bacia do Rio das Garças: (a) TerrSet; (b) ArcMap; (c) RichDEM; (d) SAGA.	142
Figura 58 - Análise da diferença relativa entre os comprimentos das redes de drenagens dos trechos da bacia do Rio Sirinhaém, obtidas através do MDT LiDAR original de 1 m e reamostrado para a resolução de 2, 5, 10 e 30 m, processado pelo TerrSet (a); ArcMap (b); RichDEM (c); e SAGA (d), em relação à rede de referência digitalizada.....	144
Figura 59 - Análise da diferença relativa entre os comprimentos das redes de drenagens dos trechos da bacia do Rio das Garças, obtidas através do MDT LiDAR original de 1 m reamostrado para a resolução de 2, 5, 10 e 30 m, processado pelo TerrSet (a); ArcMap (b); RichDEM (c); e SAGA (d), em relação à rede de referência digitalizada.....	145

Figura 60 - Análise áreas de drenagem de trechos do rio principal da bacia do rio Sirinhaém, tendo como referência a área de drenagem para a maior resolução espacial processada em cada algoritmo.....	147
Figura 61 – Análise áreas de drenagem de trechos do rio principal da Bacia do rio das Garças, tendo como referência a área de drenagem para a maior resolução espacial processada em cada algoritmo.....	148
Figura 62 – <i>Percentual dentro do buffer</i> utilizando os dados LiDAR de 1 m reamostrados para 30 m e processados por diferentes algoritmos e o <i>upsampling</i> de direções de fluxo do dado LiDAR de 1 m para a resolução de 30 m, analisados tendo como referência a rede de drenagem digitalizada: (a) bacia do Rio Sirinhaém; (b) bacia do Rio das Garças.	150
Figura 63 – Trechos de rios da bacia do Rio Sirinhaém que a drenagem obtida pelo MDT LiDAR reamostrado para 30 m apresentou diferenças significativas entre a rede de drenagem de referência digitalizada. (a) Trecho do Rio Seco; (a) Trecho do Rio Seco; (b) Trecho do Riacho do Renon; (c) Trecho do Riacho Tanque de Piabas; (d) Trecho do Rio Tapiruço.	151
Figura 64 - Trechos de rios da bacia do Rio das Garças que a drenagem obtida pelo MDT LiDAR reamostrado para 30 m apresentou diferenças significativas entre a rede de drenagem de referência digitalizada. (a) Trecho do curso médio do Rio das Garças; (b) Trecho do curso alto do Rio das Garças; (c) Trecho do Riacho das Lagoas; (d) Trecho do Riacho São Domingos; (e) Trecho do Riacho Alegre.....	153
Figura 65 – Análise da diferença relativa entre os comprimentos das redes de drenagens dos trechos da bacia do Rio Sirinhaém (a) e da bacia do Rio das Garças (b), obtidas através do MDT LiDAR original de 1 m reamostrado para a resolução de 30 m, processado pelos algoritmos analisados, e para a rede de drenagem obtida através do <i>upsampling</i> de direções de fluxo do MDT LiDAR de 1 m para 30 m, em relação à rede de referência digitalizada.....	154
Figura 66 - <i>Percentual dentro do buffer</i> utilizando os dados LiDAR de 1 m reamostrados para 30 m e processados por diferentes algoritmos e o <i>upsampling</i> de direções de fluxo do dado LiDAR de 1 m para a resolução de 30 m, analisados tendo como referência a rede derivada do MDT LiDAR de 1 m. (a) Para a bacia do Rio Sirinhaém e (b) do Rio das Garças.....	156
Figura 67 – Trecho do alto curso do Rio das Garças como exemplo de região com grande percentual dentro do <i>buffer</i> entre a rede de referência obtida através da extração	

automática da rede de drenagem através do SAGA GIS utilizando os dados MDT LiDAR de 1m e a rede de drenagem proveniente do <i>upsampling</i> de direções de fluxo do MDT LiDAR de 1 m para 30 m.	157
Figura 68 - Análise da diferença relativa entre os comprimentos das redes de drenagens dos trechos da bacia do Rio Sirinhaém (a) e da bacia do Rio das Garças (b), obtidas através do MDT LiDAR original de 1 m reamostrado para a resolução de 30 m, processado pelos algoritmos analisados, e para a rede de drenagem obtida através do <i>upsampling</i> de direções de fluxo do MDT LiDAR de 1 m para 30 m, em relação à rede de referência derivada do MDT LiDAR 1 m.....	159
Figura 69 - Análise áreas acumuladas de drenagem tendo como referência a área acumulada de drenagem obtida através do LiDAR 1m processada pelo SAGA GIS para a bacia do Rio Sirinhaém.....	160
Figura 70 - Análise áreas acumuladas de drenagem tendo como referência a área acumulada de drenagem obtida através do LiDAR 1m processada pelo SAGA GIS para a bacia do Rio das Garças.....	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados encontrados por Nardi et al. (2008), sobre o impacto do algoritmo de preenchimento de depressões proposto por Jenson e Domingue (1988) no aumento de área planas em MDEs com resolução espacial degradada (desconsiderando as regiões de espelho d’água presente na área de estudo). Fonte: adaptado de (NARDI et al., 2008).....	35
Tabela 2 - Infraestruturas computacionais utilizadas para o processamento dos dados.....	76
Tabela 3 – Algoritmos de extração automática de rede de drenagem a partir de MDE selecionados.....	85
Tabela 4 – Dimensão da matriz numérica para cada resolução espacial.....	86
Tabela 5 – Trechos de rios da rede de drenagem das bacias do Rio Sirinhaém e do Rio das Garças selecionados para as análises (os trechos do rio principal de cada bacia estão destacados com a cor de fundo cinza).	94
Tabela 6 - Características dos MDEs utilizados no processamento do <i>upscaling</i> COTAT+.	99
Tabela 7 - Procedimentos de avaliação e correspondente fonte de dados topográficos, resolução espacial e dados auxiliares.	104
Tabela 8 - Dimensões das matriz numérica e requisitos de armazenamento de dados correspondentes para cada MDT LiDAR da bacia do Rio Sirinhaém, incluindo produtos derivados (MDT sem depressão, direções de fluxo, áreas acumuladas de drenagem e rede de drenagem).	111
Tabela 9 - Dimensões das matriz numérica e requisitos de armazenamento de dados correspondentes para cada MDT LiDAR da bacia do Rio das Garças, incluindo produtos derivados (MDT sem depressão, direções de fluxo, áreas acumuladas de drenagem e rede de drenagem).	111
Tabela 10 - Custo computacional dos algoritmos de remoção de depressões para a bacia do Rio Sirinhaém.	118
Tabela 11 - Custo computacional dos algoritmos de remoção de depressões para a bacia do Rio das Garças.	118
Tabela 12 - Custo computacional dos algoritmos de cálculo de área acumulada de drenagem para a bacia do Rio Sirinhaém.	123
Tabela 13 - Custo computacional dos algoritmos de cálculo de área acumulada de drenagem para a bacia do Rio das Garças.	123

Tabela 14 – Avaliação do desempenho computacional do processamento do <i>upscaling</i> COTAT+ sequencial e paralelo para a área teste utilizando o <i>desktop</i> e o <i>workstation</i> , ambos com a quantidade máxima de núcleos de processamento.	124
--	-----

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Vários produtos derivados de Sensoriamento Remoto estão cada vez mais disponíveis para estudos ambientais e tais informações têm se mostrado extremamente valiosas para avaliação espaço – temporal. Isso se deve a várias vantagens desse tipo de dado, incluindo facilidade e velocidade de obtenção, formas de compartilhamento, disponibilização gratuita de parte deles, padronização (que possibilita uma maneira fácil de desenvolver e ajustar ferramentas computacionais para processá-los), controle de qualidade, cobertura espacial e disponibilidade para grandes áreas. (SMITH; CLARK, 2005). Além disso, há melhoria contínua na diversidade, quantidade e qualidade desse tipo de dado, incluindo novos satélites, plataformas aéreas e até mesmo monitoramento em terra. (MCCABE et al., 2017).

A delimitação de bacias hidrográficas e a caracterização da rede de drenagem é a primeira etapa na maioria das análises e pesquisas de recursos ambientais e naturais (DAVID et al., 2023). A caracterização topográfica desempenha um papel fundamental em vários aspectos e processos ambientais, incluindo aqueles relacionados à hidrologia, erosão e transporte de sedimentos, ciclo de nutrientes, riqueza e distribuição de espécies, dispersão de poluentes e seleção de locais para produção de energia solar e eólica (MUKHERJEE et al., 2013).

Para a hidrologia, os dados topográficos adquiridos pelo Sensoriamento Remoto e disponibilizados como MDE (Modelos Digitais de Elevação) são fundamentais para o desenvolvimento de projetos de recursos hídricos e também para subsidiar avanços científicos. A disponibilidade do MDE auxilia no planejamento, monitoramento e modelagem de regiões críticas, incluindo, por exemplo, áreas alagáveis (MAIDMENT, 2017b; SANDERS, 2007) e deslizamentos de terra (SCHULZ et al., 2017). Os MDEs também são dados de entrada para localizar áreas que transportam poluentes para um rio (XIANG et al., 2020), para simular os efeitos da mudança no uso da terra no escoamento (MUNOTH; GOYAL, 2019), para estimar propriedades hidrológicas e geomorfológicas de uma região (SOFIA; FONTANA; TAROLLI, 2014), incluindo umidade do solo, estabilidade do solo, retenção de chuva, erosão de escoamento superficial (LI, 2009),

análise de fluxo e transporte de sedimentos (SYVITSKI; MILLIMAN, 2007), e estimar a extensão e o momento das cheias (JAMALI et al., 2018), entre outros.

Um dos principais usos do MDE em hidrologia é derivar e caracterizar automaticamente redes de drenagem de rios, além do uso para extrair informações geomorfológicas necessárias para diversos estudos, como modelagem hidrológica (BARNES; LEHMAN; MULLA, 2014c; CHOI; YI; PARK, 2011; RIEGLER; HENNIG; WEBER, 2015b; TAKAKU; TADONO; TSUTSUI, 2014).

Nesse sentido, o MDE fornecido pelo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) desde 2000 (FARR et al., 2007) pode ser considerado um marco por sua abrangência, qualidade relativa e gratuidade. É considerado um precursor e ainda hoje a principal fonte de dados topográficos gratuitos globais de Sensoriamento Remoto (BUARQUE et al., 2009; PAZ; COLLISCHONN, 2008; SCHUMANN; BATES, 2018). Inicialmente disponível globalmente com resolução espacial de 90 m e posteriormente lançado com resolução espacial de 30 m, abriu as possibilidades e derrubou as tradicionais barreiras quanto ao acesso gratuito e global a dados topográficos, proporcionando uma forma rápida de desenvolver estudos para grandes áreas, inclusive aquelas de difícil acesso.

Vários outros MDEs provenientes de Sensoriamento Remoto estão disponíveis gratuitamente desde então, como o ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Global Digital Elevation Model*) (TACHIKAWA et al., 2011), o ALOS AW3D (*Advanced Land Observing Satellite, World 3D-Digital Elevation Model*) (TADONO et al., 2015), o ALOS PALSAR DEM-ALOS (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar Digital Elevation Model*) (NGULA NIPELE; CHEN, 2019) e o TanDEM -X World DEM (Complemento TerraSAR -X para Medição Digital de Elevação) (KRIEGER et al., 2007).

No entanto, existem algumas implicações ao usar esses dados topográficos. Por exemplo, a missão SRTM apresenta erros de elevação absolutos e relativos de 16 e 6 m, respectivamente (FARR et al., 2007; SCHUMANN; BATES, 2018), isto significa que dependendo do tamanho da área de estudo e do nível de precisão exigido, o uso desses dados torna-se inviável, devido à grande resolução espacial e à precisão relativamente baixa da altimetria. Esforços foram realizados para melhorar os dados divulgados anteriormente, removendo vegetação, elementos construídos/artificiais, além dos ruídos provenientes da aquisição ou manipulação dos dados, como *Bare-Earth* DEM

(O'LOUGHLIN et al., 2016), *Earth- Env DEM (Earth-Environment)* (ROBINSON; REGETZ; GURALNICK, 2014), *MERIT DEM (Multi-Error-Removed Improved-Terrai)* (YAMAZAKI et al., 2019), *Copernicus DEM* (LI et al., 2022b) e *FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM)* (HAWKER et al., 2022). No entanto, embora essas versões derivadas sejam amplamente utilizadas, elas ainda exibem erros verticais muito maiores do que os aceitáveis para algumas aplicações, inclusive em aplicações de escala local (SCHUMANN; BATES, 2018).

Em outra frente de desenvolvimento, está a crescente disponibilidade de dados topográficos adquiridos por meio de levantamentos LiDAR (*Light Detection and Ranging*). O LiDAR pode ser definido como um sistema de sensores remotos para adquirir, pelo menos, coordenadas planialtimétricas (x, y e z) de alvos na superfície (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015). A medição da altitude (z) é baseada no intervalo de tempo entre a emissão e a recepção do pulso laser (DONG; CHEN, 2018). O LiDAR é classificado como um sensor remoto ativo, pois não depende de fonte de luz externa para seu funcionamento, utiliza o laser como fonte de luz para aquisição de dados (BIGDELI; AMINI AMIRKOLAEI; PAHLAVANI, 2018).

O LiDAR é tratado como um sistema de sensores, por utilizar um conjunto de equipamentos, além do laser, para obtenção da nuvem de pontos com coordenadas planialtimétricas. O sistema de sensoriamento remoto LiDAR consiste principalmente em (1) um emissor e receptor de sinal laser, que obtém a coordenada altimétrica (coordenada z) do alvo, que também pode obter outros dados como a intensidade, por exemplo; (2) um sistema de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*), para obter as coordenadas x e y; (3) e uma IMU (*Inertial Measurement Unit*), que mede os ângulos (ω , ϕ , κ) de atitude (*roll*, *pitch* e *yaw*) da plataforma aérea ou orbital; (4) um sistema robusto de armazenamento de dados e, em alguns casos, uma câmera pode ser integrada (DONG; CHEN, 2018a; LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015).

Existe três tipos principais de sistemas LiDAR de acordo com a localização da plataforma utilizada para instalação do sistema de sensores: (1) aéreo, se a plataforma for uma aeronave, também chamado de ALS (*Airborne Laser Scanning*); (2) orbital ou satelital, se a plataforma for um satélite; (3) terrestre, quando o sistema sensor é instalado em tripé, automóvel ou qualquer outra plataforma que esteja em contato com o solo. Por estar em contato com o solo, o sistema de sensor LiDAR terrestre não requer a medição de

ângulos de atitude e, portanto, dispensa a IMU. Outro aspecto do uso da varredura a laser terrestre é que a coleta de dados pode ser estática, a partir de um ponto de referência fixo na área de estudo, ou cinemática/móvel, usando uma plataforma móvel (DONG; CHEN, 2018).

Os dados do LiDAR são apresentados na forma de uma nuvem de pontos, composta por pontos referentes ao primeiro retorno, retornos intermediários e último retorno de um mesmo pulso laser (JENSEN; EPIPHANIO, 2011). Este tipo de dado tem sido útil para vários propósitos distintos. O pulso de laser do LiDAR pode penetrar no dossel das árvores e essa característica especial aumenta a frequência de uso do LiDAR em aplicações florestais (BIGDELI; AMINI AMIRKOLAEI; PAHLAVANI, 2018; TORRE-TOJAL et al., 2022), como: estimativa de volume e biomassa (VAN LEEUWEN; NIEUWENHUIS, 2010), altura das árvores (WANG; GLENN, 2008), estimativas de mortalidade das árvores (DALAGNOL et al., 2021) e estimativa da saturação de carbono (DETTO et al., 2015). Além disso, esses dados também são usados para arqueologia (MATÉ-GONZÁLEZ et al., 2019), modelagem de risco de inundação urbana (NOH et al., 2018), mapeamento de linhas de transmissão de energia (CHEN et al., 2022a; DONG; CHEN, 2018; YAN et al., 2015), identificação de estradas (CHEN et al., 2022b; WANG; SHI; ZHANG, 2022), detecção de mudanças urbanas (ALJUMAILY et al., 2021; ZOVÁTHI; NAGY; BENEDEK, 2022), riscos naturais (TREPEKLI et al., 2022) e muitos outros.

Da nuvem de pontos é possível derivar MDE com alta resolução espacial, de 1 m ou submétrica, como usado por (DE ALMEIDA; BATES; OZDEMIR, 2018) para modelar inundações urbanas, por exemplo. Além disso, devido à natureza da aquisição de dados, ao longo dos retornos, podem ser gerados dois tipos de informações: MDT (Modelo Digital do Terreno) e MDS (Modelo Digital da Superfície). O primeiro representa o terreno natural, enquanto o último representa as características naturais e construídas/artificiais do ambiente.

Os dados LiDAR permitem a representação do relevo da bacia de forma inédita, conforme apontado por estudos como (MURPHY et al., 2008b) e (PERSENDT; GOMEZ, 2016), que compararam a topografia derivada do LiDAR com outras fontes de dados, por exemplo, MDEs disponíveis globalmente e ortofotos aéreas. Essa melhor representação da topografia fornece a base para derivar redes de drenagem fluvial com detalhes nunca imaginados há algumas décadas, e essa melhoria é ilustrada por vários estudos recentes

(DU et al., 2017; LINDSAY; DHUN, 2015b; ROELENS et al., 2018). Melhorar a qualidade das características da rede de drenagem fluvial, como comprimento, inclinação, sinuosidade e posicionamento dos caminhos de fluxo e junções dos rios, ajuda a impulsionar a modelagem hidrológica. Por exemplo, erros no comprimento do rio dificultam o modelo de representar adequadamente o tempo de propagação e atenuar com precisão as ondas de inundação (GANDOLFI; BISCHETTI, 1997; GIRONÁS et al., 2010; LAURI; KUMMU, 2014; LINDSAY; EVANS, 2008; OLIVERA; RAINA, 2003b; WU; LI; HUANG, 2008), enquanto erros no posicionamento do rio podem fazer com que o modelo deturpe a contribuição dos tributários e também a localização da inundação da planície de inundação, afetando assim o roteamento do fluxo e a simulação da extensão da inundação (GETIRANA et al., 2009).

A representação imprecisa das redes de drenagem fluviais medidas também tem uma forte influência em estudos de modelagem que comparam a disponibilidade e a demanda de água (DÖLL; LEHNER, 2002), bem como em estudos que simulam trocas hiporreicas em escala local, padrões mais amplos de recarga/descarga de águas subterrâneas, fluxos ribeirinhos e águas subterrâneas (KÄSER et al., 2014). Os caminhos de fluxo terrestre a montante das redes de drenagem fluvial também são importantes para serem representados com a maior precisão possível em modelos hidrológicos, pois podem afetar a simulação da geração de fluxo (GIANNONI; ROTH; RUDARI, 2005), transporte de sedimentos e poluentes para os córregos (DUKE et al., 2006; MAYORGA et al., 2005; YAMAZAKI; OKI; KANAE, 2009), variações espaciais e temporais nas velocidades de fluxo (PIÉGAY et al., 2008) e distribuição espacial da umidade do solo (KENWARD, 2000; RAAFLAUB; COLLINS, 2006).

Em resumo, representar melhor as trajetórias de escoamento superficial e fluvial em modelos hidrológicos reduz a propagação de erros pela estrutura do modelo, reduz o efeito de compensação obtido pela calibração do modelo e contribui para a obtenção de um modelo que se baseia melhor nas características físicas (SOUSA; PAZ, 2017), o que está de acordo com as melhores práticas recomendadas para modelagem hidrológica (SEMENOVA; BEVEN, 2015).

Apesar de ser útil para melhorar a representação da topografia e da rede de drenagem fluvial, o uso de dados LiDAR pode ser desafiador devido ao seu custo computacional, uma vez que em um curto período, o MDT passou de uma resolução

espacial de 30-90 m para submétrica, com bilhões de pixels (BARNES, 2017). Isso requer um aumento no poder computacional, armazenamento de dados e melhoria dos algoritmos de processamento (BARNES; LEHMAN; MULLA, 2014a; GONG; XIE, 2009; STANISLAWSKI et al., 2018; YILDIRIM et al., 2015; ZHU; TIAN; ZHAO, 2006). Esses métodos devem ser capazes de tratar áreas planas (BARNES; LEHMAN; MULLA, 2014b), remover depressões (LINDSAY; DHUN, 2015b) e determinar acúmulo de fluxo (ZHOU; WEI; FU, 2019) para uma grande quantidade de dados.

Outra questão está relacionada ao entendimento e avaliação adequada da qualidade das redes de drenagem derivadas, pois dados de alta resolução espacial podem apresentar um excesso de informações relacionadas aos detalhes das redes. Nesse sentido, devido a esse nível de detalhamento da superfície em estudo, mesmo os menores elementos detectados pelo sistema sensor ou mesmo os menores ruídos podem causar grandes alterações na determinação da rede de drenagem. Isso levou alguns autores alterar a resolução espacial original do MDT LiDAR para trabalhar com resoluções menores (GÖKGÖZ; BAKER, 2015; MORETTI; ORLANDINI, 2018) ou usar técnicas de suavização (ERDBRÜGGER et al., 2021). Estudos como Lindsay et al., (2019) afirmam que os dados LiDAR de alta resolução espacial geralmente apresentam uma rugosidade superficial excessiva que pode dificultar a caracterização da topografia e isso implica em erros na extração automática de redes de drenagem. A mudança na resolução espacial do dado original para resoluções menores pode ser feita, principalmente, através da agregação dos valores altimétricos, reamostragem dos pixels do MDE, ou em outros casos, ainda pouco explorado (EILANDER et al., 2021; MORETTI; ORLANDINI, 2018; MUNIER; DECHARME, 2021), através do *upsaling* de direções de fluxo. Esta última abordagem consiste na obtenção das direções de fluxo e das áreas acumuladas de drenagem na resolução original do dado, e se valendo dessas informações obter as direções de fluxo na resolução menor desejada.

O *upsaling* de direções de fluxo vem sendo utilizado nas últimas décadas em aplicações de modelos hidrológicos distribuídos de grandes bacias, Rio São Francisco e Rio Paraná, por exemplo. Para essas bacias o uso SRTM com resolução espacial de 30 m, ou até mesmo reamostrado para 100 m, representa um nível de detalhamento alto e uma grande quantidade de dados, principalmente levando-se em consideração o poder computacional disponível na época. As resoluções espaciais utilizadas na literatura para

essas bacias chegam a pixels com dimensão de até 10 km, por exemplo, isto significa que a resolução espacial obtida através do *upsampling* de direções de fluxo chega a ser 100 vezes menor que a resolução espacial original. O *upsampling* de direções apresentou resultados melhores, comparados aos da reamostragem dos pixels, para o uso dos dados do SRTM no estudo de modelos hidrológicos distribuídos de grandes bacias, em resoluções espaciais degradadas de até 10 km.

Entretanto, atualmente com a disponibilidade de dados LiDAR com resoluções espaciais de 1 m e a necessidade do uso de produtos geoespaciais com resolução espacial de 30, ou até 100 m, para estudos hidrológicos, ainda se faz necessária a mudança de escala dos dados. E nesse caso, a diferença entre a resolução espacial original e a degrada também chega a ser de até 100 vezes. Porém, o nível de detalhamento da resolução espacial é muito maior que o do SRTM com pixel de 30 m.

Nesse sentido, é pertinente analisar as limitações e potencialidades do uso do MDT LiDAR para a caracterização topográfica de bacias hidrográficas e avaliar a qualidade da rede de drenagem derivada dos dados na resolução original e em resoluções menores, utilizando a reamostragem dos pixels e o *upsampling* de direções de fluxo. Na literatura, até então, só foi encontrada uma pesquisa, Moretti e Orlandini (2018), que avalia a qualidade da rede de drenagem derivada de MDT LiDAR na resolução original e degrada utilizando reamostragem e *upsampling* de direções de fluxo. Para tanto, duas áreas de estudo com características topográficas distintas foram escolhidas como área de estudo, a bacia do Rio Sirinhaém e a do Rio das Garças, no estado de Pernambuco, aproveitando a disponibilidade de dados LiDAR do projeto PE3D (Pernambuco Tridimensional) (CIRILO et al., 2015).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é analisar as limitações e potencialidades do uso do MDT LiDAR para a extração automática de redes de drenagens.

Como objetivos específicos desta pesquisa, tem-se:

- i) Quantificar os benefícios na representação topográfica a partir de MDT LiDAR comparativamente ao SRTM;
- ii) avaliar as dificuldades e o custo computacional do processamento de dados de alta resolução espacial provenientes do LiDAR;
- iii) avaliar os impactos de diferentes métodos na qualidade da rede de drenagem derivada de MDE;
- iv) analisar o efeito da resolução espacial na caracterização da rede de drenagem;
- v) avaliar o benefício do procedimento de *upscaling* de direções de fluxo na mudança de escala.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO – MDE

2.1.1 Fundamentos

A Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG) classifica os modelos digitais a partir do MDE e o define como sendo um produto cartográfico obtido através de modelos matemáticos que representam uma região de forma contínua, porém representados de forma discreta (DSG, 2016). Em outras palavras, o MDE é uma representação digital e discretizada da superfície contínua do terreno e consiste em uma matriz bidimensional (coordenadas planimétricas x e y) de valores de elevação (coordenada altimétrica z) referente a regiões do terreno regularmente espaçadas (Figuras 1–a e b) (WANG; LIU, 2006). Estes modelos possuem uma variedade de utilidade prática e deles podem ser extraídos diversos produtos, tais como: curvas de nível; perfis do terreno; cálculo de volumes; mapas de declividade; e, em particular, extração de redes de drenagem (SILVA; SEGANTINE, 2015).

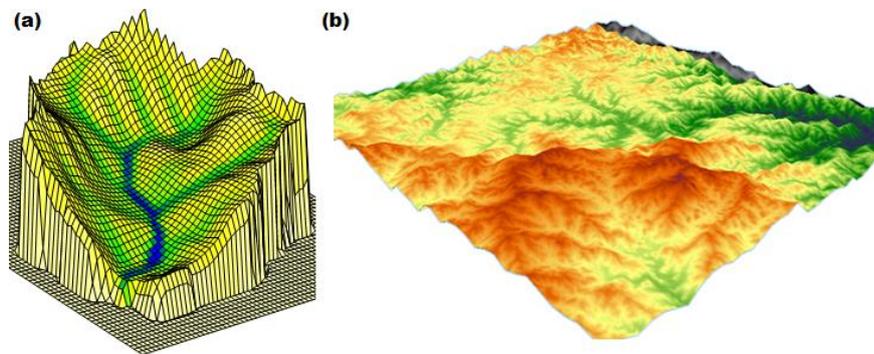


Figura 1 – (a) e (b) MDE representação tridimensional, coordenadas planialtimétricas, da superfície. Fonte Figura 1-a: (TARBOTON, 2003).

Para que seja possível representar a topografia da superfície terrestre, faz-se necessário adquirir as coordenadas de pontos amostrais desta, através de equipamentos e procedimentos que podem adquirir os dados de forma direta (coleta em campo) e indireta (através de sensores remotos, por exemplo).

Quanto maior a quantidade de pontos, maior o nível de detalhamento e mais representativo é o modelo a ser gerado por esse conjunto de pontos espaciais. Entretanto, devido à dificuldade e ao custo de se obter um número quase infinito de pontos, capazes de representar os menores nuances da superfície, recorre-se a métodos de interpolação. Estes métodos consistem na estimativa do valor de uma propriedade em um local não amostrado dentro da área de estudo (MENDES; CIRILO, 2001), em outros termos, cada pixel do MDE representa um valor médio da elevação da área abrangida por ele (Figura 2).

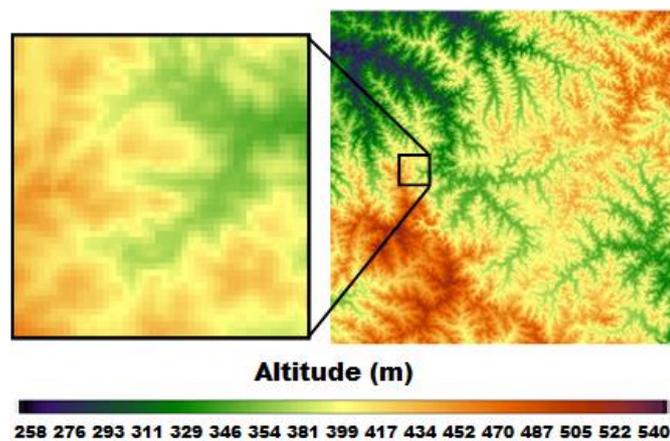


Figura 2 – MDE e visualização dos pixels deste. Cada pixel representa o valor médio de elevação da área abrangida por ele.

A distinção entre os modelos derivados do MDE é feita a partir dos elementos que esses representam. Dessa forma, a superfície e os elementos naturais e artificiais sobre ele são representados no Modelo Digital de Superfície (MDS). Tais elementos podem ser de origem antrópica, por exemplo, edificações e pontes, ou naturais, como a vegetação e formações rochosas. Sendo assim, pode-se afirmar que os dados provenientes do SRTM, por exemplo, constituem um MDS e tal fato implica na influência dos elementos artificiais e naturais na representação do relevo da região de estudo. Enquanto que o Modelo Digital do Terreno (MDT) representa apenas o terreno, livre dos elementos de origem antrópica e naturais acima do terreno. O MDT deve ser capaz de considerar os acidentes geográficos de relevo, tais como talwegues, espigões, divisores de água, taludes, muros de arrimo, zonas construídas e outros (DSG, 2016). Esse modelo é um importante produto de mapeamento topográfico, que pode ser usado em diversas análises do terreno. A Figura 3 apresenta exemplos de elementos que seriam representados em um MDS e em um MDT.

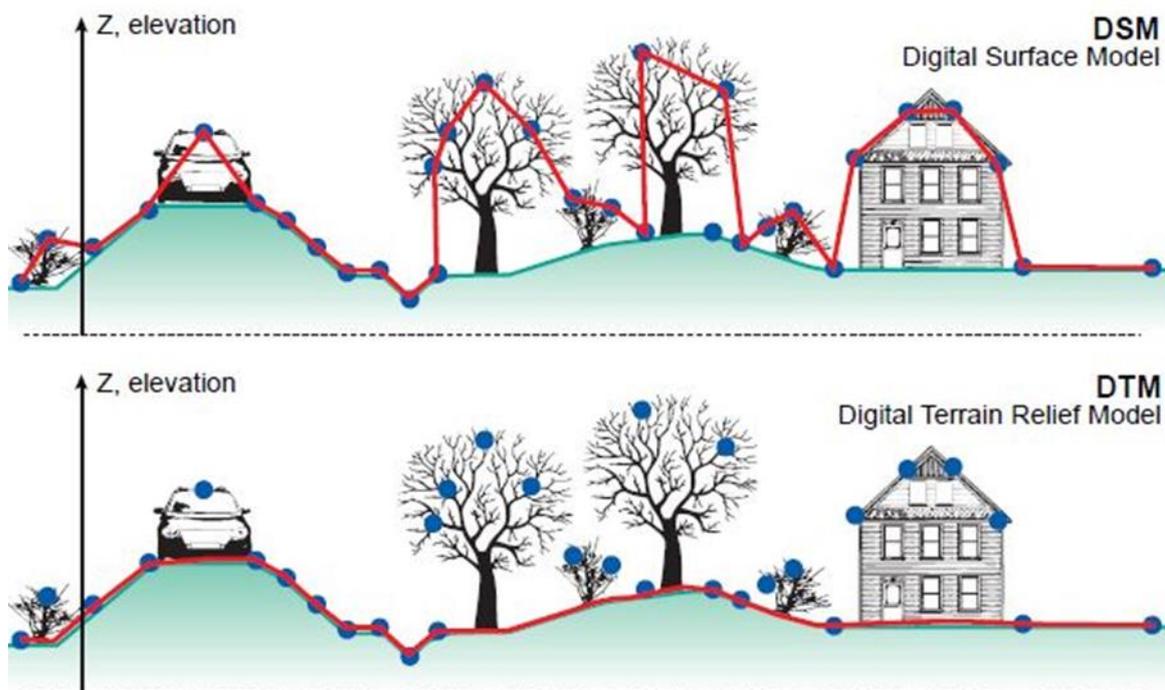


Figura 3 – Diferenças dos elementos representados no MDS e MDT. Fonte: <https://3dmetrica.it/dtm-dsm-dem/>

O MDE pode ser armazenado em dois tipos de dados: vetorial e raster, sendo o dado vetorial a representação utilizando elementos topológicos de ponto, linha e polígono; e o dado raster uma matriz de pixels ou células com valores reais ou inteiros. O MDE raster é amplamente utilizado na análise geoespacial de propriedades hidrológicas e geomorfológicas, incluindo a extração automática de rede de drenagem (BARNES, 2016).

2.1.2 Aquisição de dados via LiDAR

2.1.2.1 Conceitos

Pode-se definir o LiDAR como um sistema sensor remoto de aquisição das coordenadas planialtimétricas (x, y e z) dos alvos na superfície ou que estejam sobre ela (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015). A medição de altitude (z) é baseada no intervalo de tempo entre a emissão e recepção do sinal laser (DONG; CHEN, 2018). O LiDAR é classificado como sensor remoto ativo, pois não depende de fonte de luz externa

para o seu funcionamento, visto que se utiliza do laser como fonte de luz para aquisição de dados (DONG; CHEN, 2018).

Os dados LiDAR se apresentam na forma de uma nuvem de pontos referentes ao: primeiro retorno, retornos intermediários e último retorno de um mesmo pulso laser (JENSEN, 2009). A Figura 4 apresenta um perfil transversal da nuvem de pontos LiDAR classificada de acordo com os objetos interceptados.

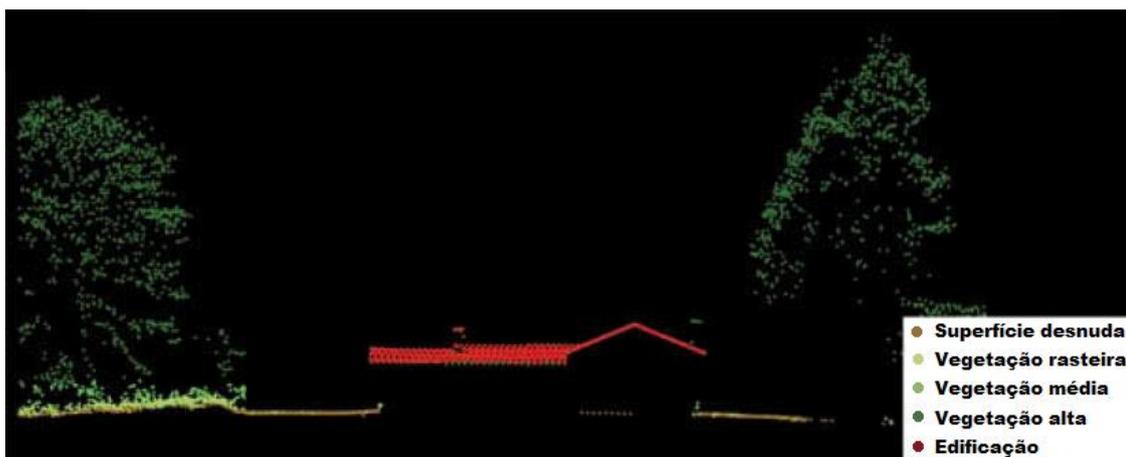


Figura 4 – Perfil transversal da nuvem de pontos LiDAR classificada de acordo com os objetos interceptados. Fonte: adaptado de (DONG; CHEN, 2018).

A nuvem de pontos obtida por esse sistema é extremamente densa e corresponde a uma amostra pontual tridimensional da superfície. A densidade de pontos varia de acordo com parâmetros do levantamento, do sistema sensor e da plataforma utilizada, sendo normalmente de até 25 pontos por m² (HÖFLE; RUTZINGER, 2011) e de até 50 pontos por m² para regiões íngremes ou densamente vegetadas (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015). A densidade pode ser expressa como a distância entre os pulsos laser e depende da: (1) altitude; (2) velocidade da aeronave; (3) ângulo de varredura; (4) taxa de varredura (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015).

Ao se planejar o levantamento com sensor LiDAR deve-se prever a sobreposição das linhas de varredura, com a finalidade de evitar lacunas de dados. As regiões que não apresentam dados são denominadas de destituídas de dados ou em inglês *data voids* (JENSEN, 2009). A sobreposição recomendada é de 30 a 50%, dependendo da área de estudo, tendo uma proporção direta com a declividade do terreno e com a quantidade de

cobertura vegetal (JENSEN, 2009). Áreas íngremes e com cobertura vegetal, geralmente requerem um ângulo de abertura do sistema de varredura menor, o que resulta em uma nuvem de pontos mais densa (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015).

Ressalta-se ainda que o sensor LiDAR tem menor custo de processamento quando comparado ao processamento de ortofotos, que são obtidas através de levantamento aerofotogramétrico convencional. Dessa forma, o LiDAR tem substituído gradualmente os métodos convencionais de aquisição de dados planialtimétricos, principalmente como fonte de dados para a criação de modelos digitais de elevação (WERBROUCK et al., 2011). Alguns países têm utilizado o sistema sensor LiDAR para adquirir MDE com alta resolução espacial para todo o território nacional, tais como: Dinamarca (*Danish Geodata Agency*), Finlândia (*National Land Survey of Finland*) e Suécia (*Swedish Mapping, Cadastral and Land Registration Authority*) (LIDBERG et al., 2017). Revisões da evolução histórica de aquisição de dados LiDAR e de novos sistemas desse tipo podem ser encontradas nos trabalhos de Baltsavias (1999) e Dong e Chen (2018).

2.1.2.2 Componentes

O LiDAR é tratado como sistema sensor, por utilizar um conjunto de equipamentos, além do laser, para obter a nuvem de pontos com coordenadas planialtimétricas. O sistema de sensoriamento remoto LiDAR consiste principalmente de: (1) um emissor e receptor do sinal laser, que obtém a coordenada altimétrica (coordenada z) do alvo; (2) um sistema de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*), para medição das coordenadas x e y ; (3) e um sistema de orientação inercial, em inglês *Inertial Measurement Units* (IMU), que mede os ângulos (ω , ϕ , κ) de atitude (em inglês *roll*, *pitch* e *yaw*) da plataforma aérea ou orbital; (4) um sistema de armazenamento robusto de dados e, em alguns casos, uma câmera pode ser integrada (DONG; CHEN, 2018; LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015).

Os dados provenientes desses sistemas são pós-processados com o objetivo de estabelecer as correlações dos dados, a filtragem de ruídos e dos pontos sobrepostos. Tem-se como resultado a nuvem de pontos tridimensionais do terreno (DALMOLIN et al., 2014). A Figura 5 apresenta os equipamentos do sistema sensor LiDAR aerotransportado e alguns dos seus parâmetros de aquisição de dados.

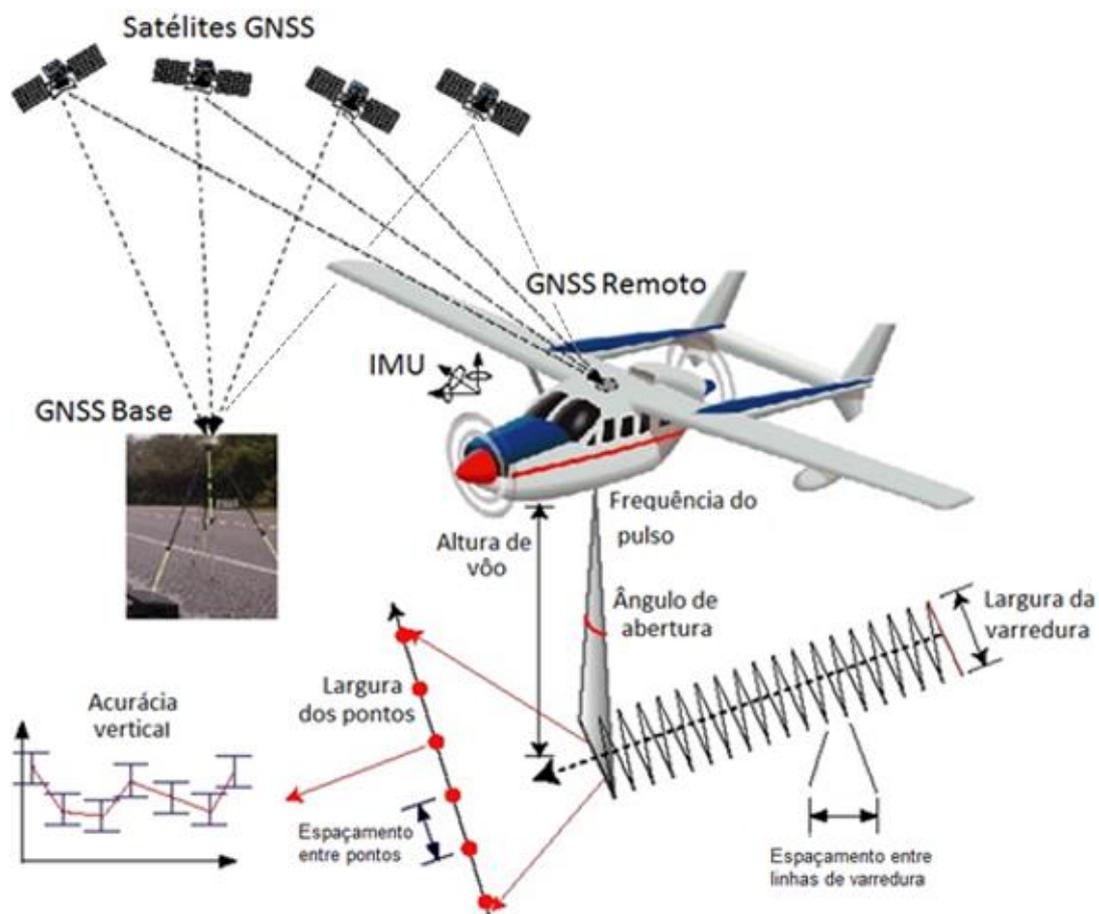


Figura 5 – Equipamentos do sistema sensor LiDAR e alguns dos seus parâmetros. Fonte: adaptada de <http://LIDAR.ihrc.fiu.edu/>.

2.1.2.3 Classificação e tipos de sensores

A classificação em aéreo, orbital ou terrestre se deve à localização da plataforma utilizada para instalar o sistema sensor: (1) aéreo, caso a plataforma seja uma aeronave, como apresentado na Figura 5, sendo também denominado de *ALS - Airbone Laser Scanning*; (2) orbital ou satelital, caso a plataforma seja um satélite; (3) terrestre, quando o sistema sensor é instalado em um tripé, automóvel ou qualquer outra plataforma que esteja em contato com o solo. Por estar em contato com o solo, o sistema sensor LiDAR terrestre não requer a medição de ângulos de atitude e dispensa, portanto, a IMU. Outro aspecto da utilização do escaneamento a laser terrestre é que o levantamento dos dados pode ser estático, a partir de um ponto fixo de referência da área de estudo, ou cinemático/móvel,

mediante o uso de uma plataforma em movimento (DONG; CHEN, 2018), como por exemplo, aplicações de sensor LiDAR em carros autônomos.

O sistema sensor LiDAR pode ser considerado uma tecnologia recente, apesar da utilização do laser como método de aquisição de distâncias e para pesquisas atmosféricas terem sido feitas desde a segunda metade do século passado (GOYER; WATSON, 1963). Porém, apenas com a modernização dos sistemas GNSS e de orientação inercial, em meados da década de 1990, foi possível avançar nas pesquisas sobre LiDAR (DONG; CHEN, 2018). A integração do GNSS e IMU permitiu aos sistemas LIDAR aerotransportado obter dados de elevação com uma precisão vertical de 15 a 50 cm (FLOOD, 2001; HILL et al., 2000; WANG; LIU, 2006). Além disso, dois grandes avanços na tecnologia do sistema, que não estão relacionados com a precisão das coordenadas, foram bastante relevantes no seu desempenho e fez com que seu uso se tornasse cada vez mais vantajoso, frente aos outros sensores.

O primeiro avanço se refere ao sistema ótico mecânico de varredura, sistema de espelhos que possibilita a aquisição de pontos em uma área de abrangência definida pelo tipo de espelho e pelo ângulo de abertura. Os sistemas LiDAR iniciais eram dispositivos que obtinham dados de elevação apenas de objetos diretamente abaixo, ortogonais, sob o caminho de uma aeronave, quando aerotransportado. Esses sistemas iniciais eram complexos e limitados, devido à relação custo-benefício, principalmente para o estudo de grandes áreas (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015).

O segundo avanço se refere à detecção de objetos sobrepostos através dos múltiplos retornos para cada pulso (GIONGO et al., 2010; JENSEN, 2009). Os sistemas mais modernos são capazes de registrar cinco retornos ou mais por pulso (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015).

Além desses avanços, na última década tem se utilizado, cada vez mais, aeronaves não tripuladas de pequeno porte, denominadas de VANTS (Veículos Aéreos Não Tripulados), para realizar aquisição de dados espaciais, principalmente de pequenas áreas de estudo. Em suma, existem dois tipos principais de VANTS: multirotor e asa fixa. O primeiro tipo apresenta normalmente quatro motores (quadrópteros) ou mais (hexacópteros, octacópteros e assim por diante). Esses motores garantem a sua estabilidade, maior controle de navegação, alto consumo de energia e permite decolagem e pouso em qualquer local. Já o segundo tipo de VANT, de asa fixa, apresenta menor

consumo de energia, porém impõe que a decolagem e o pouso sejam realizados em grande área aberta e possibilita um menor controle de navegação. Ambos os tipos voam em baixas altitudes, em comparação às aeronaves tradicionais. Por esse motivo, ao utilizar VANTS como plataformas de aquisição de dados LiDAR, a nuvem de pontos resultante pode apresentar até milhares de pontos por m² (KUŽELKA; SLAVÍK; SUROVÝ, 2020; SALACH et al., 2018). A densidade da nuvem de pontos representa uma riqueza maior de detalhes, porém um maior custo de pós-processamento.

2.1.2.4 Obtenção de MDS e MDT

A existência de múltiplos retornos representa uma das características singulares do sistema LiDAR. Um único pulso laser ao interceptar objetos ao longo do trajeto retorna ao sistema sensor como um dado a ser processado e que está presente na nuvem de pontos resultante do levantamento. Os pontos relativos ao terreno são os pontos referentes ao MDT. Tais pontos podem estar representados no primeiro ou no último retorno, a depender do trajeto realizado pelo pulso laser e da existência de objetos sobre o terreno. Enquanto que para o MDS são considerados todos os pontos do levantamento, não só os que representam o terreno. A Figura 6 exibe situações em que o pulso laser apresenta múltiplos retornos e um único retorno.

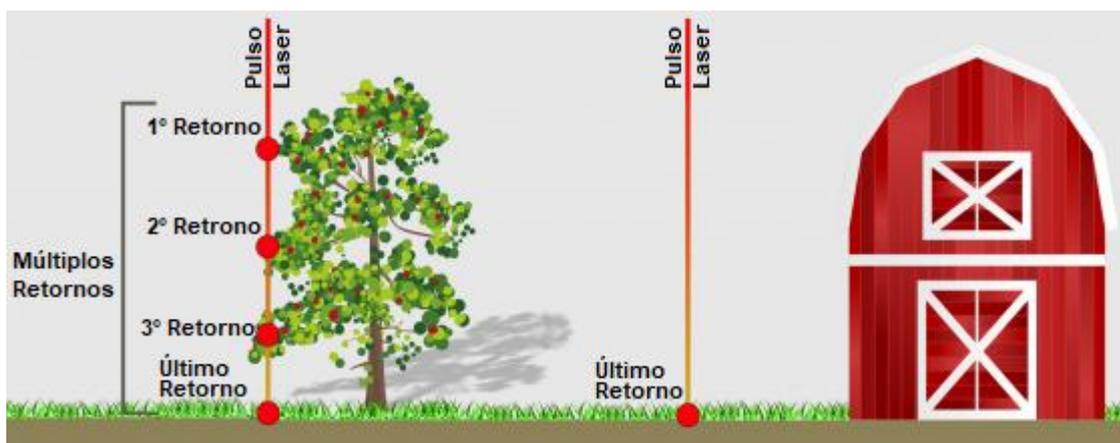


Figura 6 - Intercepção de objetos e respectivos retornos do pulso laser. Fonte: <https://gisgeography.com/lidar-light-detection-and-ranging/>

Observa-se na Figura 6 que através dos múltiplos retornos, é possível adquirir o MDT mesmo de regiões com cobertura vegetal. Entretanto, ressalta-se que o último retorno representa a superfície do solo, se houver lacunas suficientes no dossel para que partes do pulso transmitido o alcancem e retornem. Caso o dossel seja muito denso e a quantidade de retornos por pulso não seja suficiente para atingir o solo, o último retorno representa um objeto acima da superfície (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015). Como medida de contorno a este fato, frisa-se a importância de se obter uma nuvem mais densa para essas regiões, pois outros pulsos laser vizinhos tendem a conseguir alcançar o terreno. Essa tendência se deve ao ângulo de incidência do pulso laser, quanto mais ortogonal menor a possibilidade de interceptar alvos intermediários (DONG; CHEN, 2018).

Através do estudo de forma segmentada dos retornos, é possível realizar a medição das dimensões do dossel das árvores, como também da elevação estrutural da cobertura vegetal e do seu volume (DONG; CHEN, 2018; WERBROUCK et al., 2011). Essas características tornam o LiDAR uma ferramenta relevante no levantamento de áreas com cobertura vegetal, principalmente de grandes áreas e densamente vegetada, como também para áreas com grande declividade, com presença de áreas encobertas e de difícil acesso (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015).

2.1.2.5 Precisão

A precisão dos dados LiDAR é mensurada através do levantamento das coordenadas de pontos de controle com equipamentos de alta precisão (GNSS geodésicos ou por meio de estação total, por exemplo). A precisão obtida por esses equipamentos e as suas técnicas é da ordem milimétrica. De posse das coordenadas dos pontos de controle e da nuvem de pontos LiDAR, é realizada a análise do Erro Médio Quadrático – EMQ (Equação 1), entre as coordenadas dos pontos de controle e o ponto mais próximo correspondente na nuvem de pontos.

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta^2}{n}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde Δ é a diferença entre o valor da coordenada do ponto de controle e a valor da coordenada do ponto homólogo na nuvem de pontos; e n representa a quantidade de pontos de controle.

O ponto homólogo pode ser obtido por meio de interpolação, caso não exista ponto na nuvem de pontos que coincida com o ponto de controle em análise (JENSEN, 2009). De acordo com IBGE (2017) e a Norma ISO 19157:2013, a acurácia posicional, referente às acurácias planimétrica e altimétrica do conjunto de dados analisado, é composta de três sub-elementos:

- a. Acurácia posicional absoluta ou externa – refere-se à relação entre os valores das coordenadas adquiridas no levantamento a ser analisado e os valores de referência homólogos, considerados como verdadeiros. Dessa forma, pode-se afirmar que a análise da precisão de dados LiDAR é realizada através da acurácia posicional absoluta, observando-se a relação entre as coordenadas dos pontos da nuvem de pontos com as coordenadas dos pontos de controle;
- b. Acurácia posicional relativa ou interna – estabelece a relação de proximidade entre os valores das coordenadas adquiridas no levantamento a serem analisadas com a posição relativa de outras feições geográficas no conjunto de dados e suas respectivas posições aceitáveis ou consideradas como verdadeiras. Um exemplo do uso da acurácia posicional relativa é a inspeção do posicionamento relativo entre a rede de drenagem extraída de forma automática a partir de MDE e a rede de drenagem de referência, fornecida por órgãos oficiais;
- c. Acurácia posicional dos dados em grade – relação de proximidade da posição de uma grade de dados, por exemplo, dados matriciais rasters e MDE, com o valor de referência aceitável ou considerado verdadeiro.

2.1.3 Fontes de dados globais

O SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) foi lançado em 11 de fevereiro de 2000 e durou 11 dias (JENSEN, 2009). Foi realizado através de um esforço colaborativo da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e da NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*). Teve por objetivo obter dados de elevação (MDS), usando

interferometria de radar (SAR), nas resoluções espaciais de 30 e 90 m, para quase todo o globo (região do levantamento realizado foi entre as latitudes 54° S e 60° N). Seus dados foram disponibilizados gratuitamente, entretanto, para a América do Sul, por exemplo, inicialmente foram disponibilizados apenas os dados com resolução espacial de 90 m, no sistema geodésico WGS84 – *World Geodetic System* (ROBINSON; REGETZ; GURALNICK, 2014). Antes disso, o único conjunto de dados de elevação global disponível gratuitamente era o GTOPO30 da *US Geological Survey* (USGS), com resolução espacial de 1 Km (ZANDBERGEN, 2008).

Os dados obtidos pelo SRTM representam os elementos sobre a superfície do terreno, ou seja, trata-se de um MDS. Além desses elementos que impactam na utilização desses dados em aplicações hidrológicas, esses dados também apresentam uma quantidade considerável de ruídos, principalmente em área com pouca inclinação, devido à baixa precisão vertical (~10 m). Os dados do SRTM também apresentam vazios, ou áreas ausentes de informação. Isso ocorre quando a energia eletromagnética dispersa pelo elemento a ser imageado é menor do que a capaz de ser identificada pelo sensor (GARBRECHT; MARTZ, 1997; ROBINSON; REGETZ; GURALNICK, 2014; WANG; LIU, 2006; ZANDBERGEN, 2008). Apesar disso, esse conjunto de dados é bastante utilizado, principalmente pela carência de outros dados de elevação globais e gratuitos (SIMPSON et al., 2015).

Diversos produtos globais com dados topográficos na forma de MDE são disponibilizados, tais como o ASTER GDEM - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Global Digital Elevation Model* (TACHIKAWA et al., 2011a); o ALOS AW3D - *Advanced Land Observing Satellite, World 3D-Digital Elevation Model* (TADONO et al., 2015a); o ALOS PALSAR (*ALOS Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar Digital Elevation Model*) (NGULA NIPELE; CHEN, 2019a); e o WorldDEM do TanDEM-X - *TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement* (KRIEGER et al., 2007a). Esses produtos estão disponíveis de forma gratuita com resolução espacial de 30 m e o ALOS PALSAR de 12,5 m.

Modelos digitais de elevação obtidos por sensores orbitais contêm diferentes tipos de erros observacionais, que não são desprezíveis para aplicações às geociências e outras áreas correlatas (YAMAZAKI et al., 2017). Diferente da tecnologia LiDAR, os outros sistemas sensores apresentam incapacidade de penetrar áreas densamente vegetadas, o que

influencia consideravelmente a qualidade da informação topográfica obtida por esses levantamentos (O'LOUGHLIN et al., 2016). A partir de melhorias desses MDEs originais, como a remoção de efeito de vegetação e outros tipos de ruídos, foram criados produtos como o *Bare-Earth DEM - Bare Earth Digital Elevation Model* (O'LOUGHLIN et al., 2016), o *Earth-Env DEM - Earth-Environment Digital Elevation Model* (ROBINSON; REGETZ; GURALNICK, 2014) o *MERIT DEM - Multi-Error-Removed Improved-Terrain Digital Elevation Model* (YAMAZAKI et al., 2017), o *NASADEM* (CRIPPEN et al., 2016), o *COPDEM – Copernicus DEM* (LI et al., 2022a) e o *FABDEM – Forest and Buildings removed Copernicus DEM* (UHE et al., 2022).

2.1.4 Aplicações de MDE

Modelos Digitais de Elevação têm grande relevância para atividades comerciais e científicas, devido a sua importância na análise e previsão de processos ou eventos ambientais e geofísicos. Também é utilizado como insumo para planejamento, monitoramento e modelagem de regiões críticas (WISE, 2000), por exemplo, áreas de inundações (MAIDMENT, 2017a; SANDERS, 2007) e de deslizamento de terra (DENNISON; FRYER; COVA, 2014), localizar áreas que contribuem com poluentes para um rio e simular os efeitos das alterações da paisagem no escoamento de águas superficiais; estimar propriedades hidrológicas e geomorfológicas de uma região (SOFIA; FONTANA; TAROLLI, 2014), incluindo a umidade do solo, estabilidade do terreno, retenção da chuva, poder erosivo do escoamento (LI et al., 2009), análise de escoamento e transporte de sedimentos (SYVITSKI; MILLIMAN, 2007); dimensionar descargas de rios; estimar a extensão e o tempo das cheias; além de ser base de dados espaciais para caracterização da rede de drenagem (BARNES; LEHMAN; MULLA, 2014a; CHOI; YI; PARK, 2011; O'LOUGHLIN et al., 2016; RIEGLER; HENNIG; WEBER, 2015; TAKAKU; TADONO; TSUTSUI, 2014; WANG; LIU, 2006).

O emprego de MDE para extração automática de redes de drenagens e posterior aplicação em modelos hidrológicos tem sido cada vez maior. Tendo início na década de 1980, passaram a ser amplamente utilizados, principalmente, após a disponibilização de dados globais gratuitos da missão do SRTM no ano 2000. Tal fato se explica devido à possibilidade de obter a partir do MDE uma série de características topográficas, tais

como: declividade, aspecto, direções de fluxo, área acumulada de drenagem, redes de drenagem e limites da bacia hidrográfica. A determinação das direções de fluxo é indispensável no processamento dessas variáveis topográficas, exceto para a declividade e o aspecto (PAN; XI; WANG, 2019; SOUSA; PAZ, 2017). Os parâmetros hidrográficos são alguns dos dados de entradas requeridos para estudos de modelagem hidrológica (WANG; LIU, 2006).

Dentre essas aplicações, se destaca como uma das principais ou talvez a principal utilização do MDE a extração e a caracterização de redes drenagem (O'CALLAGHAN; MARK, 1984; TARBOTON; BRAS; RODRIGUEZ-ITURBE, 1991; TRIBE, 1992), servindo de base de informação para diversos outros estudos (QIN et al., 2018; ROELENS et al., 2018a; YAN; TANG; PILESJÖ, 2018)

A análise da rede drenagem baseou-se por muitos anos em mapas topográficos e em fotogrametria aérea, porém a evolução dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e a disponibilidade dos MDE permitiu a extração automática de redes de drenagem (NIKOLAKOPOULOS; CHOUSIAFIS; KARATHANASSI, 2015). Isso tem motivado diversas pesquisas desenvolvidas nas últimas décadas com o objetivo de aprimorar as técnicas de extração de redes de drenagem e suas características geográficas tais como comprimento, declividade e sinuosidade (LASHERMES; FOUFOULA-GEORGIU; DIETRICH, 2007). Os MDEs obtidos com tecnologias de sensoriamento remoto possibilitam o processamento rápido de dados topográficos com alta resolução espacial, temporal e espectral, além de cobrirem grandes áreas e serem capazes de obter dados de regiões inacessíveis por outras tecnologias utilizadas anteriormente (NIKOLAKOPOULOS; CHOUSIAFIS; KARATHANASSI, 2015; TAKAKU; TADONO; TSUTSUI, 2014).

Segundo Koenders et al. (2014), uma das abordagens usuais para identificação de redes de drenagem em MDEs leva em consideração que o fluxo d'água ocorre de regiões de maiores altitudes para regiões de menores altitudes, ou seja, de acordo com a declividade. Sendo assim, para extrair a rede de drenagem de um MDE é preciso identificar as matrizes de direção e acumulação de fluxo. Diversos algoritmos foram desenvolvidos para esse propósito nas últimas décadas, sendo um dos primeiros entre eles proposto por Jenson e Domingue (1988) denominado método D8. Atualmente, muitos

softwares de SIG ou de modelagem hidrológica utilizam esse método, mesmo sendo computacionalmente intensivo e demorado (WANG; LIU, 2006).

Para Lashermes et al. (2007), os maiores desafios para esses algoritmos são a manipulação de múltiplas direções de fluxos e a determinação do início da rede de drenagem, ou seja, a identificação das nascentes (LI et al., 2020a). Além disso, a resolução do MDE e o ruído nos valores de altitude influenciam consideravelmente na acurácia e na interpretação numérica a ser calculada.

A resolução espacial dos dados utilizados é de grande importância para os métodos de extração automática de redes de drenagem. Segundo Dixon e Earls (2009), se os resultados obtidos não fossem alterados devido à resolução espacial dos dados, o MDE obtido originalmente na resolução de 30 m e o reamostrado para resolução de 90 m, por exemplo, apresentariam a mesma precisão dos dados modelados que o MDE obtido originalmente na escala de 90 m. Isso não ocorre, o que demonstra que a resolução espacial não pode ser ignorada.

Outra problemática está relacionada à generalização cartográfica da rede de drenagem obtida, que consiste na determinação dessa rede em escalas diferentes da que foi definida. A necessidade de se realizar a generalização cartográfica, isto é, obter dados em resolução espacial menor a partir de dados com resolução espacial maior, se deve, entre outros fatores ao custo computacional, principalmente ao se utilizar algoritmos que não foram desenvolvidos para lidar com grande quantidade de dados. Dentre as abordagens, destacam-se a reamostragem dos pixels do MDE e o *upscaling* das direções de fluxo. Nesse sentido, é pertinente o uso de técnicas distintas de generalização cartográfica, para avaliar os resultados obtidos.

A seguir são apresentadas as principais etapas da extração automática da rede de drenagem a partir do MDE.

2.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DO MDE

Ao adquirir dados espaciais faz-se necessário realizar a verificação e remoção de ruídos, caso esses existam. No caso do uso do MDE para extração automática de rede de drenagem, além da remoção de ruídos, também é necessário que sejam removidas e tratadas às depressões e as áreas planas, usualmente presentes. Essas etapas são

consideradas como pré-processamento do MDE e são cruciais para que seja possível realizar a extração automática de redes de drenagem a partir do MDE (BARNES; LEHMAN; MULLA, 2014a; GONG; XIE, 2009; JIANG et al., 2013; QIN et al., 2018; SONG et al., 2012; YILDIRIM et al., 2015; ZHU; TIAN; ZHAO, 2006a).

2.2.1 *Filtragem de dados inválidos*

A aquisição de dados por Sensoriamento Remoto não está livre de ruídos ou erros que podem ser introduzidos pelo sistema sensor. Tais erros podem ser de origem eletrônica ou ambiental, proveniente da posição relativa entre o sensor e o alvo na superfície, por causa de regiões sobrepostas; das condições atmosféricas, principalmente para sensores passivos (que dependem da luz solar ou outra fonte de luz); espalhamento atmosférico da luz na direção do campo de visada do sensor; entre outros fatores (JENSEN, 2009). Para que esses erros sejam removidos são aplicadas técnicas de processamento digital de imagens, entretanto o produto final pode ainda conter ruídos.

Modelos Digitais de Elevação representam dados topográficos, ou seja, caracterizam o relevo da região. Considerando que o relevo varia de forma relativamente suave frente a outras variáveis, quanto mais próxima uma região da outra, mais próximos serão os seus valores de altitude. Nesse caso, podem-se filtrar os pixels com valores inválidos, atribuindo a eles um valor derivado dos seus vizinhos. Procedimentos como média aritmética, vizinho mais próximo ou métodos de interpolação diversos têm sido utilizados.

Entretanto, essa abordagem desconsidera regiões com grandes declividades, visto que nesse caso o relevo não varia de forma suave e os valores atribuídos pela média dos vizinhos podem apresentar valores que não correspondem com a realidade. Ressalta-se ainda que, dependendo da quantidade de ruídos na imagem, pode-se considerar que o uso da imagem com ruídos é preferencial em comparação com uma imagem filtrada. Por fim, vale frisar que os pontos inseridos a partir de métodos de filtragens são inferências e também podem ser considerados como ruídos.

2.2.2 *Remoção das depressões*

2.2.2.1 Aspectos gerais

Para obter a rede de drenagem a partir de MDE é preciso identificar as direções de escoamento de cada pixel, ou seja, é preciso que: (1) cada pixel do MDE tenha sua direção de fluxo definida; e (2) que a partir de cada pixel, seguindo a direção de fluxo pixel a pixel a jusante dele, seja sempre possível chegar à borda do MDE. Esses requisitos são dificultados de serem alcançados pela presença de depressões e área planas no MDE (BARNES; LEHMAN; MULLA, 2014a). Isso ocorre porque o escoamento superficial se dá de acordo com a diferença de altitude entre pixels vizinhos, tendo a sua direção formada a partir do ponto de maior altitude para o ponto de menor altitude. Por esse motivo, torna-se uma condição existir uma diferença de altitude, e que essa diferença de altitude aconteça também para os próximos pontos, para que assim o escoamento continue, ou seja, um conjunto de pixels de mesma altitude.

Em um MDE, uma depressão pode ser definida como um pixel ou um conjunto de pixels que possui todos os seus vizinhos com valores de altitudes superiores a sua, podendo ser natural do terreno ou proveniente de imperfeições, erros ou ainda ruídos, ao se adquirir o MDE (YILDIRIM et al., 2015). Tais erros podem ser provocados pela interpolação durante a geração do MDE ou oriundos de truncamento ou arredondamento de valores interpolados (MARTZ; GARBRECHT, 1998). São comuns em MDE de baixa resolução espacial, principalmente em regiões com relevo suave ou plano. Nessa situação, com a proximidade dos valores de altitudes entre si e a baixa precisão altimétrica apresentada por esses dados, pode-se atribuir aos pixels valores de altitude espúrios, formando assim depressões que não correspondem com a realidade do terreno (MARTZ; GARBRECHT, 1998; WANG; LIU, 2006).

Tendo em vista que a rede de drenagem em um MDE é um caminho de fluxo de drenagem representado por um conjunto de pixels, cujo escoamento se dá de um pixel a montante para um pixel a jusante, a remoção de depressão é uma etapa essencial para que haja essa representação do caminho do escoamento e para que seja possível extrair a rede de drenagem a partir dele. Pois, a presença de depressões no MDE impede que o fluxo de água simulado seja drenado desde o pixel em análise até um pixel da borda do MDE. E caso o MDE seja processado sem que as depressões sejam removidas, o resultado obtido é

constituído por caminhos de fluxo desconectados e sub-bacias hidrográficas interiores que não correspondem com a realidade (WANG; LIU, 2006).

Vale ressaltar que mesmo que o objetivo seja remover depressões espúrias, provenientes de erros na aquisição do MDE, ao se aplicar algoritmos de remoção de depressões, as depressões naturais também podem ser removidas. Isso pode produzir como resultado um MDE que represente o relevo distinto do real (YAN; TANG; PILESJÖ, 2018). Como forma de evitar que tal fato ocorra, seria necessário aplicar o método apenas nas regiões que apresentem depressões que impactam de uma maneira hidrologicamente significativa, o que não provocaria alterações nas partes não problemáticas do MDE (WANG; LIU, 2006). Porém, é pertinente que se leve em consideração que existe uma maior probabilidade de as depressões serem provenientes de erros ao adquirir o MDE do que de origem natural (GOODCHILD; MARK, 1987; MARK, 1984).

Para que sejam removidas as depressões de uma área de estudo qualquer (Figura 7-a), existe duas abordagens principais: i) preencher a depressão, ou seja, elevar o pixel ou conjunto de pixels para o valor de altitude do pixel de menor altitude da vizinhança que garanta o escoamento (Figura 7-b); ii) escavar ou rebaixar os pixels a jusante do pixel ou conjunto de pixels da depressão, atribuindo a eles um valor de altitude menor (Figura 7-c).

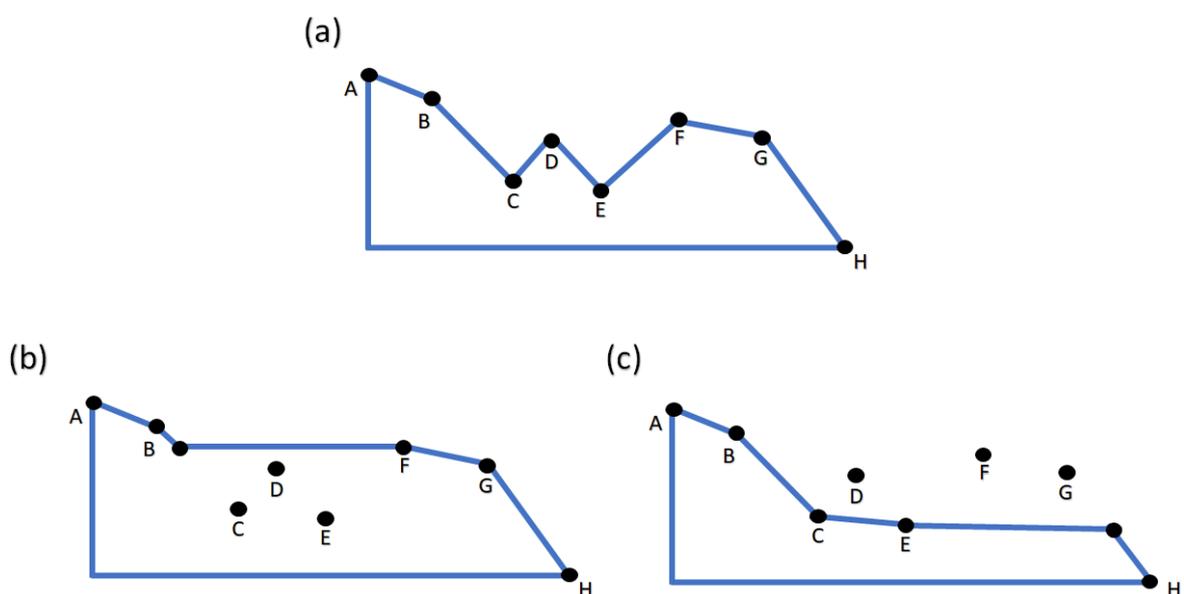


Figura 7 – Representação das abordagens de remoção de depressões: preencher e rebaixar. (a) Perfil longitudinal de uma região com duas depressões aninhadas, dentro de uma maior.

Ponto mais a montante é o ponto A e ponto mais a jusante o ponto H; (b) Preenchimento das depressões; e (c) Rebaixamento das regiões a jusante das depressões.

Apesar da alteração no relevo provocada pela abordagem de rebaixamento ser mais significativa no exemplo da Figura 7, em cada caso esse impacto de modificação pode ser maior para rebaixamento ou para preenchimento (LIDBERG et al., 2017; LINDSAY; DHUN, 2015). Por esse motivo, alguns algoritmos utilizam a combinação dessas duas abordagens (LINDSAY, 2016a; SOILLE, 2004).

2.2.2.2 Abordagem de Marks et al. (1984) e O'Callaghan e Mark (1984)

Uma das primeiras metodologias encontradas na literatura foi proposta por Marks et al. (1984) e O'Callaghan e Mark (1984), segundo a qual as depressões são interpretadas como lagoas ou reservatórios individuais e o objetivo do método de correção é identificar qual valor mínimo de altitude garante o escoamento para a vizinhança da depressão. Para isso, de forma prática o algoritmo realiza uma simulação de inundação gradual da depressão, em outras palavras, a cota de inundação da depressão é gradativamente aumentada até que ocorra o escoamento a partir de um pixel, denominado de exutório da depressão (MARKS; DOZIER; FREW, 1984; O'CALLAGHAN; MARK, 1984).

O primeiro passo do método para remover as depressões consiste em identificar os pixels de depressão através de uma janela 3 x 3 percorrendo todo o MDE. Marcam-se como pixels de depressão todos aqueles com elevação menor ou igual à de seus oito vizinhos. Esses pixels são ordenados de forma crescente, de acordo com seus valores de elevação, e tratados sequencialmente. O ponto de depressão com a menor elevação é processado primeiro para delinear sua área de captação interior, subindo recursivamente a montante e rotulando todos os pixels que drenam para ele, até que se identifiquem todos os pixels do interior da depressão. Em seguida, os pixels limítrofes da depressão são identificados e é selecionado o de mais baixa altitude, o qual é marcado como o exutório da depressão. Esse exutório caracteriza por onde a água sairia se a depressão estivesse cheia d'água. O passo final é atribuir aos pixels contidos no interior da depressão valores de elevação superior ao do exutório, garantindo que haja o escoamento de todos os pixels

da depressão (MARKS; DOZIER; FREW, 1984; O'CALLAGHAN; MARK, 1984; WANG; LIU, 2006).

A Figura 8 (i) apresenta um perfil longitudinal de uma região cujo terreno apresenta duas pequenas depressões, as quais estão contidas de forma aninhada em uma maior. Para que seja possível remover todas as depressões dessa região, faz-se necessária a aplicação do método de Marks et al. (1984) e O'Callaghan e Mark (1984) de forma iterativa. Na primeira iteração, as duas depressões menores são identificadas e preenchidas (Figura 8-ii). Em seguida, em uma segunda iteração, deve-se identificar e preencher a depressão maior (Figura 8-iii). O resultado final da remoção das depressões está representado na Figura 8-iv. Nota-se que foi produzida uma região plana, e tal questão é tratada por outros métodos.

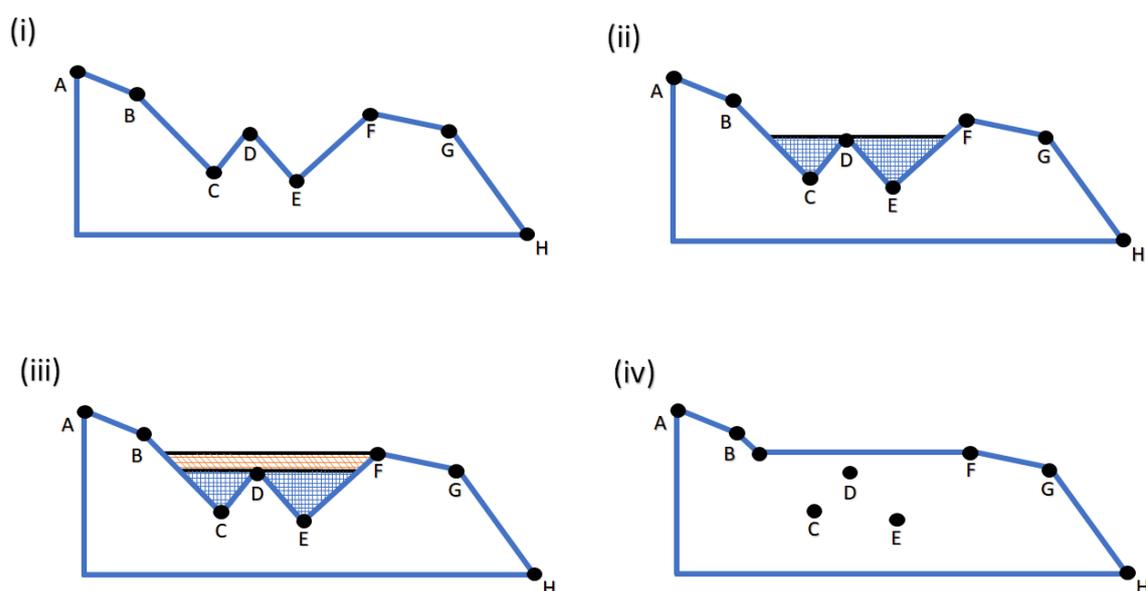


Figura 8 – Representação do método de preenchimento de depressões, proposto por Marks et al. (1984) e O'Callaghan e Mark (1984). (i) Perfil longitudinal de uma região com duas depressões aninhadas, dentro de uma maior. Ponto mais a montante é o ponto A e ponto mais a jusante o ponto H; (ii) Duas pequenas depressões são preenchidas na primeira iteração; (iii) A depressão maior, com fundo plano, é preenchida na segunda iteração; e (iv) Perfil longitudinal final, sem depressões. Fonte: adaptado de (WANG; LIU, 2006).

O fato de ser necessária mais de uma iteração para remover depressões aninhadas faz com que o método proposto por Marks et al. (1984) e O'Callaghan e Mark (1984) não consiga lidar de forma eficiente com depressões complexas. Além disso, a inclusão de

áreas planas é outro aspecto negativo do método. Por esse motivo, outros autores propuseram melhorias a essa abordagem, com o objetivo de solucionar os aspectos negativos mencionados.

Uma alternativa encontrada para evitar a necessidade de iterações foi aumentar o tamanho da janela de varredura do MDE de 3 x 3 para 10 x 10 (MARTZ; JONG, 1988). Havendo depressões aninhadas, a janela de varredura móvel é ampliada e a região interna da depressão é novamente analisada. Dessa forma, esse método trata as depressões aninhadas em uma única iteração.

2.2.2.3 Abordagem de Jenson e Domingue (1988)

Jenson e Domingue (1988) desenvolveram um método semelhante às abordagens anteriores mencionadas, porém sendo capaz de lidar com depressões complexas, além de ser mais eficiente e operacionalmente viável para a época (WANG; LIU, 2006). Tendo como objetivo diminuir o tempo de processamento, todas as depressões simples, depressões de um único pixel em relação aos seus oito vizinhos, são preenchidas primeiro. Para isso, é aumentada a elevação de cada pixel à elevação do seu vizinho de menor elevação, sendo este definido como exutório. Esta etapa reduz o número de depressões que precisam ser tratadas nas etapas posteriores.

Em seguida, as direções de fluxo são calculadas para cada pixel do MDE. São identificadas e rotuladas as regiões do interior e as regiões de contribuição de drenagem de cada depressão usando para isso as direções de fluxo calculadas na etapa anterior. Com isso, cada depressão passa a ser entendida pelo método como uma sub-bacia, tendo a sua região de contribuição de drenagem e o seu exutório para a sub-bacia adjacente.

Portanto, após a identificação das áreas de contribuição de cada sub-bacia, resta identificar os pontos de escoamento de cada depressão do MDE e dispor em uma tabela. Por fim, são analisados os caminhos de fluxo a partir dos exutórios até que a borda do MDE seja atingida. Entre todos os exutórios encontrados no caminho de fluxo a ser analisado, aquele com a elevação mais alta é selecionado. Em seguida, todos os pixels das regiões interiores das depressões com valores de altitude inferiores ao exutório mais alto são elevados para o valor deste (JENSON; DOMINGUE, 1988; WANG; LIU, 2006).

Para remover as depressões do mesmo perfil longitudinal apresentado na Figura 7 (a) e na Figura 8 (i), o método proposto por Jenson e Domingue (1988) remove as depressões da seguinte forma: as depressões são identificadas e divididas em sub-bacias com seus respectivos exutórios (Figura 9-b). As duas depressões aninhadas são mescladas em uma única depressão maior, e o exutório comum entre elas é descartado e retirado da tabela de exutórios, sendo definido um novo exutório (Figura 9-c). É rastreada a área de contribuição da depressão formada pela união das duas depressões aninhadas e todos os pixels da região de contribuição com valor de altitude inferior ao exutório são elevados para o valor deste (Figura 9-d).

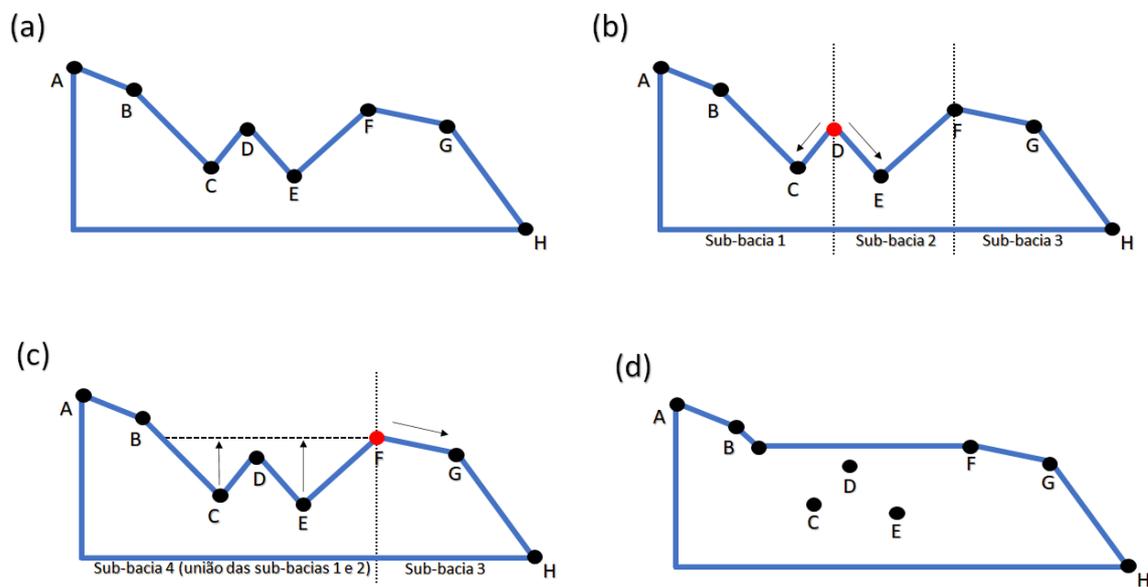


Figura 9 – Representação do método de preenchimento de depressões, proposto por Jenson e Domingue (1988). (a) Perfil longitudinal de uma região com duas depressões aninhadas, dentro de uma maior. Ponto mais a montante é o ponto A e ponto mais a jusante o ponto H; (b) Identificação das depressões, divididas em sub-bacias com suas respectivas áreas de contribuição de drenagem e pontos de escoamento para a sub-bacia adjacente (ponto D); (c) As duas sub-bacias 1 e 2 são mescladas e o ponto de escoamento em comum, ponto D, é suprimido. Os pixels da área de contribuição da depressão maior, formada pela união das depressões menores, que tiverem valor de altitude menor que o ponto de escoamento F, são elevados para o valor de altitude desse ponto; e (d) Perfil longitudinal final, sem depressões. Fonte: adaptado de (WANG; LIU, 2006).

Assim como os métodos anteriormente apresentados, o algoritmo de Jenson e Domingue (1988) também apresenta um custo computacional elevado quando aplicado para grandes áreas ou para dados com resolução espacial refinada. Isso se deve ao fato de que o método possui diversas etapas de processamento: cálculo das direções de fluxo de todos os pixels do MDE, identificação dos pontos de depressão, determinação das áreas contribuição para cada depressão, identificação de um exutório para cada depressão e fusão e preenchimento de depressões. Durante a execução do algoritmo, é requisitada uma grande quantidade de recursos computacionais, tais como gerenciamento de memória virtual e física, para acesso aos resultados intermediários, como direção de fluxo, área de contribuição de cada sub-bacia e exutórios.

Embora o algoritmo de Jenson e Domingue (1988) possa preencher várias depressões adjacentes ao mesmo tempo, cada depressão ainda precisa ser varrida sequencialmente para delinear o limite de captação interior e estabelecer a tabela de exutórios. Para um MDE com N pixels, o custo computacional desse método em relação ao tempo de processamento, segundo a notação *Big O*, é de $O(N^2)$, isto é proporcional ao quadrado da quantidade de pixels do MDE (PLANCHON; DARBOUX, 2001; WANG; LIU, 2006). A notação *Big O* foi introduzida por P. Bachman, (1892, apud Roussos, 2004) e pode expressar a complexidade de tempo, entretanto não é expressa em unidade de tempo. Representa a complexidade do processamento de um algoritmo baseado nos dados de entrada.

2.2.2.4 Abordagem de Planchon e Darboux (2001)

Um método mais recente, porém, tradicional por não ser proposto para lidar com dados com resolução espacial refinada, foi proposto por Planchon e Darboux (2001). Tal algoritmo tem por objetivo quantificar a capacidade de armazenamento das depressões presentes em um MDE, entretanto também é bastante utilizado para remoção de depressões. Sua metodologia consiste em inundar a superfície analisada atribuindo um valor de altitude elevado para a superfície da água simulada sobre todos os pixels do MDE e, em seguida, é simulada uma drenagem iterativa do excesso de água em relação ao valor de altitude de cada pixel.

Para encontrar um caminho de fluxo descendente para cada pixel e drenar completamente o excesso de água, são analisados seus oito vizinhos de forma alternada. Utiliza como estrutura de dados uma árvore tendo como raiz o pixel central e como nós os pixels adjacentes pertencentes ao caminho de fluxo até a borda do MDE. Uma busca progressiva é realizada através dos nós, com o objetivo de remover o excesso de água de todos os pixels da árvore. No final do processo, a água sobre uma depressão é drenada até que atinja o nível do ponto de escoamento mais alto, resultando em superfícies planas de depressão. Ressalta-se que este ponto de escoamento deve apresentar um caminho de fluxo a partir dele até um pixel da borda do MDE. A água nos pixels fora das áreas de contribuições de drenagem das depressões é completamente drenada e seus valores finais de elevação permanecem os mesmos de antes da inundação (WANG; LIU, 2006). A complexidade temporal deste algoritmo para lidar com um MDE com N pixels é de $O(N^{1.2})$ em média e $O(N^{1.5})$ no pior caso (PLANCHON; DARBOUX, 2001; WANG; LIU, 2006).

Se comparado aos métodos tradicionais apresentados anteriormente, tal algoritmo representa uma melhoria considerável na diminuição do tempo de processamento. No entanto, a varredura iterativa aos oito vizinhos de cada pixel do MDE ainda é uma etapa relativamente demorada. A diferença entre os tempos de processamento, $O(N^{1.2})$ em média e $O(N^{1.5})$, diz respeito à possibilidade de não ser necessária à execução da varredura de todos os vizinhos. Pois, se as primeiras rodadas de varreduras ocorrerem em uma direção favorável, o excesso de água poderá ser drenado rapidamente e o processo de varredura poderá terminar antes que todas as oito rodadas sejam concluídas. Na pior das hipóteses, são necessárias as oito rodadas de varreduras. Portanto, o tempo de execução desse método está condicionado pela orientação do terreno em relação aos oito vizinhos de cada pixel, além do número e tamanho das depressões presentes no MDE (PLANCHON; DARBOUX, 2001; WANG et al., 2011).

2.2.2.5 Aplicações de dados LiDAR

Como foram apresentados, vários algoritmos foram propostos baseados na abordagem de identificar e preencher as depressões (JENSON; DOMINGUE, 1988; MARKS; DOZIER; FREW, 1984; MARTZ; JONG, 1988; O'CALLAGHAN; MARK,

1984; PLANCHON; DARBOUX, 2001). Entre esses algoritmos, o desenvolvido por Jenson e Domingue (1988) é o mais conhecido e o mais utilizado, tendo sido implementado em muitos softwares de SIG e de modelagem hidrológica, incluindo ArcInfo (ESRI 1999), *Geographic Resources Analysis Support System* - GRASS (GRASS, 2020), TOPOZ (GARBRUCHT; MARTZ, 1997), TAUDM (TARBOTON, 1997) e TAPES-G (GALLANT; WILSON, 1996). Apesar da adoção do algoritmo de Jenson e Domingue, a identificação e o preenchimento das depressões continuam sendo uma das etapas mais demoradas na extração de redes de drenagem (WANG; LIU, 2006).

A localização e o preenchimento das depressões da superfície com o método convencional podem levar várias horas para um MDE de tamanho moderado obtido por levantamento LiDAR. Pois, devido à alta resolução espacial, os sistemas sensores LiDAR são capazes de identificar características sutis do terreno e sobre ele, tais como: rede de drenagem de riachos, linhas férreas e de transmissão de energia, pontes, edificações, árvores, lagoas, lagos e até poças d'água. Como consequência, o número de depressões presentes em um MDE com alta resolução espacial tende a ser muito maior, devido ao nível de detalhamento do terreno. Com isso conclui-se que, o uso de métodos convencionais para o preenchimento da depressão em MDE de resolução espacial refinada torna-se computacionalmente impraticável para o estudo de regiões representadas por uma grande matriz numérica de dados (WANG; LIU, 2006).

Novas abordagens foram necessárias para lidar com tamanha quantidade de dados, com o enfoque na otimização do gerenciamento de memória, na quantidade de acessos a dados armazenados, na paralelização do processamento e na redução das iterações e cálculos realizados durante o processo. Essas abordagens estão dispostas no tópico 2.4.3, sobre algoritmos de alto desempenho para remoção de depressões.

2.2.2.6 *Tratamento de área planas*

Uma área plana em um MDE pode ser definida matematicamente pela ausência de declividade (BARNES; LEHMAN; MULLA, 2014a). Tal situação, uma área verdadeiramente plana, com declividade igual zero, raramente pode ser encontrada na natureza, ao contrário do que ocorre ao representar o relevo através de amostras pontuais interpoladas (MDE). A presença de superfícies planas normalmente está relacionada a

outros fatores como: (1) a precisão vertical, que pode ser ainda mais exacerbada pela baixa precisão horizontal; (2) o preenchimento das depressões, elevando os pixels internos à depressão ao nível do exutório da depressão de mais baixa elevação; (3) a conversões do formato dos dados de altitude de real, ponto flutuante, para inteiro; e (4) a remoção de ruído (BARNES; LEHMAN; MULLA, 2014a; GARBRECHT; MARTZ, 1997; NARDI et al., 2008).

Ressalta-se a influência dos métodos de preenchimento de depressões, pois estes muitas vezes aumentam o tamanho e o número de planos em um MDE. Por exemplo, Nardi et al. (2008) apresentam um estudo em que são identificados de 28 a 162% de áreas planas a mais (Tabela 1), após o preenchimento de depressões utilizando o algoritmo proposto por Jenson e Domingue (1988).

Tabela 1 – Resultados encontrados por Nardi et at. (2008), sobre o impacto do algoritmo de preenchimento de depressões proposto por Jenson e Domingue (1988) no aumento de área planas em MDEs com resolução espacial degradada (desconsiderando as regiões de espelho d'água presente na área de estudo). Fonte: adaptado de (NARDI et al., 2008)

Bacia hidrográfica	Área (km ²)	MDE	Resolução (m)	Depressões (%)	Áreas planas antes da remoção de depressões (%)	Áreas planas após a remoção de depressões (%)	Diferença entre antes e após a remoção de depressões (%)
Tongue (EUA)	13.997,6	NDE	30	0,57	1,67	4,38	161,83
Snake Powder (EUA)	10.601,9	SRTM	30	0,11	5,07	7,14	40,89
Naches (EUA)	2.887,3	NDE	10	0,05	0,92	1,18	28,52
Spokane (EUA)	17.068,7	SRTM	30	0,13	7,02	11,50	63,80
Tevere (Itália)	17.279,2	IGMI	75	0,19	7,68	11,75	53,09

NED – *National Elevation Dataset* (fornecido pela USG); IGMI - *Italian Geographic Military Institute*

Apesar da alta inclusão de áreas planas após o preenchimento de depressões pelo algoritmo proposto por Jenson e Domingue (1988) nos resultados de Nardi et al. (2008), ressalta-se que o maior percentual de áreas planas encontradas foi de 11,75% dentre todos os pixels do MDE da bacia hidrográfica de Tevere (Itália); e o menor foi de 1,18%, para o MDE da bacia de Naches (EUA). Isso caracteriza que o problema existe, porém em relativamente poucos pixels do MDE, mesmo após o processamento de remoção de

depressões. Mesmo assim, qualquer que seja sua origem, as superfícies planas devem ser tratadas, quando se deseja obter as direções de fluxo de um MDE, já que as direções de fluxo em uma superfície perfeitamente plana são indeterminadas e isso causa impactos na precisão dos resultados obtidos (BARNES; LEHMAN; MULLA, 2014a; GARBRECHT; MARTZ, 1997; MARTZ; GARBRECHT, 1998; NARDI et al., 2008; TRIBE, 1992).

Para que isso seja possível, foram propostos na literatura: (1) modificações aos algoritmos de preenchimento de depressões, introduzindo uma declividade artificial para as áreas corrigidas (BARNES, 2016; BARNES; LEHMAN; MULLA, 2014b; WANG; LIU, 2006); (2) algoritmos especialistas para tratamento de áreas planas (BARNES; LEHMAN; MULLA, 2014a; FAIRFIELD; LEYMARIE, 1991; GARBRECHT; MARTZ, 1997; MARTZ; GARBRECHT, 1998; ORLANDINI et al., 2003).

Tais métodos, os de tratamento de áreas planas, se enquadram em duas categorias principais: (a) aqueles que estimam a direção de fluxo utilizando as informações do MDE original, sem qualquer modificação adicional; e (b) os que impõem uma declividade artificial no terreno, modificando a superfície como uma etapa preliminar antes de atribuir as direções de fluxo (NARDI et al., 2008).

O método proposto por Fairfield e Leymarie (1991) é um exemplo da abordagem (a), pois ao identificar mais de uma direção de fluxo possível para um pixel do MDE, atribui a direção de fluxo de forma randômica. Enquanto que o método proposto por Jenson e Domingue (1988), para o mesmo caso em que mais de uma direção de fluxo é identificada, atribui a primeira encontrada no sentido horário a partir do Norte. Tal fato faz com que sejam geradas drenagens paralelas que não correspondem com a realidade.

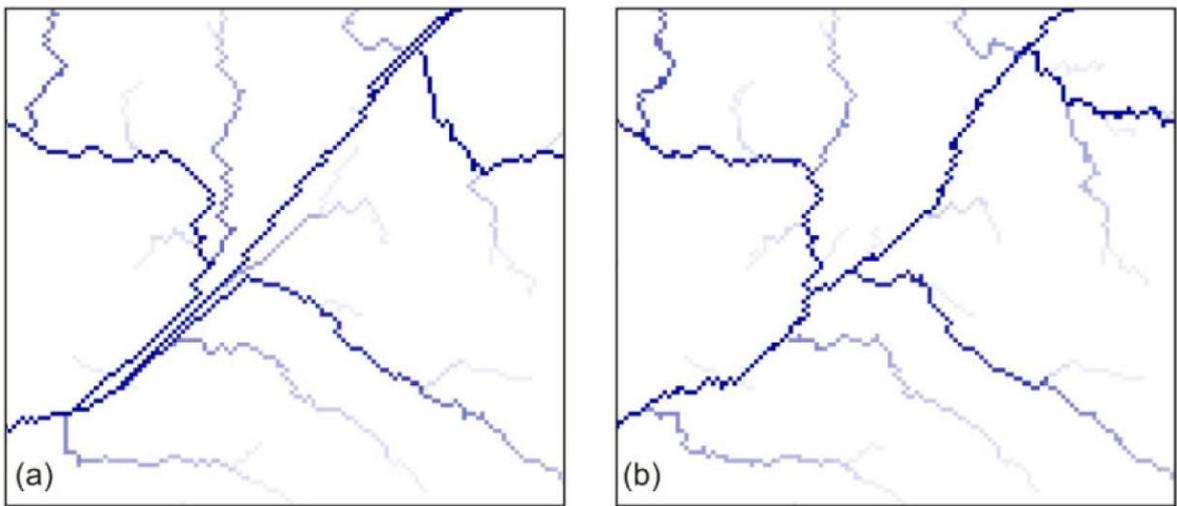


Figura 10 – (a) rede de drenagem derivada do algoritmo original proposto por Jenson e Domingue (1988) com vetores paralelos que não correspondem com a realidade. (b) rede de drenagem derivada pelo método proposto por Fairfield e Leymarie (1991) minimizando o problema de drenagens paralelas com o uso de um fator aleatório no algoritmo proposto por Jenson e Domingue (1988). Fonte: Paz e Collischonn, 2008.

O algoritmo proposto por Barnes et al. (2014b) é um exemplo da abordagem (b), no qual os autores realizaram melhorias do algoritmo proposto por Garbrecht e Martz (1997), dentre elas: não requer processamento iterativo, sendo uma única iteração suficiente para resolver todas as regiões planas; não ser suscetível à perda de precisão por truncamento de ponto flutuante; e um custo computacional expresso por $O(N)$, enquanto o algoritmo mais antigo era $O(N^{1.5})$ (BARNES; LEHMAN; MULLA, 2014b; GARBRECHT; MARTZ, 1997).

2.3 PROCESSAMENTO DO MDE

Após o pré-processamento do MDE, considera-se que este não apresenta ruídos, áreas planas e depressões. Com isso, tem-se um dado que representa a topografia da área de estudo e a partir dele é possível extrair a rede de drenagem, o que pode ser realizado através das seguintes etapas: (1) determinação das direções de fluxo; (2) cálculo das áreas acumuladas de drenagem; (3) obtenção da rede de drenagem. Estas etapas fazem parte do processamento do MDE.

Os produtos de cada uma dessas etapas são utilizados na caracterização de bacias hidrográficas e servem como subsídios para a modelagem hidrológica. Entretanto, existem diferentes aspectos que influenciam na extração da rede de drenagem e que dificultam a aplicação dessa metodologia. Dentre eles, destacam-se: as características topográficas da área de estudo; o custo computacional, quando se utiliza dados com alta resolução espacial ou de grandes áreas, requerendo algoritmos cada vez mais eficientes; e a precisão dos dados obtidos de acordo com as características geográficas detalhadas contidas no MDE e os algoritmos utilizados na extração automática (LI et al., 2020a; WEI; ZHOU; DONG, 2019).

Outro fator que influencia no resultado obtido na extração automática de rede de drenagem a partir de MDE é a identificação das nascentes ou a definição da área mínima de drenagem. Alguns autores se propõem a realizar o reconhecimento automático de nascentes, através da análise dos padrões e características geomorfológicas da área de interesse (BARBEDO; SIQUEIRA; COLLISCHONN, 2022; LI et al., 2020b; PASSALACQUA et al., 2010; SANGIREDDY et al., 2016).

A seguir são apresentadas as principais etapas do processamento da extração automática de rede de drenagem a partir de MDE.

2.3.1 *Direções de fluxo*

Assumindo que o fluxo d'água ocorre de regiões de maiores altitudes para regiões de menores altitudes, ou seja, de acordo com a declividade, a direção de fluxo de um pixel é a direção em que a água flui para fora deste pixel e tem como direção um ou mais pixels da sua vizinhança (JENSON; DOMINGUE, 1988). Para que seja possível extrair a rede de drenagem e posteriormente se consiga delimitar a bacia hidrográfica, faz-se necessário, a princípio, identificar as direções de fluxo de todos os pixels do MDE e que exista um caminho de fluxo de cada pixel até algum pixel da borda do MDE (WANG; LIU, 2006). Os algoritmos de direções de fluxo aplicados em MDEs podem ser categorizados em:

- métodos de identificação e atribuição de uma única direção de fluxo - denominados de algoritmos de direções de fluxo simples ou de métodos de oito direções (D8 ou *deterministic eight neighbours*) (JENSON; DOMINGUE, 1988). Essa abordagem tem por objetivo atribuir a direção de

fluxo de cada pixel em análise para apenas um dos seus oito vizinhos (COSTA-CABRAL; BURGESS, 1994; FAIRFIELD; LEYMARIE, 1991; GARBRECHT; MARTZ, 1997; JENSON; DOMINGUE, 1988; MARKS; DOZIER; FREW, 1984; O'CALLAGHAN; MARK, 1984; ORLANDINI et al., 2003);

- métodos de identificação e atribuição de múltiplas direções de fluxo - denominados de algoritmos de direções de fluxo dispersivos ou múltiplos. Nessa abordagem, atribui-se ao pixel em análise múltiplas direções de fluxo, particionando esse escoamento para dois ou mais dos seus 8 pixels vizinhos (COSTA-CABRAL; BURGESS, 1994; FREEMAN, 1991; LINDSAY, 2003; QUINN et al., 1991; QUINN; BEVEN; LAMB, 1995; TARBOTON, 1997).

O método de direção de fluxo D8, proposto por Marks *et al.* (1984) e O'Callaghan e Mark (1984), identifica a direção de fluxo através da maior declividade entre o pixel central e seus vizinhos. Para o cálculo da declividade são utilizados os valores de elevação e a distância entre eles. A distância entre pixels ortogonais é considerada igual à resolução espacial ($dx = \text{resolução espacial}$) e, entre pixels diagonais, é considerada como igual ao produto da raiz quadrada de dois pela resolução espacial ($dx = \sqrt{2} \times \text{resolução espacial}$) (PAZ; COLLISCHONN, 2008).

O resultado obtido após a aplicação do método é um raster codificado de acordo com a direção de fluxo do pixel central (x) para um dos oito pixels vizinhos. Caso o pixel em análise tenha valor de altitude inferior a todos os seus vizinhos, caracteriza uma depressão individual, é rotulado com um valor negativo, pois não apresenta direção de fluxo (JENSON; DOMINGUE, 1988). A Figura 11-a apresenta a codificação utilizada pelo método; a Figura 11-b ilustra um exemplo de uma matriz numérica com dados de elevação; a Figura 11-c apresenta as direções de fluxo de acordo com o método simples; e a Figura 11-d mostra o raster obtido através da aplicação do método D8.

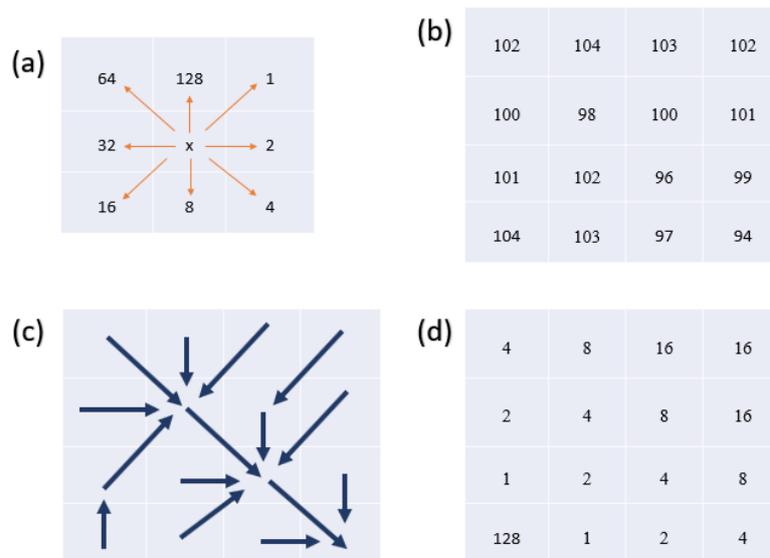


Figura 11 – Codificação de direção de fluxo através do método D8 proposto por Marks *et al.* (1984) e O'Callaghan e Mark (1984). (a) codificação utilizada pelo método; (b) exemplo de uma matriz numérica com dados de elevação; (c) direções de fluxo de acordo com o método simples; (d) raster obtido através da aplicação do D8.

Outros algoritmos que se baseiam no método D8 utilizam diferentes valores de codificação de direção de fluxo. Isso deve ser levando em consideração ao usar a informação, pois ao se utilizar o raster codificado em outros processos, pode-se causar interpretação equivocada e erro, portanto, nos caminhos de fluxo considerados, caso tal processo não esteja preparado para lidar com a codificação utilizada. A Figura 12 apresenta alguns exemplos.



Figura 12 – Valores de codificação para o raster de direções de fluxo obtido por diferentes métodos que se baseiam no método D8. (a) codificação do método D8 (JENSON; DOMINGUE, 1988); (b) codificação do método implementado no *software* TerrSet (CLARCK LABS, 2020); (c) codificação do método implementado no RichDEM (BARNES, 2017); (d) codificação do método implementado no *software* ArcGis (ESRI, 2020); (e) codificação do método implementado no *software* SAGA Gis (SAGA GIS, 2020).

2.3.2 Área acumulada de drenagem

A área acumulada de drenagem de um pixel corresponde à quantidade de pixels ou à soma da área superficial de todos os pixels cujo escoamento contribui para o pixel em análise (JENSON; DOMINGUE, 1988; O'CALLAGHAN; MARK, 1984; PAZ; COLLISCHONN, 2008). Caso nenhum pixel escoe para o pixel em análise, seu valor de acumulação de fluxo, normalmente, é igual a 1 pixel ou a área desse pixel.

Para realizar o procedimento de determinação de áreas acumuladas de drenagem, utiliza-se como entrada apenas o raster codificado com as direções de fluxo, e o produto gerado pelo método é um raster onde cada pixel, ao invés de representar o valor de altitude (MDE), representa o somatório da área superficial de drenagem acumulada. A área superficial do pixel está diretamente relacionada à resolução espacial do MDE utilizado:

$$\text{Área superficial} = \text{resolução espacial}^2 \quad \text{Equação (2)}$$

Entretanto, para o estudo de grandes áreas, devido às distorções dos sistemas de coordenadas e dos sistemas de projeções, as áreas dos pixels têm valores distintos de acordo com sua posição geográfica e a equivalência de graus para unidades planas (PAZ; COLLISCHONN, 2008).

O custo computacional para calcular as áreas acumuladas de drenagem de MDEs de com alta resolução espacial, usando métodos convencionais, pode ser proibitivamente longo. Por este motivo, nos últimos anos, novos algoritmos foram propostos com o objetivo de reduzir o custo computacional e possibilitar o uso desses dados para grandes áreas de estudo (BARNES, 2017; ZHOU; WEI; FU, 2019). Estes métodos são apresentados no tópico 2.4.4, que aborda os algoritmos de alto desempenho para cálculo de área acumulada de drenagem.

2.3.3 *Rede de drenagem*

Embora o raster resultante do procedimento de cálculo da área acumulada de drenagem indique para cada pixel a área de contribuição de drenagem até este, isso não indica que todos os pixels apresentem cursos d'água a montante ou mesmo que ele seja parte de um curso d'água (PAZ; COLLISCHONN, 2008). Para que seja possível identificar as redes de drenagem propriamente, têm-se três possibilidades: (1) ter conhecimento das coordenadas precisas das nascentes dessas redes de drenagens; (2) utilizar métodos de análise de parâmetros geomorfológicos com a finalidade de identificar de forma automática as nascentes (ISTANBULLUOGLU et al., 2002; LI et al., 2020a; MCNAMARA et al., 2006; SANGIREDDY et al., 2016); (3) atribuir um valor de área de drenagem mínima, acima do qual se considera que existam cursos d'água naquela área de estudo (JENSON; DOMINGUE, 1988; MARKS; DOZIER; FREW, 1984; O'CALLAGHAN; MARK, 1984).

A primeira abordagem depende de conhecimento prévio das coordenadas precisas das nascentes, caso contrário pode ser obtida com a coleta dos dados em campo ou através dos dados espaciais disponíveis da área de estudo, tais como ortofotos e imagens de satélite na faixa espectral do visível com resolução espacial refinada. Isto faz com que essa abordagem seja bastante limitada, devido às dificuldades de se obter tais informações.

A respeito da segunda abordagem, alguns autores têm-se dedicado a desenvolver métodos de identificação de forma automática a partir de características físicas da bacia. Porém, cabe ressaltar que devido ao aumento da resolução espacial, trata-se de mais um processo que necessita de ajustes no custo computacional para que seja capaz de lidar com tais dados, ou até de ajustar os procedimentos e as inferências já realizadas baseando-se em dados com baixa resolução espacial.

Por fim, em relação à terceira abordagem, considera-se que essa seja a mais acessível e com menor custo computacional, até o momento, e é a mais utilizada largamente. Por exemplo, tal procedimento está formalmente instituído em softwares como ArcGis e SAGA GIS. Entretanto, o limiar de área de drenagem utilizado influencia diretamente nos parâmetros da rede de drenagem derivada. Por esse motivo, Fan et al. (2013) procuraram relacionar a definição de limiar com características físicas como solos, cobertura vegetal, geologia, e hidrológicos como chuvas e regime de vazões, para servir de indicador para a escolha do valor ideal. Também propuseram uma alternativa a essa abordagem, usando a variação espacial do limiar na bacia hidrográfica, em outras palavras a atribuição de diferentes valores para regiões distintas da mesma área de interesse, partindo do princípio que um único valor de limiar não representaria as características divergentes da área de estudo (FAN et al., 2013), como adotado por Dantas e Paz (2021).

2.3.4 Comprimento da rede de drenagem

Após a identificação das redes de drenagens da área de estudo, seja ela por qualquer uma das três abordagens apresentadas, é possível quantificar os seus comprimentos (PAZ; COLLISCHONN, 2008). Ressalta-se que o processo se dá em cadeia e que cada etapa influencia na etapa seguinte, desde o pré-processamento até a definição das direções de fluxo. Sendo o raster de direções de fluxo o dado base para os processos seguintes, este influencia diretamente a estimativa dos comprimentos da rede de drenagem. Entende-se por distância hidrológica da rede de drenagem, o comprimento do caminho que uma gota d'água seguiria na superfície do terreno, desde o pixel mais a montante até o exutório (NARDI et al., 2008).

Análogo ao entendimento utilizado para o cálculo da declividade, a distância entre pixels é dada por: entre pixels ortogonais, igual à resolução espacial

($\Delta x = \text{resolução espacial}$); e entre pixels diagonais, igual ao produto da raiz quadrada de dois pela resolução espacial ($\Delta x = \sqrt{2} \times \text{resolução espacial}$). O cálculo do comprimento da rede de drenagem consiste na soma das distâncias entre todos os pixels do caminho de fluxo desta, desde a nascente até o exutório ($\text{comprimento} = \sum dx$).

2.4 Algoritmos de alto desempenho para processamento do MDE

2.4.1 Limitações dos algoritmos convencionais

Como já foi citado anteriormente, com o avanço tecnológico, mais especificamente dos equipamentos e sensores remotos de obtenção de MDE, tornou-se possível adquirir dados com resoluções espaciais cada vez menores, que por consequência resultam em uma grande quantidade de dados. Dados de alta resolução espacial possuem um tamanho de armazenamento considerável e para o processamento destes dados alguns algoritmos recomendam ter um espaço livre de pelo menos quatro vezes o tamanho do MDE de entrada. Essa recomendação se deve ao fato de que os algoritmos criam arquivos temporários durante a execução, além do espaço necessário para armazenar o resultado do processamento.

Tal fato requer, além de maior espaço de armazenamento, um maior e melhor gerenciamento de memória por parte dos algoritmos (YILDIRIM et al., 2015). Isto pode ser exemplificado através da limitação própria do algoritmo de remoção de depressões disponível no *software* TerrSet, o qual traz na sua documentação a seguinte limitação: “O algoritmo de remoção de depressões é um módulo intenso computacionalmente e, portanto, não é capaz de processar imagens com mais de 32 mil linhas e colunas.” (CLARK LABS, 2020). Tal limitação diz respeito ao algoritmo, nesse caso. Porém de acordo com o hardware do computador a ser utilizado, essa limitação pode ser ainda maior, ou passar a ser uma limitação para usar um algoritmo que em si não tem limitação.

Vale ressaltar que, mesmo que o computador a ser utilizado seja capaz de processar a quantidade máxima permitida pelo algoritmo, devido à sua arquitetura, a forma como o algoritmo foi implementado, o custo computacional, ou seja, o tempo de processamento pode ser considerável. Portanto, os algoritmos tradicionais estão limitados ao tamanho das matrizes numéricas do MDE e, por essa razão, mesmo quando são capazes de processar,

tornam-se proibitivamente demorados quando aplicados a dados com alta resolução espacial (WALLIS et al., 2009).

2.4.2 *Perspectivas dos algoritmos de alto desempenho*

Tendo em vista essas limitações, algoritmos têm sido desenvolvidos com o objetivo de melhorar a eficiência, diminuir o tempo de execução, e fornecer uma maior capacidade para executar MDE com alta resolução espacial, com grandes matrizes numéricas. Muitos deles recorrem à computação paralela das funções de análise de terreno, dentre elas a remoção de depressões e do cálculo das áreas acumuladas de drenagem. A princípio, a paralelização se dava via processamento em computadores interligados, o que permitia a divisão das tarefas em mais de um processador, porém o tempo de troca de informação entre as máquinas era um aspecto negativo dessa estratégia.

Com o surgimento de processadores com vários núcleos, denominados de processadores *multi-core*, tornou-se possível paralelizar sem ter um custo de troca de informação entre máquinas. Associados a esses processadores, pode-se utilizar ainda os núcleos de processamento das placas gráficas GPUs (*Graphics Processing Unit*), em particular utilizando a arquitetura CUDA (*Compute Unified Device Architecture*) da NVIDIA. As GPUs possibilitam uma maior eficiência na manipulação da memória, acelerando ainda mais os processos entre diferentes núcleos (NVIDIA, 2008).

A arquitetura CUDA permite a implementação de algoritmos em GPUs com esforço inferior a outras arquiteturas, pois não requer conhecimento de computação paralela, devido a sua abstração da linguagem computacional ser de alto nível, possibilitando a reescrita das soluções de processamento de MDEs por um maior número de profissionais (ORTEGA; RUEDA, 2010). O custo de aquisição de máquinas com tais recursos ainda é alto. Isso faz com que ainda se busque por soluções que sejam capazes de serem utilizadas tanto em computadores de uso pessoal, quanto em *workstations* ou até mesmo em supercomputadores (LIU et al., 2018).

Nesse sentido, o RichDEM, proposto por Barnes (2016, 2017) possui soluções, para a remoção de depressões e cálculo de área acumulada de drenagem, através de processamento paralelo de blocos de pixels e/ou retalhos do MDE de entrada. Isso possibilita a sua utilização em computadores com processadores com um ou vários núcleos

de processamento. Esses métodos garantem que, independentemente do tamanho do MDE, cada pixel seja acessado apenas um número fixo de vezes e apenas um número fixo de eventos de comunicação de baixo custo seja necessário. Essas propriedades permitem que esse algoritmo possa ser executado com eficiência em computadores pessoais ou em supercomputadores. Além disso, na sua concepção se buscou eficiência em termos de tempo, espaço de armazenamento em disco rígido durante o processo e complexidade de comunicação (leitura e escrita de dados) (BARNES, 2016, 2017).

Os algoritmos de extração de depressões e cálculo de área acumulada de drenagem do RichDEM, além de outros, estão disponíveis em código aberto no repositório do próprio autor, sendo possível modificar e adaptar o código fonte (BARNES, 2018). Através da leitura do algoritmo entende-se o mecanismo e a metodologia empregada, permitindo um aprofundamento e apropriação do conhecimento envolvido. Além disso, a possibilidade de alteração torna um atrativo a mais para essa solução, pois permite empregar diferentes metodologias.

A seguir são apresentados algoritmos de alto desempenho proposto na literatura para extração automática de rede de drenagem e para cálculo de área acumulada de drenagem a partir de MDE.

2.4.3 *Algoritmos de alto desempenho para remoção de depressões*

Os algoritmos encontrados, na sua maioria, se valeram da divisão da enorme quantidade de dados, seja através da divisão do MDE de entrada em retalhos ou na paralelização em núcleos de processamento. Em comum a todas as abordagens, o foco dos métodos foi à busca pela otimização do uso e gerenciamento dos recursos de *hardware* disponíveis, principalmente da memória. Tal recurso é limitante para o processamento dos dados, uma vez que a não disponibilidade da quantidade de memória requerida resulta em erro e encerramento do processo.

Ressalta-se a importância da disponibilidade e do fácil acesso a esses algoritmos propostos, principalmente através de *softwares* livres, para que seja possível o uso e a análise das soluções propostas por um maior número de pessoas. O Quadro 1 apresenta uma síntese de alguns dos algoritmos que se preocuparam em diminuir o custo

computacional do processamento da remoção de depressões de MDE com alta resolução espacial.

Quadro 1 – Alguns dos algoritmos que se propõem a diminuir o custo computacional para remover depressões de MDE com alta resolução espacial.

Autores	Solução	Análise crítica
(WANG; LIU, 2006)	Utiliza o conceito de elevação de derramamento, atribuindo para toda área de estudo uma simulação de espelho d'água de mais alta altitude e o decresce até encontrar todos os pontos de escoamento. Prioriza a busca de menor custo por caminhos ideais de fluxo. Custo computacional de $O(N \log N)$ no pior cenário.	Disponível em <i>software</i> livre (SAGA GIS), o que faz com que essa solução seja acessível. Disponível em duas versões, uma que gera, além do MDE sem depressões, as direções de fluxos, as áreas acumuladas de drenagem e a identificação automática da delimitação das bacias; a outra gera apenas o MDE sem depressões, sendo esta solução a recomendada para MDE de alta resolução espacial e de grande quantidade de dados.
(GONG; XIE, 2009)	Divide a área de estudo em pequenas áreas independentes e as processa separadamente em uma infraestrutura com computadores interligados.	Usa uma rede de computadores para paralelizar a solução. Esse tipo de infraestrutura requer troca de informações entre máquinas o que torna a solução de baixo desempenho, comparada com soluções em <i>multi-core</i> .
(WALLIS et al., 2009)	Utilizou agentes independentes, inteligência artificial, para a remoção de depressões e elevações espúrias. O escaneamento realizado por um agente é informado aos vizinhos, permitindo a solução para toda a área de estudo.	Requer troca de informações entre os agentes através de múltiplos acessos à memória. Não é uma solução ainda de alto desempenho, tendo sido uma das primeiras abordagens de paralelismo da solução.
(YILDIRIM et al., 2015)	Divide a área de estudo em retalhos e os processa através do compartilhamento e gerenciamento eficiente de memória de uma única máquina. Utiliza algoritmo paralelo com	Caso o MDE não possa ser armazenado inteiramente na memória, os retalhos são armazenados no disco rígido, uso da memória virtual. Utiliza uma <i>thread</i> exclusiva para leitura e escrita dos dados e as outras para processamento dos retalhos.

Autores	Solução	Análise crítica
	virtualização de memória e <i>multi threads</i> .	A quantidade de troca de informação entre as <i>threads</i> torna uma desvantagem dessa solução.
(BARNES; LEHMAN; MULLA, 2014b)	Realiza melhorias a diversos algoritmos propostos na literatura. Ao utilizar o método, pode-se escolher quais dos métodos aprimorados utilizar. Proporciona uma solução capaz de lidar bem com dados de elevação inteiro ou real. Entretanto, apresenta custo computacional distinto entre esses dois tipos de dados ($O(N)$ e $O(N\log_2 N)$, respectivamente). Reduz até 37% do custo apresentado pelos algoritmos originais.	Disponível através de bibliotecas, na linguagem de programação C++ ou Python. Necessita de uma configuração da infraestrutura computacional. Não apresenta interface gráfica, devendo ser executado através de linha de comando, ou incorporado a um algoritmo desenvolvido pelo usuário. De acordo com a quantidade de memória disponível, consegue processar matrizes numéricas maiores. Porém, limitado a capacidade da biblioteca GDAL, para lidar com grandes dados raster. Essa solução não é capaz de lidar com grande quantidade de dados.
(BARNES, 2016)	Solução baseada na segmentação do MDE em retalhos, capaz de processar grande quantidade de dados mesmo em computadores pessoais. Seu desempenho é favorecido caso seja processado em ambiente computacionais mais robustos. Focado na redução de acesso a memória física e virtual, como forma de redução de recursos e diminuição do custo computacional. Capaz de processar dois trilhões de pixels em 287 min (4,8 h). Quanto maior a quantidade de núcleos de processamento menor o custo computacional.	Disponível através de repositório, aberto à comunidade de usuário. Entretanto, necessita de conhecimentos técnicos para configurar o ambiente computacional. Dá preferência a sistema operacional baseado em UNIX (Linux). Requer a configuração de diversas bibliotecas, dentre elas <i>OpenMPI</i> e GDAL. Mesmo que queira utilizar em um único núcleo de processamento é preciso utilizar a biblioteca de comunicação entre processos paralelos (<i>OpenMPI</i>). Não apresenta interface gráfica, devendo ser executado através de linhas de comando. Isso dificulta o seu uso, principalmente para os usuários sem os conhecimentos técnicos requisitados. Todos os retalhos devem ter a mesma quantidade de linhas e colunas.

2.4.4 Algoritmos de alto desempenho para cálculo de área acumulada de drenagem

O Quadro 2 apresenta alguns dos algoritmos convencionais e de alto desempenho propostos para calcular a área acumulada de drenagem.

Quadro 2 - Revisão da literatura a respeito dos métodos de cálculo de área acumulada de drenagem.

Autores	Solução	Crítica
(O'CALLAGHAN; MARK, 1984)	Baseado na análise da quantidade de caminhos de fluxo que drenam para cada pixel do MDE. Realizado através de processo iterativo, iniciando com custo computacional no pior dos casos de $O(N^2)$ e na média de $O(N^{1.5})$.	Um dos primeiros algoritmos propostos na literatura para o cálculo de área acumulada de drenagem. Apresenta um alto custo computacional, no melhor dos casos $O(N^{0.5})$. Entretanto, ainda é bastante utilizado, disponível no <i>software</i> ArcGIS.
(FREEMAN, 1991)	Este algoritmo calcula o valor de acumulação do pixel em análise, computando recursivamente os valores de acumulação de todos os pixels vizinhos que drenam para ele. Usa um processo iterativo, baseado no conceito de pilha e reduziu o custo computacional para $O(N)$.	Primeiro método proposto com custo computacional igual à dimensão da matriz numérica (N). Apesar disso, para os dados com grande matriz numérica esse custo computacional ainda é proibitivo.
(WANG et al., 2011)	Baseado no método proposto por O'Callaghan e Mark (1984), modificou-se o processo iterativo utilizando o conceito de fila simples. Reduziu-se o custo computacional para $O(N)$.	Apesar dos avanços obtidos, este método ainda apresenta um custo computacional superior à quantidade elementos da matriz numérica (N).
(JIANG et al., 2013)	Baseado no método proposto por O'Callaghan e Mark (1984), modificou o processo iterativo utilizando o conceito de pilha. Reduzindo o custo computacional para $O(N)$.	Apesar dos avanços, o custo computacional ainda é o mesmo do algoritmo proposto por Wang et al. (2011).

Autores	Solução	Crítica
(YAO; SHI, 2015)	Baseado no método proposto por O'Callaghan e Mark (1984), propuseram um método de varredura alternada para este algoritmo, reduzindo o custo computacional $O(N \log N)$.	Apesar dos avanços obtidos, este método ainda apresenta um custo computacional superior à quantidade elementos da matriz numérica (N).
(SU et al., 2015)	Utiliza o conceito de árvore para percorrer desde os pixels da borda do MDE, até o pixel mais a montante do caminho de fluxo. A área acumulada de drenagem é calculada percorrendo o caminho inverso. Apresenta custo computacional para $O(N)$.	Uma abordagem distinta das anteriores. Porém, ainda apresenta o mesmo custo computacional obtido por Wang et al. (2011) e Jiang et al. (2013).
(ZHANG et al., 2013)	Utiliza processo iterativo. O valor de acumulação de cada pixel é comparado com a soma dos valores de acumulação de todos os vizinhos que drenam para ele, atualizando o valor caso a soma seja maior que o valor atual. A iteração para quando não há alterações nos valores de acumulação de todas os pixels. Apresenta custo computacional de $O(N)$, podendo chegar a $O(N^2)$ no pior caso.	O número de iterações depende do comprimento do caminho de drenagem mais longo. Apesar de apresentar custo computacional de $O(N)$, pode chegar a $O(N^2)$ no pior caso. Fato que não favorece o seu uso.
(BARNES, 2017)	Utiliza processamento paralelo de blocos de pixels e/ou segmentação da área de estudo. Apresenta menor custo de acordo com a quantidade de memória e núcleos de processamento disponíveis. Porém, também pode ser processado com pouca memória, através do gerenciamento desta. Tem foco na redução de acesso	Apresenta as mesmas características do algoritmo paralelo de remoção de depressões disponível no RichDEM.

Autores	Solução	Crítica
	<p>aos dados armazenados na memória física e/ou volátil. Apresenta um custo computacional inferior comparado aos algoritmos até então disponíveis. O custo computacional é dado em função da quantidade de retalhos, $O(Tn)$, onde T é a quantidade de retalhos e n a quantidade de pixels do retalho.</p>	
(ZHOU; WEI; FU, 2019)	<p>Baseado no método proposto por O'Callaghan e Mark (1984), rotula os pixels em três tipos: pixels de origem, pixels internos e pixels de interseção. Um pixel de origem não tem nenhum pixel vizinho que drenam para ele, seu valor de acumulação é zero. Um pixel interior tem apenas um pixel vizinho que drena para ele, seu valor de acumulação é um. Um pixel de interseção tem mais de um pixel vizinho que drena para ele e seu valor é maior que um. Realiza processo iterativo até percorrer todos os caminhos de fluxos e rotular todos os pixels como internos. Apresenta custo computacional para $O(N)$.</p>	<p>Uma abordagem distinta das anteriores. Porém, ainda apresenta custo computacional $O(N)$.</p>

Como medida de contorno para o custo computacional é possível obter os dados em resolução espacial mais baixa, a partir das informações na resolução original. Isso pode ser feito através da agregação dos valores altimétricos dos pixels na resolução original, denominada de reamostragem (Figura 13–a), ou por meio do *upsampling* de direções de fluxo (Figura 13–b). Além da redução do custo computacional, o uso de determinadas

resoluções possibilita se valer de vários outros dados geoespaciais de diferentes resoluções, utilizados na modelagem hidrológica.

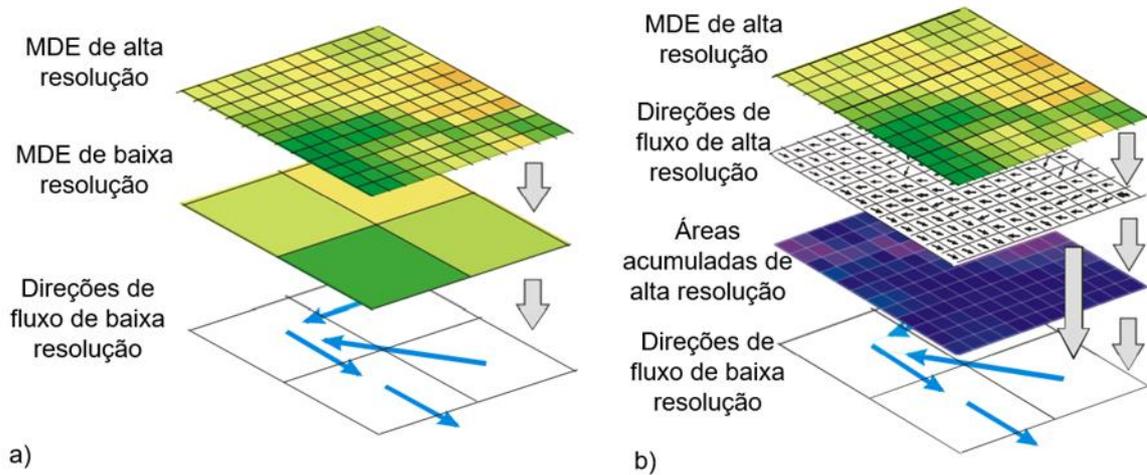


Figura 13 – a) Reamostragem dos pixels de MDE de alta resolução espacial para obtenção de MDE de baixa resolução e demais produtos para aquisição de rede de drenagem; b) *upscaling* de direções de fluxo de dados de alta resolução espacial para obtenção de direções de fluxo de baixa resolução espacial e demais produtos para extração automática de rede de drenagem. Fonte: Collischonn & Tucci (2005).

2.5 Derivação da rede de drenagem em resolução espacial menor que a original

2.5.1 Reamostragem espacial

A agregação dos pixels do MDE deve ser realizada através de algum critério, interpolador, que pode ser o maior ou menor valor, média e moda, por exemplo, ou o vizinho mais próximo, dentre outros. A reamostragem do MDE é bastante utilizada devido à sua simplicidade e fácil entendimento e execução em qualquer *software* de geoprocessamento e SIG. A partir do MDE derivado da reamostragem segue-se o fluxo metodológico de obtenção das direções de fluxo e demais produtos derivados desse, para obter a rede de drenagem, por exemplo.

Pode-se notar que esse procedimento acarreta perda de informação, proporcional à diferença entre a resolução espacial original e a reamostrada. Como consequência, espera-

se que a rede de drenagem extraída apresente maiores incompatibilidades com a rede de referência, Figura 14 (PAZ et al., 2008; REED, 2003; SHAW; MARTZ; PIETRONIRO, 2005).

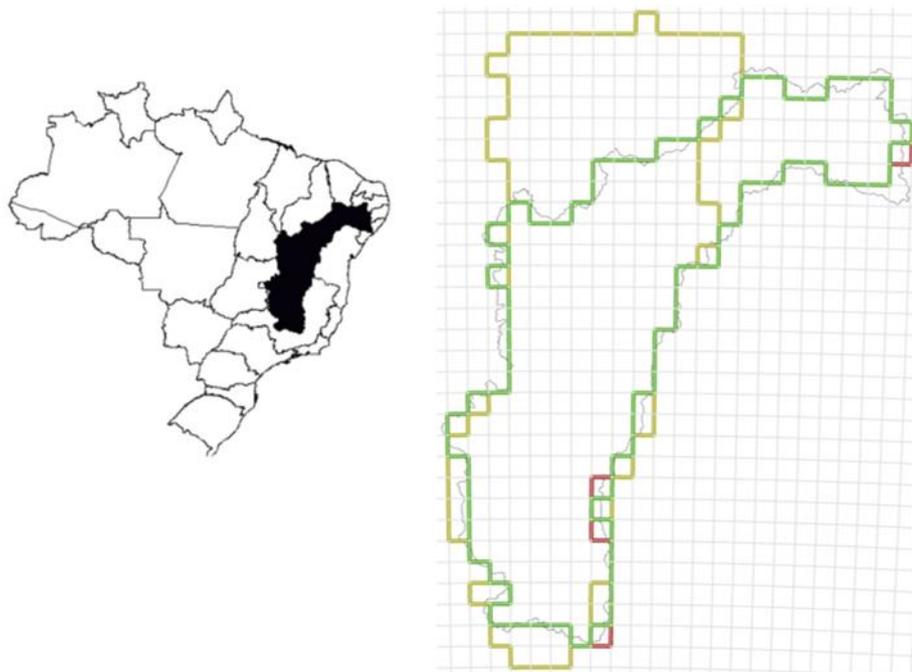


Figura 14 – Comparativo de delimitações da bacia do Rio São Francisco na resolução espacial de 50 km, considerando abordagem de reamostragem do MDE (amarelo) e via *upscaling* de direções de fluxo com algoritmo COTAT+ (verde). Fonte: adaptado de Saraiva e Paz (2014).

2.5.2 *Upscaling de direções de fluxo*

O método de extração das direções de fluxo em uma resolução espacial menor a partir das direções de fluxo de um MDE em uma resolução maior é denominado de *upscaling* de direções de fluxo (PAZ; COLLISCHONN; LOPES DA SILVEIRA, 2006). O *upscaling* se propõe a preservar informações importantes da rede de drenagem, na resolução original, na resolução desejada (YAMAZAKI; OKI; KANAE, 2009). Diferentes abordagens foram propostas na literatura (DÖLL; LEHNER, 2002; FEKETE; VÖRÖSMARTY; LAMMERS, 2001; O'DONNELL; NIJSSEN; LETTENMAIER, 1999; OLIVERA et al., 2002; PAZ; COLLISCHONN; LOPES DA SILVEIRA, 2006; REED,

2003; SHAW; MARTZ; PIETRONIRO, 2005a, 2005b; WANG; HJELMFELT; GARBRECHT, 2000; WU et al., 2011).

Dentre tais abordagens, o método COTAT+, proposto por Paz et al. (2006), baseia-se no método COTAT de Reed (2003) e identifica as direções de fluxo da célula de saída, com resolução espacial menor, analisando os pixels da resolução espacial maior através de dois parâmetros: (a) Área Incremental Mínima (AIM) de drenagem acumulada; (b) limite mínimo de caminho de fluxo a montante, denominado de Caminho Mínimo de Montante (CMM). Os valores dos parâmetros recomendados por Paz et al. (2006) para o limiar da AIM é de mesmo valor da área da célula e do CMM é de um quinto da dimensão da célula.

Segundo Paz et al. (2006), o uso de tal algoritmo de *upscaling* para a Bacia do Rio Grande reduziu drasticamente a demanda por correções manuais na rede de drenagem gerada para aplicação no modelo hidrológico. Diminuiu o tempo de preparo dessas informações a serem inseridas no mesmo, quando comparado a determinar a rede de drenagem a partir da reamostragem e posterior determinação das direções de fluxo. Além disso, o resultado do *upscaling* apresentou concordância com a rede de drenagem na resolução original superior, quando comparado aos resultados obtidos através da reamostragem.

Em estudo desenvolvido por Davies e Bell (2009), foram avaliados três métodos de *upscaling* de direções de fluxo e um método de reamostragem, visando gerar redes de drenagem para todo o território do Reino Unido e, em particular, para as bacias dos rios Severn e Tamisa. Os métodos utilizados foram: *Mean Elevation Method* (MEM) (ARORA; BOER, 1999; SHAW; MARTZ; PIETRONIRO, 2005b), sendo este o único método de reamostragem, a partir da média; COTAT+ (PAZ; COLLISCHONN; LOPES DA SILVEIRA, 2006; REED, 2003); *Network Scaling Algorithm* (NSA) (FEKETE; VÖRÖSMARTY; LAMMERS, 2001); *Network Tracing Method* (NTM) (OLIVERA; RAINA, 2003). Os resultados obtidos pelos quatro algoritmos de *upscaling* indicaram que os métodos COTAT+ e NTM, obtiveram os melhores desempenhos, considerando as redes de drenagem geradas em todas as escalas e características topográficas da área de estudo.

O algoritmo COTAT+ consiste em três grandes processos: (a) identificação do pixel de saída para cada célula (pixel do MDE na resolução espacial menor); (b) atribuição da direção de fluxo para cada célula; e (c) teste dos caminhos de fluxo, com o objetivo de

evitar cruzamentos entre eles, sendo corrigidos, caso existam. As etapas de cada processo são:

1. Identificar o pixel da célula com maior área acumulada de drenagem e rotular como um pixel potencial para a saída da célula;
2. Para cada pixel na borda da célula, determina qual drena a maior parte da célula e o rotula, podendo ser o mesmo ou não da primeira etapa;
3. Segue o caminho de fluxo a montante do pixel rotulado na primeira etapa, medindo a distância do caminho de fluxo dentro da célula;
4. Se a distância calculada for maior que o limiar definido pelo usuário (CMM), o pixel rotulado na primeira etapa é aceito como o pixel de saída da célula. Caso contrário, é verificado se o pixel rotulado na primeira etapa é o mesmo do rotulado na segunda. Caso seja verdade, o pixel é aceito como saída da célula. Caso não seja verdade, o pixel rotulado na primeira etapa é rejeitado e o pixel com a segunda maior área de drenagem é rotulado como potencial de saída da célula, repetindo o que foi feito para o primeiro pixel rotulado como potencial;
5. Após realizar as etapas anteriores até que o pixel de saída da célula seja encontrado (Figura 15), é percorrido o caminho de fluxo a jusante desse pixel;
6. Ao encontrar durante o caminho de fluxo a jusante o pixel de saída de cada célula vizinha, a área de drenagem acumulada total até esse pixel é calculada e subtraída da área de do pixel inicial, o que está sendo analisado. Se a diferença for maior que o limiar definido pelo usuário (AIM), um vizinho válido é encontrado e o rastreamento é interrompido. Caso contrário, o rastreamento do caminho de fluxo a jusante continua para as células subsequentes, até que a diferença obtida exceda o limiar, ou atinja uma célula que não seja vizinha à célula do pixel analisado. Neste caso, nenhuma célula vizinha válida foi encontrada;
7. Caso tenha sido encontrada uma célula vizinha válida, a direção de fluxo da resolução mais baixa é atribuída no sentido da célula que está sendo analisada, para a célula vizinha encontrada. Caso contrário, a direção de fluxo

é estabelecida no sentido da última célula encontrada ao longo do caminho de fluxo percorrido na tentativa de encontrar a célula válida;

8. Por fim, após a atribuição das direções de fluxos de todas as células (Figura 16), é verificada a existência de cruzamentos entre direções de fluxo. Caso exista, é realizada a correção, modificando a direção de fluxo de uma das células envolvidas. É modificada a célula que tiver o pixel de saída com a menor área acumulada de drenagem.

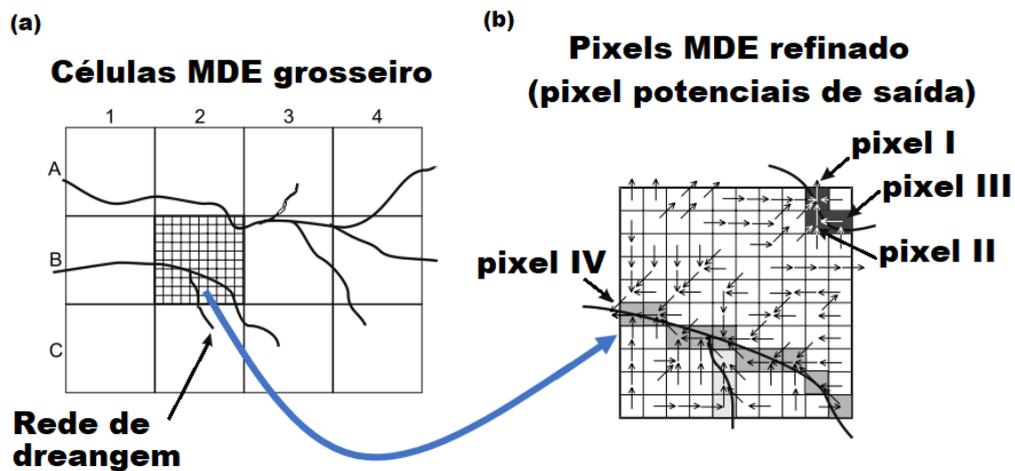


Figura 15 – Identificação dos pixels potenciais (b) de saída da célula (a), do método COTAT+. Fonte: adaptado de (PAZ; COLLISCHONN; LOPES DA SILVEIRA, 2006).

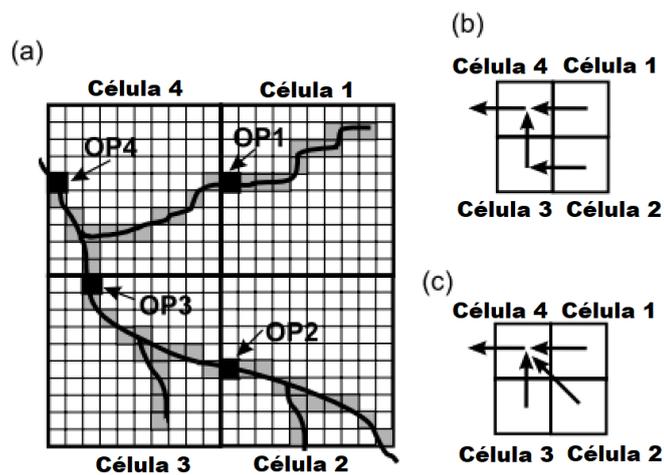


Figura 16 - Procedimento para atribuir a direção do fluxo das células (a) de acordo com o caminho do fluxo traçado a partir de seu pixel de saída, do método COTAT+. A diferença

entre as atribuições de direções de fluxo (b) e (c) se deve ao limiar de área acumulada de drenagem mínima atribuída pelo usuário. Fonte: adaptado de (PAZ; COLLISCHONN; LOPES DA SILVEIRA, 2006).

2.6 ANÁLISES DE PRODUTOS DERIVADOS DO MDE

2.6.1 *Efeito de escala nos dados de MDE de alta resolução espacial*

Murphy et al. (2008) realizaram um estudo comparando as redes de drenagens obtidas a partir de dois tipos de MDEs: o primeiro proveniente da interpolação de dados aerofotogramétricos, com resolução espacial de 10 m; e o segundo extraído da interpolação de nuvem de pontos LiDAR, com resolução espacial de 1 m. Ambos os resultados foram analisados utilizando como rede de referência a rede de drenagem adquirida através de levantamento em campo por GNSS e ortofotos da área de estudo. Isto foi possível, pois a área de estudo é pequena, a bacia hidrográfica analisada corresponde a 1,93 km². Também foram realizadas as análises dos dados originais em comparação com os dados corrigidos por meio da técnica de *stream burning*. Esta técnica consiste em rebaixar as elevações dos pixels do MDE que são sobrepostos pelos pixels de uma rede de referência, com isso o caminho de fluxo é forçado para esses pixels com altitudes mais baixas (LINDSAY, 2016b). Segundo os autores, nenhum outro estudo havia sido feito até então, buscando realizar a análise de dados LiDAR com 1 m de resolução espacial, comparado com dados aerofotogramétricos, com e sem o uso de *stream burning* (MURPHY et al., 2008).

Tais autores concluíram que: (a) a rede de drenagem obtida a partir dos dados LiDAR foi a que apresentou maior concordância com a rede de referência, em comparação com a obtida por dados aerofotogramétricos; (b) Em relação aos dados originais e corrigidos, a rede derivada do MDE convencional corrigido foi mais precisa do que a derivada do MDE convencional original; (c) Em contrapartida, tal fato não se repetiu para o MDE LiDAR. Possivelmente, devido à diferença entre o nível de detalhamento do terreno ao adquirir a rede de referência e o MDE LiDAR (MURPHY et al., 2008).

2.6.2 Efeito de escala devido à reamostragem do MDE

A partir do estudo realizado por Murphy et al. (2008), Yang et al. (2014) e Woodrow et al. (2016) se propuseram a realizar novas análises hidrográficas de dados LiDAR, utilizando o dado de mais alta resolução espacial e o mesmo dado reamostrado para resoluções menores.

Yang et al. (2014) realizaram o estudo do efeito de escala do MDE LiDAR na extração de parâmetros hidrográficos e hidrológicos em diferentes resoluções espaciais (1, 5, 10, 30 e 60 m), para três bacias hidrográficas experimentais, com características topográficas distintas. Utilizaram como padrão ouro, para servir de comparação com os resultados obtidos, uma rede de referência proveniente da digitalização de ortofotos com resolução espacial de 1 m e dados hidrológicos oficiais. Tal fato foi viável, pois as bacias experimentais analisadas correspondem a 28, 239 e 320 km² (YANG et al., 2014).

Tais autores obtiveram, dentre os resultados, que o efeito da resolução espacial em MDE LiDAR na derivação de características hidrográficas se mostrou evidente. Dentre as resoluções espaciais, a que resultou em uma rede de drenagem com maior comprimento foi a de 1 m, e houve uma tendência decrescente com o aumento no tamanho do pixel. Outro resultado foi que MDEs derivados de LiDAR de alta resolução produzem características hidrográficas mais detalhadas. Além disso, o Erro Médio Quadrático Longitudinal (EMQL), distância espacial entre os fluxos de referência e modelados aumentou com o aumento da resolução espacial, indicando melhor precisão na resolução mais alta (1 m), enquanto o desvio absoluto entre a sinuosidade da rede de drenagem derivadas e os dados de referência atingiu menor valor na resolução espacial de 10 m. Dentre as redes de drenagens obtidas a partir dos dados LiDAR, a que melhor correspondeu aos dados de referência para modelagem hidrológica foi a de resolução espacial intermediária (10 m), em vez da resolução mais alta (1 m).

Já Woodrow et al. (2016) realizaram o estudo do efeito de escala e da aplicação das técnicas de preenchimento e remoção de depressões, e do *stream burning*, para MDE LiDAR. Foram analisados parâmetros hidrográficos em diferentes resoluções espaciais, original de 1 m e reamostradas para 5 e 10 m, de uma bacia hidrográfica de 120 km². Utilizaram como padrão ouro, para servir de comparação com os resultados obtidos, uma

rede de referência proveniente da digitalização de ortofotos com resolução espacial de 10 m.

Os resultados mostraram que a resolução espacial provoca alterações significativas da delimitação da bacia hidrográfica e no comprimento da rede de drenagem. As técnicas utilizadas na remoção de depressões e o *stream burning* também causaram impactos relevantes no resultado final. A sensibilidade dos parâmetros hidrológicos a essas técnicas aumenta significativamente com o aumento da resolução. Portanto, é necessária uma maior consideração dos métodos pré-processamento do MDE, particularmente em pesquisas que usam dados LiDAR de alta resolução espacial (WOODROW; LINDSAY; BERG, 2016).

Esses resultados coadunam com estudos hidrológicos anteriores, encontrados em Zhang e Montgomery (1994), que propuseram que a resolução espacial de 10 m apresenta uma melhor relação custo benefício entre o aumento da resolução e os resultados obtidos ao realizar a modelagem de processos hidrológicos. Além desses, Zhang et al. (2008) observaram que o cálculo da vazão e da produção de sedimentos foram as mais próximas das observações de campo, quando utilizado MDE LiDAR com 10 m de resolução espacial em relação a: LiDAR de 4 e 30 m; NED com 10 e 30 m; e SRTM 30 m. Embora dados de alta resolução estejam cada vez mais disponíveis, esses resultados mostram que o uso de tais dados pode não resultar necessariamente em melhores MDEs para aplicações hidrológicas (YANG et al., 2014; ZHANG; CHANG; WU, 2008; ZHANG; MONTGOMERY, 1994).

2.6.3 *Efeito de escala via upscaling de direções de fluxo*

Saraiva e Paz (2014) analisaram o efeito de escala para dados proveniente do SRTM de quatro bacias hidrográficas, sendo a menor delas com 20.000 km² e a maior com 640.000 km². Foram utilizados os métodos de remostragem dos pixels e o *upscaling* de direções de fluxo para obter os dados com resolução espacial degradada. O impacto do uso desses métodos também foi analisado. A rede de drenagem de referência de cada bacia foi obtida a partir da digitalização utilizando imagens proveniente do satélite ETM+/LANDSAT 7, com resolução espacial de 15 m. Destaca-se que, as resoluções mais detalhadas utilizadas no estudo foram de 100 e 200 m, provenientes da reamostragem dos dados originais do SRTM. Esses dados foram avaliados posteriormente nas resoluções

mais grosseiras de 10, 30 e 50 km, usando a remostragem e *upscaling* de direções de fluxo de forma gradual e direta.

Os autores concluíram que o método de *upscaling* de direções de fluxo obteve os melhores resultados, em comparação aos métodos de reamostragem dos pixels. Este último teve seu desempenho avaliado de forma negativa, independente das características das bacias estudadas. Além disso, o *upscaling* gradual obteve melhores resultados, comparado ao *upscaling* realizado de forma direta, da mais alta para a mais baixa resolução espacial (SARAIVA; PAZ, 2014).

Existe uma carência de pesquisas que analisem os impactos das características hidrográficas, de redes de drenagens extraídas a partir de MDT LiDAR na sua resolução original e em resoluções mais grosseiras utilizando para isso o *upscaling* de direções de fluxo. Pode-se citar apenas o trabalho dos autores Moretti e Orlandini (2018) que propuseram um novo método de *upscaling*, e o avaliaram através das redes de drenagens de duas bacias hidrográficas (Crostolo, 86 km², e Cordevole, 690 km², ambas localizadas na Itália), derivadas a partir de:

- MDT LiDAR, com resolução espacial de 1 m;
- MDT LiDAR reamostrado, utilizando o método do vizinho mais próximo e do método proposto por Zhou e Chen (2011), para 200 m;
- e do *upscaling* das direções de fluxo original de 1m para 200 m.

Segundo os autores, o método de *upscaling* obteve os melhores resultados (MORETTI; ORLANDINI, 2018).

2.6.4 *Efeito de escala a partir de dados globais e influência da fonte de dados*

Tan et al. (2018) se propuseram a avaliar o efeito da resolução de MDE provenientes de sensores remotos globais (TanDEM-X, SRTM, AW3D30 e ASTER GDEM2), com resolução espacial de 12 a 500 m, utilizando a reamostragem dos pixels para obter os dados em resoluções mais grosseiras. Os interpoladores de agregação também foram avaliados, tendo sido utilizados: vizinho mais próximo, interpolação bilinear, cúbica, convolução e moda. Foram avaliados parâmetros hidrográficos e hidrológicos. A rede de drenagem de referência foi proveniente de dados oficiais.

No referido trabalho, a análise dos parâmetros hidrográficos mostrou que os interpoladores de reamostragem causam impactos desprezíveis na extração da rede de drenagem. Por outro lado, a resolução espacial desempenha um papel significativo, onde quanto menor a resolução, mais imprecisa é a rede de drenagem obtida. A baixa resolução espacial, para a região de estudo, fez com que fossem removidas pequenas colinas em regiões com relevos mais suaves, que são importantes para os cálculos de direção do fluxo. Entretanto, os autores ressaltam que não seria praticável usar MDE com resolução espacial de 1 m na modelagem de uma grande bacia, pois além do alto custo financeiro de aquisição desse dado, o custo computacional seria muito elevado. Neste sentido, definem que resoluções espaciais variando de 15 a 50 m são suficientes para serem usadas na extração de rede de drenagem para modelagem hidrológica (TAN; RAMLI; TAM, 2018).

Por fim, ressaltam-se os seguintes resultados desse estudo: (1) o TanDEM-X obteve redes de drenagens mais precisas quando comparado ao ASTER GDEM2; (2) as resoluções espaciais de 20 e 60 m foram as que apresentaram melhores resultados para o cálculo de vazões mensais na modelagem hidrológica; (3) os MDEs TanDEM-X e SRTM foram mais precisos do que o ASTER GDEM2 no cálculo de vazões mensais (TAN; RAMLI; TAM, 2018).

2.6.5 *Inspeção visual*

O olho humano é capaz de identificar e analisar padrões complexos que são difíceis de serem substituídos por alguma métrica matemática/computacional (Saraiva & Paz, 2014; Wu et al., 2011). Entretanto, a subjetividade de julgamento e detalhes, que podem não ser percebidos, influenciam no resultado. Apesar disso, essa avaliação qualitativa das redes de drenagens é utilizada por diversos autores (ARIZA-VILLAVERDE; JIMÉNEZ-HORNERO; GUTIÉRREZ DE RAVÉ, 2015; ARORA; HARRISON, 2007; ENDRENY; WOOD; LETTENMAIER, 2000; FEKETE; VÖRÖSMARTY; LAMMERS, 2001; LAI et al., 2016; LINDSAY, 2016c; MORETTI; ORLANDINI, 2018; MUNIER; DECHARME, 2021; NIKOLAKOPOULOS; CHOUSIAFIS; KARATHANASSI, 2015; PERSENDT; GOMEZ, 2016; SARAIVA; PAZ, 2014; SOUSA; PAZ, 2017).

Para que seja realizada, a rede de drenagem obtida é sobreposta aos dados de referência: vetor da rede de drenagem de referência e/ou dados de Sensoriamento Remoto,

imagens de satélite ou ortofotos. Caso a quantidade de dados a serem analisados seja pequena, é possível tornar essa métrica com viés quantitativo ao analisar célula a célula as diferenças entre o dado de referência e o em análise. Um exemplo, dessa abordagem é a análise da diferença das direções de fluxo entre o pixel do dado na resolução original e a célula do obtido através do *upsampling* de direções de fluxo (SHAW; MARTZ; PIETRONIRO, 2005a, 2005b).

2.6.6 *Percentual dentro do buffer*

A métrica de análise de percentual dentro do *buffer* utiliza uma rede de referência a qual é aplicado um limiar de tolerância, denominado de *buffer* (CHEN et al., 2012; SOUSA; PAZ, 2017). Este limiar pode ser único, para toda a rede de drenagem, ou dinâmico, de acordo com as características de cada trecho. Outra forma de se obter o *buffer* é através da digitalização da calha do rio. Este último método é o que mais se aproxima da realidade, porém é o de maior dificuldade de obtenção, principalmente para grandes áreas de estudo. E mesmo assim, também não está livre de imprecisões, principalmente devido à subjetividade e acurácia visual do operador da digitalização (SOUSA; PAZ, 2017; VOGT; COLOMBO; BERTOLO, 2003). Para cada rede de drenagem a ser analisada, deve-se mensurar a interseção entre essa rede e a área do *buffer*. Por fim, é calculado o percentual de interseção em relação a toda rede de drenagem em análise.

Essa métrica considera que a rede de drenagem extraída de forma automática do MDE não precisa coincidir de forma exata com a rede de referência, uma vez que a rede de referência irá representar, na melhor das hipóteses com maior precisão, a linha central da calha do rio, isto é, a calha do rio é uma região de tolerância para a localização da rede de drenagem. Por esse motivo, muitos autores buscam métodos matemáticos para obter esse limiar de tolerância, como alternativa à obtenção através da digitalização. Alguns desses autores (JANKOWFSKY et al., 2013; VOGT; COLOMBO; BERTOLO, 2003; ZHOU; CHEN, 2011) utilizam como *buffer* múltiplos do tamanho do pixel do MDE de mais alta resolução espacial. Enquanto, Davies e Bell (2009), por exemplo, utilizam uma fração do tamanho do pixel de mais baixa resolução espacial. Já Buarque et al., (2009), utiliza como limiar a largura média dos trechos de rios a serem analisados.

Quanto menor a região do *buffer*, mais rigorosa será a análise, podendo até ser uma análise desproporcional a realidade, invalidando resultados satisfatórios. Porém, caso o limiar seja muito maior que a largura do rio naquele trecho, a análise será muito permissiva, validando dados errôneos, o que também deve ser evitado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 *Localização da área de estudo*

Esta pesquisa tem como área de estudo duas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco: Rio Sirinhaém e Rio das Garças. Os motivos dessa escolha são: disponibilidade dos dados MDT LiDAR e ortofotos do projeto PE3D (Pernambuco tridimensional) (CIRILO; ALVES; SILVA, LUIZ AUGUSTO CLEMENTE DA CAMPOS, 2014); estão localizadas em duas regiões com características fisiográficas distintas e a segunda possuir praticamente o dobro da área de drenagem da primeira. Estas duas bacias foram utilizadas como parâmetros para o desenvolvimento metodológico da pesquisa.

O estado de Pernambuco possui uma área de 98.076 km² e 184 municípios, dividido pelo IBGE em três regiões fisiográficas: Litoral - Zona da Mata, Agreste e Sertão, de acordo com as suas características geomorfológicas (Figura 17) (APAC, 2013):

- Litoral - Zona da Mata – Apresenta um clima tropical quente e úmido (temperaturas médias anuais de 24° C). Suas precipitações pluviométricas estão na faixa de 800 mm a mais de 2.000 mm anuais, sobretudo na porção sul dessa região. Relevo predominante é a planície litorânea, quase ao nível do mar, com máximas altitudes de 600 m nas regiões próximas ao Planalto da Borborema. A rede hidrográfica nessa região apresenta rios perenes, em consequência das suas características pluviométricas. O revestimento vegetal é representado pela floresta tropical (Mata Atlântica), hoje bastante reduzida, e pela agricultura da cana-de-açúcar (APAC, 2013);

- Agreste – Região de transição entre a Zona da Mata e o Sertão, localizado no planalto da Borborema. Apresenta clima entre o tropical úmido, próximo a Zona da Mata e semiárido nas regiões próximas ao Sertão. Possui regiões de brejo, principalmente nas áreas de maiores altitudes e expostas aos ventos alísios de sudeste, e regiões de caatinga;
- Sertão – Maior região dentre as três do estado, com 63.000 km², altas temperaturas e clima quente e seco. Além de possuir poucas chuvas e mal distribuídas, por consequência a rede hidrográfica da região, em sua maioria, são rios intermitentes. Relevo de superfície plana, denominada de depressão sertaneja, apresentando maiores elevações ao norte, na Chapada do Araripe, e na Serra da Baixa Verde.



Figura 17 – Regiões fisiográficas do estado de Pernambuco. Fonte: adaptado de (APAC, 2013).

Essas três regiões apresentam uma grande variedade entre as características individuais, que pode ser atribuída à interação da estrutura geológica e o micro clima de cada uma delas (SILVA; LIMA MONTENEGRO; SOUZA, 2017). A Figura 18 representa o relevo, através de cores de intensidade hipsométrica, com uma secção transversal, no sentido sudeste/noroeste.

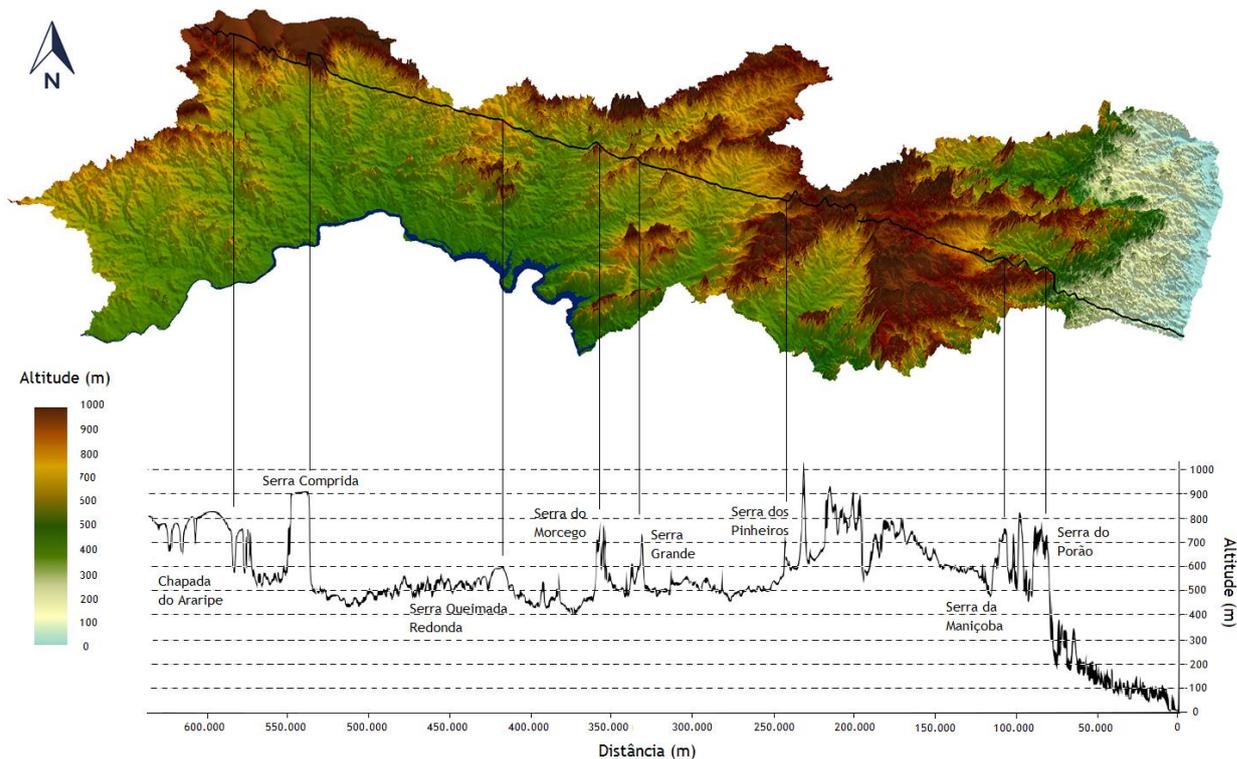


Figura 18 – Caracterização do relevo do estado de Pernambuco. Fonte: adaptado de TOPODATA/INPE/UFPE.

Seguindo as diretrizes da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), o estado possui 28 unidades de planejamento hídricas, apresentadas na Figura 19. A unidade de planejamento hídrico 4 corresponde à bacia hidrográfica do Rio Sirinhaém e a 12 corresponde à bacia do Rio das Garças.



Figura 19 - Unidades de planejamento hídrico do estado de Pernambuco. Fonte: adaptado de (SILVA; LIMA MONTENEGRO; SOUZA, 2017).

3.1.2 Caracterização da bacia hidrográfica do Rio Sirinhaém

O Rio Sirinhaém tem sua nascente, Riacho dos Tanques, no município de Camocim de São Félix e deságua no Oceano Atlântico. Sua extensão é de aproximadamente 158 km, com sentido noroeste-sudeste. A sua bacia abrange 19 municípios e sua área é de 2.090,64 km². Essa bacia representa 2,13% da área do estado e está totalmente inserida nele (APAC, 2019). A vazão média anual do Rio Sirinhaém é de 34,78 (m³/s) e vazão específica 16,81 (L/s/km²). Apresenta uma demanda de abastecimento humano total de 10775458 m³/ano (APAC, 2019).

O gradiente pluviométrico na bacia é de noroeste para leste/sudeste, passando de aproximadamente 800 mm anuais para mais de 2000 mm, segundo mapa climatológico pluviométrico apresentado na APAC (2022).

Esta bacia possui um clima quente e úmido, com precipitações máximas no outono ou inverno e mínimas na primavera ou verão. Seu relevo abrange áreas do Planalto e da Planície Litorânea. No alto curso do Rio Sirinhaém o uso do solo é predominantemente de vegetação arbustiva aberta, com algumas regiões arbustivas fechadas e com ainda menos vegetação arbórea fechada (Mata Atlântica). Já no médio e baixo curso do Rio Sirinhaém, predominam as regiões antropizadas, com a presença de algumas regiões com vegetação

arbustiva fechada e de cultura de cana-de-açúcar, Figura 20. Dados de uso e ocupação do solo do ano de 2021, provenientes do projeto MapBiomias.

A Figura 21 apresenta a bacia hidrográfica do Rio Sirinhaém, além da identificação e localização das sedes dos municípios abrangentes, de instrumentos meteorológicos e de PCDs (plataformas de coleta de dados) meteorológicas.

3.1.3 Caracterização da bacia hidrográfica do Rio das Garças

O Rio das Garças é um rio intermitente e tem sua nascente, o Riacho Caipora, no município de Santa Filomena, próximo à divisa do estado de Pernambuco com o Piauí, e desaguando no Rio São Francisco. Sua extensão total é de aproximadamente 192 km, com sentido noroeste-sudeste. A sua bacia abrange 5 municípios e possui uma área de 4.094,10 km², representando 4,16% da área do estado e estando totalmente inserida nele. Possui oito reservatórios, com capacidade máxima acima de 1 milhão de m³ (Belo Jardim, Brejo, Cacimba, Calmaria, Contendas, Lagoa da Pedra, Saco II e Tranqueira) (APAC, 2019). Sua vazão média anual é de 1,36 (m³/s) e vazão específica 0,31 (L/s/km²). Apresenta uma demanda de abastecimento humano total de 1193050 m³/ano (APAC, 2019).

Essa bacia apresenta uma climatologia pluviométrica anual que varia entre cerca de 700 mm nas cabeceiras localizadas na parte noroeste da bacia até 400 mm no sudeste região próxima à foz da bacia, conforme mapa climatológico pluviométrico apresentado na APAC (2022).

Esta bacia também possui um clima quente e seco e chuvas mal distribuídas durante o ano. O relevo é formado por vastas superfícies aplanadas, apresentando maiores elevações ao norte, na Serra do Araripe. O uso do solo nesta bacia é predominantemente de vegetação arbustiva arbórea aberta, formação savânica, e regiões antropizadas, onde áreas de policultura e pastagem se intercalam com alguns fragmentos de vegetação arbórea arbustiva fechada, Figura 22. Dados de uso e ocupação do solo do ano de 2021, provenientes do projeto MapBiomias.

A Figura 23 apresenta a bacia hidrográfica do Rio das Garças, além da identificação e localização das sedes dos municípios abrangentes, de instrumentos meteorológicos e de PCDs (plataformas de coleta de dados) meteorológicas.

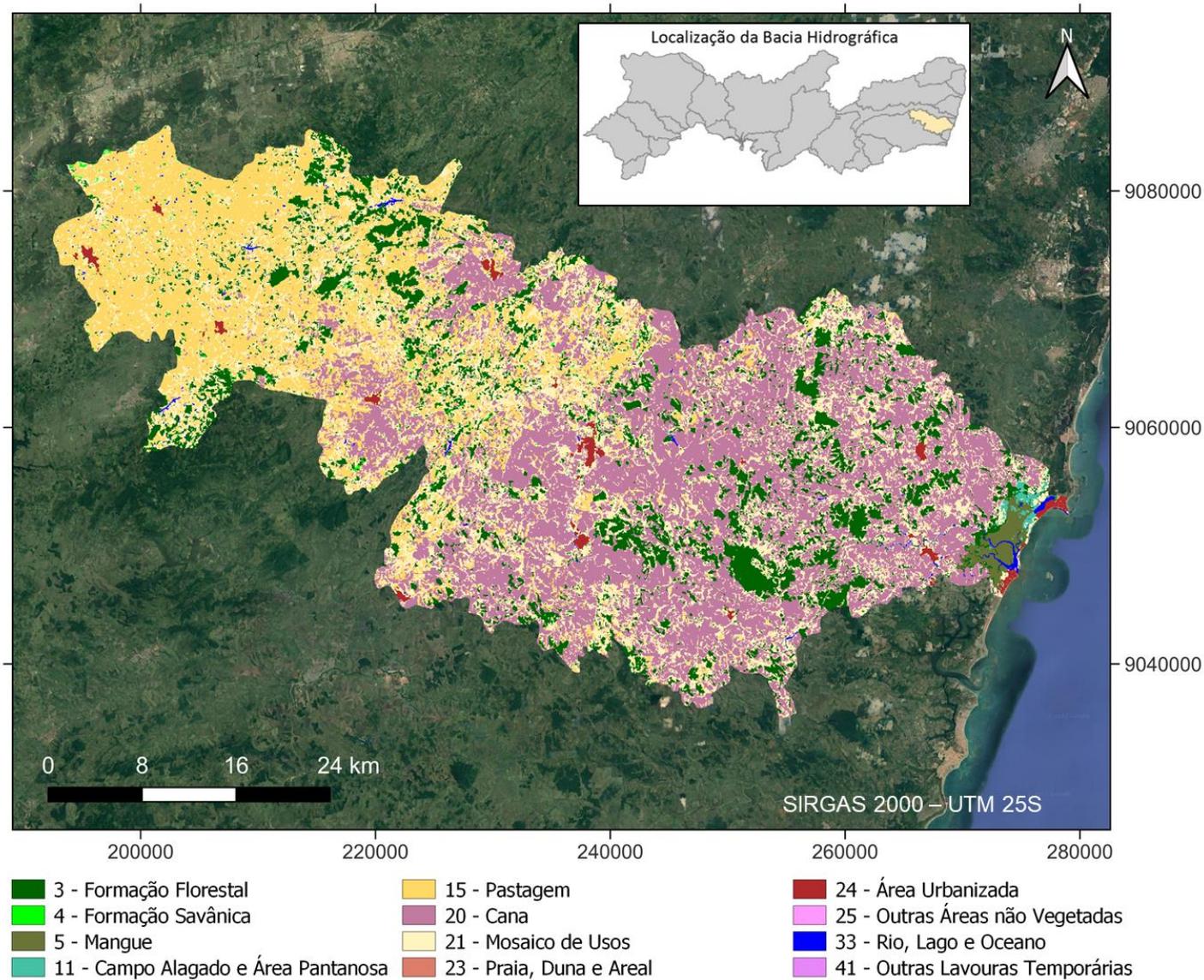


Figura 20 – Classificação de uso e ocupação do solo para a bacia do Rio Sirinhaém. Dados de uso e ocupação do solo do MapBiomas, dados de 2021.

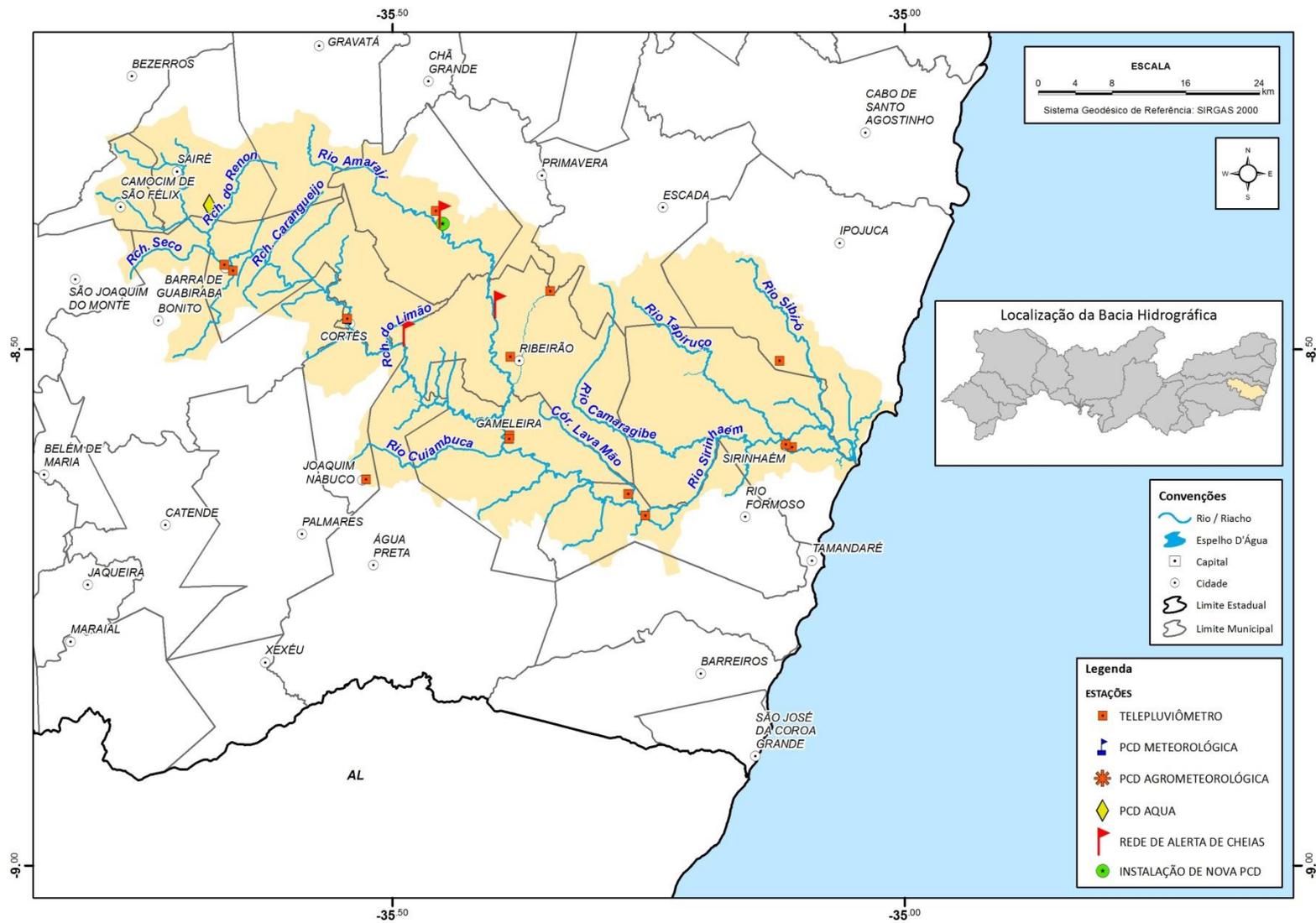


Figura 21 - Bacia Hidrográfica do Rio Sirinhaém. Fonte: <https://www.apac.pe.gov.br/171-bacias-hidrograficas-rio-sirinhaem/205-bacia-do-rio-sirinhaem>.

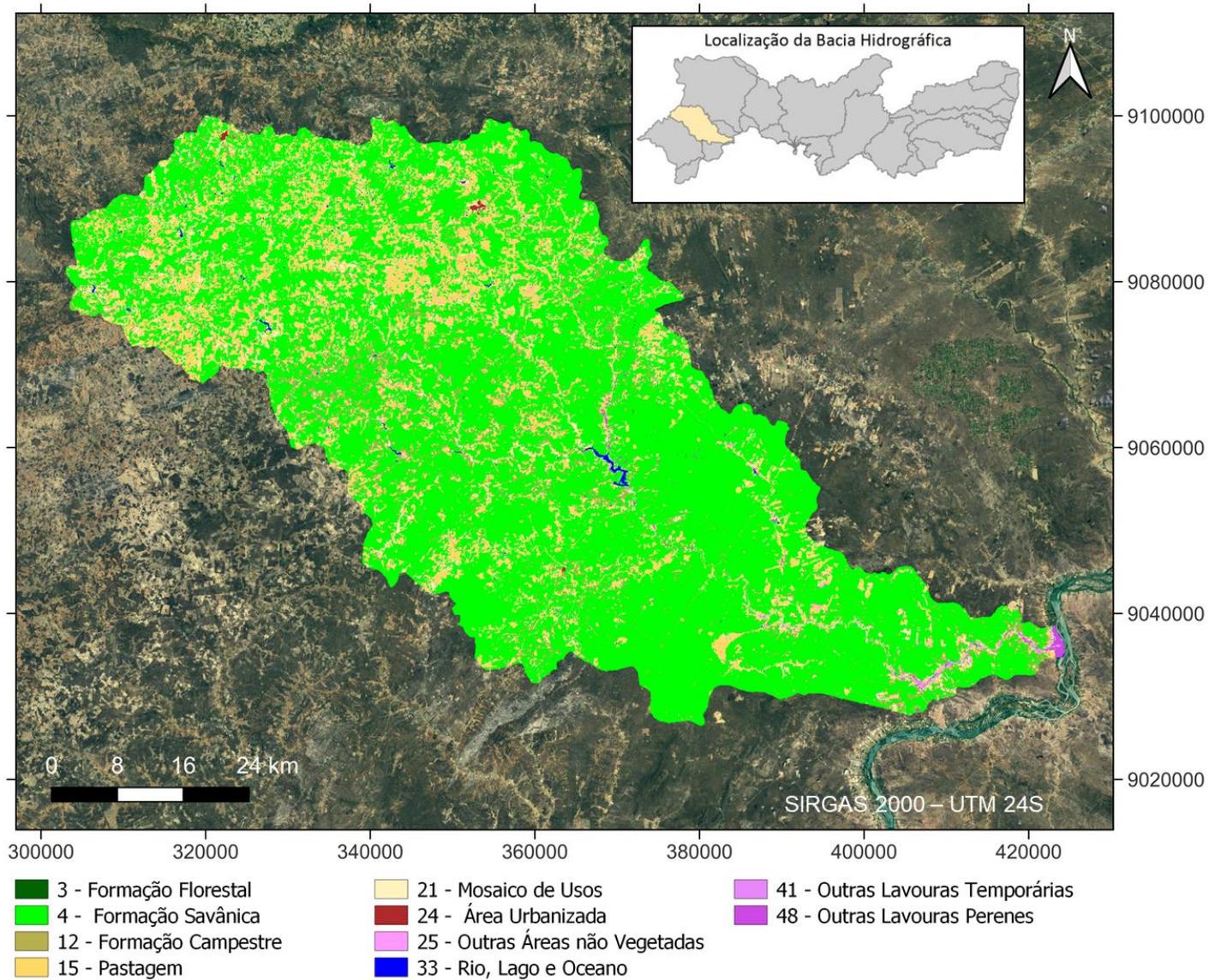


Figura 22 – Classificação de uso e ocupação do solo para a bacia do Rio das Garças. Dados de uso e ocupação do solo do MapBiomas, dados de 2021.

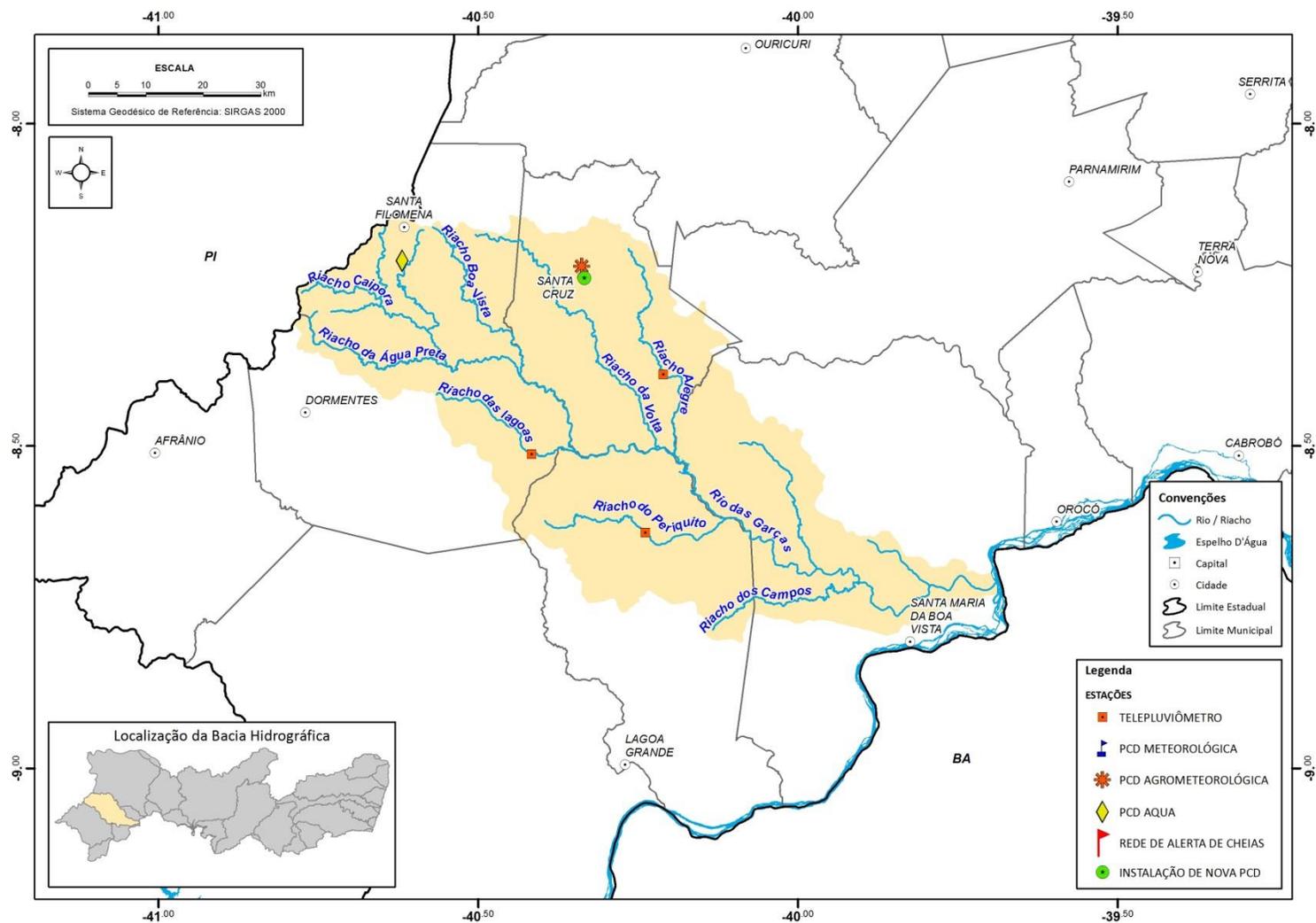


Figura 23 - Bacia Hidrográfica do Rio das Garças. Fonte: <http://200.238.107.184/bacias-hidrograficas/40-bacias-hidrograficas/210-bacia-riacho-das-garcas>.

A Figura 24 apresenta os mapas de localizações das duas bacias e a representação do relevo através das informações provenientes dos MDTs LiDAR com resolução espacial de 1 m.

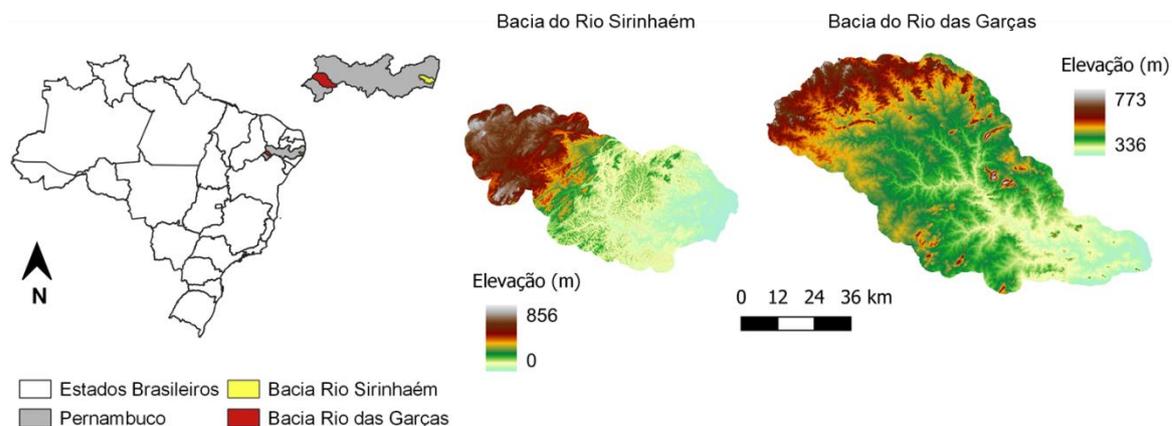


Figura 24 - Localização da Bacia do Rio das Garças (a) e da Bacia do Rio Sirinhaém (b) – PE, e seus respectivos Modelos Digitais do Terreno - MDT LiDAR.

3.2 VISÃO GERAL DA METODOLOGIA

Esta pesquisa tem a metodologia estruturada em seis etapas (Figura 25).

A primeira etapa consiste na definição e coleta dos dados LiDAR de toda a área de estudo. Ressalta que se deve utilizar um limiar de inclusão de regiões da vizinhança da área de interesse, sendo a área de estudo a união da área de interesse e as regiões da vizinhança. Como conjunto de dados iniciais, são utilizados os rasters MDT LiDAR provenientes do PE3D, com resolução espacial de 1 m. Para obter as informações altimétricas de toda a área de estudo, é necessário concatenar os arquivos rasters (mosaico). Por fim, é facultada a etapa de filtragem dos pixels sem dados altimétricos válidos.

A etapa seguinte inicia com a seleção dos algoritmos de remoção das depressões a serem utilizados no pré-processamento: reamostragem dos pixels do dado obtido na primeira etapa para as resoluções de 2, 5, 10 e 30 m, e remoção das depressões, utilizando cada método selecionado com a quantificação do custo computacional, para o dado na resolução de 1 m e nas demais resoluções obtidas a partir dele.

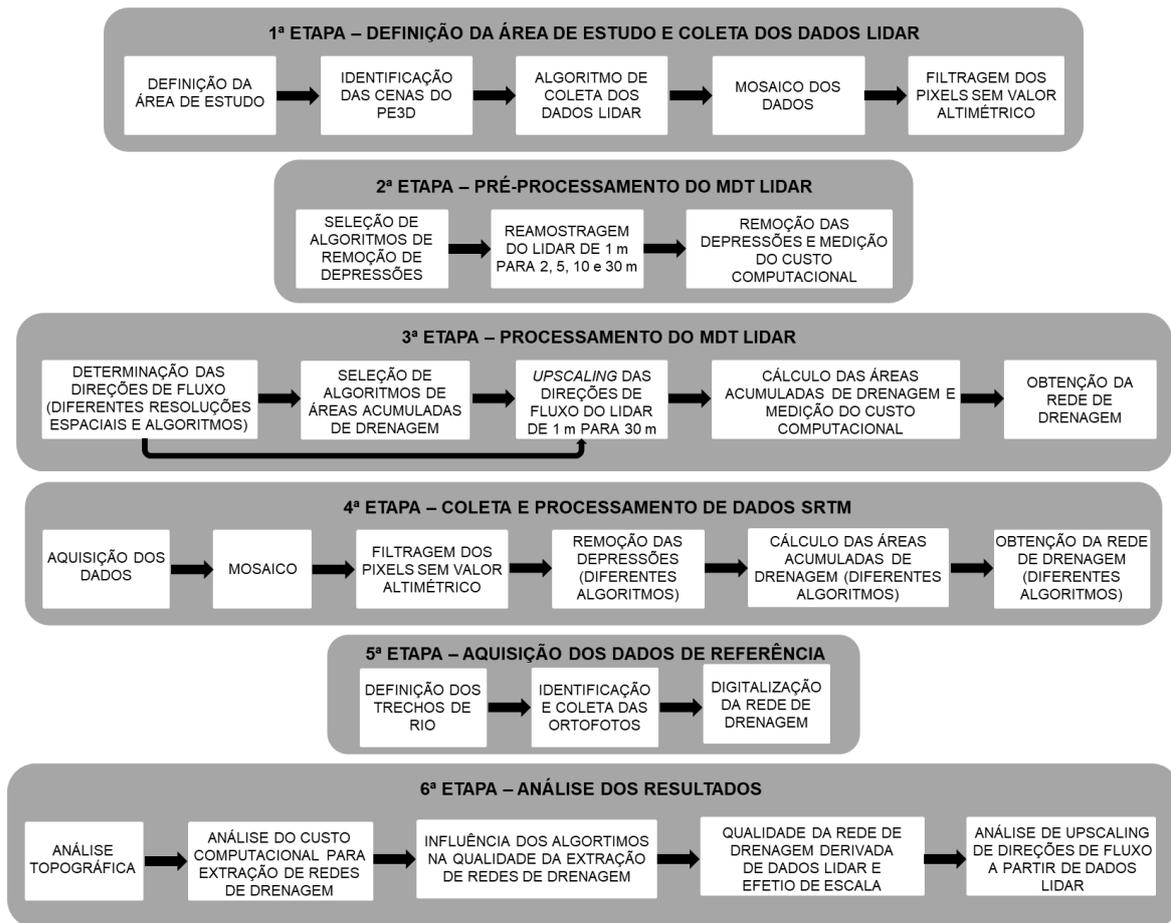


Figura 25 - Fluxograma da metodologia.

A terceira etapa, processamento dos dados LiDAR, tem início com a obtenção das direções de fluxo de cada resolução espacial. Em seguida são selecionados os algoritmos de cálculo de áreas acumuladas de drenagem. De posse das direções de fluxo do MDT LiDAR de 1 m, é possível realizar o *upscaling* dessa resolução para 30 m. Na sequência, são processados para os dados obtidos pela reamostragem e pelo *upscaling* de direções de fluxo: cálculo da área acumulada de drenagem, utilizando cada método selecionado com a quantificação do custo computacional; definição da área mínima; e obtenção da rede de drenagem.

A quarta etapa realiza a aquisição dos dados SRTM com resolução espacial de 30 m, mosaico e recorte desses dados, filtragem dos pixels sem valor altimétrico, remoção das depressões e em seguida cálculo das áreas acumuladas de drenagem utilizando todos os métodos selecionados, e por fim a obtenção da rede de drenagem.

A quinta etapa consiste na aquisição dos dados de referência através da seleção de quais trechos de rios fazem parte dessa rede, em seguida identifica e coleta as ortofotos,

com alta resolução espacial, 50 cm, do PE3D, que recobre todos os trechos selecionados, e por fim a digitalização da rede de drenagem utilizando os dados aerofotogramétricos.

A sexta etapa realiza a análise dos resultados obtidos através da análise topográfica dos dados utilizados, custo computacional para extração das redes de drenagens em todas as resoluções espaciais processadas, influência dos algoritmos utilizados na qualidade da extração das redes de drenagem, qualidade da rede de drenagem derivada de dados LiDAR e efeito de escala e a análise do *upscaling* de direções de fluxo a partir de dados LiDAR.

Devido à grande quantidade de dados utilizados por esta pesquisa, faz-se necessária a adaptação dos algoritmos encontrados na literatura, dentre eles o algoritmo de *upscaling* de direções de fluxo, além de diversos algoritmos que foram desenvolvidos em linguagem de programação Python, com o objetivo de possibilitar desde a coleta dos dados da área de estudo até a adaptação dos processos intermediários.

3.3 Recursos computacionais disponíveis

Duas configurações de recursos computacionais foram adotadas para analisar a eficiência computacional dos algoritmos para processamento dos MDTs LiDAR (Tabela 2). O primeiro é um *desktop* com processador com 6 núcleos de processamento, sistema RAM, e gráficos muito comuns aos atuais computadores de baixo custo. Essa máquina representa recursos normalmente disponíveis para a maioria dos usuários – referido aqui nesta pesquisa por *desktop*.

O segundo computador é uma estação de trabalho com processador, RAM e sistema gráfico de maior capacidade que o primeiro, sendo referido aqui por *workstation*. O grande diferencial do *workstation* é que além de ter 4 vezes mais memória RAM que o *desktop*, sua RAM também possui sistema ECC (*Error Correction Code*), capaz de corrigir erros de leitura ou escrita de dados, durante o processamento, evitando possíveis travamentos do sistema. Além disso, possui 20 núcleos de processamento. A *workstation* representa uma máquina de maior poder computacional do que um computador comum disponível ao usuário, e foi considerado nesta pesquisa com o propósito de avaliar o desempenho dos algoritmos comparativamente aos resultados com o *desktop*.

Tabela 2 - Infraestruturas computacionais utilizadas para o processamento dos dados.

	Processador	Quantidade de núcleos	Memória	Barramento	Placa Gráfica
<i>Workstation</i>	Intel Xeon E5-2666 v3 3.5 GHz	20	64 GB ECC	64 bits	Dedicada - NVIDIA® GeForce 8400 GS 256 MB
<i>Desktop</i>	Intel Core i5-8,400 2.80Ghz	6	16 GB	64 bits	Integrada - Intel UHD 630

3.4 Coleta de dados LiDAR

3.4.1 MDT LiDAR – PE3D

O Estado de Pernambuco realizou um levantamento aerofotogramétrico com perfilamento a laser LiDAR, recobrando todo o estado. Esse programa, denominado Pernambuco Tridimensional (PE3D), foi realizado através da então Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE), atualmente incorporada à Secretaria de Infraestrutura do Estado de Pernambuco (SEINFRA). O objetivo do levantamento foi adquirir MDSs e MDTs de alta resolução, derivados do LiDAR, além das ortoimagens, ambos em duas escalas, 1:5.000 (para todo o território) e 1:1.000 (para as principais sedes municipais). Essas escalas correspondem a uma resolução espacial de 50 e 12 cm para as ortofotos; e 1 m e 50 cm para os dados LiDAR, respectivamente. O erro altimétrico do perfilamento a laser é melhor que 25 cm para escala de 1:5.000, e melhor que 10 cm para a escala de 1:1.000 (AMARAL; CIRILO; RIBEIRO NETO, 2020; CIRILO et al., 2015; CIRILO; ALVES; SILVA, LUIZ AUGUSTO CLEMENTE DA CAMPOS, 2014). Todos os produtos apresentados estão referenciados no Sistema de Coordenadas Projetadas UTM SIRGAS 2000, nos fusos 24S ou 25S (SRHE, 2014).

A área do estado de Pernambuco (98.146 km²) foi dividida em 12.962 folhas articuladas, com uma nuvem de pontos LiDAR de 75 bilhões de pontos, com densidade aproximada de 1,3 pontos por m² (CIRILO; ALVES; SILVA, LUIZ AUGUSTO CLEMENTE DA CAMPOS, 2014).

Para o dado LiDAR MDT do PE3D, foram excluídos os pontos referentes aos objetos sobre a superfície desnuda, inclusive os referentes às pontes (SRHE, 2014). A ausência de pontes facilita no processo de extração automática de rede de drenagem. No formato Geotiff, cada arquivo de MDT ou MDS apresenta tamanho médio de 32,6 Mb, contendo aproximadamente 3.500 colunas e 2.400 linhas. O tamanho de armazenamento

do conjunto inteiro dos dados originais MDT LiDAR no formato Geotiff é de aproximadamente 1 Terabyte, e igual tamanho para o conjunto de dados MDS LiDAR.

3.4.2 Identificação das cenas e coleta dos dados do PE3D

Os dados do PE3D foram obtidos através de ofício na COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento). Foram disponibilizados os dados para todo os estado de Pernambuco para os produtos: MDS, MDT e Ortofoto. É possível obter parte dos dados através do portal eletrônico do PE3D, mas a grande maioria dos dados ainda não está disponível.

Cada arquivo de MDT LiDAR corresponde a uma folha da articulação do mapeamento realizado. O nome de cada um desses arquivos é dado pelo índice de nomenclatura padronizado, tendo como base a divisão da carta internacional do mundo ao milionésimo (LEAL DE MENEZES; FERNANDES, 2013). O índice é formado de acordo com o apresentado na Figura 26.

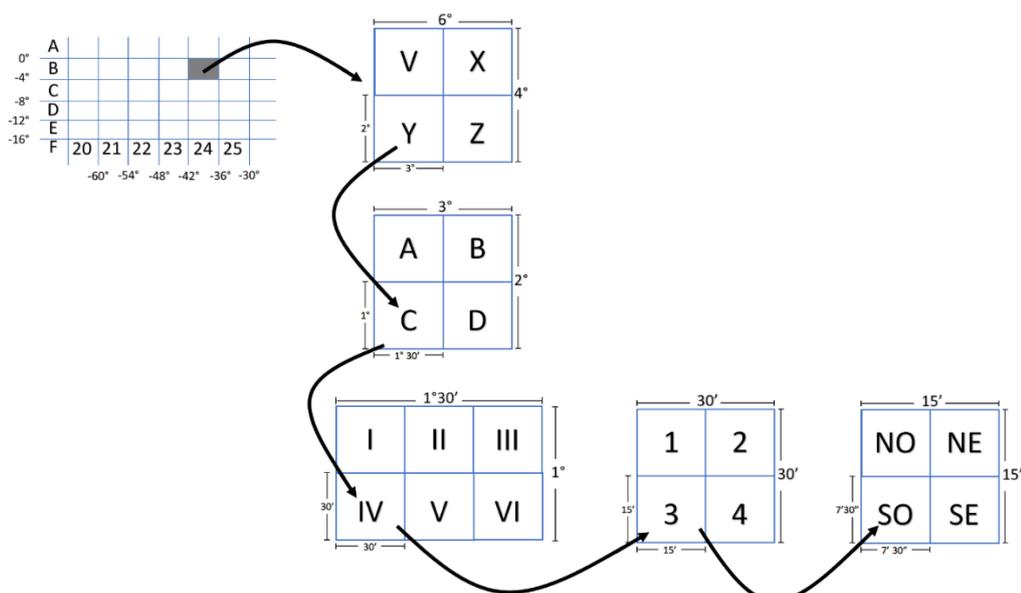


Figura 26 – Índice de nomenclatura da carta internacional do mundo ao milionésimo, o qual serve de base para a nomenclatura das folhas do mapeamento do PE3D. A folha representada através das indicações das setas é a: SB-24-Y-C-IV-3-SO. Sendo S de Sul, e B referente à faixa de latitude da folha. Fonte: adaptado de (MENEZES & FERNANDES, 2013).

A identificação das folhas que fazem parte da área de estudo é realizada através da utilização do mapa de localização destas. É recomendado utilizar um dado vetorial no formato de um polígono, que delimite a área de estudo, e se sobreponha ao mapa de localização das folhas. Ao realizar a interseção entre os dados, são identificadas todas as folhas da área de interesse. A Figura 27 apresenta essa abordagem.

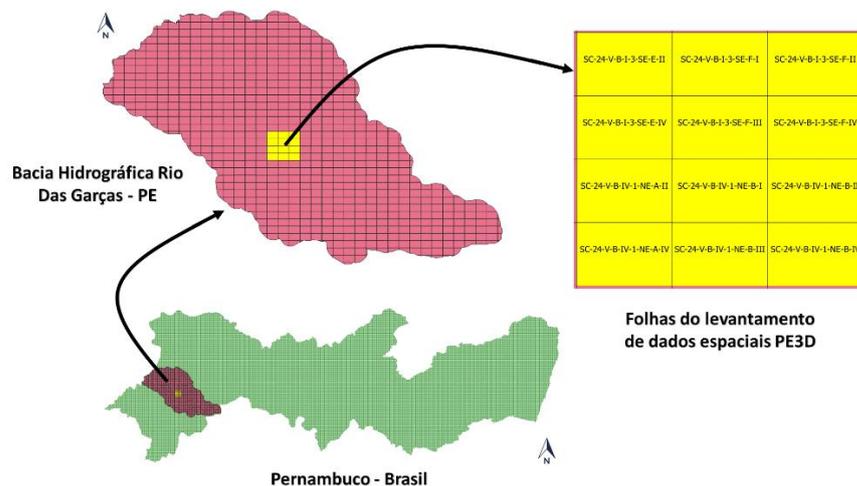


Figura 27 – Mapa índice do levantamento de dados espaciais PE3D. Exemplo da obtenção das folhas de uma área de interesse. Utilizando a interseção do polígono que delimita a área e ao mapa índice. A tabela de atributos do resultado dessa operação apresenta o índice de nomenclatura de cada folha.

De posse da nomenclatura de todas as folhas da área de estudo, é preciso ter acesso a elas no disco rígido onde foram salvo os arquivos MDTs LiDAR do PE3D. Quando a quantidade de folhas é pequena, essa tarefa pode ser realizada manualmente, sem grandes problemas. Porém, à medida que a quantidade de arquivos a serem copiados aumenta, tal tarefa se torna dispendiosa e susceptível à falha na correta aquisição dos dados, já que a nomenclatura dos arquivos é extensa, como foi apresentado na Figura 27. Foi desenvolvido um algoritmo em linguagem de programação Python que lê um arquivo texto contendo a nomenclatura de todas as folhas da área de estudo, realiza a busca por cada uma delas no disco rígido e as copia para o destino desejado pelo usuário.

Para poupar o custo computacional associado, para cada uma das bacias de interesse foi tomada a delimitação da bacia e estabelecida uma área no entorno de 3 km. A região definida pela bacia e esse entorno é que foi considerada como necessária para ter

dados dos MDT LiDAR. As áreas externas a essa região, dentro de cada MDT, permaneceram com dados inválidos.

3.4.3 Concatenação dos arquivos MDT LiDAR

A concatenação dos dados do MDT LiDAR, também denominada de mosaicagem ou miscelânea, tem como produto um arquivo único de toda a área de interesse (mosaico). Esse processo pode ser realizado através de *software* de SIG ou através de algoritmos, utilizando a biblioteca *Geospatial Data Abstraction Library* - GDAL, por exemplo. Por apresentar maior liberdade de manipulação dos arquivos, foram desenvolvidos algoritmos em Python utilizando a biblioteca citada.

A primeira versão desse algoritmo consistia no agrupamento de todos os arquivos de forma sequencial, desde o primeiro até o último arquivo em um único *loop*. Em cada iteração os arquivos eram agrupados de acordo com as coordenadas de cada pixel das suas matrizes de dados, n linhas e m colunas. A quantidade de linhas e colunas do arquivo agrupado depende da localização, das coordenadas, dos pixels.

Quando há sobreposição de dados, a quantidade de linhas e/ou de colunas é menor que a soma entre as quantidades individuais de cada dado raster. E havendo sobreposição, o valor do pixel no mosaico é igual ao valor contido no último raster analisado durante o processo de mosaicagem. A Figura 28 apresenta duas situações: dois MDTs LiDAR adjacentes lateralmente (Figura 28-a), cada um com 2.412 linhas e 3.544 colunas. O resultado dessa operação é o MDT representado na Figura 28-b, com 2.412 linhas e 6.981 colunas. Outro exemplo são dois MDTs adjacentes diagonalmente, cada um com 2.412 linhas e 3.544 colunas (Figura 28-c). O resultado dessa última operação é encontrado na Figura 28-d, com 4.707 linhas e 6.987 colunas.

Nessa versão inicial do algoritmo de concatenação, os dados de entrada da primeira iteração são os dois primeiros arquivos da lista de dados a serem concatenados. O resultado da primeira iteração é inserido como dado de entrada na segunda iteração, junto com o próximo arquivo a ser concatenado. E o resultado da segunda iteração é inserido como dado de entrada da terceira, para ser concatenado com o próximo arquivo, e assim por diante, até que sejam concatenados todos os arquivos.

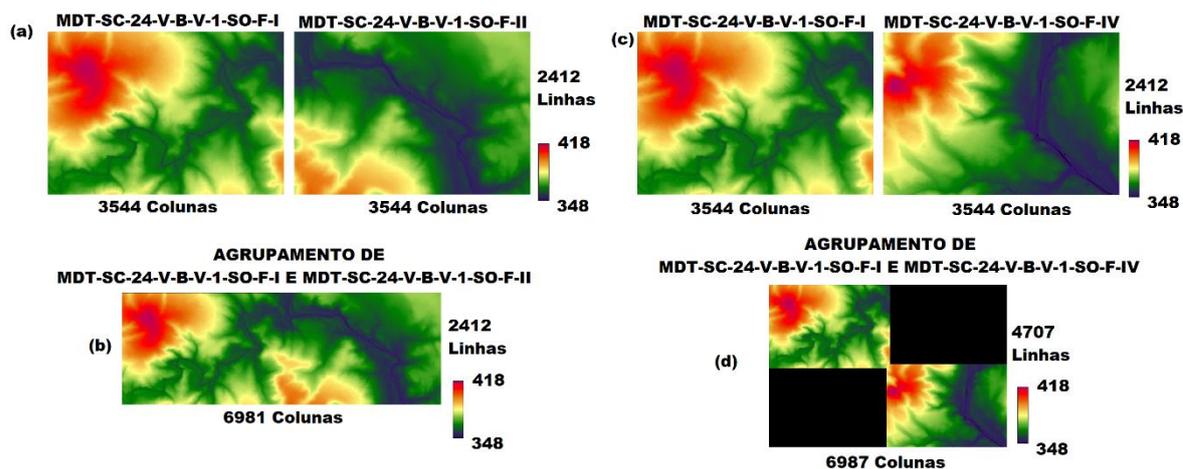


Figura 28 – Casos de agrupamento de dados raster. (a) MDTs adjacentes lateralmente; (b) agrupamento de dois MDTs adjacentes lateralmente e com sobreposição de colunas; (c) MDTs adjacentes diagonalmente; agrupamento de dois MDTs adjacentes diagonalmente e com sobreposição de linhas e colunas.

Entretanto, com o uso do algoritmo, percebeu-se que à medida que a quantidade de iterações ia aumentando o custo computacional para concatenar mais um arquivo aumentava consideravelmente. Foram feitas alterações no algoritmo, com o objetivo de reduzir o tempo de processamento.

A solução encontrada foi dividir os arquivos em blocos, ou seja, ao invés de concatenar todos os arquivos em um único *loop*, o conjunto de dados foi dividido em blocos, onde cada bloco se refere a um grupo de arquivos. Os arquivos de cada bloco são então concatenados entre si e, posteriormente, os blocos são concatenados entre eles. Para criar os blocos são selecionados os arquivos mais próximos geograficamente e, para isso, é utilizado o índice de nomenclatura apresentado na Figura 27.

Por exemplo, caso a quantidade de arquivos a serem concatenados seja de 730 rasters, o método pode inicialmente concatenar três grupos de 200 rasters e um grupo de 30 rasters, resultando em quatro mosaicos. Após essa etapa inicial, o algoritmo concatena os quatro mosaicos e tem como resultado o mosaico final de toda a área de estudo. Dependendo do *hardware* disponível, a quantidade de rasters a serem concatenados em um bloco pode ser maior do que a do exemplo apresentado.

Essa simples alteração no código para operar a concatenação de dados por blocos de arquivos resultou em uma diminuição considerável do tempo de processamento, reduzindo de mais de 5 dias de processamento para algumas horas.

Para a bacia do rio das Garças, o mosaico do MDT é formado por 732 cenas e, para a bacia do rio Sirinhaém, tem-se 421 cenas mosaicadas.

3.4.4 Filtragem dos pixels sem valores do MDT LiDAR

Nas cenas individuais do PE3D, podem existir pixels sem dados (*No data value*). Uma alternativa para lidar com isso é a etapa de filtragem desses pixels.

Nesta pesquisa, optou-se por primeiro realizar a concatenação das cenas e posteriormente analisar a ocorrência de dados inválidos para verificar a necessidade de efetuar a filtragem. Esse procedimento foi realizado por dois motivos.

Primeiro, para minimizar a modificação dos dados originais. Uma vez que a filtragem realiza uma inserção de informação através de alguma métrica de interpolação, alguns autores consideram uma contaminação do dado original, sendo, portanto, desejável minimizar esse efeito.

O segundo motivo é que as cenas individuais podem conter pixels sem dados na borda da cena, mas cujos valores estão presentes e válidos na cena vizinha (pixels sobrepostos). Através do processo de mosaicagem, os pixels sem dados são devidamente preenchidos com os valores originais do dado da cena vizinha, reduzindo a necessidade de filtragem.

Por outro lado, se a filtragem é realizada para as cenas individuais, haveria o preenchimento dos pixels inválidos localizados na borda das cenas com valores calculados, de acordo com a métrica escolhida. Ao fazer posteriormente a concatenação das cenas já filtradas, poderia ser que valores gerados pela filtragem permanecessem no resultado, ao invés de valores originais válidos, nas áreas de sobreposição das cenas.

Para esta pesquisa a filtragem foi realizada através do desenvolvimento de um algoritmo em Python, utilizando a biblioteca GDAL através da plataforma Anaconda.

A biblioteca GDAL e os *softwares* de SIG possuem ferramentas de preenchimento de pixels sem valores (*Fill No data Values*). No caso da biblioteca citada, os valores filtrados são obtidos através da interpolação pelo inverso da distância ponderada dos valores dos pixels válidos da vizinhança. Porém, para trabalhar com grandes quantidades de dados como os MDT Lidar, dependendo do tamanho da área de estudo, o arquivo concatenado pode ser grande demais para ser filtrado utilizando a biblioteca GDAL ou um *software* de SIG. Quando isso ocorre, ao tentar filtrar a imagem ocasiona um erro

informando que o método de filtragem não está preparado para lidar com arquivos denominados *BigTiff*. Como medida de contorno, pode-se utilizar a versão mais recente da biblioteca GDAL, ou do *software*, mas sem garantia de resolução definitiva do problema de limitação de quantidade de dados.

Com a concatenação das cenas para obter o mosaico do MDT da bacia do Rio das Garças, não houve nenhum pixel inválido dentro da região de interesse (área da bacia mais entorno de 3 km). Todos os casos de pixels inválidos nessa região estavam localizados nas bordas das cenas individuais e foram eliminados automaticamente no processo de mosaicagem.

Para a bacia do rio Sirinhaém, o processo de concatenação das imagens não evitou existirem pixels inválidos no mosaico final do MDT dentro da região de interesse. Permaneceram quase 4 milhões de pixels inválidos, mas que representam apenas cerca de 0,14% do total de pixels da região de interesse (~3 bilhões). Esses pixels inválidos foram eliminados e preenchidos pelo processo de filtragem seguindo o procedimento descrito.

3.5 Etapa de pré-processamento dos dados MDT LiDAR

3.5.1 Seleção de algoritmos de remoção de depressões

Foram selecionados na literatura 6 algoritmos de remoção das depressões, dois comerciais: TerrSET – *Pit Removal* (SEDGWICK, 1992), ArcMap – *Fill* (PLANCHON; DARBOUX, 2001), e quatro *Open Source*, código fonte aberto que pode distribuído de forma compilada: RichDEM – *Depression Filling* (BARNES, 2016), RichDEM – *Parallel Priority Flood Fill Sinks* (BARNES, 2017), SAGA GIS – *Fill Sinks* (WANG; LIU, 2006) e SAGA GIS – *Fill Sinks XXL* (WANG; LIU, 2006). A escolha se motivou por serem algoritmos de grande utilização por parte dos usuários, soluções comerciais, e por serem de alto desempenho, de acordo com a literatura.

O algoritmo TerrSET – *Pit Removal* cria um MDE ajustado removendo depressões ou mínimos locais. A partir do pixel de menor altitude da depressão analisada, um caminho que direciona o fluxo para fora desta depressão é pesquisado. O pixel inicial é o pixel identificado como depressão e o pixel final é o pixel que tem um valor menor que o pixel inicial ao longo do caminho do fluxo, ou um pixel localizado na borda do conjunto de dados. Em seguida, todos os pixels nesse caminho de fluxo são reduzidos linearmente de

acordo com a distância percorrida (SEDEWICK, 1992). O raster resultante garante que qualquer pixel no MDE possua um caminho de fluxo até a borda do raster. Um caminho é composto de pixels que são adjacentes horizontalmente, verticalmente ou diagonalmente na grade raster e diminui de forma constante em valor altimétrico, o que garante também o tratamento de áreas planas.

ArcMap – *Fill* realiza uma busca por pixels que não possuem escoamento para pixels de borda, ao encontrá-los determina qual o pixel com menor diferença de altitude provocaria um escoamento caso a depressão fosse inundada. O usuário deve definir um valor máximo de diferença entre a altitude do pixel a ser preenchido e a do pixel de escoamento. Para os casos em que os valores sejam maiores que o limite estabelecido, as depressões permanecerão intocadas. A execução desse algoritmo demanda alta disponibilidade de memória, poder de processamento e requer até quatro vezes o tamanho do raster de entrada como espaço disponível de armazenamento. Para dados de entrada raster com mais de 5.000 linhas e 5.000 colunas, o processamento é realizado de forma paralela utilizando por padrão a metade dos núcleos de processamento disponíveis. Entretanto ao usar o processamento paralelo, os dados temporários de cada bloco gerados durante a execução serão gravados e posteriormente serão lidos. A tarefa de leitura e escrita das informações de cada bloco impacta no custo de processamento, principalmente se estiver utilizando unidades físicas de disco rígido (*hard disk drives* - HDD) ao invés de unidades de estado sólido (*solid-state drives* - SSD).

O algoritmo *Depression-Filling* fornecido pelo RichDEM simula uma inundação artificial do DEM da borda para interior do raster, usando uma fila de prioridade para determinar o próximo pixel a ser inundado. Pixels de borda são marcados como resolvidos, pois garantem uma drenagem. O processamento é realizado através da inserção de pixels de borda na fila de prioridade, o de maior prioridade será sempre aquele com a menor altitude. O pixel de maior prioridade é removido da fila e seu pixel vizinho é analisado. Se o pixel vizinho em análise tiver uma altitude maior que o pixel removido, ele é adicionado à fila de prioridade e o processamento continua inalterado. Caso contrário, ele é inserido em uma fila simples e seu valor de altitude é substituído pelo mesmo valor do pixel que foi removido da fila de prioridade. A próxima iteração novamente analisa o vizinho do pixel anterior, agora analisando ambas as filas. O processamento termina quando não houver mais pixels na fila de prioridade. Para superar o limite de RAM para lidar com todo o conjunto de dados, este algoritmo divide o MDT em blocos, se necessário. Este algoritmo é

capaz de processar grandes quantidades de dados até mesmo em computadores pessoais, mas seu desempenho é favorecido se for processado em ambientes computacionais mais robustos (BARNES, 2016).

O algoritmo paralelo, RichDEM – *Parallel Priority Flood Fill Sinks* utiliza blocos de processamento dos dados caso o raster de entrada não caiba inteiramente na memória. Possui um único processo denominado de produtor e vários processos consumidores. É dividido em três etapas: (1) o produtor define e distribui os blocos aos consumidores que processam os dados e devolvem algumas informações ao produtor; (2) De posse das informações dos blocos, o produtor realiza o cálculo para que cada bloco possa, de forma independente, recalculá-los os valores, até então locais, para produzir uma solução global; (3) o produtor passa as informações para cada bloco. Após todos os blocos recalcularem os valores, tem-se uma solução global para todos os pixels do raster de entrada. Percebe-se que a terceira etapa só pode ser realizada ao término da segunda, pois dados intermediários interferem na solução global. Os dados intermediários podem ser armazenados na memória ou salvos em disco, a primeira estratégia possui resultados melhores que a segunda, mas depende da quantidade de memória disponível.

O algoritmo SAGA GIS – *Fill Sinks* também usa a ideia de preenchimento para remover depressões. Além disso, este método propõe a remoção de depressões alterando o mínimo possível o MDE original, e mesmo assim, garante uma inclinação descendente ao longo do caminho do fluxo. Este algoritmo prioriza o menor custo por busca de caminhos de fluxo ótimos e utiliza o conceito de elevação de derramamento, atribuindo a toda a área de estudo um espelho d'água de maior altitude e diminuindo até encontrar todos os pontos de drenagem (WANG; LIU, 2006). Outra versão desse algoritmo é projetada especificamente para processar grandes conjuntos de dados, particularmente dados LiDAR, e é denominado SAGA GIS – *Fill Sinks XXL*.

A Tabela 3 apresenta os algoritmos de remoção das depressões, direções de fluxo e áreas acumuladas de drenagem selecionadas por esta pesquisa.

Tabela 3 – Algoritmos de extração automática de rede de drenagem a partir de MDE selecionados.

Software/Solução	Algoritmos usados		
	Remoção de depressões	Direções de fluxo	Áreas acumuladas de drenagem
TerrSet	<i>Pit Removal</i>	Flow **	<i>Runoff</i>
ArcMap	<i>Fill</i>	<i>Flow direction</i>	<i>Flow Accumulation</i>
SAGA GIS	<i>Fill Sinks (WANG; LIU, 2006)</i>	<i>Fill Sinks (WANG; LIU, 2006)**</i>	<i>Flow Accumulation (Top Down)</i>
SAGA GIS	<i>Fill Sinks XXL (WANG; LIU, 2006)</i>	<i>Fill Sinks (WANG; LIU, 2006)**</i>	<i>Flow Accumulation (Top Down)</i>
RichDEM	<i>Fill Depression</i>	<i>RD D8 Flowdirs **</i>	<i>Flow Accumulation</i>
RichDEM	<i>Parallel Priority Flood</i>	<i>RD D8 Flowdirs</i> <i>Fill Sinks XXL (WANG; LIU, 2006)</i>	<i>Parallel Flow Accumulation</i>

** não necessário de calcular.

3.5.2 Reamostragem do MDT

A reamostragem dos pixels do MDT LiDAR foi realizada pelo método da agregação pela média dos valores válidos. A quantidade de pixels a serem agregados através da média é dada em função da relação entre resolução espacial a ser obtida e resolução espacial original. Por exemplo, para a reamostragem de 1 m para 10 m, foram utilizados 100 pixels da resolução original para obter a média representativa do pixel de 10 m correspondente.

Foi utilizado o dado original, MDT com resolução de 1 m, e foram obtidos MDTs nas resoluções espaciais de 2, 5, 10 e 30 m. A Tabela 4 apresenta a dimensão e o tamanho de armazenamento desses dados, para ambas as bacias em estudo.

3.5.3 Remoção das depressões

Para cada bacia, foi efetuada a remoção das depressões para o MDT nas diferentes resoluções espaciais (1, 2, 5, 10 e 30 m) e considerando os 6 algoritmos selecionados. Essas operações foram repetidas para os dois computadores trabalhados nesta pesquisa. Ao

final, foi realizado um total de 120 procedimentos de remoção das depressões, em duplicata.

Tabela 4 – Dimensão da matriz numérica para cada resolução espacial.

Resolução	Garças			Sirinhaém		
	Quantidade de colunas	Quantidade de linhas	Quantidade de pixels válidos*	Quantidade de colunas	Quantidade de linhas	Quantidade de pixels válidos*
1 m	127.056	80.166	5.025.601.620	92.489	56.071	2.985.053.977
2 m	63.528	40.083	1.256.303.643	46.244	28.035	746.186.369
5 m	25.411	16.033	206.401.514	18.497	11.214	119.410.956
10 m	12.705	8.016	51.236.235	9.248	5.607	29.859.132
30 m	4.35	2.672	5.733.420	3.082	1.869	3.319.279

* Pixels dentro da região de interesse, já que pixels de fora dessa região são inválidos, para reduzir custo computacional.

3.6 Processamento dos dados MDT LiDAR

3.6.1 Determinação das direções de fluxo

Algoritmos específicos para o cálculo de direções de fluxo nem sempre são disponibilizados pela solução computacional. Nesses casos, a direção de fluxo é calculada como etapa inicial do processamento de aquisição de outros produtos que dependem dessa informação. Entretanto, alguns algoritmos requerem essa informação como dado de entrada. Por exemplo, dentre os algoritmos de áreas acumuladas de drenagem selecionadas, o ArcMap *Flow accumulation* e o *Parallel Flow Accumulation* do RichDEM, são os únicos que requerem como dado de entrada o raster de direções de fluxo. O MDE sem depressões é o dado de entrada para os demais, sendo o cálculo das direções de fluxo uma etapa do processamento. Essa diferença de abordagem impacta no custo de processamento do método, a quantidade de processos a serem executados não é a mesma entre eles. Porém, são escolhas de implementação de cada solução que não impedem de serem comparadas quanto o custo de processamento.

O método de cálculo de direções de fluxo do RichDEM *RD D8 Flowdirs* não é um método capaz de lidar com grande quantidade de dados e por esse motivo os MDTs

LiDAR com resolução espacial de 1 m para as duas bacias não puderam ser processados por essa solução. O raster de direções de fluxo obtido pelo SAGA GIS *fill sinks*, para esses dados foram utilizados para mensurar o custo de processamento do *Parallel Flow Accumulation* do RichDEM. Apesar disso, os resultados, da área acumulada de drenagem, obtidos não foram utilizados para extrair a rede de drenagem, por se tratar de um produto adquirido por mais de uma solução computacional.

3.6.2 Seleção de algoritmos de cálculo de áreas acumuladas de drenagem

Para um determinado pixel, a área acumulada de drenagem é a soma de todos os pixels que escoam até ele. Esta informação pode ser expressa como a quantidade de pixels a montante que contribuem para este pixel ou expresso pela soma de suas áreas de superfície. Assim, dada à definição das direções de fluxo, tem-se que a determinação das áreas acumuladas de drenagem é um cálculo trivial.

Embora seja um conceito simples, softwares distintos podem adotar métodos computacionais específicos para realizar este cálculo, principalmente tentando reduzir o tempo de execução. Portanto, a distinção entre os algoritmos não é quanto ao resultado em si das áreas acumuladas de drenagem, e sim quanto ao custo computacional.

O custo computacional de calcular as áreas de drenagem acumuladas de MDEs de alta resolução espacial usando métodos convencionais pode ser proibitivamente longo. Por isso, nos últimos anos, novos algoritmos têm sido propostos para reduzir custos computacionais e possibilitar o uso desses dados para grandes áreas (ZHOU; WEI; FU, 2019a).

Foram utilizados os seguintes algoritmos: TerrSET – *RUNOFF*; ArcMap – *Flow Accumulation*; RichDEM – *Flow Accumulation*; RichDEM – *Parallel Flow Accumulation*; SAGA GIS – *D8 Flow Accumulation (Top-Down)*. O algoritmo TerrSET – *RUNOFF* é baseado no método proposto por Jenson e Domingue (1988). Este algoritmo calcula a área acumulada de cada pixel do raster com base no conceito de uma unidade de chuva que "caiu" em cada pixel e que flui ao longo de seu caminho de fluxo a jusante até atingir a borda do conjunto de dados. O algoritmo TerrSET – *RUNOFF* é computacionalmente intensivo e não pode executado em grandes matrizes de dados (Manual do TerrSET).

O algoritmo ArcMap – *Flow Accumulation* também é baseado no método proposto por Jenson e Domingue (1988), com adaptações propostas por Tarboton et al. (1991). Pode

ser processado de forma sequencial e paralelo, para dados de entrada com mais de 5.000 linhas e 5.000 colunas. Por padrão utiliza a metade dos núcleos de processamento disponíveis quando processado de forma paralela, na versão implementada no ArcMap.

A ferramenta *Flow Accumulation (Top-Down)* do SAGA GIS realiza o cálculo das áreas acumuladas de drenagem a partir de uma fila de prioridade. A prioridade é diretamente proporcional ao valor altimétrico do pixel. Este método é capaz de processar grandes conjuntos de dados.

O algoritmo RichDEM – *Flow Accumulation* usa processamento distribuído, através da segmentação do conjunto de dados. Para dividir e processar a área de estudo em partições são utilizados nós mestre e escravo, com apenas duas interações de comunicação entre o mestre e cada nó escravo (BARNES, 2016). Isso limita a comunicação, leitura e escrita de dados, reduz o tempo de processamento e permite que o algoritmo seja processado para grandes MDEs em *desktops* convencionais (BARNES, 2016).

O algoritmo paralelo RichDEM – *Parallel Flow Accumulation* utiliza um processo chamado produtor, que cria tarefas, as distribui e agrega os resultados obtidos por outros processos chamados consumidores. O processamento consiste em três etapas: (1) o produtor aloca os blocos aos consumidores, que calculam o acúmulo de fluxo para cada pixel pertencente ao bloco. Este é um resultado intermediário; (2) de posse dos resultados intermediários, os consumidores repassam ao produtor que calcula e devolve aos consumidores a informação do deslocamento de acúmulo de fluxo para cada pixel da borda do bloco; (3) A partir do deslocamento do acúmulo de fluxo, os blocos recalculam as áreas acumuladas de drenagem, obtendo uma solução global. Essa abordagem permite um processamento de conjunto de dados ainda maiores que os processados pelo RichDEM – *Flow Accumulation*, além de requerer menos recursos computacionais.

3.6.3 Cálculo das áreas acumuladas de drenagem

Para cada bacia, foi efetuado o cálculo das áreas acumuladas de drenagem para o MDT nas diferentes resoluções espaciais (1, 2, 5, 10 e 30 m) e considerando os 5 algoritmos selecionados. Essas operações foram repetidas para os dois computadores trabalhados nesta pesquisa. Ao final, foi realizado um total de 100 procedimentos de remoção das depressões, em duplicata.

3.6.4 Adaptação do algoritmo de uspcaling de direções de fluxo para grande quantidade de dados

O algoritmo COTAT+ proposto por (PAZ; COLLISCHONN; LOPES DA SILVEIRA, 2006) não é capaz de lidar com grande quantidade de dados, devido ao gerenciamento de memória RAM requerido pelas várias matrizes carregadas simultaneamente. Para superar essa limitação, o algoritmo precisou ser modificado. Duas etapas de processamento independentes principais foram identificadas: a etapa de seleção de pixel exutório para cada célula de baixa resolução espacial e a etapa de atribuição de direções de fluxo pelo percurso dos caminhos de fluxo a jusante dos pixels exutórios. Para a primeira, apenas os dados que envolvem o processamento de cada célula são carregados na memória RAM, enquanto que para a segunda etapa são carregados os dados da célula em análise e das suas oito vizinhas (grade 3 x 3), Figura 29. O algoritmo foi modificado via linguagem de programação Fortran.

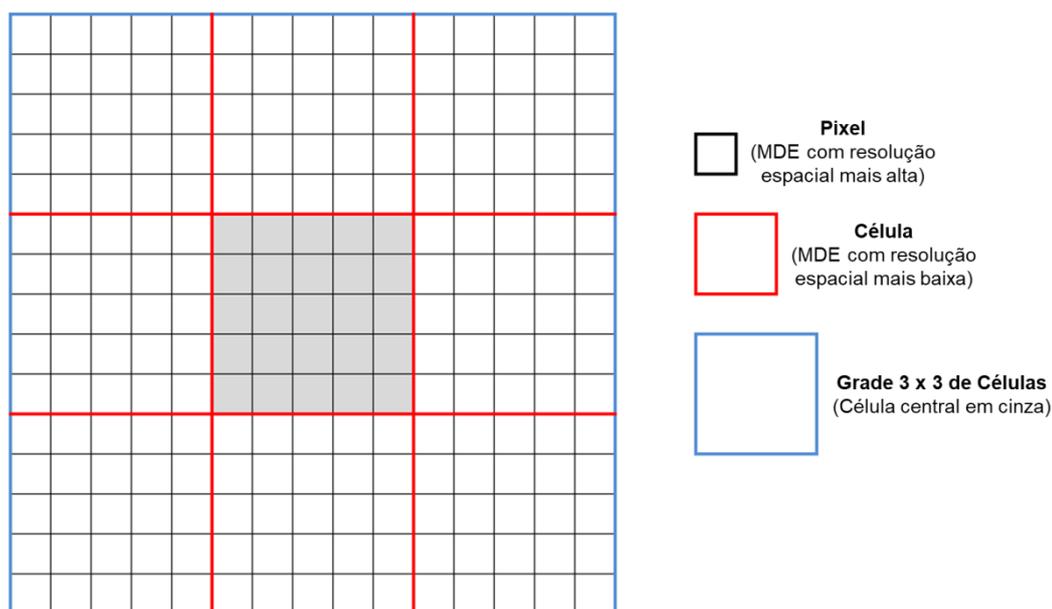


Figura 29 – Representação do pixel do MDE de mais alta resolução espacial, da célula do MDE de mais baixa resolução e da grade 3 x 3 de células.

Como efeito o algoritmo modificado se tornou praticamente independente de restrição de memória RAM – computadores pessoais comuns estão aptos a rodar para qualquer dimensão de matriz. Porém, o custo de processamento ainda é elevado. Com o

objetivo de reduzir esse custo, foi implementada a paralelização do processamento das etapas independentes identificadas, via *openMP* (*Open specifications for Multi-Processing*). Trata-se de um padrão de processamento paralelo que define diretivas de compilador, possui biblioteca própria de funções e variáveis de ambiente que facilitam a implementação (CHAPMAN et al., 2008) e está disponível para linguagem FORTRAN (HERMANNNS, 2002), dentre outras linguagens. O uso do *openMP* é bastante simples e requer pequenas adaptações ao código original da rotina, que continua podendo ser executado de forma sequencial.

A paralelização de qualquer método computacional requer a identificação de tarefas independentes que possam ser executadas ao mesmo tempo, sem que isso atrase o processamento de outras tarefas do método, isto é, a paralelização, na maioria dos casos, é realizada para parte do método e não para todo o método computacional. Sendo assim, parte do método continua sendo processada de forma sequencial e outras partes são modificadas para serem processadas de forma simultânea, divididas na quantidade de núcleos de processamento disponíveis. A redução do custo computacional ocorre em função da quantidade de tarefas que podem ser paralelizadas e o quanto cada uma dessas tarefas impacta no custo de processamento do método na forma sequencial.

3.6.5 Aplicação do *upscaling* de direções de fluxo

O *upscaling* de direções de fluxo foi aplicado para os dados MDT LiDAR 1 m para as bacias do Rio Sirinhaém e do Rio das Garças, para obter as direções de fluxo na resolução espacial de 30 m. Os valores de parâmetros adotados foram: 900 m² (AIM), igual à área da célula, e 6 m (CMM), igual a um quinto da dimensão da célula.

Devido ao tempo de processamento desse método para a quantidade de dados utilizada por esta pesquisa, o processamento foi realizado apenas com o método COTAT+ paralelo, na *workstation* com 20 núcleos de processamento.

Para obter a rede de drenagem do *upscaling* foi utilizado o método paralelo de cálculo de áreas acumuladas do RichDEM. Pois, requer como variável de entrada o raster de direções de fluxo, além de ser computacionalmente eficiente. Além do RichDEM paralelo, também poderia ter sido utilizado o método *flow accumulation* presente no ArcMap, pois também recebe como entrada o raster de direções de fluxo, porém este método obteve um custo computacional superior ao do RichDEM.

3.6.6 *Obtenção da rede de drenagem derivada do MDT LiDAR*

A aquisição da rede de drenagem foi realizada inicialmente através da atribuição de uma área de acumulação de drenagem mínima, isto significa que pixels com áreas acumuladas superiores a esse valor passaram a fazer parte da rede de drenagem, via procedimento de reclassificação. A definição do limiar de início da rede de drenagem foi estabelecida por tentativa e erro para a rede oriunda do MDT de 1m, visando obter uma rede de drenagem com densidade aproximada à rede vetorial digitalizada tomada como referência (descrita no item 3.8.3), porém mais densa do que a digitalizada. O valor de área mínima definido para a rede de 1 m foi replicado para as demais resoluções. Para as duas bacias esse valor foi de 5 km².

O propósito desse procedimento foi obter redes de drenagem determinadas do processamento do MDT equivalentes às redes digitalizadas para cada bacia. A partir desse procedimento de reclassificação, a rede de drenagem obtida em formato raster foi convertida para o formato vetorial. Em seguida, um pós-processamento manual foi realizado para eliminar trechos de rio gerados por esse método, mas que não estavam representados na rede vetorial digitalizada. Também foram editadas as redes vetoriais geradas do processamento MDT para garantir o início de cabeceira dos trechos equivalente ao das redes digitalizadas.

Com essa abordagem, o valor de área mínima para início das redes de drenagem não tem qualquer influência sobre os resultados obtidos nesta pesquisa. Todo o procedimento de obtenção das redes de drenagem foi replicado para obter redes resultantes de todos os algoritmos e resoluções espaciais de MDT, para as duas bacias de estudo (um total de 20 redes para cada bacia).

3.7 *Coleta e processamento do MDE SRTM*

3.7.1 *Aquisição dos dados SRTM, mosaico e recorte*

O uso do SRTM faz-se pertinente para avaliar o custo-benefício do uso de dados de alta resolução espacial, quando comparado aos resultados dos dados com resoluções maiores. O SRTM, por ser um dos primeiros MDEs globais, disponibilizado gratuitamente,

e com uma resolução espacial de 30 ou 90 m, é amplamente utilizado em pesquisas hidrológicas, dentre elas, para aquisição de redes de drenagem. Por esse motivo, pelo uso desse dado, com a resolução de 30 m, para servir de comparação ao analisar os resultados obtidos pelos dados LiDAR e para avaliar desempenhos dos diferentes algoritmos testados. Os dados foram obtidos através do *EarthExplorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), portal *online* para aquisição de dados do *United States Geological Survey* (USGS).

Para a bacia do Rio das Garças, foram obtidas as cenas s09_w040_1arc_v3 e s09_w041_1arc_v3, fazendo-se o mosaico e posterior recorte para a mesma janela de trabalho definida pelo mosaico do MDT LiDAR. Analogamente, o mesmo procedimento foi realizado com as cenas s09_w035_1arc_v3 e s09_w036_1arc_v3 do SRTM 30, para o caso da bacia do Rio Sirinhaém.

3.7.2 Filtragem do MDE SRTM

O mesmo procedimento de filtragem aplicado ao MDT LiDAR foi usado para filtrar o MDE SRTM e substituir os pixels inválidos. Na bacia do Rio das Garças, não apresentou pixels sem dados altimétricos, enquanto para a bacia do Rio Sirinhaém o percentual foi de 1%.

3.7.3 Remoção das depressões do MDE SRTM

Os mesmos algoritmos de remoção de depressões usados para MDT LiDAR e listados na Tabela 3 foram usados para o caso do MDE SRTM de ambas as bacias de estudo. O propósito foi de posteriormente avaliar a qualidade da rede de drenagem considerando diferentes algoritmos, como descrito no item 4.3 adiante. Como não houve a intenção de avaliar custo computacional de processar o MDE SRTM, esse procedimento foi realizado apenas uma vez para cada algoritmo e bacia.

3.7.4 Cálculo das áreas acumuladas de drenagem a partir do MDE SRTM

Novamente os mesmos algoritmos selecionados e usados para o caso do MDT LiDAR (Tabela 3) foram usados para obter as áreas acumuladas de drenagem derivadas do

MDE SRTM em cada bacia. Também não houve replicação do procedimento em máquinas distintas e nem registro de tempo para avaliação de custo computacional.

3.7.5 *Obtenção da rede de drenagem derivada do MDE SRTM*

A partir de cada raster de áreas acumuladas de drenagem, o procedimento de reclassificação foi realizado considerando área mínima de 5 km² para as bacias do Rio das Garças e do Rio Sirinhaém – ou seja, foram mantidos os valores definidos para o MDT LiDAR. Analogamente, cada rede de drenagem raster foi convertida para vetor e feito o pós-processamento para eliminação de trechos de rio não selecionados para análise e garantia do início das redes de forma equivalente. Foram obtidas, portanto, 20 redes para cada bacia.

3.8 Aquisição da rede de drenagem de referência

3.8.1 *Definição dos trechos de rio*

Nesta etapa foi definido um conjunto de rios para análise posterior da qualidade das redes de drenagem obtidas por diferentes fontes de dados e processamentos. O propósito foi estabelecer um conjunto de rios espacialmente representativo de cada bacia e viável em termos de quantidade de processamentos e resultados a serem realizados e analisados.

Foram selecionados os rios e trechos de rios para análise com base na hidrografia da APAC representada nos mapas da Figura 21 e 23. Foram selecionados 16 trechos para cada uma das bacias, enumerados na Tabela 5.

Tabela 5 – Trechos de rios da rede de drenagem das bacias do Rio Sirinhaém e do Rio das Garças selecionados para as análises (os trechos do rio principal de cada bacia estão destacados com a cor de fundo cinza).

Id	Bacia Rio Sirinhaém	Bacia Rio das Garças
1	Riacho dos Tanques	Alto Riacho Caipora
2	Alto Rio Sirinhaém	Médio Riacho Caipora
3	Médio Rio Sirinhaém	Baixo Riacho Caipora
4	Baixo Rio Sirinhaém	Riacho São Domingos
5	Foz Rio Sirinhaém	Alto Rio das Garças
6	Riacho Tanque de Piabas	Médio Rio das Garças
7	Riacho Seco	Baixo Rio das Garças
8	Riacho do Renon	Riacho do Mocambo
9	Riacho Bonito Grande	Riacho da Água Preta
10	Riacho do Sangue	Riacho Boa Vista
11	Rio Amaraji	Riacho das Lagoas
12	Rio Cuiambuca	Riacho da Volta
13	Rio Camaragibe	Riacho Alegre
14	Córrego Lava Mão	Riacho do Periquito
15	Rio Tapiruçó	Riacho dos Campos
16	Rio Sibiró	Riacho da Ponta da Serra

3.8.2 Identificação e coleta das ortofotos

Para o conjunto de rios selecionados para cada bacia de estudo, foram obtidas as ortofotos correspondentes do projeto PE3D, com resolução espacial de 50 cm. Foram coletadas 190 ortofotos para os rios da bacia do rio das Garças e 126 ortofotos para o caso da bacia do rio Sirinhaém.

3.8.3 Digitalização dos trechos de rio

Pela interpretação visual das ortofotos, os traçados dos rios selecionados para análise foram obtidos por digitalização manual para as duas bacias de estudo. Um total de 553,442 km de rios foi digitalizado para a bacia do Rio das Garças e 444,722 km para a bacia do Rio Sirinhaém. Esses traçados foram considerados posteriormente nas análises

como a rede de referência. A Figura 30 apresenta os rios digitalizados para as duas bacias, com a identificação dos trechos de acordo com a Tabela 5.

A Figura 31 apresenta as ortofotos de trecho da bacia do Rio das Garças e a rede de drenagem obtida pela digitalização manual realizada para esse trecho, como exemplo da metodologia utilizada.

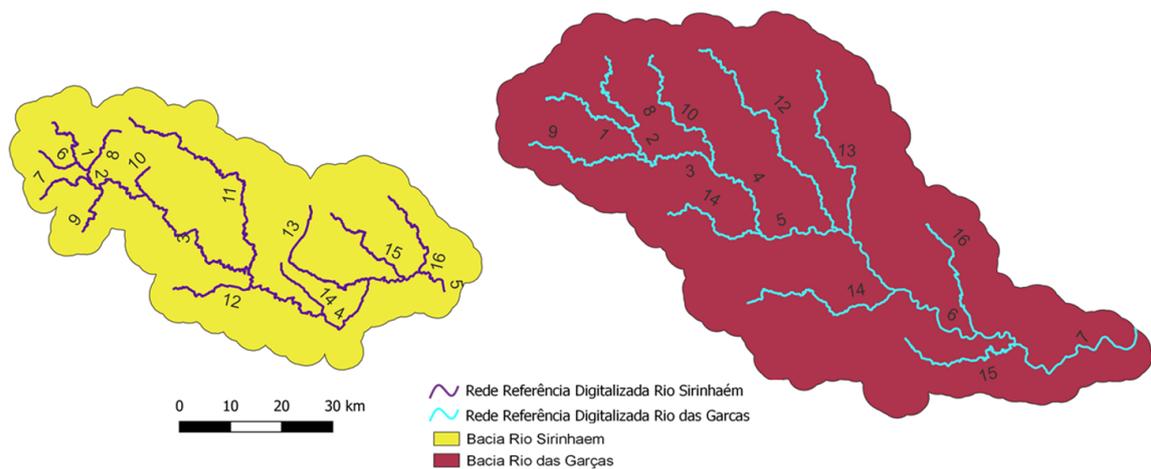


Figura 30 - Redes de referências digitalizadas para cada uma das bacias de estudo.

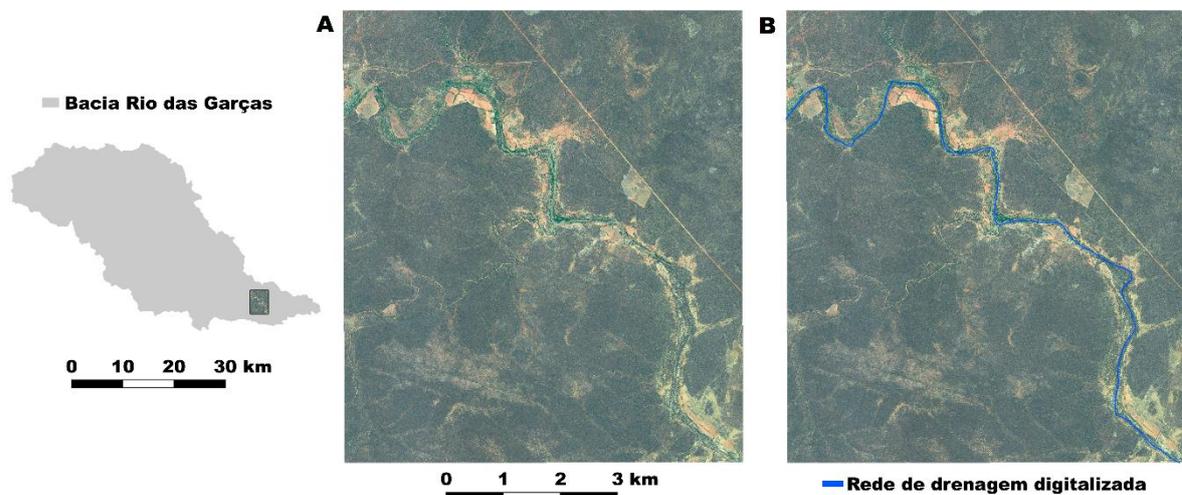


Figura 31 – Digitalização de trecho da drenagem do Rio das Garças, utilizando ortofotos do PE3D, com resolução espacial de 50 cm: A) Ortofoto; B) Ortofoto com rede digitalizada sobreposta.

3.9 Análise de resultados

3.9.1 Análise topográfica

Do ponto de vista da representação topográfica, foram analisadas curvas hipsométricas, perfis topográficos e raster das diferenças entre MDEs. Os propósitos dessas análises foram: avaliar a qualidade dos dados do MDT LiDAR frente aos dados do MDE SRTM; avaliar a diferença de representação entre MDS e MDT LiDAR; e avaliar o efeito da mudança de resolução espacial do MDT LiDAR.

A curva hipsométrica caracteriza a variação topográfica da bacia hidrográfica relacionando o percentual da área que possui valores de elevação acima de um determinado valor. As curvas hipsométricas foram geradas a partir da elaboração dos histogramas de frequência de elevação dos pixels contidos na região delimitada pela bacia hidrográfica, obtida em cada resolução espacial e para cada fonte de dados. Nesse caso, foram considerados o MDE SRTM e o MDT LiDAR nas diferentes resoluções espaciais.

Os perfis topográficos transversais representam a variação topográfica ao longo de determinado transecto. Esses transectos foram traçados manualmente procurando cruzar áreas de diferentes características de uso e ocupação da terra e cobertura de vegetação. Foram traçados vetores do tipo linha, sobrepostos ao MDT/MDS LiDAR e ao MDE SRTM. A análise do gráfico com os valores de elevação e a sua distribuição planimétrica, possibilita verificar as diferenças do relevo em cada uma das fontes de dados. Isso permite, por exemplo, avaliar os elementos representados por eles e as diferenças de detalhes capazes de serem identificados devido à diferença da resolução espacial, caso exista. As análises foram realizadas com auxílio das ortofotos para interpretação e associação ao uso e ocupação da terra e cobertura vegetal.

O raster das diferenças entre MDS e MDT LiDAR e entre MDT LiDAR e MDE SRTM foram também gerados e analisados. Para o primeiro caso, ambos MDS e MDT foram tomados na resolução espacial original de 1m. Para o segundo caso, foi feita a operação entre o MDT LiDAR de 1m e o MDE SRTM com 30 m de resolução. Nesse caso, o MDE SRTM foi refinado para a resolução de 1m repetindo os valores de elevação de cada pixel de 30 m x 30 m para todos os pixels de 1 m correspondentes. A intenção foi não desperdiçar a informação mais refinada de 1m do MDT LiDAR e não criar informação nova a partir do MDE SRTM.

3.9.2 *Análise de custo computacional para extração de redes de drenagem*

O custo computacional foi quantificado de três maneiras. A primeira refere-se ao espaço em disco necessário para o armazenamento de cada MDT, para toda a bacia do Rio Sirinhaém e toda a bacia do Rio das Garças, e seus principais produtos derivados relacionados às etapas de obtenção das redes de drenagem: remoção das depressões, determinação de direções de fluxo, cálculo de áreas acumuladas de drenagem e extração da rede de drenagem. Cada uma dessas etapas produz uma matriz raster com o mesmo número de linhas e colunas do MDT de entrada, sendo o MDT sem depressões e as áreas acumuladas de drenagem com tipo de dado real (FLOAT32), enquanto as direções de fluxo e a rede de drenagem no formato de dados inteiro.

O segundo aspecto da quantificação do custo computacional foi o tempo computacional, definido aqui como o tempo necessário para realizar separadamente e completamente duas operações para cada bacia: remoção das depressões e cálculo das áreas acumuladas de drenagem.

Esses procedimentos são as etapas mais demoradas para derivar uma rede de drenagem a partir de um determinado MDE. Diferentes algoritmos foram avaliados para essas etapas, como descrito anteriormente.

Cada vez que uma dessas operações (remoção de depressões ou cálculo de áreas acumuladas) era realizada, uma série de medidas foi tomada para que o tempo de execução não fosse influenciado por outros fatores. O computador foi totalmente dedicado a esse objetivo, não sendo utilizado para qualquer outra demanda do usuário. Foram desligados processos como atualização de software, verificação de antivírus, execução de outros *softwares* em segundo plano e hibernação do sistema operacional. Além disso, foi reiniciado o computador para limpar o cache da memória RAM antes de cada rodada.

Adicionalmente, cada uma dessas operações para um determinado MDT foi realizada duas vezes, para garantir que eventos isolados e não previstos possam ter influenciado a execução computacional em termos de tempo necessário.

Os métodos de remoção de depressões do MDT LiDAR e de cálculo de área acumulada de drenagem foram processados nas duas infraestruturas, em todas as resoluções espacial, e por diferentes algoritmos, como descrito nos itens anteriores.

Para que fosse possível obter os tempos de cada método, foram desenvolvidos algoritmos em Python para comandar a execução da rodada dos métodos, sendo registrados

os tempos de processamentos de cada algoritmo, exceto para os do SAGA GIS que exhibe os tempos de forma automática no registro de processos do próprio *software*.

O terceiro aspecto de avaliação da eficiência computacional foi à avaliação do procedimento de *upscaling* de direções de fluxo. Avaliado o tempo de execução do algoritmo COTAT+ adaptado para não ter restrição por uso de memória RAM, mas rodando de forma sequencial e rodando de forma paralelizada. Foram consideradas rodadas no *desktop*, com paralelização em 6 núcleos e no *workstation* com paralelização com 20 núcleos. Para medir o impacto da paralelização foram calculadas as métricas fator de aceleração ou *speed up* (FA) e eficiência (Ef).

O cálculo do tempo de processamento T_0 de um método computacional sequencial pode ser escrito da forma:

$$T_0 = (s + p) \cdot T_0 \quad \text{Equação (3)}$$

Onde s corresponde à fração do tempo de processamento das tarefas do método que são dependentes e não podem ser paralelizadas e p é a fração do tempo das tarefas independentes, paralelizáveis. Sendo assim, $s + p = 1$ já que correspondem a frações de processamento do método em análise.

Cada tarefa paralelizada é processada de forma simultânea pela quantidade de núcleos de processamento disponíveis (NP). Dessa forma, o cálculo de tempo T_1 de um método computacional paralelo pode ser escrito da forma:

$$T_1 = (s + p/NP) \cdot T_0 \quad \text{Equação (4)}$$

O fator de aceleração (FA) relaciona o tempo total de processamento sequencial T_0 e o tempo total paralelo T_1 :

$$FA = \frac{T_0}{T_1} = \frac{1}{s+p/NP} \quad \text{ou} \quad FA = \frac{1}{s + (1-s)/NP} \quad \text{Equação (5)}$$

O fator de aceleração varia de 1, quando apesar do método ser paralelo ele é processado de forma sequencial, pois possui um único núcleo de processamento ou um único processador $NP = 1$, até ∞ , que corresponde a uma situação hipotética com uma quantidade infinita de núcleos de processamento disponíveis.

A eficiência (Ef) foi utilizada para avaliar o desempenho da paralelização (Equação 6).

$$Ef = \frac{FA}{NP} = \frac{T_0}{NP \cdot T_1} \quad \text{Equação (6)}$$

A eficiência varia de 0 a 1, sendo 1 o valor correspondente à situação ideal de 100% de eficiência do método paralelo em relação ao método sequencial.

Para avaliar o desempenho do COTAT+ modificado sequencial e paralelo foram utilizadas as métricas de fator de aceleração e de eficiência. Para isso, foi utilizada uma área teste com características descritas na Tabela 6, nas duas infraestruturas computacionais disponíveis (*desktop* e *workstation*). Foi utilizada uma área teste, pois o custo de processamento para as bacias da área de estudo seriam muito alto para o processamento sequencial.

Para a área teste com resolução espacial de 1 m, foram obtidas as direções de fluxo na resolução espacial de 100 m através do *upscaling*. Os valores de parâmetros adotados foram: 100 m² (AIM), igual à área da célula, e 20 m (CMM), igual a um quinto da dimensão da célula.

Tabela 6 - Características dos MDEs utilizados no processamento do *upscaling* COTAT+.

	Área Teste	Garças	Sirinhaém
Colunas	14.000	127.056	92.489
Linhas	11.000	80.166	56.071
Pixels Válidos	154.000.000	5.159.969.676	2.985.053.977
Resolução Alta	1	1	1
Resolução Baixa	100	30	30
Quantidade de Células	15.400	5.733.299	3.316.726

3.9.3 Formas de análise da qualidade das redes de drenagem

Para avaliação da qualidade das redes de drenagem obtidas por diferentes processamentos e fontes de dados, de forma geral quatro procedimentos foram adotados: inspeção visual, *percentual dentro do buffer*, comprimentos de trechos de rio, áreas de drenagem de trechos de rio.

O primeiro foi a inspeção visual do traçado das redes, a partir da interpretação das ortofotos e superpondo com uma rede definida como referência. A inspeção visual é uma forma de avaliação da qualidade da rede de drenagem muito praticada na literatura, que procura avaliar a qualidade do traçado em si. Essa abordagem permite a identificação de erros na estrutura da rede de drenagem (WU et al., 2011; SOUSA e PAZ, 2017), valendo-se da capacidade do olho e cérebro humanos em perceber padrões não mensuráveis na mesma medida por nenhuma métrica (KENWARD, 2000; TREVISANI; CAVALLI; MARCHI, 2010).

O segundo procedimento foi a determinação da métrica *percentual dentro do buffer*, que também avalia o traçado em si da rede, mas de uma forma quantitativa. Segundo Chen et al., 2012, ela é definida como o valor percentual do comprimento de uma rede de drenagem (L') se sobrepõe a uma região de *buffer* aplicado a uma rede de referência com comprimento igual a (L), Figura 32.

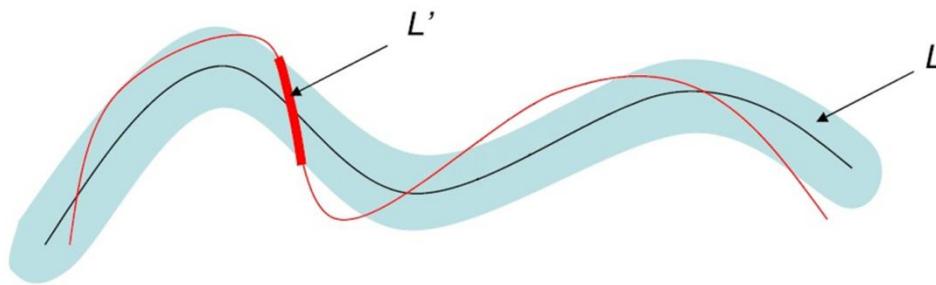


Figura 32 – *Percentual dentro do buffer* de uma rede de drenagem com comprimento igual a L' e uma rede de referência com comprimento igual a L . Fonte: adaptado de Chen et al., (2012).

O *percentual dentro do buffer* (PWB) é definido por:

$$PWB = \sum \frac{L'}{L} * 100 \quad \text{Equação (7)}$$

A terceira forma de análise foi a quantificação dos comprimentos dos trechos de rio definidos na quinta etapa, item 3.8.1, e listados na Tabela 5, para comparação com os comprimentos dos trechos da rede de referência. Foram calculadas as variações relativas

dos comprimentos das redes em análise ($Comp.'$) relativamente à rede de referência ($Comp.$), pela Equação 8.

$$Dif. rel. = \frac{(Comp.' - comp.)}{Comp.} * 100 \quad \text{Equação (8)}$$

A avaliação de comprimentos é interessante por ser uma informação de grande utilidade para estudos hidrológicos, relacionado ao tempo de viagem do escoamento e outros aspectos.

A quarta forma de análise foi a comparação entre áreas de drenagem correspondentes aos trechos do rio principal de cada bacia (trechos destacados em cinza na Tabela 5). Foram determinadas as áreas de drenagem do ponto a montante do trecho de cabeceira do rio principal e dos pontos de jusante de cada trecho subsequente. Assim como o comprimento de um trecho de rio, a área de contribuição desse trecho é outro parâmetro de grande relevância para estudos hidrológicos.

3.9.4 *Influência dos algoritmos na qualidade da extração de redes de drenagem*

Esta análise é focada em avaliar a qualidade das redes de drenagem obtidas pelos diferentes algoritmos, listados na Tabela 3. Nesta etapa de análise, optou-se por comparar apenas as redes de drenagem derivadas a partir do MDE SRTM 30m. Isso foi decidido por dois motivos principais: 1) o SRTM é um dado amplamente conhecido e utilizado na literatura. Por esse motivo, serve de parâmetro de comparação com outros dados de elevação. Principalmente, realizar a comparação em relação aos dados do PE3D, provenientes de LiDAR, com todas suas particularidades, dado local e ainda pouco avaliado; 2) restrições dos algoritmos conseguir processar o MDT LiDAR 1 m na resolução espacial original e em resoluções mais baixas.

Para avaliação de resultados desta etapa, foram adotados os procedimentos de inspeção visual, percentagem dentro do *buffer* e análise de comprimentos de rios. A inspeção visual do traçado das redes foi feita a partir da interpretação das ortofotos e superpondo com a rede digitalizada. A determinação da métrica *percentual dentro do buffer* foi feita tomando nesse caso a rede digitalizada como referência, e adotado um *buffer* de 30 m. A escolha desse limiar foi por ser a dimensão do pixel da menor resolução espacial utilizada por esta pesquisa. Essa mesma rede digitalizada foi tomada como

referência para avaliação dos comprimentos dos trechos de rio. A análise de áreas de drenagem não foi incluída nesta avaliação dos algoritmos, por não haver valores de referência.

3.9.5 *Qualidade da rede de drenagem derivada de dados LiDAR e efeito de escala*

Aqui o foco foi avaliar as redes de drenagem derivadas do MDT Lidar 1 m de forma absoluta, avaliando qualitativamente frente à interpretação visual das ortofotos e quantitativamente quanto à capacidade de reproduzir o traçado das redes de referência digitalizada. Apenas o SAGA GIS, utilizando seus algoritmos em todas as etapas, foi capaz extrair a rede de drenagem utilizando o MDT LiDAR 1 m. O RichDEM paralelo depende de métodos de outras soluções para adquirir as direções de fluxo para grande quantidade de dados.

Também foi avaliado o efeito da resolução espacial do MDT LiDAR (2, 5, 10 e 30 m) quanto a esses aspectos, por todas as cinco soluções utilizadas por esta pesquisa (TerrSet, ArcMap, RichDEM e SAGA GIS), restrito a resolução que cada um foi capaz de processar

Para análise dos resultados desta etapa, foram adotados os quatro procedimentos descritos no item 3.9.3. A inspeção visual foi baseada na comparação e interpretação entre os traçados obtidos do MDT LiDAR, as ortofotos e a rede digitalizada como referência. A análise de *percentual dentro do buffer* foi realizada com o cálculo dado pela Equação 7 para cada trecho de rio, considerando a rede digitalizada como referência e uma largura de *buffer* de 30 m por ser a dimensão do pixel da menor resolução espacial utilizada por esta pesquisa.

Os comprimentos da rede digitalizada também serviram como parâmetro para análise das redes derivadas do MDT LiDAR em diferentes resoluções. Já para a análise de áreas acumuladas de drenagem, os valores correspondentes à rede de drenagem derivada do MDT LiDAR 1 m foram tomados como referência para avaliação dos valores derivados para as demais resoluções espaciais.

3.9.6 *Análise de upscaling de direções de fluxo a partir de dados LiDAR*

Esta etapa contemplou avaliar quão boas foram às redes de drenagem obtidas pelo procedimento de *upscaling* para resolução de 30 m, avaliando também como concorrente as redes de drenagem obtidas a partir da reamostragem do MDT LiDAR para 30 m. Dois enfoques foram dados.

O primeiro enfoque foi avaliando essas redes de 30 m quanto a reproduzir os padrões da rede digitalizada de referência. Nesse caso, as análises de inspeção visual, *percentual dentro do buffer* e comprimentos de rio tiveram como referência a rede digitalizada. Por esse motivo, nesse caso não foram analisadas áreas de drenagem, pela indisponibilidade de valores de referência.

O segundo enfoque foi avaliar as redes de 30 m quanto à capacidade de seguir os padrões da rede de drenagem derivada do MDT LiDAR 1 m. Para esse caso, as análises de inspeção visual, porcentagem, comprimentos de rio e áreas de drenagem foram realizadas tomando essa rede de 1 m como referência. Esse segundo enfoque foi proposto com a intenção de complementar o julgamento do resultado do *upscaling*, já que esse procedimento de *upscaling* visa justamente gerar uma rede de baixa resolução que consiga seguir o mais fielmente possível o traçado da rede de alta resolução, dada como informação de entrada.

3.10 Síntese dos procedimentos de avaliação de qualidade da rede de drenagem

A Tabela 7 apresenta os MDEs e dados auxiliares utilizados por cada análise desta pesquisa.

Tabela 7 - Procedimentos de avaliação e correspondente fonte de dados topográficos, resolução espacial e dados auxiliares.

Análises	MDE SRTM 30 m	MDS LiDAR 1 m	MDT LiDAR 1 m	MDT LiDAR 2, 5, 10 e 30 m	Dados Auxiliares
Raster das diferenças	Sim	Sim	Sim	-	Ortofotos
Perfil topográfico	Sim	Sim	Sim	-	Ortofotos
Curvas hipsométricas	Sim	-	Sim	Sim	Ortofotos
Inspeção visual da rede de drenagem	Sim	-	Sim	Sim	Ortofotos
Custo computacional de espaço de armazenamento	-	-	Sim	Sim	-
Custo computacional da remoção das depressões	-	-	Sim	Sim	-
Custo computacional do cálculo das áreas acumuladas de drenagem	-	-	Sim	Sim	-
Influência dos algoritmos na qualidade da extração de redes de drenagem	Sim	-	Sim	Sim	Rede de referência digitalizada
Qualidade da rede de drenagem derivada de dados LiDAR e efeito de escala	-	-	Sim	Sim	Rede de referência digitalizada
Análise de <i>upscaling</i> de direções de fluxo a partir de dados LiDAR	Sim	-	Sim	Sim	Rede de referência digitalizada e rede derivada do MDT LiDAR 1 m

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE TOPOGRÁFICA

4.1.1 *Perfis topográficos transversais*

Em geral, pode-se observar que os perfis topográficos do MDT caracterizam a superfície da região livre de materiais antrópicos e de elementos naturais acima da superfície, tais como vegetação. Enquanto os perfis do MDS apresentam além da superfície, os elementos naturais e artificiais sobre ela (Figura 33). Por exemplo, no perfil topográfico AG atravessando uma área urbana (Figura 33-a), existe um galpão de grandes dimensões com quase 10 m de altura (ponto B) que está representado no MDS, mas não no MDT. Há também outras edificações e casas próximas ao ponto D. As áreas da superfície nua fazem com que MDS e MDT sejam iguais (ponto E, por exemplo).

Áreas de cobertura vegetal densa destacam diferenças maiores entre MDS e MDT, de até 10 m, como a região em torno do ponto J na Figura 33-b. A transição abrupta de floresta para campo aberto é bem visível, como o ponto K na Figura 33 -b. Perto do ponto F na Figura 33 -a, o perfil cruza uma grande estrada. Os aterros rodoviários podem ser considerados com parte da superfície e, portanto, estão presentes no MDT LiDAR, ao contrário das pontes, que foram removidas ao produzir o MDT dos dados PE3D (ITEP, 2018a, 2018b).

Apesar do levantamento LiDAR PE3D não ser capaz de penetrar na água, a seção transversal do rio próximo ao ponto C é representada satisfatoriamente tanto no MDT quanto no MDS. Isso ocorre provavelmente devido ao rio ser intermitente e ao baixo nível da água no momento da aquisição dos dados. Como este é um rio estreito e devido às incertezas inerentes e imprecisão do SRTM relativamente a este nível de detalhe, não há uma representação explícita do leito de rio na seção transversal obtida dessa fonte de dados topográficos.

Em regiões mais amplas sem cobertura vegetal (como o ponto E na Figura 33-a), há mais concordância entre os dados do MDE SRTM e do MDT LiDAR. No entanto, a diferença de quase 15 anos no período de aquisição entre os levantamentos SRTM e PE3D dificulta comparações mais conclusivas. Por exemplo, áreas desmatadas como as regiões próximas aos pontos I e L poderiam estar cobertas por vegetação densa durante a aquisição

dos dados SRTM. Caso estivessem cobertas por vegetação densa, isso explicaria o fato do perfil topográfico do SRTM apresentar um descolamento positivo em relação ao perfil do MDT LiDAR para toda a região representada entre os pontos H e M.

Durante esse lapso de tempo de 15 anos, mudanças também podem ter ocorrido no perfil topográfico devido às dinâmicas e intervenções populacionais e à própria natureza. Além disso, qualquer análise de dados SRTM não deve desconsiderar sua resolução espacial (30 m) e seus erros de elevação absoluto e relativo de 16 e 6 m, respectivamente (FARR et al., 2007; HAWKER et al., 2018; RABUS et al., 2003; SCHUMANN; BATES, 2018) e o conhecido efeito da vegetação (O'LOUGHLIN et al., 2016; YAMAZAKI et al., 2019).

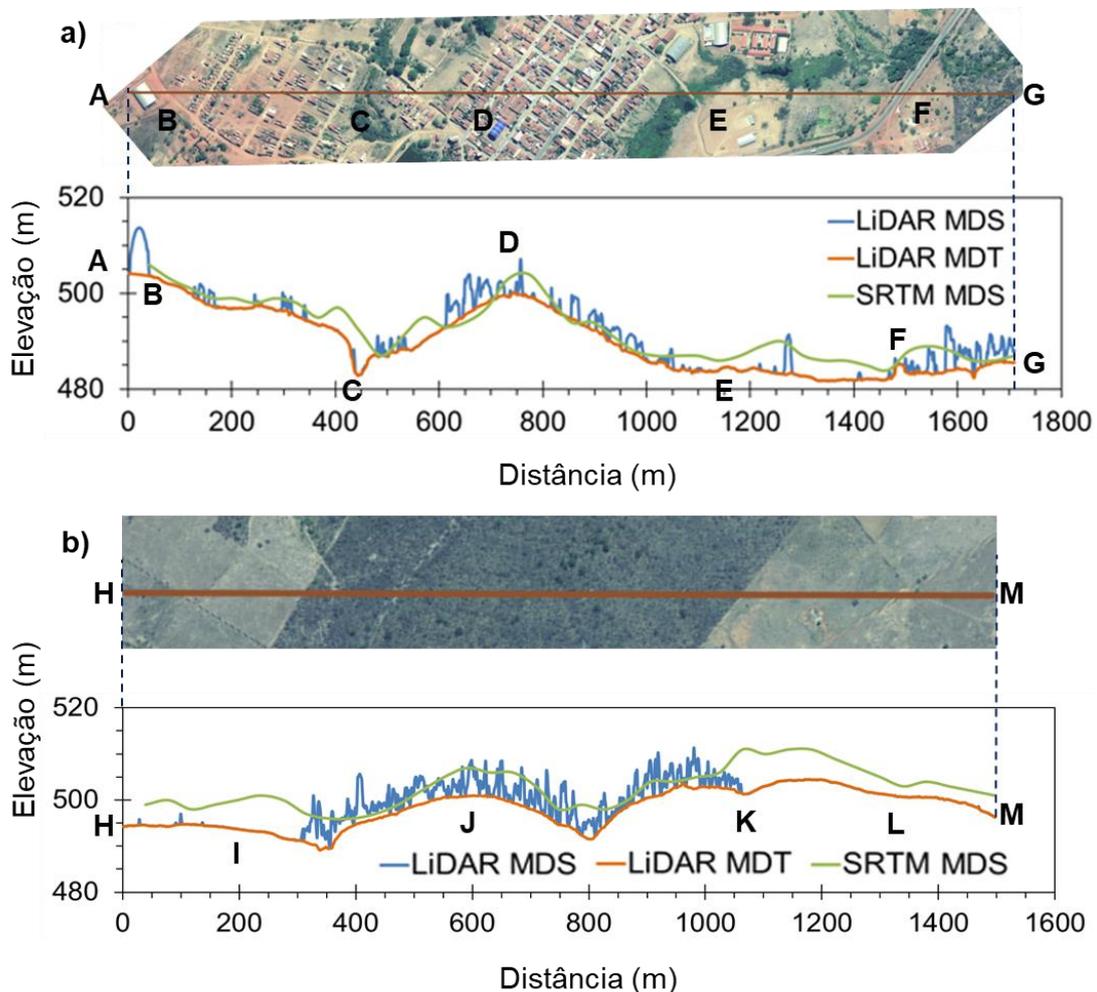


Figura 33 - Perfis topográficos ao longo de duas regiões da área de estudo, com características distintas, para a análise dos dados de elevação extraídos do MDT e MDS LiDAR e do MDS SRTM.

4.1.2 Raster das diferenças

O raster das diferenças entre SRTM e MDT LiDAR mostrado na Figura 34 apresenta valores que variam de -22 m até +39 m. Há uma clara predominância de diferenças positivas (86% da área), com 65% entre 0 e 4 m, e apenas 1,3% maiores que 8 m. Esses valores são coerentes levando em consideração a precisão vertical do SRTM, a predominância de vegetação de médio porte e a presença de edificações.

Além disso, a referida figura mostra o raster das diferenças entre MDS e MDT LiDAR para a mesma área. As diferenças são, em geral, mais próximas de zero do que no resultado anterior, com 79% deles positivos: 75% entre 0 e 4 m, 3% entre 4 e 8m, e apenas 1% maior que 8 m. Estas diferenças positivas são pelos motivos do raster das diferenças entre SRTM e MDT LiDAR, pois se trata da mesma região. Os valores negativos (21% da área) são em grande parte muito pequenos (99% delas são inferiores a 1 m; 81% delas são inferiores a 0,2 m), e pode estar relacionado com o erro altimétrico máximo de 25 cm relatado por ITEP (2018a, 2018b), devido às imprecisões inerentes ao tratamento dos dados para obtenção do MDS e MDT e diferentes efeitos de ruído.

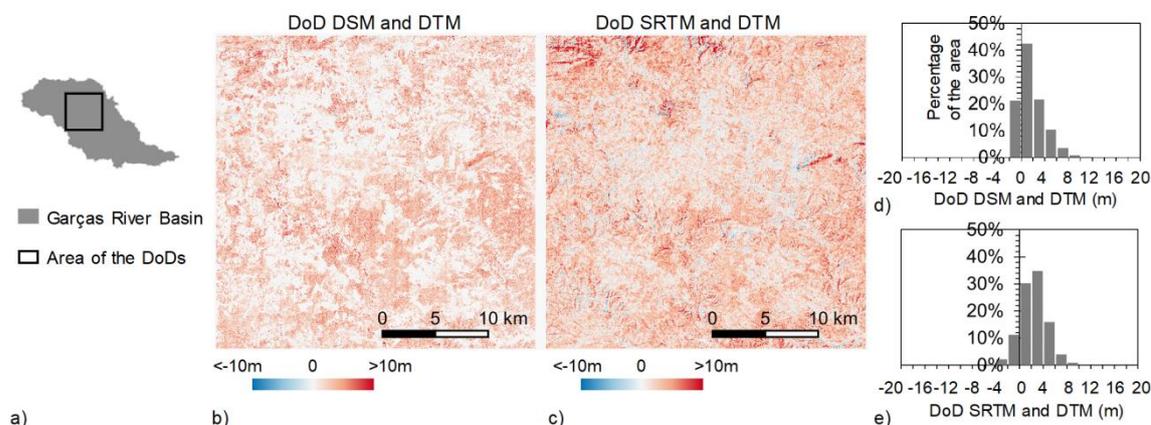


Figura 34 – (a) Área selecionada para análise do raster das diferenças entre MDS LiDAR 1 m e MDT LiDAR 1 m (b), e entre SRTM e MDT LiDAR 1 m (c); (d) e (e) Histogramas de frequência dos rasters das diferenças.

Para outra região, localizada na parte sudeste da bacia do Rio das Garças e que faz parte do Município de Santa Maria, Figura 35-a destaca-se o efeito acentuado das edificações nas elevações representadas no MDS LiDAR e que foram removidas no MDT LiDAR. O MDE SRTM ao contrário, não apresenta uma distribuição espacial das

elevações que se assemelhe à localização espacial das edificações, devido, principalmente, à relação entre a sua resolução espacial e às dimensões das edificações.

Outro exemplo notável de diferenças entre MDS e MDT LiDAR é a remoção da ponte da rodovia federal BR-122 na porção central da bacia (Figura 35 -b). O MDT é, aproximadamente, 13 m inferior ao MDS no local desta ponte. Nas proximidades da mesma área, a mata ciliar possui árvores com altura superior a 10 m que também foram removidas no MDT.

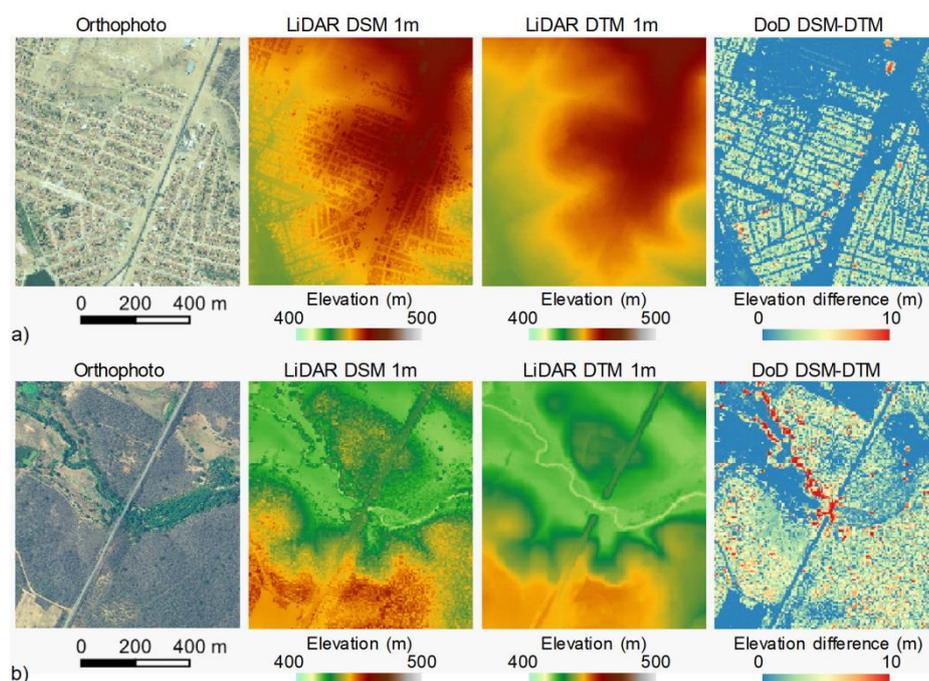


Figura 35 - (a) Exemplo de remoção de edifícios do MDS para o MDT em dados LiDAR para parte do município de Santa Maria na região sudeste da bacia do rio Garças; (b) Exemplo de remoção de ponte e árvore do MDS para o MDT.

4.1.3 Curva hipsométrica

As diferenças entre as curvas hipsométricas geradas pelo MDT LiDAR para a bacia do rio das Garças com diferentes resoluções espaciais são desprezíveis (menos de 0,2% em valor absoluto; Figura 36). Na figura mencionada, as linhas em tom de azul e a linha verde claro não aparecem por estarem praticamente iguais à verde escura, que está posicionada no topo delas.

As diferenças entre MDE SRTM e MDT LiDAR são atenuadas quando o objetivo é comparar os dois dados através da curva hipsométrica da bacia do rio das Garças. Existem diferenças numéricas de menos de 2,3% entre pontos correspondentes dessas curvas hipsométricas LiDAR e SRTM. Por exemplo, 50% da bacia é superior a uma elevação de 460 m de acordo com os dados SRTM, enquanto esta elevação é de cerca de 458 m de acordo com o MDT LiDAR.

Uma curva hipsométrica representa a topografia geral e a distribuição do relevo de uma bacia e pode ser influenciada por uma espécie de efeito de compensação entre áreas de sub e superestimação de elevações ao comparar duas fontes de dados topográficos. Dessa forma, caracterizar topograficamente a bacia do rio das Garças em termos de curva hipsométrica é praticamente indistinto se utilizado MDT LiDAR nas diferentes resoluções analisadas ou até se utilizado o MDE SRTM 30m.

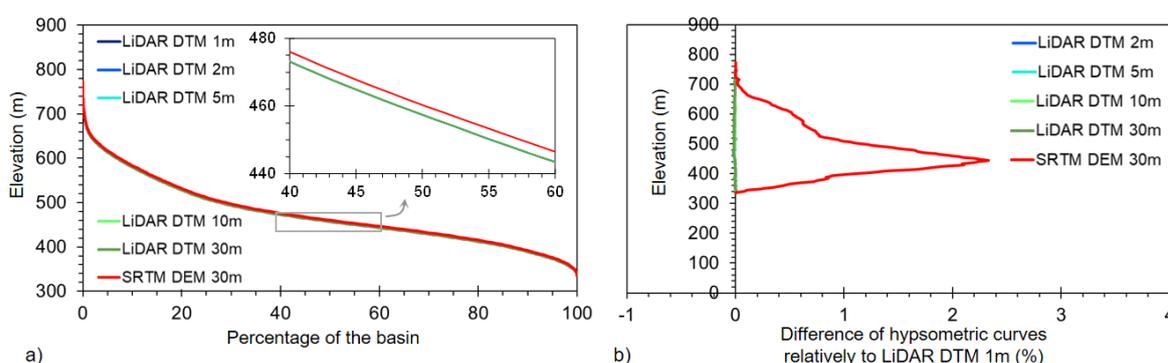


Figura 36 - (a) Curvas hipsométricas da bacia do Rio das Garças derivadas do MDT LiDAR de diferentes resoluções espaciais e do SRTM; b) Diferenças das curvas hipsométricas em relação à derivada do MDT LiDAR 1 m.

4.2 ANÁLISE DE CUSTO COMPUTACIONAL PARA EXTRAÇÃO DE REDES DE DRENAGEM

4.2.1 Armazenamento de dados

Para a resolução espacial de 1 m, o MDT da bacia do Rio Sirinhaém possui 92.489 colunas e 56.071 linhas, com quase 3 bilhões de pixels com informações válidas para armazenar e processar (Tabela 8). Já o MDT da bacia do Rio das Garças possui 127.056

colunas e 80.166 linhas, com 5,16 bilhões de pixels com informações válidas. O MDT do Sirinhaém requer espaço em disco de 19,3 Gb e o do Garças ocupa 39,4 Gb.

Considerando o MDT em conjunto com seus produtos derivados relacionados à extração da rede de drenagem (MDT sem depressões; direções de fluxo; áreas acumuladas de drenagem; rede de drenagem) o espaço em disco utilizado chega a 197,2 Gb (Figura 37-a e b). A título de comparação, a representação de toda a bacia amazônica (5.084.460 km² segundo Lakshmi et al., 2018) através do SRTM 30 m compreende quase 5,6 bilhões de pixels. Assim, armazenar e processar MDT LiDAR com resolução espacial de 1 m para a bacia do Rio das Garças (com “apenas” 4.100 km² mas 5,16 bilhões de pixels válidos) é comparável ao armazenamento e processamento usando o SRTM 30 m para a maior bacia hidrográfica do mundo, e muito mais difícil do que trabalhar com SRTM 30 m para representar a segunda maior bacia do mundo (Rio Congo, com 3.064.930 km²; Lakshmi et al., 2018).

Uma análise proporcional desses resultados indica um espaço em disco necessário de 43,4 Gb para cada 1.000 km² de MDT e produtos derivados com resolução espacial de 1 m, o que pode ser um indicador prático de requisitos de armazenamento para interessados em outras áreas de estudo no Estado de Pernambuco.

Para as duas bacias do Rio Sirinhaém e das Garças, o MDT reamostrado para resolução espacial de 2 m reduz em 75% o tamanho da matriz e o espaço em disco requerido em relação à resolução de 1 m. Essa redução chega a 96% quando o tamanho do pixel é ampliado para 5 m e atinge 99% e 99,9% para as resoluções de 10 m e 30 m, respectivamente (Tabelas 8 e 9).

Tabela 8 - Dimensões das matriz numérica e requisitos de armazenamento de dados correspondentes para cada MDT LiDAR da bacia do Rio Sirinhaém, incluindo produtos derivados (MDT sem depressão, direções de fluxo, áreas acumuladas de drenagem e rede de drenagem).

Resolução espacial MDT Sirinhaém	Quantidade de colunas	Quantidade de linhas	Quantidade de pixels válidos (bilhões)	Tamanho do MDT (Gb)	Redução do tamanho em relação ao de 1 m
1 m	92.489	56.071	2.985	19,319	-
2 m	46.244	28.035	0,746	4,83	-75,00%
5 m	18.497	11.214	0,119	0,773	-96,00%
10 m	9.248	5.607	0,030	0,193	-99,00%
30 m	3.082	1.869	0,003	0,021	-99,89%

Tabela 9 - Dimensões das matriz numérica e requisitos de armazenamento de dados correspondentes para cada MDT LiDAR da bacia do Rio das Garças, incluindo produtos derivados (MDT sem depressão, direções de fluxo, áreas acumuladas de drenagem e rede de drenagem).

Resolução espacial MDT Garças	Quantidade de colunas	Quantidade de linhas	Quantidade de pixels válidos (bilhões)	Tamanho do MDT (Gb)	Redução do tamanho em relação ao de 1 m
1 m	127.056	80.166	5.160	39,439	-
2 m	63.528	40.083	1.290	9,860	-75,00%
5 m	25.411	16.033	0,206	1,578	-96,00%
10 m	12.705	8.016	0,052	0,394	-99,00%
30 m	4.235	2.672	0,006	0,044	-99,89%

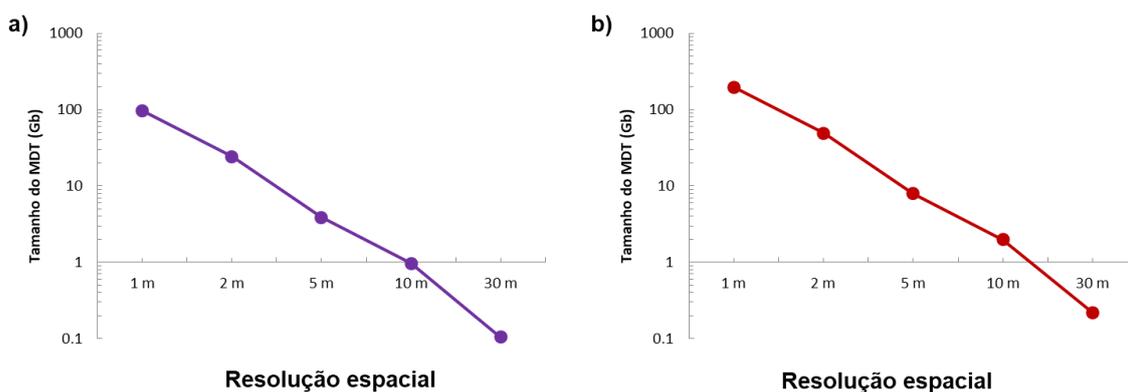


Figura 37 - Espaço em disco necessário para armazenar MDT e produtos derivados relacionados à extração da rede de drenagem, raster com e sem depressões, de direções de fluxo, áreas acumuladas de drenagem e da rede de drenagem, considerando diferentes resoluções espaciais: (a) bacia do Rio Sirinhaém; (b) bacia do Rio das Garças.

4.2.2 Tempo de processamento do MDT para remoção de depressões

As grandes diferenças na quantidade de pixels dos MDTs processados nas diferentes resoluções espaciais também resultaram em tempos de execução computacionais muito distintos para a remoção das depressões (Figura 38 – a e b). Isso ocorreu independente do algoritmo, do computador utilizado e da área de estudo.

Altas resoluções espaciais, como esperado, demandam mais tempo de processamento e uma infraestrutura computacional mais robusta para processá-los. Para as duas bacias e uma dada resolução espacial, os resultados foram distintos entre os algoritmos e entre os dois computadores. No entanto, quanto menor a resolução espacial, menor o tempo de execução.

Em outras palavras, para conjuntos de dados maiores, há mais relevância na seleção de algoritmos eficientes e no uso de um computador com maior capacidade de processamento. Para a remoção das depressões, o tempo de execução variou de alguns segundos para a maior resolução espacial de 30 m até aproximadamente 8h 30min para a resolução de 1 m.

Para as duas bacias, o algoritmo RichDEM – *Parallel Priority Flood* foi o que apresentou os melhores resultados, principalmente com o aumento da quantidade de dados. Enquanto o TerrSet – *Pit Removal* foi marcadamente mais lento do que os outros (tempo

de execução aproximadamente 100 vezes mais lento que RichDEM paralelo; Figura 38-a e b).

O algoritmo SAGA GIS – *Fill Sinks* XXL foi no pior caso 14 vezes mais lento que o RichDEM paralelo, mas provou ser mais eficiente que seu similar algoritmo SAGA GIS – *Fill Sinks* (22 vezes mais lento que RichDEM paralelo, no pior caso).

O ArcMap – *Fill* apresentou custos computacionais similares ao SAGA GIS – *Fill Sinks* para as duas bacias e principalmente para os resultados utilizando o *desktop*. No entanto, algumas execuções de todos os algoritmos não foram alcançadas devido aos requisitos de memória RAM.

O algoritmo TerrSet se mostrou o mais restrito, não executando as três maiores resoluções espaciais (1 m, 2 m e 5 m) em ambos os computadores, isto é, mesmo usufruindo da *workstation* com 64 Gb de RAM esse algoritmo não executou, confirmando uma séria limitação a trabalhar com dados em maior quantidade. Nesse software, a remoção de depressões tem uma limitação para processar dados com mais de 32.000 linhas e colunas, o que é inerente ao algoritmo e independente do computador. Além disso, requer uma grande quantidade de memória RAM, o que limita sua aplicabilidade aos dados LiDAR.

A resolução espacial de 1 m também dificultou o cálculo para os outros algoritmos: o algoritmo SAGA GIS – *Fill Sinks* não foi executado para a resolução de 1 m em ambas as bacias no *desktop*, enquanto os algoritmos SAGA GIS – *Fill Sinks* XXL e RichDEM – *Fill Depressions* não rodaram para a resolução de 1 m para a Bacia do Rio das Garças no *Desktop*. Assim, se apenas esse computador mais simples e de baixo custo estivesse disponível, o MDT sem depressão para a bacia do Rio das Garças com resolução espacial de 1 m só poderia ser obtido através do algoritmo RichDEM paralelo e do ArcMap – *Fill*. Já para bacia do Rio Sirinhaém, além desses dois algoritmos, o SAGA GIS – *Fill Sinks* XXL e o RichDEM – *Fill Depressions* também foram capazes de processar a remoção das depressões.

A utilização do RichDEM – *Fill Depressions* depende de bibliotecas externas à solução, fazendo com que seus resultados estejam atrelados à capacidade dessas bibliotecas para lidar com arquivos raster com um grande número de linhas e colunas. Apesar do algoritmo RichDEM – *Parallel Priority Flood* ter apresentado os melhores resultados, esse é o método de mais difícil configuração e utilização para usuários típicos de recursos hídricos. Isso porque requer que seja utilizado através de sistema operacional LINUX,

depende de bibliotecas externas difíceis de serem configuradas, em especial a *OpenMPI* para comunicação entre os processos paralelos, e não possui interface gráfica.

A partir da Figura 38 a e b, percebe-se que existe uma relação quase paralela entre os métodos com o aumento da quantidade de dados, para as duas bacias. O que indica uma relação de tempo e método utilizado, em uma ordem de menor e maior custo computacional.

As Figuras 39 e 40 apresentam os tempos de processamento para todos os algoritmos de remoções de depressões utilizados, utilizando os dois computadores, para a bacia do Rio Sirinhaém e do Rio das Garças, respectivamente. É possível analisar a relação do aumento do custo computacional com o aumento da quantidade de dados, para os 10 rasters, 5 (cinco) para cada bacia, nas 5 (cinco) resoluções espaciais. Observa-se que para cada método existe um limiar que marca uma abrupta diferença nos custos de processamento. Sugere que de acordo com as características do método e da infraestrutura computacional utilizada, até certa quantidade de pixels os custos são muito próximos e o método processa sem dificuldades. Ao passo que, com o aumento da quantidade de dados, as dificuldades de processamento aumentam, refletindo em uma diferença significativa nos tempos de processamento, chegando ao ponto de não ser capaz de processar, para alguns métodos. As dificuldades de processamento estão, nesse caso, bastante relacionadas ao uso da memória RAM, sendo este recurso o que impõe os maiores limites de processamento, principalmente para os métodos convencionais.

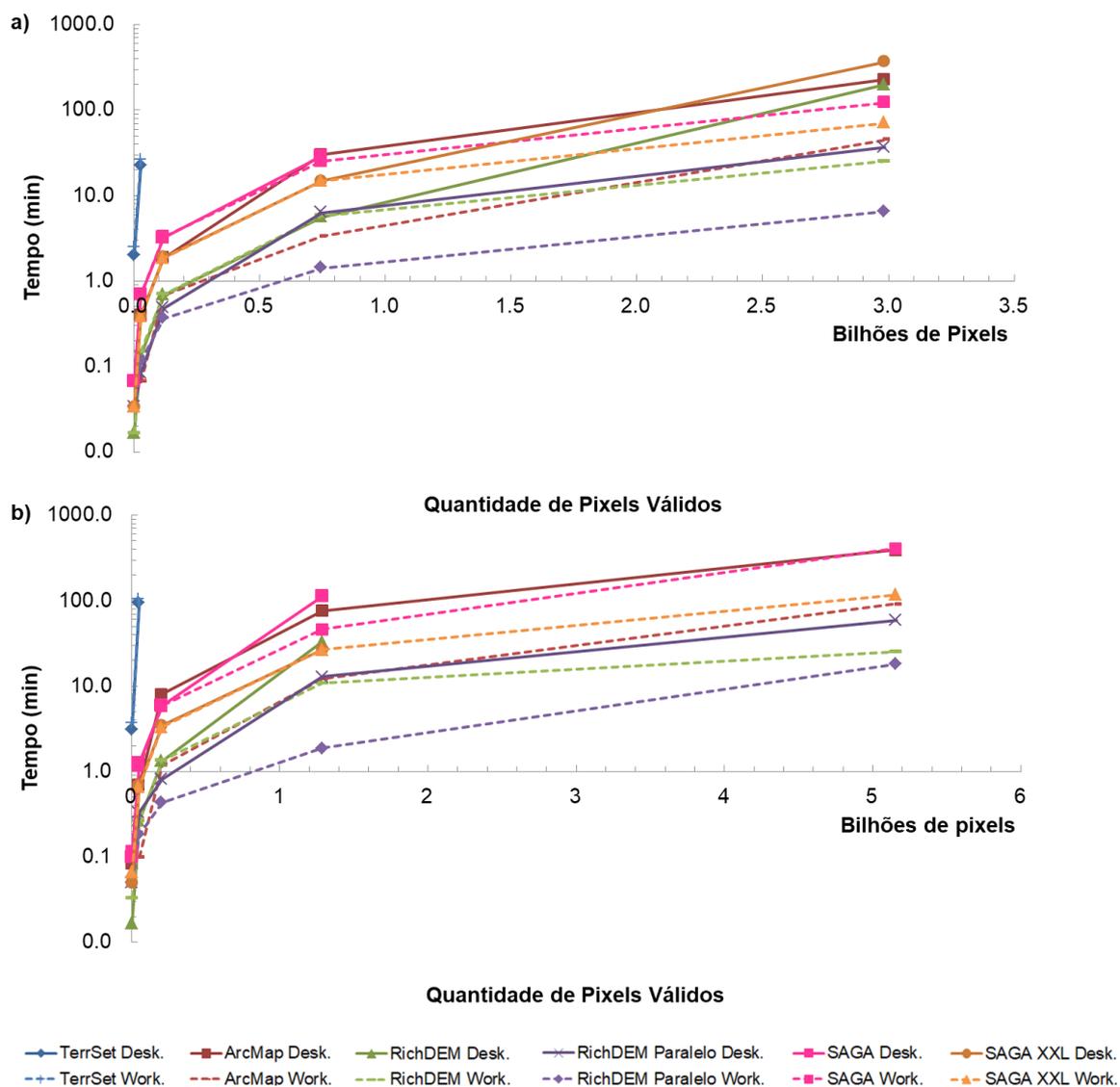


Figura 38 - Tempo de processamento dos algoritmos de remoções de depressões (a) para a bacia do Rio Sirinhaém e (b) do Rio das Garças, usando as duas infraestruturas computacionais *desktop* e *workstation*.

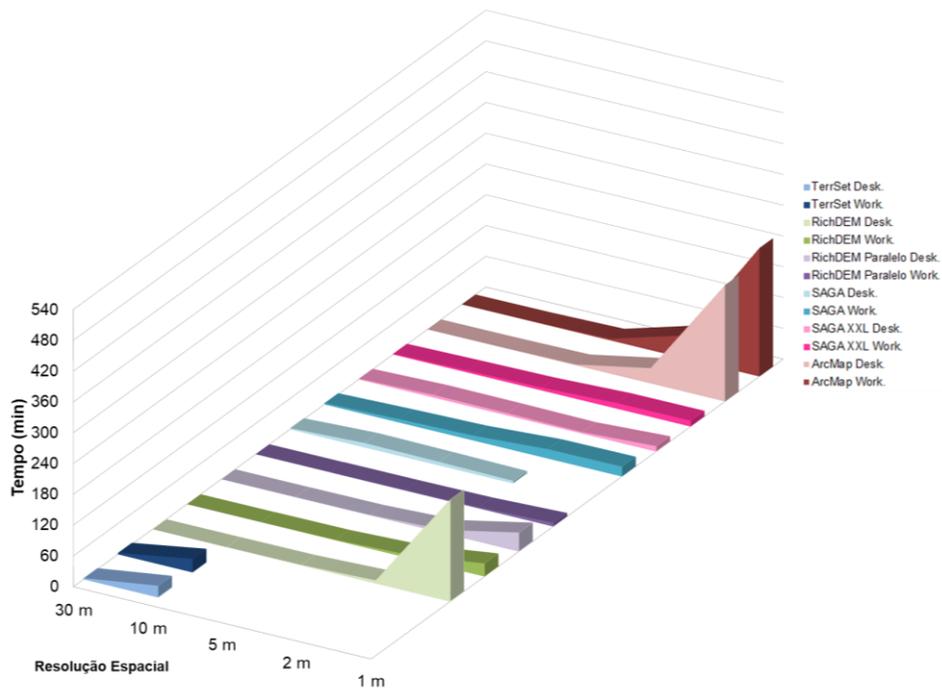


Figura 39 – Tempo de processamento dos algoritmos de remoções de depressões para a bacia do Rio Sirinhaém, usando as duas infraestruturas computacionais *desktop* e *workstation*.

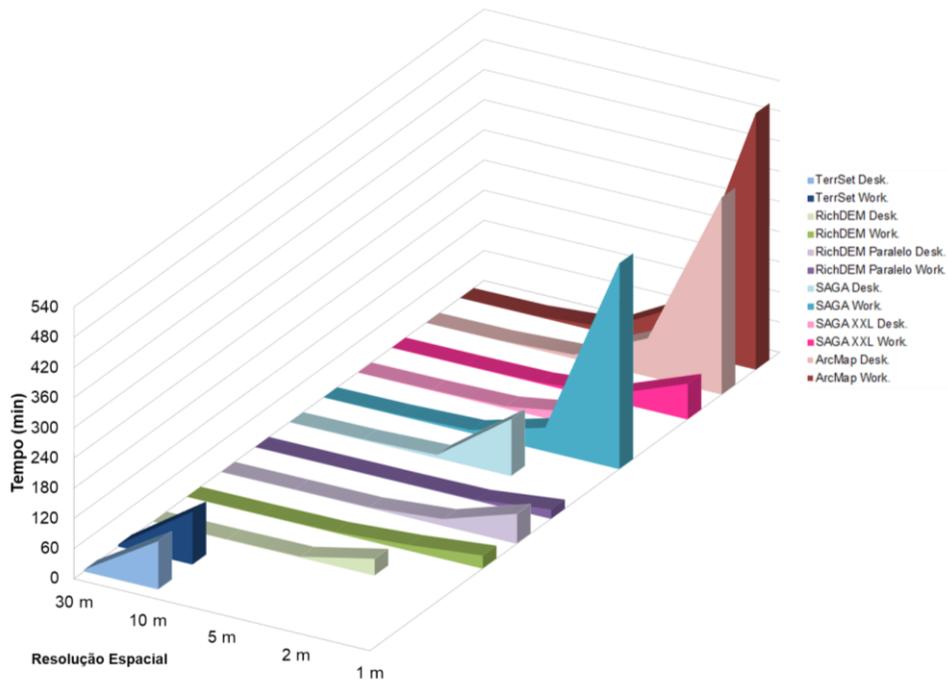


Figura 40 - Tempo de processamento dos algoritmos de remoções de depressões para a bacia do Rio das Garças, usando as duas infraestruturas computacionais *desktop* e *workstation*.

Os custos computacionais para os algoritmos de remoção das depressões para a bacia do Rio Sirinhaém e do Rio das Garças, usando o *desktop* e a *workstation*, também são apresentados nas Tabelas 10 e 11, respectivamente.

4.2.3 *Tempo de processamento das áreas acumuladas de drenagem*

As Figuras 41–a e b apresentam os gráficos dos custos computacionais de processamento do cálculo das áreas acumuladas de drenagem para as duas bacias. Nota-se que também existe uma relação entre a quantidade de dados, os métodos e as infraestruturas computacionais, assim como comentado para o procedimento de remoção de depressões do MDT. As linhas de tempo de execução em função da quantidade de pixels apresentam um padrão semelhante ao encontrado para o método de remoção das depressões.

Os custos para os algoritmos de cálculo de área acumulada de drenagem também estão dispostos nas Tabelas 12 e 13. De acordo com os custos computacionais obtidos, ressalta-se que a diferença entre os tempos de processamento tem impacto maior com o aumento da resolução espacial. Para dados de baixa resolução espacial, a diferença entre as infraestruturas pode passar despercebida. Tal fato se deve ao tamanho da matriz numérica desses dados. Quanto maior a matriz, maior o tempo necessário para armazenar todos os valores da matriz nas estruturas de dados do algoritmo. Pode-se notar a diferença significativa de tempo entre um mesmo algoritmo, na mesma infraestrutura computacional, variando apenas a resolução espacial. Por exemplo, para a bacia do Rio das Garças o cálculo de área acumuladas de drenagem através do SAGA GIS – *Flow Accumulation (Top Down)*, o tempo de processamento do MDT LiDAR de 30 m foi de 9 segundos, enquanto para o de MDT LiDAR de 1 m foi de 28 horas 48 minutos e 28 segundos.

Para o procedimento de acumulação de fluxo, novamente o algoritmo *RichDEM – Parallel Flow Accumulation* foi o mais rápido e o único método capaz de processar os dados para as duas bacias na resolução espacial de 1 m utilizando o *desktop*. Já para o uso da *workstation*, além desse método, apenas o SAGA GIS – *Flow Accumulation* também foi capaz de processar, com um custo bastante superior comparado ao RichDEM paralelo.

Tabela 10 - Custo computacional dos algoritmos de remoção de depressões para a bacia do Rio Sirinhaém.

Resolução espacial (n° de pixels válidos)	TerrSet – Pit Removal		ArcMap – Fill		RichDEM – Fill Depressions		RichDEM – Parallel Priority Flood		SAGA GIS – Fill Sinks (Wang Liu)		SAGA GIS – Fill Sinks XXL (Wang Liu)	
	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.
30 m (3.3 mi.)	2 min	2 min 29 s	4 s	4 s	1 s	1 s	2 s	2 s	4 s	4 s	2 s	2 s
10 m (29.9 mi.)	22 min 14 s	26 min 02 s	24 s	41 s	8 s	9 s	5 s	7 s	41 s	42 s	23 s	23 s
5 m (119.4 mi.)	NEM	NEM	1 min 52 s	3 min 20 s	41 s	42 s	29 s	22 s	3 min 12 s	3 min 18 s	1 min 54 s	1 min 51 s
2 m (746.2 mi.)	NEM	NEM	29 min 55 s	45 min 5 s	5 min 35 s	5 min 51 s	6 min 20 s	1 min 25 s	28 min 46 s	25 min 13 s	14 min 52 s	14 min 47 s
1 m (2.9 bi.)	NEM	NEM	3 h 46 min 53 s	4 h 10 min 27 s	3 h 18 min 25 s	25 min 04 s	36 min 34 s	6 min 31 s	NEM	2 h 2 min	6 h 6 min 34 s	1h 10 min 32 s

NEM - *Not Enough Memory.*

Tabela 11 - Custo computacional dos algoritmos de remoção de depressões para a bacia do Rio das Garças.

Resolução espacial (n° de pixels válidos)	TerrSet – Pit Removal		ArcMap – Fill		RichDEM – Fill Depressions		RichDEM – Parallel Priority Flood		SAGA GIS – Fill Sinks (Wang Liu)		SAGA GIS – Fill Sinks XXL (Wang Liu)	
	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.
30 m (5.7 mi.)	3 min 6 s	3 min 45 s	5 s	6 s	1s	2 s	3 s	3 s	6 s	7 s	3 s	4 s
10 m (51.6 mi.)	1 h 35 min 27 s	1 h 44 min 50 s	42 s	1 min 11 s	16 s	16 s	20 s	11 s	1 min 16 s	1 min 10 s	42 s	40 s
5 m (206.4 mi.)	NEM	NEM	8 min 2 s	12 min 18 s	1 min 20 s	1 min 22 s	49 s	26 s	5 min 57 s	5 min 54 s	3 min 30 s	3 min 19 s
2 m (1.3 bi.)	NEM	NEM	1 h 16 min 4 s	1h 31 min 42 s	32 min 58 s	10 min 53 s	12 min 55 s	1 min 53 s	1h 52 min 59 s	46 min 12 s	27 min	26 min 32 s
1 m (5.2 bi.)	NEM	NEM	6 h 32 min 1 s	8 h 30 min 23 s	NEM	25 min 28 s	59 min 4 s	18 min 11 s	NEM	6 h 48 min 57 s	NEM	1 h 57 min 38 s

NEM - *Not Enough Memory.*

Apesar de o algoritmo RichDEM paralelo apresentar os menores custos computacionais, este método requer como arquivo de entrada as direções de fluxo. Entretanto, as soluções computacionais disponíveis no RichDEM não dispõe de um método de cálculo de direções de fluxo computacionalmente eficiente. O método disponível para obter as direções de fluxo não foi capaz de processar o MDT LiDAR de 1 m para as duas bacias da área de estudo, mesmo utilizando a *workstation*.

Ressalta-se que o método *RichDEM – Parallel Flow Accumulation* dispõe de duas opções de dados de entrada: através de um único arquivo de direções de fluxo (*one*) ou através de vários arquivos (*many*). Entretanto o processamento através da opção *many*, calcula a área acumulada de drenagem para cada arquivo de forma independente, o que resulta em uma rede de drenagem única e não uma solução global para toda a área coberta pelos arquivos. Para que se tenha uma solução global através de vários arquivos de direções de fluxo como dado de entrada, é preciso segmentar o arquivo de direções de fluxo obtido para toda a região de interesse.

Também é importante frisar que foram analisados os custos computacionais de métodos de cálculo de áreas acumuladas de drenagem que possuem abordagens distintas em relação ao processamento das direções de fluxo como etapa de processamento ou como dado de entrada. A primeira abordagem por razões claras irá ter um custo de processamento a mais que os da segunda abordagem. Porém, são decisões de solução para o mesmo problema e não impede que sejam comparados os custos de processamento.

Por não ser possível obter as direções de fluxo através do RichDEM para grande quantidade de dados, pode-se obter as direções de fluxo através de outro método, tomando o cuidado de reclassificar os valores de direções de fluxo do método utilizado para as codificações do RichDEM.

Para calcular o tempo de processamento do *RichDEM – Parallel Flow Accumulation* do MDT LiDAR na resolução espacial de 1 m, foi utilizado o raster de direções de fluxo obtido através do SAGA GIS. Por esse motivo, as análises de qualidade da rede de drenagem não apresentam a rede derivada do RichDEM para a resolução espacial de 1 m. Pois a rede obtida apresenta informações provenientes de outra solução computacional.

O algoritmo TerrSet – *Runoff* foi novamente o mais lento. Este método não foi processado para as resoluções espaciais 1, 2 e 5 m, pois o algoritmo TerrSet – *Pit Removal* não conseguiu ser executado para essas resoluções por limitações do próprio algoritmo. Os processamentos do algoritmo ArcMap – *Flow Accumulation* para resoluções de 1 m e 2 m

foram interrompidas após 144 h de cálculo para as duas bacias, visto que o tempo de processamento já era bastante superior aos outros métodos. Isso ilustra a grande ineficiência computacional desse algoritmo.

Excetuando o método *RichDEM – Parallel Flow Accumulation* o custo computacional do cálculo das áreas acumuladas de drenagem foi bastante superior ao da remoção das depressões. Pode-se afirmar que dentre as etapas envolvidas para extração da rede de drenagem a partir de um MDE, a determinação das áreas acumuladas de drenagem é o que apresenta maior custo. Isso ocorreu para todos os métodos, exceto o RichDEM paralelo, em todas as resoluções espaciais e nos dois computadores. Além disso, requer um maior poder computacional, pois os métodos convencionais não são capazes de lidar com grande quantidade de dados em computadores convencionais. Para processar grandes quantidades de dados na determinação das áreas acumuladas de drenagem, requerem-se algoritmos eficientes ou infraestrutura com maior poder de processamento.

As Figuras 42 e 43 apresentam os tempos de processamento para todos os algoritmos de cálculo de áreas acumuladas de drenagem utilizados, nos dois computadores, para a bacia do Rio Sirinhaém e do Rio das Garças, respectivamente. Nota-se uma limitação maior de processamento, com uma quantidade maior de métodos que não foram capazes de processar os dados nas resoluções espaciais maiores e com um custo computacional bastante superior ao da remoção das depressões. A discrepância entre o custo dos métodos convencionais e de alto desempenho é bastante significativa, sendo o RichDEM paralelo 30 vezes mais rápido que o SAGA GIS – *Flow Accumulation* para o MDT LiDAR de 1 m. Para os métodos convencionais, também é possível identificar um limiar de quantidade de dados que o método lida de forma satisfatória e para além desse limiar as dificuldades de processamento são percebidas pelo aumento significativo dos tempos de processamento.

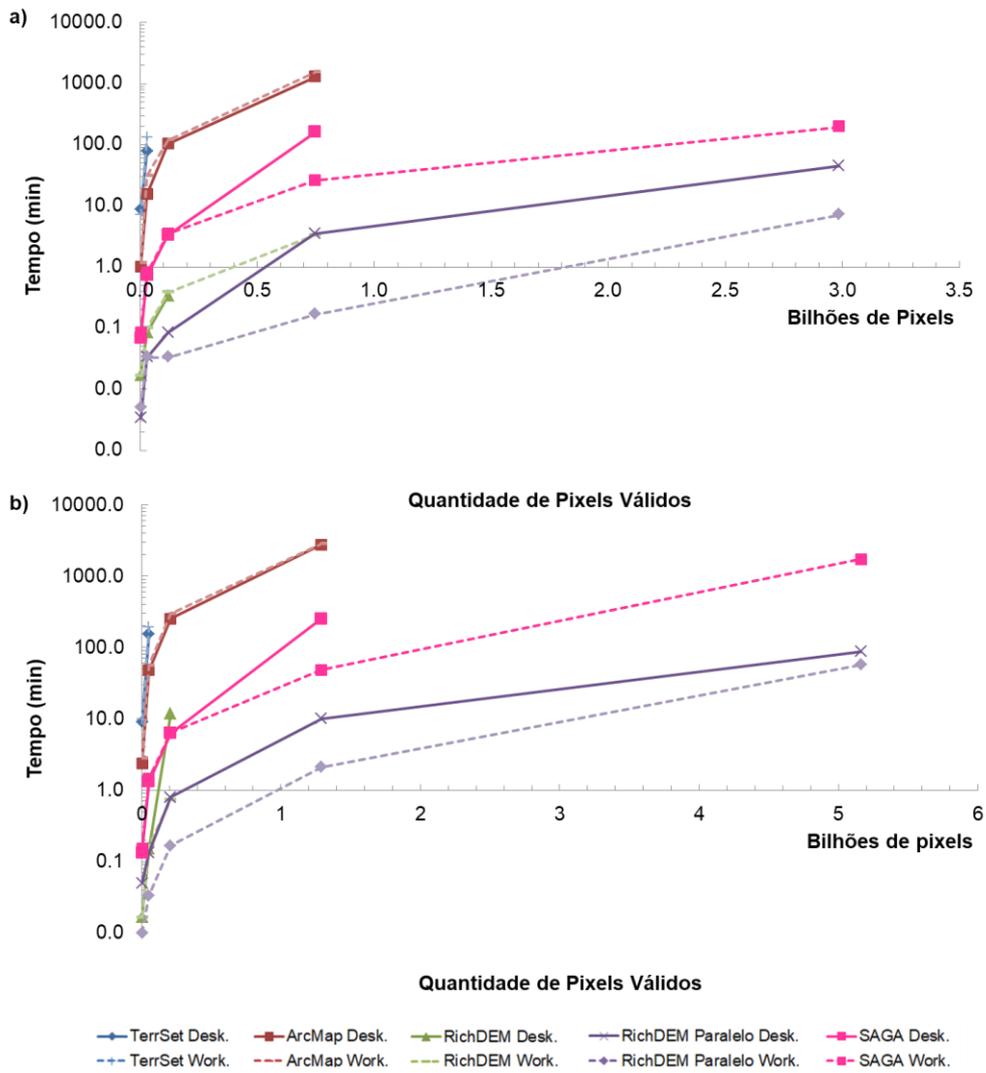


Figura 41 - Tempo de processamento dos algoritmos de cálculo de áreas acumuladas de drenagem (a) para a bacia do Rio Sirinhaém e (b) do Rio das Garças, usando as duas infraestruturas computacionais *desktop* e *workstation*.

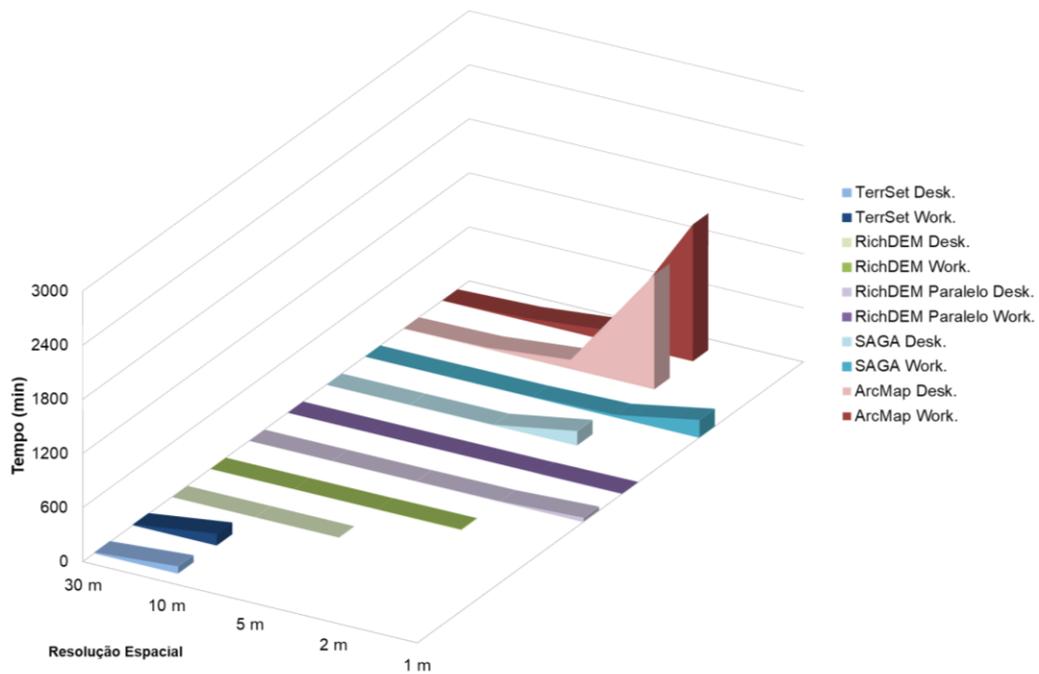


Figura 42 - Tempo de processamento dos algoritmos de cálculo de áreas acumuladas de drenagem para a bacia do Rio Sirinhaém, usando as duas infraestruturas computacionais *desktop* e *workstation*.

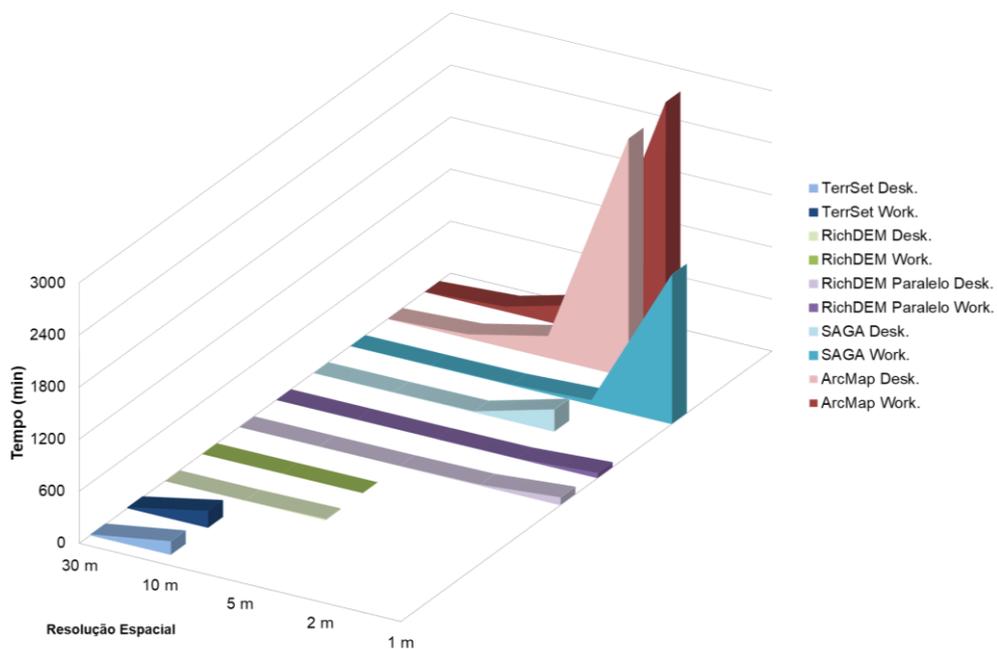


Figura 43 - Tempo de processamento dos algoritmos de cálculo de áreas acumuladas de drenagem para a bacia do Rio das Garças, usando as duas infraestruturas computacionais *desktop* e *workstation*.

Tabela 12 - Custo computacional dos algoritmos de cálculo de área acumulada de drenagem para a bacia do Rio Sirinhaém.

Resolução espacial (n° de pixels válidos)	TerrSet – RunOff		ArcMap – Flow Accumulation		RichDEM – Flow Accumulation		RichDEM – Parallel Flow Accumulation		SAGA GIS – Flow Accumulation (Top Down)	
	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.
30 m (3.3 mi.)	8 min 35 s	6 min 56 s	1 min	1 min 10 s	1 s	1 s	0.2 s	0.3 s	4 s	5 s
10 m (29.9 mi.)	1 h 17 min 47 s	2 h 8 min 10 s	15 min 23 s	18 min 5 s	5 s	6 s	2 s	2 s	43 s	48 s
5 m (119.4 mi.)	—	—	1 h 43 min 26 s	1 h 58 min 59 s	20 s	23 s	5 s	2 s	3 min 19 s	3 min 28 s
2 m (746.2 mi.)	—	—	21 h 13 min 54 s	25 h 19 min 32 s	NEM	3 min 17 s	3 min 28 s	10 s	2 h 39 min 17 s	25 min 58 s
1 m (2.9 bi.)	—	—	> 144 h	> 144 h	NEM	NEM	44 min 44 s	7 min 9 s	NEM	3 h 15 min 26 s

NEM - *Not Enough Memory*; – Não realizado.

Tabela 13 - Custo computacional dos algoritmos de cálculo de área acumulada de drenagem para a bacia do Rio das Garças.

Resolução espacial (n° de pixels válidos)	TerrSet – RunOff		ArcMap – Flow Accumulation		RichDEM – Flow Accumulation		RichDEM – Parallel Flow Accumulation		SAGA GIS – Flow Accumulation (Top Down)	
	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.	Desk.	Work.
30 m (5.7 mi.)	8 min 57 s	9 min 52 s	2 min 23 s	2 min 49 s	1 s	1 s	3 s	0.6 s	8 s	9 s
10 m (51.6 mi.)	2 h 34 min 10 s	3 h 12 min 22 s	48 min 9 s	56 min 53 s	9 s	10 s	8 s	2 s	1 min 19 s	1 min 27 s
5 m (206.4 mi.)	—	—	4 h 14 min 1 s	4 h 59 min 57 s	11 min 43 s	44 s	48 s	10 s	6 min 15 s	6 min 27 s
2 m (1.3 bi.)	—	—	45 h 53 min 52 s	47 h 43 min 32 s	NEM	NEM	10 min 6 s	2 min 6 s	4 h 13 min 20 s	48 min 21 s
1 m (5.2 bi.)	—	—	> 144 h	> 144 h	NEM	NEM	1 h 27 min 16 s	57 min 24 s	NEM	28 h 41 min 18 s

NEM - *Not Enough Memory*; – Não realizado.

4.2.4 Eficiência computacional no procedimento do *upscaling* de direções de fluxo

Os custos de processamento das duas etapas paralelas do método COTAT+ foram analisados individualmente. A Tabela 14 apresenta o resultado dessa análise. A Figura 44 apresenta o gráfico com os custos de processamento dessa análise.

Tabela 14 – Avaliação do desempenho computacional do processamento do *upscaling* COTAT+ sequencial e paralelo para a área teste utilizando o *desktop* e o *workstation*, ambos com a quantidade máxima de núcleos de processamento.

Tipo de processamento	Etapa de processamento	Tempo de processamento	Desempenho relativo ao processamento sequencial na mesma infraestrutura computacional		
			Redução do tempo de processamento	Fator de aceleração	Eficiência
Sequencial <i>Desktop</i>	Primeira etapa	15 min 3 s	-	-	-
	Segunda Etapa	45 min 9 s	-	-	-
<i>Desktop</i> Paralelo 6 núcleos	Primeira etapa	3 min 13 s	79%	4.67	0.78
	Segunda Etapa	9 min 54 s	78%	4.56	0.76
Sequencial <i>Workstation</i>	Primeira etapa	18 min 15 s	-	-	-
	Segunda Etapa	55 min 18 s	-	-	-
<i>Workstation</i> Paralelo 20 núcleos	Primeira etapa	2 min 3 s	86%	7.30	0.37
	Segunda Etapa	5 min 43 s	90%	9.67	0.48

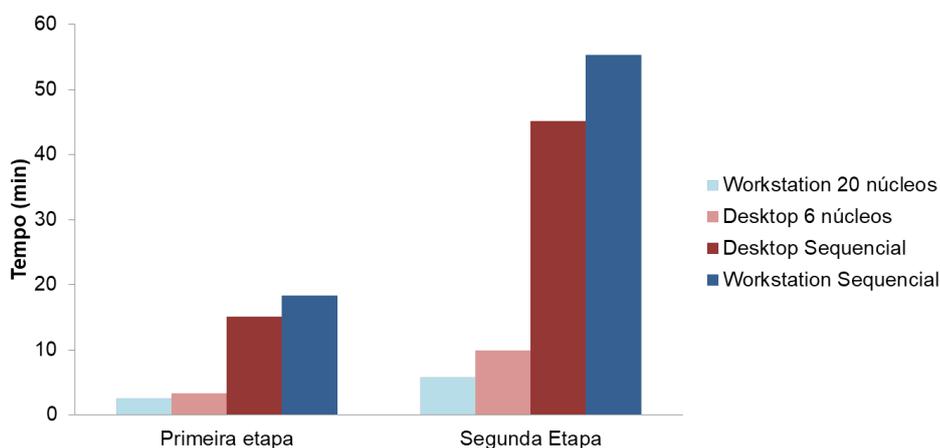


Figura 44 – Custo de processamento do método de *upscaling* de direções de fluxo COTAT+ sequencial e paralelo para uma área teste utilizando duas infraestruturas computacionais, *desktop* e *workstation*.

A Figura 45 apresenta o gráfico com os custos de processamento das duas bacias para as duas etapas do método.

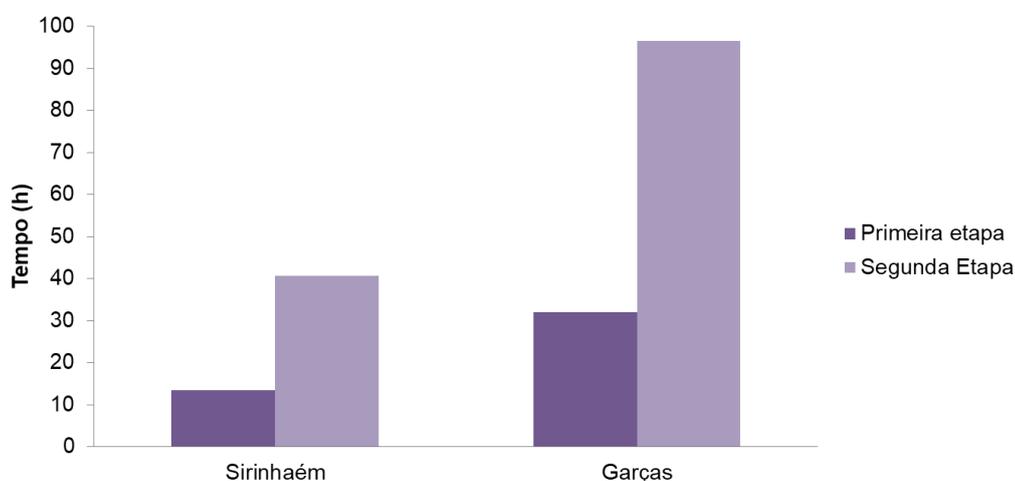


Figura 45 - Custo de processamento do método de *upscaling* de direções de fluxo COTAT+ paralelo para as bacias do Rio Sirinhaém e do Rio das Garças, utilizando a *workstation* com 20 núcleos de processamento, com distinção das duas etapas principais do algoritmo.

O custo de processamento elevado para as duas bacias, principalmente para a bacia do Rio das Garças, se deve ao fato do processamento ser realizado célula a célula. Essa estratégia permite que o método seja processado em qualquer máquina. Porém, analisando os resultados, observou-se que o custo de processamento poderia ter sido ainda mais reduzido, em relação ao processamento sequencial, caso seja utilizado o processamento em blocos. Ao invés de processar uma única célula em um núcleo de processamento, utilizar o processamento paralelo de blocos de células poderia reduzir o tempo de execução do método. As dimensões dos blocos poderiam ser ajustadas de acordo com as características da área de estudo e das dimensões da célula para que esse novo método também possa ser processado em qualquer infraestrutura computacional.

4.3 INFLUÊNCIA DOS ALGORITMOS DE REMOÇÃO DE DEPRESSÕES E ATRIBUIÇÃO DE DIREÇÕES DE FLUXO SOBRE A QUALIDADE DA REDE DE DRENAGEM

Com o objetivo de avaliar o impacto dos algoritmos utilizados na extração automática de drenagem, foi utilizado como dado de entrada o MDE proveniente do SRTM.

4.3.1 Inspeção visual do traçado das redes de drenagem

A Foz do Rio Sirinhaém é um estuário com grandes áreas alagadas sujeitas ao efeito da maré. Por esse motivo os métodos de extração automática da rede de drenagem, utilizando dados MDT LiDAR e SRTM, Figuras 46 e 47 respectivamente, obtiveram resultados bastante distintos entre si e em relação à rede de referência digitalizada, para esse trecho.

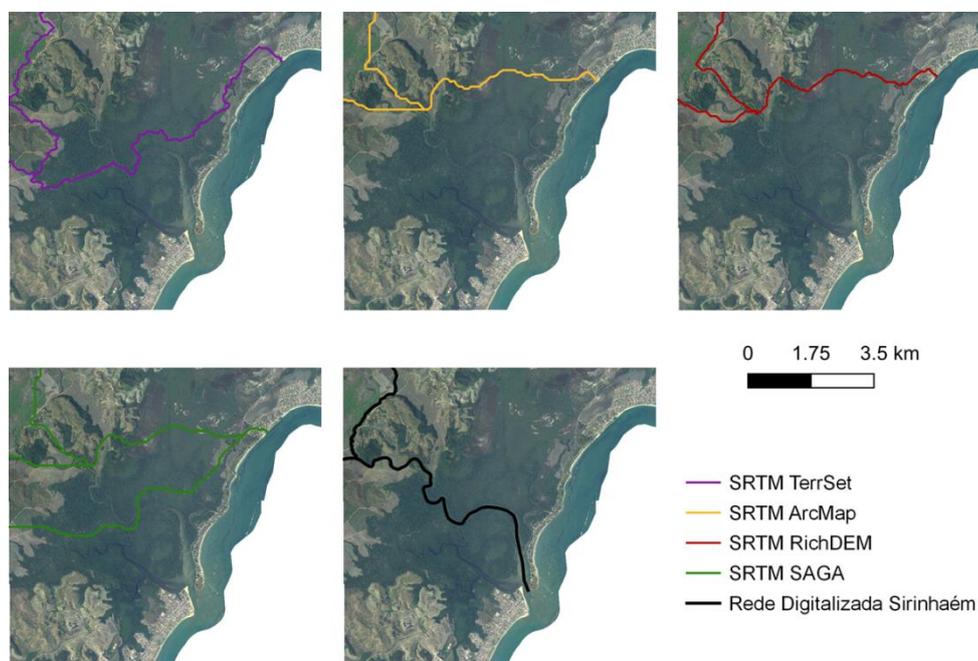


Figura 46 – A Foz do Rio Sirinhaém é um estuário com grandes áreas alagadas com efeito da maré, fato que fez com que os métodos de extração de redes de drenagens a partir dos dados SRTM apresentassem resultados bastante distintos em relação à rede de referência digitalizada.

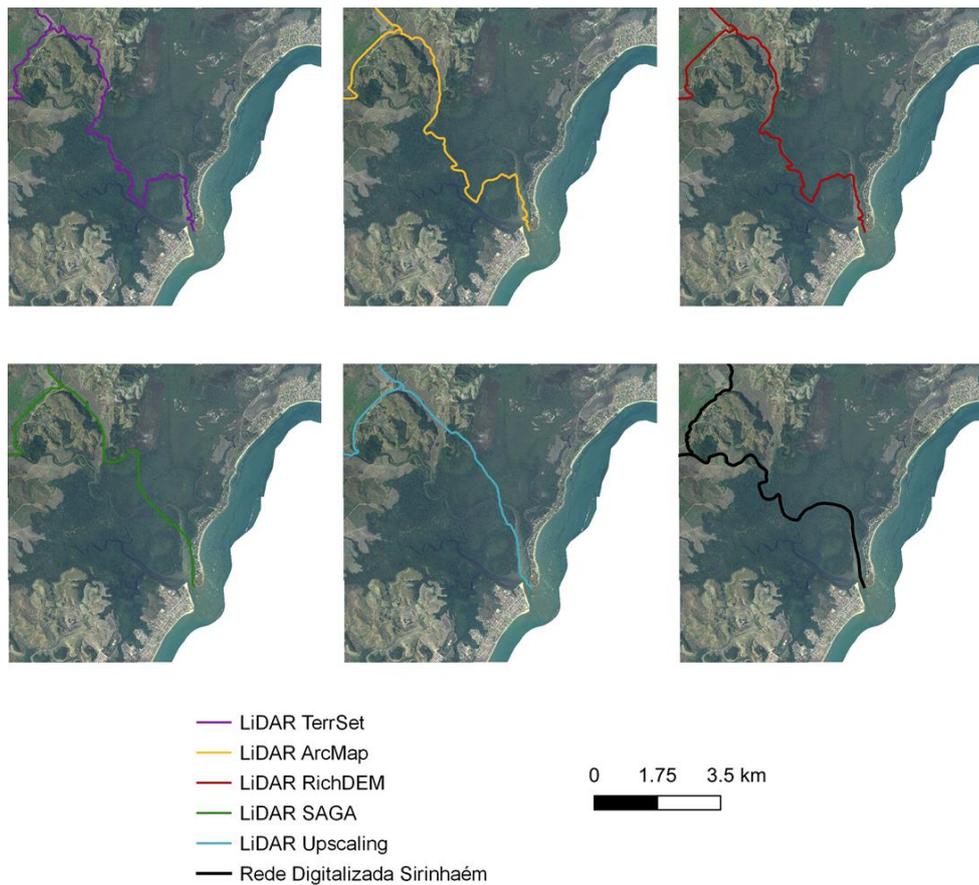


Figura 47 - Os métodos de extração de redes de drenagens a partir dos dados MDT LiDAR também apresentassem resultados bastante distintos em relação à rede de referência digitalizada para a Foz do Rio Sirinhaém.

A rede de drenagem obtida através dos dados do SRTM, utilizando os algoritmos do TerrSet, ArcMap, RichDEM e SAGA GIS, apresentaram uma descontinuidade significativa da rede de drenagem no trecho do baixo curso do Rio Sirinhaém, Figuras 48–a e b.

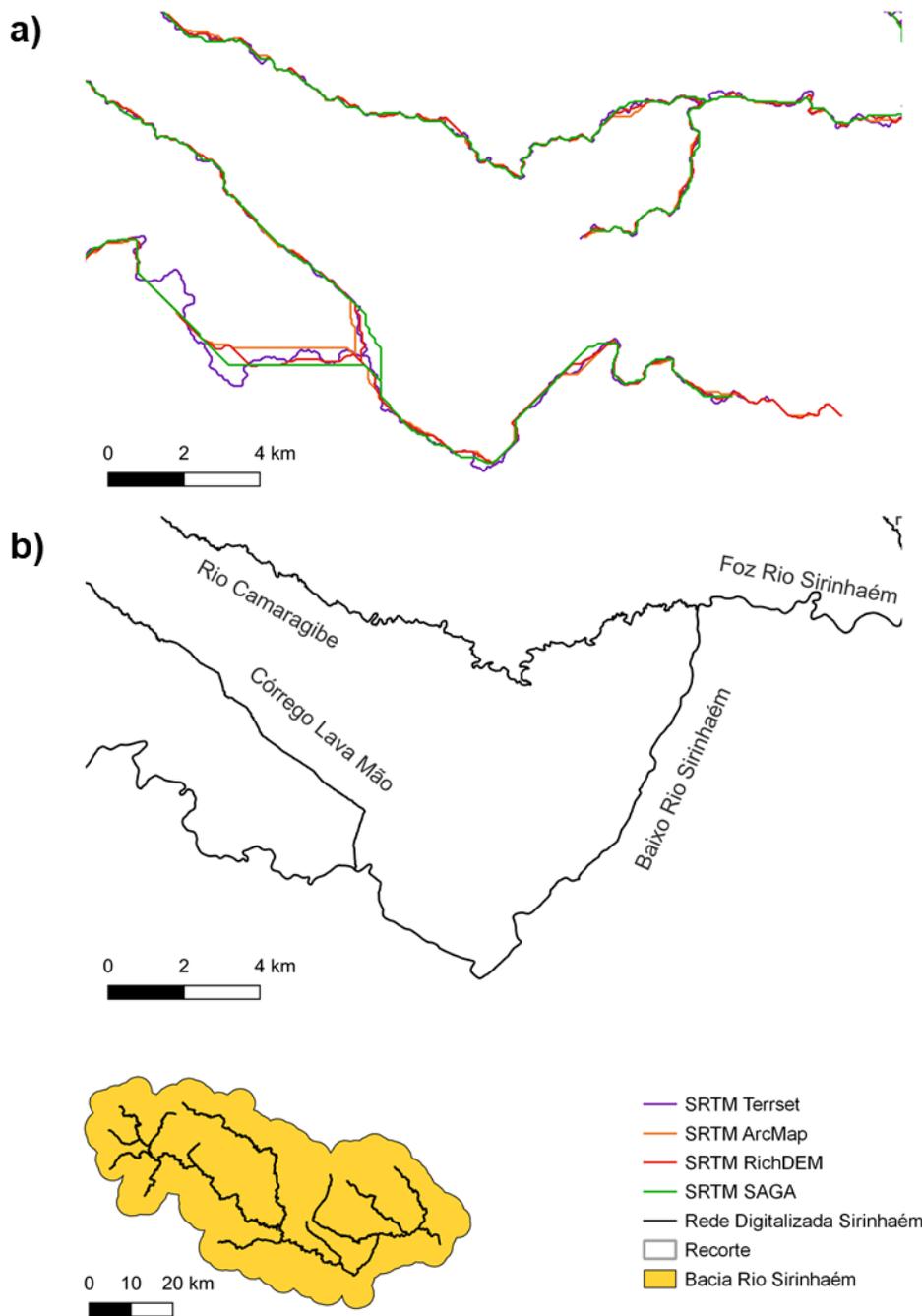


Figura 48 – (a) Descontinuidade da rede de drenagem do trecho Baixo Rio Sirinhaém obtida com dados SRTM através dos algoritmos TerrSet, ArcMap, RichDEM e SAGA GIS. (b) Rede de referência digitalizada para o mesmo trecho do baixo curso do Rio Sirinhaém.

A partir da análise das Figuras 49–a e b, é possível identificar que os dados do SRTM apresentam uma elevação no leito do rio, identificada pelo ponto A na Figura 49–a. Essa elevação faz com que o caminho de fluxo da drenagem desse trecho seja interrompido

e por esse motivo há a descontinuidade. Analisando os dados do MDT LiDAR, ponto B Figura 49–b, percebe-se que o leito do rio além de ser mais largo que o dos dados do SRTM, também não há interrupção do escoamento. Essa elevação nos dados do SRTM pode ser um ruído, elevação espúria, ou pode ser resultado da ação humana, uma estrutura antrópica, da época de aquisição do dado do SRTM, ano 2000, e que não estava presente na data de aquisição do LiDAR PE3D, anos 2014 e 2015. Caso seja por questões antrópicas, representa um fato que demonstra a importância da aquisição sistemática de dados de elevação, isto é, a repetição temporal da aquisição.

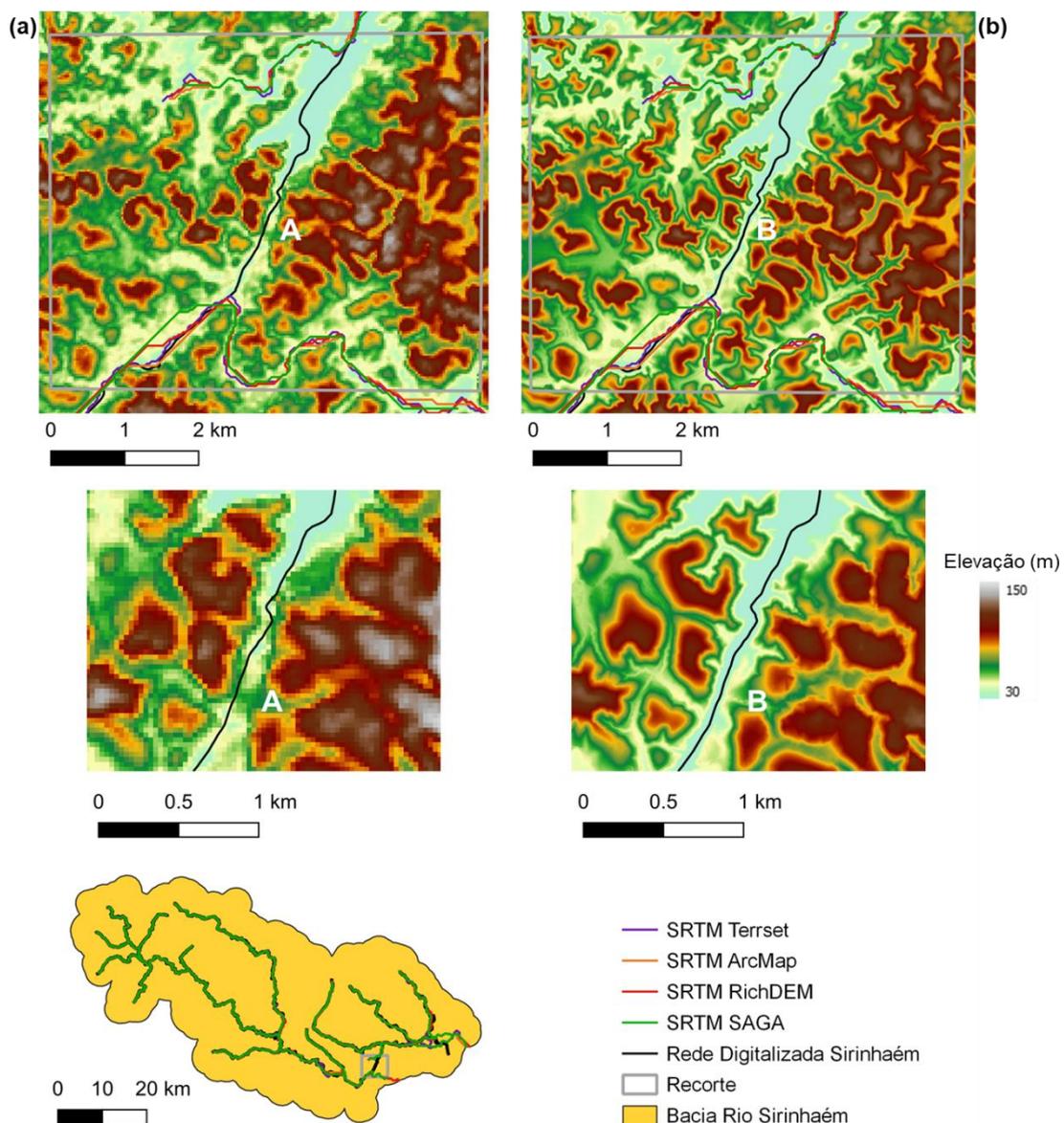


Figura 49 – Análise dos dados de elevação do SRTM (a) e do MDT LiDAR de 1 m para identificação de possíveis causas da interrupção da rede de drenagem do trecho do baixo

curso do Rio Sirinhaém através da extração automática da rede de drenagem utilizando os dados provenientes do SRTM.

4.3.2 *Percentual dentro do buffer*

As Figuras 50–a e b apresentam os gráficos da análise de percentual dentro do *buffer* para a bacia do Rio Sirinhaém e do Rio das Garças, respectivamente, utilizando os dados do SRTM e todos os métodos de extração automática de drenagem analisados na pesquisa. Nota-se que o percentual de sobreposição para as duas bacias foi de no máximo 80%. Os menores valores foram para o trecho da Foz do Rio Sirinhaém, pelos motivos apresentados nas Figuras 46 e 47, para a bacia do Rio Sirinhaém.

Em relação aos resultados individuais de cada método, é possível afirmar, analisando aos gráficos das Figuras 50–a e b, que o TerrSet e o RichDEM obtiveram uma vantagem pequena, porém perceptível, em relação aos demais, na extração da rede de drenagem das duas bacias, segundo a métrica percentagem dentro *buffer*. Dentre esses dois métodos, o TerrSet foi o que obteve os maiores valores dessa métrica em determinados trechos para as duas bacias, corroborando estudo de Buarque et al. (2009) e Siqueira et al. (2016) que atestam a qualidade da rede de drenagem derivada por esse algoritmo.

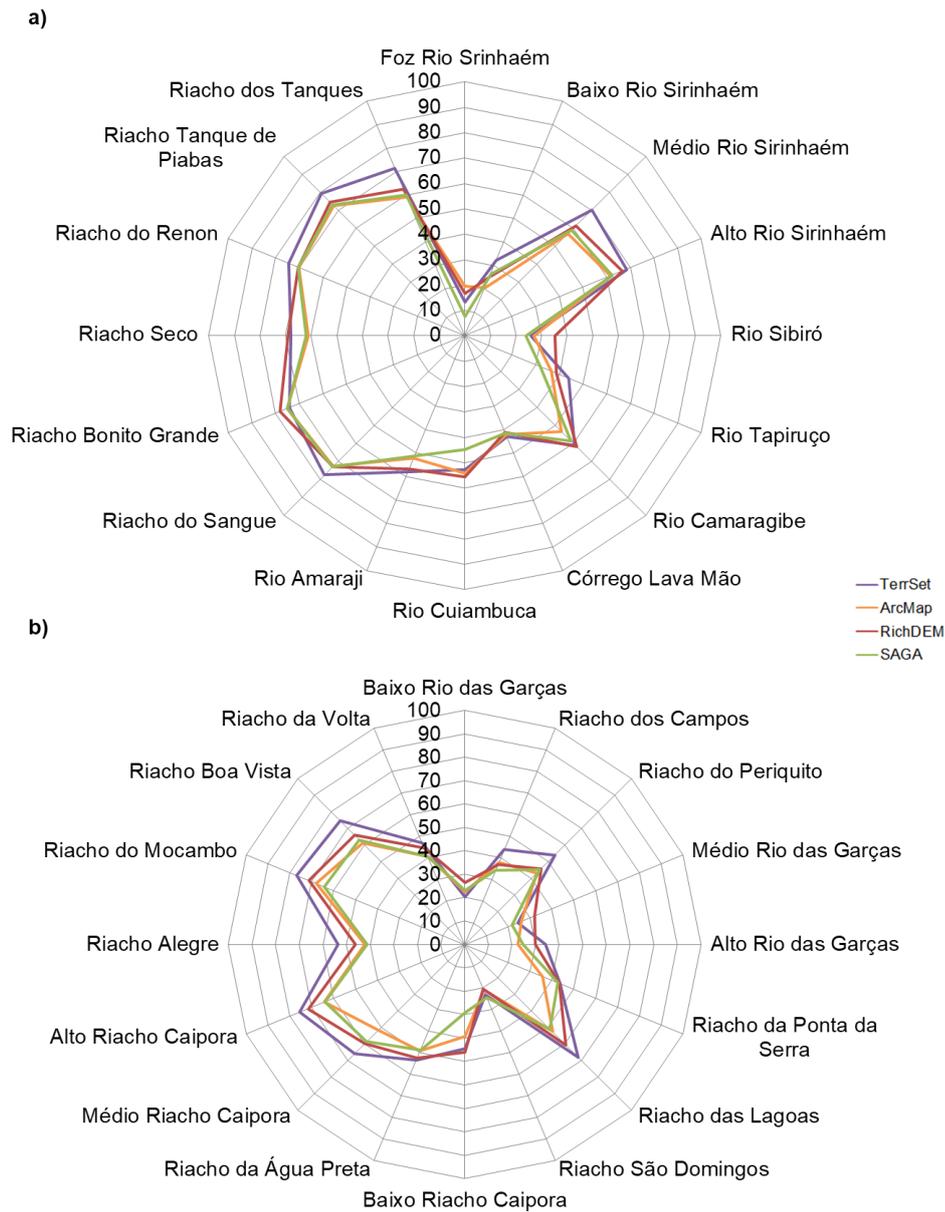


Figura 50 – *Percentual dentro do buffer* utilizando os dados do SRTM através de diferentes algoritmos, (a) para a bacia do Rio Sirinhaém e (b) do Rio das Garças.

4.3.3 Comprimentos de rio

Devido à resolução espacial de 30 m do MDE SRTM, é esperado que haja uma subestimação dos comprimentos da rede de drenagem, devido à dificuldade de identificação dos meandros e do encurtamento dos caminhos de fluxo (FEKETE; VÖRÖSMARTY; LAMMERS, 2001; PAZ et al., 2008; YANG et al., 2014). É possível notar nas Figuras 51–a e b que isso ocorre para as maiorias dos trechos nas duas bacias,

para todos os métodos analisados. Isso indica que para todos os algoritmos avaliados, as redes de drenagem obtidas a partir do MDE SRTM apresentaram traçados com comprimentos menores do que os comprimentos esperados medidos nos trechos das redes de referência, em ambas as bacias.

Através da análise dos gráficos nas Figuras 51–a e b, observa-se que para a maioria dos trechos das duas bacias, o TerrSet apresentou uma diferença relativa menor, comparado aos outros métodos. Isso é um indicador indireto de que o traçado dos rios obtidos com esse algoritmo tendeu a melhor seguir os meandros da rede de referência, o que foi observado também no estudo de Buarque et al. (2009).

Nos trechos dos rios principais principalmente na parte baixa e média, houve a tendência de todos os algoritmos resultarem em comprimentos dos trechos de rio superestimados em relação à rede de referência. Isso pode estar relacionado a serem áreas mais planas, com calhas de rios mais largos, e que, mesmo para pixels de 30 m, resultaram em um efeito de zigue-zague artificial, aumentando o caminho de fluxo (FEKETE; VÖRÖSMARTY; LAMMERS, 2001; SOUSA; PAZ, 2017; YANG et al., 2014).

Nesse aspecto, o SAGA praticamente não superestimou os comprimentos, e quando isso ocorreu, o valor foi muito baixo, para as duas bacias, bem inferior ao ocorrido para os demais algoritmos. O TerrSet apresentou os maiores valores de superestimação nesses trechos.

Outra observação geral é que os resultados do RichDEM e do ArcMap foram semelhantes entre si para a maioria dos trechos das duas bacias.

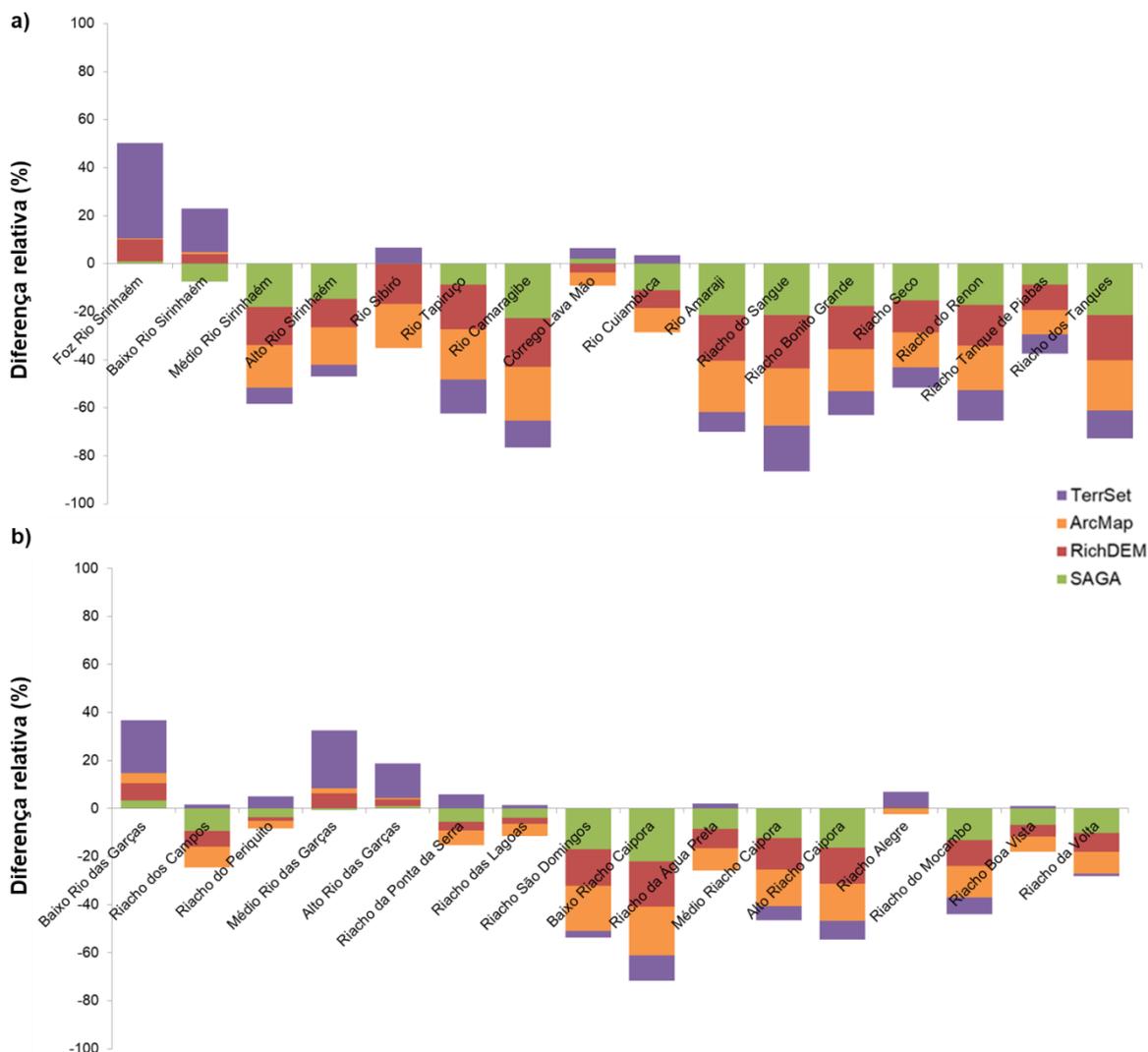


Figura 51 - Análise da diferença relativa entre os comprimentos das redes de drenagens dos trechos da bacia do Rio Sirinhaém (a) e da bacia do Rio das Garças (b), obtidas através do SRTM, processado pelos algoritmos analisados, em relação à rede de referência digitalizada.

4.4 ANÁLISE DE QUALIDADE DA REDE DE DRENAGEM DERIVADA DO MDT LIDAR E EFEITO DE ESCALA

O dado original MDT LiDAR com resolução espacial de 1 m foi reamostrado par as resoluções de 2, 5, 10 e 30 m e todo esse conjunto de dados foi processado pelos métodos de extração automática analisados, para as duas bacias da área de estudo.

4.4.1 Inspeção visual do traçado das redes de drenagem

Observando o MDE SRTM no ponto A das Figuras 52 e 53, percebe-se que a calha do Rio das Garças possui uma dimensão bem maior que o *buffer* utilizado e que devido ao rio ser intermitente, a topografia do leito do rio interfere na determinação da rede de drenagem, mesmo para os dados na resolução espacial de 30 m. Assim, todos os algoritmos tiveram desempenho inferior em termos de percentagem dentro do *buffer* na bacia do rio das Garças em relação à bacia do rio Sirinhaém.

Os rios que correm na bacia hidrográfica do Rio das Garças são, para a maioria dos trechos, relativamente estreitos, com o canal principal com largura de poucos metros, sendo a maioria deles intermitentes, por se tratar de uma região semiárida. Estas características tornam estes rios difíceis de serem adequadamente representados em redes derivadas de forma automática de MDE e até de serem identificados visualmente nas ortofotos.

Um exemplo de inspeção visual para avaliação da qualidade das redes fluviais derivadas é mostrado em Figura 54. A parte (a) desta figura destaca a concordância entre a drenagem derivada do MDT LiDAR 1 m e os caminhos reais do rio vistos na ortofoto subjacente. Nesta figura, três regiões detalhadas ilustram que a rede fluvial extraída do MDT se encaixa inteiramente no canal percebido visualmente na ortofoto para alguns trechos do rio, enquanto para outros trechos há um deslocamento de alguns metros de largura. Por exemplo, esse deslocamento é de até 8 metros no detalhe mostrado na parte central da figura mencionada.

A reamostragem do MDT resultou em redes de drenagem derivadas que mantiveram de forma muito satisfatória os padrões espaciais obtidos com a resolução espacial de 1 m. Para o exemplo mostrado na Figura 54, as diferenças entre as redes derivadas de 1 m e 2 m são quase imperceptíveis visualmente. As redes extraídas com as resoluções de 5 m e 10 m também apresentam pequenas e pontuais diferenças em relação à de 1 m. A resolução de 30 m ainda conserva a maioria dos caminhos fluviais, bastante semelhantes à rede de 1 m, mas há divergências que são perceptíveis entre eles em alguns trechos do rio. Por exemplo, os entroncamentos dos rios A e B da rede de 1 m são deslocados por cerca de 100 m na rede de 30 m (pontos A' e B').

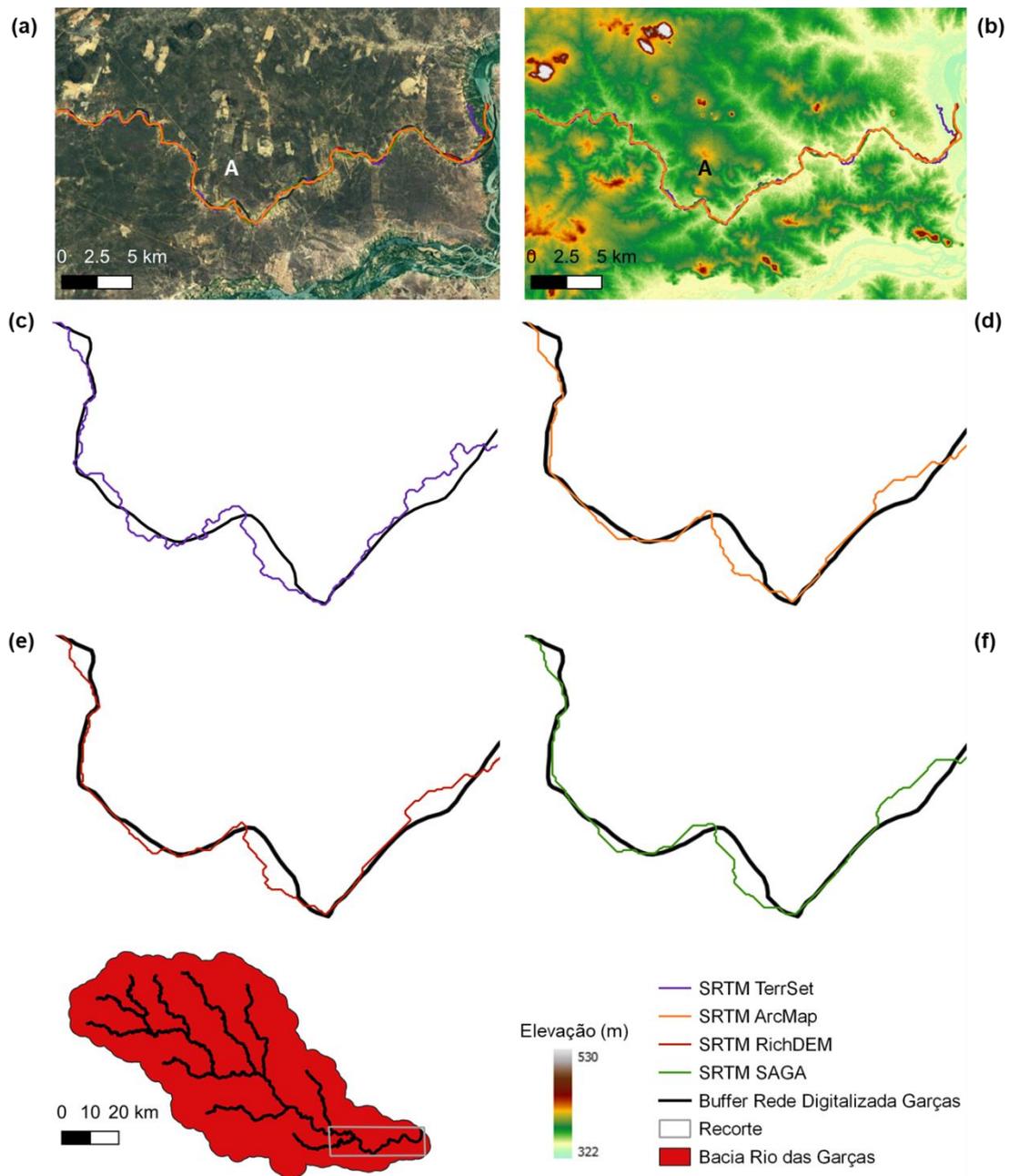


Figura 52 - Trechos da Bacia do Rio das Garças, baixo curso do Rio das Garças com baixo percentual dentro do *buffer* da rede de drenagem derivada dos dados SRTM. (a) ortofoto, (b) SRTM, *buffer* da rede de drenagem digitalizada de referência e derivadas dos algoritmos (c) TerrSet, (d) ArcMap, (e) RichDEM e (f) SAGA.

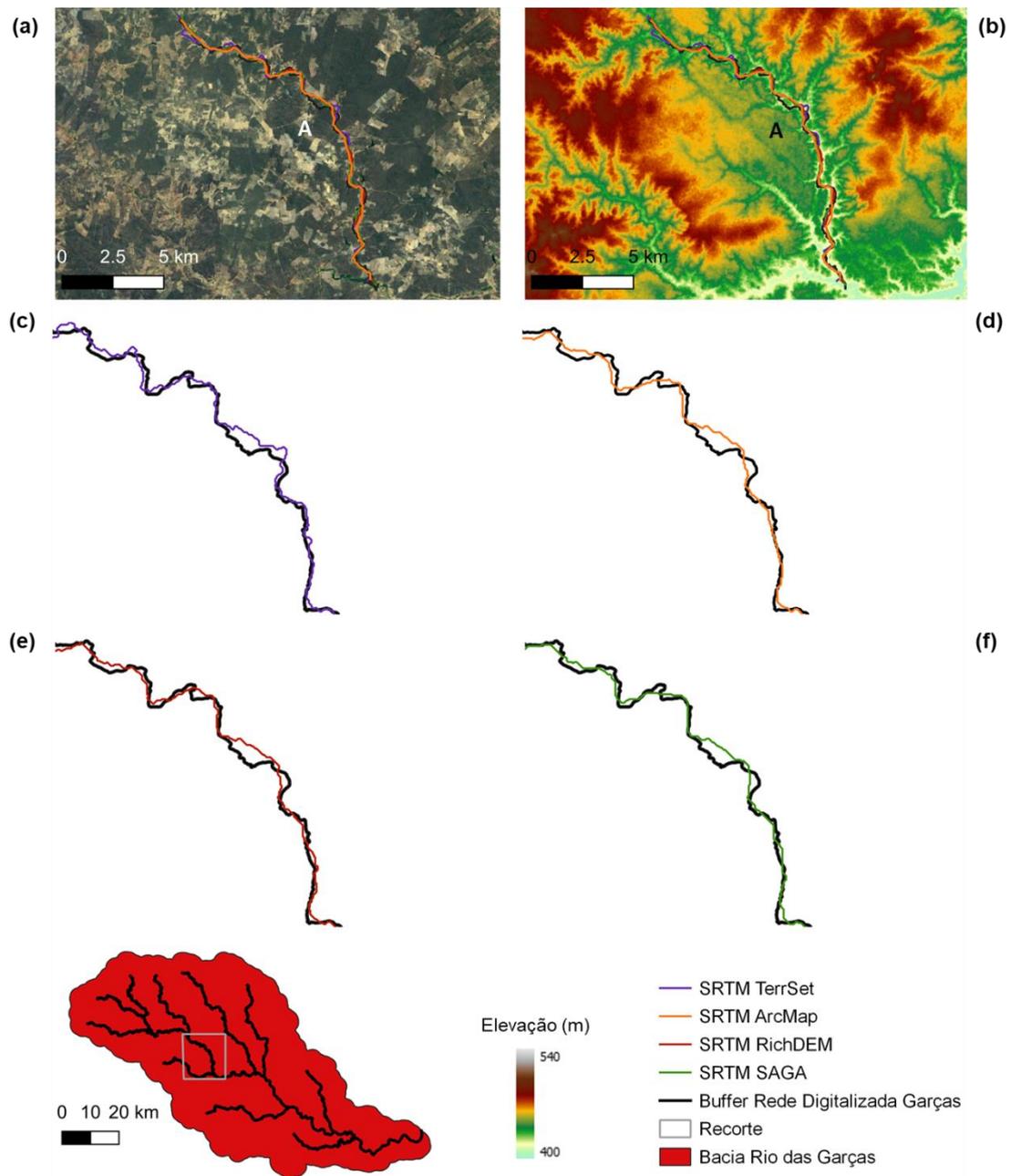


Figura 53 - Trechos da Bacia do Rio das Garças, Riacho São Domingos com baixo percentual dentro do *buffer* da rede de drenagem derivada dos dados SRTM. (a) ortofoto, (b) SRTM, *buffer* da rede de drenagem digitalizada de referência e derivadas dos algoritmos (c) TerrSet, (d) ArcMap, (e) RichDEM e (f) SAGA.

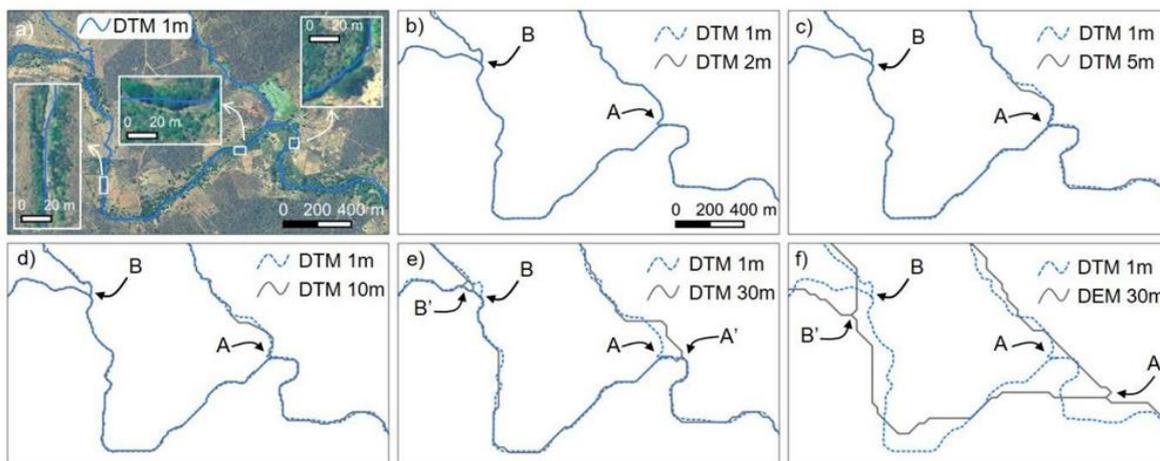


Figura 54 - a) Ortofoto e rede de drenagem extraída MDT LiDAR de 1m; b), c), d), e) Sobreposição entre as redes de drenagem derivadas do MDT LiDAR reamostrado e o MDT original de 1 m; f) Sobreposição entre a drenagem derivada da rede SRTM 30m e a rede derivada de MDT LiDAR 1 m.

No entanto, a qualidade da rede MDT LiDAR 30 m é melhor do que a rede SRTM 30 m. O último apresenta um deslocamento considerável da rede de 1 m ao longo de todo o seu comprimento – por exemplo, as junções fluviais A e B estão agora compensadas por aproximadamente 180 m e 370 m, respectivamente. Há também uma tendência geral de suavização dos meandros dos percursos fluviais na rede SRTM, como pode ser visto em ambos os trechos do rio a montante da junção A' relativamente às suas contrapartes a montante de junção A na rede de 1 m. Este efeito é devido ao tamanho do pixel SRTM em relação às dimensões dos meandros reais do rio na área, um efeito amplamente relatado por outros autores (FEKETE et al., 2001; YANG et al., 2014;).

A alta qualidade da rede derivada do MDT LiDAR 1 m é um resultado direto de uma tecnologia tão refinada de representação topográfica. No entanto, esta capacidade do MDT LiDAR 1 m, de detectar variações de pequena escala na topografia também apresentou algumas armadilhas ao derivar a rede de drenagem. Um exemplo claro disso é o caso de um curso de rio intermitente, que possui canal principal mais largo está seco, no momento da aquisição dos dados altimétricos, e há dois cursos estreitos e paralelos, representados na Figura 55-a, separados um do outro por uma distância que varia entre 80 m e 160 m. O MDT LiDAR 1 m foi capaz de representar com precisão essas características

topográficas (Figura 55-b), enquanto o SRTM possui resolução espacial muito baixa para capturar esses detalhes, (Figura 55-c).

Como consequência, a rede derivada do MDT LiDAR 1m possui dois caminhos de fluxo paralelos, indicados pelas setas A e B na Figura 55-d. Isso é razoavelmente correto em relação à topografia real, mas pode ser considerada uma representação indesejada da rede fluvial. Durante períodos em que o nível da água está mais alto, a água ocupa todo o canal, abrangendo juntos os caminhos de fluxo A e B. Assim, o afluente na parte superior direita da figura deve confluir com o rio principal que flui da parte esquerda perto do ponto C na Figura 55-b. Em vez disso, devido à divisão do curso principal do rio em dois caminhos de fluxo distintos e paralelos, a confluência C ocorre bem à jusante (ponto C' na Figura 55-d), aproximadamente 1,8 km em linha reta e 2,2 km ao longo do curso principal do rio. O uso da rede de drenagem do rio com esses caminhos de fluxo paralelos A e B não seriam adequados como dados de entrada para executar um modelo hidrológico para estimar e prever inundações nesta área, por exemplo.

Além disso, o uso da rede de drenagem do rio da Figura 55-d para delineamento da bacia teria um resultado bastante distinto do real e considerado errado. Um exutório localizado no caminho de fluxo A resultaria em uma bacia restrita à área contribuindo para este trecho fluvial, desconsiderando as áreas que drenam para a via de escoamento B, e vice-versa. A delimitação esperada da bacia deveria, ao invés disso, incluir áreas de drenagem tanto do curso principal do rio e seu afluente. Portanto, esses caminhos de fluxo paralelos não são desejados para fins da maioria dos estudos hidrológicos.

As redes de drenagem derivadas de MDTs de 2 m (não mostrado), 5 m (não mostrado) e 10 m (Figura 55-e) apresentam o mesmo padrão de trajetórias paralelas observadas para 1 m. A resolução de 30 metros era tão grosseiro que esse paralelismo foi evitado (Figura 55-f), assim como ocorreu para a rede derivada do SRTM (Figura 55 -g). No entanto, a confluência D que é razoavelmente representada nas redes derivadas de MDT 1 m (Figuras 55-a e 55-b) e também na rede MDT LiDAR 30 m, é deslocado por 330 m na rede SRTM.

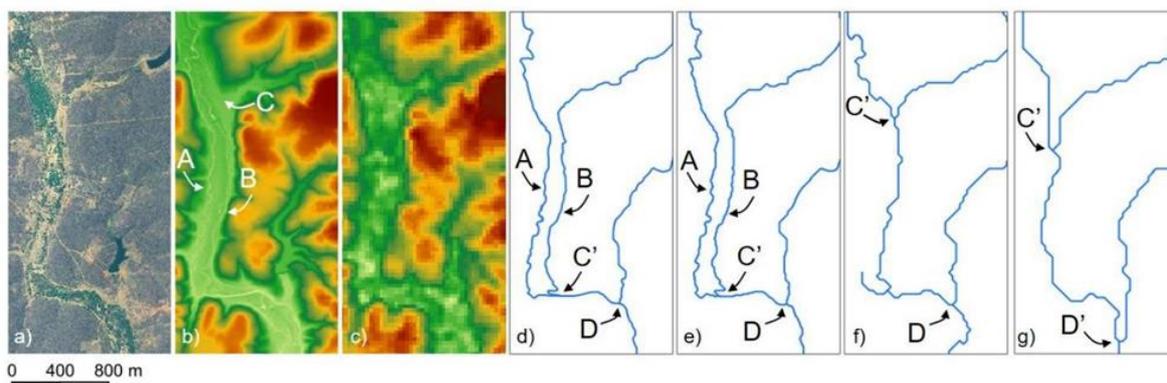


Figura 55 - Exemplo de canal principal de um trecho de rio intermitente com dois percursos de escoamento paralelos: a) Ortofoto; b) LiDAR DTM 1 m; c) SRTM DEM 30 m; d), e), f) LiDAR DTM redes derivadas de 1m, 10m e 30m, respectivamente; g) Rede SRTM DEM 30m.

4.4.2 Percentual dentro do buffer

Os gráficos das Figuras 56–a, b, c e d apresentam os resultados obtidos pelas redes de drenagens que cada método foi capaz de extrair para a bacia do Rio Sirinhaém. Analisando a Figura 56-d, referente aos resultados do SAGA, o único método que foi capaz de processar os dados na resolução original de 1 m, nota-se que há uma sobreposição entre os resultados das resoluções de 1 e 2 m e uma proximidade entre os resultados nas outras resoluções. O SAGA apresentou um resultado bastante distinto, quando comparado aos outros métodos, para as resoluções de 5, 10 e 30 m, para os trechos Riacho Seco, do Renon e Tanque de Piabas.

Já para o método do RichDEM, para essa mesma bacia (Figura 56–c), apenas a resolução de 30 m apresenta valores mais distintos, em relação às outras resoluções. O que é semelhante ao encontrado na Figura 56 –b, resultado do método do ArcMap. Entretanto para esse resultado é possível notar que em determinados trechos as resoluções de 5 e 10 m também apresentam diferenças perceptíveis. O TerrSet, Figura 56–a, apesar de ter processado apenas as duas resoluções mais baixas, apresenta valores de percentagem dentro do *buffer* compatíveis com os outros métodos, para essas mesmas resoluções.

De forma geral, a sobreposição para todas as resoluções apresentou um alto valor percentual. Excetuando o método do SAGA, para essa bacia, pode-se afirmar que os

resultados apresentados por resoluções intermediárias são muito próximos aos das mais altas resoluções.

Em relação à bacia do Rio das Garças, os gráficos das Figuras 57–a, b, c e d, pode-se afirmar de forma geral, para todos os métodos, que as redes de drenagens derivadas do MDT LiDAR nas resoluções de 1, 2, 5 e 10 m são equivalentes quanto à qualidade dos traçados, medida em termos de percentagem dentro do *buffer*. Existem diferenças entre os percentuais de sobreposição, porém valores reduzidos (de menos de 8,74%).

Em termos dos resultados dentre algoritmos para a bacia do Garças, houve grande similaridade entre os algoritmos, com aproximadamente um mesmo padrão de maior ou menor acerto (menor ou maior valor de percentagem dentro do *buffer*) para os mesmos rios. Por exemplo, Riacho Boa Vista e Médio Riacho das Caiporas alcançaram valores de quase 100% em todos algoritmos e resoluções, enquanto os trechos do Médio e Alto Rio das Garças apresentaram os menores percentuais em todos algoritmos e resoluções.

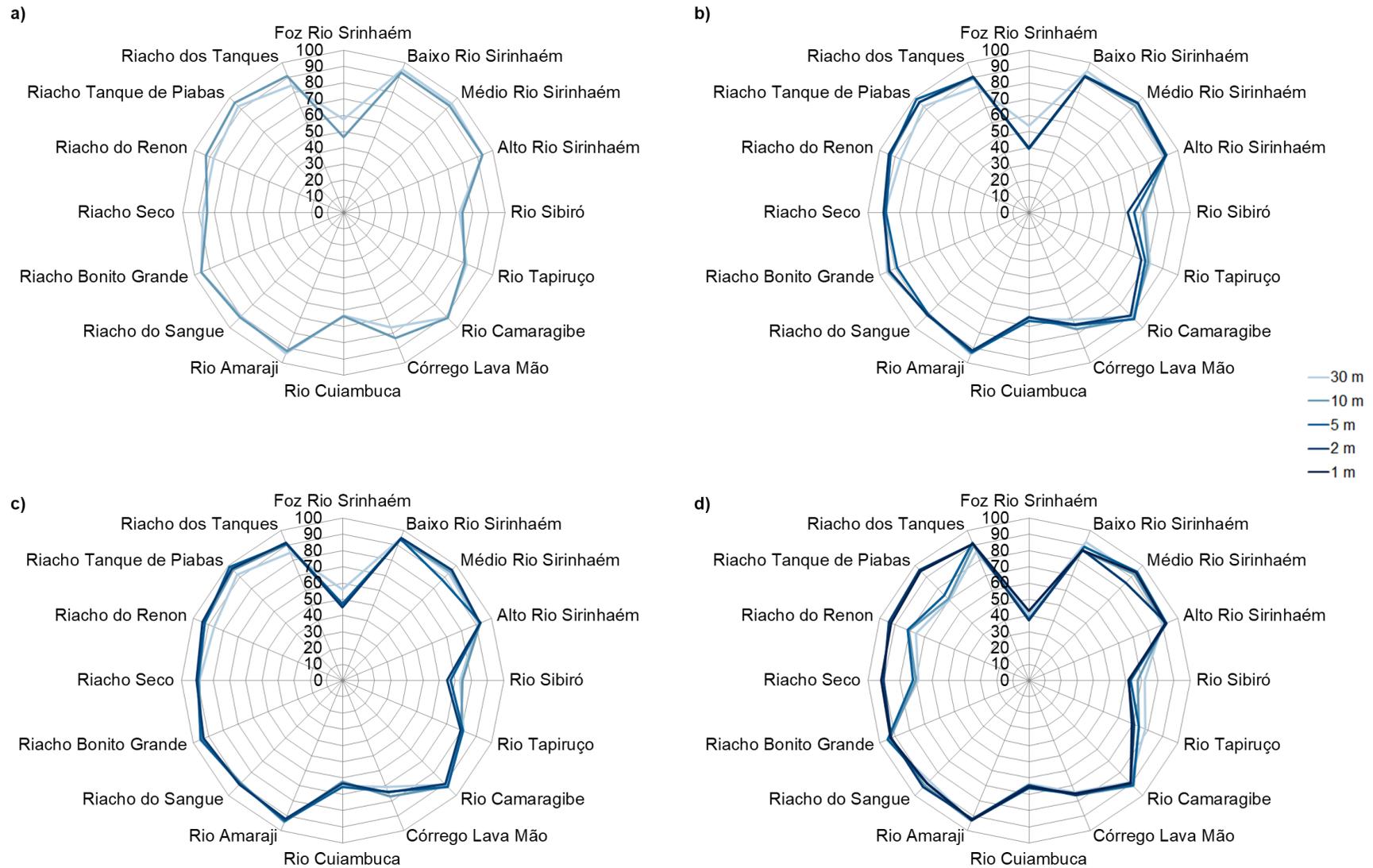
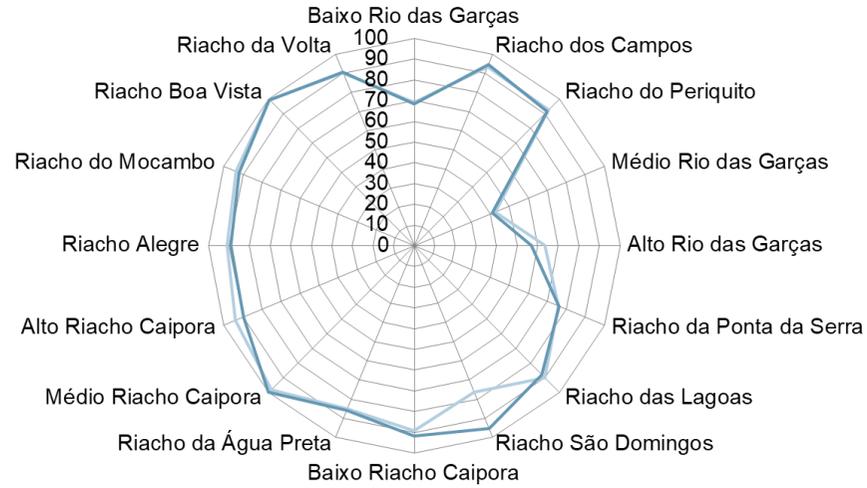
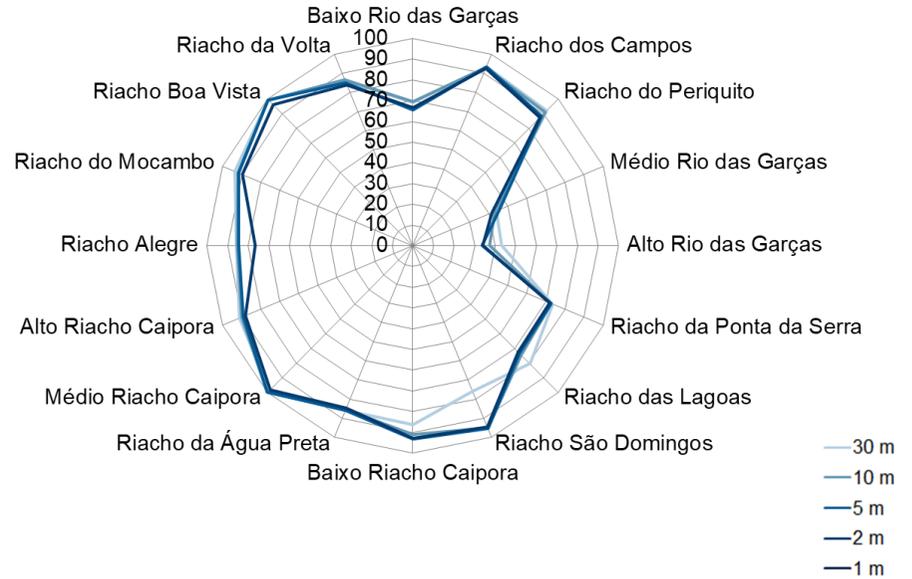


Figura 56 – Percentual dentro do buffer para a bacia do Rio Sirinhaém: (a) TerrSet; (b) ArcMap; (c) RichDEM; (d) SAGA.

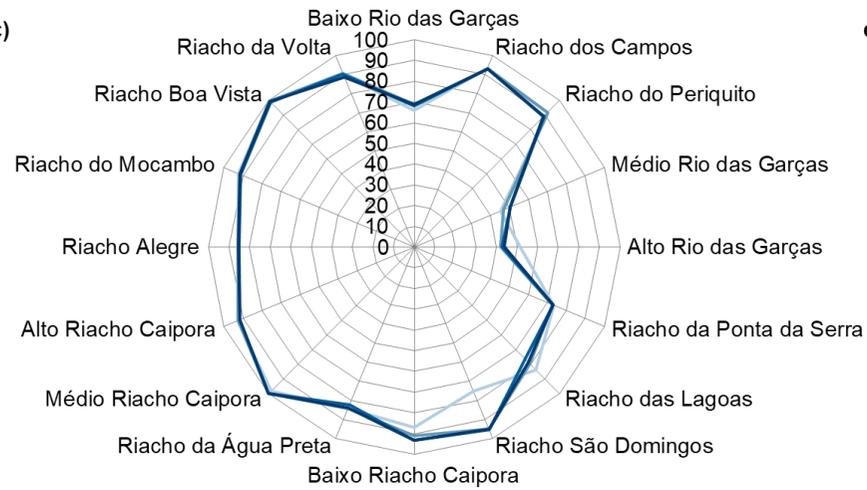
a)



b)



c)



d)

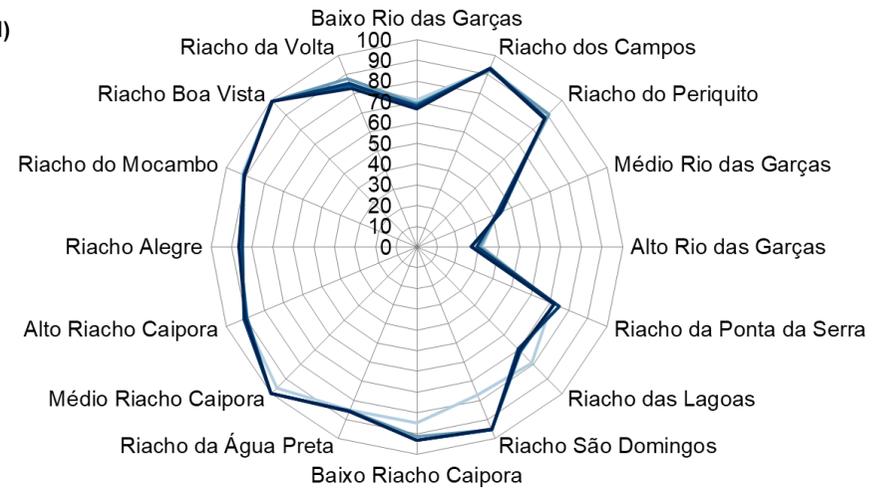


Figura 57 - Percentual dentro do buffer para a bacia do Rio das Garças: (a) TerrSet; (b) ArcMap; (c) RichDEM; (d) SAGA.

4.4.3 *Comprimentos de rio*

Em relação à diferença relativa entre o comprimento das redes de drenagem obtidas e a de referência digitalizada, a Figuras 58 apresenta os resultados para a bacia do Rio Sirinhaém. Percebe-se que para a maioria dos trechos houve uma subestimação dos comprimentos. Um padrão contrário de resultado foi obtido para a bacia do Rio das Garças (Figuras 59), no qual todos os métodos em todas as resoluções superestimaram o comprimento da maioria dos trechos de rio.

O fato das bacias possuírem características distintas pode ser um dos motivos para esses resultados contrários. A bacia do Rio das Garças apresenta rios intermitentes, com a calha seca do rio com largura superior até mesmo ao tamanho do pixel de menor resolução espacial, 30 m, e a aquisição dos dados altimétricos foi feita em período sem lâmina d'água, observado através das ortofotos da região. Então, essa larga calha seca foi interpretada pelos algoritmos de processamento dos MDTs como uma área relativamente plana, levando os caminhos de fluxo a zigue-zaguearem artificialmente dentro dessa área, ou seja, criaram-se meandros de rio em trechos onde o caminhamento deveria ser mais retilíneo. Em alguns trechos, internamente ao leito seco da calha mais larga havia de fato no MDT a representação de um caminho de fluxo mais sinuoso, que poderia ser por onde flui a água em níveis bem reduzidos no rio. Em contraste, a rede de referência digitalizada a partir das ortofotos foi traçada manualmente seguindo o fluxo principal da calha mais larga, que é o traçado do rio quando está em níveis de água mais elevados. Com isso, ocorreu a superestimação dos comprimentos dos trechos derivados dos MDTs em relação aos comprimentos medidos a partir da rede digitalizada.

Os resultados de comprimentos de rios obtidos com os algoritmos do ArcMap e RichDEM para as resoluções espaciais de 2 e 5 m, e com o SAGA para as resoluções de 1, 2 e 5 m, foram valores próximos entre si, para os trechos das duas bacias, e foram os que mais se aproximaram da rede de referência (diferenças entre 0,16% e 16,55%), isto é, para a análise e caracterização de comprimentos da rede de drenagem, para essas duas bacias, é possível utilizar resoluções maiores que a do MDT LiDAR original de 1 m e obter resultados aproximados, com um custo computacional menor.

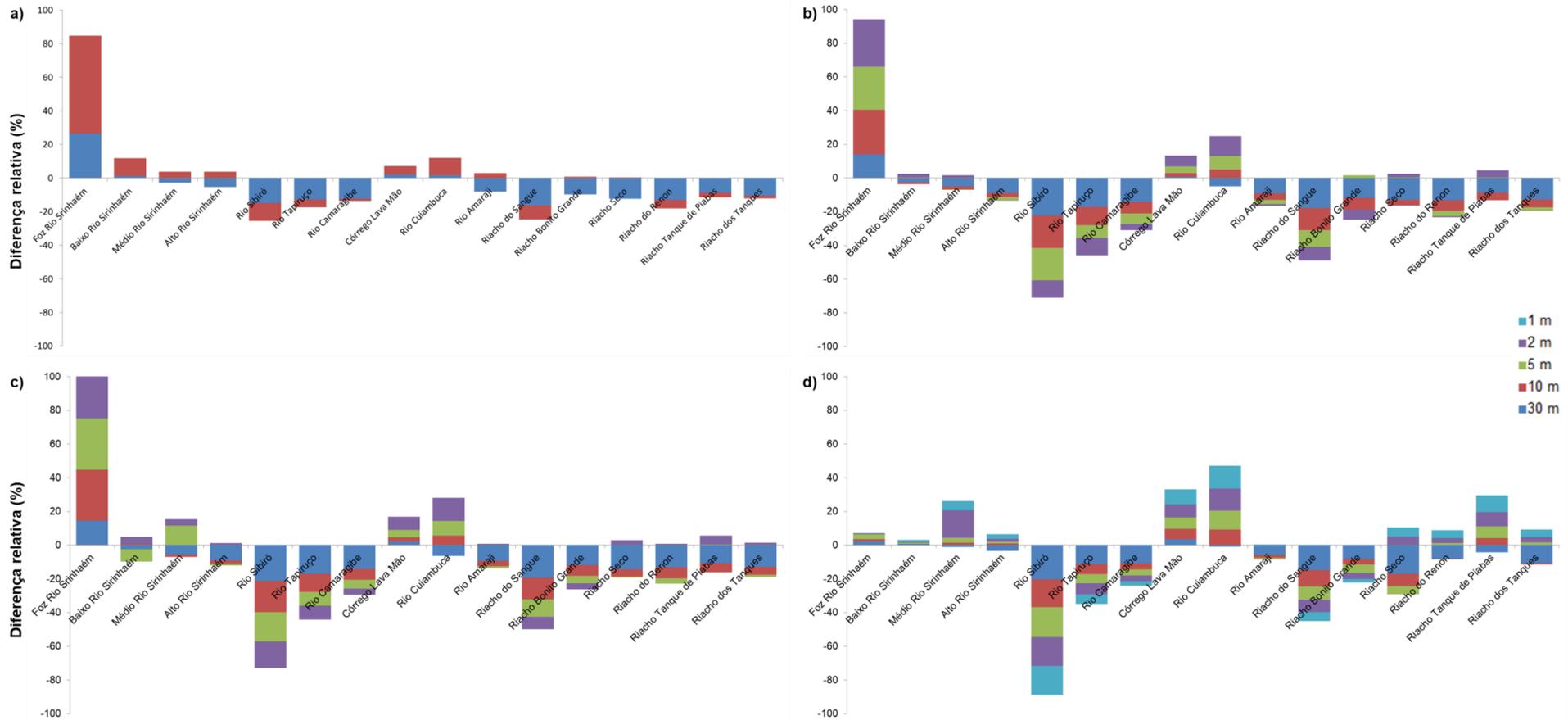


Figura 58 - Análise da diferença relativa entre os comprimentos das redes de drenagens dos trechos da bacia do Rio Sirinhaém, obtidas através do MDT LiDAR original de 1 m e reamostrado para a resolução de 2, 5, 10 e 30 m, processado pelo TerrSet (a); ArcMap (b); RichDEM (c); e SAGA (d), em relação à rede de referência digitalizada.

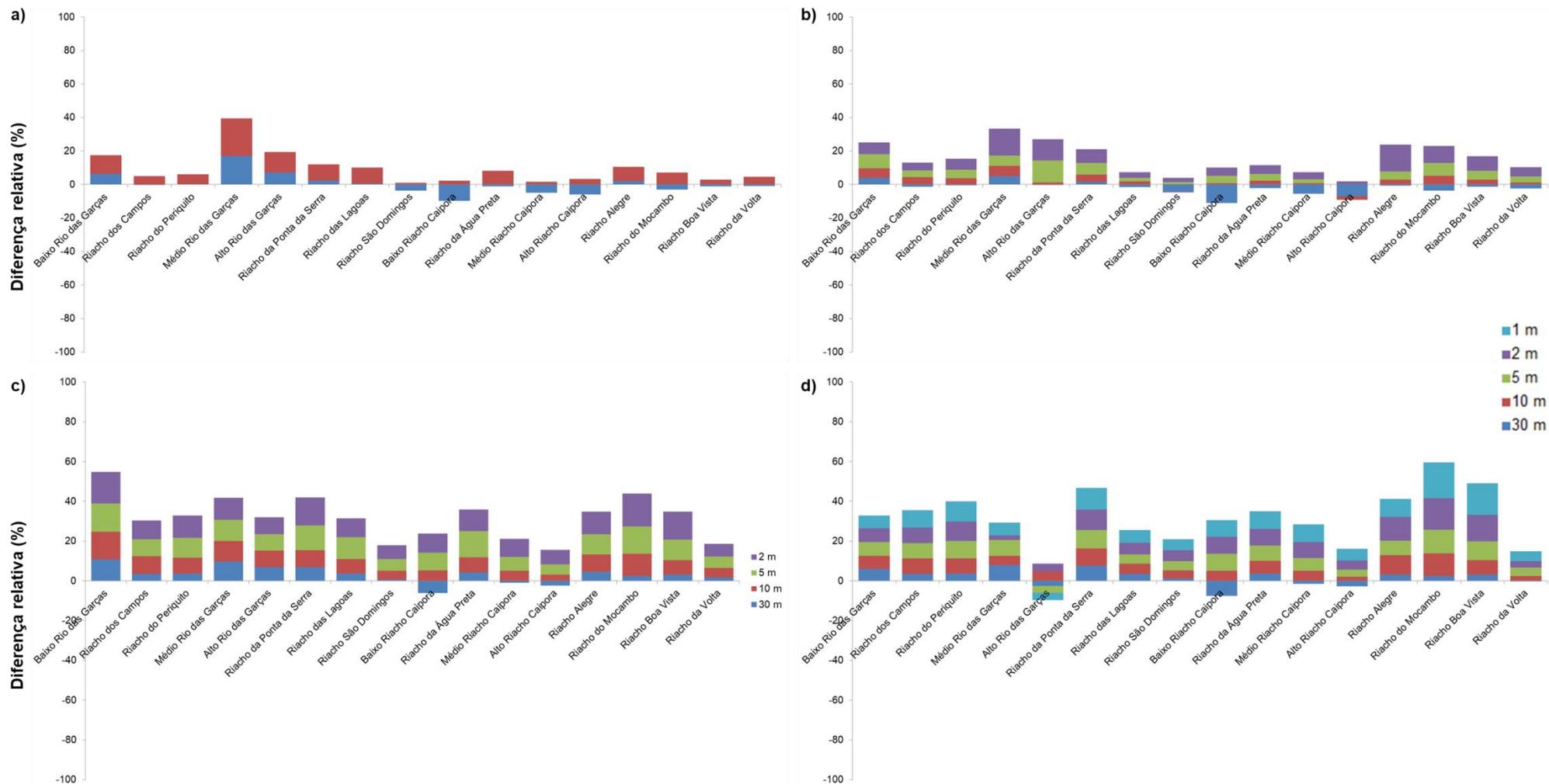


Figura 59 - Análise da diferença relativa entre os comprimentos das redes de drenagens dos trechos da bacia do Rio das Garças, obtidas através do MDT LiDAR original de 1 m reamostrado para a resolução de 2, 5, 10 e 30 m, processado pelo TerrSet (a); ArcMap (b); RichDEM (c); e SAGA (d), em relação à rede de referência digitalizada.

4.4.4 Áreas acumuladas de drenagem

As Figuras 60 e 61 apresentam os gráficos da análise comparativa entre as áreas de drenagem para cada método, em todas as resoluções, tendo como referência a área de drenagem obtida na mais alta resolução espacial processada pelo método em análise. Por exemplo, os resultados de áreas de drenagem obtidos pelo SAGA na resolução de 1m são os de referência para as demais resoluções obtidas com esse mesmo algoritmo. Porém, para o TerrSet, por exemplo, como apenas as redes nas resoluções de 10 e 30 m foram possíveis de serem determinadas, a rede na resolução de 10 m é tomada como referência para a rede de 30 m. Dessa forma, mantém-se em cada análise um mesmo algoritmo, eliminando o fator mudança de algoritmo.

Observando os gráficos das figuras mencionadas, é possível afirmar que os resultados são praticamente sobrepostos ao de referência, isto é, valores praticamente iguais nas resoluções degradadas em relação à resolução mais fina em cada caso. Por exemplo, para a bacia do Rio das Garças a maior diferença encontrada foi para o método do SAGA para o trecho do médio curso do Rio das Garças, nas resoluções de 2 e 10 m com valor de 0,97% e 0,98%, respectivamente. Essa diferença pode estar relacionada ao deslocamento espacial do ponto de confluência entre os trechos de drenagem. A comparação direta dos valores de área de drenagem não garante que os traçados das redes sejam coincidentes e nem mesmo que a delimitação das áreas de drenagem sejam as mesmas, pois pode haver compensação de erros.

Em síntese, estes resultados evidenciam que as mudanças de resolução espacial trabalhadas acarretam em diferenças desprezíveis de áreas de drenagem, independente do algoritmo utilizado para processamento do MDT, em ambas as bacias de estudo. Isso tem explicação pela relativa maior facilidade em acertar o valor de área de drenagem entre resoluções, já que diferenças de traçados da rede e até da delimitação em si das bacias contribuintes podem ter efeito compensador e resultar no mesmo valor de área (Sousa e Paz, 2017). Por exemplo, porções da bacia serem omitidas em uma região e outras porções serem erroneamente incluídas, mas numericamente o valor final da área permanece similar ao de referência.

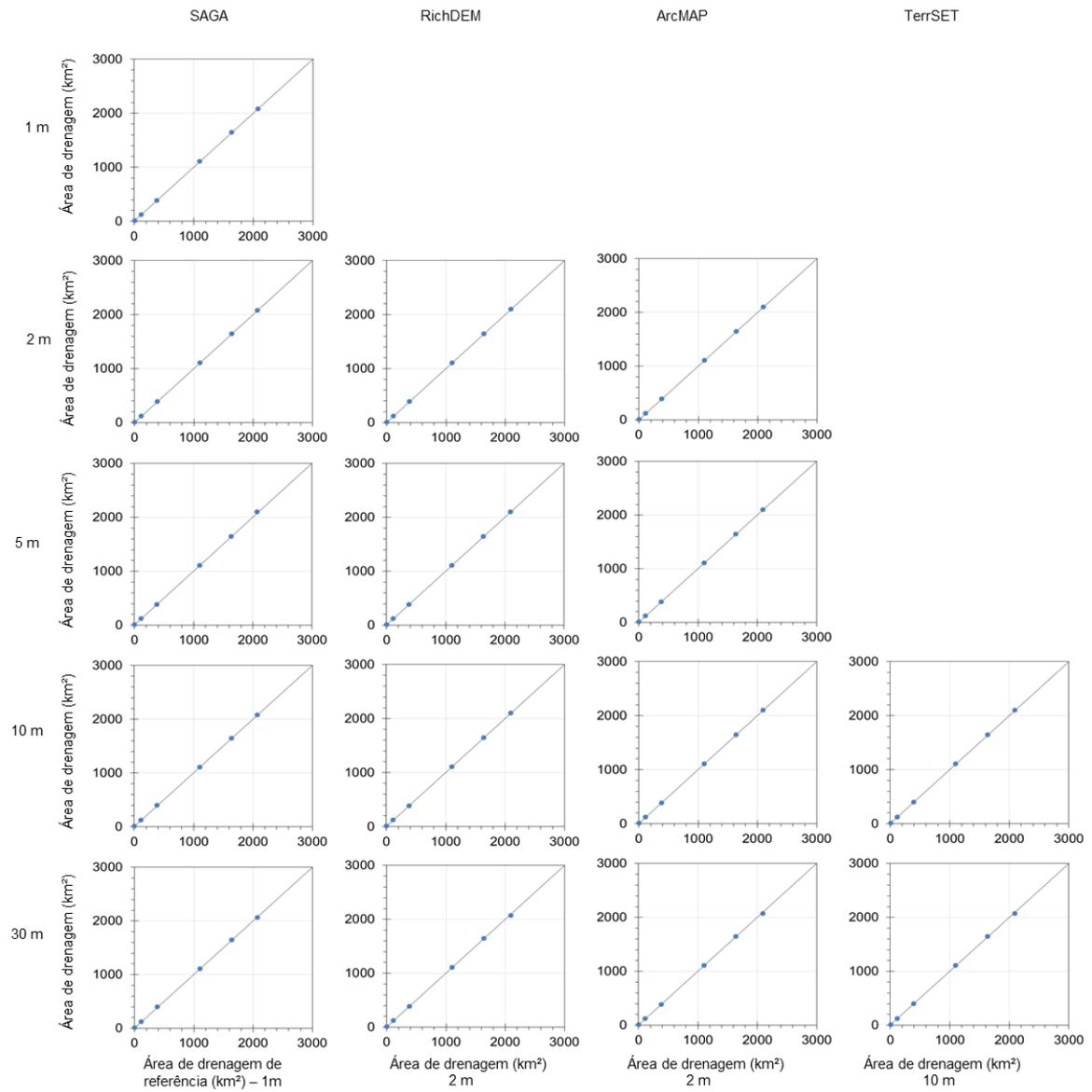


Figura 60 - Análise áreas de drenagem de trechos do rio principal da bacia do rio Sirinhaém, tendo como referência a área de drenagem para a maior resolução espacial processada em cada algoritmo.

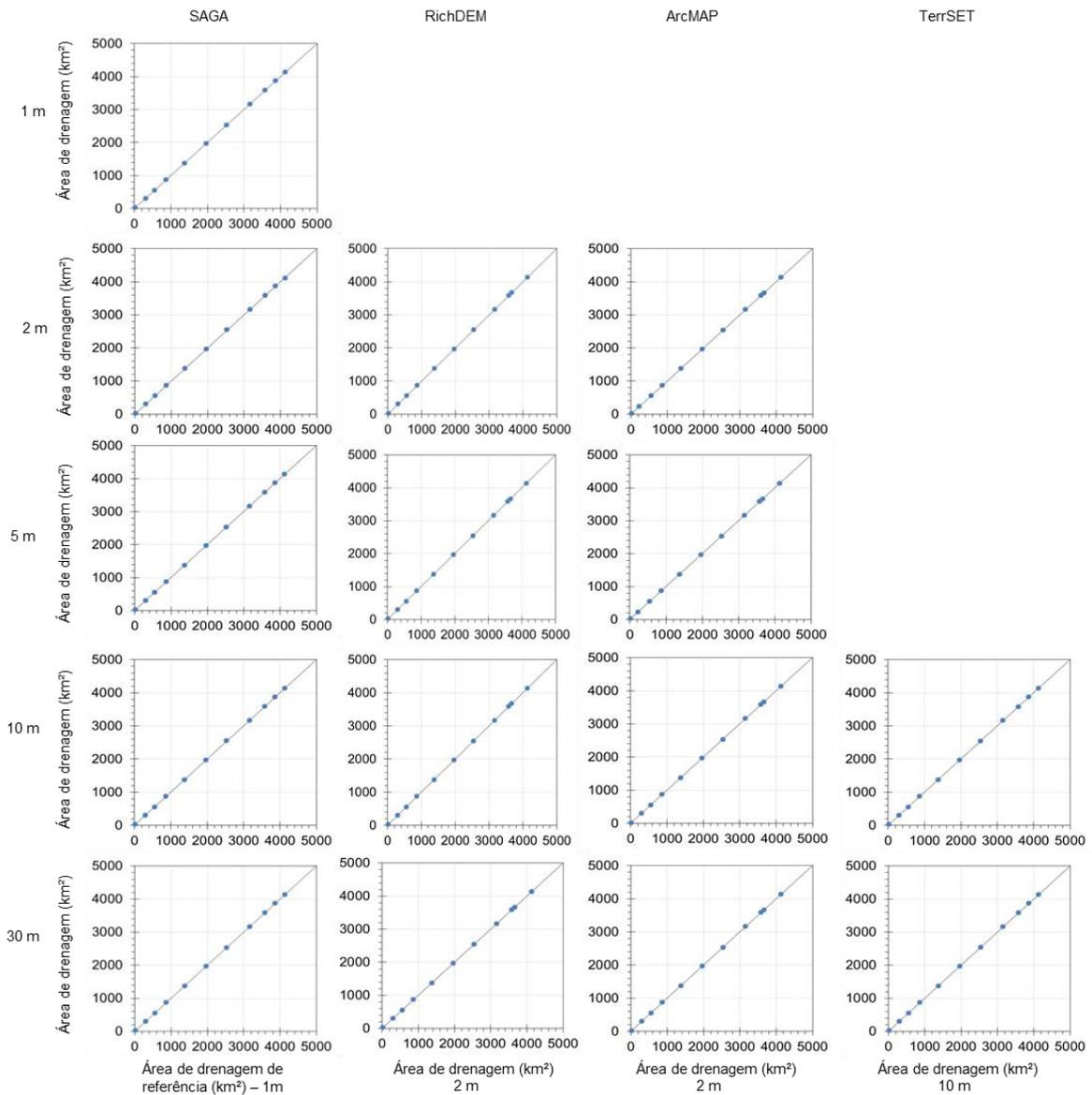


Figura 61 – Análise áreas de drenagem de trechos do rio principal da Bacia do rio das Garças, tendo como referência a área de drenagem para a maior resolução espacial processada em cada algoritmo.

4.5 ANÁLISE DO *UPSCALING* DE DIREÇÕES DE FLUXO A PARTIR DO MDT LIDAR

4.5.1 Análise tendo como referência a rede digitalizada

4.5.1.1 Percentual dentro do buffer

Aa Figura 62– a e b apresentam os resultados desta análise para o Rio Sirinhaém e Rio das Garças, respectivamente. Pode-se afirmar que tanto a abordagem de reamostragem do MDT quanto o procedimento de *upscaling* de direções de fluxo do dado LiDAR original de 1 m apresentaram um resultado superior em relação ao processamento utilizando os dados do SRTM (conforme análise realizada no item 4.3, para esses mesmos trechos de rio), independente do algoritmo utilizado para processamento do MDT reamostrado. Entretanto, segundo os resultados da referida figura, tendo como rede de referência a rede digitalizada, o *upscaling* não se destacou em relação à reamostragem, ou seja, as porcentagens dentro do *buffer* obtidas para a rede gerada pelo *upscaling* não tiveram um padrão de melhoria em relação às porcentagens obtidas das redes derivadas do MDT reamostrado.

Nota-se que para o Rio Sirinhaém os resultados obtidos pelo processamento com o SAGA do MDT reamostrado e pelo *upscaling* apresentaram valores com diferenças consideráveis em relação aos outros métodos, cujos resultados foram relativamente mais próximos entre si. Tal fato pode ser explicado analisando a Figura 63. Observa-se que para os trechos que o SAGA apresentou um percentual de sobreposição menor, isso ocorreu por grandes desvios da rede de drenagem em relação à rede de referência. Esses trechos são ilustrados pelo trecho A gerado pelo algoritmo do SAGA na Figura 63-a, quando deveria ser o traçado similar ao trecho indicado por a, como os demais algoritmos. Analogamente, tem-se o trecho B versus b e o trecho C versus c nas Figuras 63-b e -c, respectivamente. Pela configuração espacial observada e por serem trechos de cabeceira da rede, pode ter havido efeito de diferença de área acumulada de drenagem entre dois braços de rios (por exemplo, que corriam conforme A e a na Figura 63-a), mas que pelo processamento do SAGA o resultado foi que o curso do rio principal seguiu por A enquanto pelos demais o curso principal foi identificado como sendo o traçado a.

Já para os resultados do procedimento de *upscaling*, os trechos de não sobreposição ao *buffer* do *upscaling* também ocorreram por desvios da rede de drenagem, porém foram desvios mais localizados e pontuais, mas seguindo um mesmo padrão geral dos traçados obtidos pela abordagem de reamostragem do MDT. Por exemplo, têm-se os pontos D e E indicados na Figura 63–d e os pontos F, G, H e I na Figura 63–e.



Figura 62 – *Percentual dentro do buffer* utilizando os dados LiDAR de 1 m reamostrados para 30 m e processados por diferentes algoritmos e o *upsaling* de direções de fluxo do dado LiDAR de 1 m para a resolução de 30 m, analisados tendo como referência a rede de drenagem digitalizada: (a) bacia do Rio Sirinhaém; (b) bacia do Rio das Garças.

Cabe ressaltar que a métrica percentagem dentro do *buffer* é considerada uma forma de avaliar o traçado em si entre duas redes de drenagem, mas ela não quantifica o grau ou intensidade da discordância quando o traçado em análise está fora do *buffer* da rede de referência (SOUSA; PAZ, 2017). Se um trecho de rio está fora do *buffer*, porém muito próximo a ele ou se ele está fora do *buffer* e muito deslocado espacialmente, o resultado para a quantificação da métrica é o mesmo. Essa desvantagem dessa métrica ajuda a entender como os desvios mais discrepantes obtidos na rede derivada pelo SAGA a partir do MDT reamostrado resultaram em percentuais dentro do *buffer* muito próximos da rede obtida pelo *upsampling*, com desvios claramente menos deslocados espacialmente.

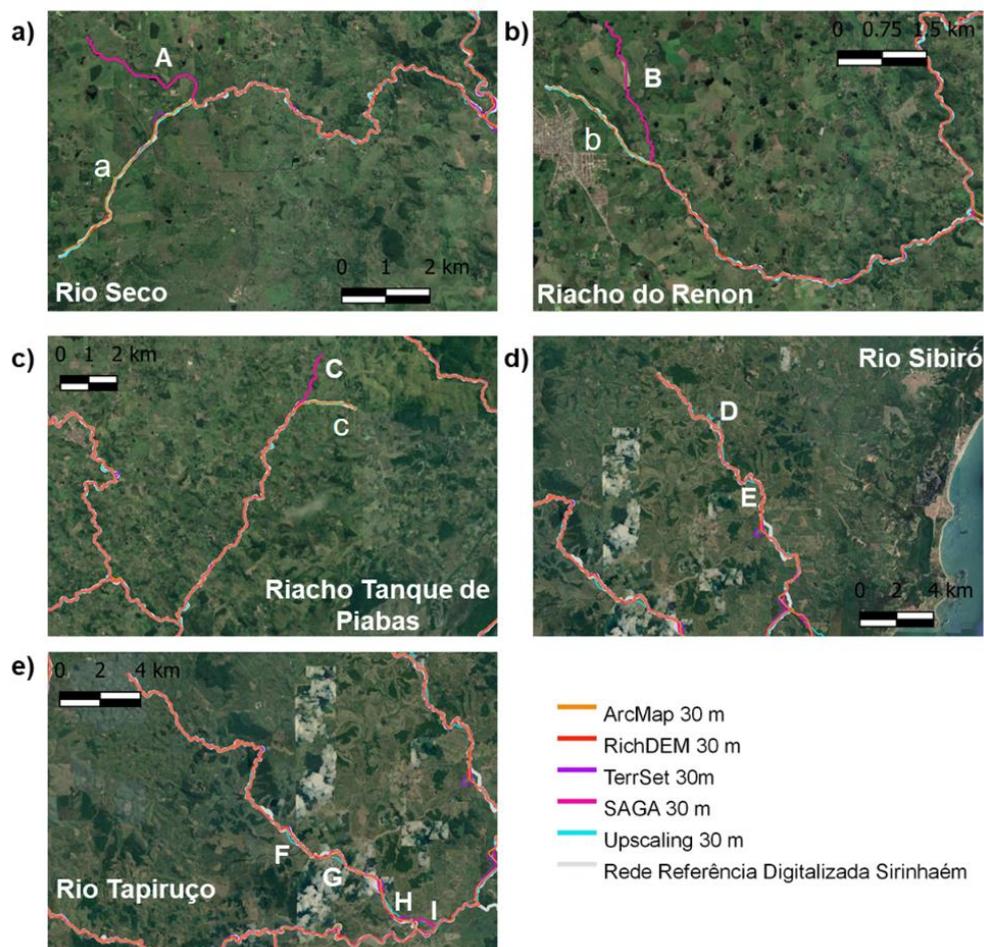


Figura 63 – Trechos de rios da bacia do Rio Sirinhaém que a drenagem obtida pelo MDT LiDAR reamostrado para 30 m apresentou diferenças significativas entre a rede de drenagem de referência digitalizada. (a) Trecho do Rio Seco; (a) Trecho do Rio Seco; (b) Trecho do Riacho do Renon; (c) Trecho do Riacho Tanque de Piabas; (d) Trecho do Rio Tapiruço.

Pode-se afirmar que os resultados obtidos pelos outros métodos (ArcMap, TerrSet e RichDEM) foram equivalentes para a análise de percentual dentro do *buffer* para o Rio Sirinhaém. Para o Rio das Garças, destacam-se alguns trechos, como o Médio Rio das Garças, para o qual todos os métodos apresentaram baixo percentual de sobreposição. É possível notar a falta de sobreposição nesse caso principalmente nas regiões próximas aos pontos A, B e C da Figura 64–a. Outro exemplo é o Alto Rio das Garças, para o qual também ocorreu baixa sobreposição, com destaque para o TerrSet, que obteve um valor mais alto, explicado pelas análises dos pontos G e F da Figura 64– b.

Além disso, o valor baixo de percentual dentro do *buffer* obtido pelo método de *upscaling* pode ser analisado através das regiões próximas aos pontos D e E da Figura 64– b. As observações para o Alto Rio das Garças são as mesmas para o Riacho das Lagoas, e podem ser analisadas através dos pontos H e I da Figura 64–c. Já para o Riacho São Domingos o *upscaling* apresentou o valor mais alto de sobreposição e isso pode ser analisado principalmente observando os pontos J e K da Figura 64–d. Por fim, o Riacho Alegre apresentou valores similares para todos os métodos, com um valor mais alto para o TerrSet. Essa diferença entre os valores de sobreposição se deve em grande parte pela região próxima ao ponto L da Figura 64–e.

4.5.1.2 Comprimentos de rio

As Figuras 65–a e b apresentam os gráficos de análise da diferença relativa entre os comprimentos dos trechos de rios extraídos a partir do MDT LiDAR reamostrado para a resolução de 30 m, por diferentes algoritmos, e para a drenagem obtida através do *upscaling* de direções de fluxo do MDT LiDAR de 1 m para 30 m, relativamente aos comprimentos dos trechos de referência da drenagem digitalizada. Observa-se que as diferenças relativas de forma geral para a bacia do Rio das Garças foi menor que em relação às diferenças da bacia do Rio Sirinhaém.

De forma geral, para todos os métodos ocorreram mais trechos subestimados para a bacia do Rio Sirinhaém e mais trechos superestimados para a bacia do Rio das Garças, ou seja, o padrão de resultados de comprimentos de rio quando comparados à rede digitalizada se repetiu para as redes do MDT reamostrado e do *upscaling*, mantendo o padrão já identificado nas análises anteriores. Devido à resolução espacial é esperado que ocorra uma subestimação do comprimento da drenagem, o que ocorreu para todos os trechos da

bacia do Rio Sirinhaém, exceto para a Foz do Rio Sirinhaém por se tratar de um estuário com grandes área alagadas com efeito da maré, e para o Córrego Lava Mão, porém este apresenta valores baixos de discrepância para todos os métodos. O oposto ocorreu para a maioria dos trechos da Bacia do Rio das Garças, que apresentou mais trechos superestimados. Tal fato pode ser explicado pela dimensão da calha dos trechos dessa bacia e pelo fato do rio ser intermitente, o que faz com que o efeito de sinuosidade artificial esteja presente mesmo para dados com baixa resolução espacial.

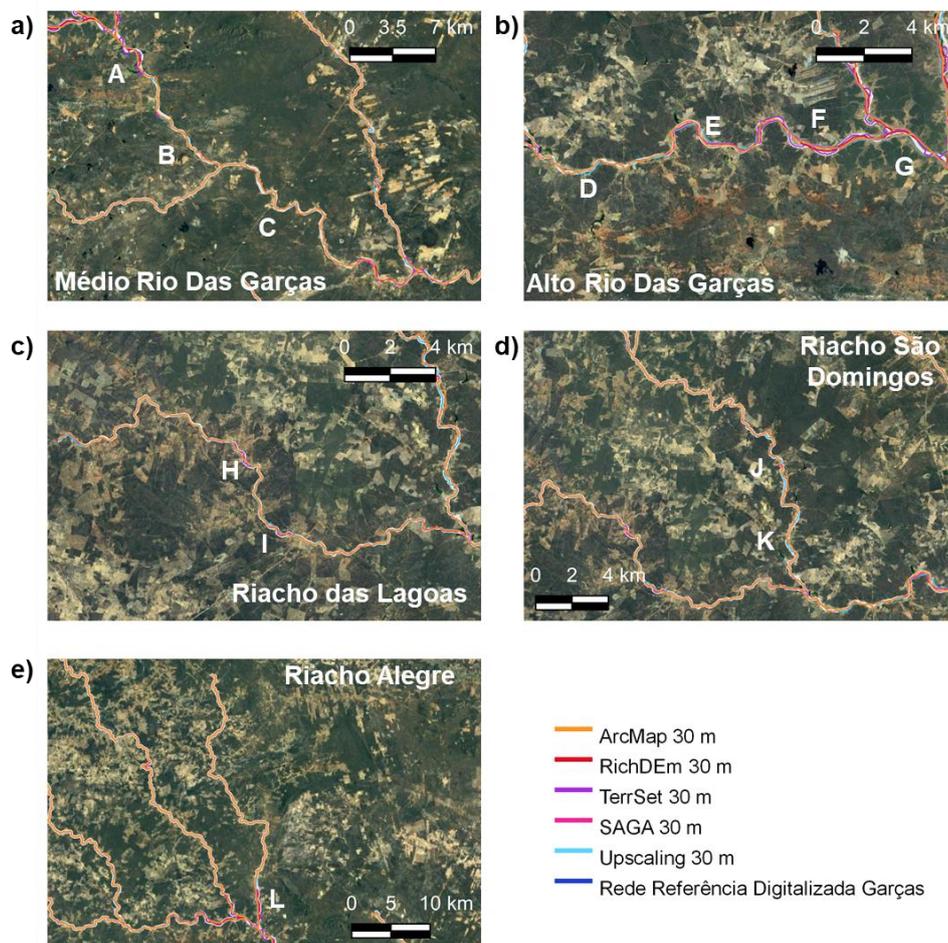


Figura 64 - Trechos de rios da bacia do Rio das Garças que a drenagem obtida pelo MDT LiDAR reamostrado para 30 m apresentou diferenças significativas entre a rede de drenagem de referência digitalizada. (a) Trecho do curso médio do Rio das Garças; (b) Trecho do curso alto do Rio das Garças; (c) Trecho do Riacho das Lagoas; (d) Trecho do Riacho São Domingos; (e) Trecho do Riacho Alegre.

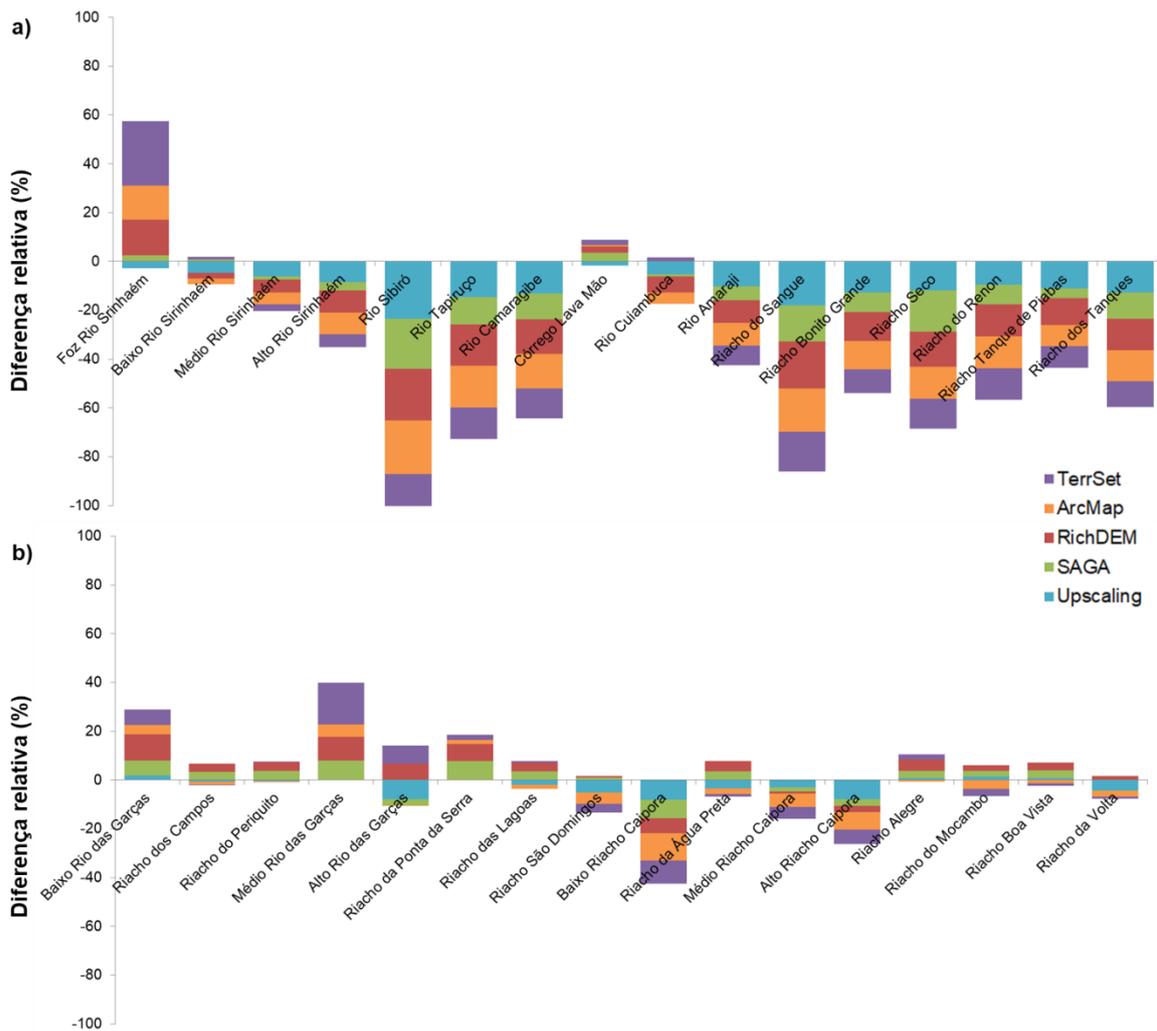


Figura 65 – Análise da diferença relativa entre os comprimentos das redes de drenagens dos trechos da bacia do Rio Sirinhaém (a) e da bacia do Rio das Garças (b), obtidas através do MDT LiDAR original de 1 m reamostrado para a resolução de 30 m, processado pelos algoritmos analisados, e para a rede de drenagem obtida através do *upscaling* de direções de fluxo do MDT LiDAR de 1 m para 30 m, em relação à rede de referência digitalizada.

4.5.2 Análise tendo como referência a rede derivada do MDT LiDAR 1 m

4.5.2.1 Percentual dentro do buffer

A Figura 66 apresenta os resultados para o Rio Sirinhaém e Rio das Garças (Figuras 66–a e Figura 66–b, respectivamente). Para esta análise, o *upscaling* apresentou um resultado bastante satisfatório para as duas bacias, com valores de percentagem dentro do *buffer* sistematicamente superiores aos obtidos pela reamostragem do MDT. Destaca-se a

bacia do Rio das Garças, onde todos os trechos possuem valores de sobreposição superiores a 96,5%. Na Figura 67 observa-se, por exemplo, o trecho do Alto Rio das Garças. Nesse caso, as redes obtidas da reamostragem do MDT por todos os métodos apresentaram baixa sobreposição ao *buffer* da rede de referência e visivelmente se percebe o equívoco em partes do traçado, se distanciando do traçado de referência. Por outro lado, a rede obtida com a abordagem de *upscaling* das direções de fluxo conseguiu sistematicamente seguir próximo ao traçado de referência, em distanciamento espacial inferior ao *buffer* estipulado como tolerância aceitável.

Já para a bacia do Rio Sirinhaém, os menores percentuais de sobreposição da rede de drenagem do *upscaling* foram a Foz do Rio Sirinhaém 89,8%, por motivos já explorados, e o Rio Sibiró com 88,2% de sobreposição, que deságua na Foz do Rio Sirinhaém e por esse motivo também é impactado pela dificuldade de extração da rede de drenagem nessa região.

Em síntese, tem-se que por esta forma de avaliação da qualidade da drenagem, a rede obtida pelo *upscaling* foi consideravelmente com traçado mais próximo ao traçado da rede derivada do MDT LiDAR 1 m do que o traçado obtido pela reamostragem do MDT com qualquer algoritmo. Esse resultado contrasta com a análise do item 4.5.1, que teve como referência a rede de drenagem digitalizada, mas de forma coerente. O propósito do *upscaling* é produzir uma rede de drenagem resolução degradada que siga o mais fielmente possível os padrões da drenagem mais fina tomada como informação de entrada. Então os resultados obtidos evidenciaram que isso foi plenamente alcançado, mas que não teria como o traçado da rede gerada pelo *upscaling* se aproximar da rede digitalizada se há as discordâncias que já foram discutidas entre a rede digitalizada e a rede derivada do MDT LiDAR 1 m.

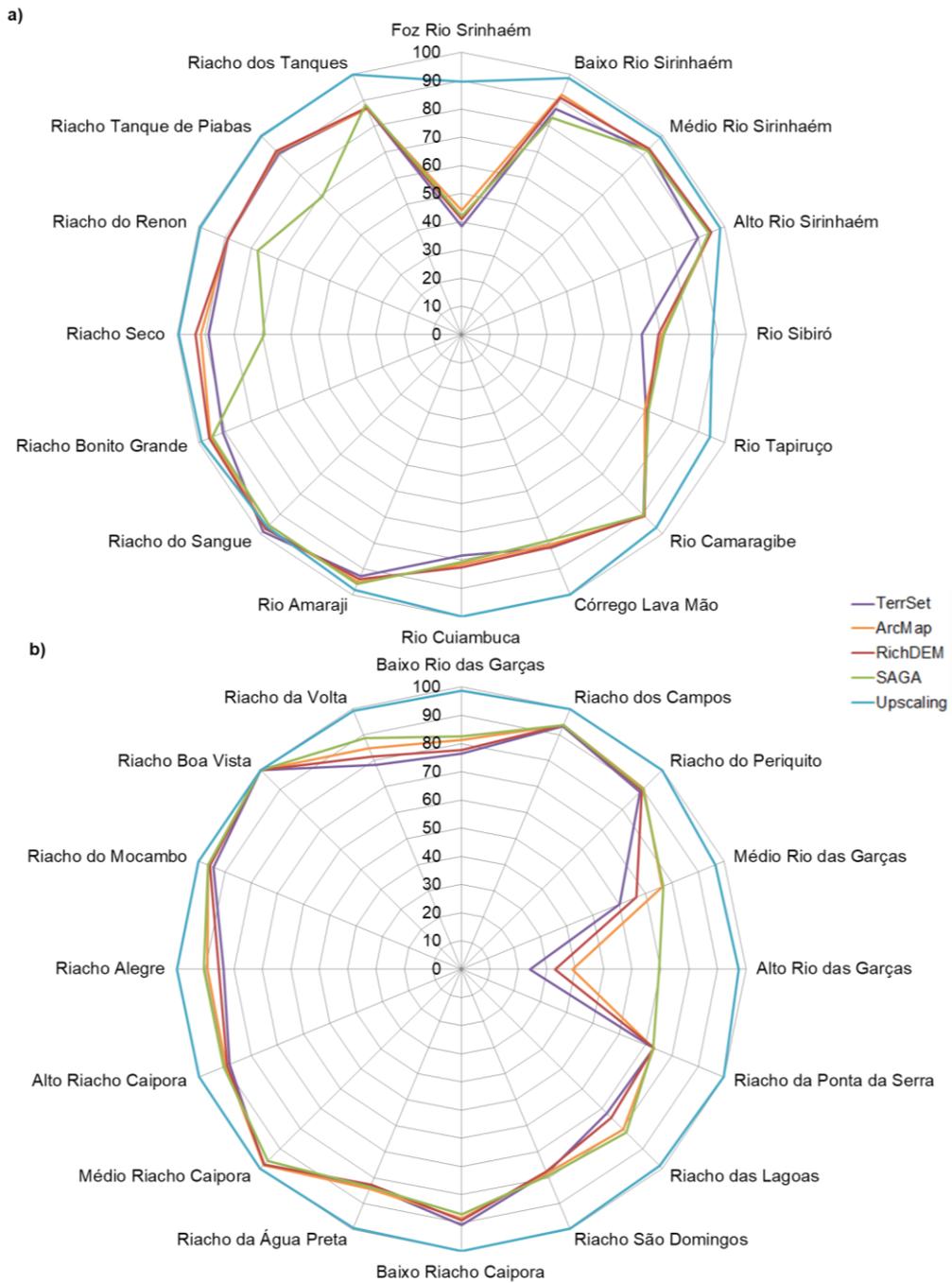


Figura 66 - *Percentual dentro do buffer* utilizando os dados LiDAR de 1 m reamostrados para 30 m e processados por diferentes algoritmos e o *upscaling* de direções de fluxo do dado LiDAR de 1 m para a resolução de 30 m, analisados tendo como referência a rede derivada do MDT LiDAR de 1 m. (a) Para a bacia do Rio Sirinhaém e (b) do Rio das Garças.

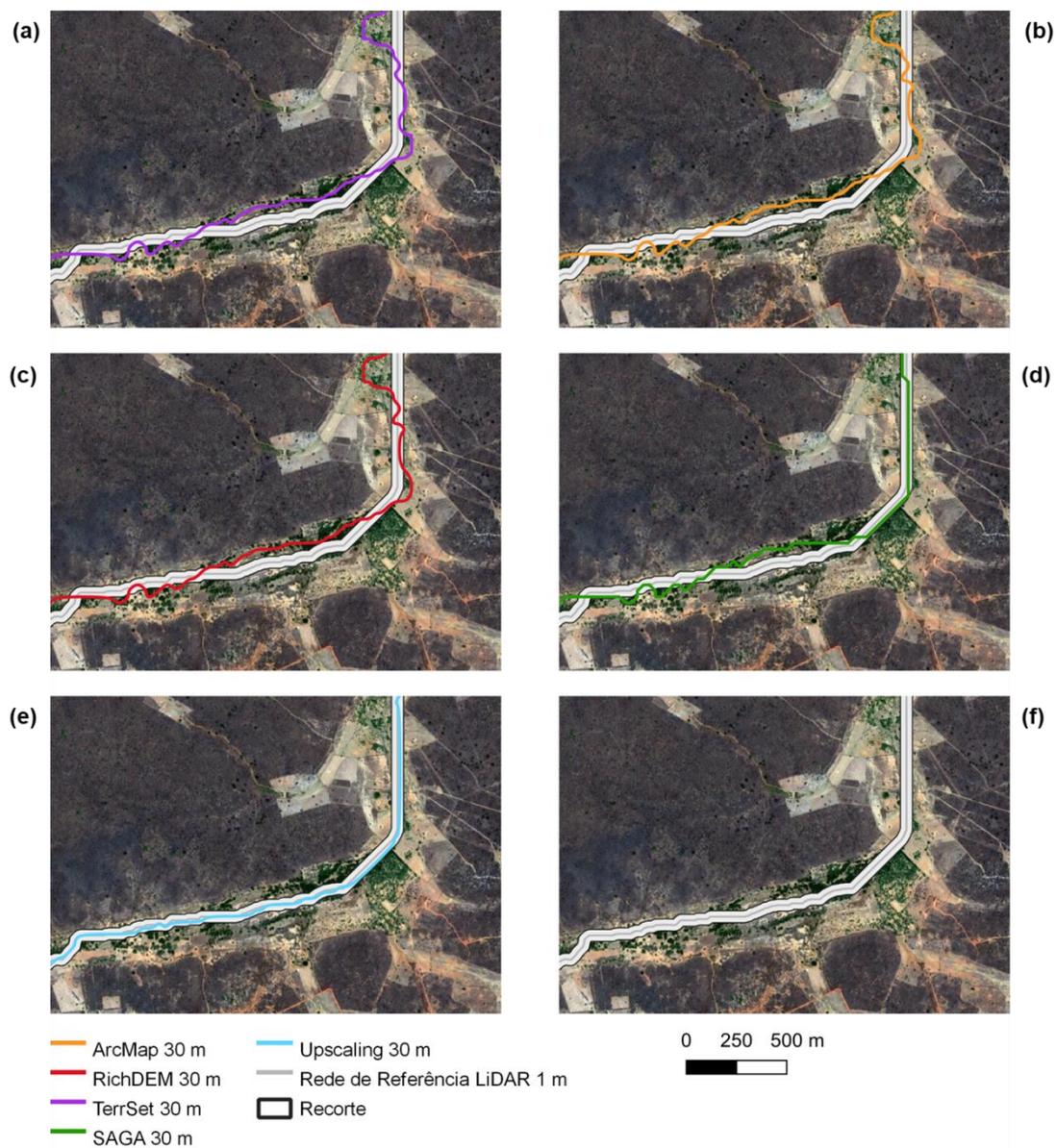


Figura 67 – Trecho do alto curso do Rio das Garças como exemplo de região com grande percentual dentro do *buffer* entre a rede de referência obtida através da extração automática da rede de drenagem através do SAGA GIS utilizando os dados MDT LiDAR de 1m e a rede de drenagem proveniente do *upscaling* de direções de fluxo do MDT LiDAR de 1 m para 30 m.

4.5.2.2 *Comprimentos de rio*

As Figuras 68–a e b apresentam os resultados para análise da diferença relativa entre os comprimentos dos trechos para a bacia do Rio Sirinhaém e do Rio das Garças, respectivamente, em relação à rede de referência MDT LiDAR 1 m, processada pelo SAGA. O resultado apresentado por essa análise é bastante diferente do resultado apresentado pela mesma análise tendo como referência a rede digitalizada. A rede derivada do *upsampling* subestimou o comprimento de todos os trechos para as duas bacias. Isto é coerente, considerando a resolução espacial de 30 m desse dado e a rede de referência ter sido obtida através de MDT LiDAR com 1 m de resolução espacial. Esse resultado segue o padrão descrito na literatura de que, ao degradar a resolução espacial, as redes de drenagem tendem a encurtar distâncias pela menor capacidade de representar os meandros do rio, dado o maior tamanho do pixel (PAZ et al., 2008). Quanto aos resultados obtidos pelo procedimento de reamostragem do MDT, para as duas bacias o SAGA obteve as menores diferenças em relação à rede de referência, para todos os trechos. Isso também é coerente já que, nesse caso, a rede de referência obtida com 1m de resolução foi gerada com esse mesmo algoritmo SAGA, então naturalmente se espera maior concordância entre as redes de 30 e 1m com esse algoritmo.

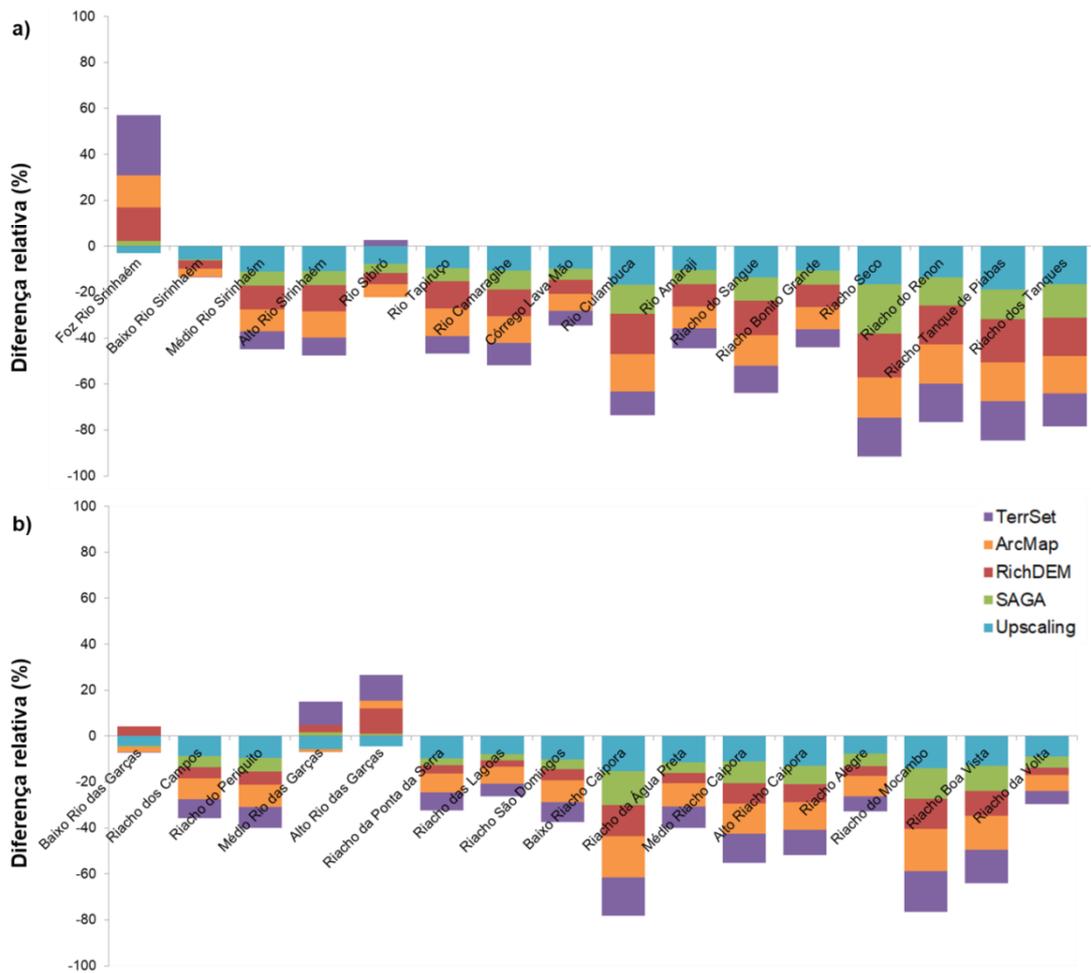


Figura 68 - Análise da diferença relativa entre os comprimentos das redes de drenagens dos trechos da bacia do Rio Sirinhaém (a) e da bacia do Rio das Garças (b), obtidas através do MDT LiDAR original de 1 m reamostrado para a resolução de 30 m, processado pelos algoritmos analisados, e para a rede de drenagem obtida através do *upsampling* de direções de fluxo do MDT LiDAR de 1 m para 30 m, em relação à rede de referência derivada do MDT LiDAR 1 m.

4.5.2.3 Áreas de drenagem

As áreas de drenagens obtidas tanto pelo *upsampling* de direções de fluxo quanto pela reamostragem do MDT com todos os algoritmos apresentaram valores muito próximos aos de referência, gerados a partir da rede derivada do MDT LiDAR 1 m processada pelo SAGA. Isso ocorreu para ambas às bacias de estudo (Figura 69 e Figura 70) e novamente ressalta como a mudança de resolução espacial, independente da abordagem ou algoritmo, repercute em diferenças desprezíveis em termos do total de área de drenagem.

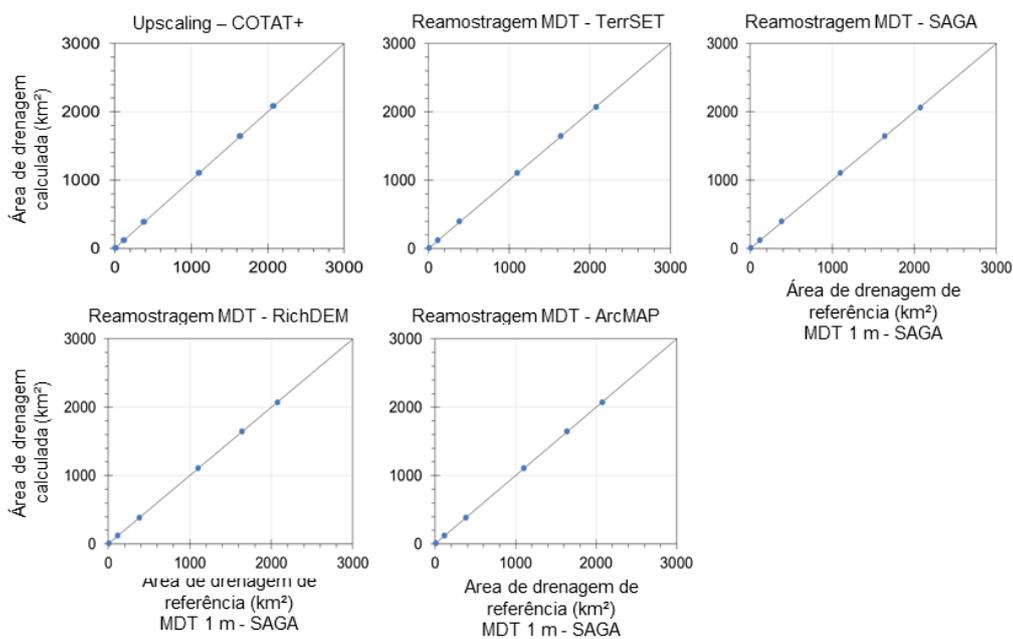


Figura 69 - Análise áreas acumuladas de drenagem tendo como referência a área acumulada de drenagem obtida através do LiDAR 1m processada pelo SAGA GIS para a bacia do Rio Sirinhaém.

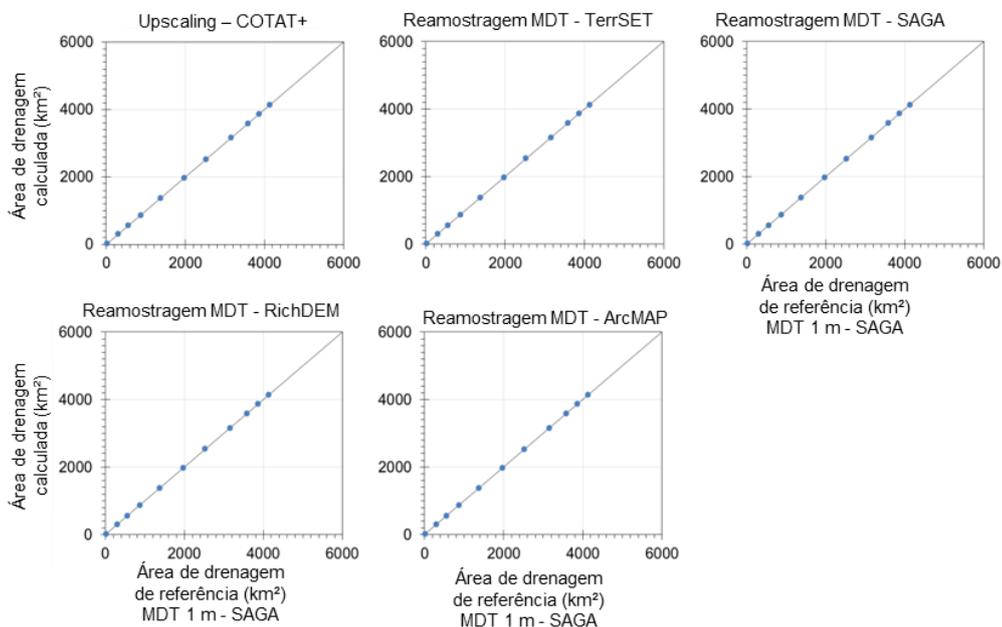


Figura 70 - Análise áreas acumuladas de drenagem tendo como referência a área acumulada de drenagem obtida através do LiDAR 1m processada pelo SAGA GIS para a bacia do Rio das Garças.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

O custo computacional de armazenamento diminuiu expressivamente para as resoluções espaciais menores que a original do MDT LiDAR (1 m). Mesmo para resolução de 2 m, redução de 75% do espaço de armazenamento. A possibilidade de se utilizar dados para resolução espacial de 2 m ou menores impacta de forma substancial no custo de armazenamento dos dados MDT LiDAR.

Já em relação ao custo de processamento, todos os métodos analisados foram capazes de processar todas as etapas da extração automática da rede de drenagem ao utilizar dados na resolução espacial de 10 m (para as duas bacias, utilizando o *desktop* ou a *workstation*). Já para os dados na resolução espacial de 5 m, apenas o TerrSet não foi capaz de executar os métodos de remoção de depressão e cálculo de áreas acumuladas de drenagem (para as duas bacias, utilizando o *desktop* ou a *workstation*). Isto é, tendo em vista que os resultados apresentados pelas análises realizadas e que estes resultados foram aproximados para as resoluções espaciais de 1 a 10 m, caso seja possível utilizar as menores resoluções espaciais, o custo computacional não será um fator limitante.

Considerando apenas os métodos de alto desempenho, pode-se afirmar que a resolução espacial de 2 m apresenta um baixo custo computacional, mesmo utilizando o *desktop*, ou seja, caso a perda na qualidade da rede de drenagem extraída com as resoluções menores seja desprezível, o uso dos dados nessas resoluções permite que sejam processados utilizando a maioria dos métodos e sem depender de uma infraestrutura computacional com maior poder de processamento.

O uso dos dados SRTM para a bacia do Rio Sirinhaém apresentou uma grande descontinuidade na rede de drenagem. Esse fato sugere que dependendo da região de interesse, esses dados podem requerer outros tratamentos que não foram necessários para o MDT LiDAR. Além disso, ressalta-se que a resolução espacial e a precisão desses dados podem causar outros tipos de dificuldades ao se obter a rede de drenagem. Para todos os métodos avaliados, as redes de drenagem obtidas a partir do SRTM apresentaram traçados com comprimentos menores do que os comprimentos esperados medidos nos trechos das redes de referência, em ambas as bacias. De forma geral, os dados SRTM apresentaram resultados piores, para as análises realizadas por esta pesquisa, em relação aos resultados

obtidos através do MDT LiDAR. Além disso, a qualidade da rede MDT LiDAR 30 m é melhor do que a rede SRTM 30 m. O TerrSet e o RichDEM obtiveram uma vantagem pequena, porém perceptível, em relação aos demais, na extração da rede de drenagem das duas bacias, segundo a métrica percentagem dentro *buffer*. Dentre esses dois métodos, o TerrSet foi o que obteve os maiores valores dessa métrica em determinados trechos para as duas bacias, corroborando estudo de Buarque et al. (2009) e Siqueira et al. (2016) que atestam a qualidade da rede de drenagem derivada por esse algoritmo.

A obtenção da rede de drenagem através do MDT LiDAR com resolução espacial de 1 m, utilizando para todas as etapas algoritmos de uma única solução, só foi possível através do SAGA GIS. Ainda assim, o custo de armazenamento e de processamento desse dado é bastante elevado utilizando essa solução computacional. Caso seja possível utilizar os métodos paralelos do RichDEM, o custo de processamento diminui consideravelmente. Porém ainda é de até 2 horas e 30 min (tempo necessário para remoção das depressões e cálculo de área acumulada de drenagem para a bacia do Rio das Garças, utilizando o *desktop*). Pode-se afirmar que o custo de armazenamento e processamento desse dado é elevado e em relação à rede de referência digitalizada apresenta resultados, para grande parte das análises realizadas, aproximados aos obtidos pelas resoluções espaciais de 2, 5 e 10 m.

O uso de dados com alta resolução espacial para a extração automática de rede de drenagem de rios intermitentes e com calha do rio maior que a dimensão do pixel causa uma superestimação dos comprimentos de drenagem. O nível de detalhamento é tão grande e o fato do leito do rio estar seco, provoca um efeito de zig zag, fazendo com que o comprimento da drenagem obtido seja muito maior do que o real. O comprimento da rede de drenagem impacta diretamente no cálculo no tempo de escoamento, onda de cheia, predição de eventos hidrológicos e gestão desses eventos.

O *upscaling* de direções de fluxo apresentou dados relevantes, altas taxas de sobreposição ao *buffer* da rede de referência derivada do MDT LiDAR 1 m. A rede de drenagem obtida por essa abordagem foi consideravelmente o traçado mais próximo ao traçado da rede derivada do MDT LiDAR 1 m do que o traçado obtido pela reamostragem do MDT com qualquer algoritmo. Esse resultado contrasta com a análise que teve como referência a rede de drenagem digitalizada, mas de forma coerente. O propósito do *upscaling* é produzir uma rede de drenagem com resolução degradada que siga o mais fielmente possível os padrões da drenagem mais fina tomada como informação de entrada.

Então os resultados obtidos evidenciaram que isso foi plenamente alcançado, mas que não teria como o traçado da rede gerada pelo *upscaling* se aproximar da rede digitalizada se há discordâncias entre a rede digitalizada e a rede derivada do MDT LiDAR 1 m.

Devido à falta de dados de referência de áreas de drenagem, as análises realizadas para esse dado apresentaram diferenças desprezíveis. O que sugere que os métodos, apesar de apresentarem redes de drenagens distintas, apresentam áreas de drenagens com valores muito próximos. Tal fato pode ser explicado pela compensação das áreas calculadas. Apesar das drenagens não seguirem caminhos de fluxo iguais, uma estar deslocada em relação à outra, extraída por outro método, as áreas de contribuições identificadas pelos métodos são praticamente as mesmas.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Analisar o custo computacional de outros algoritmos de alto desempenho de remoção de depressões e cálculo de áreas acumuladas de drenagem. Dentre os métodos a serem avaliados, recomenda-se a análise dos métodos presentes no TerraHidro. Além disso, também é pertinente avaliar o custo computacional de processamento dos dados em diferentes resoluções espaciais, porém utilizar dados com a mesma quantidade de pixels em todas as resoluções.

Dependendo da análise a ser feita através de MDE, outros atributos topográficos são relevantes. Por esse motivo, também é interessante que sejam avaliados os o efeito da mudança da resolução espacial para esses outros atributos como a declividade, por exemplo.

A partir dos resultados obtidos por esta pesquisa, justificam-se outras análises que permitam afirmar que a extração de redes de drenagem a partir de dados com resolução espacial de 5 ou 10 m, obtidas através do *upscaling* de direções de fluxo são preferíveis em comparação ao uso do dado original. Realizar o *upscaling* para outras resoluções espaciais, além da de 30 m e avaliar valores de parâmetros ótimos para o *upscaling* de direções de fluxo.

O custo de processamento elevado do *upscaling* de direções de fluxo COTAT+ para as duas bacias, principalmente para a bacia do Rio das Garças, se deve ao fato do processamento ser realizado célula a célula. Essa estratégia permite que o método seja processado em qualquer máquina. Porém, analisando os resultados, observou-se que o

custo de processamento poderia ter sido ainda mais reduzido, em relação ao processamento sequencial, caso seja utilizado o processamento em blocos. Ao invés de processar uma única célula em um núcleo de processamento, utilizar o processamento paralelo de blocos de células poderia reduzir o tempo de execução do método. As dimensões dos blocos poderiam ser ajustadas de acordo com as características da área de estudo e das dimensões da célula para que esse novo método também possa ser processado em qualquer infraestrutura computacional.

Analisar a qualidade posicional do PE3D e ampliar o acesso de usuários aos dados do PE3D com a disponibilidade da rede de drenagem em diferentes resoluções espaciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALJUMAILY, H. et al. Voxel Change: Big Data–Based Change Detection for Aerial Urban LiDAR of Unequal Densities. **Journal of Surveying Engineering**, v. 147, n. 4, p. 04021023, nov. 2021.

AMARAL, F. E. DO; CIRILO, J. A.; RIBEIRO NETO, A. Uso de técnicas de geoprocessamento na otimização do traçado de sistemas adutores de abastecimento de água com a utilização de uma base de dados de alta definição. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 381–391, mar. 2020.

ARIZA-VILLAVARDE, A. B.; JIMÉNEZ-HORNERO, F. J.; GUTIÉRREZ DE RAVÉ, E. Influence of DEM resolution on drainage network extraction: A multifractal analysis. **Geomorphology**, v. 241, p. 243–254, jul. 2015.

ARORA, V. K.; BOER, G. J. A variable velocity flow routing algorithm for GCMs. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 104, n. D24, p. 30965–30979, 1999.

ARORA, V. K.; HARRISON, S. Upscaling river networks for use in climate models. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 21, p. L21407, 15 nov. 2007.

BARBEDO, R.; SIQUEIRA, V.; COLLISCHONN, W. Topographic Position-based Stream definition (TPS): A simple method to address spatial variability of drainage density in stream networks. **Hydrological Sciences Journal**, v. 67, n. 6, p. 858–869, 26 abr. 2022.

BARNES, R. Parallel Priority-Flood depression filling for trillion cell digital elevation models on desktops or clusters. **Computers and Geosciences**, v. 96, p. 56–68, 2016.

BARNES, R. Parallel non-divergent flow accumulation for trillion cell digital elevation models on desktops or clusters. **Environmental Modelling & Software**, v. 92, p. 202–212, jun. 2017.

BARNES, R. **RichDEM: High-performance terrain analysis**. [s.l.] PeerJ Preprints, 8 ago. 2018. Disponível em: <<https://peerj.com/preprints/27099v1>>. Acesso em: 15 set. 2022.

BARNES, R.; LEHMAN, C.; MULLA, D. An efficient assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. **Computers and Geosciences**, v. 62, p. 128–135, 2014a.

BARNES, R.; LEHMAN, C.; MULLA, D. Priority-flood: An optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models. **Computers and Geosciences**, v. 62, p. 117–127, 2014b.

BIGDELI, B.; AMINI AMIRKOLAEI, H.; PAHLAVANI, P. DTM extraction under forest canopy using LiDAR data and a modified invasive weed optimization algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 216, p. 289–300, out. 2018.

BUARQUE, D. C. et al. Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 2, p. 91–103, 2009.

CHEN, C. et al. DCPLD-Net: A diffusion coupled convolution neural network for real-time power transmission lines detection from UAV-Borne LiDAR data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 112, p. 102960, ago. 2022a.

CHEN, Y. et al. Comparison of drainage-constrained methods for DEM generalization. **Computers & Geosciences**, v. 48, p. 41–49, nov. 2012.

CHEN, Z. et al. Road extraction in remote sensing data: A survey. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 112, p. 102833, ago. 2022.

CHOI, Y.; YI, H.; PARK, H. D. A new algorithm for grid-based hydrologic analysis by incorporating stormwater infrastructure. **Computers and Geosciences**, v. 37, n. 8, p. 1035–1044, 2011.

CIRILO, J. A. et al. **Pernambuco Tridimensional: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial**. ABRH. Anais... Em: 12TH SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA. Brasília: ABRH, 22 nov. 2015. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=12751>>. Acesso em: 19 set. 2022

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, LUIZ AUGUSTO CLEMENTE DA CAMPOS, J. H. DE A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2014.

COSTA-CABRAL, M. C.; BURGESS, S. J. Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1681–1692, 1994.

CRIPPEN, R. et al. NASADEM GLOBAL ELEVATION MODEL: METHODS AND PROGRESS. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLI-B4, p. 125–128, 13 jun. 2016.

DALAGNOL, R. et al. Large-scale variations in the dynamics of Amazon forest canopy gaps from airborne lidar data and opportunities for tree mortality estimates. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1388, dez. 2021.

DALMOLIN, Q. et al. Photogrammetric control points from airborne laser scanner. **Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection**, n. 198–199, p. 39–45, 21 abr. 2014.

DAVID, S. R. et al. USUAL Watershed Tools: A new geospatial toolkit for hydrogeomorphic delineation. **Environmental Modelling & Software**, v. 159, p. 105576, jan. 2023.

DE ALMEIDA, G. A. M.; BATES, P.; OZDEMIR, H. Modelling urban floods at submetre resolution: challenges or opportunities for flood risk management?: Modelling urban

floods at submetre resolution. **Journal of Flood Risk Management**, v. 11, p. S855–S865, fev. 2018.

DENNISON, P. E.; FRYER, G. K.; COVA, T. J. Identification of firefighter safety zones using lidar. **Environmental Modelling and Software**, 2014.

DETTO, M. et al. Spatial variability in tropical forest leaf area density from multireturn lidar and modeling: Multireturn LiDAR and Tropical Forest. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 120, n. 2, p. 294–309, fev. 2015.

DÖLL, P.; LEHNER, B. Validation of a new global 30-min drainage direction map. **Journal of Hydrology**, v. 258, n. 1–4, p. 214–231, 2002.

DONG, P.; CHEN, Q. **LiDAR remote sensing and applications**. Boca Raton London New York: CRC Press, Taylor & Francis, 2018.

DU, C. et al. Drainage network extraction from a high-resolution DEM using parallel programming in the .NET Framework. **Journal of Hydrology**, v. 555, p. 506–517, dez. 2017.

DUKE, G. D. et al. Incorporating ancillary data to refine anthropogenically modified overland flow paths. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 8, p. 1827–1843, maio 2006.

EILANDER, D. et al. A hydrography upscaling method for scale-invariant parametrization of distributed hydrological models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, n. 9, p. 5287–5313, 28 set. 2021.

ENDRENY, T. A.; WOOD, E. F.; LETTENMAIER, D. P. Satellite-derived digital elevation model accuracy: hydrogeomorphological analysis requirements. **Hydrological Processes**, v. 14, n. 1, p. 1–20, jan. 2000.

ERDBRÜGGER, J. et al. Effect of DEM-smoothing and -aggregation on topographically-based flow directions and catchment boundaries. **Journal of Hydrology**, v. 602, p. 126717, nov. 2021.

FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. Drainage networks from grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 27, n. 5, p. 709–717, maio 1991.

FAN, F. et al. Sobre o Início da Rede de Drenagem Definida a Partir dos Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2013.

FARR, T. G. et al. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. RG2004, 19 maio 2007.

FEKETE, B. M.; VÖRÖSMARTY, C. J.; LAMMERS, R. B. Scaling gridded river networks for macroscale hydrology: Development, analysis, and control of error. **Water Resources Research**, v. 37, n. 7, p. 1955–1967, 2001.

FLOOD, M. Laser altimetry – from science to commercial lidar mapping. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 67, 1209–11, 1213–17. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 2001.

- FREEMAN, T. G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers and Geosciences**, v. 17, n. 3, p. 413–422, 1991.
- GALLANT, J. C.; WILSON, J. P. TAPES-G: A grid-based terrain analysis program for the environmental sciences. **Computers and Geosciences**, v. 22, n. 7, p. 713–722, 1996.
- GANDOLFI, C.; BISCHETTI, G. B. INFLUENCE OF THE DRAINAGE NETWORK IDENTIFICATION METHOD ON GEOMORPHOLOGICAL PROPERTIES AND HYDROLOGICAL RESPONSE. **Hydrological Processes**, v. 11, n. 4, p. 353–375, 30 mar. 1997.
- GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. **Journal of Hydrology**, v. 193, n. 1–4, p. 204–213, 1997.
- GETIRANA, A. C. V. et al. Improving hydrological information acquisition from DEM processing in floodplains. **Hydrological Processes**, v. 23, n. 3, p. 502–514, 30 jan. 2009.
- GIANNONI, F.; ROTH, G.; RUDARI, R. A procedure for drainage network identification from geomorphology and its application to the prediction of the hydrologic response. **Advances in Water Resources**, v. 28, n. 6, p. 567–581, jun. 2005.
- GIONGO, M. et al. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231–244, 2010.
- GIRONÁS, J. et al. Evaluation of Methods for Representing Urban Terrain in Storm-Water Modeling. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 15, n. 1, p. 1–14, jan. 2010.
- GÖKGÖZ, T.; BAKER, M. Large Scale Landform Mapping Using Lidar DEM. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 3, p. 1336–1345, 7 ago. 2015.
- GONG, J.; XIE, J. Extraction of drainage networks from large terrain datasets using high throughput computing. **Computers and Geosciences**, v. 35, n. 2, p. 337–346, 2009.
- GOODCHILD, M. F.; MARK, D. M. The Fractal Nature of Geographic Phenomena. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 77, n. 2, p. 265–278, 1987.
- GOYER, G. G.; WATSON, R. The Laser and its Application to Meteorology. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 1963.
- HAWKER, L. et al. Perspectives on Digital Elevation Model (DEM) Simulation for Flood Modeling in the Absence of a High-Accuracy Open Access Global DEM. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, p. 233, 18 dez. 2018.
- HAWKER, L. et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 2, p. 024016, 1 fev. 2022.
- HILL, J. et al. Wide-Area Topographic Mapping and Application Using Airborne Light Detection and Ranging (LIDAR) Technology. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 66, n. 8, p. 908–960, 2000.

HÖFLE, B.; RUTZINGER, M. Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 55, n. March, p. 1–29, 2011.

ISTANBULLUOGLU, E. et al. A probabilistic approach for channel initiation. **Water Resources Research**, v. 38, n. 12, p. 61-1-61–14, 2002.

ITEP, I. DE T. DE P. **PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL – PE 3D Validação dos Produtos Aerofotogramétricos e Perfilamento a Laser – Relatório Final do Bloco 1 - Análise de Consistência Lógica, Completude e Exatidão Posicional: PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL – PE 3D**. Recife: ITEP, 6 nov. 2018a. . Acesso em: 23 set. 2022.

ITEP, I. DE T. DE P. **PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL – PE 3D Validação dos Produtos Aerofotogramétricos e Perfilamento a Laser – Relatório Final do Bloco 2 - Análise de Consistência Lógica e Completude: PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL – PE 3D**. Recife: ITEP, 6 nov. 2018b. . Acesso em: 23 set. 2022.

JAMALI, B. et al. A rapid urban flood inundation and damage assessment model. **Journal of Hydrology**, v. 564, p. 1085–1098, set. 2018.

JANKOWFSKY, S. et al. Comparison of catchment and network delineation approaches in complex suburban environments: application to the Chaudanne catchment, France: COMPARISON OF SUBURBAN CATCHMENT AND NETWORK DELINEATION APPROACHES. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 25, p. 3747–3761, 15 dez. 2013.

JENSEN, J. R.; EPIPHANIO, J. C. N. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2011.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593–1600, 1988.

JIANG, L. et al. Extraction of drainage network from grid terrain datasets using parallel computing. **Proceedings - 6th International Symposium on Computational Intelligence and Design, ISCID 2013**, v. 1, p. 240–243, 2013.

KÄSER, D. et al. Channel Representation in Physically Based Models Coupling Groundwater and Surface Water: Pitfalls and How to Avoid Them. **Groundwater**, v. 52, n. 6, p. 827–836, nov. 2014.

KENWARD, T. Effects of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrologic Predictions. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, n. 3, p. 432–444, dez. 2000.

KLEIN, I.; OPPELT, N.; KUENZER, C. Application of Remote Sensing Data for Locust Research and Management—A Review. **Insects**, v. 12, n. 3, p. 233, 9 mar. 2021.

KRIEGER, G. et al. TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 11, p. 3317–3341, nov. 2007.

- KUŽELKA, K.; SLAVÍK, M.; SUROVÝ, P. Very high density point clouds from UAV laser scanning for automatic tree stem detection and direct diameter measurement. **Remote Sensing**, v. 12, n. 8, 2020.
- LAI, Z. et al. Watershed delineation using hydrographic features and a DEM in plain river network region: Watershed Delineation in Plain River Network Region. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 2, p. 276–288, 15 jan. 2016.
- LASHERMES, B.; FOUFOULA-GEORGIU, E.; DIETRICH, W. E. Channel network extraction from high resolution topography using wavelets. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 23, p. 2–7, 2007.
- LAURI, H.; KUMMU, M. Improving the accuracy of a grid-based distributed hydrological model using slope and river length corrections in a large river basin: case Mekong. **Hydrology Research**, v. 45, n. 4–5, p. 715–726, 1 ago. 2014.
- LEAL DE MENEZES, P. M.; FERNANDES, M. DO C. **Roteiro de cartografia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- LECOURS, V. et al. Towards a framework for terrain attribute selection in environmental studies. **Environmental Modelling & Software**, v. 89, p. 19–30, mar. 2017.
- LI, F. et al. Influence of glacier inventories on ice thickness estimates and future glacier change projections in the Tian Shan range, Central Asia. **Journal of Glaciology**, p. 1–15, 15 jul. 2022a.
- LI, H. et al. Global DEMs vary from one to another: an evaluation of newly released Copernicus, NASA and AW3D30 DEM on selected terrains of China using ICESat-2 altimetry data. **International Journal of Digital Earth**, v. 15, n. 1, p. 1149–1168, 31 dez. 2022b.
- LI, J. et al. A D8-compatible high-efficient channel head recognition method. **Environmental Modelling and Software**, v. 125, p. 104624, 2020c.
- LI, J. et al. Digital Elevation Models for topographic characterisation and flood flow modelling along low-gradient, terminal dryland rivers: A comparison of spaceborne datasets for the Río Colorado, Bolivia. **Journal of Hydrology**, v. 591, p. 125617, dez. 2020b.
- LI, T. J. Modeling the process of hillslope soil erosion in the Loess Plateau. **Journal of Environmental Informatics**, v. 14, n. 1, p. 1–10, 10 set. 2009.
- LIDBERG, W. et al. Evaluating preprocessing methods of digital elevation models for hydrological modelling. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 26, p. 4660–4668, 2017.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation**. 7. ed ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2015.
- LINDSAY, J. B. A physically based model for calculating contributing area on hillslopes and along valley bottoms. **Water Resources Research**, v. 39, n. 12, p. 1–6, 2003.

- LINDSAY, J. B. Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 6, p. 846–857, 2016a.
- LINDSAY, J. B. The practice of DEM stream burning revisited. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 41, n. 5, p. 658–668, 2016b.
- LINDSAY, J. B.; DHUN, K. Modelling surface drainage patterns in altered landscapes using LiDAR. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 29, n. 3, p. 397–411, 2015.
- LINDSAY, J. B.; EVANS, M. G. The influence of elevation error on the morphometrics of channel networks extracted from DEMs and the implications for hydrological modelling. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 11, p. 1588–1603, 30 maio 2008.
- LINDSAY, J. B.; FRANCONI, A.; COCKBURN, J. M. H. LiDAR DEM Smoothing and the Preservation of Drainage Features. **Remote Sensing**, v. 11, n. 16, p. 1926, 17 ago. 2019.
- LIU, Y. Y. et al. A CyberGIS Integration and Computation Framework for High-Resolution Continental-Scale Flood Inundation Mapping. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 54, n. 4, p. 770–784, 2018.
- MAIDMENT, D. R. Conceptual Framework for the National Flood Interoperability Experiment. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 53, n. 2, p. 245–257, abr. 2017.
- MARK, D. M. Automated detection of drainage networks from digital elevation models. **Cartographica**, v. 21, n. 2–3, p. 168–178, 1984.
- MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models. **Hydrological Processes**, v. 12, n. 6, p. 843–855, 1998.
- MARTZ, L. W.; JONG, E. DE. CATCH: A FORTRAN program for measuring catchment area from digital elevation models. **Computers and Geosciences**, v. 14, n. 5, p. 627–640, 1988.
- MATÉ-GONZÁLEZ, M. Á. et al. On the Combination of Remote Sensing and Geophysical Methods for the Digitalization of the San Lázaro Middle Paleolithic Rock Shelter (Segovia, Central Iberia, Spain). **Remote Sensing**, v. 11, n. 17, p. 2035, 29 ago. 2019.
- MAYORGA, E. et al. Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazonian rivers. **Nature**, v. 436, n. 7050, p. 538–541, 28 jul. 2005.
- MCCABE, M. F. et al. The future of Earth observation in hydrology. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 7, p. 3879–3914, 28 jul. 2017.

MCNAMARA, J. P. et al. Channel head locations with respect to geomorphologic thresholds derived from a digital elevation model: A case study in northern Thailand. **Forest Ecology and Management**, v. 224, n. 1–2, p. 147–156, 2006.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

MORETTI, G.; ORLANDINI, S. Hydrography-Driven Coarsening of Grid Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, v. 54, n. 5, p. 3654–3672, 2018.

MUKHERJEE, S. et al. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p. 205–217, abr. 2013.

MUNIER, S.; DECHARME, B. **River network and hydro-geomorphology parametrization for global river routing modelling at 1/12° resolution**. [s.l.] *Hydrology and Soil Science – Hydrology*, 7 dez. 2021. Disponível em: <<https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2021-434/essd-2021-434.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2022.

MUNOTH, P.; GOYAL, R. Effects of DEM Source, Spatial Resolution and Drainage Area Threshold Values on Hydrological Modeling. **Water Resources Management**, v. 33, n. 9, p. 3303–3319, jul. 2019.

MURPHY, P. N. C. et al. Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 12, p. 1747–1754, 15 jun. 2008.

MURRAY, N. J. et al. Remap: An online remote sensing application for land cover classification and monitoring. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 9, n. 9, p. 2019–2027, set. 2018.

NARDI, F. et al. Hydrogeomorphic properties of simulated drainage patterns using digital elevation models: The flat area issue. **Hydrological Sciences Journal**, v. 53, n. 6, p. 1176–1193, 2008.

NGULA NIPELE, J.; CHEN, J. The usefulness of alos-palsar dem data for drainage extraction in semi-arid environments in The Iishana sub-basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 21, p. 57–67, fev. 2019.

NIKOLAKOPOULOS, K. G.; CHOUSIAFIS, C.; KARATHANASSI, V. Assessing the quality of DSM from ALOS optical and radar data for automatic drainage extraction. **Earth Science Informatics**, v. 8, n. 2, p. 293–307, 2015.

NOH, S. J. et al. Hyper-resolution 1D-2D urban flood modelling using LiDAR data and hybrid parallelization. **Environmental Modelling & Software**, v. 103, p. 131–145, maio 2018.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of ordered vector drainage networks from elevation data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, v. 28, n. 3, p. 323–344, 1984.

- O'DONNELL, G.; NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D. P. A simple algorithm for generating streamflow networks for grid-based, macroscale hydrological models. **Hydrological Processes**, v. 13, n. 8, p. 1269–1275, 1999.
- OLIVERA, F. et al. Extracting low-resolution river networks from high-resolution digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 38, n. 11, p. 13-1-13-8, 2002.
- OLIVERA, F.; RAINA, R. Development of large scale gridded river networks from vector stream data. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 39, n. 5, p. 1235–1248, 2003a.
- OLIVERA, F.; RAINA, R. DEVELOPMENT OF LARGE SCALE GRIDDED RIVER NETWORKS FROM VECTOR STREAM DATA. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 39, n. 5, p. 1235–1248, out. 2003b.
- O'LOUGHLIN, F. E. et al. A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. **Remote Sensing of Environment**, v. 182, p. 49–59, 2016.
- ORLANDINI, S. et al. Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 39, n. 6, p. 1–8, 2003.
- ORTEGA, L.; RUEDA, A. Parallel drainage network computation on CUDA. **Computers and Geosciences**, v. 36, n. 2, p. 171–178, 2010.
- PAN, F.; XI, X.; WANG, C. A MATLAB-based digital elevation model (DEM) data processing toolbox (MDEM). **Environmental Modelling and Software**, v. 122, n. October, p. 104566, 2019.
- PASSALACQUA, P. et al. A geometric framework for channel network extraction from lidar: Nonlinear diffusion and geodesic paths. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. F1, p. F01002, 7 jan. 2010.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Derivação de rede de drenagem a partir de dados SRTM. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2, n. 2, p. 84–95, 2008.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; LOPES DA SILVEIRA, A. L. Improvements in large-scale drainage networks derived from digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 42, n. 8, p. 1–7, 2006.
- PAZ, A. R. DA et al. Errors in river lengths derived from raster digital elevation models. **Computers and Geosciences**, v. 34, n. 11, p. 1584–1596, 2008.
- PERSENDT, F. C.; GOMEZ, C. Assessment of drainage network extractions in a low-relief area of the Cuvelai Basin (Namibia) from multiple sources: LiDAR, topographic maps, and digital aerial orthophotographs. **Geomorphology**, v. 260, p. 32–50, maio 2016.
- PETTORELLI, N. et al. Satellite remote sensing of ecosystem functions: opportunities, challenges and way forward. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, v. 4, n. 2, p. 71–93, jun. 2018.

PIÉGAY, H. et al. Spatial and temporal variability in sedimentation rates associated with cutoff channel infill deposits: Ain River, France: SEDIMENTATION RATES IN FORMER CHANNEL PL. **Water Resources Research**, v. 44, n. 5, maio 2008.

PLANCHON, O.; DARBOUX, F. A fast , simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. **Catena**, v. 46, p. 159–176, 2001.

QIN, L. et al. A River Channel Extraction Method for Urban Environments Based on Terrain Transition Lines. **Water Resources Research**, v. 54, n. 7, p. 4887–4900, 2018.

QUINN, P. et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p. 59–79, 1991.

QUINN, P. F.; BEVEN, K. J.; LAMB, R. The $\ln(a/\tan \beta)$ index: How to use it within the TOPMODEL framework. **Hydrological Processes**, v. 9, n. April 1994, p. 161–182, 1995.

RAAFLAUB, L. D.; COLLINS, M. J. The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, n. 5, p. 710–732, maio 2006.

RABUS, B. et al. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p. 241–262, fev. 2003.

REED, S. M. Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4 km) gridded hydrologic modeling. **Water Resources Research**, v. 39, n. 9, p. 1–11, 2003.

RIEGLER, G.; HENNIG, S. D.; WEBER, M. WorldDEM - A novel global foundation layer. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 40, n. 3W2, p. 183–187, 2015.

ROBINSON, N.; REGETZ, J.; GURALNICK, R. P. EarthEnv-DEM90: A nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 87, p. 57–67, 2014.

ROELEN, J. et al. Extracting drainage networks and their connectivity using LiDAR data. **Hydrological Processes**, v. 32, n. 8, p. 1026–1037, 2018.

SALACH, A. et al. Accuracy assessment of point clouds from LidaR and dense image matching acquired using the UAV platform for DTM creation. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 9, 2018.

SANDERS, B. F. Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. **Advances in Water Resources**, v. 30, n. 8, p. 1831–1843, 2007.

SANGIREDDY, H. et al. GeoNet: An open source software for the automatic and objective extraction of channel heads, channel network, and channel morphology from high resolution topography data. **Environmental Modelling and Software**, v. 83, p. 58–73, 2016.

- SARAIVA, A. G. S.; PAZ, A. R. Multi-step change of scale approach for deriving coarse-resolution flow directions. **Computers and Geosciences**, v. 68, p. 53–63, 2014.
- SCHULZ, W. H. et al. Landslide kinematics and their potential controls from hourly to decadal timescales: Insights from integrating ground-based InSAR measurements with structural maps and long-term monitoring data. **Geomorphology**, v. 285, p. 121–136, maio 2017.
- SCHUMANN, G. J.-P.; BATES, P. D. The Need for a High-Accuracy, Open-Access Global DEM. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, p. 225, 4 dez. 2018.
- SEDGEWICK, R. **Algorithms in C++**. 1. ed. Reading (Mass.) New York Paris [etc.]: Addison-Wesley, 1992.
- SEMENOVA, O.; BEVEN, K. Barriers to progress in distributed hydrological modelling. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 8, p. 2074–2078, 15 abr. 2015.
- SHAW, D. A.; MARTZ, L. W.; PIETRONIRO, A. A methodology for preserving channel flow networks and connectivity patterns in large-scale distributed hydrological models. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 1, p. 149–168, 2005a.
- SHAW, D.; MARTZ, L. W.; PIETRONIRO, A. Flow routing in large-scale models using vector addition. **Journal of Hydrology**, v. 307, n. 1–4, p. 38–47, 2005b.
- SILVA, R. O. B. DA; LIMA MONTENEGRO, S. M. G.; SOUZA, W. M. DE. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de pernambuco. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 2017.
- SILVA, I.; SEGANTINE, P. C. L. **Topografia Para Engenharia**. 1. ed. [s.l.] Elsevier, 2015.
- SIMPSON, A. L. et al. An urgent case for higher resolution digital elevation models in the world's poorest and most vulnerable countries. **Frontiers in Earth Science**, v. 3, n. August, p. 1–2, 2015.
- SMITH, M. J.; CLARK, C. D. Methods for the visualization of digital elevation models for landform mapping. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, n. 7, p. 885–900, jul. 2005.
- SOFIA, G.; FONTANA, G. D.; TAROLLI, P. High-resolution topography and anthropogenic feature extraction: Testing geomorphometric parameters in floodplains. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 4, p. 2046–2061, 2014.
- SOILLE, P. Optimal removal of spurious pits in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 40, n. 12, p. 1–9, 2004.
- SONG, X. et al. A novel parallel depression removing algorithm for hydrology analysis in digital elevation models. **Proceedings - 2012 20th International Conference on Geoinformatics, Geoinformatics 2012**, n. 4093053, p. 4–7, 2012.

SOUSA, T. M. I.; PAZ, A. R. How to evaluate the quality of coarse-resolution DEM-derived drainage networks. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 19, p. 3379–3395, 2017.

STANISLAWSKI, L. V. et al. An open source high-performance solution to extract surface water drainage networks from diverse terrain conditions. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 45, n. 4, p. 319–328, 4 jul. 2018.

SU, C. et al. An efficient algorithm for calculating drainage accumulation in digital elevation models based on the basin tree index. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 12, n. 2, p. 424–428, 2015.

SYVITSKI, J. P. M.; MILLIMAN, J. D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. **Journal of Geology**, 2007.

TACHIKAWA, T. et al. **Characteristics of ASTER GDEM version 2**. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. **Anais...** Em: IGARSS 2011 - 2011 IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM. Vancouver, BC, Canada: IEEE, jul. 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6050017/>>. Acesso em: 15 set. 2022

TADONO, T. et al. **Status of ALOS World 3D (AW3D) global DSM generation**. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). **Anais...** Em: IGARSS 2015 - 2015 IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM. Milan, Italy: IEEE, jul. 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7326657/>>. Acesso em: 15 set. 2022

TAKAKU, J.; TADONO, T.; TSUTSUI, K. Generation of high resolution global DSM from ALOS PRISM. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 40, n. 4, p. 243–248, 2014.

TAN, M. L.; RAMLI, H. P.; TAM, T. H. Effect of DEM Resolution, Source, Resampling Technique and Area Threshold on SWAT Outputs. **Water Resources Management**, v. 32, n. 14, p. 4591–4606, 13 nov. 2018.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, p. 309–319, 1997.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p. 81–100, 1991.

TORRE-TOJAL, L. et al. Above-ground biomass estimation from LiDAR data using random forest algorithms. **Journal of Computational Science**, v. 58, p. 101517, fev. 2022.

TREPEKLI, K. et al. UAV-borne, LiDAR-based elevation modelling: a method for improving local-scale urban flood risk assessment. **Natural Hazards**, v. 113, n. 1, p. 423–451, ago. 2022.

TREVISANI, S.; CAVALLI, M.; MARCHI, L. Reading the bed morphology of a mountain stream: a geomorphometric study on high-resolution topographic data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, n. 2, p. 393–405, 26 fev. 2010.

TRIBE, A. **Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method - Comment**. [s.l.: s.n.]. v. 139

UHE, P. et al. **FABDEM - A 30m global map of elevation with forests and buildings removed**. [s.l.] display, 28 mar. 2022. Disponível em: <<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU22/EGU22-8994.html>>. Acesso em: 17 dez. 2022.

VAN LEEUWEN, M.; NIEUWENHUIS, M. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. **European Journal of Forest Research**, v. 129, n. 4, p. 749–770, jul. 2010.

VOGT, J. V.; COLOMBO, R.; BERTOLO, F. Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. **Geomorphology**, v. 53, n. 3–4, p. 281–298, jul. 2003.

WALLIS, C. et al. Parallel Flow-Direction and Contributing Area Calculation for Hydrology Analysis in Digital Elevation Models. **Civil and Environmental Engineering Faculty Publications**, p. 1, 2009a.

WALLIS, C. et al. Hydrologic terrain processing using parallel computing. **18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling and Simulation with Mathematical and Computational Sciences, Proceedings**, n. July, p. 2540–2545, 2009b.

WANG, C.; GLENN, N. F. A linear regression method for tree canopy height estimation using airborne lidar data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. sup2, p. S217–S227, 21 nov. 2008.

WANG, L.; LIU, H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 2, p. 193–213, 2006.

WANG, M.; HJELMFELT, A. T.; GARBRECHT, J. DEM aggregation for watershed modeling. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 36, n. 3, p. 579–584, 2000.

WANG, N.; SHI, Z.; ZHANG, Z. Road Boundary, Curb and Surface Extraction from 3D Mobile LiDAR Point Clouds in Urban Environment. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 48, n. 4, p. 504–519, 4 jul. 2022.

WANG, Y. et al. A quick algorithm of counting flow accumulation matrix for deriving drainage networks from a DEM. **Third International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2011)**, v. 8009, n. Icdip, p. 800929, 2011.

- WEI, H.; ZHOU, G.; DONG, W. A variant of the Planchon and Darboux algorithm for filling depressions in raster digital elevation models. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 4, 2019.
- WERBROUCK, I. et al. Digital Elevation Model generation for historical landscape analysis based on LiDAR data, a case study in Flanders (Belgium). **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 7, p. 8178–8185, 2011.
- WISE, S. **Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours**. Hydrological Processes. **Anais...**2000.
- WOODROW, K.; LINDSAY, J. B.; BERG, A. A. Evaluating DEM conditioning techniques, elevation source data, and grid resolution for field-scale hydrological parameter extraction. **Journal of Hydrology**, v. 540, p. 1022–1029, 2016.
- WU, H. et al. Automated upscaling of river networks for macroscale hydrological modeling. **Water Resources Research**, v. 47, n. 3, p. 1–18, 2011.
- WU, S.; LI, J.; HUANG, G. H. A study on DEM-derived primary topographic attributes for hydrologic applications: Sensitivity to elevation data resolution. **Applied Geography**, v. 28, n. 3, p. 210–223, jul. 2008.
- XIANG, M. et al. Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Classification of Pollution Risk Management and Control Zones in the Industrial Developed City. **Environmental Management**, v. 66, n. 6, p. 1105–1119, dez. 2020.
- YAMAZAKI, D. et al. A high-accuracy map of global terrain elevations. **Geophysical Research Letters**, 2017.
- YAMAZAKI, D. et al. MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset. **Water Resources Research**, v. 55, n. 6, p. 5053–5073, jun. 2019.
- YAMAZAKI, D.; OKI, T.; KANAE, S. Deriving a global river network map and its sub-grid topographic characteristics from a fine-resolution flow direction map. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, n. 11, p. 2241–2251, 2009.
- YAN, K. et al. A review of low-cost space-borne data for flood modelling: topography, flood extent and water level: A REVIEW OF LOW-COST SPACE-BORNE DATA FOR FLOOD MODELLING. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 15, p. 3368–3387, 15 jul. 2015.
- YAN, Y.; TANG, J.; PILESJÖ, P. A combined algorithm for automated drainage network extraction from digital elevation models. **Hydrological Processes**, v. 32, n. 10, p. 1322–1333, 2018.
- YANG, P. et al. What is the effect of LiDAR-derived DEM resolution on large-scale watershed model results? **Environmental Modelling and Software**, v. 58, p. 48–57, 2014.
- YAO, Y.; SHI, X. Alternating scanning orders and combining algorithms to improve the efficiency of flow accumulation calculation. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 29, n. 7, p. 1214–1239, 2015.

- YILDIRIM, A. A. et al. A virtual tile approach to raster-based calculations of large digital elevation models in a shared-memory system. **Computers and Geosciences**, v. 82, p. 78–88, 2015.
- ZANDBERGEN, P. Applications of shuttle radar topography mission elevation data. **Geography Compass**, v. 2, n. 5, p. 1404–1431, 2008.
- ZHANG, H. et al. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. **Computers and Geosciences**, v. 52, p. 177–188, 2013.
- ZHANG, J. X.; CHANG, K. T.; WU, J. Q. Effects of DEM resolution and source on soil erosion modelling: A case study using the WEPP model. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 22, n. 8, p. 925–942, 2008.
- ZHANG, W.; MONTGOMERY, D. Digital elevation model grid size, landscape representation. **Water resources research**, v. 30, n. 4, p. 1019–1028, 1994.
- ZHOU, G.; WEI, H.; FU, S. A fast and simple algorithm for calculating flow accumulation matrices from raster digital elevation. **Frontiers of Earth Science**, v. 13, n. 2, p. 317–326, 2019.
- ZHOU, Q.; CHEN, Y. Generalization of DEM for terrain analysis using a compound method. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 1, p. 38–45, jan. 2011.
- ZHU, Q.; TIAN, Y.; ZHAO, J. An efficient depression processing algorithm for hydrologic analysis. **Computers and Geosciences**, v. 32, n. 5, p. 615–623, 2006.
- ZOVÁTHI, Ö.; NAGY, B.; BENEDEK, C. Point cloud registration and change detection in urban environment using an onboard Lidar sensor and MLS reference data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 110, p. 102767, jun. 2022.