



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.17.13.26-TDI

**DIREÇÕES DE FLUXO EM MODELOS DIGITAIS DE
ELEVAÇÃO: UM MÉTODO COM FOCO NA
QUALIDADE DA ESTIMATIVA E PROCESSAMENTO
DE GRANDE VOLUME DE DADOS**

Alexandre Copertino Jardim

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Antônio Miguel Vieira Monteiro, e João Ricardo de Freitas Oliveira, aprovada em 07 de abril de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NT7EN5>>

INPE
São José dos Campos
2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.17.13.26-TDI

**DIREÇÕES DE FLUXO EM MODELOS DIGITAIS DE
ELEVAÇÃO: UM MÉTODO COM FOCO NA
QUALIDADE DA ESTIMATIVA E PROCESSAMENTO
DE GRANDE VOLUME DE DADOS**

Alexandre Copertino Jardim

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Antônio Miguel Vieira Monteiro, e João Ricardo de Freitas Oliveira, aprovada em 07 de abril de 2017.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NT7EN5>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Jardim, Alexandre Copertino.

J284d Direções de fluxo em modelos digitais de elevação: um método com foco na qualidade da estimativa e processamento de grande volume de dados / Alexandre Copertino Jardim. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xxiv + 109 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.17.13.26-TDI)

Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadores : Drs. Antônio Miguel Vieira Monteiro, e João Ricardo de Freitas Oliveira.

1. Algoritmo. 2. Direções de fluxo. 3. Modelo digital de elevação. 4. Redes de drenagem. 5. Fossos. I.Título.

CDU 519.254:004.042



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

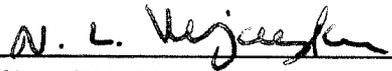
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): *Alexandre Copertino Jardim*

"DIREÇÕES DE FLUXO EM MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO: UM MÉTODO COM FOCO NA QUALIDADE DA ESTIMATIVA E PROCESSAMENTO DE GRANDE VOLUME DE DADOS"

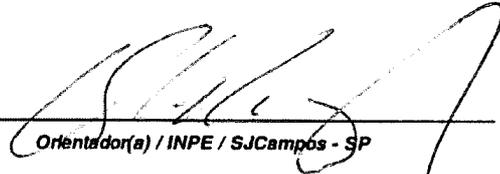
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Computação Aplicada

Dr. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. João Ricardo de Freitas Oliveira



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Sidnei João Siqueira Sant'Anna



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Camilo Daleles Rennó



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Conrado de Moraes Rudorff



Convidado(a) / CEMADEN / São José dos Campos - SP

Dr. Sergio Roberto Matiello Pellegrino



Convidado(a) / ITA / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(X) unanimidade

São José dos Campos, 07 de abril de 2017

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer (1788 – 1860)

Dedico este trabalho a meus pais Pedro e Bete.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro, Dr. João Ricardo de Freitas Oliveira e Dr. Sérgio Rosim pela orientação e incentivo.

Aos meus professores pelos ensinamentos. Em especial ao Dr. Camilo Daleles Rennó pelas contribuições no projeto TerraHidro.

A todos os colegas do curso de computação aplicada.

E a minha família e amigos pelo apoio e carinho.

RESUMO

As direções de fluxo são dados essenciais para modelagem hidrológica. Estas direções permitem simular o caminho que a água e materiais transportados como sedimentos, contaminantes, nutrientes, etc., podem percorrer. Das direções de fluxo são derivadas as delimitações de bacias hidrográficas, as áreas de contribuição dos rios, a rede de drenagem, o comprimento e declividade de trechos de drenagem, os descritores de terreno, o índice topográfico, entre outros. A qualidade destes produtos depende da qualidade das direções de fluxo. As direções de fluxo são extraídas de modelos computacionais de representação do relevo do terreno conhecidos como Modelo Digital de Elevação (MDE). A representação para MDE mais comum e utilizada é a grade regular retangular. Entretanto, os MDE quase sempre possuem células da sua grade onde não é possível definir uma direção de fluxo. Essas células são chamadas de fossos. A remoção dos fossos é necessária para a geração de MDE hidrológicamente consistente. Mas o processo de remoção altera os valores originais de altimetria do MDE. Essas alterações podem introduzir erros e influenciam diretamente na qualidade das direções de fluxo obtidas e, conseqüentemente, em todos os produtos derivados da grade de direção de fluxos. Esta Tese trata dos aspectos relevantes aos métodos de extração de direção de fluxos. São duas as principais contribuições deste trabalho: (1) apresenta inovações no método para definir direções de fluxo de MDE representado por grade regular, com melhora na qualidade da estimativa para as direções de fluxo e, conseqüentemente, uma melhora nos produtos derivados destas direções e, (2) projeta, implementa e testa um conjunto de funções que permite a computação destas inovações metodológicas e seu uso para trabalhar com bases de dados de MDE em escala global. Uma nova abordagem híbrida é proposta para a correção de fossos, que procura estabelecer a menor modificação do MDE original e, ao mesmo tempo, não prejudicar a qualidade das direções de fluxos e dos produtos derivados. Uma prova de conceito foi estabelecida com base em estudo comparado, para os resultados do método proposto nesta Tese. O método proposto foi avaliado contra cinco métodos presentes em diferentes ambientes computacionais de processamento para definição de direções de fluxo. Foram comparadas as diferenças entre o MDE original e o corrigido, gerado por cada método testada. As direções de fluxo foram comparadas indiretamente através da qualidade das redes de drenagem obtidas quando se utiliza cada um dos métodos. Foram utilizadas duas áreas-teste. A primeira área compreende um trecho do rio Crepori, um afluente do rio Tapajós localizado na cidade Jacareacanga do estado do Pará. A segunda área compreende toda bacia hidrográfica do Rio Purus. Esta bacia abrange os estados brasileiros do Acre e do Amazonas e parte do Peru. Em uma classificação final, utilizando métricas de qualidade que consideram dois quesitos em conjunto: (a) a menor alteração no MDE original e, (b) a qualidade das estimativas de direção dos fluxos observada indiretamente pela qualidade

da rede de drenagem derivada, o método proposto desta Tese obteve o melhor desempenho.

Palavras-chave: Algoritmo. Direções de Fluxo. Modelo Digital de Elevação. Redes de Drenagem. Fossos.

FLOW DIRECTIONS FROM DIGITAL ELEVATION MODELS: A METHODOLOGY FOCUSED ON THE QUALITY OF ESTIMATION AND PROCESSING OF LARGE DATA

ABSTRACT

The flow directions are essential data in hydrological modeling. These directions allow simulating the stream path of water and transported materials such as sediments, contaminants, nutrients, etc. River basin delimitations, river contribution areas, drainage network, length and slope of drainage stretches, terrain descriptors, topographic index, among others, are derived from flow directions. The quality of these products depends on the quality of the flow directions. The flow directions are extracted from computational terrain relief models known as the Digital Elevation Model (DEM). The most common and used DEM representation is the regular rectangular grid. However, DEMs almost always have cells in their grid where it is not possible to define a flow direction. These cells are called pits. The pits removal is necessary to generate MDE hydrologically consistent. However, the removal process alters the original EDM altimetry values. These changes can introduce errors and directly influence the quality of the flow directions obtained and, consequently, all products derived from the flow direction grid. This Thesis deals with aspects relevant to methods of extracting flow directions. There are two main contributions of this work: (1) presents innovations in the methodology to define flow directions from DEMs represented by regular rectangular grids, with improvement in the quality of the estimation of the flow directions and, consequently, an improvement in the products derived from these directions and, (2) designs, implements and tests a set of functions that allows the computation of these methodological innovations and their use to work with DEMs databases on global scale. A new hybrid approach is proposed for pits correction, which seeks to establish the least modification of the original DEM and, at the same time, not to impair the quality of the flow directions and derived products. A proof of concept was established based on a comparative study, for the results of the methodology proposed in this Thesis. The proposed methodology was evaluated against five methodologies present in different computational processing environments for the definition of flow directions. The differences between the original and the corrected DEM generated by each methodology were compared. The flow directions were compared indirectly through the quality of the drainage networks obtained when using each of the methodologies. Two test areas were used. The first area comprises a stretch of the Crepori River, a tributary of the Tapajós River located in the city of Jacareacanga in the state of Pará. The second area comprises the entire catchment area of the

Purus River. This basin covers the Brazilian states of Acre and of Amazon and, part of Peru. In a final classification, using quality metrics that consider two questions together: (a) the lowest change in the original DEM and, (b) the quality of the flow direction estimates observed indirectly by the quality of the drainage network. The methodology of this thesis obtained the best performance.

Keywords: Algorithm. Flow Direction. Digital Elevation Model. Drainage Networks. Pits.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Exemplo de Modelo Digital de Elevação. Os números representam do terreno em relação a um <i>Datum</i> de referência.	7
Figura 2.2 - Oito Possíveis direções de fluxo.	8
Figura 2.3 - Exemplo de codificação das direções de fluxo.	9
Figura 2.4 - Exemplo de grade de direções de fluxo gerada pelo método D8..	10
Figura 2.5 - Exemplo de grade de área de contribuição.....	13
Figura 2.6 - Exemplo de grade de redes de drenagem.	14
Figura 2.7 - Fluxograma do método geral para extração de redes de drenagem.	15
Figura 2.8 - Algoritmo Dinf.....	16
Figura 2.9- Comparação dos métodos para definir direções de fluxo.	17
Figura 3.1 - Recorte de dado SRTM de três segundos de arco da região do Rio Purus.....	20
Figura 3.2 - Identificando as áreas planas.	22
Figura 3.3 – Demonstração de como cavar as áreas planas em forma de "v".	23
Figura 3.4 - Como resolver fossos simples.	25
Figura 3.5 - Exemplo da utilização do PFS passo 1	29
Figura 3.6 - Exemplo da utilização do PFS passo 2.....	29
Figura 3.7 - Exemplo da utilização do PFS passo 3.....	30
Figura 3.8 - Exemplo da utilização do PFS passo 4.....	31
Figura 3.9 – Exemplo da utilização do PFS passo 5	31
Figura 3.10 - Exemplo da utilização do PFS passo 6.....	32
Figura 3.11 - Exemplo da utilização do PFS parte 7	33
Figura 3.12 - Distâncias ortogonal e diagonal.	37
Figura 3.13 - Exemplo de empate no cálculo da direção de fluxo	38
Figura 4.1 – Primeira área de teste, trecho do Rio Crepori.	47
Figura 4.2 - Segunda área de teste, Rio Purus.	48
Figura 4.3 - Ilustração do método de comparação entre linhas de drenagem.	52

Figura 4.4 - Comparando linhas de drenagem.	53
Figura 4.5 - Definindo o começo (nascente) e o fim (exutório) das redes de drenagens derivadas de cada método.	54
Figura 4.6 – Redes de drenagem de referência do Rio Crepori.	55
Figura 4.7 - Obtendo a drenagem de referência para o Rio Purus.....	56
Figura 4.8 - Divisão das áreas para os testes estatísticos.	60
Figura 4.9 – Mosaico de cenas do SRTM de 90 metros para a América do Sul.	62
Figura 4.10 – Mosaico de cenas do SRTM de 90 metros para o mundo.	62
Figura 5.1 - Comparação visual de detalhes das redes de drenagem extraídas pelos diferentes métodos.	67
Figura 5.2 - Erros dos métodos de preenchimento.	68
Figura 5.3 - Erros dos métodos de preenchimento 2.	69
Figura 5.4 - Detalhe do IDRISI escolhendo o mesmo caminho que os métodos que preenchem o MDE.	70
Figura 5.5 - Resultado do teste de Friedman.....	72
Figura 5.6 - Detalhe da rede de drenagem na área do Rio Crepori.	76
Figura 5.7 - Resultado do teste de Friedman para concordância com rede de drenagem da área do Rio Crepori com MDT.....	79
Figura 5.8 - Regiões do onde o TerraHidro altera mais células (NCA) que aos outros métodos.....	81
Figura 5.9 - Resultado do teste de Friedman para a concordância com rede de drenagem da área do Rio Crepori com MDS.	85
Figura 5.10 - Resultado do teste de Friedman para concordância com rede de drenagem da área do Rio Crepori com MDT.....	90
Figura 5.11 - Rede de drenagem para América do Sul.	94
Figura 5.12 - Rede de drenagem para o mundo.	95

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1 – Quadro comparativo dos métodos de correção de fossos	51
Tabela 5.1 - Concordância entre as redes de drenagem para o Rio Purus.	66
Tabela 5.2 - Ranques do teste de Friedman	71
Tabela 5.3 - Valores de NCA e MDA para área do Rio Purus.....	72
Tabela 5.4 - Teste de Friedman para os valores de NCA	73
Tabela 5.5 - Teste de Friedman para os valores de MDA	74
Tabela 5.6 - Média dos Ranques de Friedman	75
Tabela 5.7 - Concordância entre as redes de drenagem para o Rio Crepori usando o MDT.....	77
Tabela 5.8 - Teste de Friedman para concordância com a rede de drenagem para Rio Crepori usando MDT.....	77
Tabela 5.9 - Valores de NCA e MDA para área do Rio Crepori usando MDT..	79
Tabela 5.10 - Teste de Friedman para os valores de NCA da área do Rio Crepori usando MDT	80
Tabela 5.11 - Teste de Friedman para os valores de MDA da área do Rio Crepori usando MDT	80
Tabela 5.12 - Média dos Ranques de Friedman para Rio Crepori usando MDT.	82
Tabela 5.13 - Concordância entre as redes de drenagem para o Rio Crepori usando o MDS.....	83
Tabela 5.14 - Teste de Friedman para concordância com a rede de drenagem para Rio Crepori usando MDS	84
Tabela 5.15 - Valores de NCA e MDA para área do Rio Crepori usando MDS.	85
Tabela 5.16 - Teste de Friedman para os valores de NCA da área do Rio Crepori usando MDS.....	86
Tabela 5.17 - Teste de Friedman para os valores de MDA da área do Rio Crepori usando MDS.....	86

Tabela 5.18 - Média dos Ranques de Friedman para Rio Crepori usando MDS.	87
Tabela 5.19 – Concordância entre as redes de drenagem para o Rio Crepori usando o SRTM de 30 metros.....	88
Tabela 5.20 - Teste de Friedman para concordância entre as redes de drenagem para o Rio Crepori utilizando o SRTM de 30 metros.	89
Tabela 5.21 - Valores de NCA e MDA para área do Rio Crepori com MDT.....	90
Tabela 5.22 - Teste de Friedman para os valores de NCA da área do Rio Crepori com SRTM.....	91
Tabela 5.23 - Teste de Friedman para os valores de MDA da área do Rio Crepori com SRTM.....	91
Tabela 5.24 - Média dos Ranques de Friedman para Rio Crepori com SRTM.	93

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
MDA	Média das Diferenças Absolutas
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
NCA	Número de Células Alteradas
PFS	Priority First Search
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Definição do problema	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Contribuições desta tese	3
1.4. Organização do documento.....	6
2 TRABALHOS RELACIONADOS.....	7
2.1 Direções de fluxo	8
2.1. Área de contribuição	12
2.2. Redes de drenagem	13
2.3. Notas sobre o método geral.....	14
2.4. Limitações do algoritmo D8	15
3 MÉTODO COMPUTACIONAL PROPOSTO.....	19
3.1. Correção do MDE	19
3.1.1. Primeira fase: áreas planas.....	20
3.2. Segunda fase: fossos simples	23
3.3. Terceira fase: fossos complexos.....	26
3.3.1. Eficiência computacional do método de correção dos fossos proposto	36
3.4. Direções de fluxo	36
3.4.1. Células adjacentes com valor nulo de altimetria	37
3.4.2. Empate para o maior valor de declividade	37
3.5. Área de contribuição	39
3.6. Redes de drenagem	43
4 PROVA DE CONCEITO: DELINEAMENTO DOS EXPERIMENTOS	45
4.1. Dados e áreas de teste.....	46
4.2. Os métodos em comparação.....	49
4.3. Comparação das redes de drenagem.....	52
4.3.1. Obtendo a rede de drenagem de referência.....	54

4.4.	Comparando os MDE original e corrigido	56
4.5.	Testes estatísticos	57
4.6.	Capacidade de processamento	61
5	PROVA DE CONCEITO: ANALISE DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS.....	65
5.1.	Discussão dos resultados	65
5.2.	Rio Purus	66
5.2.1.	Rede de drenagem Rio Purus	66
5.2.2.	Diferença entre MDE original e corrigido.....	71
5.2.3.	resumo dos resultados para o Rio Purus	74
5.3.	Rio Crepori.....	76
5.3.1.	Modelo digital de terreno - MDT	76
5.3.1.1.	MDT - rede de drenagem	76
5.3.1.2.	MDT - diferença entre MDE original e corrigido	78
5.3.1.3.	Resumo dos resultados para MDT	81
5.3.2.	Modelo Digital de Superfície - MDS	83
5.3.2.1.	MDS - rede de drenagem	83
5.3.2.2.	MDS - diferença entre MDE original e corrigido	84
5.3.2.3.	Resumo dos resultados para MDS.....	87
5.3.3.	SRTM de 30 metros	88
5.3.3.1.	SRTM - rede de drenagem.....	88
5.3.3.2.	SRTM - diferença entre MDE original e corrigido	89
5.3.3.3.	Resumo dos resultados para SRTM	92
5.4.	Capacidade de processamento	93
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
6.1.	Contribuições originais apresentadas por esta tese	99
6.1.1.	Forçar direção de fluxo para oceano.....	99
6.1.2.	Dividir o MDE em blocos	99
6.1.3.	Cavar áreas planas em “v”	100
6.1.4.	Fossos simples.....	101
6.1.5.	Condição de parada adaptativa do algoritmo PFS	102

6.1.6.	Janela adaptativa do PFS	102
6.1.7.	Área acumulada	103
6.1.8.	Capacidade de processamento.....	103
6.2.	Melhorias possíveis	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

1 INTRODUÇÃO

1.1. Definição do problema

As direções de fluxo simulam o caminho que a água e materiais transportados (sedimentos, contaminantes, nutrientes, etc.) percorrem através da topografia (NARDI et al., 2008). É um dado essencial para modelagem hidrológica. Das direções de fluxo são derivadas as delimitações de bacias hidrográficas, as áreas de contribuição, a rede de drenagem, o comprimento e declividade de trechos de drenagem (PAZ; COLLISCHONN, 2007), descritores de terreno (RENNÓ et al., 2008), índice topográfico (QUINN et al., 1995), entre outros.

As direções de fluxo são obtidas de Modelo Digital de Elevação (MDE). Um MDE é uma representação digital do terreno normalmente representado por uma estrutura de grade retangular regular georreferenciada. Cada célula dessa grade armazena o valor de altimetria da localização referente no terreno. Existem outras formas de representação de representar o terreno de forma digital como grades triangulares e curvas de nível que podem ser vistas em Wilson (2012). No entanto, os principais algoritmos para obter direções de fluxo são baseados em grades regulares, pois essas têm a vantagem de ser facilmente representada e manipulada, pois as relações topológicas estão implícitas.

Normalmente as direções de fluxo também são representadas por uma grade retangular regular, onde cada célula da grade armazena a direção de fluxo da célula correspondente no MDE. Portanto, a grade de direção de fluxo tem as mesmas dimensões da grade do MDE. Existem outras formas de representação das direções de fluxo, por exemplo, a utilização de grafos (ROSIM, 2008), que não serão abordadas neste trabalho.

Existem diferentes abordagens para se definir as direções de fluxo (TARBOTON, 1997). No entanto, a abordagem mais utilizada foi inicialmente proposta por O'Callaghan e Mark (1984) chamada de D8 (oito direções de fluxo). Nessa abordagem é atribuída uma única direção de

fluxo para cada célula da grade, esta direção aponta para uma das oito células adjacentes onde a declividade é maior (para onde o terreno desce mais).

Os MDE quase sempre possuem células onde não é possível definir uma direção de fluxo usando apenas as informações das células adjacentes. Casos que ocorrem quando as células se encontram em uma área plana ou em um mínimo local; essas células são chamadas de fossos. Na grande maioria das vezes, os fossos são artefatos criados no processo de geração do MDE, mas também podem estar presentes naturalmente no terreno. Segundo Lindsay e Creed (2005), o único método que realmente confirma se um fosso é natural ou artefato é a inspeção de solo. Porém, a inspeção de solo é muitas vezes inviável, quando não impraticável, dado o tamanho da área de estudo e o acesso. O problema da presença de fossos no MDE é que eles impedem a extração de atributos dependentes das direções de fluxo, como por exemplo, as redes de drenagem. Por esses motivos, é uma prática comum remover todos os fossos de um MDE antes de definir as direções de fluxo. O processo de remoção dos fossos, muitas vezes chamado de correção do MDE tem como objetivo a geração de um MDE hidrologicamente consistente.

O processo de correção altera os valores originais de altimetria do MDE. Essas alterações podem introduzir erros no MDE e influenciar diretamente na qualidade das direções de fluxo e, conseqüentemente, em todos os produtos derivados da grade de direção de fluxos. O processo de correção normalmente é a primeira etapa da modelagem hidrológica e, portanto, erros nesta etapa são propagados para todas as outras etapas da modelagem. Estes são motivos suficientes para se preocupar com a qualidade da correção do MDE.

Os métodos de correção podem ser classificados de acordo com a forma que alteram o MDE. Existem métodos que somente elevam as altimetrias, chamados métodos de preenchimento, pois preenchem os mínimos locais a fim de remover os fossos. Outros métodos fazem o contrário: diminuem as altimetrias, e são chamados de métodos de escavação, pois cavam um

caminho do fosso até uma célula com altimetria mais baixa que a do fosso ou até uma célula que se localiza na borda do MDE. Existe ainda uma terceira classificação, chamada de métodos híbridos que, seguindo algum critério, pode tanto preencher quanto cavar o MDE para remover um fosso. Cada abordagem tem suas vantagens e desvantagens, podendo alterar mais ou menos o MDE, ser mais simples ou complexa de implementar, ou resultar em direções de fluxo que representam melhor ou pior as características do terreno.

Atualmente esses diferentes métodos para corrigir o MDE e definir as direções de fluxo estão implementados em diferentes softwares de geoprocessamento. No entanto Collischonn et al. (2010), ressalta que os resultados não são sempre satisfatórios. Por exemplo, alguns métodos geram um padrão não natural de redes de drenagem, como linhas paralelas.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo a precisão cartográfica das direções de fluxo e, em consequência, a precisão dos produtos derivados dessas direções, notadamente as redes de drenagem e as bacias de captação. Como objetivo secundário, mas também muito importante, desejava-se que o método fosse capaz de processar grandes volumes de dados em um tempo hábil.

1.3. Contribuições desta tese

Este trabalho traz duas contribuições essenciais. (1) apresenta inovações no método para definir direções de fluxo de MDE representado por grade regular, com melhora na qualidade da estimativa para as direções de fluxo e, conseqüentemente, uma melhora nos produtos derivados destas direções; (2) projeta, implementa e testa um conjunto de funções que permite a computação destas inovações metodológicas e seu uso para trabalhar com bases de dados de MDE em escala global. Uma abordagem híbrida é proposta para a correção de fossos, que procura estabelecer a menor modificação do MDE original e, ao mesmo tempo,

não prejudicar a qualidade das direções de fluxos e dos produtos derivados. O conjunto de funções que estabelece este método foi implementado em C++ e incorporado a biblioteca de funções e código aberto TerraHidro¹.

Para verificar as inovações propostas, uma prova de conceito foi estabelecida com base em estudo comparado para os resultados do método proposto nesta Tese, com cinco métodos presentes em diferentes ambientes computacionais de processamento para definição de direções de fluxo. Foram comparadas as diferenças entre o MDE original e o corrigido, gerado por cada método testado, verificando quem apresentou a menor diferença entre os MDE. As direções de fluxo foram comparadas indiretamente através da qualidade das redes de drenagem obtidas quando se utiliza cada um dos métodos em teste. As redes de drenagem são canais conectados, capazes de escoar a água superficial. É um dos mais importantes produtos derivados das direções de fluxo. As redes de drenagem obtidas por cada método foram comparadas a uma rede de drenagem de referência, um padrão ouro.

Foram utilizadas duas áreas de teste. A primeira área compreende um trecho do rio Crepori, um afluente do rio Tapajós localizado na cidade Jacareacanga do estado do Pará. Esta área foi escolhida especialmente pela disponibilidade da rede de drenagem de referência obtida por especialistas da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) do Exército Brasileiro. Foram utilizados o modelo digital de terreno (DTM – *Digital Terrain Model*) e o modelo digital de superfície (DSM – *Digital Superfície Model*) de cinco metros de resolução horizontal obtidos pelo programa Radiografia da Amazônia. Também o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de um segundo de arco (aproximadamente 30 metros de resolução horizontal) disponibilizado pela NASA.

¹ <http://www.dpi.inpe.br/terrahidro>

A segunda área compreende toda bacia hidrográfica do rio Purus. Esta bacia abrange os estados brasileiros do Acre e do Amazonas e parte do Peru. Foi escolhido todo trecho do rio Purus em território brasileiro para comparação entre as redes de drenagem. O MDE utilizado foi o SRTM de três segundos de arco (aproximadamente 90 metros de resolução horizontal). A rede de drenagem de referência foi obtida com o uso das imagens ópticas do Landsat 8.

Os resultados mostram que o método proposto nesta Tese obteve as melhores redes de drenagem comparadas à rede de drenagem de referência. Em termos de diferença entre os MDE original e corrigido, o método aqui proposto esteve sempre entre as três métodos que menos alteram o MDE. Em uma classificação final que considera os dois quesitos em conjunto, a menor alteração no MDE original e a qualidade das estimativas de direção dos fluxos observada indiretamente pela qualidade da rede de drenagem derivada, o método desta Tese teve o melhor desempenho.

Uma tarefa complexa no processo de correção de fossos é dividir a região de estudo em partes menores, processar essas partes separadamente e depois unir os resultados de cada parte para gerar o resultado final. Podem existir muitos problemas nas bordas dessas partes criando padrões de direções de fluxo que não representam as características naturais do terreno. Portanto, também é desejável que o método de correção seja capaz de processar grandes volumes de dados em um tempo de processamento viável para os usuários. O método proposto foi capaz de eliminar todos os fossos e gerar as direções de fluxo do continente América do Sul em menos de 6h utilizando um computador pessoal (Intel i7 de 2.40 GHz e 16 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 7).

Em um teste mais abrangente, o método proposto foi capaz de eliminar os fossos e gerar direções de fluxo para quase todo o globo terrestre utilizando os dados do SRTM de 90 metros disponibilizados pela CGIAR-

CSI². O processamento foi realizado em um computador com 48 Gb de memória RAM em pouco menos de 24h.

Em um teste mais abrangente, o método proposto foi capaz de eliminar os fossos e gerar direções de fluxo para quase todo o globo terrestre utilizando os dados do SRTM de 90 metros disponibilizados pela CGIAR-CSI² em aproximadamente 24. Desta vez o processamento foi realizado num computador Intel Xeon (CPU ES 2420 v2@ 2,20 GHz) com 48 GB de memória RAM também utilizando o sistema operacional Windows 7.

1.4. Organização do documento

Este documento está organizado em 6 capítulos. O capítulo seguinte apresenta os trabalhos relacionados ao tema desta Tese. O terceiro capítulo apresenta o método proposto. No quarto capítulo é descrito as formas que os testes foram realizados. Os resultados são apresentados no quinto capítulo e finalmente no sexto capítulo são apresentadas as conclusões desta Tese.

² <http://srtm.csi.cgiar.org>

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Para se obter direções de fluxo e, é necessária uma representação digital da altimetria do terreno que se deseja estudar. Existem diversos modos de representar digitalmente um terreno, Wilson (2012) fez uma revisão sobre representação digital de terreno, e como este dado é utilizado atualmente. Contudo, a forma de representação mais utilizada é a grade retangular regular. Nesse caso cada célula da grade armazena o valor de altimetria daquele ponto do terreno em relação a um *Datum* de referência (Figura 2.1). Deste ponto em diante o termo Modelo Digital de Elevação (MDE) é referente à representação por grade retangular regular.

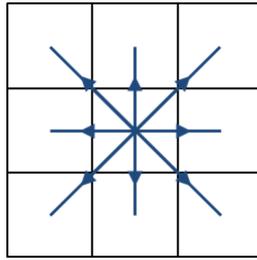
Figura 2.1 - Exemplo de Modelo Digital de Elevação. Os números representam do terreno em relação a um *Datum* de referência.

	1	2	3	4
A	40	34	35	40
B	35	30	32	35
C	40	29	36	36
D	43	28	27	26
E	43	40	35	34

Fonte: Produção do Autor.

As direções de fluxo foram propostas inicialmente como passo necessário para a extração automática de redes de drenagem a partir de um MDE por O'Callaghan e Mark (1984). O método proposto por esses autores ficou conhecido como D8 (oito direções), pois, para cada célula do MDE, existem oito possíveis direções de fluxo. Uma direção de fluxo pode apontar para cada uma das oito células adjacentes da célula em questão (Figura 2.2). Pode-se dizer que o algoritmo D8 é o método geral para definição de direções de fluxo e redes de drenagem, pois os principais softwares de geoprocessamento que possibilitam a extração de direções de fluxo implementam esse método ou variações do método D8.

Figura 2.2 - Oito Possíveis direções de fluxo.



Fonte: Produção do Autor.

O algoritmo D8 consiste em três principais etapas: (1) definir as direções de fluxo para cada célula do MDE; (2) calcular a área de contribuição de cada célula e; (3) com base em um limiar de área de contribuição definir as redes de drenagem.

Existem outras abordagens que permitem extrair redes de drenagem de forma automática de MDE que não são baseadas em direções de fluxo, mas sim nas características geomorfológicas do terreno, como por exemplo, declividade, curvatura horizontal, curvatura vertical, e outras que são descritas em Shary et.al (2002). Existem pesquisas que ainda tentam unir essas duas abordagens, como a proposta por Chorowicz et. al (1992). No entanto, atualmente, os métodos que se encontram implementados em softwares disponíveis para os usuários, utilizam como base o método D8.

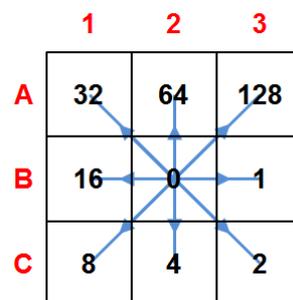
2.1 Direções de fluxo

O primeiro passo do algoritmo D8 é definir as direções de fluxo para cada célula do MDE. Isto é feito utilizando-se as altimetrias das oito células adjacentes e a altimetria da própria célula em questão. São então calculadas as declividades da célula para as células adjacentes. A direção de fluxo aponta para célula que obteve a maior declividade, ou seja, para onde o MDE desce mais.

O resultado é uma grade com as mesmas dimensões e resolução do MDE. Cada célula da grade armazena a direção de fluxo à célula correspondente do MDE. Normalmente é utilizada uma codificação

numérica para representar digitalmente as direções de fluxo. A Figura 2.3 apresenta um exemplo de uma codificação para célula B2. Neste exemplo o código 1 representa a direção de fluxo para célula adjacente (B3); o código 2 representa a direção de fluxo para a célula C3; e assim por diante. Desta forma, caso a direção de fluxo da célula B2 apontasse para célula A1, por exemplo, o valor de B2 na grade de direções de fluxo seria 32.

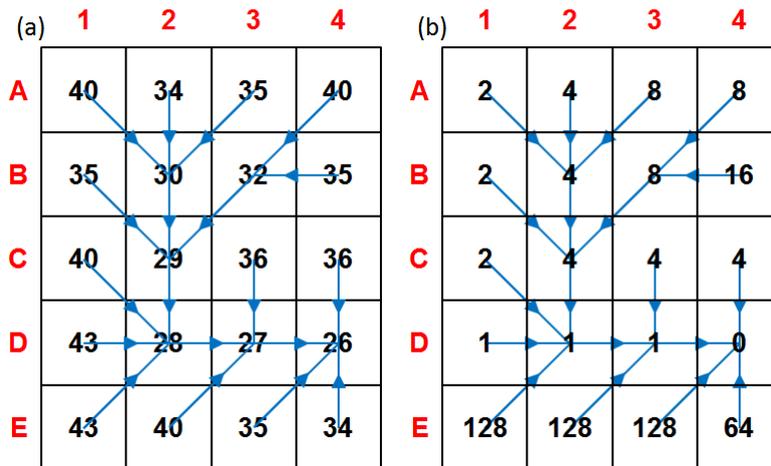
Figura 2.3 - Exemplo de codificação das direções de fluxo.



Fonte: Produção do autor.

Normalmente é utilizado potência de base dois para codificar as direções de fluxo. Desta forma é possível representar múltiplas direções de fluxo. Para isto basta somar os valores das codificações correspondentes. Por exemplo, caso se queira representar as direções de fluxo da célula B2 para as células B1 e C1, basta somar os códigos 16 e 8 correspondentes. Neste caso a direção de fluxo da célula B2 seria 24 (16+8). Vale ressaltar que o método D8 não utiliza múltiplas direções de fluxo. A Figura 2.4 apresenta um exemplo de grade de direções de fluxo geradas pelo método D8 seguindo a codificação apresentada na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Exemplo de grade de direções de fluxo gerada pelo método D8.



(a) As setas em azul representam as direções de fluxo para cada célula do MDE.

(b) A grade de direções de fluxo correspondente segundo a codificação apresentada anteriormente.

Fonte: Produção do autor.

O código 0 (zero) representa um fosso. O fosso é uma célula onde não foi possível definir uma direção de fluxo. Isto acontece em áreas planas ou em mínimos locais em um MDE. Na maioria das vezes os fossos são artefatos criados no processo de geração do MDE e fazem com que direções de fluxo não representem as características reais do terreno. Segundo Lindsay e Creed (2005), o único método que realmente confirma se um fosso é real ou não, é a inspeção de solo, o que é muitas vezes inviável quando não impraticável. O problema é que os fossos impedem o cálculo dos produtos dependentes das direções de fluxo, como as redes de drenagem por exemplo. Por esse motivo, é uma prática comum remover todos os fossos de um MDE, antes de se definir as direções de fluxo. O processo de remoção dos fossos é chamado de correção do MDE e o resultado desse processo é um MDE hidrológicamente consistente ou, também chamado de MDE corrigido.

O processo de correção altera os valores de altimetria do MDE original. Essa modificação é feita de forma a garantir que cada célula tenha ao menos uma célula adjacente com valor de altimetria menor do que sua própria altimetria, e possa assim determinar uma direção de fluxo.

Conforme a maneira como alteram o MDE, os métodos de correção podem ser classificados em três categorias: (1) Métodos que somente elevam as altimetrias, chamados métodos de preenchimento, pois preenchem os mínimos locais a fim de remover os fossos; (2) Métodos que diminuem as altimetrias, chamados métodos de escavação, pois “cavam” um caminho do fosso até uma célula com altimetria mais baixa do que a do fosso, ou que se localiza na borda do MDE e; (3) Métodos híbridos que podem tanto preencher quanto cavar o MDE, dependendo de um determinado critério. Os métodos híbridos têm o objetivo de minimizar as alterações no MDE original.

Cada abordagem tem suas vantagens e desvantagens, podendo alterar mais ou menos o MDE, ser mais simples ou complexa de implementar, ou resultar em direções de fluxo que representam melhor ou pior as características topológicas do terreno.

Na maioria dos métodos esse processo é realizado antes da definição das direções de fluxo. Porém em alguns métodos não é possível separar a etapa da correção do MDE da etapa da definição das direções de fluxo. Por exemplo, Morris e Heerdegen (1988) não gera o MDE hidrológicamente consistente. As correções são feitas somente na grade de direções de fluxo. Grande parte dos métodos que preenchem o MDE não corrige todos os fossos. Nesses casos são corrigidos somente os fossos de mínimos locais; as áreas planas não são corrigidas. E na tentativa de corrigir um fosso podem-se criar áreas planas artificiais que não existiam no MDE original. Ou seja, o MDE corrigido não é totalmente hidrológicamente consistente. Isto sobrecarrega a etapa de definir as direções de fluxo, pois é necessário utilizar alguma heurística para que se possam definir as direções de fluxo nas áreas planas.

Idealmente a diferença entre o MDE corrigido e o original deve ser mínima, mas devido aos processos envolvidos, na sua geração um MDE possui erros. A correção dos fossos provavelmente vai introduzir mais erros podendo fazer com que o MDE deixe de representar características topológicas importantes do terreno. Lindsay e Creed (2005) concluíram

que os métodos de correção de fossos impactam na distribuição espacial e na estatística das altimetrias e, conseqüentemente, nos atributos geomorfológicos derivados do MDE. Para uma revisão de atributos geomorfológicos veja Shary et. al, 2002.

Para remover alguns fossos, utilizar a abordagem de preencher o MDE pode resultar em menos alterações do que utilizar a abordagem de cavar. E para remover outros, o contrário. Os métodos híbridos de correção tentam utilizar a abordagem que causa menos alterações para remover cada fosso. Dependendo do método híbrido, esse ainda pode preencher ou cavar o MDE para remover um mesmo fosso, por exemplo, o método proposto por Soile (2004). O ponto negativo dos métodos híbridos é relacionado a complexidade de implementação e normalmente consumir mais tempo de processamento do que métodos que só cavam ou preenchem o MDE.

Atualmente diversos avanços foram alcançados no processo de eliminação de fossos. Entre esses avanços Barnes et. al, (2014) e Bai et. al (2015), propuseram métodos de preenchimento de fossos com complexidade $O(N \log N)$. E Zhang et. al (2017) alcançou avanços significativos no problema de definir direções de fluxo em áreas planas. Ainda existem métodos que não precisam corrigir os fossos para extrair redes de drenagens de MDE. Utilizam o MDE sem nenhum pré-processamento como os métodos propostos por Rueda et. al (2013), Zheng et. al (2015) e Schmidt et. al (2017). Porém, estes métodos não se encontram implementados em softwares disponíveis no mercado e/ou de código aberto.

Depois de corrigir o MDE e definir as direções de fluxo, o próximo passo é calcular a área de contribuição para cada célula do MDE. Depois desse procedimento, a rede de drenagem pode ser extraída.

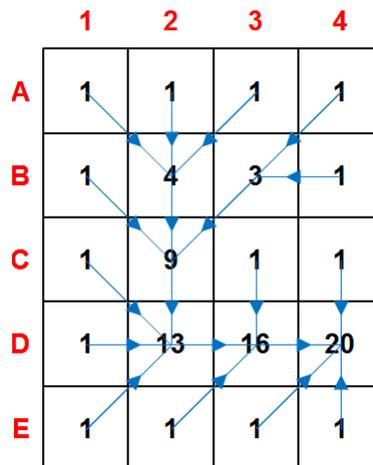
2.1. Área de contribuição

A área de contribuição é toda a área que se encontra a montante de um determinado ponto do terreno. No D8 o valor de área de contribuição é

calculado para cada célula do MDE. Para facilitar cálculos e diminuir o tempo de processamento, normalmente o valor de área de contribuição é adimensional considerando que cada célula do MDE tem o valor de área igual a um. Em outras palavras, normalmente o valor de área de contribuição é calculado em número de células.

A área de contribuição de uma célula é calculada somando o número de células que, seguindo as direções de fluxo, chegam até a célula em questão, somando ainda mais um pelo valor de área de contribuição da própria célula. Na Figura 2.5, o valor de área de contribuição da célula (C, 2) é 9 pois, as células (A, 1); (A, 2); (A, 3); (A, 4); (B, 1); (B, 2); (B, 3) e; (B, 4) drenam até (C, 2) o que resulta em 8 mais 1 pelo valor de área de contribuição da própria célula.

Figura 2.5 - Exemplo de grade de área de contribuição.



Os números representam o valor de área de contribuição em número de células.

Fonte: Produção do autor.

O resultado é uma grade com as mesmas dimensões e resolução do MDE. Cada célula dessa grade armazena o valor de área de contribuição para a célula correspondente do MDE.

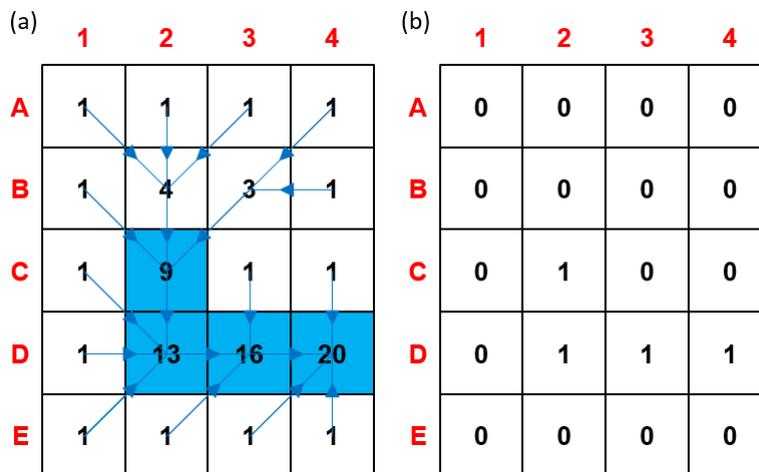
2.2. Redes de drenagem

O último passo do D8 é definir quais células do MDE pertencem à rede de drenagem. Isto é feito com base em um limiar de área de contribuição.

Toda célula que tiver valor de área de contribuição maior que esse limiar é considerada como parte da rede de drenagem.

A Figura 2.6 (a) mostra um exemplo de grade de área de contribuição, com as células pertencentes à rede de drenagem destacadas em azul. Neste exemplo foi considerado como limiar de área de contribuição o valor oito (8). A Figura 2.6 (b) mostra a grade de redes de drenagem resultante.

Figura 2.6 - Exemplo de grade de redes de drenagem.



Fonte: Produção do autor.

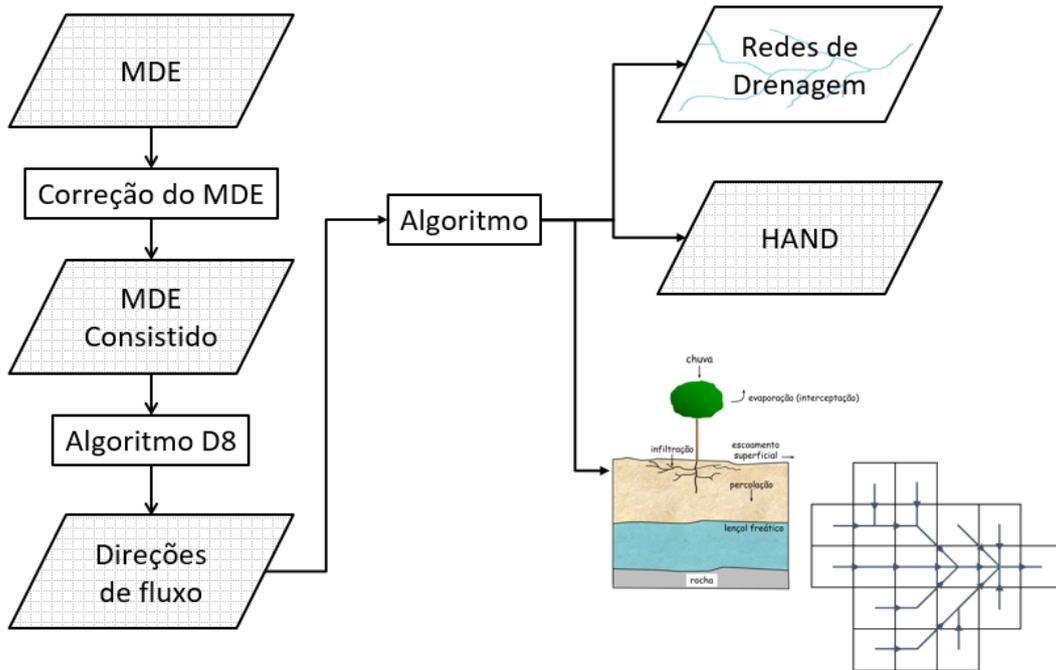
O resultado também é uma grade com as mesmas dimensões e resolução do MDE. Cada célula dessa grade armazena um entre dois valores. Normalmente 0 (zero) e 1 (um), onde um dos valores (normalmente o 1) representa as células que pertencem à rede de drenagem. Esse resultado muitas vezes é convertido para a representação vetorial melhorar a visualização e a em sistemas de informação geográfica e portabilidade.

2.3. Notas sobre o método geral

É possível afirmar que a correção dos fossos é o processo mais importante do método geral, pois é esse o passo que altera os resultados para as direções de fluxo em métodos distintos com a consequente produção de diferentes redes de drenagem e outros produtos derivados.

As redes de drenagem foram utilizadas neste trabalho para comparar a qualidade das direções de fluxos obtidas por diferentes métodos. A Figura 2.7 apresenta o fluxograma que resume a método geral para a obtenção de redes de drenagem.

Figura 2.7 - Fluxograma do método geral para extração de redes de drenagem.



Fonte: Produção do autor.

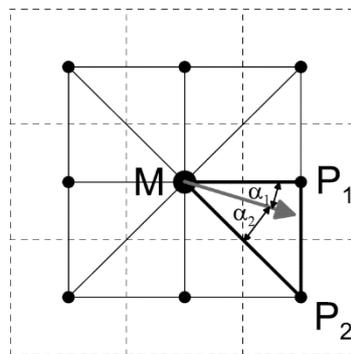
2.4. Limitações do algoritmo D8

A principal vantagem do algoritmo D8 é sua simplicidade de implementação e velocidade de processamento para extrair os atributos derivados como as redes de drenagem, por exemplo. Porém, assumir uma única direção de fluxo para cada célula tem suas limitações. Essa abordagem tende a concentrar a área de contribuição em linhas distintas criando padrões não naturais (Figura 2.9a) ou em casos que existe uma bifurcação natural do fluxo como em caso de ilhas em um rio. Para resolver as limitações do D8 foram propostos métodos que permitem múltiplas direções de fluxo. Esses métodos distribuem o fluxo de uma célula para uma ou mais células adjacentes. Em outras palavras cada célula pode ter mais de uma direção de fluxo e sua área de contribuição pode ser distribuída para mais de uma célula adjacente.

Quinn, P. et al. (1991) propôs o algoritmo MD8 (múltiplo D8) que distribui o fluxo para uma ou mais células adjacentes, ponderado pela declividade à cada célula adjacente. Essa abordagem tende a produzir padrões espaciais mais naturais e funciona bem para áreas planas. No entanto, em encostas, o fluxo tende a divergir produzindo resultados indesejados (Figura 2.9b).

Nos algoritmos D8 e MD8, as possíveis direções de fluxo são discretas em oito direções separadas por 45°. Tarboton (1997) propôs o algoritmo Dinf (infinitas direções) onde a direção de fluxo não é mais discreta e tem infinitas possibilidades (de 0° a 360°). A direção de fluxo é calculada com base em oito faces triangulares tridimensionais definidas pelo centro da célula e dos centros das células adjacentes como pode ser observado na Figura 2.8. A direção de maior declividade entre as oito faces é então escolhida como direção de fluxo do pixel analisado. Depois de definida a direção do fluxo a área de contribuição é distribuída para uma ou duas células vizinhas, ponderadas pelo ângulo da direção de fluxo com as arestas da face triangular de maior declividade.

Figura 2.8 - Algoritmo Dinf.

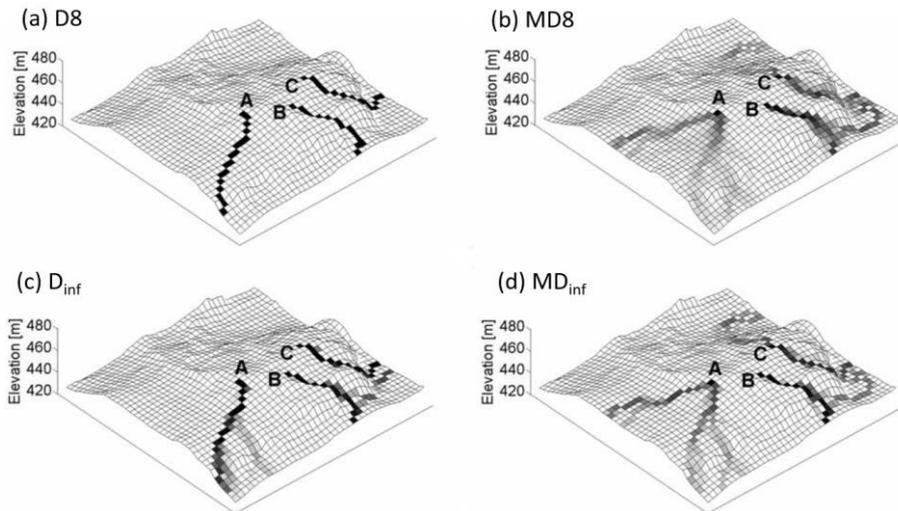


Fonte: Seibert e McGlynn (2007)

O algoritmo Dinf foi proposto para resolver o problema de dispersão encontrado no MD8. No entanto o Dinf tem a tendência de concentrar o fluxo em uma direção uma vez que a área de contribuição é distribuída somente a uma ou duas células adjacentes (Figura 2.9c). Seibert e McGlynn (2007) propuseram o algoritmo MDinf (múltiplas infinitas direções) que combina as vantagens do MD8 e do Dinf. Essa abordagem

é uma evolução do Dinf e considera todas as faces triangulares que têm declividade positiva (no sentido da gravidade). A área de contribuição é então distribuída ponderada pela declividade entre as faces triangulares e pelo ângulo (da mesma forma do Dinf) para cada face triangular.

Figura 2.9- Comparação dos métodos para definir direções de fluxo.



Fonte: Adaptado de Seibert e McGlynn (2007).

Os resultados do cálculo da área de contribuição usando o algoritmo MDinf (Figura 2.9d) parece gerar um padrão mais natural do que os outros algoritmos nas áreas de encostas como pode ser visto na Figura 2.9.

Mesmo com as limitações do método D8, Nardi et al. (2008) concluiu que não existem diferenças significativas entre utilizar múltiplas ou única direção de fluxo em encostas. O autor afirma que o método de correção do MDE influencia mais do que a escolha do método de direção de fluxo para extração de atributos morfológicos, tanto em encostas como em áreas planas. E, por fim, que métodos que utilizam única direção de fluxo são mais adequados para a caracterização de redes de drenagem.

Pelas as razões abordadas o algoritmo D8 é o método mais utilizado para definir direções de fluxo e o escolhido como base deste trabalho. O próximo capítulo apresenta o método proposto para definir as direções de fluxo e obter a rede de drenagem.

3 MÉTODO COMPUTACIONAL PROPOSTO

O método geral para extração de redes de drenagem de um MDE pode ser resumido em quatro etapas. A primeira etapa é corrigir o MDE para eliminar os fossos e gerar o MDE hidrológicamente consistente. Na segunda etapa o MDE hidrológicamente consistente é utilizado para definir as direções de fluxo de cada célula. Na terceira etapa as direções de fluxo são então utilizadas para calcular a área de contribuição de cada célula. E por fim, na quarta e última etapa, é definido um limiar de área de contribuição e todas as células que têm área de contribuição maior ou igual do que esse limiar é considerado como parte das redes de drenagem do MDE.

O método proposto neste trabalho tem como base o método geral. Seu objetivo principal é produzir menores modificações no MDE original durante a etapa de correção dos fossos, para que se consiga gerar uma grade de direções de fluxo que represente o melhor as características topológicas naturais do terreno. O MDE resultante do método proposto é totalmente sem fossos, com as áreas planas corrigidas. Além disso, o método proposto deve ser capaz de processar grandes volumes de dados de forma que possa ser aplicada em grandes bacias hidrográficas em escala regional, transnacionais e/ou globais.

A seguir, cada etapa do novo método é descrita mostrando as inovações contidas no desenvolvimento deste trabalho.

3.1. Correção do MDE

A correção do MDE é feita alterando-se as altimetrias do MDE de forma a garantir que toda célula tenha pelo menos uma célula adjacente com altimetria menor. Esta regra não se aplica as bordas da grade retangular do MDE e nem para as células que estão adjacentes ao oceano.

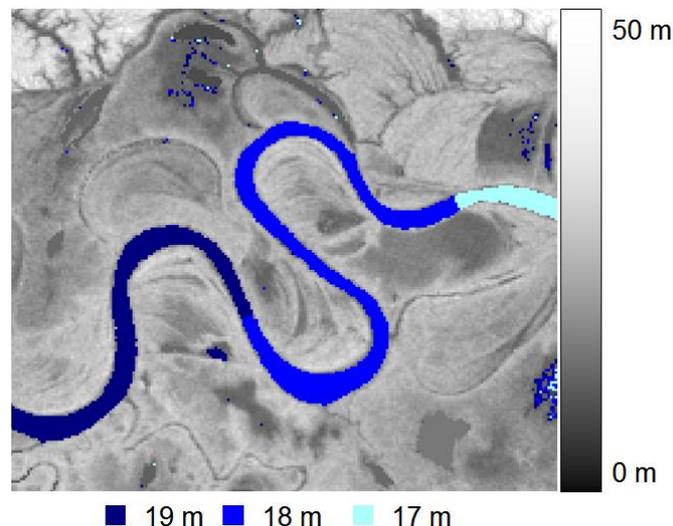
A correção do MDE é a primeira etapa do método geral e, neste trabalho, esta etapa é subdividida em três fases. A primeira fase identifica as áreas planas presentes no MDE e “cava” essas áreas em forma de “v”. A

segunda fase resolve os chamados fossos simples (que serão explicados mais adiante) por preenchimento. A terceira e última fase resolve os fossos restantes (fossos complexos) cavando um caminho até uma célula de saída utilizando o algoritmo *Priority First Search* (PFS - SEDGEWICK, 1992). O objetivo dessa divisão é minimizar as alterações necessárias no MDE para corrigir os fossos e garantir melhor qualidade das direções de fluxo. Esta é um método híbrido proposto para correção do MDE.

3.1.1. Primeira fase: áreas planas

É normal que os MDE possuam áreas planas. Normalmente essas áreas são rios cuja largura excede a resolução horizontal do MDE, como o caso dos dados provenientes do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER). As áreas planas são aglomerados de células adjacentes com o mesmo valor de altimetria. Normalmente as áreas planas formam uma espécie de escada ao longo de um rio, com o degrau mais alto mais a montante, como pode ser observado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Recorte de dado SRTM de três segundos de arco da região do Rio Purus.



O Rio Purus está destacado em tons de azul. É possível identificar visualmente a área plana em forma de degraus ao longo do rio.

Fonte: Produção do autor.

Idealmente as linhas de drenagem deveriam seguir a calha do rio. Como não é possível inferir exatamente a localização da calha do rio no MDE, uma boa aproximação é fazer com que as linhas de drenagem passem pelo centro do leito do rio. Vale ainda ressaltar que todas as células pertencentes às áreas planas são fossos que vão consumir tempo de processamento para serem corrigidos.

Com a finalidade de diminuir o número de fossos e fazer com que a rede de drenagem passe pelo centro do rio foi proposto cavar as áreas planas em forma de “v” das bordas para o centro.

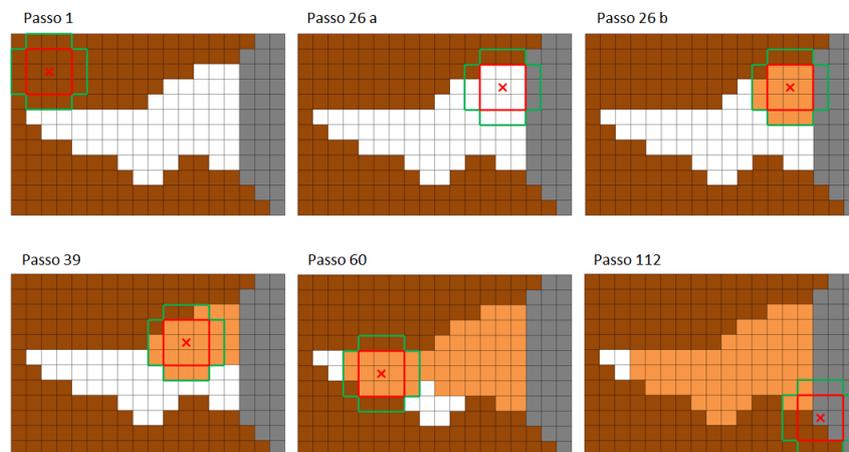
O primeiro passo desse algoritmo é identificar as áreas planas. Poderia ter sido usado um algoritmo de segmentação por crescimento de regiões. Porém, algoritmos de segmentação de imagens são, em geral, computacionalmente custosos. Este trabalho propõe uma solução mais simples: utilizar um de filtro de imagem.

A Figura 3.2 representa um MDE onde as células em marrom representam a área não plana, ou seja, células com valores diferenciados de altimetria. As células em branco representam uma área plana (neste caso um rio) onde todas as células têm o mesmo valor de altimetria. As células em cinza representam o valor nulo de altimetria (onde o MDE não deve ser processado). O valor nulo pode ser qualquer valor de altimetria não válido para área de estudo, como exemplo -32768 (valor utilizado pelos dados de SRTM). Este valor é normalmente utilizado para representar o oceano.

O algoritmo utiliza um filtro formado de duas partes. A primeira parte é o centro do filtro e tem a forma de um quadrado (Figura 3.2 linhas em vermelho). A segunda parte é uma geometria em forma de cruz (Figura 3.2 linhas em verde). O “x” em vermelho representa o centroide do filtro. O filtro é então posicionado no canto superior esquerdo do MDE (Figura 3.2 passo 1) e é deslocado da esquerda para direita e de cima para baixo até varrer todo o MDE. Antes de ser deslocado é verificado se as células da parte central do filtro (quadrado em vermelho) têm o mesmo

valor de altimetria. Caso essas células tenham o mesmo valor de altimetria todas as células internas ao filtro (linhas verdes em forma de cruz) e que têm o mesmo valor de altimetria que as células do centro são marcadas como área plana. Na Figura 3.2 passo 26 a foi verificado que todas as células da parte central do filtro têm o mesmo valor de altimetria. No passo 26b essas células foram marcadas como parte de uma área plana (laranja). Os passos 39 e 60 são exemplos de passos intermediários e o passo 112 é o resultado final do algoritmo onde todas as células em laranja foram marcadas como área plana.

Figura 3.2 - Identificando as áreas planas.



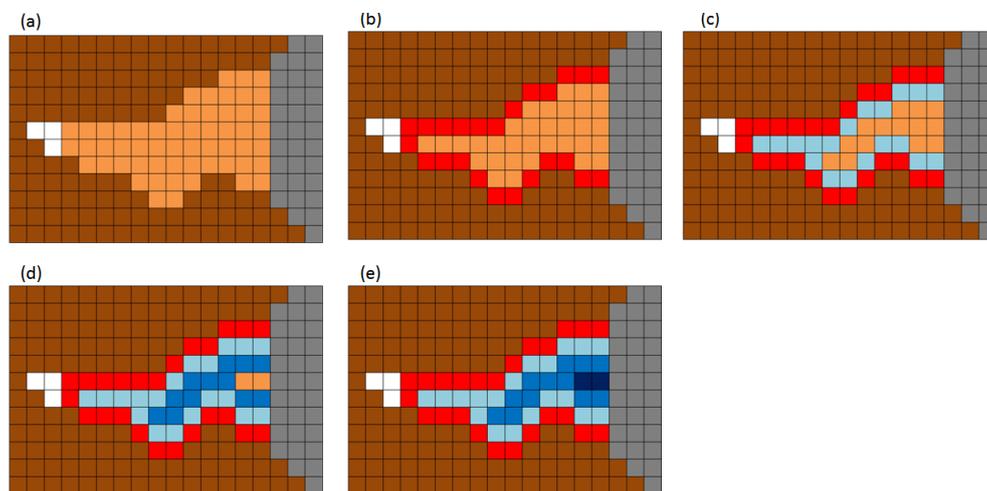
Fonte: Produção do autor.

Na Figura 3.2 é possível observar no passo 112 que sobraram algumas células não marcadas pelo algoritmo que pertencem à área plana (três células em branco). Porém essas células não farão diferença na etapa seguinte que é cavar essas áreas planas.

A Figura 3.3 mostra como deve ser cavada as áreas planas encontradas na etapa anterior. O primeiro passo é identificar a borda da área plana. Isto é feito considerando-se somente células adjacentes ortogonais. Em outras palavras, todas as células da área plana que têm uma célula adjacente ortogonal não marcada como área plana são marcadas como borda da área plana (Figura 3.3b). Note que as células que fazem fronteira com o oceano (células cinzas) não são marcadas como borda. O segundo passo é subtrair dos valores de altimetria das células de borda

um determinado valor de decremento. No caso do exemplo foi usado o 10^{-3} . Caso ainda existam células marcadas como área plana, aumentar o valor do decremento (para a segunda rodada $2 \cdot 10^{-3}$), desmarcar todas as células marcadas como borda e repetir o primeiro e segundo passo novamente. Este procedimento deve ser repetido até que não existam mais células marcadas como área plana. Note que o tratamento deve ser diferente caso uma célula de área plana faça adjacência com o oceano (valor nulo) ou com a borda do MDE. Observe que não foi cavado da borda que faz fronteira com o oceano para o centro, pois isto faria com que parte do rio corresse do oceano para o continente.

Figura 3.3 – Demonstração de como cavar as áreas planas em forma de "v".



Fonte: Produção do autor.

Esse pré-processamento diminui drasticamente o número de fossos no MDE. Isto melhora o desempenho geral do método, pois menos fossos deveriam ser resolvidos pelas fases seguintes. A próxima fase é resolver os fossos simples.

3.2. Segunda fase: fossos simples

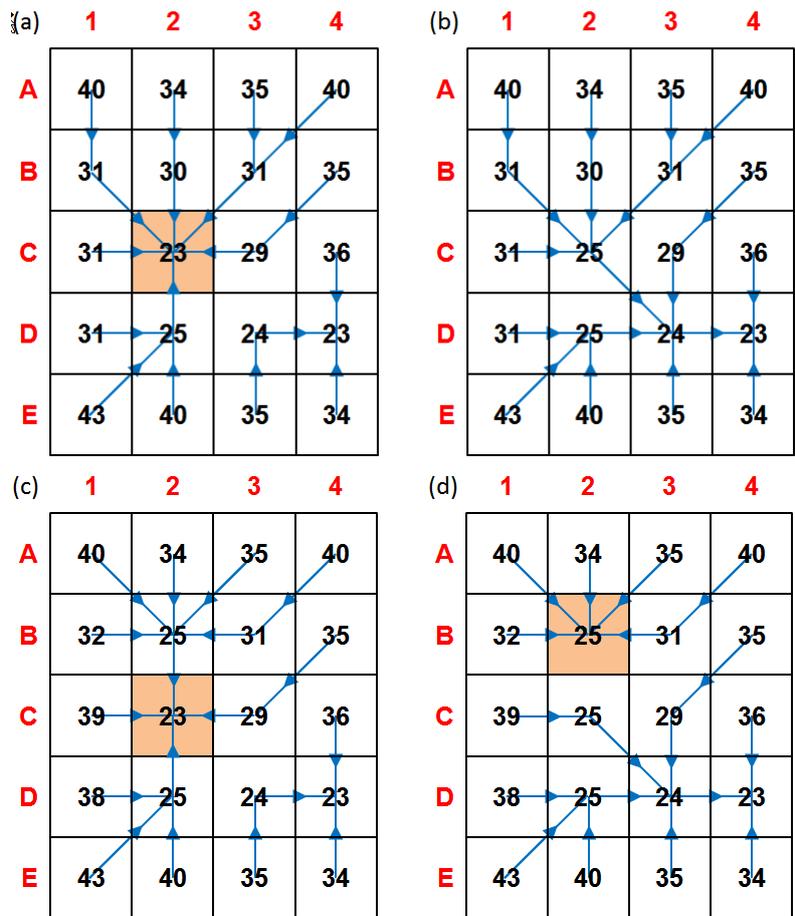
Idealmente o MDE deve ser minimamente modificado durante o processo de remoção dos fossos. E como já foi explicado, existe três abordagens para se remover um fosso: preencher, cavar ou os dois (híbrida). Destas abordagens a mais simples é preencher. O problema dessa abordagem é que ao se corrigir um fosso pode gerar um ou mais fossos nas células

adjacentes. E corrigir esses novos fossos gerados pode gerar ainda mais outros fossos. Isto pode se tornar um efeito em cascata. Este efeito em cascata cria áreas planas artificiais que não existiam no MDE original.

No entanto, alguns fossos, ao serem corrigidos pela abordagem de preencher, alteram somente uma única célula do MDE e não geram fossos vizinhos. Esses fossos são chamados de fossos simples (os demais de fossos complexos). Tendo em mente esse conceito de fosso simples foi proposta a segunda fase do processo de correção do MDE deste trabalho.

A segunda fase parte do pressuposto que toda célula fosso pode ser um fosso simples. Então é feita uma primeira tentativa de corrigir todas as células fosso. Os passos desta tentativa compreendem: substituir o valor de altimetria da célula fosso pelo valor de altimetria da célula adjacente mais baixa acrescido de um determinado valor. Nos testes foi utilizado 10^{-3} como valor de acréscimo. Porém, para melhor ilustrar esta ideia, neste exemplo foi utilizado o valor 1 (Figura 3.4 **a** e **b**). Verificar, depois da alteração, se alguma das células adjacentes é fosso (ou se tornou um fosso). Se nenhuma das células adjacentes for fosso, a operação é considerada bem-sucedida e a alteração feita no MDE corrigido é mantida. Caso qualquer uma das células adjacentes seja fosso, desfazer a alteração (Figura 3.4 **c** e **d**). Essa célula fosso é considerada um fosso complexo e será corrigida na próxima fase.

Figura 3.4 - Como resolver fossos simples.



Os números representam os valores de altimetria de um MDE. As setas em azul representam as respectivas direções de fluxo. As células marcadas em laranja são fossos. Em (a) a célula C2 é um fosso. Em (b) a altimetria da célula é substituída pelo valor de altimetria da célula adjacente mais baixa (D3) acrescido de 1. A célula C2 deixa de ser fosso e nenhuma célula adjacente é fosso, então o fosso foi resolvido e a modificação é aceita. Em (c) novamente a célula C2 é um fosso. Em (d) a altimetria da célula é substituída pelo valor de altimetria da célula adjacente mais baixa (D3) acrescido de 1. Porém a célula B2, adjacente ao antigo fosso (C2), passa a ser fosso. Portanto, o fosso é considerado não resolvido e as modificações no MDE são desfeitas, ou seja, o MDE passa a ter novamente a mesma configuração de (c).

Fonte: Produção do autor.

A ordem desse algoritmo é $O(N)$, onde N é o número de células fossos. Alguns métodos têm uma primeira fase chamada *de-pitting* (LINDSAY; CREED, 2005). O *de-pitting* é o processo de elevar a altimetria de todos

os fossos (normalmente é utilizada uma média das altimetrias das oito células adjacentes). A diferença entre o *de-pitting* e o processo proposto neste trabalho é que o *de-pitting* eleva altimetria de todas as células fossos, enquanto este método altera somente as altimetrias das células fossos que são eliminadas por esse processo sem gerar novos fossos. O *de-pitting* tenta suavizar o DEM tendo o mesmo efeito de um filtro passa baixa. Neste trabalho um dos objetivos é alterar menos possível o MDE resultante dessa operação, pois se a célula fosso não for resolvida pela abordagem de preencher, ela será resolvida pela abordagem de cavar.

3.3. Terceira fase: fossos complexos

Toda célula fosso que precisa alterar o valor de altimetria de mais de uma célula no MDE para ser removida é um fosso complexo. Na terceira e última fase é proposto corrigir esses fossos “cavando” um caminho até uma célula mais baixa, ou o oceano, ou a borda do MDE, ou seja, até encontrar uma célula de saída. O algoritmo para encontrar esse caminho é o ponto crítico dessa abordagem. É desejado que o algoritmo modifique minimamente o MDE ao mesmo tempo em que se deseja que essas modificações criem padrões naturais de direções de fluxo.

O algoritmo escolhido simula o caminho que a água faria para transbordar um fosso e escoar até encontrar a célula de saída. Esse também seria o caminho que modificaria menos o MDE, pois o comportamento físico da água faz com que ela flua pelas partes mais baixas do terreno e pelos caminhos mais curtos. Por estas razões foi adotada a estratégia de utilizar um algoritmo que imita esse comportamento físico da água para encontrar o caminho até a célula de saída.

O desafio que se apresenta agora é como desenvolver um algoritmo que encontre esse caminho de forma eficiente. É sabido que o MDE é representado computacionalmente por uma grade regular e é possível tratar a grade regular como um grafo.

Um grafo é um modelo matemático utilizado para estudar relações entre objetos (BERGE; MINIEKA, 1973). Nesse modelo os objetos são

representados por vértices e, as relações são representadas por arestas. Em outras palavras, um grafo é um conjunto de vértices conectados por arestas. Tanto os vértices quanto arestas podem ter atributos. Por exemplo, num mapa de rotas aéreas, os vértices representam os aeroportos e têm como atributo o nome do aeroporto. As arestas representam as rotas aéreas que ligam dois aeroportos e têm como atributo a distância entre esses aeroportos.

Para tratar o MDE como um grafo, basta considerar que cada célula da grade é um vértice, que esse está conectado à suas oito células adjacentes, e que cada conexão é uma aresta. A grade regular tem ainda a vantagem de não precisar de uma lista de adjacência para armazenar as ligações entre os vértices, pois a relação de vizinhança já está explícita (cada célula está ligada com suas oito células adjacentes).

A vantagem de tratar o MDE como um grafo é poder utilizar os algoritmos existentes da teoria de grafos. Um desses algoritmos é o *Priority First Search* (PFS). O PFS é um algoritmo usado para se encontrar o caminho de menor custo entre dois vértices de um grafo (SEDEWICK, 1992). O algoritmo tem como parâmetro de entrada o vértice inicial, ou seja, de onde o algoritmo inicia a busca (no caso do exemplo das rotas aéreas, o aeroporto de partida). E os atributos ou condições que o vértice final deve preencher (por exemplo, o nome do aeroporto de destino). O custo é o valor associado ao caminho entre dois vértices do grafo. Pode ser um único valor ou um conjunto de valores (por exemplo, distância e/ou consumo de combustível). O algoritmo faz uso de uma função de prioridade para comparar o menor custo entre dois caminhos. A função de prioridade retorna um valor verdadeiro ou falso, dependendo se o caminho A tem maior prioridade (menor custo) que o caminho B. Essa prioridade é calculada com base nos atributos das arestas e vértices de cada caminho.

O algoritmo começa analisando o vértice inicial. Então os vértices adjacentes a esse são adicionados a uma fila de prioridade e marcados como verificados (para não serem analisados novamente). Nessa fila os

vértices estão sempre ordenados do menor custo (maior prioridade) para o maior custo (menor prioridade). O algoritmo verifica então se o vértice do início da fila preenche os requisitos necessários para ser o vértice final. Caso seja o vértice final o algoritmo chegou ao fim com sucesso. Caso contrário retira-se o vértice do início da fila e o processo se repete a partir desse vértice. Podem existir outros critérios de parada como, por exemplo, quando todos os vértices forem marcados como visitados.

O exemplo a seguir ilustra como o algoritmo PFS foi utilizado, neste trabalho, para achar a célula de saída de um fosso. A Figura 3.5 representa um MDE onde a célula B2 é um fosso (célula contornada em vermelho). As células adjacentes foram então adicionadas na fila de prioridade e marcadas como verificadas (contornadas em verde). O PFS utiliza uma função de prioridade para definir, em um par de vértices, qual tem a maior prioridade. Lembrando que os vértices são as células do MDE.

A função de prioridade foi definida com base em duas comparações. Primeiro a célula com menor valor de altimetria tem maior prioridade. Caso as células tenham o mesmo valor de altimetria é feita uma segunda comparação como critério de desempate. O menor caminho (em número de células) da célula fosso até a célula em questão tem maior prioridade. Na fila de prioridade as células sempre estão ordenadas da maior prioridade no início da fila (mais acima), para menor prioridade no fim da fila (mais abaixo).

Na árvore de caminhos é adicionada a célula B2. A árvore de caminho armazena o caminho da célula fosso até a célula de saída, ao final do algoritmo PFS.

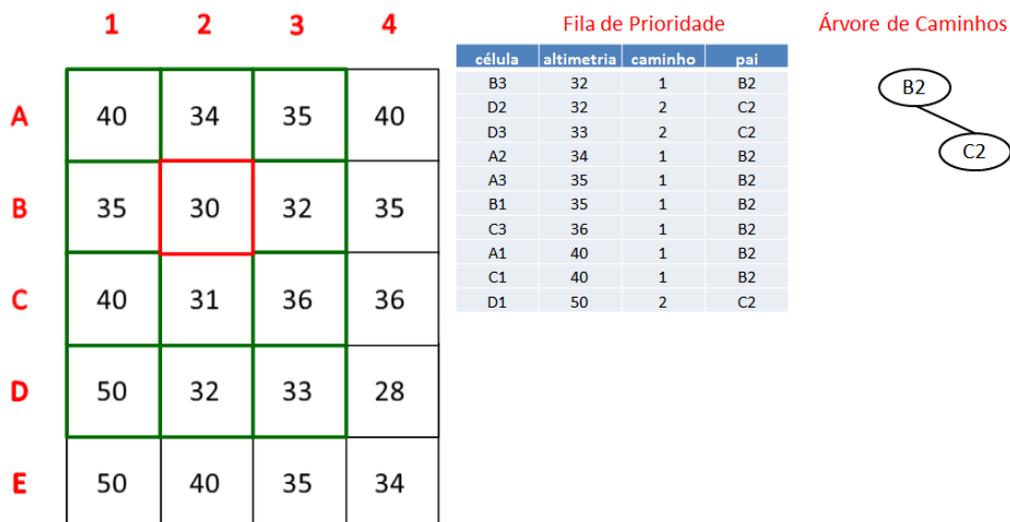
Figura 3.5 - Exemplo da utilização do PFS passo 1



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 3.5 a célula C2 tem a maior prioridade. Na Figura 3.6 essa célula é então retirada da fila de prioridade. São acrescentados á fila de prioridade as células adjacentes a C2 que ainda não foram verificadas: D1, D2 e D3. Essas células são contornadas em verde para indicar que já foram verificadas. A célula C2 é adicionada na árvore de caminhos embaixo de sua célula pai B2.

Figura 3.6 - Exemplo da utilização do PFS passo 2



Fonte: Produção do autor.

Observe na Figura 3.6 que linhas B3 e D2 da fila de prioridade têm o mesmo valor de altimetria. Porém o caminho até B3 é menor, portanto essa célula tem maior prioridade e está no início da fila.

Na Figura 3.7 a célula B3 foi retirada da fila de prioridade. As células adjacentes a B3 que ainda não foram verificadas (A4, B4 e C4) são adicionadas na fila de prioridade. Essas células são contornadas em verde no MDE para indicar que já foram verificadas.

A célula B3 é adicionada na árvore de caminhos no mesmo nível de C2, pois sua célula pai também é B2. O nível na árvore de caminhos está associado ao tamanho do caminho.

Figura 3.7 - Exemplo da utilização do PFS passo 3



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 3.7 a célula D2 tem a maior prioridade. Na Figura 3.8 a célula D2 foi retirada da fila de prioridade. As células adjacentes a D2 que ainda não foram verificadas (E1, E2 e E3) são adicionadas na fila de prioridade e marcadas como verificadas. A célula D2 é adicionada na árvore de prioridade abaixo de sua célula pai C2.

Figura 3.8 - Exemplo da utilização do PFS passo 4



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 3.8 a célula D3 tem a maior prioridade na fila. Na Figura 3.9 a célula D3 é então retirada da fila de prioridade. As células adjacentes a D3 que ainda não foram verificadas (D4 e E4) são adicionadas na fila de prioridades e marcadas como verificadas. A célula D3 é adicionada na árvore de prioridade abaixo de sua célula pai C2.

Figura 3.9 – Exemplo da utilização do PFS passo 5

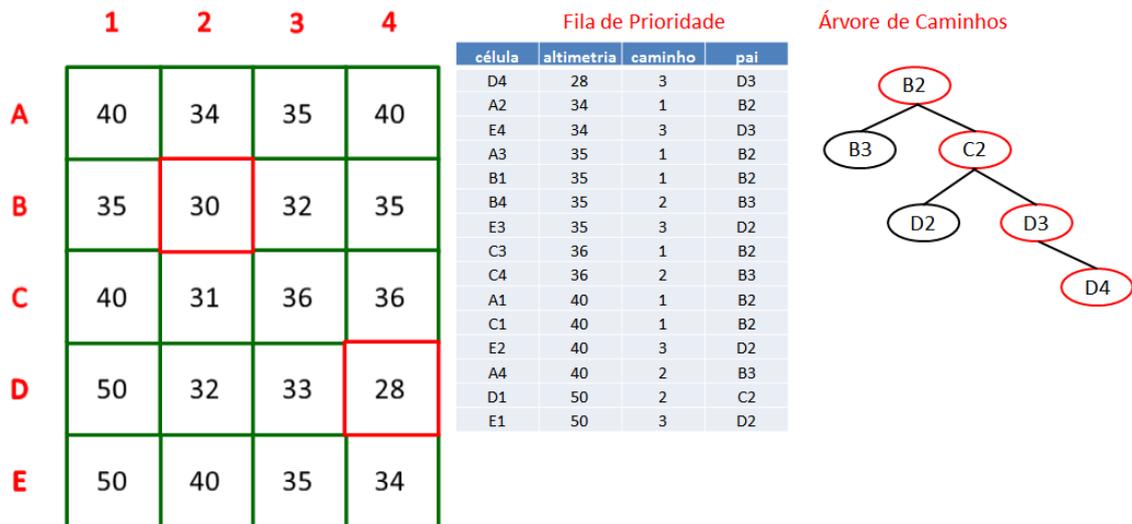


Fonte: Produção do autor.

Na Figura 3.9 a célula D4 tem maior prioridade na fila. Porém a célula D4 também tem menor valor de altimetria que a célula fosso. Portanto essa

uma das condições para o fim do algoritmo para encontrar a célula de saída. Na Figura 3.10 a célula D4 é adicionada na árvore de caminhos embaixo da sua célula pai D3. Subindo a árvore de caminhos a partir da célula D4 até atingir a célula B2 determina-se o caminho da célula de saída até a célula fosso (Figura 3.10 marcado em vermelho na árvore de caminhos).

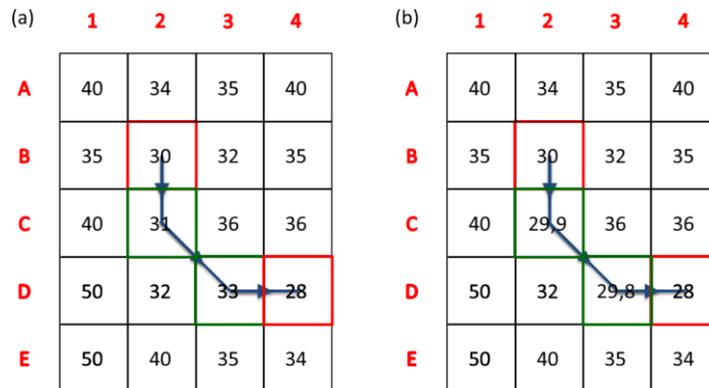
Figura 3.10 - Exemplo da utilização do PFS passo 6



Fonte: Produção do autor.

Depois de obter o caminho até uma célula de saída (Figura 3.11 a), o próximo passo é modificar o MDE para que o algoritmo D8 possa definir direções de fluxo da célula fosso até a célula de saída (Figura 3.11 b). Isto é feito criando-se um declive linear no perfil de altimetria do caminho da célula fosso até a célula de saída. Esse declive é feito da seguinte forma: a altimetria da célula fosso não é modificada. A próxima célula do caminho tem o valor de altimetria da célula anterior menos um valor de decremento previamente definido, neste exemplo 0,1 (nos testes foi utilizado 10^{-3}). Isto se repete até uma célula antes da célula de saída.

Figura 3.11 - Exemplo da utilização do PFS parte 7



Fonte: Produção do autor.

No processo de criar o declive pode acontecer que a última célula do caminho tenha valor de altimetria menor que a célula de saída. Por exemplo, se o valor de altimetria da célula D4 da Figura 3.11 fosse 29,9 ao invés de 28. A célula D4 continuaria sendo uma célula de saída, porém a célula D3 se tornaria uma célula fosso. Para evitar isso, o critério de parada do PFS muda de acordo com o tamanho do caminho. Portanto um dos critérios de parada do PFS é encontrar uma célula com valor de altimetria menor do que o valor de altimetria da célula fosso menos o valor de decremento (neste exemplo 0,1 e nos testes 10^{-3}) vezes o comprimento (número de células) do caminho.

Pode acontecer que no processo para encontrar a célula de saída o PFS encontre uma célula da borda do MDE ou uma célula sem valor de altimetria válido (valor nulo). Ambos os casos também são critérios de parada do algoritmo. Nesses casos, depois de criado o declive no perfil de altimetria das células do caminho, é verificado se a altimetria da célula de saída é maior ou igual que a altimetria da última célula do caminho. Caso seja verdade, o valor da célula de saída é alterado para o valor de altimetria da última célula do caminho menos o decremento.

Para cada célula fosso complexo, o PFS precisa armazenar as células que já foram verificadas e depois liberar essa área da memória do computador antes de começar a processar a próxima célula fosso. Uma das maneiras de se fazer isso é definir uma grade auxiliar com as

mesmas dimensões do MDE. Os possíveis valores dessa grade são zero (0) célula não verificada e, um (1) célula verificada. Essa grade deve ser iniciada com todos seus valores iguais a zero. Toda vez que uma célula do MDE for verificada pelo PFS a célula correspondente (mesma linha e coluna) da grade auxiliar tem seu valor alterado para um. Essa é a forma mais rápida marcar e saber se uma célula já foi verificada.

O problema dessa abordagem é que para cada fosso é necessário inicializar toda a grade auxiliar com zeros novamente. Isto pode consumir muito tempo de processamento dado o tamanho em linhas e colunas da grade. Se a grade ocupar mais espaço de memória principal do que a disponível, a grade então é dividida em blocos com um certo número de linhas e colunas. Parte desses blocos ficam armazenados em disco enquanto parte deles, que estão sendo utilizados no momento, ficam na memória principal. Vale lembrar que o acesso a disco é muito mais lento do que o acesso a memória principal. A TerraLib é responsável por gerenciar de forma eficiente esse tipo de acesso a dados em blocos que não podem ser carregados completamente na memória principal. Tanto o MDE quanto a grade auxiliar são divididos em blocos quando precisam de mais memória do que a disponível no computador para serem carregados. Conforme é necessário acessar um dado que está em um bloco, esse é carregado para memória. Quando o espaço de memória principal é insuficiente, os blocos que estão há mais tempo sem ser acessados são descartados para que novos blocos possam ser carregados para a memória principal.

Para evitar percorrer toda a grade auxiliar para cada célula fosso, essa grade é inicializada com zero em todas as posições uma única vez antes de remover o primeiro fosso utilizando o algoritmo PFS. Então, para cada fosso são armazenados os índices da maior e menor linha e coluna das células verificadas pelo PFS. Em outras palavras é armazenado o retângulo envolvente das células que foram verificadas para se remover um fosso. Antes de remover o próximo fosso basta “zerar” as células que se encontram dentro desse retângulo envolvente. No processo de remover um fosso tipicamente apenas um pequeno número de células é

verificado. Muitas vezes essas células já estão carregadas na memória principal, então essa abordagem além de “zerar” apenas um pequeno número de células evita acesso desnecessário a dados armazenados em disco.

Além da fila de prioridade e da grade auxiliar é utilizada também uma árvore para armazenar os caminhos temporários gerados pelo PFS antes de encontrar o caminho final até a célula de saída. A estrutura de árvore é utilizada para economizar memória, pois evita a redundância de informação. No exemplo anterior (Figura 3.10) foram armazenados 3 caminhos diferentes: Caminho 1 = {B2, B3}; Caminho 2 = {B2, C2, D2} e; Caminho 3 = {B2, C2, D3, D4}. Observe que a célula B2 se repete nos três caminhos (obviamente) e as células B2 e C2 se repetem nos caminhos 2 e 3. É necessário armazenar seus valores de linha e coluna de cada célula para posteriormente ajustar o MDE. Para se resolver um fosso podem existir inúmeros caminhos e esses serem longos. Portanto armazenar os caminhos sem uma estrutura adequada pode gerar uma redundância desnecessária de dados e ocupar muito espaço na memória principal.

O problema de utilizar a árvore de caminhos é apagar a árvore para liberar a memória principal antes de remover o próximo fosso. A abordagem mais fácil de implementar é que cada nó da árvore antes de se apagar apague seus nós filhos. Dessa forma bastaria apagar o nó raiz que a árvore se apagaria por completo. O problema dessa abordagem é que isso envolve recursividade e árvores muito grandes podem consumir toda memória livre com a pilha de recursividade. Para resolver este problema foi utilizado um vetor de ponteiros para os endereços de cada nó da árvore. Toda vez que um nó é criado este é automaticamente adicionado no vetor. Assim basta apagar todos os endereços de memória armazenados no vetor.

3.3.1. Eficiência computacional do método de correção dos fossos proposto

A complexidade algorítmica do algoritmo PFS é $O((E + V) \log V)$ (SEEDGEWICK, 1992), onde E é o número de arestas e V é o número de vértices. Adaptando de grafo para grade a eficiência do PFS no pior dos casos é $O(N \log N)$ onde N é o número de células. Note-se que o pior dos casos é quando existe um único fosso, que para ser resolvido, toda a grade do MDE deve ser verificada.

A complexidade algorítmica das outras etapas da correção de fossos é $O(N)$ para encontrar e cavar as áreas planas e $O(N)$ para remover os fossos simples. Sendo assim a eficiência computacional total do método é $O(N) + O(N \log N)$ que resulta em $O(N \log N)$.

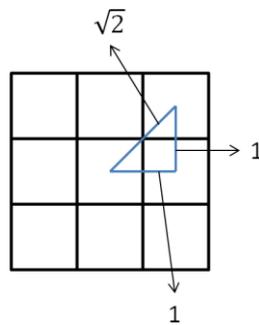
3.4. Direções de fluxo

Depois de se obter um MDE sem fossos o próximo passo é definir a direção de fluxo para cada célula do MDE. Para isso é calculada a declividade entre a célula em questão e suas oito células adjacentes. A direção aponta para a célula adjacente que obteve a maior declividade. A declividade é calculada pela Equação 3.1.

$$declividade = \frac{alimetria_{célula} - alimetria_{célula\ adjacente}}{distância_{entre\ as\ células}} \quad 3.1$$

O valor de declividade é utilizado somente para definir a direção de fluxo. Por este motivo não foi necessário calcular a distância real entre os centros da célula e cada célula adjacente utilizando a resolução horizontal do MDE. As distâncias entre as células foram adimensionalizadas para 1 para obter melhor desempenho computacional. Porém foi diferenciada a distância entre as células adjacentes ortogonais e diagonais. É definida a distância de 1 para células adjacentes ortogonais e $\sqrt{2}$ para células adjacentes diagonais (Figura 3.12).

Figura 3.12 - Distâncias ortogonal e diagonal.



Fonte: Produção do autor.

O algoritmo D8 original não especifica como tratar as células que têm valor nulo de altimetria. Nos MDE podem existir áreas onde não existe um valor válido de altimetria. Nessas áreas é utilizado um valor, por exemplo, -32768 para indicar que não se deve levar em consideração o valor de altimetria daquela célula. Esse valor é denominado valor nulo. Geralmente, nos MDE os valores nulos indicam o oceano. O algoritmo também não estabelece uma heurística para tratar os casos em que acontece de existir mais de uma célula adjacente com maior valor declividade. A seguir é descrito como este trabalho aborda essas situações.

3.4.1. Células adjacentes com valor nulo de altimetria

No calculo da direção de fluxo, caso a célula em questão tenha uma célula adjacente com valor nulo de altimetria é atribuído o valor de 10^{-3} para o calculo de declividade para essa célula. Isto foi feito, pois as células sem valor de altimetria válido normalmente representam o oceano. Portanto se uma célula de encosta não tiver uma célula adjacente com menor altimetria que ela, ela vai ter a direção de fluxo definida em direção ao oceano.

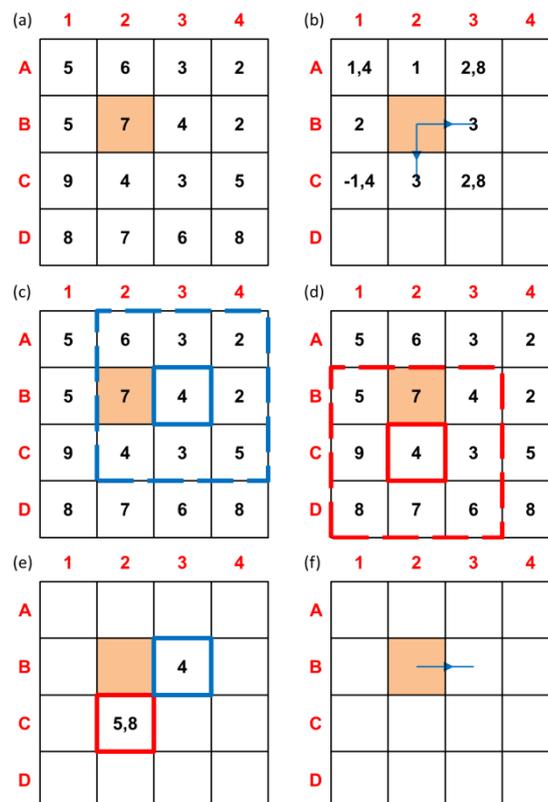
3.4.2. Empate para o maior valor de declividade

Pode ocorrer que o valor de maior declividade seja encontrado para duas ou mais células adjacentes, ou seja, um empate. Para resolver estes empates é levado em conta para onde o MDE está descendo mais. Para

isso foram calculadas as médias dos valores de altimetria das células adjacentes às células onde houve o empate. A direção de fluxo aponta então para célula que obteve a menor média.

A Figura 3.13 apresenta um exemplo de empate na tentativa de calcular a direção de fluxo da célula B2 (a). O empate ocorreu entre as células B3 e C2 (b). Foi então calculada a média das altimetrias das células adjacentes a B3 (c) e a média da altimetria das células adjacentes a C2 (d). A célula que obteve a menor média foi à célula B3 (e). Portanto a direção de fluxo da célula B2 aponta para célula B3 (f).

Figura 3.13 - Exemplo de empate no cálculo da direção de fluxo



Fonte: Produção do autor.

Não houve casos em que o empate persistiu nos testes realizados. Porém caso o empate persista, a direção de fluxo aponta para primeira célula adjacente da esquerda para direita e de cima para baixo.

3.5. Área de contribuição

O cálculo da área de contribuição utiliza como entrada a grade de Direções de Fluxo (DF) e apresenta como resultado a grade de Área de Contribuição (AC). A complexidade algorítmica é relativa ao número de leituras ou “visitas” realizadas nas células da grade DF.

Para detalhar o algoritmo proposto neste trabalho, será analisado inicialmente o algoritmo proposto por O’Callaghan e Mark (1984). Esse algoritmo tem complexidade algorítmica $O(N^2)$ conforme mostra o Pseudocódigo 1.

Pseudocódigo 1. Algoritmo para calcular a área de contribuição. A entrada do algoritmo é a grade DF e saída é a grade AC. A função próxima(d) (linha 6 e 9) retorna a célula p para qual a DF da célula d aponta, ou retorna nulo caso a célula d não possua DF definida (borda da grade ou oceano).

```
areaContribuiçãoD8( DF, AC )
01: para cada c em AC faça
02:   AC(c) = 0
03: fim para
04: para cada d em DF faça
05:   AC(d) = AC(d) + 1
06:   p = próxima(d)
07:   enquanto ( p != nulo ) faça
08:     AC(p) = AC(p) + 1
09:     p = próxima(p)
10:   fim enquanto
11: fim para
```

A complexidade algorítmica é calculada analisando-se as estruturas de repetição aninhadas nas linhas 4 e 7 do Pseudocódigo 1. A função da estrutura de repetição da linha 7 é visitar todas as células ao longo de um caminho seguindo as DF a partir de uma dada célula. Isto é feito para todas as células da grade DF. Como um mesmo caminho pode começar

de diferentes células da grade DF, então uma mesma célula será visitada mais de uma vez. Portanto o pior caso é se todas as células da grade DF formam um único caminho e o número de visitas realizadas é:

$$\sum_{n=1}^m n$$

Onde m é o número de células da grade DF. Portanto a complexidade algorítmica é $O(n^2)$.

Uma forma mais simples de calcular a área de contribuição de uma célula c é somar o valor de área de contribuição das células adjacentes (ortogonais e diagonais) cuja direção de fluxo aponta para a célula c . Neste caso a complexidade algorítmica poderia ser reduzida para $O(n)$. Para que isso seja possível é necessário garantir que os valores de AC dessas células adjacentes já tenham sido calculados previamente. Como essas células adjacentes sempre têm o valor de altimetria maior do que a célula c , então é possível garantir isso começando o cálculo de AC da célula mais alta para a mais baixa. O problema é que ordenar as células de um MDE também requer tempo de processamento e deve ser levado em conta no cálculo da complexidade algorítmica. Os algoritmos mais eficientes para ordenação têm complexidade algorítmica $O(n \log n)$. Portanto a complexidade algorítmica final é $O(n) + O(n \log n)$ que resulta em $O(n \log n)$.

Para garantir que os valores de área de contribuição das células adjacentes, cujas direções de fluxo aponta para uma célula c , sejam previamente calculados foi criado uma grade de conexões (CO). A grade CO armazena o número de células adjacentes cujas direções de fluxo aponta para a célula c , ou seja, o número de conexões para c .

O Pseudocódigo 2 mostra uma forma mais eficiente de calcular a grade CO. A primeira parte do algoritmo (linhas 1 a 3) é para iniciar a grade CO com zeros. A segunda parte do algoritmo (linhas 4 a 7) calcula o número de conexões de cada célula. Para cada célula da grade DF é calculada a

célula p para qual sua direção de fluxo aponta. É somado mais um para esta célula p na grade CO. Esse algoritmo tem complexidade $O(n)$.

Pseudocódigo 2. Algoritmo para calcular a grade de conexões. A entrada do algoritmo é a grade DF e a saída é a grade CO. A função *próxima(d)* (linha 5) retorna a célula p para a qual a DF da célula d aponta ou nulo caso a célula d não possua direção de fluxo definida (borda da grade ou oceano).

```
conexões ( DF, CO )
1: para cada c em CO faça
2:   CO(c) = 0
3: fim para
4: para cada d em FD faça
5:   p = próxima(d)
6:   CO(p) = CO(p) + 1
7: fim para
```

O novo algoritmo proposto para o cálculo da AC tem como entrada a grades de DF e CO, e retorna como saída a grade AC, conforme mostra o Pseudocódigo 3. O primeiro passo é inicializar uma grade AC com 1 (linhas 1 a 3). Então o cálculo de AC começa nas células que têm o valor de CO igual a zero (linha 5). O próximo passo é seguir o caminho formado pelas direções de fluxo dessa célula. Para cada nova célula desse caminho é somado o valor de AC da célula anterior (linhas 8 a 17). Esse processo se repete até encontrar borda da grade, o oceano, ou uma célula com valor de CO diferente de 1. Caso seja encontrada uma célula com valor de CO maior que 1 (linha 11 a 12), o algoritmo subtrai 1 do valor CO dessa célula, para de seguir o caminho formado pelas direções de fluxo, e recomeça o processo a partir da próxima célula que tem valor de CO igual a zero (linha 4).

Pseudocódigo 3. Novo algoritmo para calcular a grade AC. A entrada do algoritmo são as grades DF e CO e saída é a grade AC.

```
novoAreaContribuição( DF, CO, AC )
01: para cada c em AC faça
02:   AC(c) = 1
03: fim para
04: para cada d em CO faça
05:   se CO(d) == 0 então
06:     p = próxima(d)
07:     a = d
08:     enquanto ( p != nulo ) faça
09:       AC(p) = AC(p) + AC(a)
10:       se ( CO(p) > 1 ) então
11:         CO(p) = CO(p) - 1
12:         quebra
13:       fim se
14:       a = p
15:       p = próxima(a)
16:     fim enquanto
17:   fim se
18: fim para
```

Apesar de ter duas estruturas de repetição aninhadas nas linhas 4 e 8, esse algoritmo tem complexidade $O(n)$. A função da estrutura de repetição da linha 4 é visitar todas as células de CO. A função da estrutura de repetição da linha 8 a 16 é percorrer o caminho formado pelas direções de fluxo, mas somente para as células que tenham o valor de conexões igual a zero (linha 5). E como, cada um desses caminhos é percorrido somente uma vez, não há sobreposição de caminhos, e cada célula de DF é visitada somente uma vez. Portanto a complexidade algorítmica do Pseudocódigo 3 é $O(n)$.

A complexidade algorítmica do algoritmo proposto neste trabalho é a complexidade do Pseudocódigo 2 (grade CO) mais a complexidade do

Pseudocódigo 3 (grade AC). O que equivale a dizer $O(n) + O(n)$, ou seja, a complexidade final é $O(n)$.

3.6. Redes de drenagem

O procedimento final para se obter as linhas de drenagem é marcar as células que têm valor de área de contribuição maior que um determinado valor arbitrário especificado pelo usuário. Este é um procedimento simples de complexidade computacional $O(n)$.

No próximo Capítulo é apresentado o delineamento para a construção dos experimentos que serão utilizados para testar o método proposto em relação os diferentes métodos utilizados para extração das redes de drenagem a partir de MDE.

4 PROVA DE CONCEITO: DELINEAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Existem diferentes métodos para extração automática de linhas de drenagem. Todas elas são modificações em alguns algoritmos envolvidos nos passos descritos no método geral apresentado no Capítulo 2. Estes métodos estão implementados em softwares disponíveis no mercado e também podem ser encontradas em softwares livres com ou sem código aberto. Esses diferentes métodos produzem diferentes direções de fluxo e diferentes MDE hidrológicamente consistentes e, conseqüentemente, diferentes padrões de área de contribuição e de redes de drenagem. Como então estabelecer qual método produz os melhores resultados? Comparar as direções de fluxo seria o mais desejado, dado que as redes de drenagem e a área de contribuição são diretamente derivadas das direções de fluxo. Porém, não existe um dado de direção de fluxo de referência, um padrão ouro, estabelecido como verdade referenciada ao terreno, com o qual comparar as direções de fluxo extraídos dos diferentes métodos. Mesmo uma análise qualitativa traz problemas, dado ao grande número de células a serem analisadas. O mesmo se aplica à área de contribuição. Para que se possa testar o método proposto nesta Tese, um dado de referência foi estabelecido, um padrão ouro. Desta forma os métodos estabelecidos para comparação foram aplicados sobre um MDE comum e foram utilizadas duas métricas para comparar a qualidade dos resultados desses diferentes métodos: comparar as redes de drenagem resultantes de cada método, com o padrão ouro estabelecido e; os MDE hidrológicamente consistentes resultantes de cada método o com MDE original.

As redes de drenagem podem ser comparadas com uma rede de drenagem de referência de forma quantitativa. É possível inferir a distância entre as redes de drenagem extraídas e a de referência, como foi feito por Collischonn et al, 2010. As linhas de drenagem extraídas também viabilizam uma comparação qualitativa. É possível inferir onde a rede de drenagem deveria ocorrer observando o próprio MDE ou imagens de satélites.

O MDE hidrologicamente consistente também pode ser de interesse, pois, como foi dito antes, alguns atributos hidrológicos são extraídos diretamente dele. O processo de eliminação de fossos (muitas vezes chamado de correção do MDE) introduz erros no MDE. Lindsay e Creed (2005) ressaltam que muitos dos atributos hidrológicos são calculados utilizando-se uma janela de 3x3 células do MDE hidrologicamente consistente. Portanto a alteração na altimetria de uma célula do MDE resulta na alteração de nove valores de um atributo calculado com base numa janela 3x3. Nesses casos, ao se escolher um método, os que modificam menos MDE original têm maior preferência.

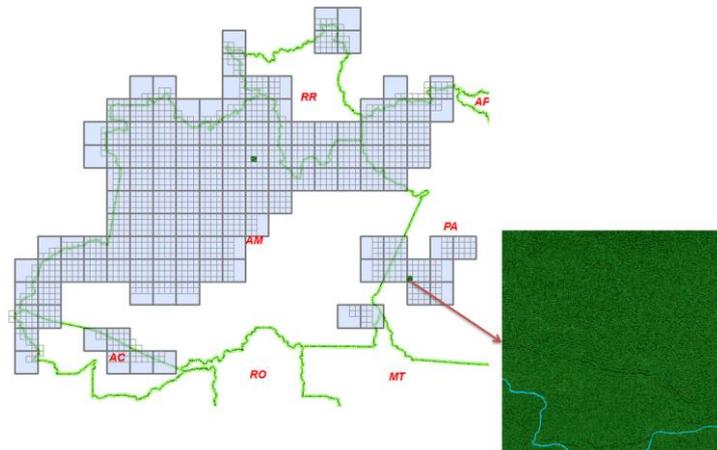
4.1. Dados e áreas de teste

Foram levados em conta dois critérios para se encolher as áreas de teste. O primeiro critério foi a disponibilidade de dados de redes de drenagem de alta resolução previamente extraídas de forma manual. Em outras palavras, a disponibilidade da drenagem de referência para possibilitar a comparação entre os métodos. O segundo critério foi escolher áreas que representassem os desafios de estudar as bacias hidrográficas no Brasil. Desafios que estão relacionados ao grande tamanho da área das bacias. Portanto foram escolhidas duas áreas de teste, ambas na região da floresta Amazônica.

Uma das áreas de teste foi escolhida devido à disponibilidade da rede de drenagem de referência. O programa Radiografia da Amazônia (OLIVEIRA et al., 2013), tem como principal objetivo mapear uma área de 1,8 milhões de Km² da floresta Amazônica que não possui informações cartográficas terrestres adequadas: o chamado “Vazio Cartográfico”. O programa, já em andamento, gera quase 20 mil produtos cartográficos, entre eles cartas topográficas, modelos digitais do terreno e modelos digitais de superfície. Uma das informações que estão contidas nas cartas topográficas são as redes de drenagem. Essas redes de drenagem são obtidas por especialistas da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) do Exército Brasileiro. Para certas folhas as redes de drenagens foram obtidas manualmente e para outras com ajuda de software. Foi

selecionado então uma área (MI-0935-3: código de referência do DSG, Figura 4.1) cuja drenagem foi obtida manualmente para que se pudesse fazer a comparação com as redes de drenagem extraídas dos diferentes métodos. Essa área se localiza perto do município Jacareacanga no estado do Pará, e compreende um trecho do Rio Crepori, um afluente da margem direita do Rio Tapajós. Para essa área foi utilizado o modelo digital de terreno e de superfície de cinco metros de resolução horizontal obtidos pelo programa Radiografia da Amazônia. Ambos MDE têm 5.847 linhas por 5.836 colunas. Também foi utilizado o SRTM de um segundo de arco (aproximadamente 30 metros de resolução horizontal) com 1.154 linhas por 1.151 colunas, para a mesma área.

Figura 4.1 – Primeira área de teste, trecho do Rio Crepori.



Fonte: Produção do autor.

A área de teste do trecho do Rio Crepori não representa uma aplicação real, pois não inclui toda a área da bacia hidrográfica do rio. Porém, a linha da rede de drenagem escolhida possibilita o teste em regiões onde a drenagem tem uma largura menor do que a resolução do MDE. A obtenção dessa rede de drenagem só foi possível com o auxílio da banda “P” dos dados de radar e um especialista da área.

Para analisar o desempenho do método em uma aplicação real foi escolhida a área que compreende a bacia do Rio Purus (Figura 4.2). A ideia inicial era extrair a drenagem para toda a área da bacia do Rio Amazonas. Embora o método proposto nesta Tese consiga executar o

procedimento, algumas dos métodos em comparação não conseguiram corrigir o MDE devido ao tamanho do dado e a capacidade de processamento no computador utilizado nos testes. Então a bacia do Rio Purus foi escolhida por ser um afluente do rio Amazonas e apresentar características de relevo similares às da bacia Amazônica. O MDE utilizado nesta área foi o SRTM de três segundos de arco (aproximadamente 90m de resolução horizontal) com 12.000 linhas por 15.600 colunas (retângulo em amarelo na Figura 4.2). A rede de drenagem de referência foi obtida utilizando-se imagens ópticas do Landsat 8.

Figura 4.2 - Segunda área de teste, Rio Purus.



Fonte: Produção do autor.

O retângulo em vermelho na Figura 4.2 representa uma área menor, mas suficiente, para se extrair a drenagem do Rio Purus dentro do território brasileiro. O SRTM de 90m para cobrir essa área possui 7.147 linhas por 11.169 colunas. Essa área menor foi utilizada por um dos métodos testados que não foi capaz de processar toda a bacia hidrográfica do Rio Purus.

4.2. Os métodos em comparação

Foram comparados os seguintes métodos para extração de linhas de drenagem:

(a) O método proposto nesta Tese, implementada no **TerraHidro** (ROSIM et al., 2003).

(b) O método proposto por Jenson e Domingue, (1988), implementado no produto **ArcGIS** 10.0 (ESRI, 2014). Segundo Planchon e Darboux (2001) a eficiência computacional desse método é $O(N^2)$. A abordagem utilizada para corrigir os fossos nesse método é o preenchimento. O método cria áreas planas que não existem no MDE original e não corrige as áreas planas que já existiam. É necessário, então, um algoritmo e, portanto, um processamento a mais para definir as direções de fluxo nas áreas planas. As direções de fluxo nas áreas planas tendem a criar linhas paralelas não naturais nos padrões de área de contribuição e redes de drenagem.

(c) O método de Lindsay e K. Dhun (2015) implementada no **Whitebox** Iguazu 3.2.1 (Lindsay, 2016). Tem como principal objetivo detectar automaticamente paisagens modificadas pelo homem, tais como pontes, viadutos e estradas, sem dados auxiliares. O MDE é modificado de tal forma a “cavar” um caminho para forçar o fluxo de água através desses objetos construídos pelo homem. O método corrige totalmente o MDE. O autor não argumentou sobre a complexidade algorítmica do método.

(d) O quarto método foi proposto por Planchon e Darboux (2001) e, implementado no **WhiteBox** Iguazu 3.2.1 (LINDSAY, 2016). Utiliza a abordagem de preenchimento, porém tem uma eficiência computacional melhor do que as duas citadas $O(N^{1,2})$. Tem a opção de corrigir totalmente o MDE ou, se for necessário, deixar áreas planas. Aqui também será necessário um processamento a mais para definir as direções de fluxos nas áreas planas.

(e) O método proposto por Garbrecht e Martz (1997) e implementada no **TauDEM** versão 5.1.2 (TARBOTON, 2003). Na verdade, o trabalho de

Garbrecht e Martz (1997) propõe uma solução para definir direções de fluxo em áreas planas que não crie linhas paralelas como o método proposto por Jenson e Domingue, (1988). O método de correção do MDE é exatamente o mesmo proposto por Jenson e Domingue, (1988). Portanto a eficiência computacional é $O(N^2)$ e o MDE não é corrigido totalmente.

(f) O método *Priority First Search* (PFS) implementado no **IDRISI** versão Selva 17.00. Utiliza a abordagem de cavar um caminho até uma célula mais baixa que o fosso. Utiliza um algoritmo desenvolvido para resolver problemas de menor caminho em grafos para encontrar a célula de saída (já explicado anteriormente). Tem eficiência computacional $O(N \log N)$ (JONES, 2002). Porém o software apresenta uma observação na documentação explicando que o tamanho máximo do MDE é de 32.000 linhas e colunas; isto é uma limitação desta implementação. Por esse motivo, o IDRISI não foi capaz de processar toda a área da bacia do rio Purus. Para não deixar este método de fora da comparação, foi utilizado um recorte menor do dado de SRTM de 90 metros para que o IDRISI pudesse extrair uma rede de drenagem. Vale ressaltar que para uma aplicação real, isto não seria aplicável, pois normalmente se deseja as direções de fluxo de toda área da bacia de um rio. O método corrige totalmente o MDE.

Para facilitar o entendimento, deste ponto em diante do trabalho será utilizado o nome do software respectivo para referenciar cada método explicado acima. Os dois métodos implementadas no WhiteBox serão diferenciadas pela abordagem utilizada para corrigir os fossos (cavar ou preencher). Portanto o método (a) TerraHidro; (b) ArcGIS; (c) WhiteBox-Cavar; (d) WhiteBox-Preencher; (e) TauDEM; (f) IDRISI. A Tabela 4.1 resume a comparação entre cada método.

Tabela 4.1 – Quadro comparativo dos métodos de correção de fossos

Autores	Software	Método de Correção	Corrige totalmente o MDE	Complexidade Algoritmo
	TerraHidro	Híbrido	Sim	$O(N \log N)$
Jeason e Domingue (1998)	ArcGIS	Preencher	Não	$O(N^2)$
Lindsay e Dhun (2015)	WhiteBox	Cavar	Sim	--
Planchon e Darboux (2001)	WhiteBox	Preencher	Sim	$O(N^{1,2})$
Garbrecht e Martz (1997)	TauDEM	Preencher	Não	$O(N^2)$
Sedgewick (1990)	IDRISI	Cavar	Sim	$O(N \log N)$

Fonte: Produção do autor.

4.3. Comparação das redes de drenagem

As redes de drenagem derivadas de cada método foram comparadas com uma rede de drenagem de referência. O método aplicado para essa comparação foi o mesmo utilizado por Collischonn et al, (2010). A ideia é sobrepor as linhas das redes de drenagem de referência e as linhas extraídas. São gerados polígonos onde a sobreposição das linhas definem regiões fechadas. A soma das áreas desses polígonos é considerada inversamente proporcional à concordância entre as linhas, ou seja, pode ser considerada a discordância entre as linhas.

Figura 4.3 - Ilustração do método de comparação entre linhas de drenagem.



Composição colorida de imagens de radar obtidas pela DSG de um trecho do Rio Crepori. Foram sobrepostas a drenagem de referência em vermelho e a drenagem extraída pelo ArcGIS em azul. Os polígonos formados em rosa quantificam a discordância entre as linhas de drenagens.

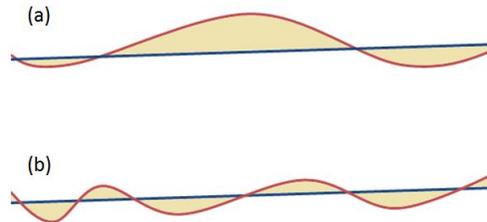
Fonte: Produção do autor.

Esse método de comparação tem dois problemas. O primeiro problema é obtenção de uma drenagem de referência; sendo que é impraticável obter uma verdade de campo para todo o comprimento de um rio utilizando-se inspeção de solo.

Para o segundo problema é necessário analisar o exemplo exposto na Figura 4.4. Imagine que para um mesmo MDE foram extraídas automaticamente as redes de drenagem pelo método A e pelo método B. Nesta Figura são apresentados os resultados das redes de drenagem pelas linhas em vermelho. Esses resultados são comparados com uma mesma rede de drenagem de referência (linhas em azul) segundo o

método anteriormente proposto. A soma das áreas para o método A é igual a soma das áreas calculadas pelo método B. Neste caso, não é possível definir qual rede de drenagem tem mais concordância com a rede de drenagem de referência segundo esse método de comparação.

Figura 4.4 - Comparando linhas de drenagem.

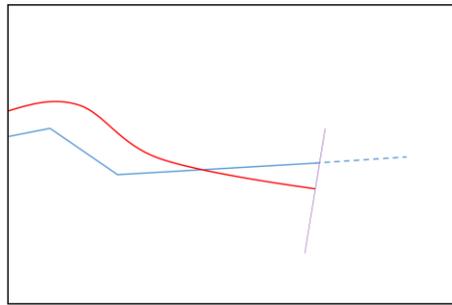


Fonte: Produção do autor.

Esse método de comparação só pode ser aplicado a uma única linha da rede de drenagem por vez, o que torna inviável a comparação de toda a rede de drenagem.

O parâmetro limiar de área de contribuição influencia diretamente na posição inicial (nascentes) das redes de drenagem extraídas por todos os métodos. Para que os testes ficassem independentes do limiar de área acumulada foi escolhido um limiar para gerar uma rede de drenagem mais comprida do que a drenagem de referência. Depois foi traçado uma linha perpendicular à nascente da drenagem de referência até as drenagens derivadas dos métodos (Figura 4.5). O mesmo foi feito com os exutórios das redes de drenagem.

Figura 4.5 - Definindo o começo (nascente) e o fim (exutório) das redes de drenagens derivadas de cada método.



A linha em vermelho é a drenagem de referência e a azul a drenagem extraída. Foi traçada uma linha perpendicular ao começo (nascente) da linha da rede de drenagem de referência até cruzar a linha da rede de drenagem derivada. A linha da rede de drenagem derivada depois do cruzamento (tracejada) foi descartada.

Fonte: Produção do autor.

Collischonn et al, (2010) faz uma segunda comparação utilizando um *buffer* no entorno da rede de drenagem de referência. O autor compara somente um trecho de rio. Como a largura do rio é mais ou menos a mesma em todo o trecho, é possível considerar uma largura constante. Neste caso, não são contabilizadas no somatório as áreas dos polígonos que se encontram dentro do *buffer*. No entanto neste trabalho nenhuma das áreas de teste têm a característica de possuir um rio com a mesma largura em todo o trecho analisado. Portanto essa estratégia de utilizar um *buffer* em torno do rio não foi utilizada neste trabalho.

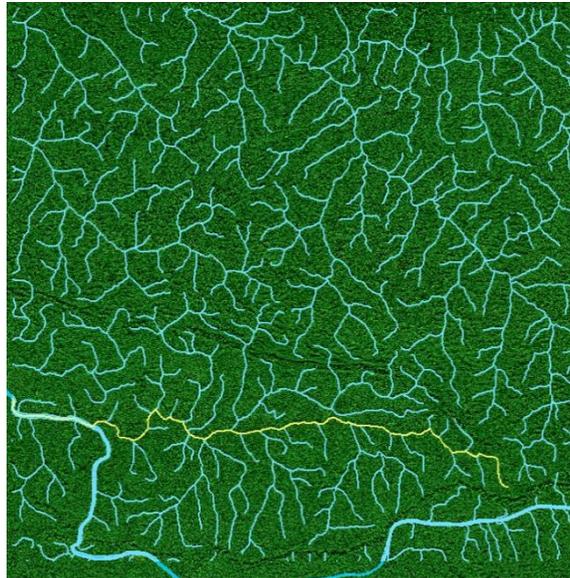
4.3.1. Obtendo a rede de drenagem de referência

A rede de drenagem de referência da primeira área foi obtida manualmente por especialistas da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) do Exército Brasileiro. Este foi um dos motivos de escolha dessa área para os testes.

A Figura 4.6 mostra a rede de drenagem obtida pelos especialistas em azul ciano. A linha em amarelo é a linha da rede de drenagem que foi escolhida para ser comparada com as redes de drenagens extraídas pelos métodos. Esta linha foi escolhida, pois apresenta parte da

drenagem onde a largura do rio é maior que a resolução do MDE e também contém drenagens de ordens mais baixas.

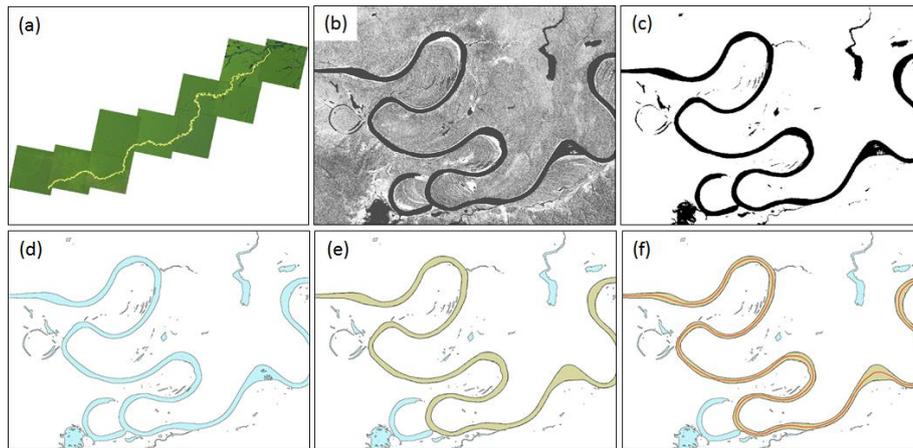
Figura 4.6 – Redes de drenagem de referência do Rio Crepori.



Fonte: Produção do autor.

Para a segunda área de teste foram utilizados um total de 10 imagens da banda 7 do satélite Landsat 8 para obter a linha de drenagem do Rio Purus (Figura 4.7a). Cada imagem foi segmentada em duas classes: corpos d'água e solo (Figura 4.7c). Os corpos d'água foram então vetorizados (Figura 4.7d) e editados de forma que sobrasse apenas o Rio Purus (Figura 4.7e). O último passo foi calcular a linha central que passa entre as duas margens do rio (Figura 4.7f). Essa linha central foi considerada a linha de drenagem de referência do Rio Purus.

Figura 4.7 - Obtendo a drenagem de referência para o Rio Purus.



Foram utilizadas 10 imagens do Landsat 8 (a). A banda 7 (b) foi classificada em corpos d'água e terra (c). Os corpos d'água foram vetorizados (d). Esse vetor foi editado para que sobrasse somente o polígono do rio Purus (e). O último passo foi calcular a linha central às margens do rio Purus (f).

Fonte: Produção do autor.

Definir a nascente de um rio não é um processo trivial e normalmente dois especialistas podem definir a nascente de um mesmo rio em regiões diferentes. Por isso, foi adotado utilizar somente a rede de drenagem do Rio Purus em território brasileiro.

4.4. Comparando os MDE original e corrigido

Como visto nas seções anteriores, os MDE normalmente possuem células onde não é possível definir uma direção de fluxo. Essas células são chamadas de fossos e na maioria das vezes são artefatos que não representam características reais do terreno que são gerados no processo de construção do MDE.

Toda alteração feita no MDE introduz erros no mesmo. Portanto, métodos que modificam menos o MDE são melhores do que os que modificam mais. Segundo Lindsay e Creed (2005), os métodos de correção alteram significativamente a distribuição espacial e estatística do MDE e dos atributos derivados dele. A escolha de um método deve ser levada em consideração, principalmente para pesquisas que utilizam MDE corrigido para modelagem hidrológica. Para quantificar a qualidade dos métodos de

correção, esses autores propuseram duas métricas baseadas nas diferenças entre o MDE original e o corrigido.

A primeira métrica é o Número de Células Alteradas (NCA). Mede a extensão do impacto horizontal causado no MDE. É uma simples contagem do número de células que tiveram o valor de altimetria alterado. Em outras palavras o número de células do MDE corrigido que são diferentes do MDE original. A segunda métrica é a Média Absoluta das Diferenças de altimetrias (MDA). Mede o impacto vertical causado no MDE. É a soma das diferenças absolutas entre o MDE corrigido e o original dividido pelo NCA. Neste trabalho o NCA foi calculado em porcentagem de células alteradas e o a MDA em metros.

4.5. Testes estatísticos

Os resultados obtidos nos testes realizados indicam que um método teve desempenho médio, melhor ou pior que outro método para toda área do MDE nas métricas analisadas, NCA, MDA e concordância com a drenagem de referência. Em outras palavras, os testes não mostram se um método “X” tem um desempenho muito bom em uma determinada área do MDE e desempenho ruim no restante. Eles mostram que, na média, um método teve desempenho melhor do que outro(s) método(s). Dessa forma esse método “X” pode não ser considerado melhor do que outros métodos, pois ter um melhor desempenho localizado não é, em geral, o que se procura. Em geral se procura um método que tenha um bom desempenho em toda área do MDE.

Outra preocupação é que, mesmo os testes informando que um método é melhor que o outro nas métricas analisadas, como afirmar que esse resultado é realmente significativo? Pode acontecer do método “A” ser melhor que o método “B” na média geral. Porém, se for analisada toda a área do MDE pode-se chegar à conclusão que o método “A” é melhor em determinadas áreas e o método “B” é melhor em outras áreas, podendo não ser possível afirmar que uma é melhor que a outra para todo MDE.

Em outras palavras, pode-se considerar que o método “A” obteve um desempenho igual ao método “B” em determinada métrica analisada.

Para analisar essas questões foram aplicados testes estatísticos nas métricas avaliadas. Os testes estatísticos servem para inferir se dois ou mais conjuntos de amostras foram extraídos da mesma população ou de populações distintas. Os testes estatísticos partem da hipótese nula, normalmente chamada de H_0 , onde se afirma que as amostras foram extraídas de uma mesma população. Primeiramente é definido um nível de significância para aceitar ou rejeitar a hipótese H_0 . O teste estatístico é então calculado com base nos conjuntos de amostras. Dependendo do resultado do cálculo e do nível de significância escolhido, se rejeita ou se aceita H_0 . Em outras palavras, e de forma resumida, os testes estatísticos servem para inferir se dois conjuntos de amostras são de fato diferentes.

No contexto desse trabalho, a hipótese nula (H_0) significa que os métodos obtiveram resultados muito parecidos para uma métrica e não se pode considerar que uma obteve resultado melhor que a outra. O nível de significância adotado foi de 5%. Portanto, se o valor calculado do teste for maior que esse valor, se aceita H_0 e não é possível considerar que um método é melhor que outra na métrica analisada.

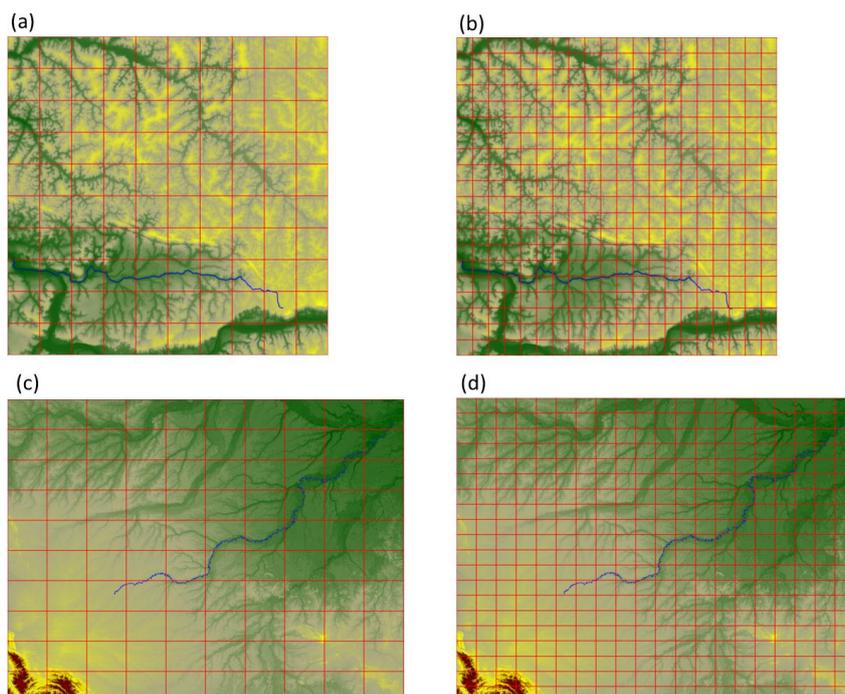
Os testes estatísticos são classificados em paramétricos e não paramétricos. Os testes paramétricos se baseiam em diversas hipóteses sobre as populações de onde foram extraídas as amostras, como por exemplo, que as populações tenham que ter uma distribuição normal e/ou que tenham que ter a mesma variância. Os testes não paramétricos são menos restritivos em relação aos parâmetros das populações analisadas. A principal vantagem dos testes paramétricos sobre os não paramétricos é que o primeiro exige um número menor de amostras do que o segundo para rejeitar H_0 se este é realmente falso. Em outras palavras, o erro associado aos testes paramétricos é menor do que o erro dos testes não paramétricos. Porém, se o número de amostras for suficientemente grande, é possível admitir que ambos os tipos de testes têm o mesmo erro associado. Como não foi possível definir as distribuições estatísticas

dos valores das métricas analisadas (NCA, MDA e concordância com a rede de drenagem), optou-se pela estatística não paramétrica.

Para que se pudesse realizar os testes estatísticos, as áreas foram divididas e cada divisão foi considerada uma amostra. Para os testes estatísticos dos valores de NCA e MDA, as áreas foram divididas em cem (100) partes iguais, conforme mostra a Figura 4.8 (a) e (c). Cada quadricula foi considerada uma amostra. Para cada amostra foram calculados os valores de NCA e MDA para cada um dos métodos avaliados.

Para os testes de concordância entre as redes de drenagem as áreas de testes foram divididas em quatrocentas (400) partes iguais, o que é mostrado na Figura 4.8 (b) e (d). Apenas os quadrados onde existem redes de drenagem, fizeram parte das amostras. Nesses quadrados foram calculados os somatórios das áreas dos polígonos formados pelas linhas da rede de drenagem de referência e as linhas da rede de drenagem derivada usando cada método.

Figura 4.8 - Divisão das áreas para os testes estatísticos.



(a) área do rio Crepori dividido em cem partes iguais; (b) mesma área dividida em quatrocentas partes iguais; (c) área do rio Purus dividida em cem partes iguais; (d) mesma área dividida em quatrocentas partes iguais.

Fonte: Produção do autor.

O primeiro teste estatístico aplicado foi o teste de Friedman. O teste de Friedman possibilita analisar dois ou mais conjuntos de amostra de uma só vez, se estes conjuntos fazem parte de uma mesma população (H_0), ou se pelo menos um deles faz parte de uma população distinta. Para calcular o valor do teste de Friedman de cada métrica analisada, os métodos são ranqueados do melhor para pior em cada amostra (divisão do MDE). O melhor método terá o ranque um, o segundo o ranque dois, e assim por diante. No final é feita uma média desses ranques. Uma das saídas do teste de Friedman é uma classificação do melhor para pior método e seus respectivos ranques médios, para cada uma das três métricas analisadas.

Esses ranques médios foram utilizados para criar uma métrica global que considera as três métricas analisadas, NCA, MDE e concordância com a

rede de drenagem de referência. Para isto foi feita uma média dos ranques médios das três métricas analisadas para cada método.

Os ranques de Friedman também foram utilizados para classificar os métodos da melhor para pior. Como será apresentado mais adiante, nem sempre o método que obteve melhor média global obteve o melhor ranque de Friedman para uma métrica.

O teste de Friedman avalia somente se existe pelo menos um método que obteve resultado significativamente diferente dos outros métodos. O próximo passo é analisar par a par os métodos, para saber se um deles está sendo significativamente melhor que outro. Para isso foi utilizado o teste não paramétrico de Wilcoxon.

Para mais detalhes sobre os testes estatísticos utilizados neste trabalho veja Siegel (1977).

Para as métricas NCA e MDA os métodos ArcGIS e TauDEM foram tratados nos testes como um único método, pois é previamente sabido que possuem exatamente o mesmo método de eliminação de fossos e, portanto, produzem o mesmo MDE corrigido.

4.6. Capacidade de processamento

Para testar a capacidade de lidar com grandes volumes de dados o método proposto, e implementada no TerraHidro, foi aplicada em duas grandes áreas de teste. Em ambas as áreas foram utilizados os dados do SRTM de 90 metros disponibilizados pela CGIAR-CSI³ (REUTER et al., 2007).

A primeira área compreende todo o continente da América do Sul (Figura 4.9). O mosaico compreendendo 58 cenas do SRTM gerou uma MDE com 90.000 linhas por 66.000 colunas. Este experimento foi

³ <http://srtm.csi.cgiar.org>

realizado em um computador pessoal com processador Intel i7 de 2.40 GHz e 16 GB de memória RAM.

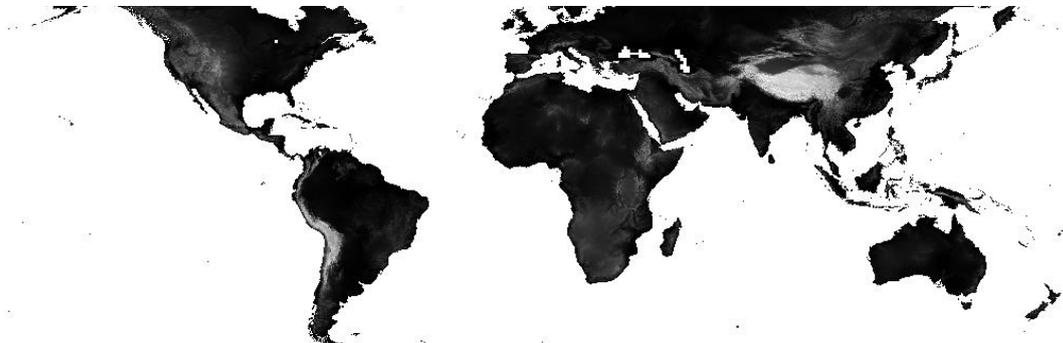
Figura 4.9 – Mosaico de cenas do SRTM de 90 metros para a América do Sul.



Fonte: Produção do autor.

Para um teste mais abrangente, a segunda área cobre quase todo o globo terrestre utilizando todos os dados do SRTM de 90 metros disponibilizados pela CGIAR-CSI (Figura 4.10). O mosaico compreendendo 847 cenas do SRTM gerou uma MDE com 144.000 linhas por 432.000 colunas. Para este experimento foi utilizado um computador com processador Intel® Xeon® (CPU ES 2420 v2@ 2,20 GHz) com 48 GB de memória RAM.

Figura 4.10 – Mosaico de cenas do SRTM de 90 metros para o mundo.



Fonte: Produção do autor.

Em ambos os testes foram gerados os MDE corrigidos, os dados de área acumulada e rede de drenagem, e as redes de drenagens em formato vetorial (*shapefile*).

No próximo capítulo serão apresentados e analisados os resultados gerados pela aplicação dos métodos nas áreas testes escolhidas e a aplicação do método proposto nesta Tese para as áreas de grande volume de dados.

5 PROVA DE CONCEITO: ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Seis métodos foram comparados em termos da qualidade das redes de drenagem, e em termos da qualidade do MDE corrigido. Para a avaliação da qualidade da rede de drenagem extraída foi utilizado o método proposto por Collischonn et al, 2010 e, para a qualidade do MDE corrigido, duas métricas foram usadas, a NCA - número de células alteradas e o MDA - média das diferenças de altimetrias. A definição dos dados, dos métodos e das métricas e procedimentos para avaliação quantitativa das redes extraídas e do MDE corrigido formam apresentados e detalhados no Capítulo 4.

5.1. Discussão dos resultados

Os métodos ArcGIS e TauDEM produzem MDE corrigidos idênticos. Porém, as redes de drenagem obtidas por esses métodos são diferentes, pois utilizam diferentes métodos para a obtenção de direções de fluxo em áreas planas.

Para realizar os testes estatísticos, as áreas de testes foram divididas em partes iguais, e cada parte foi considerada uma amostra. Foi realizado o teste estatístico não paramétrico de Friedman, utilizado para avaliar se existe diferença significativa dos resultados. Um dos resultados do teste de Friedman é uma classificação (ranque médio) que indica qual método obteve melhores resultados na maioria das amostras. E para verificar par a par a significância estatística entre os resultados de cada método, foi utilizado o teste estatístico não paramétrico de Wilcoxon.

O TerraHidro obteve sempre a melhor qualidade de rede de drenagem derivada, e esteve sempre entre os três primeiros na qualidade do MDE corrigido.

Os ranques de Friedman para concordância com a rede de drenagem, melhor NCA e melhor MDA, foram utilizados para se obter uma classificação geral dos métodos. Em outras palavras, para se definir qual

método é a melhor considerando-se os três quesitos ao mesmo tempo, foi extraída uma média dos ranques de cada quesito.

5.2. Rio Purus

A área de teste compreende toda a área da bacia hidrográfica do Rio Purus. O MDE utilizado foi o SRTM de 90 metros. Apenas para o método IDRISI foi escolhida uma área menor, pois esta não foi capaz de processar todo o MDE para toda área da bacia do rio. Os dados da comparação entre o MDE original e corrigido para o método IDRISI foram apresentados, mas não é possível afirmar que os números seriam os mesmos para toda a área de teste. Esta situação não permite a comparação do MDE corrigido pelo IDRISI com àquele gerado pelos outros métodos.

5.2.1. Rede de drenagem Rio Purus

A soma das áreas entre as drenagens extraídas e a drenagem de referência variou entre 320,85 km² a 800,35 km². O método TerraHidro obteve a melhor concordância com a drenagem de referência com uma diferença significativa para o segundo colocado, o TauDEM. A Tabela 5.1 apresenta os resultados para a concordância entre as redes de drenagem do Rio Purus.

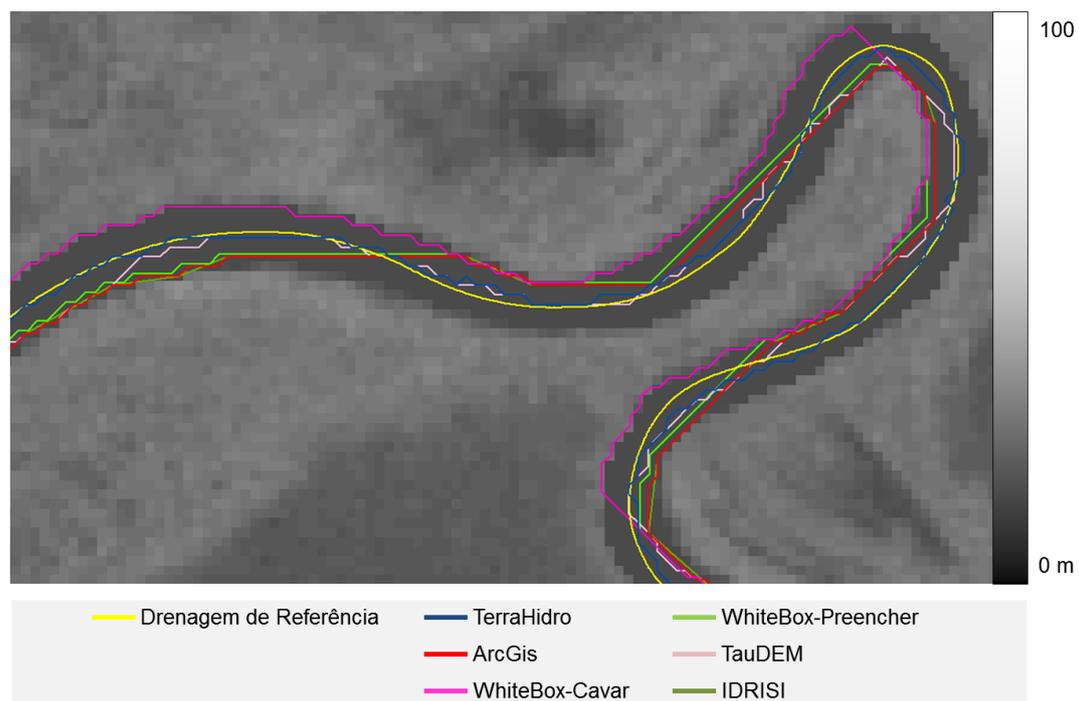
Tabela 5.1 - Concordância entre as redes de drenagem para o Rio Purus.

Método	Área entre as drenagens (km²)
TerraHidro	320,85
ArcGIS	786,00
WhiteBox-Cavar	722,64
WhiteBox-Preencher	800,35
TauDEM	613,01
IDRISI	639,63

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.1 mostra uma comparação visual (qualitativa) onde é possível observar o que acontece com as drenagens obtidas pelos diferentes métodos em relação à drenagem de referência. É possível observar que o WhiteBox-Cavar tende a seguir as margens do rio, o IDRISI tende a tangenciar as curvas do rio, enquanto o TerraHidro tende a seguir o centro do rio.

Figura 5.1 - Comparação visual de detalhes das redes de drenagem extraídas pelos diferentes métodos.

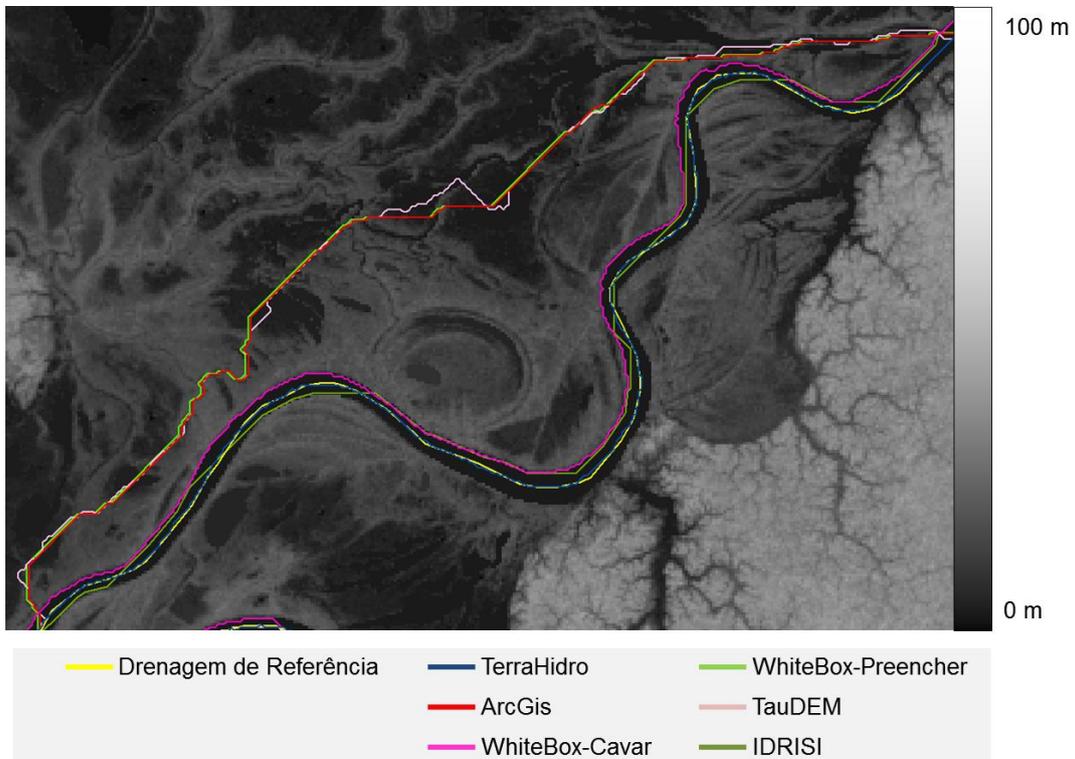


Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.2 exemplifica o problema que pode acontecer com os métodos que preenchem os fossos. É possível observar na figura o leito Rio Purus. Os métodos ArcGIS, White-Box-Preencher e TauDEM (linhas em vermelho, verde-limão e rosa-claro, respectivamente) traçaram a drenagem fora do leito do rio, enquanto os métodos TerraHidro, WhiteBox-Cavar e IDRISI (azul, magenta e verde-oliva, respectivamente) traçaram a drenagem dentro do leito do rio. Isto acontece pelo fato de haver pouca diferença de altimetria nesta área, em outras palavras, o terreno é quase plano. Quando os métodos de preenchimento removem um fosso, acabam criando uma área totalmente plana, perdendo a

informação sobre onde estava o leito do rio. Veja na Figura 5.3 a mesma área do MDE corrigido pelo método ArcGIS.

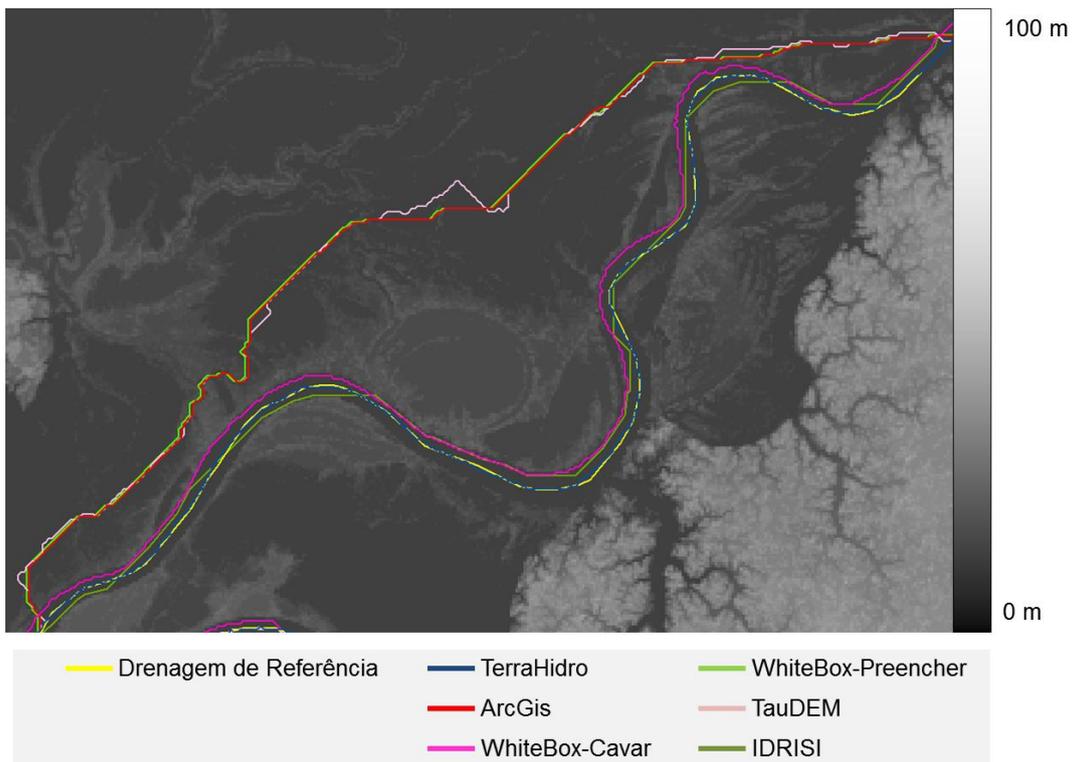
Figura 5.2 - Erros dos métodos de preenchimento.



Outro detalhe das redes de drenagens extraídas pelos diferentes métodos. Aqui é possível observar as diferenças entre as abordagens preencher ou cavar para remover fossos. As altimetrias nesta área variam entre 0 e 100 metros.

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.3 - Erros dos métodos de preenchimento 2.

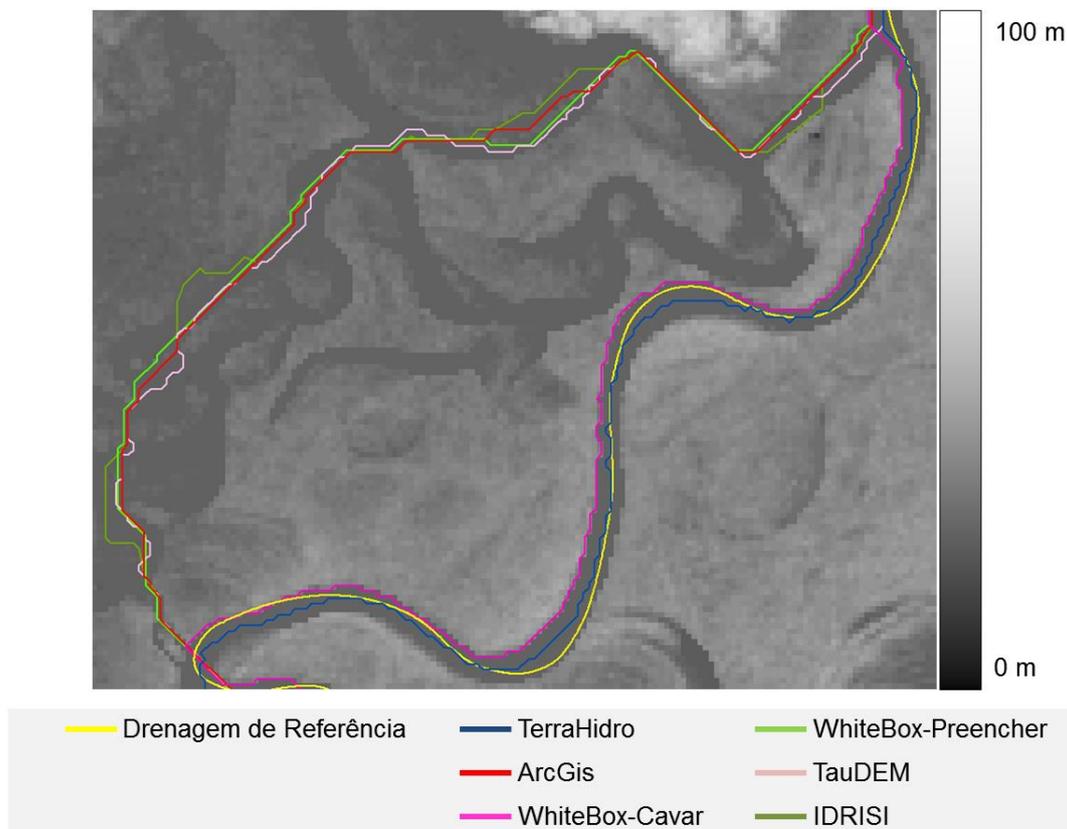


Detalhe da mesma área da Figura 5.2 mostrando o MDE corrigido pela ArcGIS. É possível observar as áreas planas criadas pelo método de correção.

Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.4 a IDRISI que também utiliza o PFS para corrigir fossos traçou, de forma errada, a drenagem fora do leito do rio do mesmo modo que os métodos de preenchimento. O método TerraHidro que também utiliza o PFS traçou a drenagem dentro do leito do rio. Isto se deve ao fato da TerraHidro cavar as áreas planas em forma de “v”. O leito principal do rio é mais largo deixando esse “v” mais profundo. Isso força o PFS a traçar a drenagem dentro e perto do centro do leito do rio.

Figura 5.4 - Detalhe do IDRISI escolhendo o mesmo caminho que os métodos que preenchem o MDE.



Fonte: Produção do autor.

O teste de Friedman mostrou que houve diferença significativa entre os resultados das concordâncias entre as redes de drenagens derivadas. A Tabela 5.2 mostra o resultado do teste.

Tabela 5.2 - Ranques do teste de Friedman

Método	Ranque Médio
TerraHidro	1,20
ArcGIS	4,27
WhiteBox-Cavar	5,00
WhiteBox-Preencher	5,07
TauDEM	2,40
IDRISI	3,07
Valor-p	0,0001

Fonte: Produção do autor.

O teste de Wilcoxon, com significância de 5%, acusou que não existe diferença significativa entre TauDEM e IDRISI, e entre ArcGIS, WhiteBox-Cavar e WhiteBox-Preencher. Portanto, a classificação final em relação à melhor concordância com a rede de drenagem de referência é:

1º TerraHidro

2º TauDEM e IDRISI

4º ArcGIS, WhiteBox-Cavar e WhiteBox-Preencher

5.2.2. Diferença entre MDE original e corrigido

Na comparação entre MDE original e corrigido, os valores de MDA ficaram abaixo de 3,6 metros. Isto é menor do que a precisão vertical do SRTM (15 metros). O método TerraHidro ficou em segundo neste quesito. O WhiteBox-Cavar, que apresentou o melhor MDA, foi o penúltimo nos valores de NCA. O TerraHidro também apresentou o segundo melhor valor de NCA, superado apenas pelo IDRISI. Vale lembrar que o IDRISI não foi capaz de processar toda a área da bacia do Rio Purus nos testes. O WhiteBox-Preencher obteve o pior valor de NCA, alterando quase 25% do MDE original. Todos os resultados dessa comparação podem ser

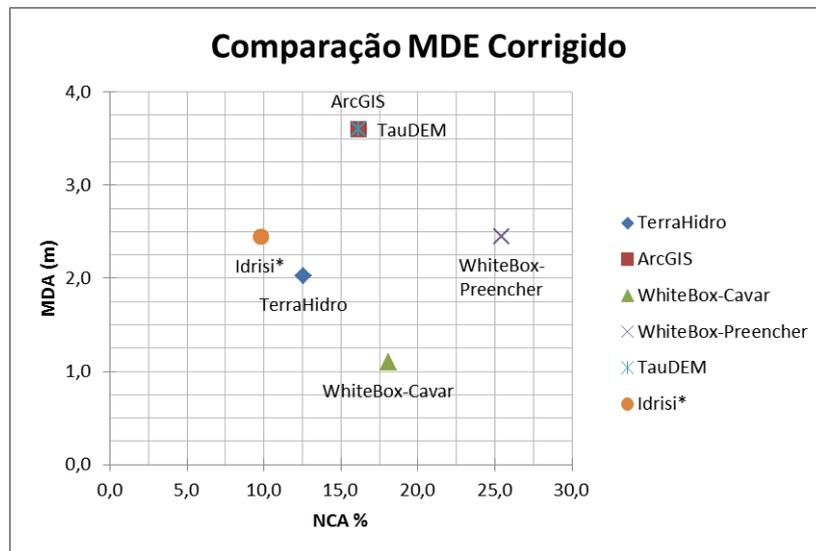
observados na Tabela 5.3. A Figura 5.5 compara conjuntamente os valores de MDA e NCA.

Tabela 5.3 - Valores de NCA e MDA para área do Rio Purus.

Método	NCA %	MDA m
TerraHidro	12,57	2,030
ArcGIS	16,16	3,599
WhiteBox-Cavar	18,10	1,103
WhiteBox-Preencher	25,44	2,448
TauDEM	16,16	3,599
IDRISI	9,79	2,443

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.5 - Resultado do teste de Friedman



Fonte: Produção do autor.

Observe que os valores de NCA e MDA para ArcGIS e TauDEM são os mesmos, pois os dois utilizam o mesmo método de correção de fossos. Esse método não remove todos os fossos, sobram áreas planas no MDE corrigido. Desse modo esses métodos obtêm redes de drenagem

diferentes, pois utilizam algoritmos diferentes para definir as direções de fluxo em áreas planas.

O teste de Friedman mostrou que existem diferenças significativas para os valores de NCA e MDA. A Tabela 5.4 mostra o resultado do teste de Friedman para os valores de NCA. A Tabela 5.5 mostra o resultado do teste de Friedman para os valores de MDA. Observe que não foi possível incluir o IDRISI nos testes de Friedman dado que o IDRISI não foi capaz de corrigir toda a área destinada para os testes. A segunda observação é que a ArcGIS e a TauDEM foram tratadas nos testes como um único método, pois é previamente sabido que possuem exatamente o mesmo método de eliminação de fossos e, portanto, apresentam o mesmo resultado.

Tabela 5.4 - Teste de Friedman para os valores de NCA

Método	Ranque Médio
TerraHidro	1,03
ArcGIS	2,20
WhiteBox-Cavar	2,77
WhiteBox-Preencher	4,00
TauDEM	2,20
Valor-p.	0,0001

Fonte: Produção do autor.

Tabela 5.5 - Teste de Friedman para os valores de MDA

Método	Ranque Médio
TerraHidro	2,40
ArcGIS	4,00
WhiteBox-Cavar	1,00
WhiteBox-Preencher	2,60
TauDEM	4,00
Valor-p.	0,0001

Fonte: Produção do autor.

O teste de Wilcoxon, com significância de 5%, acusou diferença significativa para os valores de NCA e MDA para todas os métodos, exceto, obviamente, para o ArcGIS e o TauDEM, que obtiveram exatamente os mesmos valores.

5.2.3. resumo dos resultados para o Rio Purus

O TerraHidro obteve a melhor concordância com a rede de drenagem de referência, apresentando ampla vantagem em relação aos outros métodos. O método para definir direção de fluxo em áreas planas do TauDEM obteve uma rede de drenagem melhor do que a do ArcGIS, apesar de usarem o mesmo método de correção do MDE.

O TerraHidro ficou com o segundo lugar em relação ao valor de NCA, perdendo somente para o IDRISI. Porém, ao contrário dos outros métodos, o IDRISI não foi capaz de corrigir os fossos para toda a área da bacia do Rio Purus. Por isso, não se sabe se o IDRISI modificaria mais ou menos o MDE do que aos outros métodos.

O TerraHidro ficou em segundo lugar em relação ao valor de MDA, perdendo somente para o WhiteBox-Cavar. Vale ressaltar que o WhiteBox-Cavar ficou em quarto (última colocação), empatado com

ArcGIS e WhiteBox-Preencher, em relação à concordância com a rede de drenagem de referência.

Sendo assim, a TerraHidro ficou em primeiro lugar na classificação geral. A classificação geral, considerando as três métricas, é apresentada na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Média dos Ranques de Friedman

Método	Média dos Ranques de Friedman	Classificação Geral
TerraHidro	1,54	1
ArcGIS	3,49	4
WhiteBox-Cavar	2,92	3
WhiteBox-Preencher	3,89	5
TauDEM	2,87	2
IDRISI	-----	--

Fonte: Produção do autor.

5.3. Rio Crepori

A segunda área de teste compreende um trecho do Rio Crepori, conforme já foi apresentado anteriormente na Figura 4.1. Na área de teste do Rio Purus foram avaliadas somente as drenagens que se encontravam dentro do leito do rio. Diferentemente da área do Rio Purus esta área possibilita estudar os comportamentos dos métodos em drenagens de primeira ordem, em outras palavras, perto das nascentes. A linha de rede de drenagem escolhida possui um trecho situado no leito do rio, e trechos de ordens mais baixas até a nascente (Figura 5.6).

Figura 5.6 - Detalhe da rede de drenagem na área do Rio Crepori.



Fonte: Produção do autor.

Para área do Rio Crepori foram utilizados três diferentes MDE: os MDT e MDS de 5 metros de resolução, disponibilizados pela DGE, e o SRTM de 30 metros de resolução (aproximadamente) disponibilizado pela NASA. Destes MDE, o MDT é o mais preciso, pois despreza os objetos presentes na superfície, como construções e árvores. Em termos de concordância com a rede de drenagem de referência, a TerraHidro obteve os melhores resultados para os três MDE.

5.3.1. Modelo digital de terreno - MDT

Este é o dado com que se obteve, para todos os métodos, a melhor concordância com a rede de drenagem e menos modificações entre o MDE original e o corrigido.

5.3.1.1. MDT - rede de drenagem

A soma das áreas entre as drenagens derivadas e a drenagem de referência variou entre 0,64 km² a 1,62 km². O TerraHidro obteve a melhor concordância com a drenagem de referência. A Tabela 5.7 apresenta os

resultados para a concordância entre as redes de drenagem do Rio Crepori.

Tabela 5.7 - Concordância entre as redes de drenagem para o Rio Crepori usando o MDT.

Método	Área entre as drenagens (km²)
TerraHidro	0,64
ArcGIS	1,56
WhiteBox-Cavar	0,91
WhiteBox-Preencher	1,62
TauDEM	1,20
IDRISI	0,86

Fonte: Produção do autor.

O teste de Friedman verificou que existem diferenças significativas entre os resultados obtidos com significância assintótica menor do que 0,00%. A Tabela 5.8 apresenta os ranques de Friedman e os resultados do teste.

Tabela 5.8 - Teste de Friedman para concordância com a rede de drenagem para Rio Crepori usando MDT

Método	Ranque Médio
TerraHidro	2,85
ArcGIS	4,35
WhiteBox-Cavar	3,87
WhiteBox-Preencher	4,74
TauDEM	2,52
IDRISI	2,67
Valor-p	0,0001

Fonte: Produção do autor.

Apesar de apresentar o melhor resultado para concordância em todo trecho de rede de drenagem avaliada, nos ranques de Friedman o

TerraHidro ficou em terceiro lugar. Analisando-se as amostras, ou seja, partes da drenagem onde o TerraHidro não ficou em primeiro, foi possível verificar que:

- 1- O TerraHidro tem uma ampla vantagem para extrair as redes de drenagem no leito do rio.
- 2- Para as outras áreas, os métodos obtiveram resultados muito parecidos para este tipo de dado.

Para verificar se existem diferenças significativas entre cada par de métodos, foi aplicado o teste de Wilcoxon. Em resumo, a classificação final do teste com significância de 5% foi:

1º TerraHidro, TauDEM e IDRISI.

2º WhiteBox-Cavar.

3º ArcGIS e WhiteBox-Preencher.

Interessante observar que os três que obtiveram melhor concordância com a rede de drenagem são softwares livres.

5.3.1.2. MDT - diferença entre MDE original e corrigido

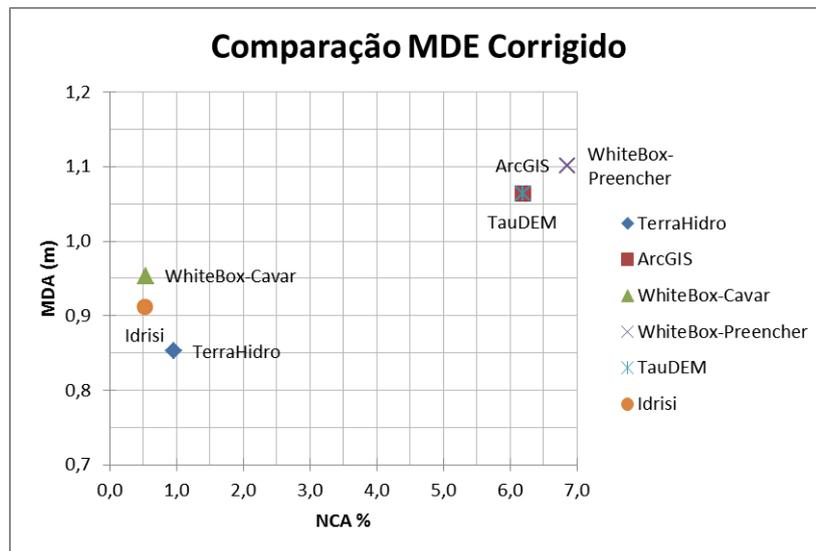
Como pode ser visto na Tabela 5.9 e Figura 5.7, a TerraHidro apresentou o melhor MDA e ficou em terceiro em valores de NCA, para toda a área de teste. Os valores de MDA variaram entre 0,89 e 1,10 metros, ou seja, uma diferença de apenas 21 centímetros. Mesmo o maior valor de MDA ainda é menor que a resolução vertical do MDE, que é de um metro. Na Figura 5.6 é possível observar uma diferença mais notória entre os valores de NCA. Os três métodos que cavam o MDE apresentaram valores de NCA menores que 1%, enquanto os métodos que preenchem o MDE apresentaram valores de NCA maiores que 6%.

Tabela 5.9 - Valores de NCA e MDA para área do Rio Crepori usando MDT.

Método	NCA %	MDA m
TerraHidro	0,99	0,89
ArcGIS	6,19	1,06
WhiteBox-Cavar	0,54	0,95
WhiteBox-Preencher	6,86	1,10
TauDEM	6,19	1,06
IDRISI	0,53	0,91

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.7 - Resultado do teste de Friedman para concordância com rede de drenagem da área do Rio Crepori com MDT.



Fonte: Produção do autor.

O teste de Friedman mostrou que existem diferenças significativas para os valores de NCA e MDA. A Tabela 5.10 mostra o resultado do teste de Friedman para os valores de NCA. A Tabela 5.11 mostra o resultado do teste de Friedman para os valores de MDA.

Tabela 5.10 - Teste de Friedman para os valores de NCA da área do Rio Crepori usando MDT

Método	Ranque Médio
TerraHidro	1,26
ArcGIS	3,96
WhiteBox-Cavar	2,89
WhiteBox-Preencher	5,00
TauDEM	3,96
IDRISI	1,89
Valor-p	0,0001

Fonte: Produção do autor.

Tabela 5.11 - Teste de Friedman para os valores de MDA da área do Rio Crepori usando MDT

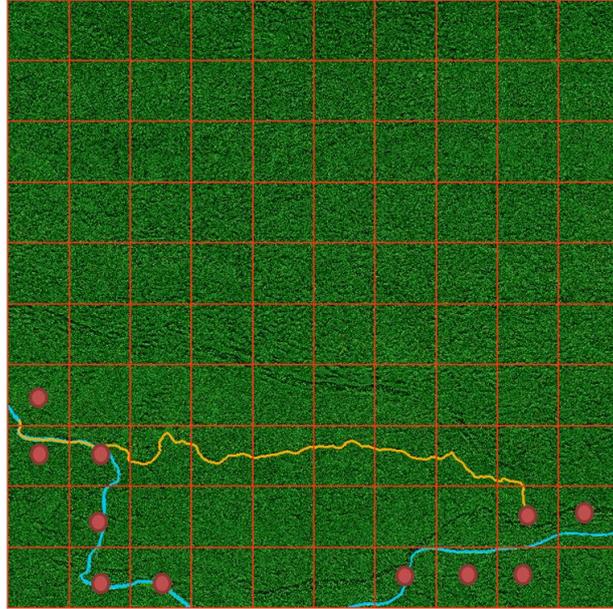
Método	Ranque Médio
TerraHidro	2,92
ArcGIS	3,00
WhiteBox-Cavar	1,99
WhiteBox-Preencher	3,99
TauDEM	3,00
IDRISI	3,10
Valor-p	0,0001

Fonte: Produção do autor.

Apesar do IDRISI ter apresentado melhor valor de NCA que o TerraHidro, os ranques de Friedman colocaram o TerraHidro na primeira posição, e o IDRISI em segundo. Isto acontece pelo fato do TerraHidro cavar as áreas planas (leito do rio) em forma de “v” (células destacadas na Figura 5.8). Isto faz com que o TerraHidro altere mais células do que os outros métodos, nessas áreas. Porém, essa modificação a mais no MDE tem a vantagem de produzir redes de drenagem melhores nessas mesmas

áreas. Para as outras áreas do MDE, o TerraHidro apresentou NCA menor do que todas aos outros métodos.

Figura 5.8 - Regiões do onde o TerraHidro altera mais células (NCA) que aos outros métodos.



Fonte: Produção do autor.

Algo inverso acontece com os valores de MDA. Em números gerais de MDA, o TerraHidro ficou em primeiro, pois nas áreas planas as alterações feitas são muito pequenas comparadas com as alterações feitas pelos outros métodos. Nas amostras onde não passa o leito do rio, o TerraHidro ainda teve vantagem em relação aos demais métodos, exceto para o WhiteBox-Cavar que ficou em primeiro nos ranques de Friedman, enquanto o TerraHidro ficou em segundo.

O teste de Wilcoxon, com significância de 5%, acusou diferença significativa para os valores de NCA e MDA em todos os métodos, exceto, obviamente, para o ArcGIS e o TauDEM, que obtiveram exatamente os mesmos valores.

5.3.1.3. Resumo dos resultados para MDT

Os métodos obtiveram um ótimo valor de MDA, sendo este sempre menor do que a resolução vertical do MDE, que é de um metro. Os métodos também obtiveram uma ótima concordância com a drenagem de

referência. O TerraHidro, o TauDEM e o IDRISI podem ser considerados os métodos que melhor concordaram com a drenagem de referência. Somente os valores de NCA separam os métodos que cavam o MDE dos métodos que preenchem o MDE.

A classificação geral, considerando os três quesitos, é apresentada na Tabela 5.12. Novamente, a TerraHidro ficou em primeiro lugar na média dos ranques de Friedman.

Tabela 5.12 - Média dos Ranques de Friedman para Rio Crepori usando MDT.

Método	Média dos Ranques de Friedman
TerraHidro	2,34
ArcGIS	3,77
WhiteBox-Cavar	2,92
WhiteBox-Preencher	4,58
TauDEM	3,16
IDRISI	2,55

Fonte: Produção do autor.

5.3.2. Modelo Digital de Superfície - MDS

O modelo de superfície inclui os objetos da superfície do terreno como árvores, casas e prédios. Por essa razão os métodos de correção alteraram mais o MDE a fim de extrair as redes de drenagem.

5.3.2.1. MDS - rede de drenagem

A soma das áreas entre as drenagens derivadas e a drenagem de referência variou entre 1,03 km² e 1,52 km². Os métodos de correção que cavam o MDE obtiveram resultados piores utilizando o MDS do que utilizando o MDT, mas não foram superados pelos métodos que preenchem o MDE. Novamente, o TerraHidro obteve a melhor concordância com a drenagem de referência. A Tabela 5.13 apresenta os resultados para a concordância entre as redes de drenagem do Rio Crepori.

Tabela 5.13 - Concordância entre as redes de drenagem para o Rio Crepori usando o MDS.

Método	Área entre as drenagens (km²)
TerraHidro	1,03
ArcGIS	1,49
WhiteBox-Cavar	1,41
WhiteBox-Preencher	1,52
TauDEM	1,21
IDRISI	1,33

Fonte: Produção do autor.

O teste de Friedman verificou que existem diferenças significativas entre os resultados obtidos com significância menor do que 0,00%. A Tabela 5.14 apresenta os ranques de Friedman e os resultados do teste.

Tabela 5.14 - Teste de Friedman para concordância com a rede de drenagem para Rio Crepori usando MDS

Método	Ranque Médio
TerraHidro	3,41
ArcGIS	2,96
WhiteBox-Cavar	4,48
WhiteBox-Preencher	3,27
TauDEM	2,86
IDRISI	4,02
Valor-p	0,006

Fonte: Produção do autor.

Apesar da TerraHidro obter o melhor resultado para a concordância em todo trecho da rede de drenagem avaliado, nos ranques de Friedman a TerraHidro ficou apenas em quarto. Os resultados do teste de Wilcoxon mostraram que não houveram diferenças significativas para todos os métodos, exceto para a WhiteBox-Cavar, que ficou em último. Com significância de 5% no teste de Wilcoxon, a maioria dos métodos empatou na primeira colocação:

1º TerraHidro, ArcGIS, WhiteBox-Preencher, TauDEM e IDRISI.

6º WhiteBox-Cavar.

5.3.2.2. MDS - diferença entre MDE original e corrigido

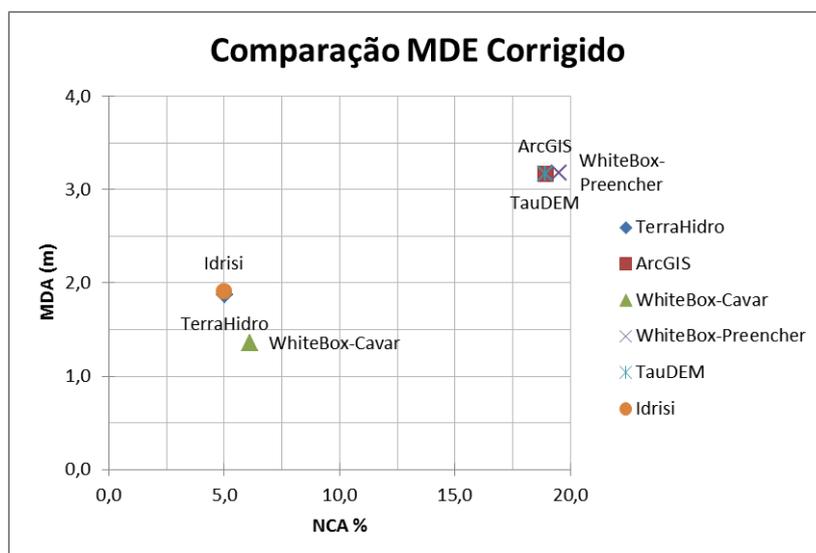
Como pode ser visto na Tabela 5.15 e Figura 5.9 o TerraHidro ficou em segundo lugar tanto para os valores de NCA quanto de MDA. A IDRISI ficou em primeiro lugar em relação ao NCA e em terceiro em relação ao MDA. O WhiteBox-Cavar ficou em primeiro em relação ao MDA, e em terceiro em valores de NCA. Na Figura 5.9 é possível observar novamente que os métodos que cavam obtiveram resultados melhores que os métodos que preenchem.

Tabela 5.15 - Valores de NCA e MDA para área do Rio Crepori usando MDS.

Método	NCA %	MDA m
TerraHidro	5,03	1,87
ArcGIS	18,91	3,17
WhiteBox-Cavar	6,10	1,36
WhiteBox-Preencher	19,52	3,18
TauDEM	18,91	3,17
IDRISI	4,98	1,91

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.9 - Resultado do teste de Friedman para a concordância com rede de drenagem da área do Rio Crepori com MDS.



Fonte: Produção do autor.

O teste de Friedman mostrou que existem diferenças significativas para os valores de NCA e MDA. A Tabela 5.16 mostra o resultado do teste de Friedman para os valores de NCA. A Tabela 5.17 mostra o resultado do teste de Friedman para os valores de MDA.

Tabela 5.16 - Teste de Friedman para os valores de NCA da área do Rio Crepori usando MDS

Método	Ranque Médio
TerraHidro	1,11
ArcGIS	4,00
WhiteBox-Cavar	3,00
WhiteBox-Preencher	5,00
TauDEM	4,00
IDRISI	1,89
Valor-p	0,0001

Fonte: Produção do autor.

Tabela 5.17 - Teste de Friedman para os valores de MDA da área do Rio Crepori usando MDS

Método	Ranque Médio
TerraHidro	2,86
ArcGIS	4,10
WhiteBox-Cavar	1,00
WhiteBox-Preencher	4,85
TauDEM	4,10
IDRISI	2,19
Valor-p	0,0001

Fonte: Produção do autor.

Nos ranques de Friedman o TerraHidro subiu para a primeira colocação em valores de NCA, superando o IDRISI. Porém, caiu para terceira posição em valores de MDA, perdendo para o IDRISI e o WhiteBox-Cavar. Novamente o TerraHidro possui valores melhores de MDA e piores de NCA em relação aos outros métodos, nas áreas onde passa o leito do rio.

O teste de Wilcoxon, com significância de 5%, acusou diferença significativa para os valores de NCA e MDA em todos os métodos, exceto obviamente para o ArcGIS e o TauDEM que obtiveram exatamente os mesmos valores.

5.3.2.3. Resumo dos resultados para MDS

Novamente, em números gerais, o TerraHidro obteve a melhor concordância com a rede de drenagem de referência. Porém, o teste de Wilcoxon mostrou que houve grande confusão entre os resultados. Somente a WhiteBox-Cavar apresentou um resultado estatisticamente diferente dos demais métodos que empataram na primeira colocação.

A classificação geral, considerando-se os três quesitos, é apresentada na Tabela 5.18. Novamente, o TerraHidro ficou em primeiro lugar na média dos ranques de Friedman.

Tabela 5.18 - Média dos Ranques de Friedman para Rio Crepori usando MDS.

Método	Média dos Ranques de Friedman
TerraHidro	2,46
ArcGIS	3,69
WhiteBox-Cavar	2,83
WhiteBox-Preencher	4,37
TauDEM	3,65
IDRISI	2,70

Fonte: Produção do autor.

5.3.3. SRTM de 30 metros

Diferentemente dos dados testados anteriormente, o SRTM tem 30 metros de resolução horizontal, ao invés de 5 metros. Apesar da menor resolução horizontal, o SRTM apresentou resultados parecidos, e algumas vezes melhores que o MDS.

5.3.3.1. SRTM - rede de drenagem

A soma das áreas entre as drenagens derivadas e a drenagem de referência variou entre 0,93 km² e 1,75 km². O TerraHidro obteve a melhor concordância com a drenagem de referência. A Tabela 5.19 apresenta os resultados para a concordância entre as redes de drenagem do Rio Crepori.

Tabela 5.19 – Concordância entre as redes de drenagem para o Rio Crepori usando o SRTM de 30 metros.

Método	Área entre as drenagens (km²)
TerraHidro	0,93
ArcGIS	1,47
WhiteBox-Cavar	1,75
WhiteBox-Preencher	1,64
TauDEM	1,23
IDRISI	1,14

Fonte: Produção do autor.

O teste de Friedman verificou que existem diferenças significativas entre os resultados obtidos, usando significância menor do que 5,00%. A Tabela 5.20 apresenta os ranques de Friedman e os resultados do teste.

Tabela 5.20 - Teste de Friedman para concordância entre as redes de drenagem para o Rio Crepori utilizando o SRTM de 30 metros.

Método	Ranque Médio
TerraHidro	2,54
ArcGIS	3,52
WhiteBox-Cavar	5,25
WhiteBox-Preencher	4,00
TauDEM	2,45
IDRISI	3,25
Valor-p	0,0001

Fonte: Produção do autor.

Novamente, a TerraHidro teve um resultado muito superior para extrair redes de drenagem dentro do leito do rio. Porém, ficou em segundo, superado pela TauDEM, nos ranques de Friedman para a concordância com a rede de drenagem de referência.

Desta vez, o teste de Wilcoxon, com significância de 5% acusou diferença significativa para todos os métodos. Portanto, a classificação final foi:

1º TauDEM.

2º TerraHidro.

3º IDRISI.

4º ArcGIS.

5º WhiteBox-Preencher.

6º WhiteBox-Cavar.

5.3.3.2. SRTM - diferença entre MDE original e corrigido

Como pode ser visto na Tabela 5.21 e Figura 5.7, a TerraHidro apresentou o segundo melhor NCA, e ficou em terceiro em valores de

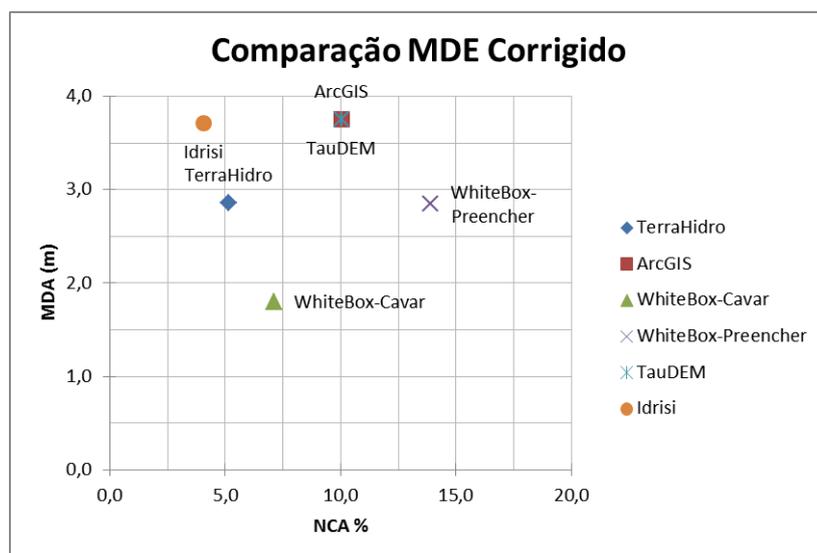
MDA, para toda a área de teste. Os valores de MDA variaram entre 1,80 e 3,75 metros. Na Figura 5.10 é possível observar novamente uma diferença mais notória entre os valores de NCA. Os três métodos que cavam o MDE apresentaram valores de NCA menores que 7%, enquanto os métodos que preenchem o MDE apresentaram valores de NCA maiores que 10%.

Tabela 5.21 - Valores de NCA e MDA para área do Rio Crepori com MDT.

Método	NCA %	MDA m
TerraHidro	5,16	2,86
ArcGIS	10,06	3,75
WhiteBox-Cavar	7,13	1,80
WhiteBox-Preencher	13,92	2,85
TauDEM	10,06	3,75
IDRISI	4,05	3,71

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.10 - Resultado do teste de Friedman para concordância com rede de drenagem da área do Rio Crepori com MDT.



Fonte: Produção do autor.

O teste de Friedman mostrou que existem diferenças significativas para os valores de NCA e MDA. A Tabela 5.22 mostra o resultado do teste de Friedman para os valores de NCA. A Tabela 5.23 mostra o resultado do teste de Friedman para os valores de MDA.

Tabela 5.22 - Teste de Friedman para os valores de NCA da área do Rio Crepori com SRTM

Método	Ranque Médio
TerraHidro	2,03
ArcGIS	3,80
WhiteBox-Cavar	3,17
WhiteBox-Preencher	5,00
TauDEM	3,80
IDRISI	1,00
Valor-p	0,0001

Fonte: Produção do autor.

Tabela 5.23 - Teste de Friedman para os valores de MDA da área do Rio Crepori com SRTM

Método	Ranque Médio
TerraHidro	2,72
ArcGIS	4,41
WhiteBox-Cavar	1,11
WhiteBox-Preencher	2,47
TauDEM	4,41
IDRISI	4,29
Valor-p	0,0001

Fonte: Produção do autor.

Novamente, o TerraHidro fica em segundo nos ranques de Friedman para os valores de NCA, e em terceiro para os valores de MDA. Porém, o

IDRISI, que foi o primeiro colocado em valores de NCA, ficou em último para os valores de MDA e foi a terceira para a concordância com a rede de drenagem de referência. O WhiteBox-Cavar e o WhiteBox-Preencher foram as primeiras (respectivamente) em valores de NCA, porém foram terceira e último (respectivamente) em valores de MDA, e empataram em último em relação à concordância com a drenagem de referência.

O teste de Wilcoxon, com significância de 5%, acusou diferença significativa para os valores de NCA para todos os métodos (exceto obviamente para o ArcGIS e o TauDEM que obtiveram exatamente os mesmos valores). Para os valores de MDA, o teste não acusou diferença significativa entre alguns métodos. Em resumo a classificação final para os valores de MDA foi:

1º WhiteBox-Cavar

2º TerraHidro e WhiteBox-Preencher

3º IDRISI, ArcGIS e TauDEM.

5.3.3.3. Resumo dos resultados para SRTM

Novamente, em números gerais, a TerraHidro obteve a melhor concordância com a rede de drenagem de referência. Porém, nos ranques de Friedman, ficou em segundo, superada pela TauDEM. O TerraHidro ficou em segundo nos valores de NCA e MDA.

A classificação geral, considerando os três quesitos, é apresentada na Tabela 5.24. Novamente a TerraHidro ficou em primeiro lugar na média dos ranques de Friedman.

Tabela 5.24 - Média dos Ranques de Friedman para Rio Crepori com SRTM.

Método	Média dos Ranques de Friedman
TerraHidro	2,46
ArcGIS	3,69
WhiteBox-Cavar	2,83
WhiteBox-Preencher	4,37
TauDEM	3,65
IDRISI	2,70

Fonte: Produção do autor.

5.4. Capacidade de processamento

É desejável que o método de correção de fossos seja capaz de processar grandes volumes de dados em um tempo hábil. O método proposto foi capaz de eliminar todos os fossos da América do Sul em aproximadamente 5:55 horas, em um computador pessoal (processador Intel i7 2.40GHz com 16GB de memória RAM). O tempo necessário para calcular a grade de área acumulada, extrair a rede de drenagem com limiar de 1.000 células e converter o resultado para o formato vetorial (*shapefile*) foi de aproximadamente 2:50 horas. Portanto o tempo total de todos os processamentos envolvidos foi de quase 9h. O resultado das redes de drenagem para América do Sul pode ser observado na Figura 5.11.

Figura 5.11 - Rede de drenagem para América do Sul.

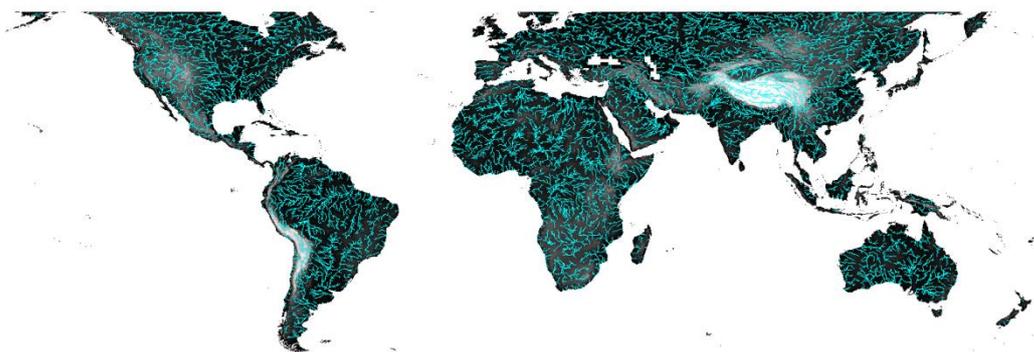


Fonte: Produção do autor.

Em um teste mais abrangente, o método foi capaz de eliminar os fossos de quase todo o globo terrestre (excluindo as calotas polares do Norte e do Sul), utilizando os dados do SRTM de 90 metros disponibilizados pela CGIAR-CSI. Desta vez foi utilizado um computador com processador Intel® Xeon® (CPU ES 2420 v2@ 2,20 GHz) com 48 GB de memória RAM.

O tempo do processo de eliminação de fossos demorou um pouco mais do que 24 horas (aproximadamente 24:05h). O tempo para extrair as redes de drenagem em formato vetorial (*shapefile*) com um limiar de área acumulada 1.000 células foi de aproximadamente 9:30h. Portanto o tempo total de todos os processamentos envolvidos foi aproximadamente 1 dia e 9:35h. O resultado final pode ser observado na Figura 5.12.

Figura 5.12 - Rede de drenagem para o mundo.



Fonte: Produção do autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta Tese foi proposta e testada um novo método para se obter direções de fluxo de um MDE. O método proposta foi baseada no método geral onde, para cada célula do MDE, é atribuída uma única direção de fluxo. A direção de fluxo aponta para a célula vizinha onde o terreno é mais declivoso. Dessa forma, é possível inferir a rota da água pelo terreno estudado e derivar outros atributos hidrológicos dependentes das direções de fluxo tais como as redes de drenagem. O método proposto foi implementada utilizando a plataforma de código aberto chamada TerraHidro (ROSIM et al., 2003).

No processo para se obter as direções de fluxo, é necessário eliminar os fossos contidos no MDE. Fossos são mínimos locais e áreas planas onde é impossível obter a direção de fluxo. Os fossos interrompem o roteamento do fluxo da água no terreno tornando impraticável a abordagem explicada acima. Portanto, é necessário eliminar os fossos, gerando um MDE hidrologicamente consistente. O processo de eliminar os fossos, muitas vezes chamado de correção do MDE, é feito alterando-se os valores de altimetria a fim de possibilitar ao menos uma direção de fluxo para cada célula do modelo. O processo de eliminação de fossos é o que difere entre os diferentes métodos implementadas em diferentes softwares de geoprocessamento.

O método proposto foi comparada com outros cinco métodos em duas áreas distintas da região da bacia amazônica, usando diferentes fontes de MDE. A primeira área compreendeu a bacia do Rio Purus, enquanto que a segunda área compreendeu um trecho da bacia do Rio Crepori. O dado utilizado na primeira área foi o SRTM de 90 metros, enquanto que para a segunda área foram utilizados os modelos de terreno (MDT) e de superfície (MDS), ambos com resolução horizontal de 5 metros, disponibilizados pela DGE.

Por não ser viável comparar as direções de fluxo diretamente, essas foram avaliadas indiretamente pelas redes de drenagem derivadas. As

redes de drenagem derivadas das direções de fluxo de cada método foram então comparadas com uma rede de drenagem de referência. A métrica utilizada foi calculada somando-se as áreas de todos os polígonos gerados pela sobreposição das linhas da rede de drenagem de referência e da drenagem derivada. Esse valor é inversamente proporcional à concordância entre as redes de drenagem. Em outras palavras, quanto menor esse valor, melhor é a concordância entre duas linhas. Para essa métrica, o método proposto neste trabalho foi o que obteve os melhores resultados nas duas áreas de testes e considerando os diferentes MDE utilizados.

Um efeito colateral da eliminação de fossos é que alterar o MDE pode introduzir erros e, conseqüentemente, criar direções de fluxo que não representam as características naturais do terreno. Portanto, é desejável que se altere menos o possível o MDE no processo de eliminação dos fossos. Duas métricas foram utilizadas para medir as alterações no MDE. O número de células alteradas (NCA), e a média absoluta da diferença de altimetria em cada célula alterada (MDA). O NCA mede a alteração horizontal enquanto que a MDA mede a alteração vertical do MDE.

Para as duas áreas de testes, usando os diferentes MDE, o método proposto esteve sempre entre as três primeiras que obtiveram melhores resultados em valores de NCA e MDA.

Tanto para as comparações com as redes de drenagem quanto para as diferenças entre MDE original e sem fossos, foi aplicado o teste estatístico de Friedman. O teste de Friedman foi utilizado para verificar que existem diferenças significativas entre os resultados das comparações realizadas. O teste também gera uma classificação chamada ranques de Friedman. Utilizando a média dos ranques de Friedman para os resultados de NCA, MDA e, concordância com a rede de drenagem, foi gerada uma classificação final considerando-se as três métricas ao mesmo tempo.

O método proposto obteve a melhor classificação final em todos os testes realizados.

Pode-se então concluir que o método proposto foi a melhor para extrair direções de fluxo para as áreas de teste e dados utilizados. Como as duas áreas se encontram dentro da bacia do rio Amazonas é possível inferir que o método também seja a melhor para extrair direções de fluxo para toda a bacia Amazônica.

6.1. Contribuições originais apresentadas por esta tese

Ao longo desse trabalho foram apresentados os avanços (contribuições) necessários para que se pudesse alcançar o objetivo de extrair direções de fluxo de MDE para estudar grandes bacias hidrográficas, em outras palavras, processar grandes volumes de dados mesmo utilizando um computador pessoal. Esse objetivo foi alcançado juntamente com o objetivo de obter direções de fluxo de qualidade, ou seja, que representassem bem as características naturais do relevo aproveitando ao máximo as informações contidas nos MDE.

Como foi explanado anteriormente, para extração de direções de fluxo é necessário eliminar os mínimos locais e áreas planas contidas no MDE. Esse processo está diretamente ligado à qualidade das direções de fluxo e também é o que mais consome tempo de processamento.

6.1.1. Forçar direção de fluxo para oceano

Os MDE podem ter valores nulos, que representam células que não devem ser levadas em considerações. No caso dos dados de SRTM, por exemplo, o valor nulo é -32768. Essas células representam regiões fora da área de estudo e/ou representam o oceano. Em ambos os casos, os fossos que fazem fronteira (adjacentes) com células nulas são corrigidos definindo sua direção de fluxo para célula de valor nulo e não é alterado nenhum valor de altimetria do MDE. Isto economiza tempo de processamento e evita modificações desnecessárias no MDE.

6.1.2. Dividir o MDE em blocos

Um dos objetivos desse trabalho é que se possa realizar o processo de extrair direções de fluxo de MDE independente do tamanho da área de

estudo (volume de dados) e do computador utilizado. Muitas vezes, o tamanho do MDE pode ser maior que o espaço de memória disponível em um computador, impossibilitando carregar todo o MDE na memória para processamentos, como por exemplo, eliminação dos fossos. De fato, isto pode acontecer facilmente, devido aos avanços na área de sensoriamento remoto, hoje é possível obter dados com alta resolução como o caso do SRTM de um segundo de arco (SRTM 30), para quase toda extensão do globo terrestre.

Para que possa se extrair direções de fluxo de MDE maiores que o espaço de memória disponível em um computador, nesse trabalho, o MDE é dividido em blocos retangulares de 512 linhas por 512 colunas. Somente a parte do MDE que está sendo processada naquele momento é carregada para memória do computador. Além do MDE as grades auxiliares também são divididas em blocos do mesmo tamanho, pois se não existe espaço de memória para o MDE também não existirá espaço de memória para as grades auxiliares.

Isto acontece tanto no processo de correção de fossos, que é a etapa que mais exige processamento e memória do computador, e também em todas outras etapas até a extração de redes de drenagens. Nos outros processos a grade de saída também é dividida em blocos retangulares (512 linhas por 512 colunas), pois, uma vez que não existe memória suficiente para carregar o MDE, muito provavelmente também não terá espaço de memória disponível para as grades de saída.

6.1.3. Cavar áreas planas em “v”

Muito frequentemente os rios são representados por áreas totalmente planas nos MDE. Mais precisamente formam uma espécie de escada com o degrau mais alto mais próximo a nascente e o degrau mais baixo no exutório. Cada um desses degraus é formado por um conjunto de células com mesmo valor de altimetria.

Nessas áreas os métodos de correção do MDE acabam criando padrões de rede de drenagem que seguem uma das margens do rio. O desejado é

que a drenagem passasse sobre a calha do rio, porém não é possível afirmar exatamente onde se encontra a calha de um rio no MDE. No caso do MDE uma boa aproximação é se a drenagem passar pelo centro do rio.

Sobre as áreas planas não é possível definir uma direção de fluxo para suas células. Em outras palavras são aglomerados de fossos que requerem tempo de processamento para serem eliminados.

Para resolver esses problemas as áreas planas foram cavadas em forma de “v” das bordas para o centro. Isto garantiu que a drenagem extraída do MDE corrigido passe pelo centro do rio. Os fossos passam a se concentrar no centro do rio que passou a ser mais baixo que as bordas. Isto diminui drasticamente os fossos nas áreas planas e ajudam o PFS a achar um caminho de saída para os fossos. O PFS é facilitado, pois o algoritmo passa a analisar um número menor de células para achar a célula de saída.

6.1.4. Fossos simples

Foi observado que alguns fossos isolados eram facilmente resolvidos alterando somente o valor de altimetria da própria célula fosso. Isto é feito substituindo o valor de altimetria da célula fosso pelo valor de altimetria da célula adjacente mais baixa acrescido de 10^{-3} (o porquê desse valor é explicado mais adiante). O infortúnio dessa técnica é que ao se resolver um fosso, um ou mais fossos podem ser criados (fossos que não existiam antes) nas células adjacentes ao fosso; e ao se eliminar o fosso dessa célula adjacente podem-se criar outros fossos e assim por diante. Portanto, primeiramente são eliminados todos os fossos que são possíveis eliminar por essa técnica e que não criam fossos em células adjacentes.

Essa técnica requer menos processamento e altera menos o MDE do que o PFS para remover um fosso.

6.1.5. Condição de parada adaptativa do algoritmo PFS

Para eliminar um fosso o algoritmo PFS acha um caminho até uma célula de saída que tem valor de altimetria menor que a do fosso. Então, o próximo passo é cavar o caminho até a célula de saída. Cavar um caminho significa criar um declive no perfil de altimetria do caminho da célula fosso até a célula de saída. Por restrições numéricas devido ao compilador e ao tipo de dado escolhido (float) o valor mínimo de diferença de altimetria entre duas células é 10^{-3} . Por causa dessa restrição, cavar o caminho pode diminuir o valor de altimetria da célula de saída, e essa célula pode se tornar um fosso. Isso é um efeito indesejado, pois esse fosso terá que ser corrigido gerando mais alterações no MDE e consumir mais tempo de processamento. Para eliminar esse efeito indesejado, à medida que o caminho aumenta uma célula, a altimetria da célula de saída deve ser subtraída de 10^{-3} . Por exemplo, se a altimetria da célula fosso é 9 o critério de parada é achar uma célula com altimetria menor que 9 para caminhos de comprimento 1 (um). Se o algoritmo passar a procurar a saída para caminho de comprimento 2 o critério de parada é achar uma célula com altimetria menor que 8,99, e assim por diante.

O valor de 10^{-3} foi escolhido, pois, devido ao compilador (Microsoft Visual C++ 2015) e ao tipo de dado escolhido (float), o número de dígitos significativos é 7. Para medir o maior valor de altimetria encontrado no planeta Terra, que é o pico Everest que mede menos de 9000 metros de altitude, são necessários 4 significativos. Portanto sobraram apenas três dígitos e o menor número que se pode representar com 3 dígitos é 0,001.

6.1.6. Janela adaptativa do PFS

Como foi explicado anteriormente, muitas vezes não é possível carregar todo o MDE na memória principal de um computador. Nesses casos é necessário dividir o MDE em pequenos blocos e, carregar somente os blocos que estão sendo processado num determinado momento. Acessar dados em disco rígido é muito mais lento do que acessar dados na memória principal de um computador. Portanto, é desejado que se ocorra

menos acesso a dados no disco. Em outras palavras é desejado minimizar o número de carregamentos e descarregamentos de blocos do MDE.

O algoritmo PFS depende de uma grade auxiliar do mesmo tamanho que a grade do MDE para registrar quais células já foi analisada pelo algoritmo para eliminar um fosso. Toda vez que o PFS vai eliminar um novo fosso, essa grade auxiliar deve ser “zerada” (todas suas células dever ter valor zero). Esse processo de zerar a grade auxiliar pode ocasionar muito acesso a disco, pois será necessário acessar todos os blocos da grade auxiliar. Para evitar isso é armazenado a coluna máxima e mínima e, a linha máxima e mínima das células analisadas para se resolver um fosso. Em outras palavras o retângulo envolvente. Somente as células dentro desse retângulo envolvente foram modificadas e, portanto, somente essas células dever ser zeradas. Para que isso seja possível é necessário que a grade auxiliar seja inicializada com zero quando criada.

6.1.7. Área acumulada

Outro processo que está diretamente ligado com as direções de fluxo é o cálculo de área acumulada. Esse processo consome boa parte do tempo de processamento quando se quer extrair as redes de drenagem de MDE utilizando o algoritmo D8. Foram feitos avanços significativos em relação ao método para o cálculo de área acumulada inicialmente proposto por O'Callaghan e Mark (1984). O algoritmo original tem complexidade algorítmica $O(n^2)$ enquanto a proposta neste trabalho tem complexidade algorítmica $O(n)$.

6.1.8. Capacidade de processamento

O método proposto foi capaz de processar grande volume de dados. O primeiro teste utilizou um computador pessoal (Intel i7 2.40GHz com 16GB de memória RAM) para processar todo o subcontinente da América do Sul. O processo de correção de fossos levou em torno de 6 horas, e o restante do processo (até se obter as redes de drenagem no formato

vetorial) demorou mais 3 horas. Ou seja, em 9 horas foi possível obter as redes de drenagem para todo o subcontinente da América do Sul.

Um segundo teste utilizou um computador mais potente (Intel® Xeon® (CPU ES 2420 v2@ 2,20 GHz) com 48 GB de memória RAM), para se obter a rede de drenagem para quase todo o globo terrestre. O processo de correção de fossos levou 24 horas, e o restante do processo, mais 10 horas. Em outras palavras, em 34 horas foi possível obter as redes de drenagem para todo o globo terrestre, já em formato vetorial.

6.2. Melhorias possíveis

O processo de correção de fossos é o que consome maior tempo de processamento. O algoritmo proposto neste trabalho para correção de fossos é linear, em outras palavras, utiliza somente um processador (núcleo). Uma possibilidade interessante é o uso efetivo de processadores multinúcleos, com o uso de *treads*, de forma que se possa diminuir ainda mais o tempo de processamento para esse processo.

Futuramente mais testes devem ser realizados utilizando os dados do SRTM de 30 metros. Os dados do SRTM de 30 metros não foram utilizados neste trabalho, pois esses dados possuem “vazios”. Os vazios são células onde não foram estimados valores de altimetria e, portanto deve ser utilizada alguma técnica para preencher esses vazios. A escolha da técnica pode influenciar diretamente nos resultados dos testes.

Todo este trabalho foi baseado em uma única direção de fluxo. Será importante uma solução que possa, de forma eficiente, armazenar e processar múltiplas direções de fluxo.

A versão mais recente da plataforma TerraHidro se encontra no site na internet: <http://www.dpi.inpe.br/terrahidro> e inclui todas as funções que permitem a aplicação do método proposta nesta Tese.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAI, R.; LI, T.; HUANG, T.; LI, J.; WANG, G. Geomorphology An efficient and comprehensive method for drainage network extraction from DEM with billions of pixels using a size-balanced binary search tree.

Geomorphology, v. 238, p.56–67, 2015. Available at:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.028>.

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

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.04.024>.

BERGE, C.; MINIEKA, E. **Graphs and hypergraphs**. Amsterdam: North-Holland publishing company, 1973.

CHOROWICZ, J.; ICHOKU, C.; RIAZANOFF, S.; KIM, Y. Algorithm for automated drainage network extraction. **Water Esourcerse Search**, v. 28, n. 5, p.1293–1302, 1992.

COLLISCHONN, W. BUARQUE, D. C.; Paz, A. R.; Mendes, C. A.; Fan, F. M. Impact of pit removal methods on DEM derived drainage lines in flat regions. In: AWRA SPRING SPECIALTY CONFERENCE, 2010, Orlando. **Proceedings...** Orlando: AWRA, 2010.

GARBRECHT, J.; MARTZ, L.W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. **Journal of Hydrology**, v.193, p.2014–213, 1997.

JENSON, S.K.K.; DOMINGUE, J.O.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.

JONES, R. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. **Computers & Geosciences**, v. 28, n. 9, p.1051–1060, 2002.

LINDSAY, J.B. Whitebox GAT: a case study in geomorphometric analysis. **Computers & Geosciences**, v. 95, p.75–84, 2016.

LINDSAY, J.B.; CREED, I.F. Removal of artifact depressions from digital elevation models: towards a minimum impact approach. **Hydrological Processes**, v.19, n. 16, p.3113–3126, 2005.

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.

MORRIS, D.G.; HEERDEGEN, R.G. Automatically derived catchment boundaries and channel networks and their hydrological applications. **Geomorphology**, v. 1, n. 2, p.131–141, 1988.

NARDI, F.; GRIMALDI, S.; SANTINI, M.; PETROSELLI, A.; UBERTINI, L. Hydrogeomorphic properties of simulated drainage patterns using digital elevation models: the flat area issue / Propriétés hydro-géomorphologiques de réseaux de drainage simulés à partir de modèles numériques de terrain: la question des zones planes. **Hydrological Sciences Journal**, v. 53, n. 6, p.1176–1193, 2008.

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

OLIVEIRA, G.P.; SALDANHA, M.F.S.; CORREIA, A.H. Projeto radiografia da Amazônia: colorização e estratificação vegetal de dados SAR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 16., 2013, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 2022-2029. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00066-9 (Internet), 978-85-17-00065-2 (DVD). IBI: <3ERPFQRTRW34M/3E7GH5G>. Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW34M/3E7GH5G>>.

PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W. River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution

digital elevation model. **Journal of Hydrology**, v. 343, n. 3–4, p.127–139, 2007.

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.

QUINN, P.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. 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 calculate it and how to use it within the topmodel framework. **Hydrological Processes**, v. 9, n. 2, p.161–182, 1995.

RENNÓ, C.D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M.J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p.3469–3481, 2008.

REUTER, H.I.; NELSON, A.; JARVIS, A. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 21, n. 9, p.983–1008, 2007.

SEDGEWICK, R. **Algorithms in C++**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1992.

ROSIM, S. **Estrutura baseada em grafos para representação unificada de fluxos locais para modelagem hidrológica distribuída**. 2008. 110 p. IBI: <http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnK3Y/UL52y>. (INPE-15320-TDI/1363). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnK3Y/UL52y>.

ROSIM, S.; MONTEIRO, A.M.V.; RENNO, C.D.; SOUZA, R.C.M.; SOARES, J.V., 2003. TerraHidro - uma plataforma computacional para o

desenvolvimento de aplicativos para a análise integrada de recursos hídricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2589 - 2596. CD-ROM. ISBN 85-17-00017-X. (INPE-16167-PRE/10770). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.17.20.15>>.

RUEDA, A.; NOGUERA, J.M.; MARTÍNEZ-CRUZ, C. A flooding algorithm for extracting drainage networks from unprocessed digital elevation models. **Computers and Geosciences**, v. 59, p.116–123, 2013. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.06.001>.

SCHMIDT, A.; LAFARGE, F.; BRENNER, C.; ROTTENSTEINER, F.; HEIPKE, C. Forest point processes for the automatic extraction of networks in raster data. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.126, p.38–55, 2017. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.01.012>.

SEIBERT, J.; McGLYNN, B.L. A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 43, n. 4, p.n/a-n/a, 2007.

SHARY, P.A.; SHARAYA, L.S.; MITUSOV, A. V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. **Geoderma**, 107, n. 1-2, p.1–32, 2002.

SIEGEL, S. **Nonparametric statistics for the behavioral sciences**. McGraw-Hill, 1977.

SOILLE, P. Optimal removal of spurious pits in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 40, n. 12, 2004.

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.

WILSON, J.P. Digital terrain modeling. **Geomorphology**, v. 137, n. 1, p.107–121, 2012.

ZHANG, H. et al. An integrated algorithm to evaluate flow direction and flow accumulation in flat regions of hydrologically corrected DEMs. **Catena**, v.151, p.174–181, 2017. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.009>.

ZHENG, X. et al. Advances in water resources a robust channel network extraction method combining discrete curve evolution and the skeleton construction technique. **Advances in Water Resources**, v. 83, p.17–27, 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.05.003>.