



Ministério da  
**Ciência e Tecnologia**



[sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.01.13.51-TDI](http://sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.01.13.51-TDI)

## **AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS E MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DA DRENAGEM**

Darcy Carolina Jiménez Fernández

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelo Dr. Marcio de Morison Valeriano, aprovada em 30 de maio de 2011.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39K8BSL>

INPE  
São José dos Campos  
2011

## **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

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**

### **Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

### **Membros:**

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência e Tecnologia**



[sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.01.13.51-TDI](http://sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.01.13.51-TDI)

## **AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS E MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DA DRENAGEM**

Darcy Carolina Jiménez Fernández

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelo Dr. Marcio de Morison Valeriano, aprovada em 30 de maio de 2011.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39K8BSL>

INPE  
São José dos Campos  
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

J564 Jiménez Fernández, Darcy Carolina.  
Avaliação de algoritmos e modelos digitais de elevação para extração automática da drenagem / Darcy Carolina Jiménez Fernández. – São José dos Campos : INPE, 2011.

xx+92 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.01.13.51-TDI)

Dissertação (Mestrado Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientador : Dr. Marcio de Morison Valeriano.

1. Drenagem. 2. Algoritmos de fluxo. 3. Relevo. 4. MDE.  
5. Área de captação. I.Título.

CDU 528.8.04 (811.1) (815.6)

---

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Mestre em  
Sensoriamento Remoto

Dra. Dilce de Fátima Rossetti

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Marcio de Morisson Valeriano

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Teresa Gallotti Florenzano

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Ailton Luchiari

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / USP / São Paulo - SP

Este trabalho foi aprovado por:

- maioria simples
- unanimidade

Aluno (a): Darcy Carolina Jiménez Fernández

São José dos Campos, 30 de maio de 2011



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a meus pais, Darsi e Wilfredo, meus irmãos Dayana e Wilfredo, pelo apoio incondicional desde o início até o fim desta etapa.

Agradeço ao meu orientador de mestrado Márcio de Morisson Valeriano, por todo o conhecimento compartilhado, paciência, críticas e amizade, durante o desenvolvimento no curso de mestrado.

Aos meus colegas da turma 2009 do INPE, agradeço porque mais que uma turma muitos de nós viramos amigos de verdade. Obrigada Luciana e Gabriel, finalmente, conseguimos!!!.

Ao meu companheiro Hiran Zani quem admiro muito, agradeço a paciência, o apoio e o amor brindado durante esta etapa na minha vida. Ao meu amigo Clódis, obrigada pela ajuda e pela amizade.

Agradeço à instituição FONACIT pelo financiamento, Fundación Instituto de Ingeniería, especificamente ao Centro de Processamento Digital de Imagens (CPDI), pelo apoio concedido e pela autorização para realização deste curso.



## RESUMO

Esta pesquisa avaliou o processo de extração automática de redes de drenagem de Modelos Digitais de Elevação (MDE) em função de diferentes dados, relevos, algoritmos e parâmetros de operação. Dados SRTM, Topodata e GDEM de quatro (4) microbacias de geomorfometrias distintas foram submetidos à extração de redes de drenagem com seis (6) algoritmos de fluxo (D8, Rho8, Dinf, Mf, KRA e DEMON), operados sob diferentes limiares de área de captação. O efeito de cuidados de pré-processamento do MDE também foi avaliado. Como referência para validação, foram utilizadas duas redes de drenagem mapeadas previamente, no Estado de São Paulo, na escala 1:50.000, e outra no interflúvio Madeira-Purus (RO), na escala 1:100.000. Em toda circunstância testada, as redes experimentais e de referência foram sobrepostas para análise visual e controle de sua correspondência, quantificada também com recursos de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para estimar acertos, erros e questões posicionais. Resultados de análises quantitativas das redes experimentais selecionadas foram comparados aos das referências para uma avaliação funcional das metodologias de extração digital. Entre os principais resultados se obteve: os processos automáticos testados produziram resultados aparentemente adequados para escalas relativamente generalizadas, porém insatisfatórios quando observadas em escalas compatíveis com a percepção de feições evidentes dos MDE de origem, necessitando de ajustes por outras metodologias; diferentes desempenhos dos algoritmos em cada microbacia; variação na densidade da drenagem com o limiar de área de captação; e, no relevo plano da Amazônia, o baixo desempenho geral das metodologias, exceto quando se aplicaram dados Topodata preparados com filtragem média (3x3). O algoritmo com melhor desempenho na maioria das microbacias estudadas aqui foi o DEMON. O estudo dos limiares de área de captação evidenciou a necessidade de tratamento estratificado por áreas com características geomorfológicas semelhantes.



# **AUTOMATIC DRAINAGE NETWORK EXTRACTION USING DIGITAL ELEVATION MODELS**

## **ABSTRACT**

This work is an evaluation of automatic processes for drainage extraction from Digital Elevation Models (DEM), as related to different data sources, terrain types, algorithms and operation parameters. SRTM, Topodata and GDEM data of four (4) watersheds with distinct geomorphometries were processed through six (6) different flow algorithms (D8, Rho8, Dinf, Mf, KRA e DEMON), operated with different caption area thresholds. The effect of DEM pre-processing procedures was also evaluated. Two mapped drainage networks, in the State of São Paulo (SP), at the 1:50,000 scale, and in the State of Rondônia (RO), at the 1:100,000 scale, were used as reference data source. All tests involved reference and experimental networks, which were superimposed for visual analyses and correspondence assessments, also quantified with Geographical Information System (GIS) resources, to evaluate errors and positional issues. Analyses of the drainage networks from reference data and experimental results were compared as a functional evaluation of the digital extraction methodologies. The main results showed: drainage networks resulting from automatic processes were apparently suitable for relatively generalized scales, but unsatisfactory when observed at the scales compatible to the perception of features in the respective DEM, requiring adjustments by other methodologies; distinct performance of algorithms among watersheds; and a relation between caption area threshold and drainage density; and, in plain relief of Amazonia, the general low performance of all methodologies, except when using Topodata after pre-processed with 3x3 mean filter. Best performances were achieved with DEMON algorithm. The study on threshold parameter evidenced the need for stratified processing in geomorphometrically similar areas.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Relação Drenagem – Relevo – MDE – SIG.....	1
Figura 2. 1 – Bacia de drenagem e seus elementos. ....	6
Figura 2. 2 - Divisores e vertentes em uma bacia hidrográfica. ....	7
Figura 2. 3 - Tipos de formas das microbacias.....	9
Figura 2. 4 - Padrões de drenagem básicos. ....	10
Figura 2. 5 - Orientação aproximada de alguns sistemas de informação geográfica SIG usados para extração de redes de drenagem automaticamente. ....	19
Figura 2. 6 - Algoritmos de fluxo. ....	22
Figura 2. 7 - (a) Direções de fluxo possíveis para um determinado <i>pixel</i> e (b) direção de fluxo escolhida em função da maior declividade entre o <i>pixel</i> central e os vizinhos, segundo o método D8.....	23
Figura 2. 8 - Duas grades mostram (a) elevação, e (b) linhas de fluxo paralelas produzidas com o algoritmo de encaminhamento de fluxo D8.....	24
Figura 2. 9 - Duas grades mostrando (a) elevação e (b) linhas de fluxo produzidas com o algoritmo de fluxo Rho8. ....	25
Figura 2. 10 - Cálculo de direções de fluxo segundo o método Dinf. ....	27
Figura 2. 11 - Repartição do fluxo usando o algoritmo MF.....	28
Figura 3. 1 - Encadeamento geral das diferentes etapas do trabalho.....	31
Figura 3. 2 - Variáveis consideradas neste estudo.....	33
Figura 3. 3 – Localização e MDE das microbacias selecionadas para estudo.....	34
Figura 3. 4 – Climogramas das áreas onde se encontram as microbacias estudadas. ....	35
Figura 3. 5 - Curvas hipsométricas das microbacias analisadas.....	39
Figura 3. 6 – Redes de drenagem utilizadas como referência para as microbacias analisadas. ....	43
Figura 3. 7 - Extração das redes de drenagem e as componentes avaliadas nos testes. .	46
Figura 4. 1 – Resultados preliminares das redes de drenagem da SJC1 utilizando os dados Topodata. (a) Rede de drenagem de referência, (b) obtida do dado original, (c) obtida depois de filtrar o dado uma vez e (d) obtida depois do dado ser filtrado cinco vezes. Os quadrados ressaltados em cinza claro são detalhes correspondentes às Figuras 4.2 e 4.3.....	52
Figura 4. 2 - Detalhes identificados com o número um (1) apresentados em cor cinza na Figura 4.1 mostrando o efeito da filtragem do MDE nas redes de drenagem obtidas. (1a) rede de drenagem de referência; (1b), é a rede de drenagem obtida do dado original; (1c) e (1d) são as geradas dos dados filtrados uma (1) e cinco (5) vezes, respectivamente.....	53

Figura 4. 3 - Detalhe identificados com o número um (2) apresentados em cor cinza na Figura 4.1 mostrando o efeito da filtragem do MDE nas redes de drenagem obtidas. (2a) rede de drenagem de referência; (2b), é a rede de drenagem obtida do dado original; (2c) e (2d) são as geradas dos dados filtrados uma (1) e cinco (5) vezes, respectivamente. ....	54
Figura 4. 4 - Testes de filtragem nos dados GDEM. Redes de drenagem para MB3 (Relevo de colina com densidade de drenagem alta). (a) Rede de drenagem de referência (b) extraída do dado original, (c) do dado filtrado uma vez e (d) do dado filtrado três vezes. ....	55
Figura 4. 5 - Testes de filtragem nos dados Topodata na MB4 (Relevo plano) usando o algoritmo de fluxo D8. (a) Rede de drenagem de referência, (b) extraída do dado original, (c) rede do dado filtrado uma vez e (d) do dado filtrado cinco vezes. Os quadros em cinza são detalhes 1 (norte da MB) e 2 (sul da MB), correspondem às Figuras 4.6, respectivamente. ....	56
Figura 4. 6- Detalhes das redes extraídas para Mb4 a partir de Topodata; (a) Drenagem de referência, (b) obtida do dado original, (c) do dado filtrada uma vez e (d) do dado filtrada cinco vezes. ....	58
Figura 4. 7 - Testes de filtragem sobre os dados SRTM. Redes de drenagem obtidas de SRTM. (a) rede de drenagem de referência, (b) rede obtida do dado original, (c) rede obtida do dado filtrado uma vez e (d) rede gerada a partir do dado filtrado pela quinta vez. ....	59
Figura 4. 8 - Áreas de captação das microbacias calculadas com o algoritmo de fluxo D8, a partir dos três MDE utilizados. ....	60
Figura 4. 9 – Detalhes das áreas de captação calculadas para MB1 (Relevo de Serra) (a, b, c). As áreas de captação mostradas foram obtidas a partir de Topodata. (a) Área de captação calculada usando o algoritmo de fluxo D8, (b) usando Dinf, e (c) usando DEMON. Estes foram representadas em escala logarítmica para melhor apreciação. Na mesma figura algumas características geomorfométricas (d, e, f). (d) Curvatura horizontal, (e) orientação de vertentes e (f) declividade. ....	63
Figura 4. 10 – Detalhes das áreas de captação calculadas para MB4 (Relevo Plano) (a, b, c). As áreas de captação mostradas foram obtidas a partir de Topodata (Filtrado). (a) Área de captação calculada usando o algoritmo de fluxo D8, (b) usando Dinf, e (c) usando DEMON. Estes foram representadas em escala logarítmica para melhor apreciação. Na mesma figura algumas características geomorfométricas (d, e, f). (d) Curvatura horizontal, (e) orientação de vertentes e (f) declividade. ....	64
Figura 4. 11 - (a), (b) Razão das áreas de captação obtidas para MB3; (Relevo de colina) usando Topodata e GDEM. (c), (d) Razão das áreas de captação obtidas para MB4; (Relevo plano) usando Topodata e SRTM. Resultados provenientes dos algoritmos de fluxo D8 (a), (c) e DEMON (b), (d). ....	66

- Figura 4. 12 - Efeito da aplicação de um único valor de limiar de área da captação em áreas com relevos diferentes. (a) Rede de drenagem de referência para MB1, (b), (e) extraída usando  $L= 8,75.10^{-3} \text{ Km}^2$  (L: Limiar), (c), (f)  $L=0,4 \text{ km}^2$  e (d) rede de referência MB4. O algoritmo de fluxo utilizado foi o Dinf e o MDE de Topodata (para MB4 foi Topodata filtrado)..... 67
- Figura 4. 13 - Áreas com mesmo tipo de relevo e densidades de drenagem diferentes. (a) e (c) drenagens de referência para as MB2 (Relevo de colina com baixa densidade de drenagem) e MB3 (Relevo de colina com alta densidade de drenagem) respectivamente. (b) e (d) Drenagens obtidas a partir de dados de Topodata usando o algoritmo Dinf. .... 69
- Figura 4. 14 - Densidades de drenagens ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) calculadas para cada uma das microbacias com cada um dos algoritmos de fluxo usando os diferentes modelos digitais de elevação. A barra em cor preta representa a densidade de drenagem da rede de referência. As barras em tons de cinza representam as densidades de drenagens estimadas a partir dos três MDE utilizados e os diferentes algoritmos de fluxo. .... 70
- Figura 4. 15 – Erros calculados nas redes de drenagem extraídas em cada uma das MB a partir de cada MDE com cada um dos algoritmos de fluxo utilizados. As barras representam os MDE utilizados e cada três barras correspondem um algoritmo de fluxo. Cada linha corresponde com uma MB, cada coluna com os erros e acertos; (a) % de erros de omissão, (b) % de erros de comissão e (c) % de acertos ..... 73
- Figura 4. 16 – Deslocamentos apresentados pelas redes extraídas em relação às redes de referência. (a) distância máxima de deslocamento obtida para cada rede de drenagem gerada com cada um dos algoritmos de fluxo me todas as MB e (b) distância média de deslocamento obtida para cada rede de drenagem gerada com cada um dos algoritmos de fluxo para cada MB. .... 76
- Figura 4. 17 – Detalhe mostrando em os erros de posicionamento das redes extraídas em relação a referência. Fragmento de rede de drenagem da MB2. (a) Detalhe a escala 1:100 00, (b) escala 1:50 000 e (c) escala 1:25.000. Os traços em cinza correspondem com a referência e os pretos com as redes extraídas. .... 79



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2. 1- Versões dos dados SRTM .....	14
Tabela 3. 1- Características morfométricas das bacias analisadas .....	40
Tabela 3. 2 – Características geográficas das microbacias analisadas .....	40
Tabela 3. 4 - Limiares (km <sup>2</sup> ) selecionados para cada uma das microbacias analisadas .	48
Tabela 4. 1 - Parâmetros obtidos das redes de drenagem de referência e extraídas para MB1 a partir dos dados Topodata. Onde Ns: numero de segmentos; Ct: comprimento total de rios e Dd densidade de drenagem. ....	52
Tabela 4. 2 - Parâmetros considerados nas redes de drenagem de MB3 usando GDEM. Onde Ns: numero de segmentos; Ct: comprimento total de rios e Dd densidade de drenagem .....	55
Tabela 4. 3 - Parâmetros considerados nas redes de drenagem de MB4 usando Topodata. Onde Ns: numero de segmentos; Ct: comprimento total de rios e Dd densidade de drenagem .....	57
Tabela 4. 4 - Parâmetros considerados nas redes de drenagem da microbacia 4 usando SRTM. Onde Ns: numero de segmentos; Ct: comprimento total de rios e Dd densidade de drenagem .....	59
Tabela 4. 5 - Valores máximos (Max.) de área de captação (km <sup>2</sup> ) para cada microbacia estudada usando o algoritmo de fluxo de D8 e os diferentes MDE .....	61
Tabela 4. 6 - Parâmetros analisados para MB1 e MB4. Onde Ns: numero de segmentos; Ct: comprimento total de rios, Dd densidade de drenagem, L: Limiar e RMB: rede de referência .....	68
Tabela 4. 7 - Parâmetros considerados nas redes de drenagem extraídas. Onde Ns: numero de segmentos; Ct: comprimento total de rios, Dd densidade de drenagem e RMB: rede de referência .....	69
Tabela 4. 8 - Densidades de drenagem calculadas para cada microbacias analisadas ...	71
Tabela 4. 9 – Erros (omissão e comissão, %) e acertos (%) calculados para cada rede de drenagem de cada MB derivada dos diferentes MDE utilizados .....	74
Tabela 4. 10 – Deslocamentos (m) calculados para as redes extraídas automaticamente com cada um dos algoritmos de fluxo em cada MB .....	77



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

MDE - Modelo Digital de Elevação

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

ASTER GDEM - *Global Digital elevation Model ASTER*

Topodata - Banco de dados geomorfométricos do Brasil

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

MB - Microbacia

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

NIMA - *National Imagery and Mapping Agency*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

NGA - *National Geospatial-Intelligence Agency*

SIG - Sistema de Informação Geográfica



## SUMARIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO .....</b>	<b>5</b>
2.1. Redes de drenagem.....	5
2.1.1. Características geométricas .....	8
2.1.2. Características de relevo.....	10
2.1.3. Características da rede de drenagem .....	11
2.2. Modelos Digitais de Elevação (MDE) .....	12
2.2.1. SRTM ( <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> ) .....	13
2.2.2. Topodata (Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil) .....	15
2.2.3. GDEM ( <i>Global Digital Elevation Model</i> ).....	15
2.3. Extrações de redes de drenagem .....	16
2.3.1. Extração automática .....	16
2.3.2. Programas para análises hidrológicas.....	19
2.3.3. Algoritmos de fluxo .....	21
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
3.1. Fluxo geral do trabalho .....	31
3.2. Caracterização das áreas de estudo .....	33
3.3. Dados.....	41
3.3.1. Modelos Digitais de Elevação.....	41
3.3.2. Dados de referência.....	42
3.4. Recursos de análise .....	43
3.5. Metodologia .....	44
3.5.1. Seleção e delimitação das microbacias .....	44
3.5.2. Testes preliminares.....	45
3.3.3. Extração das redes de drenagem .....	46
3.2.3. Avaliação dos resultados .....	48
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>51</b>
4.1. Testes preliminares.....	51
4.2. Extração das redes de drenagem .....	60

4.3. Avaliação dos resultados .....	70
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A caracterização das redes de drenagem e a delimitação de bacias são amplamente reconhecidas como requisitos importantes para monitoramento e gerência ambiental em escalas que vão desde bacias individuais até continentes inteiros. Além de sua importância direta, constituem importante insumo para identificação de solos e rochas, advindas da interação entre fatores associados a relevo, geologia, clima e vegetação. Os dados de drenagem mais freqüentemente disponíveis estão em escalas cartográficas generalizadas, enquanto dados detalhados são mais raros e esparsos. Dessa forma, dependendo da área de interesse, os dados cartográficos existentes podem ser insuficientes para proceder a análises no nível desejado de detalhamento. Nesse contexto, a oferta de dados topográficos orbitais (i.e. SRTM, ASTER GDEM) representa uma alternativa para a caracterização de áreas desprovidas de levantamentos cartográficos adequados. Estruturados em Modelos Digitais de Elevação (MDE), estes dados são aplicados no mapeamento de redes de drenagem por técnicas de extração automática (FERN et al., 1998; CHARLEUX-DEMARGNE; PUECH, 2000; XU; DAFANG, 2003, ANDRADES FILHO et al., 2009).

Os métodos de extração de redes de drenagem por processos automáticos têm sido muito aplicados atualmente, devido à crescente necessidade desta informação aliada à recente disponibilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e a criação de novos algoritmos e programas de análise hidrológica. No entanto, nem sempre é possível obter drenagens fiéis às existentes na paisagem, dada perda de informações que ocorrem desde o levantamento de dados até a extração (Figura 1.1). Pode-se dizer que a drenagem existente é parcialmente revelada no relevo, sendo por sua vez, simplificado no MDE. Além disto se produz uma perda quando estes dados são extraídos usando os programas de modelagem hidrológica traduzido em uma, numa degeneração crescente da complexidade do traçado existente na paisagem.

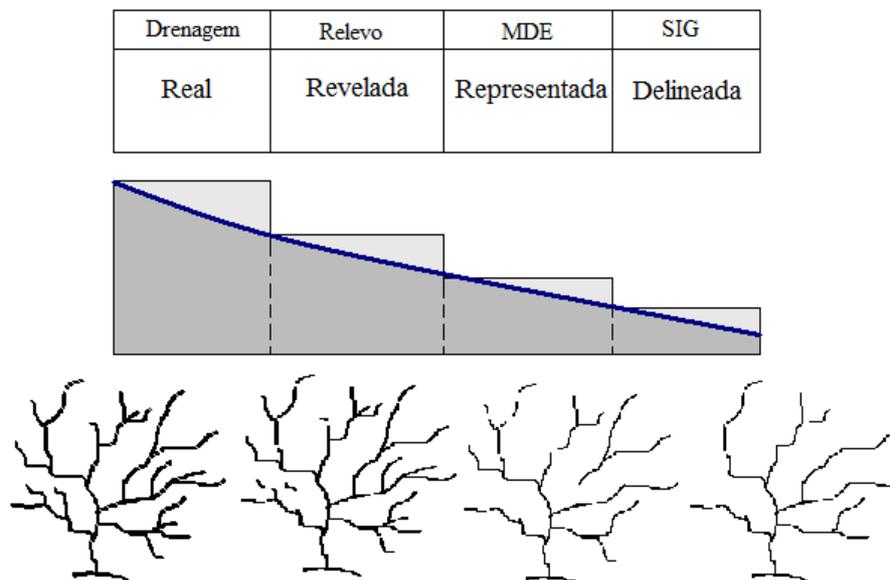


Figura 1.1 – Relação Drenagem – Relevo – MDE - SIG.

Em geral, o método de extração de redes de drenagem por processos automáticos envolve: 1) preparo e correção do MDE; 2) cálculo das direções de fluxo; 3) cálculo da área de captação; e 4) delineamento das linhas de drenagem. No processo de extração devem ser consideradas algumas variáveis, como tipo de dado representado no MDE com relação às suas características (p.e., resolução, nível de processamento, características de aquisição); o algoritmo de fluxo a ser utilizada para definir direções de fluxo e área de captação, o funcionamento do algoritmo e por fim, as características geomorfométricas da área a ser analisada. Um elemento importante a influir diretamente no resultado é o valor do limiar de área de captação, parâmetro definido pelo operador, que estabelece o valor mínimo a partir do qual se considera um local apto a desenvolver um canal de drenagem. O objetivo geral desta pesquisa foi verificar a interação destas variáveis no processo de extração de redes de drenagem usando MDE, como base para o estabelecimento de diretrizes metodológicas. Para tanto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar as fontes de MDE usadas como insumo para derivação automática de redes de drenagem.

- Avaliar o desempenho dos algoritmos de fluxo disponíveis para cálculo de área de captação, utilizada nos processos de extração automática da drenagem.
- Determinar a influência do limiar de área de captação no desempenho destes processos para otimizar sua operação.
- Analisar a interação dos fatores avaliados acima com tipos de relevo distintos para estabelecer procedimentos otimizados em função da geomorfometria da área de interesse.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO**

Neste capítulo serão fundamentados os principais elementos necessários à compreensão deste estudo: as redes de drenagem (2.1), os modelos digitais de elevação (2.2) e os processos de extração da drenagem (2.3).

### **2.1. Redes de drenagem**

Rede de drenagem corresponde a toda água superficial presente em determinada região, incluindo corpos d'água fluviais, lacustres e marinhos, marginais como: cursos d'água, lagos, lagoas, represas e enseadas. Canais de drenagem são linhas ao longo das quais processos fluviais atuam para transportar água e sedimentos a partir de seus locais de origem (HORTON, 1945; STRAHLER, 1952). A disposição e as características gerais das redes de drenagem refletem a combinação de propriedades do terreno (topografia, solo, litologia, estruturas geológicas), cobertura vegetal e a atuação do clima ao longo de sua evolução (LOPEZ; CAMARASA, 1999).

A análise de suas características traz elementos importantes para a compreensão de questões geomorfológicas, dado que a evolução dos cursos de água constitui um dos processos morfogenéticos de maior expressão na esculturação da paisagem terrestre (CHRISTOFOLLETTI, 1980). Os processos geomórficos atuantes numa bacia decorrem de um conjunto de características ambientais (clima, morfologia do terreno, cobertura vegetal, solos e litologia) e esta, por sua vez, determina diferentes características do desenho planimétrico da drenagem, em especial sua densidade (TARBOTON et al., 1991; MONTGOMERY; DIETRICH, 1992; DIETRICH et al., 1993; TUCKER et al., 2001). Uma vez que a configuração da rede de drenagem reflete as propriedades do material de origem, características geológicas e processos de formação pedogenética, é apontada como uma das informações mais importantes para a fotopedologia e fotogeologia (MONIZ, 1972).

Para Tonello (2005), a caracterização morfométrica objetiva obter índices quantitativos, que auxiliam os estudos hidrológicos de uma bacia hidrográfica. Com a análise das características morfométricas, procura-se entender a relação solo-superfície, em decorrên-

cia de processos erosivos sobre estruturas e litologias variadas. As características morfológicas de uma bacia incluem: geometria, relevo e rede de drenagem. A compreensão destas características envolve os conceitos expostos a seguir:

**Bacia de drenagem** – área drenada por um determinado rio ou por um sistema fluvial (CHRISTOFOLETTI, 1980). Conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes. Este conceito se estende às cabeceiras ou nascentes, divisores de água, cursos de água principais, afluentes e subafluentes (Figura 2.1) (GUERRA, 1993).

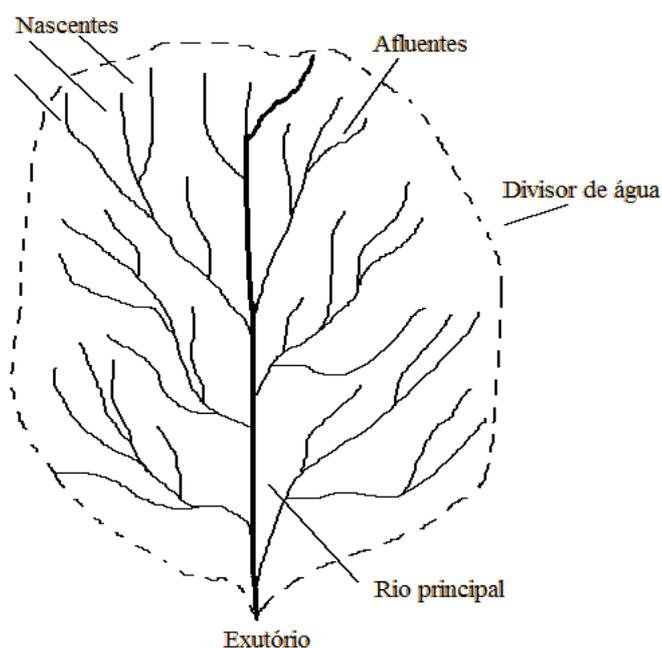


Figura 2. 1 – Bacia de drenagem e seus elementos.

**Divisor de água** – Corresponde à linha separadora das águas pluviais. Geralmente esquematizada como linha de cumeada, isto é, em divisores formados por arestas lineares, ou cristas. Todavia, um divisor de águas não é sempre constituído por cristas (Figura 2.2). Exemplos sob divisores de convexidades suaves, muitas vezes imperceptíveis, como o Planalto Central do Brasil, entre as bacias do Paraná, do São Francisco e Amazônica (GUERRA, 1993).

**Vertentes** – São planos de declives variados que divergem das cristas ou dos interflúvios enquadrando o vale (GUERRA, 1993). Nas zonas de planícies, muitas vezes as vertentes são pouco estruturadas e o rio divaga amplamente.

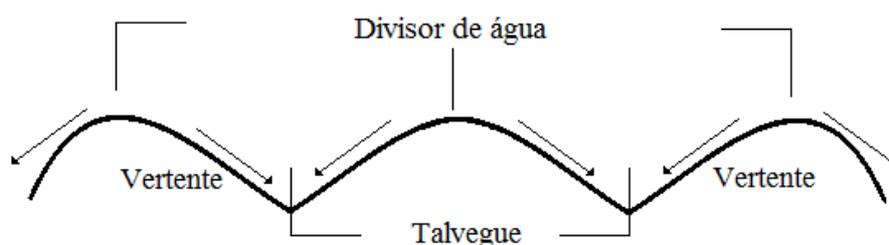


Figura 2. 2 - Divisores e vertentes em uma bacia hidrográfica.  
Fonte: Adaptado de Guerra (1993).

**Orientação de vertentes** – Também referida por *aspecto* (no contexto de SIG) ou exposição, é a direção azimutal de plano inclinado tangente à superfície da célula (JESON; DOMINGUE, 1988). Caracteriza o movimento da água através das células, pelo princípio de que a água move-se sempre na direção do menor potencial possível, ou seja, a maior declividade (FERRERO, 2004). Tal aspecto leva à denominação “direção de fluxo”, mais usada no contexto da modelagem hidrológica. Rennó (2008) define como as relações hidrológicas entre pontos diferentes de uma bacia hidrográfica. A continuidade topológica para as direções de fluxo é, conseqüentemente, necessária para que uma drenagem funcional possa existir.

**Área de captação** – Também denominada fluxo acumulado, área de contribuição, área a montante ou área de acumulação. Pode-se definir como o somatório da área de todas as células cujo escoamento contribui para o ponto em questão (JENSON; DOMINGUE, 1988; COSTA-CABRAL; BURGESS, 1994; FERRERO, 2004). Numa descrição alternativa, Fernandes et al. (2003) a define como relacionada à área da bacia a montante de cada célula específica. É uma variável que combina o grau de confluência do escoamento com o comprimento de rampa, aplicado em duas dimensões. Sua obtenção é complexa, uma vez que reúne, além de características do comprimento de rampa (conexão com divisores de água a montante), também a curvatura horizontal (confluência e divergência das linhas de fluxo) (VALERIANO, 2008).

### 2.1.1. Características geométricas

As características geométricas são aquelas que refletem a forma da bacia que ajudam na determinação de seu comportamento hidrológico, conforme se descreve a seguir:

- Área: Toda área drenada pelo sistema pluvial inclusa entre seus divisores topográficos, projetada em plano horizontal. É um parâmetro básico para o cálculo de diversos índices morfométricos (TONELLO, 2005).
- Perímetro: Comprimento da linha imaginária ao longo do divisor de águas (TONELLO, 2005).
- Coeficiente de compacidade (KC): é a relação entre o perímetro da bacia (P) e a circunferência de um círculo de área igual à área da bacia (A), segundo a Equação 2.1:

$$KC = 0,28 * (P/A^{1/2}) \quad (2.1)$$

Caso não existam fatores que interfiram, menores valores de KC indicam maior potencialidade de produção de picos de enchentes elevados.

- Fator de forma (F): relaciona a forma da bacia com a de um retângulo, correspondendo à razão entre a largura média e o comprimento axial da bacia (da foz ao ponto mais longínquo do espigão) (VILLELA; MATTOS 1975). O fator de forma (F) é calculado em função da área da bacia (A) e do comprimento do eixo da bacia (L), de acordo com a Equação 2.2:

$$F = A/L^2 \quad (2.2)$$

- Índice de circularidade (IC): Simultaneamente ao coeficiente de compacidade, o índice de circularidade tende para uma unidade à medida que a bacia aproxima-se da forma circular e diminui à medida que a forma torna-se alongada. Este índice é obtido a partir da área da bacia (A) e do perímetro (P), segundo a equação (CARDOSO et al., 2006):

$$IC = (12,57*A)/P^2 \quad (2.3)$$

Estes índices se relacionam com a dinâmica da vazão em resposta a um evento de chuva conforme a Figura 2.3: a possibilidade de concentração do escoamento, relacionada à probabilidade de enchentes, tem relação direta com F e IC e indireta com KC.

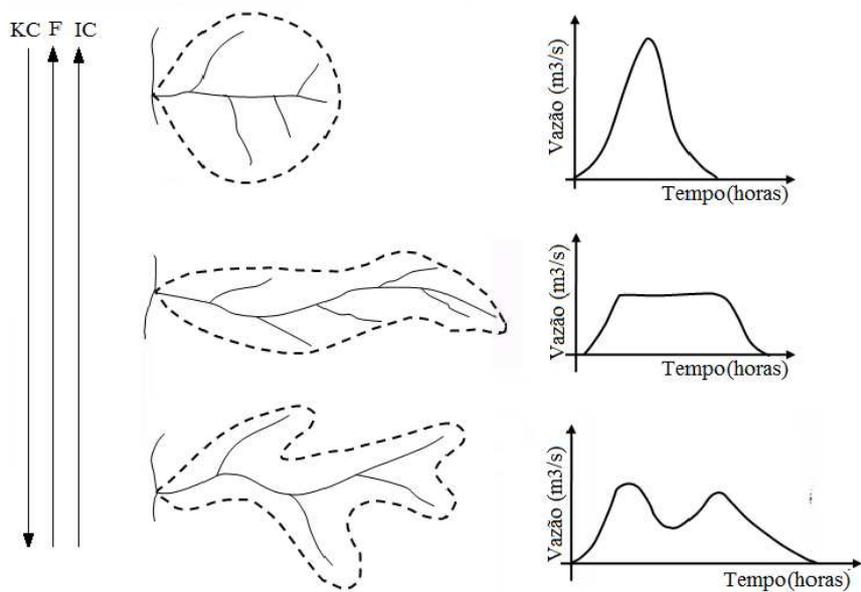


Figura 2. 3 - Tipos de formas das microbacias.  
Fonte: Christofolletti (1980).

- Padrão de drenagem: refere-se ao arranjo espacial dos cursos de água fluviais. Este pode ser influenciado, em sua atividade morfogenética, pela natureza e disposição das camadas rochosas, resistência litológica variável, diferenças de declividade e evolução geomorfológica da região. Padrões de drenagem básicos incluem: dendrítico, retangular, treliça, paralelo, radial e anelar (Figura 2.4) (CHRISTOFOLETTI, 1980).

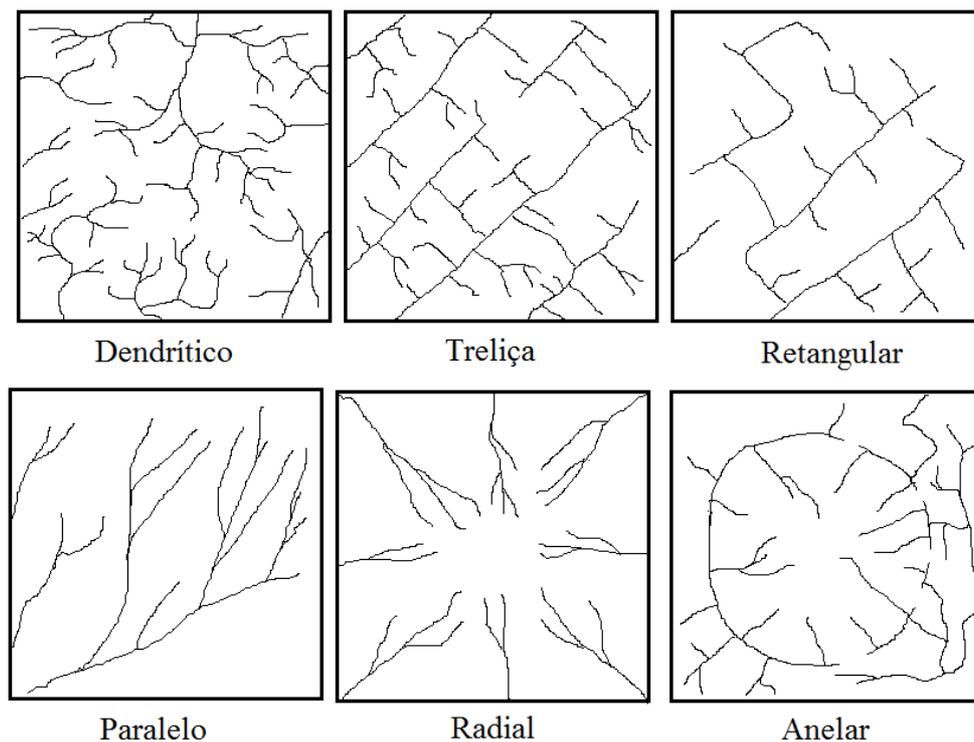


Figura 2. 4 - Padrões de drenagem básicos.  
Fonte: Adaptado de Christofolletti (1980).

### 2.1.2. Características de relevo

As características de relevo são aquelas relacionadas às variações topográficas dentro de uma bacia hidrográfica. São descritos a seguir alguns conceitos utilizados para este fim:

- Declividade da bacia: relaciona-se com a velocidade em que ocorre o escoamento superficial, afetando, portanto, o tempo que leva a água da chuva para concentrar-se nos leitos fluviais que constituem sua rede de drenagem. Os picos de enchente, infiltração e susceptibilidade para erosão dos solos são aspectos afetados pela declividade da bacia (VILLELA; MATTOS, 1975).

- Altitude: grandes variações de altitude numa bacia acarretam diferenças significativas na temperatura média, a qual, por sua vez, causa variações na evapotranspiração. Mais significativas, porém, são as possíveis variações de precipitação anual com a elevação (TEODORO et al., 2007). Por este mecanismo, a variação de altitude associa-se com a precipitação, evaporação, transpiração e, conseqüentemente, o deflúvio médio.

- Curva hipsométrica: é a representação gráfica do relevo médio de uma bacia. Representa o estudo da distribuição de área ao longo da elevação dos vários terrenos da bacia, com referência ao seu nível altimétrico mínimo.

### 2.1.3. Características da rede de drenagem

São aquelas relacionadas ao desenho planimétrico das redes de drenagem:

- Comprimento do curso de água principal: é a distância que se estende ao longo do curso de água desde sua desembocadura até determinada nascente (CHRISTOFOLETTI, 1980).

- Comprimento total dos cursos de água: corresponde à soma do comprimento da totalidade dos segmentos de drenagem da bacia analisada.

- Densidade de drenagem: correlaciona o comprimento total dos canais ou rios (Ct) com a área da bacia hidrográfica (A) (CHRISTOFOLETTI, 1969). Para calcular o comprimento devem ser medidos tanto os rios perenes como os temporários, definida por Horton (1945), pela seguinte equação:

$$Dd = L/A \quad (2.4)$$

O comportamento hidrológico das rochas, em um mesmo ambiente climático, afeta a densidade de drenagem. Onde a infiltração é mais dificultada, há maior escoamento superficial, com maior possibilidade de estabelecimento de canais permanentes e conseqüentemente densidade de drenagem mais elevada.

- Densidade segmentos: é a quantidade de segmentos existentes ( $\Sigma ni$ ) em uma determinada bacia hidrográfica por unidade de área (A) (CHRISTOFOLETTI, 1980).

$$Fs = \Sigma ni/A \quad (2.5)$$

- Índice de sinuosidade: é a relação entre o comprimento do canal principal (L) e a distância entre os extremos do canal, em linha reta ( $Dv$ ) (ALVES; CASTRO, 2003). A expressão para o cálculo do Índice de sinuosidade é descrita pelos autores como:

$$Is = L/Dv \quad (2.6)$$

## 2.2. Modelos Digitais de Elevação (MDE)

Numa definição prática (VALERIANO, 2008), MDE são arquivos que contêm registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas, como uma imagem digital, com valores de elevação em cada célula (ou em cada *pixel*, da imagem). A estrutura em grade retangular é naturalmente adaptada aos recursos de tratamento e análise de imagens digitais, o que também simplifica opções variadas de visualização (WILSON; GALLANT, 2000). As cotas altimétricas devem ser valores de altitude do relevo, idealmente, para que o MDE seja uma representação da topografia.

A propriedade de maior interesse dos MDE decorre de sua contribuição a análises quantitativas. Em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), é possível operar o MDE para extrair grande quantidade de informação, incluindo grau e a direção de declividade, a partir da relação entre as cotas de células vizinhas (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010; WILSON; GALLANT, 2000), as derivações de primeira ordem mais imediatas. As aplicações de MDE em geomorfologia podem ser resumidas principalmente em: 1) análises geomorfométricas básicas, relacionadas à descrição de altura, declividade e curvaturas; 2) análises de redes de drenagem e microbacias; 3) classificação semi-automática das formas do relevo; 4) modelagem da erosão de solos; 5) modelagem da

susceptibilidade a deslizamentos; e 6) avaliação de mudanças frente a análises topográficas (OGUCHI, 2006).

Neste estudo, serão usados diferentes MDE para extração de redes de drenagem por processos automáticos, conforme descritos a seguir.

### **2.2.1. SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)**

Os dados SRTM são produto de uma participação conjunta da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *The National Geospatial Intelligence Agency* (NGA) para adquirir dados de radar, os quais foram usados para criar mapas topográficos detalhados. O levantamento da SRTM ocorreu a bordo do ônibus espacial *Endeavour* de 11 a 22 de fevereiro de 2000, em 176 órbitas que cobriram 80% da superfície terrestre, entre 60 ° norte e 56 ° de latitude sul, com dados individualizados a cada 1 arco de segundo (cerca de 30 metros). A técnica de sensoriamento remoto aplicada na SRTM foi Interferometria de Radar, com a comparação entre duas imagens de radar tomadas em ângulos ligeiramente diferentes. Esta missão usou interferometria de passagem única, a qual adquire dois sinais no mesmo tempo a partir de duas antenas de radar diferentes. Uma antena, localizada a bordo do ônibus espacial, coletou um conjunto de dados, e um outro conjunto foi coletado por uma segunda antena, distante a 60m da primeira com auxílio de um mastro acoplado à nave. A diferença entre os dois sinais permite o cálculo da superfície de elevação. A partir deste único levantamento, os dados SRTM têm sido reprocessados em sucessivos aprimoramentos relativos às versões anteriores, de modo que existem diferentes versões, de acordo com a Tabela 2.1.

Em todas as versões, os sinais de radar obtidos na SRTM foram integrados pelo *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) em intervalos espaçados de 1 arco-segundo (~30m). Esses dados foram depois editados para delinear e aplanar os corpos de água, definir melhor linhas de costa, remover picos e poços, e preencher pequenos vazios. Dados para regiões fora dos Estados Unidos foram reamostrados por interpolação (convolução cúbica) para 3 arco-segundo (~90m) para distribuição gratuita.

Os dados são disponibilizados em quadrículas de 1° X 1° (latitude e longitude) sem projeção, ou seja, em iguais intervalos de latitude e longitude real para facilitar manipulações em ambiente SIG. As alturas estão em metros referenciadas para o geóide EGM96, *datum* WGS84. Às células sem dado foi atribuído o valor de -32768 (EROS-USGS, 2011).

Tabela 2. 1- Versões dos dados SRTM

DADO	Características	Fonte
SRTM_V1	-Contêm pontos de dados falsos em área de baixo retroespalhamento do radar, tais como corpos d'água	<a href="ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/">ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/</a>
SRTM_V2	-Foram corrigidos picos e poços ainda quando algumas áreas apresentam se sem dados	<a href="http://seamless.usgs.gov/">http://seamless.usgs.gov/</a> <a href="ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/">ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/</a>
SRTM_V2.1	-Substitui SRTM_V2 -Eliminação de artefatos (bandeamento vertical leve).	<a href="http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/">http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/</a>
SRTM_V3	-Interpolação para 1 arco-segundo -Preenchimento de vazios	<a href="http://wetlands.jpl.nasa.gov/">http://wetlands.jpl.nasa.gov/</a>
SRTM_V4	-Preenchimento de vazios	<a href="http://srtm.csi.cgiar.org/">http://srtm.csi.cgiar.org/</a>

Os dados SRTM têm sido usados como entrada para a extração de redes de drenagem (PAZ; COLLISCHONN, 2008), devido, principalmente, à sua disponibilização de forma gratuita, em combinação com o aumento da capacidade computacional e o desenvolvimento de algoritmos para o tratamento destes dados. Neste contexto, foi desenvolvido um programa chamado HydroSHEDS – Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivates at multiple Scales – (LEHNER; DÖLL, 2004), desenvolvido pelo Conservation Science Program of World Wildlife Fund (WWF). É um produto de mapeamento que provê informação hidrográfica para aplicações em escala global e regional em formato consistente. Ele oferece um conjunto de dados (formato *raster* e vetor) em diversas escalas, que inclui redes hidrográficas, limite de bacias hidrográficas, direção de drenagem e fluxo acumulado.

### **2.2.2. Topodata (Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil)**

O banco de dados Topodata contém dados topográficos e suas derivações básicas em cobertura nacional, elaborados a partir dos dados SRTM da versão 1. Os dados foram refinados da resolução espacial original de 3 arco-segundos (~90m) para 1 arco-segundo (~30m) por krigagem e o MDE refinado derivado em variáveis geomorfométricas básicas.

O banco possui dados de declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e curvatura vertical. Estes foram calculados a partir dos dados refinados aplicando algoritmos de análises geomorfométricas elaborados especificamente para este MDE (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010). Além dessas variáveis, uma derivação de segundo grau foi aplicada para evidenciação de talvegues e divisores de água, cujos resultados foram combinados à orientação de vertentes, para favorecer a interpretação das feições de drenagem e caracterização de sua estrutura. As variáveis geomorfométricas foram, ainda, classificadas para a geração de mapas não numéricos, tais como as classes de declividade consagradas pela pesquisa agrônômica (classes EMBRAPA, por exemplo), as curvaturas em convexo/planar/côncavo, bem como as possíveis formas de vertentes, entre outras representações qualitativas (VALERIANO, 2008).

Os dados estão todos estruturados em quadrículas de 1° de latitude por 1,5° de longitude, compatíveis com a articulação 1:250.000 do sistema cartográfico brasileiro. Os dados estão em estrutura *raster*, com as mesmas especificações cartográficas daquelas do SRTM, exceto a resolução espacial e vertical, que foram interpoladas. Portanto, estão referenciados em latitude/longitude (sem projeção), com coordenadas em graus decimais e *datum* WGS84. Os dados encontram-se disponibilizados em formato ASCII, IDRISI (versão 2.0), Geotiff e Bitmap.

### **2.2.3. GDEM (*Global Digital Elevation Model*)**

O GDEM é um MDE de cobertura quase global, de 1" de resolução, derivado de dados ASTER (*The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*),

desenvolvido em parceria pelo Ministério de Economia, Comércio e Indústria (METI), de Japão, e pela Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço, dos Estados Unidos (NASA). Estes dados cobrem a superfície da Terra entre as latitudes 83°N e 83°S em 22600 quadriculas de 1° x 1°. São dados de acesso livre, fornecidos pelo Centro de Análise de Dados Terrestres de Sensores Remotos (ERSDAC) do Japão e do Centro de Arquivos Distribuídos de Processos Terrestres (LP DAAC) da NASA.

O sistema sensor ASTER, construído pelo METI, foi lançado a bordo da plataforma orbital TERRA em dezembro de 1999. Tem capacidade de levantamento com estereoscópica longitudinal na banda infravermelho próximo. A resolução espacial de aquisição do sistema ASTER é de 15m no terreno. Durante a observação de 227 períodos ao longo de mais de 7 anos, foram coletadas 1260000 cenas (60x60km) em pares estereoscópicos. No lançamento público dos dados em 2009, todos os dados individuais gerados para cada cena foram agrupados e divididos em grades de 1° x 1° (HIRT et al., 2010). A metodologia usada para gerar o produto GDEM envolveu o processamento automático de cenas ASTER, incluindo estéereocorrelação para produzir o MDE, máscara de nuvens para remover *pixels* escuros, substituição de áreas cobertas por nuvens, remoção de valores atípicos e residuais, seleção das datas de aquisição médias mais convenientes para determinação das cotas finais e uma correção final de anomalias residuais, antes do corte dos dados em quadriculas de 1° x 1°. O formato disponibilizado é GeoTIFF, com coordenadas geográficas, *datum* WGS84/EGM96 (ERSDAC, 2009).

### **2.3. Extrações de redes de drenagem**

#### **2.3.1. Extração automática**

A extração de redes de drenagem a partir de modelos digitais de elevação (MDE) tem muitas aplicações úteis, por permitir a caracterização dos sistemas de drenagem onde não se têm estes dados mapeados (FERN et al., 1998) e, assim, tem sido desenvolvida por uma grande quantidade de cientistas (TARBOTON; AMES, 2001). No entanto, MDE não conseguem representar todas as variações topográficas que ocorrem na paisagem, especialmente características mais detalhadas, o que ocasiona diferenças entre a quantidade e posição de canais no dado digital e na paisagem (GARBRECHT et al.,

2001). Isso tem promovido, entre outras coisas, estudos de avaliação da exatidão de alguns dos algoritmos (MEISELS et al., 1995; MCMASTER, 2002; ORLANDINI et al., 2003; ENDRENY; WOOD, 2003; CANO, 2000; WILSON et al., 2008; ANDRADES FILHO et al., 2009) que, por sua vez, impulsionam o contínuo desenvolvimento de novos recursos.

Na atualidade, as funções disponíveis nos SIG para o traçado das redes de drenagem a partir de MDE se baseiam no cálculo da área de captação que, nos locais em que atinge valores acima de um determinado limiar, caracteriza área apta para o estabelecimento de canais de drenagem. O limiar define a área mínima requerida para que o fluxo difuso, em vertentes, seja concentrado em processos de canalização. Quanto menor o limiar escolhido, mais complexa e densa será a rede de canais obtida (TRIBE, 1990; LI et al., 2008). O detalhamento obtido com limiares progressivamente menores apresenta, entre suas limitações, a produção de linhas de drenagem artificiais paralelas nas áreas de menor declividade. Estas estruturas se assemelham a ampliações microscópicas de penas de aves, referido em toda a literatura sobre extração automática da drenagem como *feathering*, de *feather* (pena). Este efeito será referido neste trabalho como *paliça* ou *paliçamento*.

Com frequência, o valor deste parâmetro para extração de redes de drenagem é escolhido por avaliação visual da rede extraída, ocasionalmente assistida por dados observados em mapas topográficos (MONTGOMERY; GEORGIU, 1993). Neste caso, não são consideradas informações climáticas ou de solos. O usuário tem a possibilidade de interagir empiricamente, determinando o valor de fluxo acumulado acima do qual a drenagem pode se estabelecer. Assim, pressupõe-se um regime hídrico e uma condição hidrológica do solo, uniformes no sistema solo-atmosfera, permitindo o estabelecimento de uma relação única entre área de captação, volume infiltrado, volume escoado e, portanto, a possibilidade de fluxo canalizado.

Nos MDE, é comum a ocorrência de depressões (*sinks*), definidas como células ou conjunto de células com drenagem endorréica, como artefato resultante de efeitos na criação dos MDE, embora possam ocorrer depressões na paisagem concreta (sumidouros)

que têm o mesmo efeito quando expressas no MDE (TEMME et al., 2006). Esta singularidade representa um bloqueio no cômputo da área de captação acumulada ao longo dos canais de drenagem, constituindo um ponto final na linha de canalização. Os métodos numéricos para a correção deste problema foram alvo de desenvolvimentos sucessivos (PLANCHON; DARBOUX, 2001; WALLIS et al., 2009) e integram os recursos atuais de extração automática da drenagem. O procedimento comumente usado é o desenvolvido por Jenson e Domingue (1988), no qual é criado um MDE ajustado sem depressões, de tal forma que as células que contêm depressões são modificadas para o valor mínimo de elevação da borda da depressão. Yan et al. (2009) apresentou um método alternativo para o tratamento destas depressões, segundo o qual não se modifica o MDE original e sim sua análise, o que evita a criação de novas áreas planas, que são produzidas pelos demais métodos.

Cada uma das metodologias de derivação da rede de drenagem é adequada a determinadas configurações da base de dados. A metodologia mais simples é a apresentada por Tarboton et al. (1991), que se caracteriza pela geração de um plano de informação com valores de área de captação, seguido de sua classificação segundo o limiar adotado. O limiar pode ser escolhido por amostragem das áreas de contribuição dos canais de primeira ordem (cabeceira de drenagem) da base cartográfica, dentro das limitações dadas pela resolução espacial do MDE. Deve-se lembrar das relações entre a escala praticável e a resolução do MDE, em que mapeamentos mais detalhados requerem alta resolução espacial (CHEREM; et al., 2009; THOMMERET et al., 2010). O efeito da resolução dos dados SRTM para extração de redes de drenagem e outros parâmetros hidrológicos têm sido estudados por vários pesquisadores (MACMASTER, 2002; CURKENDALL et al., 2003; COLOMBO et al., 2007; PAZ; COLLISCHONN, 2008; RAHMAN, 2010). Estes estudos mostraram que: as redes de drenagem obtidas dos dados SRTM em áreas de relevo plano apresentam diferenças em relação à realidade, enquanto em áreas com relevo de montanha e em relevo de colinas as diferenças são menores (CURKENDALL et al., 2003); a qualidade da drenagem extraída a partir dos MDE testados varia conforme a resolução de trabalho das imagens e das características dos rios, levando à impossibilidade de se representarem flexões do rio menores do que o

tamanho de *pixel*; o efeito de sinuosidade artificial que ocorre quando a largura do rio é superior à dimensão dos *pixels* (PAZ; COLLISCHONN, 2008); e maiores erros posicionais ocorrem em terrenos de menores declividades (MACMASTER, 2002; RAHMAN, 2010).

### 2.3.2. Programas para análises hidrológicas

Diversos são os programas desenvolvidos para modelagem hidrológica, os quais incluem procedimentos para extração de redes de drenagem. Wood (2009) distribui os programas mais populares em termos de sua capacidade para lidar com Hidrologia, Geomorfometria ou simplesmente SIG, de modo esquemático (Figura 2.5).

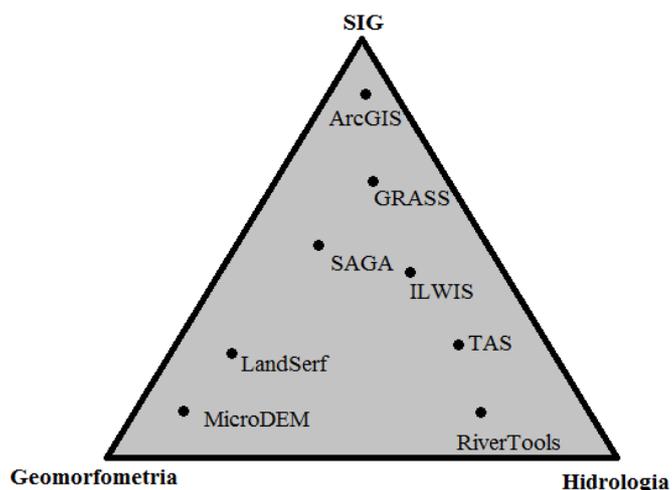


Figura 2. 5 - Orientação aproximada de alguns sistemas de informação geográfica SIG usados para extração de redes de drenagem automaticamente.  
Fonte: Wood (2009).

Todos os sistemas fornecem um menu básico de interface para selecionar dados de entrada, processamento e operações de saída. Além disso, podem se equipar com interfaces de comandos em linha (programas de lote, conhecidos por *macros*, ou *scriptings*) e podem ser elaborados em linguagens de computação comuns, tais como C, C++, *Java* e *Python* ou linguagens próprias destes mesmos pacotes.

De modo geral, a maior parte dos programas disponíveis para processamento de dados topográficos digitais possui as mesmas funções e lógicas. Estes programas requerem o

cálculo de variáveis geomorfométricas básicas, como orientação de vertentes e área de captação como insumo ao processo de extração das redes de drenagem, e englobam a determinação das ordens dos fluxos (WILSON et al., 2008). Este cálculo é feito com algoritmos específicos de fluxo (D8, Dinf. Mf, KRA, DEMON), que apresentam diferentes soluções para o mesmo problema, em decorrência de melhoramentos, novos conceitos ou, ainda, dos diferentes estágios desta linha de desenvolvimento.

Entre os programas preparados para extração da drenagem, o TAPES G (*Terrain Analysis Programs for the Environmental Science*) permite, além de calcular derivações do MDE, operar uma variedade de programas de análise com aplicações que vão desde modelagem hidrológica, solo-paisagem à ecologia. Uma variação do TAPES-G, o TAPES-C requer maior esforço para ser usado e sua principal aplicação é a modelagem hidrológica dinâmica usando o modelo hidrológico de THALES (GALLANT; WILSON, 1996).

O programa TARDEM (*Tarboton Digital Elevation Models*), que foi precedido por TauDem (*Terrain Analysis Using Elevation Models*), proporciona a remoção de poços por crescimento, para assegurar a conexão hidráulica dentro da bacia, cálculo das variáveis básicas e métodos para delineamento de bacias e sub-bacias que incluem curvatura, sensíveis à variabilidade espacial e à densidade de drenagem. Além da extração da hidrologia, apresenta funções para análise do terreno, como cálculo de índice de saturação, distância aos córregos, limite de concentração de acumulação e transporte (TARBOTON, 1997).

SAGA (*System Automated Geoscientific Analyses*) é um SIG com suporte para dados vetoriais e *raster*. É um programa livre para análises de dados espaciais que fornece todas as funções básicas em um sistema de informação geográfica. Este SIG foi desenvolvido para simplificar o uso de novos algoritmos de análises de dados espaciais dentro de uma estrutura que permite aplicações operacionais. Ele inclui a maior parte dos algoritmos publicados para o cálculo de área de captação (KISS, 2004) e variáveis relacionadas (FERRERO; CONRAD, 2009).

TAS (*Terrain Analysis System* – LINDSAY, 2009) é um SIG desenvolvido especificamente para análise de dados de elevação, que tem capacidade de modelar processos hidrológicos, baseado no algoritmo D8 para a determinação da área de captação (O'CALLAGHAN; MARK, 1984).

Enquanto muitas das aplicações do SIG possuem uma linguagem simples de programação para estender sua funcionalidade, *RiverTools* (RiverTools, 2009) pode ser estendido como, *Interactive Data Language* (IDL), e vários comandos mais simples, assim como trabalhar com outros SIG. Funciona nas plataformas de Windows, Mac e UNIX. Um dos módulos internos é da drenagem, que tem a aplicação de *Watersheds Modelling System* (WMS), cuja principal função é delinear bacias hidrográficas, redes e limites de sub-bacias a partir de MDE. Inclui os algoritmos de fluxo D8, D-Infinity, além de um próprio do programa (*Mass Flux*) para as análises de fluxo para cálculo da área de captação.

### **2.3.3. Algoritmos de fluxo**

Os algoritmos de fluxo determinam o modo como este é distribuído, desde uma célula particular até uma ou mais células na jusante, de modo a determinar, para cada ponto, a área de captação correspondente. A maioria dos algoritmos para análise das redes de drenagem traça o caminho de fluxo em direção a jusante desde as cabeceiras, passando através de cada conexão e bifurcação dentro da rede, até que um nó de saída é alcançado.

A escolha do algoritmo de encaminhamento é importante, pois são diferentes soluções para o cálculo da área de captação, bem como de outros atributos relacionados ao fluxo, como os índices de saturação do solo (*wetness index*) e de poder de escoamento (*stream power index*). São vários os algoritmos implementados nos SIG usados para simular o movimento da água em ambientes específicos (LAM, 2004). Os mesmos podem ser usados como dado de entrada para a extração de rede de drenagem de forma semi-automática (PEUCKER; DOUGLAS, 1975; MARK, 1983; O'CALLAGHAN; MARK, 1984; MONTGOMERY; GEORGIU, 1993; MEISELS et al., 1995).

Os algoritmos de fluxo se agrupam principalmente dois grandes grupos: os de fluxo simples (Figura 2.6a), onde o fluxo é dirigido em uma única direção, a mais íngreme; e os de fluxo múltiplo (Figura 2.6 b), em que se considera a dispersão do fluxo sobre a complexidade apresentada pela superfície do relevo. Os algoritmos de fluxo simples dependem principalmente da topologia da rede de drenagem, enquanto os de fluxo múltiplo consideram topologia e relevo combinados para direcionar o fluxo (CANO, 2005; PELLETIER, 2008).

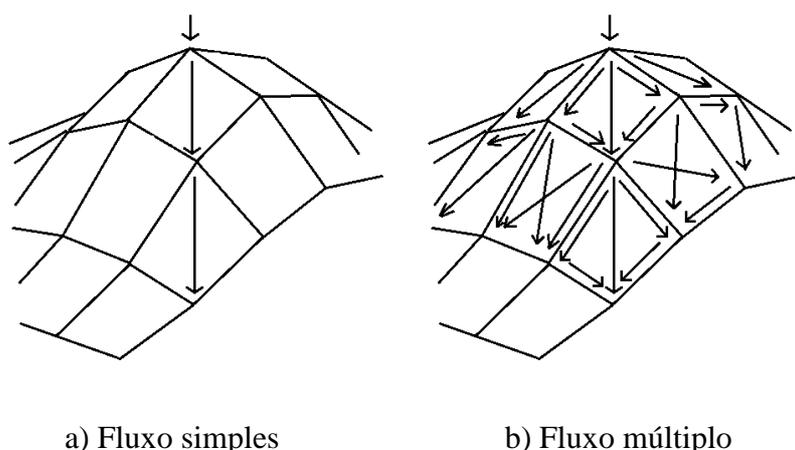


Figura 2. 6 - Algoritmos de fluxo.  
Fonte: Pelletier (2008).

O algoritmo de fluxo mais simples utilizado em modelagem hidrológica é o chamado D8 (O'CALLAGHAN; MARK, 1984), cujo nome deriva de *Deterministic eight directions*, em referência às oito direções possíveis correspondentes às oito células na vizinhança daquela que está sob análise (Figura 2.7). Este modelo é utilizado na maioria dos pacotes computacionais para estudos hidrológicos, por ser computacionalmente mais simples, e fornece resultados aceitáveis, sendo assim, o fundamento para formulação de posteriores algoritmos (FERRERO, 2004).

Pelo algoritmo D8, o ângulo de movimento do fluxo é discretizado em múltiplos de 45° (octantes), o que é considerado como o principal inconveniente do método por restringir a variedade de situações reais. Além disto, o método não tem capacidade de considerar a dispersão existente no fluxo. Isto traz, como consequência a suposição de uma concen-

tração excessiva de fluxo (irreal), fazendo com que a estimativa da área de captação seja sempre superestimada

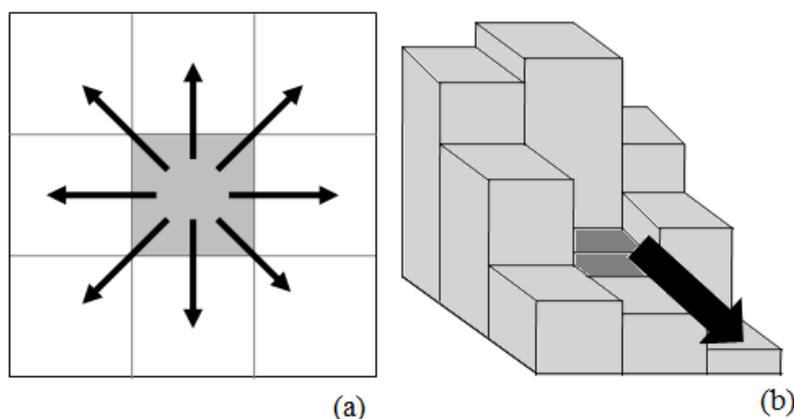


Figura 2. 7 - (a) Direções de fluxo possíveis para um determinado *pixel* e (b) direção de fluxo escolhida em função da maior declividade entre o *pixel* central e os vizinhos, segundo o método D8.

Fonte: Adaptado de Paz e Collischonn (2008).

Outro inconveniente apresentado por este algoritmo é que células com orientações diferentes em até  $44^\circ$  possam ser incluídas numa mesma categoria - enquanto pequenas diferenças podem separá-las - de acordo com o truncamento das direções, determinado pelos intervalos de octantes (FAIRFIELD; LEYMARIE, 1991; QUINN et al., 1991; COSTA CABRAL; BURGUES, 1994). Isto se deve à amplitude muito elevada para manter a precisão do modelo na maior parte dos casos, o que pode gerar estruturas fluviais pouco lógicas e sem sentido, ainda que os resultados possam se considerar satisfatórios quando generalizados (FERRERO, 2004).

Para calcular a área de captação, a cada célula é atribuído o valor de sua própria área, inicialmente. Depois, estas áreas unitárias são acumuladas ao longo da orientação de vertente (com direções discretas, em octantes), até o limite de menor elevação do MDE (PELLETIER, 2008).

Estudos mostram que, em certas condições, o D8 resulta em estruturas pouco lógicas representadas graficamente em linhas paralelas. Estas, na maioria das vezes, se correspondem com rios que se interceptam em ângulos pequenos e que, até o ponto de inter-

seção, fluem sem sinuosidade excessiva. Isto representa um problema, na elaboração dos rios a partir das direções de fluxo em relação à sua forma e à estrutura de hierarquia que os canais têm na rede de drenagem. Deste modo, pode-se resumir as maiores dificuldades deste modelo como: discretização do fluxo; resultado em linhas de fluxo paralelas (Figura 2.8); e, uma vez fundamentado em fluxos unitários (dirigidos a uma única célula), a incapacidade de simular fluxos divergentes, portanto todo o fluxo de escoamento superficial (laminar inclusive) é modelado linearmente (LAM, 2004; FERRERO, 2004).

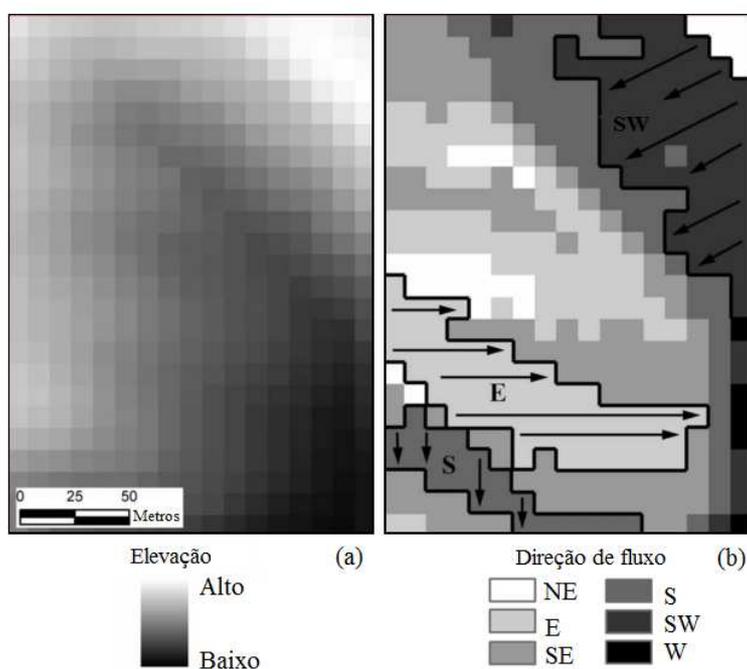


Figura 2. 8 - Duas grades mostram (a) elevação, e (b) linhas de fluxo paralelas produzidas com o algoritmo de encaminhamento de fluxo D8  
Fonte: LAM (2004).

O Algoritmo Aleatório de Oito Soluções (Rho8), de Fairfield e Leymarie (1991), é uma versão estocástica do algoritmo D8, em que se introduz um grau de aleatoriedade no cálculo das direções de fluxo. O termo aleatório faz referência ao fato de o fluxo ser direcionado de forma aleatória em função de uma probabilidade calculada segundo a declividade. Isto foi desenvolvido como solução para os caminhos de fluxo paralelos produzidos pelo algoritmo D8 em áreas planas (GALLANT; WILSON, 1996; CANO,

2005). O primeiro passo deste algoritmo é identificar as células vizinhas (incluindo diagonais) com maior declividade partindo de uma célula central. Os gradientes de declividade são calculados em cada uma dessas direções e então é selecionado um número aleatório para dirigir o fluxo para um dos candidatos. Os números são atribuídos com base numa ponderação relacionada à declividade de tal forma que caminhos de fluxo com gradientes mais íngremes têm maiores probabilidades de serem selecionados, e em geral o padrão corresponderia com aquele que seria obtido usando o algoritmo D8. No entanto, este algoritmo ainda calcula direções de fluxo irreais em áreas de vertentes. Diferentes redes de drenagem podem ser produzidas cada vez que o algoritmo é usado, devido à dependência de números aleatórios no controle da fração de fluxo entre as múltiplas células à jusante. O grau de aleatoriedade neste algoritmo faz com que atributos extraídos partindo deste método possam ser superestimados ou subestimados (COSTA CABRAL; BURGESS, 1994).

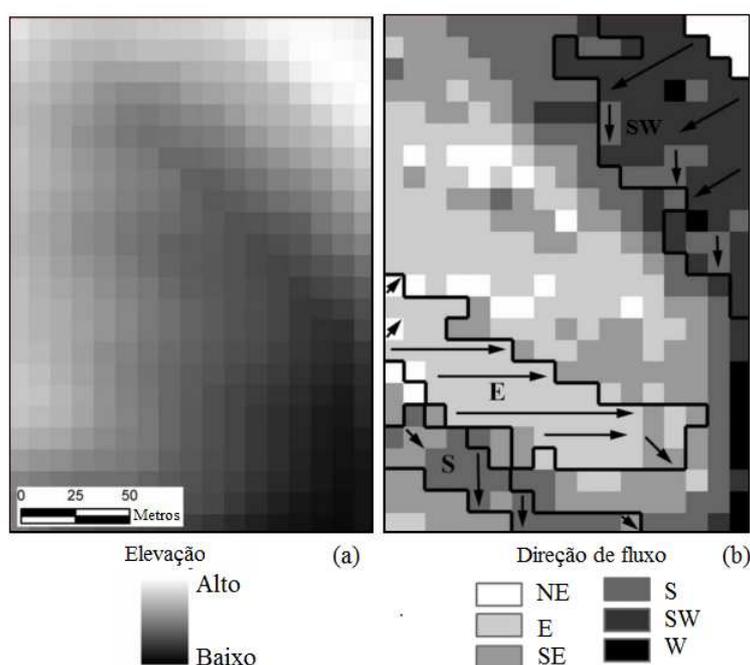


Figura 2. 9 - Duas grades mostrando (a) elevação e (b) linhas de fluxo produzidas com o algoritmo de fluxo Rho8.  
Fonte: LAM (2004).

Apesar de este algoritmo produzir menos caminhos de fluxo retos, os segmentos permanecem restritos a múltiplos de 45° e a dispersão do fluxo também não é modelada

(WILSON; GALLANT, 2000; LAM, 2004; PELLETIER, 2008). Como resultado das diferenças de funcionamento, o algoritmo Rho8 (Figura 2.9) modifica as direções de fluxo em relação ao D8 (compare com Figura 2.8) de aproximadamente 15% das células (LAM, 2004).

O algoritmo *Deterministic infinity* - Dinf - (TARBOTON, 1997) é uma das melhores alternativas ao modelo D8 por distribuir os fluxos em um leque contínuo de direções, permitindo um modelamento mais fiel do fluxo do que quando definido em octantes. Como seu nome indica, existem infinitas possibilidades numa medição contínua das direções de fluxo produzidas entre células contíguas, de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . Este algoritmo é considerado um dos métodos mais aproximados, uma vez que soluciona o viés nas direções de fluxo e o modelado da dispersão no fluxo (FERRERO, 2004; CANO, 2005), os principais problemas que dos métodos descritos acima. A declividade é calculada para cada célula em relação a seus vizinhos considerando, como referência, aquela que apresenta maior declividade. A maior novidade deste método é que o fluxo é repartido entre todas as células existentes na jusante, considerando o grau de proximidade entre a declividade resultante para cada caso e a máxima, tomada como referência (CANO, 2005). As direções de fluxo são calculadas com base na declividade de oito facetas triangulares, definidas por um *pixel* central e parte dos *pixels* vizinhos. O fluxo é dividido entre duas das oito direções mais aproximadas à maior inclinação (ou à orientação de vertentes), ponderado pelas suas respectivas diferenças angulares em relação a esta direção (PELLETIER, 2008). Regras especiais são incluídas para: (1) forçar células planas a drenar para o vizinho que finalmente drena a uma elevação mais baixa e (2) eliminar curvas nos ângulos de direção de fluxo. Este algoritmo desconsidera a direção de fluxo de células classificadas como poços, que fica codificada como dado ausente (*no data*). A área de captação para uma célula particular é calculada como sua própria área mais uma fração da área a montante do vizinho cujo fluxo recai sobre a célula de interesse. Se a direção de fluxo for diagonal ou cardinal, a área recai sobre um único vizinho. Caso seja intermediário, o fluxo é dividido entre as duas células, de acordo com a proximidade do ângulo de orientação de vertentes ( $0^\circ$ – $360^\circ$ ) em relação à direção daquelas células, em octantes (LEA, 1992; WILSON et al., 2008). A Figura 2.10 mostra o cálculo das dire-

ções de fluxo com oito facetas triangulares em uma janela móvel 3x3. Cada vetor para jusante é desenhado para fora desde o centro e pode ter um ângulo múltiplo ou não de 45°. No caso de que o ângulo do vetor declividade diminui dentro da faceta, esta representa a direção de fluxo mais acentuada desta faceta. Se o ângulo de inclinação do vetor estiver fora desta faceta, os maiores valores de fluxo ocorrem ao longo da borda mais íngreme. A declividade para cada vetor é calculada e usada para determinar a ordem dos números de facetas desde 1 até 8 (Figura 2.10). Se os vetores não fluem para jusante, o ângulo de direção de fluxo de -1 é assinalado para indicar áreas planas ou poços. A direção de fluxo é dirigida a um vizinho com a mesma elevação que tenha a direção de fluxo assinalada nesse momento. Isto garante que *pixels* drenem para os vizinhos que devem convergir para elevações menores, e assim eliminam-se curvas nos ângulos de direção de fluxo, o que é comum nas condições de relevo mais plano, quando as orientações tendem a divergir sem padrão estruturado (LAM, 2004).

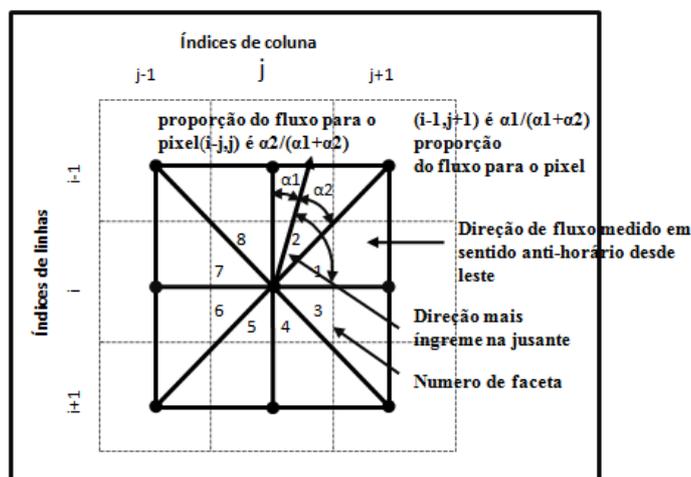


Figura 2. 10 - Cálculo de direções de fluxo segundo o método Dinf.  
Fonte: Tarboton (1997).

Baseado nos métodos D8 e Rho8, versões multi-fluxo foram desenvolvidas: o FD8 (QUINN et al., 1991) e o Fr8 (FREEMAN, 1991). Estes métodos calculam a direção do fluxo distribuindo o fluxo entre as células existentes a montante de maneira proporcional à declividade presente (CANO, 2005). A diferença dos métodos de fluxo simples (D8 e Rho8), é que estes conseguem modelar fluxos divergentes.

O algoritmo FD8, desenvolvido por Quinn et al. (1991), direciona o fluxo para cada célula adjacente na jusante com base na ponderação da declividade. Os parâmetros gradiente da declividade, comprimento de rampa e dois pesos, -0,5 e 0,35, para direções cardinais e diagonais, respectivamente, são usados para calcular a proporção de área de captação de uma célula que será atribuída a cada célula a jusante, em janela móvel de 3x3 células. Cada célula recebe uma fração de área de captação de cada célula a montante, de modo que a área de contribuição em cada célula seja composta de contribuições parciais de muitas células diferentes (COSTA-CABRAL; BURGESS, 1994; LAM, 2004). Área de captação específica é calculada como a soma das áreas de contribuição das células na montante dividida pela largura da célula para direções de fluxo cardinais, e o produto da multiplicação da largura da célula por 1,414... ( $2^{1/2}$ ) para diagonais (WILSON et al., 2008). A Figura 2.11 mostra como cada direção de fluxo é ponderada pelo comprimento do contorno, onde L1 e L2 têm comprimentos normais à direção do fluxo. L1 e L2 foram escolhidas subjetivamente pela construção geométrica simples mostrada na Figura 2.11. A porção de área que drena através de cada elemento na grade para cada direção na jusante também é estabelecida proporcionalmente à declividade de cada caminho do fluxo para jusante (QUINN et al., 1991).

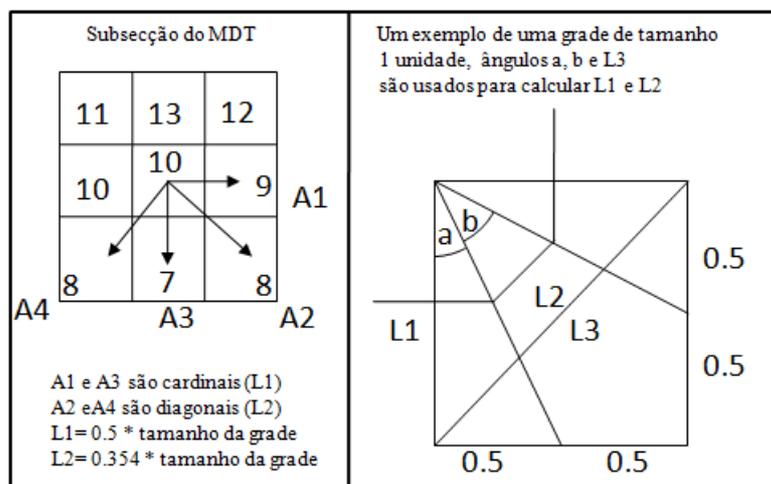


Figura 2. 11 - Repartição do fluxo usando o algoritmo MF.  
Fonte: Quinn et al. (1991).

O algoritmo *Kinematic Routing Algorithm* (KRA), desenvolvido por Lea (1992), baseia-se também na orientação de vertente para determinar a direção do fluxo, porém este é encaminhado como uma esfera que percorre a superfície, lançada a partir do centro de cada célula da grade. Considerando cada célula como um plano unitário, sua direção é determinada pelas elevações dos quatro cantos do *pixel*, por sua vez estimadas pela média das elevações adjacentes à elevação do *pixel* central. Este procedimento tem a vantagem de indicar direção de fluxo contínuo (em um ângulo entre 0° e 360°) e sem dispersão. Esta abordagem tem duas partes: (1) planos são construídos para representar a superfície de cada célula usando elevações estimadas para os quatro cantos de cada célula; e (2), sucessivamente, janelas móveis de grandes dimensões (L x K) são implementadas para minimizar a ocorrências de áreas planas. A orientação de vertentes é calculada no segundo passo em incrementos de 1° (em contraste com os 45° de incremento usado em D8), mas fluxo de cada célula é encaminhado de modo não distribuído, para células únicas.

As linhas de fluxo são construídas através da repetição deste mecanismo até que a saída da bacia seja alcançada ou uma depressão topográfica impeça o progresso contínuo do fluxo. A área de captação é calculada como o número de células percorrido pela linha de fluxo multiplicado pela área da célula do MDE. (WILSON et al., 2008).

O *Digital Elevation Model Networks* (DEMON), desenvolvido por Costa-Cabral e Burges (1994), difere do KRA, proposto por Lea (1992), por incluir uma simulação do grau de concentração do fluxo. A concentração do fluxo se manifesta por uma variação no comprimento de contorno (L2, L3 na Figura 2.11), maior em superfícies divergentes, menor em convergentes e constante em terreno planar. Seu resultado é expresso em termos de fluxo denominado “tubular”. No entanto, o fluxo gerado por uma célula é dirigido para jusante sobre uma faixa de fluxo bidimensional. Essa faixa de fluxo divide as áreas de captação de forma irregular, por pares de curvas de nível e pares de linhas ortogonais a estas. O fluxo que atravessa cada célula é equivalente ao fluxo que entra na célula mais o gerado por ela mesma. Quando o fluxo atinge uma borda de uma célula na grade em direção cardinal, todo o fluxo é dirigido para uma única célula vizinha. Nos demais casos, o fluxo é repartido entre os vizinhos na direção cardinal. A área de capta-

ção para cada célula é calculada como a somatória das áreas das células em cada curso de água tubular que entra em cada *pixel* no MDE (WILSON; GALLANT, 2000; LAM, 2004).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Fluxo geral do trabalho

Foi visto que os processos digitais de extração da drenagem a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE), objeto central da presente pesquisa, têm desempenho variável em função das condições de sua aplicação. Assim, o estudo destes processos requer que sejam testados sob condições variadas de relevo, de dados, de algoritmos e de seus parâmetros de funcionamento. Para a observação sob condições de relevo variadas, diferentes áreas de estudo foram consideradas no conjunto de experimentos. Da mesma forma, foram avaliados diversos algoritmos em testes que incluíram os respectivos parâmetros de operação. Enfim, buscou-se experimentar estes fatores sobre diferentes MDE, de dados SRTM (resolução de 3"), Topodata (SRTM refinado de 3" para 1") e GDEM (ASTER, 1"), em testes em que se observaram também efeitos do pré-processamento destes insumos. Considerando as numerosas combinações possíveis entre esses fatores, parte da pesquisa foi conduzida em etapas de diferentes níveis de experimentações, para viabilizar o atendimento à multiplicidade de questões que o objetivo suscita (Figura 3.1).

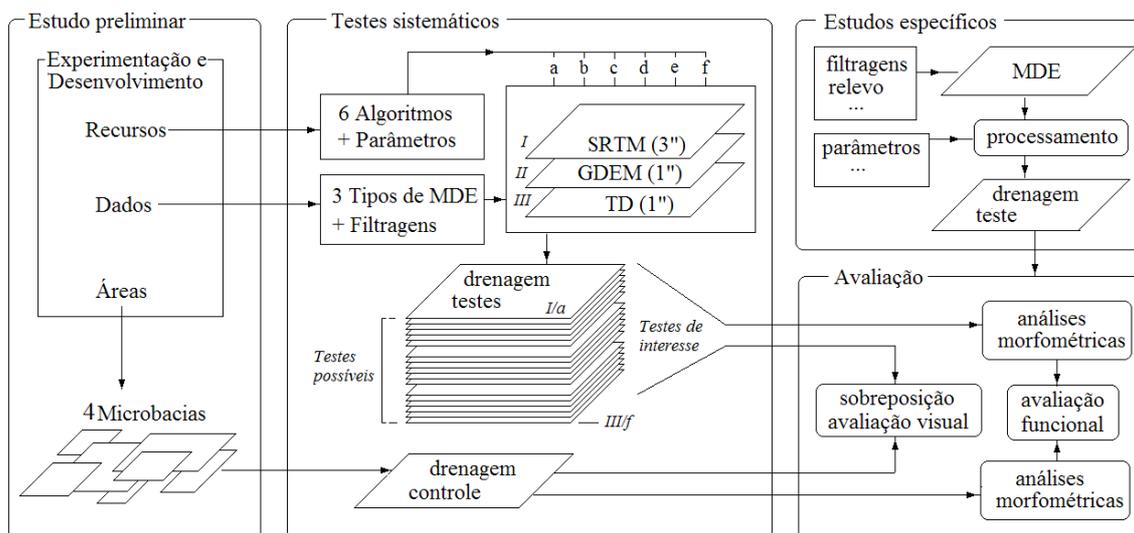


Figura 3. 1 - Encadeamento geral das diferentes etapas do trabalho.

Uma fase preliminar do trabalho foi dedicada a reunir, implementar e fazer as primeiras aplicações dos algoritmos sobre os diferentes dados, inicialmente em testes livres, que foram convergindo de forma a fornecer orientação para o uso dos dados, para evitar procedimentos não necessários e para o traçado de uma metodologia operacional. Nesta etapa foi delimitada a extensão dos testes, a partir da definição das microbacias (4) efetivamente incluídas no estudo, do conjunto de (seis) algoritmos e parâmetros de interesse e os atributos diferenciais verificáveis entre os MDE.

Uma vez delimitada a extensão de testes nos três principais fatores considerados neste estudo, a etapa seguinte consistiu num conjunto de testes sistemáticos, que incluíram automatização de algumas fases, apoiado por avaliações com dados de referência. Nesta, os resultados das possíveis combinações entre os fatores foram selecionados visualmente em comparação com as drenagens de referência. Os casos de maior interesse foram selecionados para uma avaliação funcional, em que se compararam resultados de análises morfométricas das redes de drenagem experimentais e de controle. Por fim, o conjunto de resultados foi complementado com estudos específicos para observações pontuais sobre aspectos de interesse, tais como o efeito de parâmetros de operação, determinadas condições de relevo ou do MDE, que não se encontram representadas no conjunto dos testes anteriores (Figura 3.1).

As possíveis áreas de estudo foram aventadas considerando a disponibilidade de dados para validação dos resultados e características físicas das áreas, sobretudo variações de relevo e diferenças em densidade de drenagem. Nestas áreas, diferentes algoritmos de extração da drenagem foram aplicados sobre os MDE para definição de microbacias de potencial interesse para os testes. Ao fim, foram selecionadas microbacias caracterizadas pela presença de relevo plano, colinas e serras, de acordo com EMBRAPA (1999). As combinações testadas nestas áreas podem ser esquematizadas de acordo com a Figura 3.2.

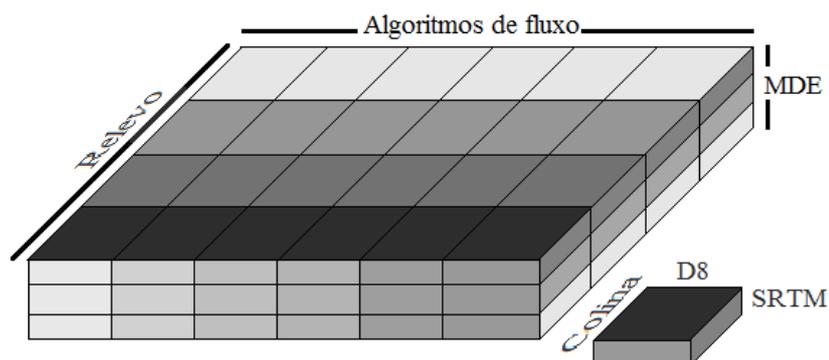


Figura 3. 2 - Variáveis consideradas neste estudo.

Os paralelepípedos representam a combinação dos três fatores efetivamente aplicados no conjunto de resultados experimentais submetidos à avaliação. Todos os seis algoritmos estudados e os três MDE foram aplicados em cada caso. Na mesma figura no canto inferior direito, se apresenta um exemplo para ilustrar quando são utilizados os dados SRTM, algoritmo de fluxo D8 na bacia com relevo de colina.

### 3.2 Caracterização das áreas de estudo

As microbacias selecionadas para as experimentações gerais estão localizadas no Estado de São Paulo, nos municípios de São José dos Campos, Bauru e Ribeirão Bonito, e de Rondônia, ao norte de Porto Velho. Na Figura 3.3 apresentam-se a localização e os respectivos MDE destas microbacias. As características morfométricas e relativas à geologia e solo das mesmas estão apresentadas em conjunto na Tabela 3.1. A seguir, serão descritas as características geográficas gerais destas áreas.

#### - São José dos Campos (MB1)

Localiza-se no município de São José dos Campos, que está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Este rio atravessa longitudinalmente o município e possui no local afluentes de maior volume de água em sua margem esquerda, onde destaca-se o Rio Jaguari e o Rio Buquira.

Tectonicamente, a área está inserida no Gráben do Paraíba ou Vale do Paraíba. Ocorrem rochas do embasamento cristalino, atribuídas aos grupos Paraíba e Açungüi, nas porções norte e sul, respectivamente. Sedimentos terciários do Grupo Taubaté ocorrem ao longo

da calha do rio Paraíba do Sul (NASCIMENTO, 2005). A rede de drenagem está adaptada às estruturas geológicas da área e à variabilidade da forma do relevo, que condicionam, com frequência, os padrões de drenagem. Com isso, ocorrem padrões de drenagem dendrítico e treliça, principalmente, com trechos retilíneos e incisões agudas ocasionais, devidas ao forte controle estrutural. A densidade de drenagem varia de média a alta (ROSS; MOROZ, 1997). A geomorfologia atual está, portanto, intimamente condicionada à tectônica (morfoestrutura), esculpida por processos erosivos e de agradiação (morfoescultura) (NASCIMENTO, 2005).

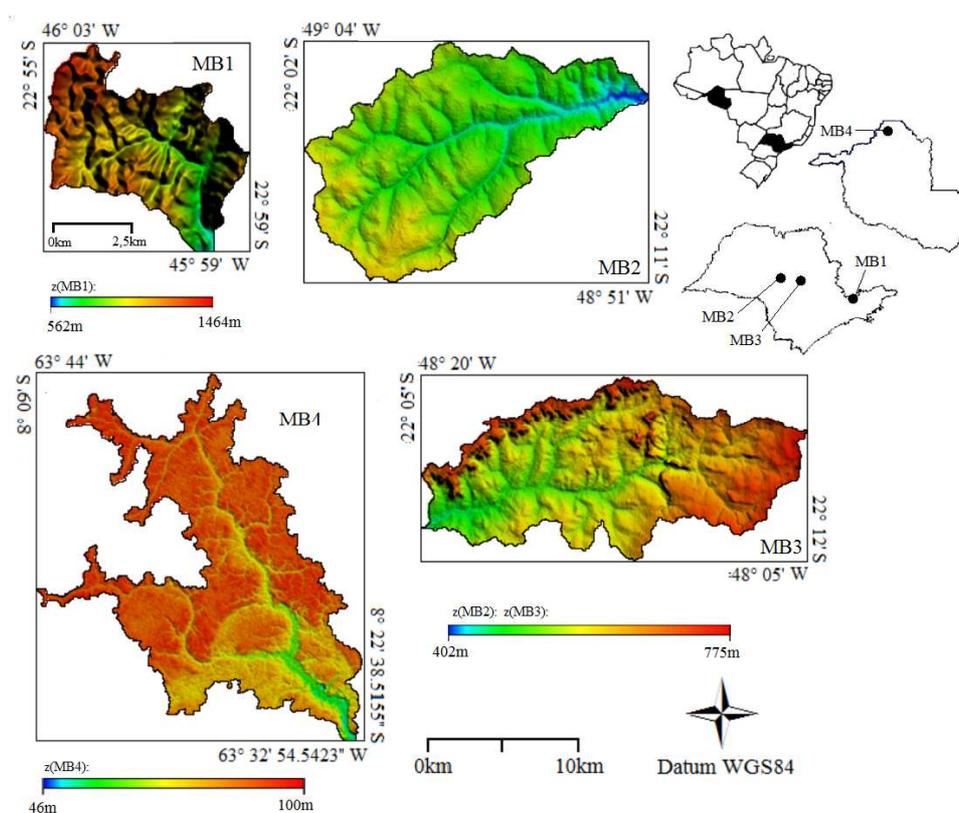


Figura 3. 3 – Localização e MDE das microbacias selecionadas para estudo.

Esta região está dentro da unidade morfoescultural denominada Planalto Atlântico, abrangendo três unidades de relevo regional: Serra de Mantiqueira, Médio Vale do Paraíba e o Planalto de Paraitinga (ROSS; MOROZ, 1997; NASCIMENTO, 2005). A microbacia aqui estudada localiza se na porção da Serra de Mantiqueira. Esta região está

caracterizada por um conjunto de escarpas que atingem mais de 1000m de altitude, predominam formas estruturais-denudacionais, (FLORENZANO, 1993; ROSS; MOROZ, 1997).

A hidrografia está sob influência das chuvas de verão, sendo os meses de novembro a fevereiro os mais chuvosos. A gênese das chuvas é eminentemente frontal, mas o relevo apresenta importância como elemento orientador na distribuição regional destas. A região do vale apresenta índices pluviométricos mensais mais reduzidos que nas regiões serranas, sendo mais abundantes as chuvas na encosta voltada para o mar, ao passo que na Serra da Mantiqueira, por ser mais elevada e interior, estas proporções são menores. (NASCIMENTO, 2005). O clima reinante na área é o tropical sub-quento úmido, caracterizado por um período seco de outono-inverno e um chuvoso correspondente à primavera-verão. As temperaturas variam no ano entre 12°C e 30°C (Figura 3.4a, d).

A vegetação nativa remanescente predomina nas encostas e nas posições mais elevadas da Serra da Mantiqueira, por constituírem áreas de preservação natural. Raríssimas ocorrências também em trechos que acompanham as margens do rio Paraíba do Sul e principais tributários, constituindo-se nas denominadas matas ciliares. Nos terraços fluviais sedimentares e nas colinas ocorrem o cerrado e os campos antrópicos (MORELLI, 2002).

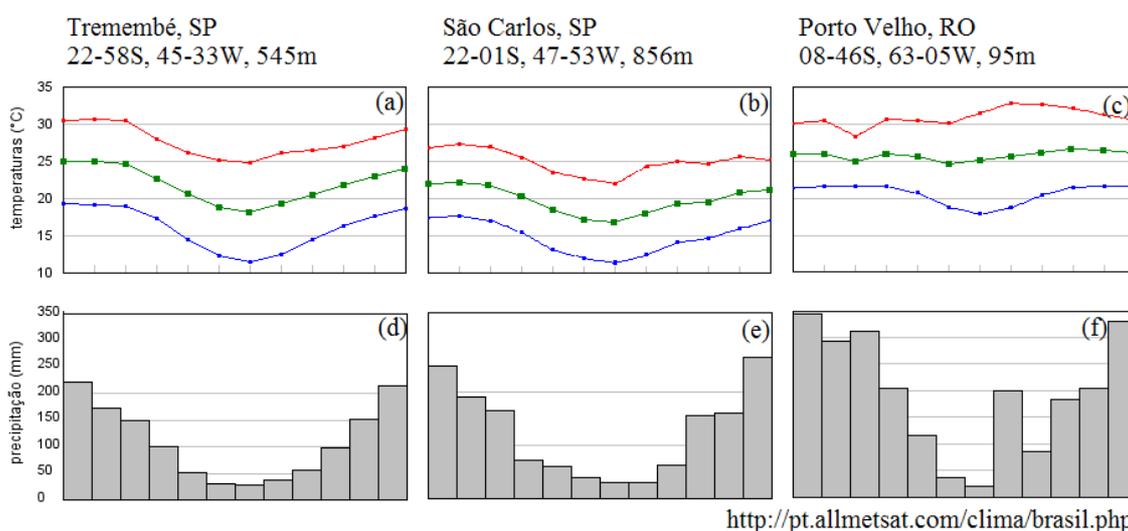


Figura 3. 4 – Climogramas das áreas onde se encontram as microbacias estudadas.

### **- Bauru (MB2)**

Está localizada no Estado de São Paulo, Município Bauru - porção sul do Distrito de Arealva. O principal rio desta área é afluente menor do Rio Tietê. O relevo está representado por colinas amplas e baixas com topos convexos e tabulares. Pertence à bacia hidrográfica Jacaré-Tietê. Apresenta formas de dissecção baixa, vales pouco entalhados e densidade de drenagem baixa (ROSS; MOROZ, 1997). No contexto geológico regional, está incluída na Bacia do Paraná, uma unidade geotectônica estabelecida sobre a Plataforma Sul Americana a partir do Devoniano Inferior. As rochas aqui existentes pertencem ao Grupo Bauru e São Bento, do Mesozóico. Na área, encontram-se rochas da Formação Adamantina do Grupo Bauru e Serra Geral do Grupo São Bento.

Regionalmente, a vegetação está representada por mata atlântica e cerrado (ROSS, 2006). O clima da área da pesquisa é do tipo Cwa que por definição segundo o Sistema Internacional de Köppen é: clima mesotérmico de inverno seco em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C (Figura 3.4b, e). O total das chuvas no mês mais seco não ultrapassa 30mm (MAGINI; CHAGAS, 2003).

### **- Ribeirão Bonito (MB3)**

Está localizada no Estado de São Paulo, abarcando os Municípios Rio Claro, Dourado, Ribeirão Bonito. Esta microbacia é afluente do rio Jacaré-Pepira da bacia hidrográfica Jacaré-Tietê. Regionalmente, a área está inserida na unidade morfoestrutural Bacia Sedimentar de Paraná e na unidade morfoescultural do Planalto Ocidental Paulista, dentro da unidade geomorfológica do Planalto Residual de São Carlos. Composta por colinas com topos convexos e tabulares em função das variações litológicas e vales medianamente entalhados, apresenta formas de dissecção média e vales entalhados (ROSS; MOROZ, 1997). Está inserida na unidade geotectônica Bacia de Paraná, sendo caracterizada, por rochas pertencentes ao Mesozóico. Litologicamente, encontra-se o Grupo São Bento, representado pelas formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral. A primeira é composta por depósitos fluviais incluindo arenitos finos a médio, avermelhados; desti-

tuída de fósseis de valor cronológico, é datada num intervalo de tempo não definido, entre o Triásico Inferior e o Jurássico. A Formação Botucatu, representada por arenitos eólicos avermelhados de granulação fina a média, encontra-se em grande parte entremediada entre os basaltos da Formação Serra Geral, pelo que sua idade se estende também indeterminada precisamente, num período do Jurássico ao Cretáceo Inferior pré-Aptiano. A Formação Serra Geral é caracterizada por rochas vulcânicas toleíticas dispostas em derrames basálticos com coloração de cinza a preta, intercaladas com arenitos. Estes basaltos são neocomianos, porém os mais antigos já se apresentaram no Jurássico Superior. O fim dos derrames de lava destes sedimentos marcou o final dos eventos deposicionais e vulcânicos generalizados na área da Bacia de Paraná (IPT, 1981).

A vegetação da região encontra-se incluída no domínio de floresta tropical semidecidual na Bacia de Paraná nos terrenos de basalto (ROSS, 2006), onde predominam Latossolos Vermelho-escuros. O clima da região é classificado como Cwa segundo Köppen, isto é, subtropical mesotérmico, úmido, com chuvas de verão e com estiagem branda no inverno. A estação chuvosa se estende de outubro a março e a estação seca de abril a setembro. Há ocorrência esporádica de geadas (PINTO; CRESTANA, 1998). As temperaturas variam entre 12°C e 26°C e com um regime de precipitação de 30mm a 250mm no ano (Figura 3.4b, e).

#### **- Porto Velho (MB4)**

Localiza-se no Estado de Rondônia, na região norte do Município de Porto Velho, mais especificamente na margem esquerda do Rio Madeira. Pertence à sub-bacia do Rio Madeira, no curso médio-baixo do rio. Nesse trecho, o rio drena áreas de depósitos terciários da Formação Solimões. Na região, é notória a presença de várzeas de alagamento, onde também está presente um delta aluvial que afoga várzeas, diques marginais e canais abandonados.

Regionalmente, esta microbacia encontra-se dentro da unidade geomorfológica Depressão Ituxi-Jari, correspondente ao domínio morfoestructural de Bacias Sedimentares e Cobertas Inconsolidadas. Predominam formas de dissecação homogênea ou diferencial. A área é caracterizada por um conjunto de formas de relevo de topos tabulares, confor-

mando feições de rampa suavemente inclinadas e lombas esculpidas em cobertas sedimentares inconsolidadas, denotando eventual controle estrutural (IBGE, 2009).

A Floresta Ombrófila Aberta Aluvial ocorre ao longo das planícies de inundação dos rios e igarapés que, em geral, apresentam forte sazonalidade de vazão. As comunidades presentes nessas áreas variam em sua fisionomia e composição florística de acordo com o período de inundação a que estão expostas (IBGE, 2009). Predominam Neossolos flúvicos, com textura variável em função do tipo de unidade fisiográfica onde são encontrados (diques marginais, várzeas, canais abandonados e praias). Estes Neossolos soterram mantos de Cambissolos e/ou Argissolos concrecionários lateríticos, apresentando também plintitos vermiformes típicos de evolução em altos estruturais (SOUZA; JIMÉNEZ-RUEDA, 2007).

O clima característico da região é do tipo Equatorial Úmido, do domínio de Floresta do tipo Hiléia. Pela classificação de Köppen, corresponde ao clima Am, com elevadas precipitações, que compensam as correspondentes estações secas (DA SILVA FILHO et al., 2003). A umidade média relativa anual varia localmente de 80% a 90%. A temperatura média anual fica em torno dos 25°C, com mínimas e máximas de 18°C e 32°C (Figura 3.4c, f), respectivamente.

As características morfométricas de todas as microbacias estudadas encontram-se resumidas na Tabela 3.1. Estas estão relacionadas à geometria das microbacias, o tipo de relevo e as características das redes de drenagem como foram descritos no capítulo anterior. Com base nas informações das microbacias apresentadas na Tabela 3.1, pode-se dizer que a forma das microbacias é alongada, o qual se confirma com os valores de  $K_c$  muito superiores e  $I_c$  muito inferiores à unidade, com o caso extremo na MB4. O valor máximo de  $F$  obtido para as microbacias estudadas foi de 0,43 (MB1), o que sugere que sejam pouco sujeitas a enchentes, por ser este um valor baixo. Os padrões de drenagem identificados nas microbacias estudadas foram dendrítico (MB1 e MB3), e subdendrítico (MB2 e MB4), desenvolvidos sob rochas de resistência uniforme, ou em estruturas sedimentarizadas horizontais.

Na Figura 3.5 se apresentam as curvas hipsométricas destas microbacias. Esta curva representa a maneira pela qual o volume rochoso está distribuído desde a base até o topo. O valor correspondente a área sob esta curva se denomina integral hipsométrica (CHRISTOFOLETTI, 1980).

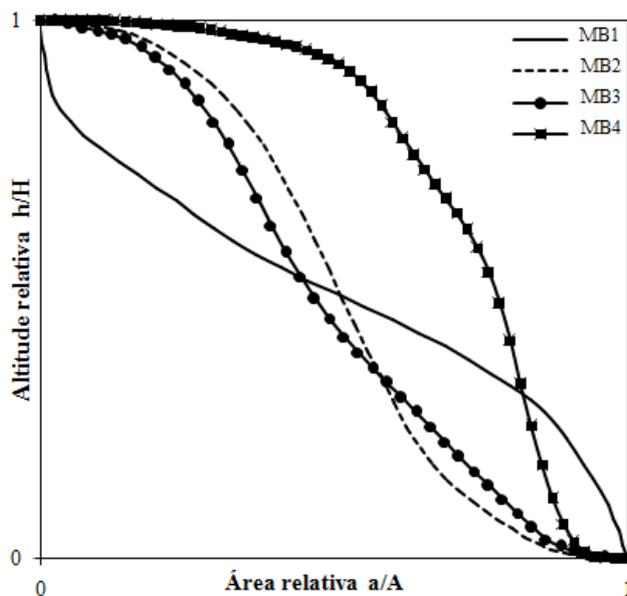


Figura 3. 5 - Curvas hipsométricas das microbacias analisadas.

Para este estudo, os valores da integral hipsométrica resultaram em torno de 0,5 para MB1, MB2 e MB3, enquanto para MB4 foi de aproximadamente 0,78. Considerando as curvas hipsométricas, observaram-se três comportamentos que permitem agrupar as microbacias: MB1 côncava-convexa, MB2 e MB3 retilíneas com pouca concavidade no final e MB4 convexa (Figura 3.4). Com base nestas observações, pode-se sugerir que as microbacias MB1 a MB3 apresentam maior grau de dissecação, maior exposição temporal a efeitos erosivos, porém mais antigas, enquanto a curva de MB4 sugere terrenos com baixo grau de dissecação, condição que sugere terrenos mais jovens.

Tabela 3. 1- Características morfométricas das bacias analisadas

	Pd	A	P	Kc	F	Ic	Dmédia	D_máx	Hmín	Hmédia	Hmáx	Dmrp	Crp	Ct	Dd
MB1	Dendritica	25,21	33,77	1,88	0,43	0,27	29,25	114	652,24	1058,53	1464,83	5,21	12,02	67,11	2,62
MB2	Sub-endritico	192,70	93,34	1,88	0,35	0,30	9,75	39	401,59	513,78	625,97	0,58	24,83	151,81	0,78
MB3	Dendritica	192,18	107,31	2,16	0,29	0,21	20,5	79	449,62	612,14	774,66	0,88	28,267	245,68	1,278
MB4	Sub-endritico	211,41	216,84	4,17	0,26	0,056	6,75	27	46	73,5	101m	0,10	33,74	218,63	1,034

MB: Microbacia, Pd: padrão de drenagem; A: área (Km<sup>2</sup>); P: perímetro (Km); Kc: coeficiente de compacidade; F: fator de forma; Ic: índice de circularidade; Dmédia (%): Declividade media; Dmáx (%): declividade máxima; Hmín (m): altitude mínima; Hmédia (m): altitude média; Hmáx (m): altitude máxima; Dmrp (%): declividade media do rio principal; Crp: comprimento do rio principal (km<sup>2</sup>); Ct (km): comprimento total do rio; e Dd (km/km<sup>2</sup>): densidade de drenagem.

Tabela 3. 2 – Características geográficas das microbacias analisadas

	Litologia	Solo	Relevo	Clima (Koeppen)
MB1	Gneises, migmatitos e granitos (FLORENZANO, 1993; ROSS; MOROZ, 1997).	Gleissolo Melânico, Latossolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Vermelho-Amarelo (OLIVEIRA et al., 1999).	Escarpas e morros altos com topos aguçados (NASCIMENTO, 2005).	Tropical sub-quente úmido (Cwa)
MB2	Arenitos com lentes de siltitos e argilitos (ROSS; MOROZ, 1997).	Latossolo Vermelho-Amarelo e Podzolico Vermelho-Amarelo (ROSS; MOROZ, 1997).	Colinas amplas e baixas com topos convexos e tabulares (ROSS; MOROZ, 1997).	Mesotérmico de inverno seco (Cwa)
MB3	Arenitos finos a médio e basaltos (IPT, 1981).	Latossolo Vermelho-escuro (ROSS; MOROZ, 1997).	Colinas de topos convexos e tabulares (ROSS; MOROZ, 1997).	Subtropical mesotérmico úmido (Cwa)
MB4	Sedimentos inconsolidados: areia, cascalho, silte, argila e turfa (SGB/CRPM, 2007).	Predominam Neossolos Flúvicos (SOUZA; JIMÉNEZ-RUEDA, 2007).	Formas de relevo com topos tabulares conformando feições de rampa suavemente inclinadas.	Equatorial úmido (Am)

### 3.3. Dados

O conjunto de dados aplicados nos testes de extração da drenagem consiste em Modelos Digitais de Elevação (Figura 3.3), para entrada nos algoritmos, e vetores de redes de drenagem (Figura 3.5) mapeadas por técnicas controladas, usadas como dados de referência. Dados de declividade foram adicionados apenas para caracterização das áreas estudadas.

#### 3.3.1. Modelos Digitais de Elevação

Os dados referidos neste trabalho por **SRTM** correspondem à versão 2\_1, especificamente SRTM3 (vide 2.2.1, Tabela 2.1), gerado a partir do recálculo dos dados levantados na missão SRTM em médias de 3X3 células de 1" para eliminar ocasionais artefatos presentes da versão anterior (Versão 2). Os dados SRTM estão em metros inteiros, referenciados no geóide EGM96, *datum* WGS84, com valor de -32768 para dado ausente, com espaçamento nominal de 3" (aproximadamente 90m). Foram obtidos em formato de extensão *HGT* do Serviço Geológico de Estados Unidos (USGS), no endereço eletrônico [http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2\\_1/SRTM3/South\\_America](http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/South_America) (LP DACC/ USGS-EROS, 2010).

Os dados referidos neste trabalho por **Topodata (TD**, quanto abreviado) se referem aos dados SRTM (versão 1, 3") refinados da resolução espacial original (~90m) para 1 arco-segundo (~30m) por krigagem (VALERIANO ; ROSSETTI, 2010). Estes dados têm as mesmas especificações cartográficas dos dados SRTM, exceto a resolução espacial e vertical refinadas, e foram coletados em formato GeoTIFF no endereço eletrônico <http://www.dsr.inpe.br/topodata>. Além de insumo para os testes gerais de extração da drenagem, estes dados foram usados para caracterização morfométrica das áreas de estudo, complementados por dados de declividade do mesmo Topodata.

Os dados referidos neste trabalho por GDEM correspondem à versão 1 do ASTER GDEM, com resolução espacial de 1 arco-segundo (~30m) e coordenadas geográficas (lat/long), referenciados no geóide EGM96 *datum* WGS84 (ERSDAC, 2008). Esta versão se caracteriza pela substituição das anomalias de elevação causadas por pelo resíduo das nuvens, pelo valor de dados ausente modificado para -9999 e por valores nulos nos corpos de água. Os dados foram obtidos em formato GeoTIFF, no endereço: <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp>.

### **3.3.2. Dados de referência**

O material cartográfico utilizado como dado de referência (Figura 3.6) para as microbacias paulistas (MB1 a MB3) foi a rede de drenagem do Estado de São Paulo na escala 1:50.000. Desta, foram destacadas 3 janelas, nos municípios de São José dos Campos, São Carlos e Bauru, cujas redes de drenagem foram utilizadas como referência. Esta rede de drenagem foi extraída da base cartográfica digital, elaborada pelo Instituto Geográfico e Cartográfico de Estado de São Paulo - IGC. Foram obtidas por vetorização das folhas topográficas 1:50.000, a partir das especificações técnicas e de imagens referenciadas dos fotolitos originais, fornecidas pelo IBGE. Os trabalhos de vetorização das cartas individuais foram desenvolvidos em parceria com outros órgãos estaduais, sob a ordenação do IGC do Estado de São Paulo. Esta base se encontra em projeção *Lambert Conformal Cônica, Datum SAD69*.

Para a microbacia de Rondônia (MB4), a rede de referência (Figura 3.6) utilizada foi gerada por BERTANI (2010). As metodologias usadas para gerar esta rede combinam informações provenientes de diferentes dados disponíveis. Estes dados foram planos de informação pré-existentes correspondentes a vetores de cartas topográficas na escala 1:100.000 (usada como referência) e dados de sensoriamento remoto para correção destes vetores e criação de novos segmentos.

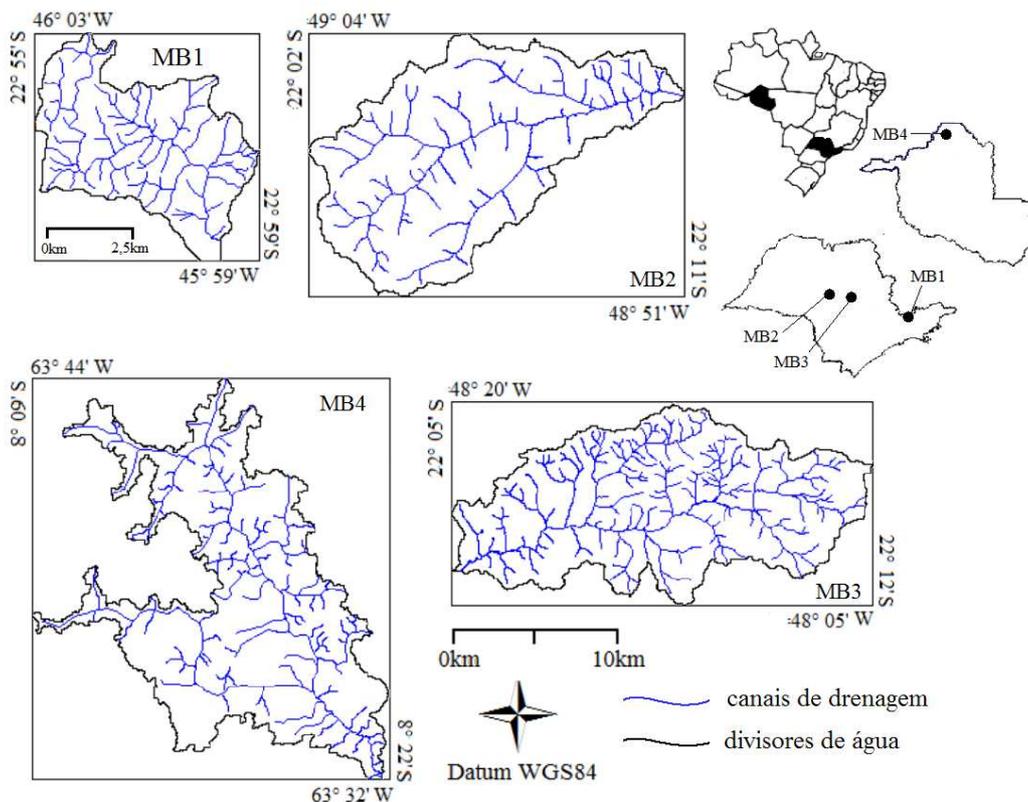


Figura 3. 6 – Redes de drenagem utilizadas como referência para as microbacias analisadas.

O processo de extração da rede de drenagem incluiu a avaliação visual dos vetores de cursos fluviais das cartas topográficas para validação dos dados de sensoriamento remoto em relação a estes dados. A partir da maior ou menor compatibilidade entre estas fontes, foram realizadas edições manuais dos vetores, assim como a complementação dos mesmos, conforme a necessidade. Na realização desta tarefa, foram utilizadas composições coloridas de imagens Landsat para cursos fluviais maiores e mais longos e dados MDE-SRTM para cursos fluviais menores.

### 3.4. Recursos de análise

- *Global Mapper v11.01* (Global Mapper Software LLC, 2002) : Conversão de formatos compatíveis entre os pacotes utilizados.

- *Arcgis Desktop 9.3.1* (ESRI Inc., 2009): Extração de microbacias, pré-processamento dos dados, conversão de formatos compatíveis entre os pacotes utilizados.
- *IDRISI ANDES 15* (Eastman, 2006): Filtragem dos dados e análise quantitativa dos resultados.
- *SAGA 2.0.5* (Copyright, 2010): Extração das redes de drenagem.

Além destes recursos específicos, foram também utilizados programas para manipulação geral de dados e cálculo de parâmetros quantitativos, como planilhas eletrônicas, pacotes gráficos e editores diversos.

### **3.5. Metodologia**

#### **3.5.1. Seleção e delimitação das microbacias**

A delimitação das bacias foi realizada por processos automáticos a partir dos dados topográficos disponíveis no Topodata, com o programa ArcGIS 9.3. Uma vez delimitadas as microbacias de interesse, foi feito o recorte no conjunto de dados topográficos digitais nos respectivos retângulos envolventes.

A extração automática nesta etapa preliminar foi realizada com o aplicativo *ArcHydroTools*, disponibilizada no ArcGIS. O procedimento para extração das microbacias, pode se explicar da seguinte maneira: (1) preenchimento de sumidouros, para evitar possíveis erros na rede de drenagem gerada que será usada para delimitar microbacias; (2) geração da grade de direção de fluxo, usando o algoritmo D8; (3) extração da grade de área de captação (ou *fluxo acumulado*, na terminologia dos programas); (4) definição da rede de drenagem, em que se estabelece um limiar de área de captação acima do qual se configuram locais que formam a rede de drenagem; (5) segmentação da rede de drenagem; e (6) geração da grade de microbacias. Na última etapa, foram criados os polígonos com as microbacias baseadas no limiar definido no passo (4).

Para a definição das bacias foram usados limiares diferentes entre as diversas áreas. No caso da microbacia localizada no município de São José dos Campos, o limiar utilizado correspondeu a uma área de 11,54 km<sup>2</sup> (14000 células de 1”). Para as microbacias dos municípios de Bauru e Ribeirão Bonito (B2 e MB3), o limiar foi de 41,45 Km<sup>2</sup> (44000 células de 1”) e, na MB4 (Rondônia), o limiar foi de 75,12 Km<sup>2</sup> (80148 células de 1”).

Uma vez obtido o limite das microbacias, a seleção das áreas foi feita mantendo-se um padrão. Assim, as áreas comparadas possuem as seguintes características:

- Incluem captações de primeira ordem;
- Relevos diferenciados entre as microbacias e uniforme dentro destas;
- Características geomorfométricas diferentes; e
- Disponibilidade de redes de drenagem de referência para usar como controle.

### **3.5.2. Testes preliminares**

Os testes preliminares englobaram experimentos sobre fatores isolados, para desenvolvimento dos procedimentos gerais aplicados nesta pesquisa. Entre estes fatores, foi avaliado o grau de suavização dos MDE promovido por filtragens. A filtragem média (3x3) foi aplicada nos três tipos de dados, nas microbacias, nos casos em que o dado original produziu redes de drenagem incoerentes. Assim, a filtragem foi aplicada nos dados de Topodata para microbacia quatro (4). Também se consideraram as características do dado topográfico para a inclusão dos dados GDEM neste teste, por apresentar artefatos que poderiam ser atenuados com filtragem e assim observar possíveis melhorias na respectiva rede de drenagem. O algoritmo utilizado para estes testes foi o D8, por ser o uso mais simples e amplamente utilizado.

Foram avaliadas as redes de drenagem produzidas e comparadas entre si com relação à referência. A avaliação foi feita a partir de parâmetros quantitativos (Ct, Ns e Dd) e qualitativos, por análise visual. O processo de filtragem não produziu grande diferença nestes testes, pelo quê não foram consideradas filtragens no resto das análises conjuntas. No caso particular da MB4, os resultados mostraram uma grande melhora para os dados

Topodata, motivo pelo qual este procedimento foi realizado previamente à extração das redes nessa microbacia, quando este dado foi usado.

### 3.3.3. Extração das redes de drenagem

Parte da metodologia foi estabelecida após a apreciação de testes preliminares, em que foram testadas combinações entre relevos e dados topográficos. A extração das redes de drenagem foi executada em sessões do aplicativo SAGA sobre os dados topográficos disponíveis.

Previamente aos processos de geração das redes de drenagem foi necessário um pré-processamento para todos os dados, para remoção dos poços ocasionalmente presentes nos MDE (*sinks*). Os procedimentos de pré-processamento foram realizados no módulo *Terrain Analysis\_Preprocessing\_Sink Drainage Route Detection*, do qual foram obtidos os planos com as direções de fluxo das células que incluem os poços (*grade sink routes*), em que os locais de poços têm valor entre um (1) e oito (8), que indicam as direções (octantes) que estas células devem assumir no cômputo dos fluxos, enquanto valores nulos são correspondentes às células sem este problema. O programa SAGA contém duas formas de extrair a rede de drenagem, uma via direta e outra indireta. As duas diferem no modo de calcular o fluxo acumulado (Figura 3.7).

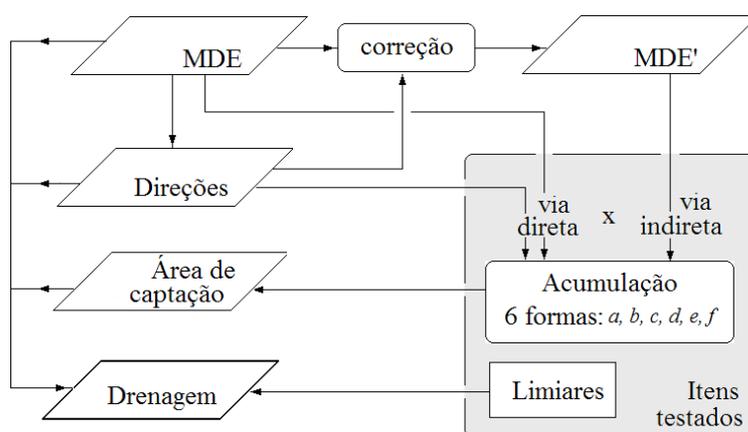


Figura 3. 7 - Extração das redes de drenagem e as componentes avaliadas nos testes.

Para todas as microbacias, o pré-processamento consistiu em calcular as direções de fluxo (Sink Drainage Route Detection) a partir do MDE original e a posterior correção (Sink Removal) deste para criação de um novo MDE corrigido (MDE'). O MDE original e o plano de direções constituíram os dados de entrada para cálculo da área de captação pela via direta, e somente o MDE' (corrigido) para a via indireta. Após geração das grades de área de captação, a extração das redes de drenagem consiste basicamente na marcação dos locais de maior área de captação como cursos d'água, a partir de limiares arbitrários.

O cálculo das áreas de captação foi realizado dentro do módulo *Terrain Analysis \_Hydrology\_Catchment Area*. Nesta etapa foram realizados procedimentos diferenciados para a microbacia MB4 em relação às demais. No caso das microbacias MB1 a MB3, os testes aplicados pela via direta foram mantidos. Problemas encontrados nos testes preliminares para a MB4 levaram à adoção da via indireta para esta microbacia.

Em todas as áreas, independentemente da via adotada, foram experimentados os algoritmos que perfazem a acumulação dos fluxos para o cômputo da área de captação. Os algoritmos de fluxo testados neste procedimento foram: D8 (O'CALLAGHAN; MARK, 1984), Rho8 (FAIRFIELD; LAYMARIE, 1991), Dinf (TARBOTON, 1997), MF (QUINN et al., 1991), KRA (LEA, 1992) e DEMON (COSTA-CABRAL; BURGESS, 1994).

Os dados requeridos pelo módulo *Terrain Analysis \_Channel\_Channel Network* (SAGA) para extrair as redes foram o MDE corrigido (MDE'), independentemente da via de cálculo da área de captação, a grade de área da captação, a indicação do limiar e de sua relação (“maior” ou “maior ou igual”) com início do traçado das redes de drenagem. Foi indicada a relação ‘maior do que’ (o limiar) para determinar a pertinência de cada ponto à rede de drenagem. O último parâmetro (o mais extensivamente testado) foi o próprio limiar de iniciação, que define a condição segundo a qual o canal é iniciado. A seleção do limiar avaliado como adequado (Tabela 3.3) foi feita com base nos parâmetros quantitativos e qualitativos de cada uma das redes extraídas em relação à referência e por sobreposição das redes.

Tabela 3. 3 - Limiares (km<sup>2</sup>) selecionados para cada uma das microbacias analisadas

	SRTM	Topodata	GDEM
MB1	5.10 <sup>-4</sup>	0,02	0,02
MB2	0,2	0,5	<sup>1</sup> 0,8; <sup>2</sup> 0,3
MB3	0,05	0,2	0,25
MB4	0,2	0,4	0,45

(1) D8, Rho8, Dinf e Mf.

(2) KRA e DEMON.

Desta forma, foram geradas setenta e duas (72) grades de fluxo acumulado e suas redes de drenagem correspondentes, seis (6) para cada dado e dezoito (18) para cada microbacia. Os parâmetros utilizados na avaliação destes testes foram Ns, Ct, Dd e a análise visual das redes (de referência e experimentais) sobrepostas.

### 3.2.3. Avaliação dos resultados

A forma de avaliação mais imediata e mais extensivamente aplicada ao longo de todos os testes foi a análise visual dos resultados experimentais sobrepostos às redes de drenagem de referência. Além de possibilitar uma rápida avaliação da compatibilidade entre as redes e portanto o imediato descarte de resultados espúrios, o controle visual dos testes, mesmo isoladamente (sem referência), permitiu verificar a ocorrência de artefatos e a expressão espacial dos resultados, aspectos encobertos nas outras formas de avaliação.

A avaliação da qualidade posicional das redes experimentais foi baseada em valores de distância de deslocamento. Isto foi calculado com a consulta local nas posições das drenagens experimentais, sobre de mapas de distância criados a partir da rede de referência. Outra medida de exatidão foi obtida por tabulação cruzada das redes obtidas por cada um dos algoritmos e sua respectiva referência, depois de rasterizadas sobre uma mesma base geográfica. Esta avaliação, materializada na estimativa dos erros de omissão e comissão, foi feita sob diferentes resoluções de rasterização, como forma de simular a observação em diferentes escalas.

Além das avaliações diretas descritas acima, os resultados foram submetidos a uma avaliação funcional, em que se fizeram análises das drenagens experimentais e seus resultados comparados aos atributos correspondentes da referência. Nesta modalidade de avaliação, foram considerados os parâmetros morfométricos Ct, Ns e Dd.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos para extração das redes de drenagem das microbacias selecionadas, usando os procedimentos mencionados no capítulo 3. A estrutura deste capítulo acompanha as etapas de desenvolvimento da metodologia. Os resultados são apresentados em desenhos, gráficos e tabelas das informações mais relevantes.

### 4.1. Testes preliminares

Alguns resultados neste apartado precisaram de tabelas, as quais contêm informações referentes às redes de drenagem extraídas, assim como os dados a partir dos quais estas foram obtidas.

A Figura 4.1 (b, c e d) corresponde às redes de drenagem extraídas para MB1. As redes extraídas aqui foram obtidas usando o algoritmo de fluxo D8, para cálculo de área de captação, e limiar de 20000 m<sup>2</sup> (~22 células), considerado como o de melhor ajuste, conforme as explicações do item 3.5.2, capítulo 3.

Na Tabela 4.1 encontram-se os parâmetros estimados para as redes de drenagem extraídas que permitiram comparações qualitativas com a rede de referência. Segundo esta tabela, os parâmetros de Ns obtidos para as redes são bem próximas daquele observado para a referência (138), com uma diferença de 14 segmentos (~10%) a menos para o dado filtrado uma vez e de 11 segmentos (~8%) para os demais testes. Comportamento semelhante foi observado para os dados de Ct e Dd. Esta leve diferença pode ser efeito do tipo de filtro de média utilizado, em que as bordas são suavizadas e a imagem resultante tem aparência borrada. Em relação à rede obtida do dado original, o efeito da filtragem nas redes obtidas é quase imperceptível visualmente e, portanto, os testes com Topodata não a incluíram para o restante das microbacias. Com o aumento do número de filtrações sucessivas, o efeito paliça foi mais ressaltado (Figura 4.1d). A redução dos valores locais de declividade causada pela filtragem promove no MDE condições aproximadas àquelas de áreas planas, onde a modelagem do fluxo superficial é reconhecidamente prejudicada.

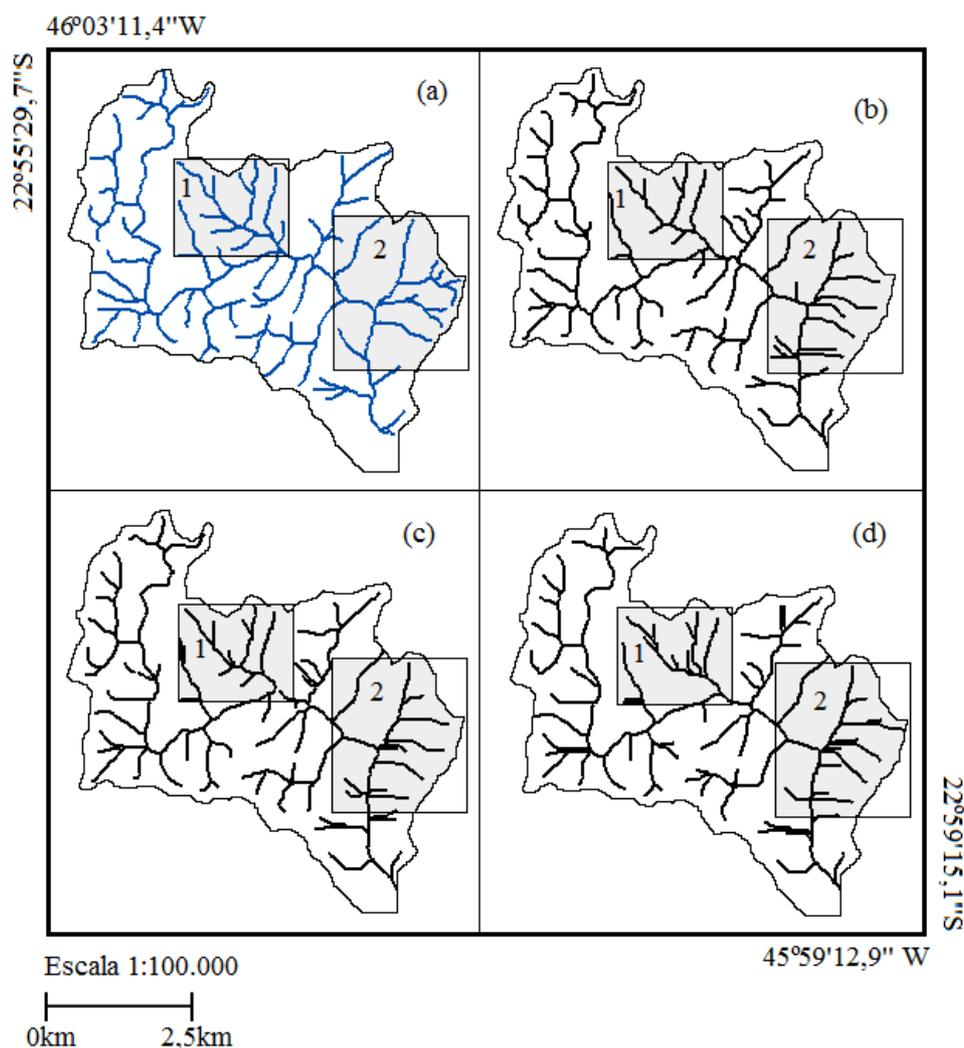


Figura 4. 1 – Resultados preliminares das redes de drenagem da SJC1 utilizando os dados Topodata. (a) Rede de drenagem de referência, (b) obtida do dado original, (c) obtida depois de filtrar o dado uma vez e (d) obtida depois do dado ser filtrado cinco vezes. Os quadrados ressaltados em cinza claro são detalhes correspondentes às Figuras 4.2 e 4.3.

Tabela 4. 1 - Parâmetros obtidos das redes de drenagem de referência e extraídas para MB1 a partir dos dados Topodata. Onde Ns: numero de segmentos; Ct: comprimento total de rios e Dd densidade de drenagem.

Parâmetro	Referência	Extração digital		
		Original	Filtrado 1x	Filtrado 5x
Ns	138	127	124	127
Ct (km)	64,34	63,13	61,87	62,31
Dd (km/km <sup>2</sup> )	2,55	2,50	2,45	2,47

Por outro lado, estes mesmos testes permitem verificar a geração de mais segmentos nas drenagens originadas de MDE filtrados quando observados em detalhe (4.2.1c, 4.2.1d), em comparação com a rede de drenagem produzida a partir do dado original (4.2.1b). Tal efeito pode ser atribuído a uma maior organização das direções de fluxo no sentido de favorecer o acúmulo das áreas de captação, à medida que as vertentes se tornam mais coesas com a filtragem.

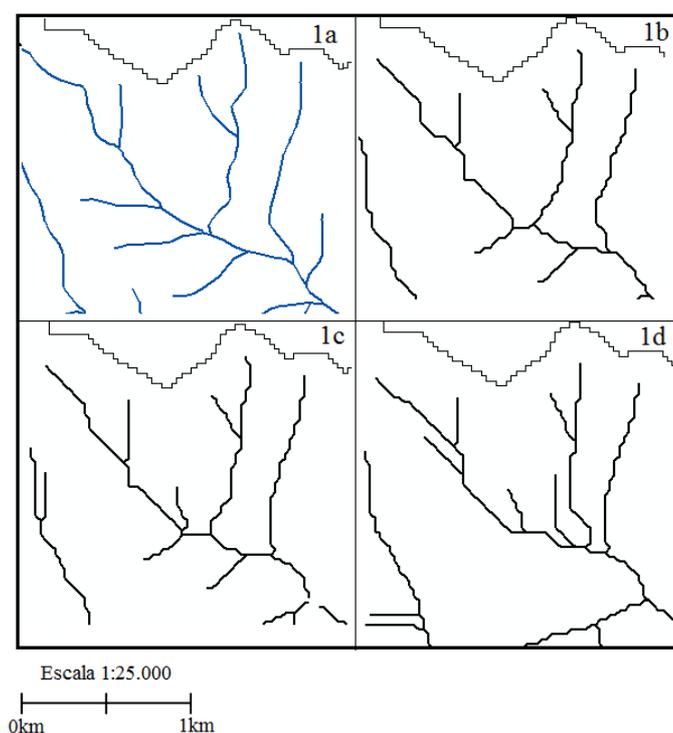


Figura 4. 2 - Detalhes identificados com o número um (1) apresentados em cor cinza na Figura 4.1 mostrando o efeito da filtragem do MDE nas redes de drenagem obtidas. (1a) rede de drenagem de referência; (1b), é a rede de drenagem obtida do dado original; (1c) e (1d) são as geradas dos dados filtrados uma (1) e cinco (5) vezes, respectivamente.

A Figura 4.3 representa o detalhe de número dois (2), assinalado na Figura 4.1 figura antes comentada, em que se ressalta o paliçamento progressivamente intensificado pela aplicação de sucessivas filtrações sobre o MDE.

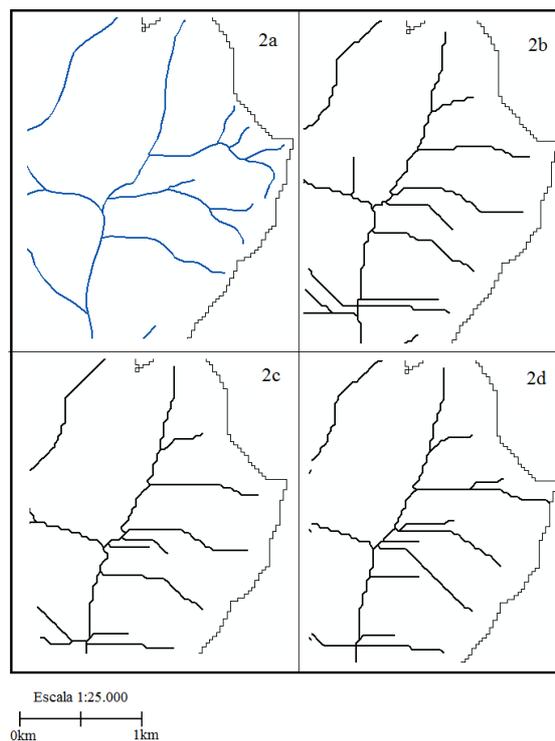


Figura 4.3 - Detalhe identificados com o número um (2) apresentados em cor cinza na Figura 4.1 mostrando o efeito da filtragem do MDE nas redes de drenagem obtidas. (2a) rede de drenagem de referência; (2b), é a rede de drenagem obtida do dado original; (2c) e (2d) são as geradas dos dados filtrados uma (1) e cinco (5) vezes, respectivamente.

Na Figura 4.3 observam-se linhas segmentadas e linhas de drenagem paralelas (efeito paliçado) nas redes extraídas por processos automáticos em relação à referência. Este efeito de criação de linhas com orientação preferencial é ocasionado pela restrição do algoritmo D8 dividir o fluxo em só uma das oito possíveis direções a cada 45 (FAIRFIELD; LEYMARIE, 1991; QUINN et al., 1991). O paliçamento se dispõe originalmente em áreas de declividades muito baixas, de modo geral, porém a filtragem estende a área passível ao efeito para vertentes que no MDE original mostraram-se livres desse efeito.

Da mesma forma que para MB1, o teste dos dados GDEM foi realizado na MB3. Na Figura 4.4 são apresentadas as redes de drenagem extraídas usando o algoritmo D8. Previamente à extração, os dados GDEM foram filtrados até três (3) vezes. Como se pode observar na Figura 4.2 (b, c e d), as diferenças obtidas nas redes são pouco expressivas quando analisadas quantitativamente e qualitativamente. A Tabela 4.2 corresponde

aos parâmetros observados nas análises quantitativas de todas as redes de drenagem. Segundo estes resultados, observa-se que os processos de filtragem geram redes de drenagem com menor número de segmentos e comprimento de rios, porém com densidade de drenagem menor em relação à referência. Além disso, quando as redes foram comparadas visualmente não se observou melhoria nas redes de drenagem resultantes. Assim, também neste caso a filtragem não foi considerada vantajosa para extração das redes a partir dos dados GDEM.

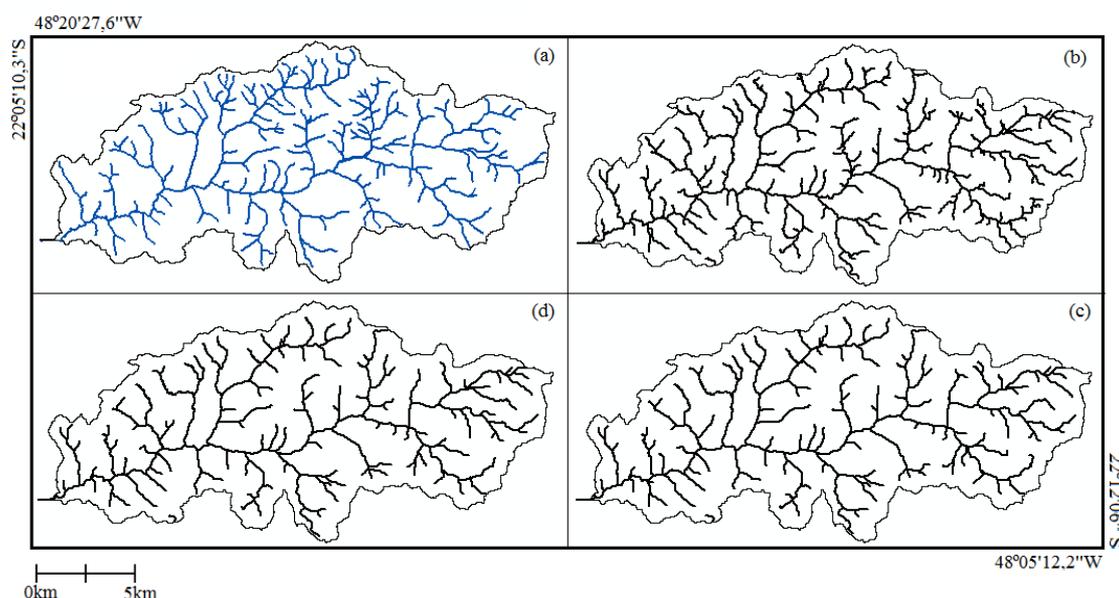


Figura 4. 4 - Testes de filtragem nos dados GDEM. Redes de drenagem para MB3 (Relevo de colina com densidade de drenagem alta). (a) Rede de drenagem de referência (b) extraída do dado original, (c) do dado filtrado uma vez e (d) do dado filtrado três vezes.

Tabela 4. 2 - Parâmetros considerados nas redes de drenagem de MB3 usando GDEM. Onde Ns: numero de segmentos; Ct: comprimento total de rios e Dd densidade de drenagem

Parâmetro	Referência	Extração digital		
		Original	Filtrado 1x	Filtrado 3x
Ns	326	310	224	227
Ct (km)	245,68	249,30	206,62	212,75
Dd (km/km <sup>2</sup> )	1,28	1,29	1,07	1,11

O ultimo teste preliminar realizado foi para a MB4, em que os dados Topodata foram filtrados, de uma a cinco vezes, antes de extrair as redes de drenagem (Figura 4.5).

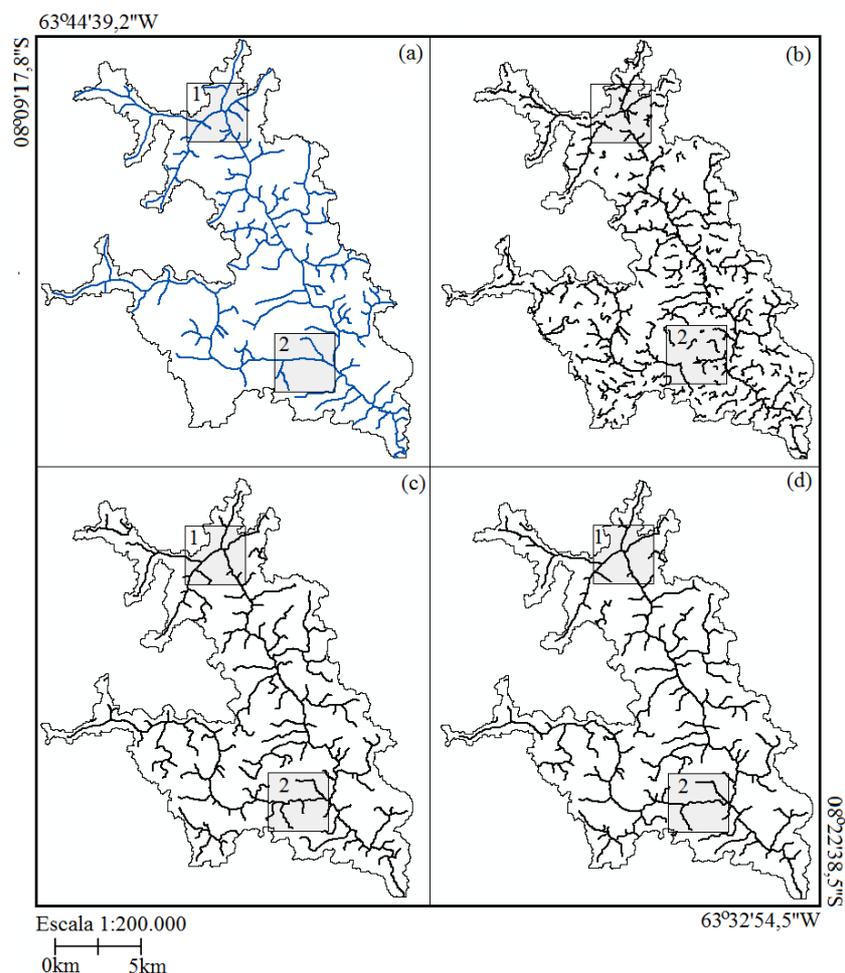


Figura 4. 5 - Testes de filtragem nos dados Topodata na MB4 (Relevo plano) usando o algoritmo de fluxo D8. (a) Rede de drenagem de referência, (b) extraída do dado original, (c) rede do dado filtrado uma vez e (d) do dado filtrado cinco vezes. Os quadros em cinza são detalhes 1 (norte da MB) e 2 (sul da MB), correspondem às Figuras 4.6, respectivamente.

Observou-se que quando os dados originais são usados para extrair a rede de drenagem neste caso particular (relevo plano), foram criadas drenagens sem conexão, em grande quantidade de segmentos incoerentes isolados (Figura 4.5b). Uma vez realizada a filtragem, as linhas criadas apresentaram maior continuidade (Figura 4.5c) e coerência em comparação com a rede de referência. Quando foi realizada a filtragem pela quinta vez e

extraída a rede de drenagem, as diferenças nas redes geradas foram mínimas, conforme os valores dos parâmetros calculados (Tabela 4.3).

Tabela 4. 3 - Parâmetros considerados nas redes de drenagem de MB4 usando Topodata. Onde Ns: numero de segmentos; Ct: comprimento total de rios e Dd densidade de drenagem

Parâmetro	Referência	Extração digital		
		Original	Filtrado 1x	Filtrado 5x
Ns	215	<b>443</b>	<b>219</b>	218
Ct (km)	218,63	337,33	249,54	239,68
Dd (km/km <sup>2</sup> )	<b>1,03</b>	<b>1,60</b>	<b>1,18</b>	1,13

Na Tabela 4.3 são apresentados os parâmetros considerados para avaliar as redes de drenagem mostradas na Figura 4.3. Estes confirmaram que o dado filtrado resulta em uma melhor rede de drenagem quando é comparada com a referência. Neste teste, observou-se que o número de segmentos gerados com o dado original foi de 443, o dobro em relação ao dado filtrado. Por outro lado, quando Topodata é filtrado, o número de segmentos diminui para 219, muito próximo ao valor da rede de referência (101%). Comportamento semelhante foi observado nos parâmetros Ct e na Dd, o que indica uma melhoria expressiva para os resultados. Uma única a filtragem sobre os dados Topodata permitiu gerar os melhores resultados atingidos para o terreno plano da MB4 em relação a todas as demais circunstâncias testadas neste trabalho.

A Figura 4.6 corresponde aos detalhes em cinza-claro mostrados na Figura 4.5. A primeira linha corresponde ao detalhe 1 e a segunda linha ao detalhe 2. A aplicação do filtro nestes dados permitiu o desenho de linhas de drenagem que foram extraídas quando foi usado dado Topodata original no curso principal do rio (Figura 4.61c e 4.61d). Contudo, o efeito da filtragem gerou linhas não existentes na referência no segundo detalhe (Figuras 4.62c e 4.62d) o que não ocorreu quando o dado original foi utilizado.

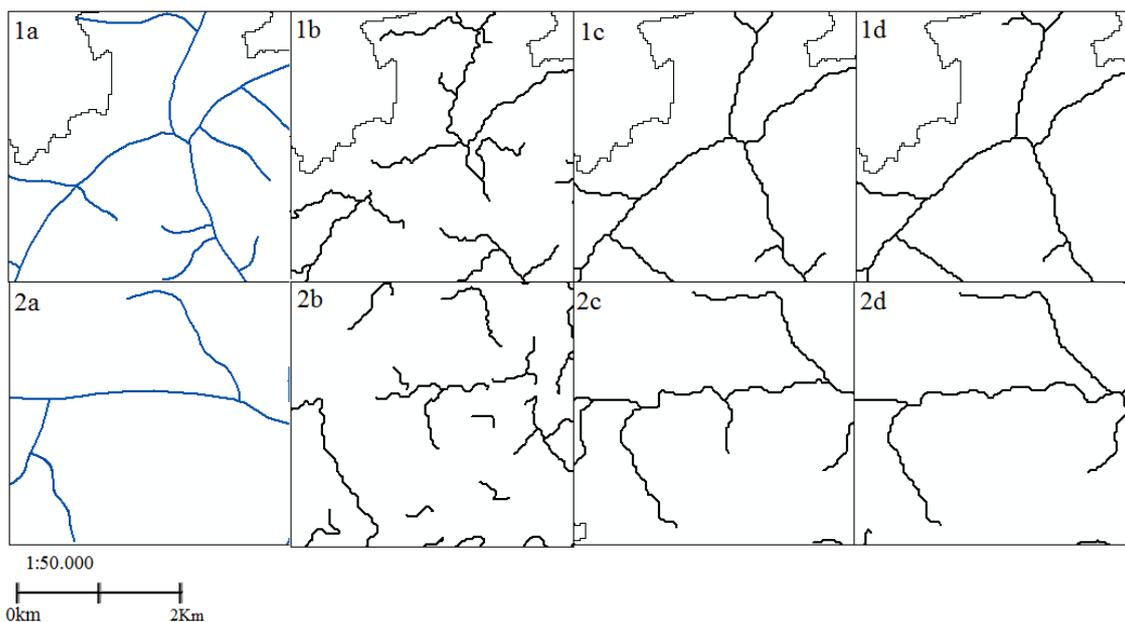


Figura 4. 6- Detalhes das redes extraídas para Mb4 a partir de Topodata; (a) Drenagem de referência, (b) obtida do dado original, (c) do dado filtrado uma vez e (d) do dado filtrado cinco vezes.

Da mesma forma que a Figura 4.6, a Figura 4.7 representa as redes de drenagem de referência e as extraídas para MB4 a partir de dados SRTM. Neste caso, quando os dados foram filtrados, não se observou variação nos resultados de Ns, Ct e Dd calculados para as redes de referência e extraídas para MB4.

Como observado na Tabela 4.4, os valores mais próximos à referência com relação a Ns foram aqueles correspondentes ao dado original. Para Ct, observou-se uma diminuição conforme o dado era filtrado, o que foi refletido na Dd calculada destas redes, também verificado na análise visual. Com isto, observou-se melhor correspondência da rede extraída a partir do dado SRTM original com a rede de referência, não se confirmando assim a necessidade de filtragem dos dados SRTM previamente à extração.

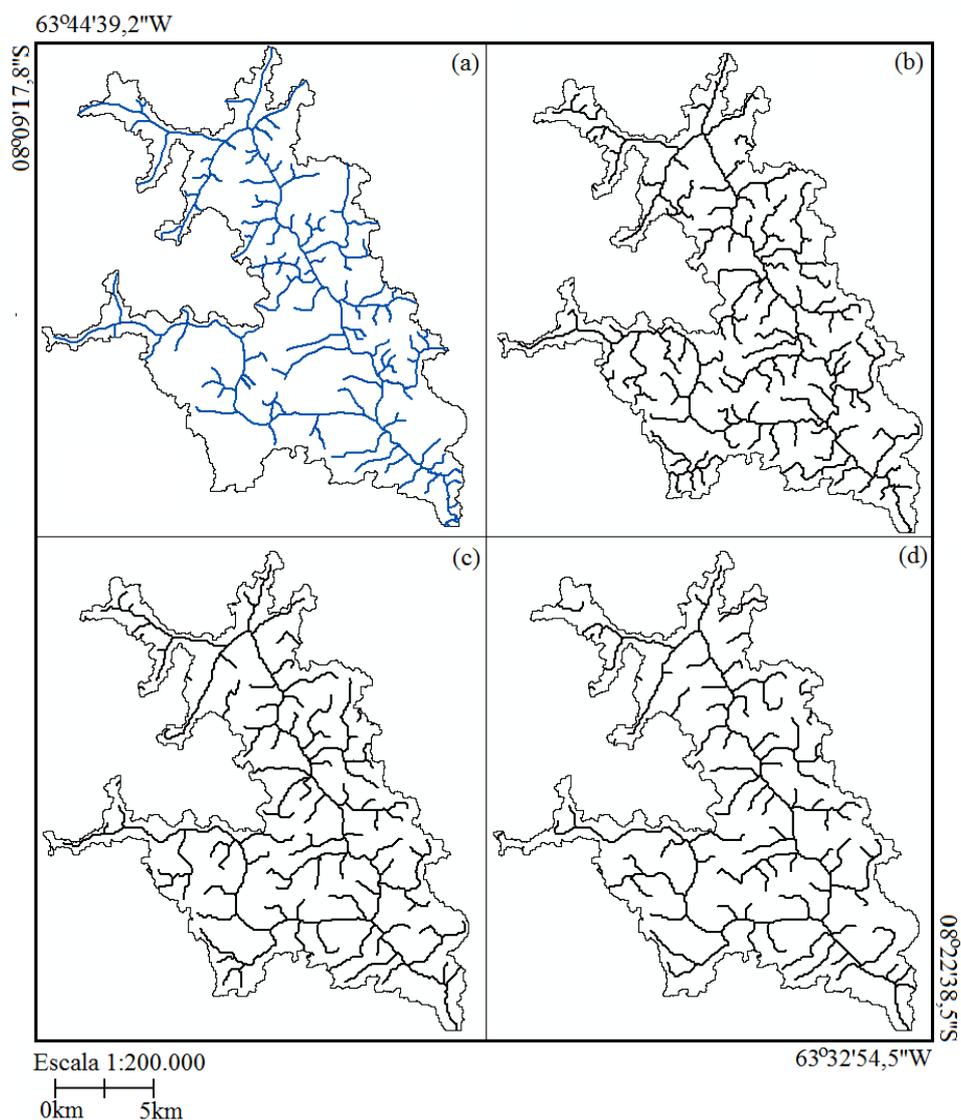


Figura 4. 7 - Testes de filtragem sobre os dados SRTM. Redes de drenagem obtidas de SRTM. (a) rede de drenagem de referência, (b) rede obtida do dado original, (c) rede obtida do dado filtrado uma vez e (d) rede gerada a partir do dado filtrado pela quinta vez.

Tabela 4. 4 - Parâmetros considerados nas redes de drenagem da microbacia 4 usando SRTM. Onde Ns: numero de segmentos; Ct: comprimento total de rios e Dd densidade de drenagem

Parâmetro	Referência	Extração digital		
		Original	Filtrado 1x	Filtrado 5x
Ns	215	210	173	147
Ct (km)	218,63	282,32	260,59	234,86
Dd (km/km <sup>2</sup> )	1,03	1,33	1,23	1,11

## 4.2. Extração das redes de drenagem

Na Figura 4.8 apresentam-se as microbacias analisadas neste estudo e suas respectivas áreas de captação calculadas com o método D8. Os maiores valores de área de captação correspondem às posições dos rios principais como o esperado, possíveis áreas de ocorrência de drenagens. Nesta figura observam-se diferenças na intensidade dos níveis de cinza, sobretudo nas posições de drenagem, que representam os valores máximos de área de captação distintos, em função das características das MB.

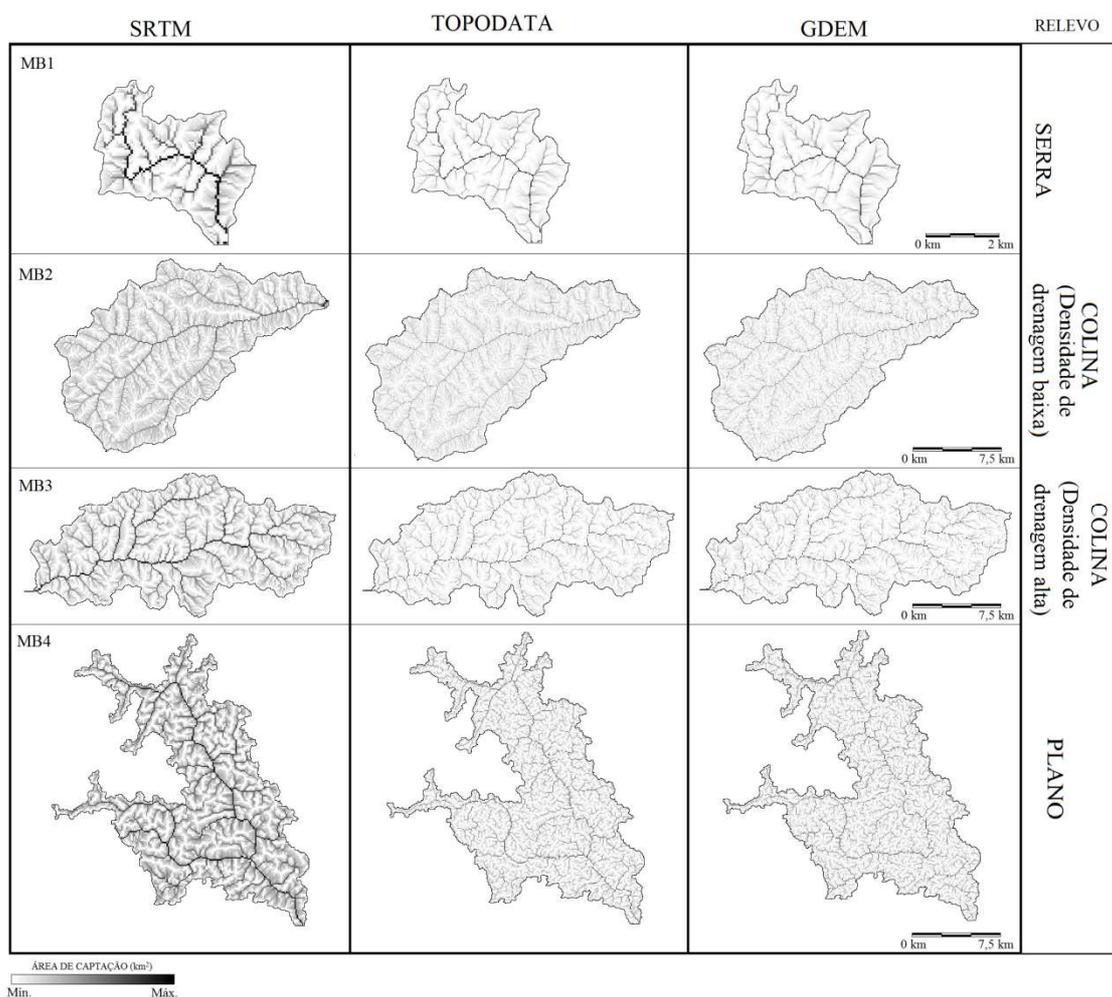


Figura 4. 8 - Áreas de captação das microbacias calculadas com o algoritmo de fluxo D8, a partir dos três MDE utilizados.

Na Figura 4.8, as maiores áreas de captação (tons mais escuros) mostram-se associadas aos talwegues, enquanto as menores (tons claros) localizam-se nas vertentes e divisores, coerentemente. Aqui também pode-se ressaltar a variação do padrão dos tons mais claros, que podem ser causados pelas características morfométricas da bacia propriamente dita ou pelo MDE utilizado. Na tabela 4.5 estão apresentados os valores máximos obtidos de área de captação calculados com todos os MDE utilizados. Nesta tabela, observa-se, que ainda com áreas de drenagem similares (MB2 e MB3) os valores de área de captação são diferentes quando cada MDE é usado.

Tabela 4. 5 - Valores máximos (Max.) de área de captação (km<sup>2</sup>) para cada microbacia estudada usando o algoritmo de fluxo de D8 e os diferentes MDE

	Área (km <sup>2</sup> )	SRTM	Topodata	GDEM
MB1	25,21	13,77	9,74	15,61
MB2	192,70	139273,45	34,52	210,04
MB3	192,28	44,45	58,15	91,53
MB4	211,41	27,64	<sup>1</sup> 15,31	9,52

(1) Topodata filtrado para MB4.

De acordo com a Figura 4.8, os padrões mais homogêneos apresentam-se nas bacias com relevos mais diferenciados, de topos agudos e os mais heterogêneos em relevos mais suaves a planos, onde os topos tornam-se mais redondos. Na mesma figura estão representados os valores obtidos de área de captação em cada uma das MB. Todas as MB apresentaram valores de área da captação diferentes entre si, como esperado (Tabela 4.5). Neste caso com as MB estudadas resultou que aquelas que possuem áreas de drenagem similares apresentaram valores de área de captação variados (Tabela 4.5; MB2, MB3 e MB4), enquanto MB com áreas de drenagem diferentes resultaram em áreas de captação semelhantes (Tabela 4.5; MB1 e MB4). Estes resultados mostram a influência das características do relevo de cada área sobre o cálculo da área de captação, o que tem implicações diretas na adoção dos limiares da extração da drenagem. Os resultados também mostraram que MB com área de drenagem igual, mesmo relevo, porém com densidade de drenagem diferente (Tabela 4.5; MB2 e MB3), resultaram em áreas de captação completamente diferentes, o que poderia se relacionar com as características

morfométricas das MB (e.g. MB1 e MB4). Nas diferentes MB foram estimadas áreas de captação diferentes, como esperado (LAM, 2004).

As Figuras 4.9 e 4.10 se referem a um detalhe das áreas de captação obtidas para MB1 e MB4, respectivamente. Nestas são apresentadas áreas de captação resultantes dos algoritmos D8, Dinf e DEMON, já que os algoritmos restantes apresentaram valores muito próximos destes escolhidos (os algoritmos D8 com Rho8, Dinf com Mf e DEMON com KRA). As menores áreas de captação foram aquelas produzidas com o algoritmo de fluxo múltiplo Dinf e DEMON (Figura 4.9c e d e Figura 4.10c e d) e as maiores com o D8 (Figura 4.9a e Figura 4.10a), da mesma forma que foi obtido por Lam (2004). Isto pode ser explicado pela discretização do fluxo em uma única direção entre oito consideradas no algoritmo D8 para calcular as áreas de captação, o que produz subestimação do fluxo em alguns casos. Tal situação não ocorre com algoritmos de fluxo múltiplo que conseguem modelar os fluxos dispersivos. Os tons mais escuros correspondem às áreas de captação posicionadas no fundo de vales associados a possíveis drenagens. Na figura, as células com menor área de captação (tons mais claros) se correspondem com as células fonte, associadas aos divisores de água (LAM, 2004). As áreas de captação criadas pelos algoritmos de fluxo múltiplo (Dinf e DEMON) geraram caminhos de fluxo mais verossímeis em relação aos algoritmos de fluxo simples (D8) (PELLETIER, 2008; LAM, 2004).

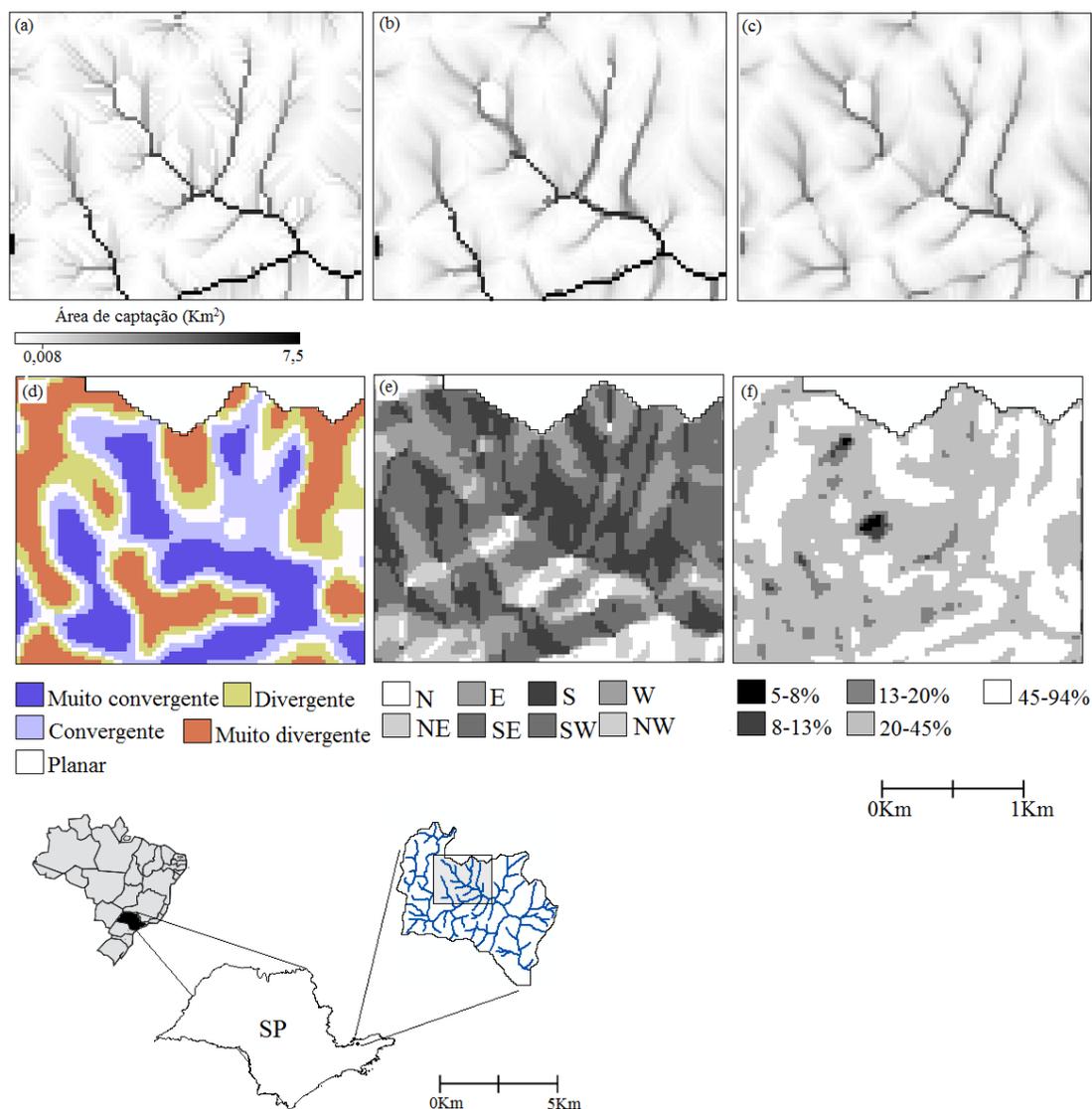


Figura 4. 9 – Detalhes das áreas de captação calculadas para MB1 (Relevo de Serra) (a, b, c). As áreas de captação mostradas foram obtidas a partir de Topodata. (a) Área de captação calculada usando o algoritmo de fluxo D8, (b) usando Dinf, e (c) usando DEMON. Estes foram representadas em escala logarítmica para melhor apreciação. Na mesma figura algumas características geomorfométricas (d, e, f). (d) Curvatura horizontal, (e) orientação de vertentes e (f) declividade.

Estes algoritmos (D8) são capazes de simular perfeitamente fluxos sob topografias convergentes (QUINN et al., 1991; FAIRFIELD; LEYMARIE, 1991; COSTA-CABRAL; BURGESS, 1994; TARBOTON, 1997), mas para topografias divergentes apresentam dificuldade pelo fato de estarem restritos a direcionar o fluxo para uma única célula, entre suas oito vizinhas. Nestas figuras encontram-se também as características geomor-

fométricas curvatura horizontal, orientação de vertentes e declividade (Figuras 4.9d, e, f e 4.10, d, e, f). Segundo as características geomorfológicas aqui apresentadas, para MB1 observa-se que as áreas de divergência correspondem, na maioria dos casos, aos divisores de água e cabeceiras dos rios, enquanto áreas de convergência correspondem com as áreas do talvegue do rio. Nas áreas de cabeceira, o algoritmo D8 tende a gerar linhas paralelas em proporção ao grau de divergência (Figura 4.9a), situação que não ocorreu com algoritmos de fluxo múltiplo (Figura 4.9b e c), em que as feições foram mais suavizadas e sem paliçamento.

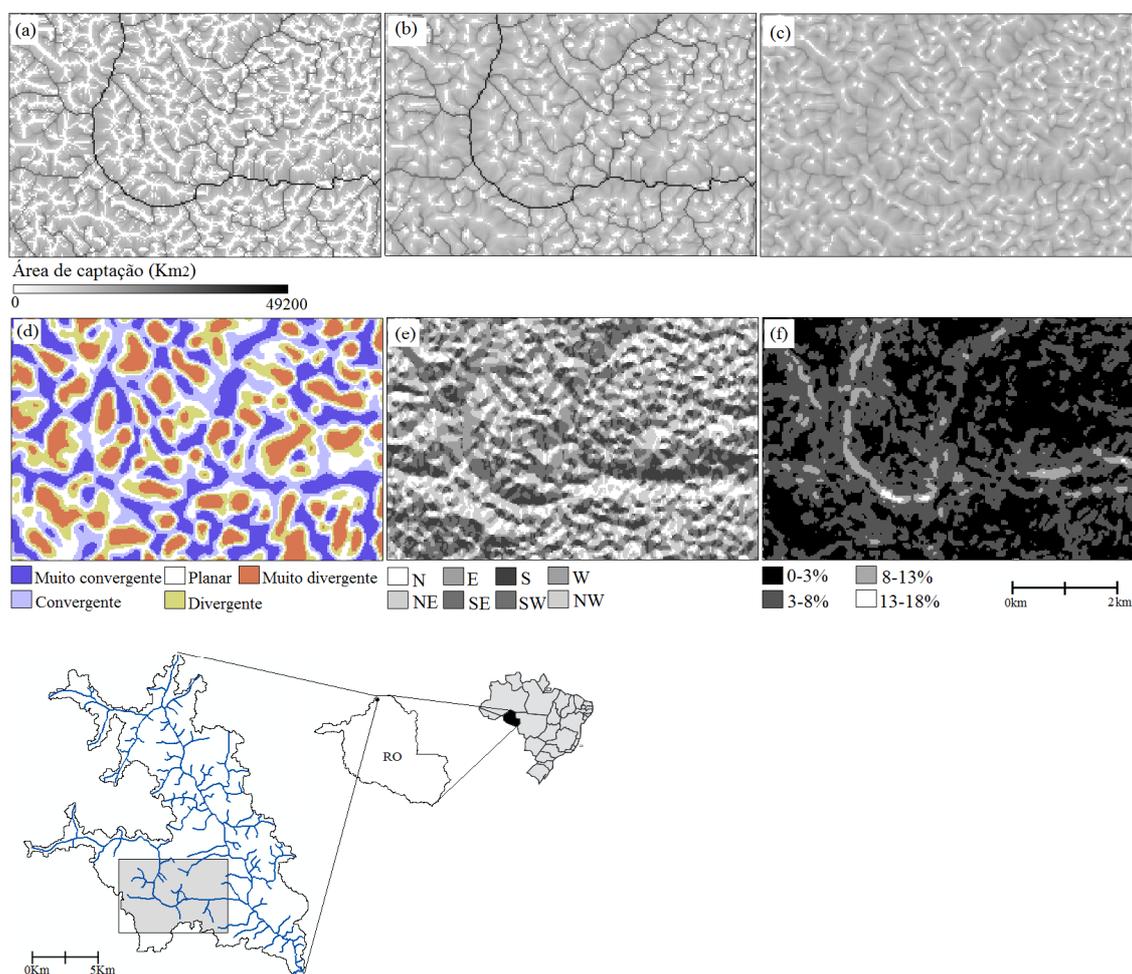


Figura 4. 10 – Detalhes das áreas de captação calculadas para MB4 (Relevo Plano) (a, b, c). As áreas de captação mostradas foram obtidas a partir de Topodata (Filtrado). (a) Área de captação calculada usando o algoritmo de fluxo D8, (b) usando Dinflow, e (c) usando DEMON. Estes foram representadas em escala logarítmica para melhor apreciação. Na mesma figura algumas características geomorfológicas (d, e, f). (d) Curvatura horizontal, (e) orientação de vertentes e (f) declividade.

Os padrões de distribuição observados nas Figuras 4.9 e 4.10 são de diferentes tipos devido às características do relevo. Na Figura 4.10, as características geomorfométricas do detalhe apresentado da MB4 mostram-se diferentes da MB1. No detalhe da Figura 4.10, a curvatura horizontal não apresenta um padrão organizado, o que corresponde a mudanças incoerentes na orientação de vertentes (Figura 4.10f). Este padrão costuma estar associado a baixas declividades (VALERIANO, 2008).

As áreas de captação produzidas pelo algoritmo D8 na área do possível canal são maiores (Figura 4.10a), com valores mais contrastantes, igual ao observado na Figura 4.9a. Por outro lado, as áreas de captação estimadas pelos algoritmos Dinf e DEMON (Figuras 4.9 b, 4.9c, 4.10b e 4.10c) produziram imagens mais suavizadas, o que poderia indicar uma distribuição mais uniforme devida ao funcionamento destes algoritmos.

Para estimar as diferenças entre as áreas de captação obtidas dos dados Topodata e GDEM, foi realizada a razão entre as áreas resultantes dos métodos D8 e DEMON. A Figura 4.11 representa a razão das áreas de captação obtida para MB3 e MB4 dos dados Topodata/GDEM e Topodata/SRTM, respectivamente. A Figura 4.11a corresponde à razão das áreas de captação geradas usando o algoritmo D8. A Figura 4.11b mostra a mesma operação, mas com as áreas de captação produzidas usando o algoritmo DEMON. Foram obtidos fatores que indicam a relação entre as áreas estimadas com cada um dos métodos, para cada caso (Topodata/GDEM usando D8 e Topodata/GDEM usando DEMON). As áreas em tons de cinza mais claro são as áreas de coincidência e vice-versa. Na mesma figura pode-se observar que as diferenças para ambos localizam-se em posições diferentes. Assim, no primeiro caso (Figura 4.11a), as maiores diferenças correspondem à posição do curso principal e, no segundo caso (Figura 4.11b), as diferenças estão distribuídas sem um padrão específico. O fato de mostrar padrões em locais diferentes, sendo que são os mesmos dados nos mesmos tipos de relevo, indica a variabilidade de funcionamento do algoritmo de fluxo, que neste caso em particular advêm das diferenças devido a natureza dos fluxos, simples (D8) e múltiplo (DEMON). Na razão realizada entre as áreas de captação calculadas usando os algoritmos D8 e DEMON obtidas dos dados Topodata e SRTM (Figura 4.11c, d), observaram-se padrões

de distribuição diferentes, o que é esperado devido a diferenças de funcionamento destes algoritmos. No caso da Figura 4.11c, em que o algoritmo usado foi o D8, os tons com menores áreas de acumulação podem corresponder às possíveis células fonte (LAM, 2004). Para este caso, observa-se ressaltado em preto, nas áreas possivelmente correspondentes ao talvegue, os pontos onde os valores da razão destes dados são maiores.

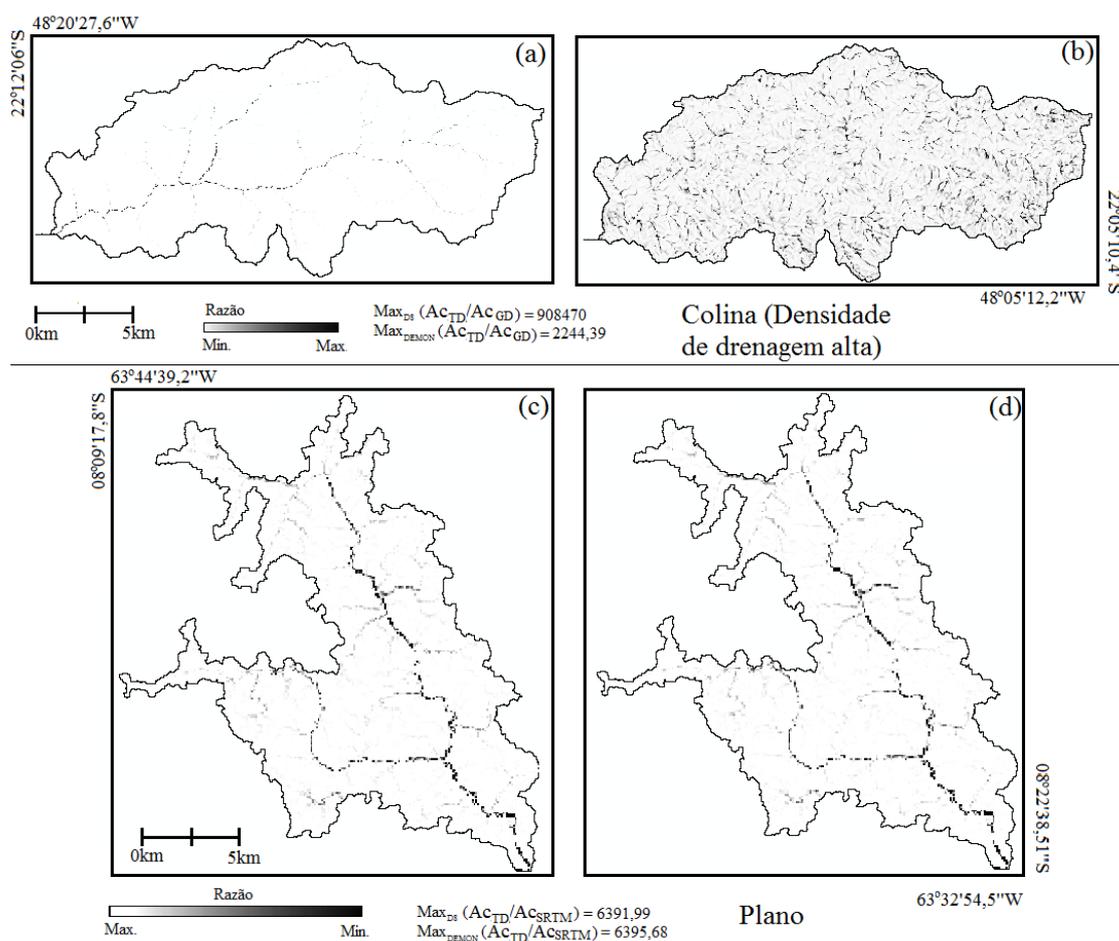


Figura 4. 11 - (a), (b) Razão das áreas de captação obtidas para MB3; (Relevo de colina) usando Topodata e GDEM. (c), (d) Razão das áreas de captação obtidas para MB3; (Relevo plano) usando Topodata e SRTM. Resultados provenientes dos algoritmos de fluxo D8 (a), (c) e DEMON (b), (d).

Observou-se que as áreas de captação geradas a partir do algoritmo de fluxo múltiplo, neste caso DEMON (Figura 4.11b,d), resultaram suavizadas, o que, segundo Desmet e

Govers (1996), se deve à transição gradual de áreas com declividade baixa para áreas com maior declividade.

Outro resultado obtido neste estudo foi o efeito produzido quando tem se uma área com relevo variado e é feita a extração automática das redes de drenagem usando um único limiar (Figura 4.12). Nesta figura são apresentadas as redes de drenagem extraídas para MB1 e MB4 (relevo de serras e relevo plano, respectivamente). Estas redes foram obtidas com o menor e o maior limiar definido para as MB analisadas. Os limiares (L) usados foram  $8,75 \cdot 10^{-3} \text{ km}^2$  (Figura 4.12b, e) e  $0,4 \text{ km}^2$  (Figura 4.12c, f).

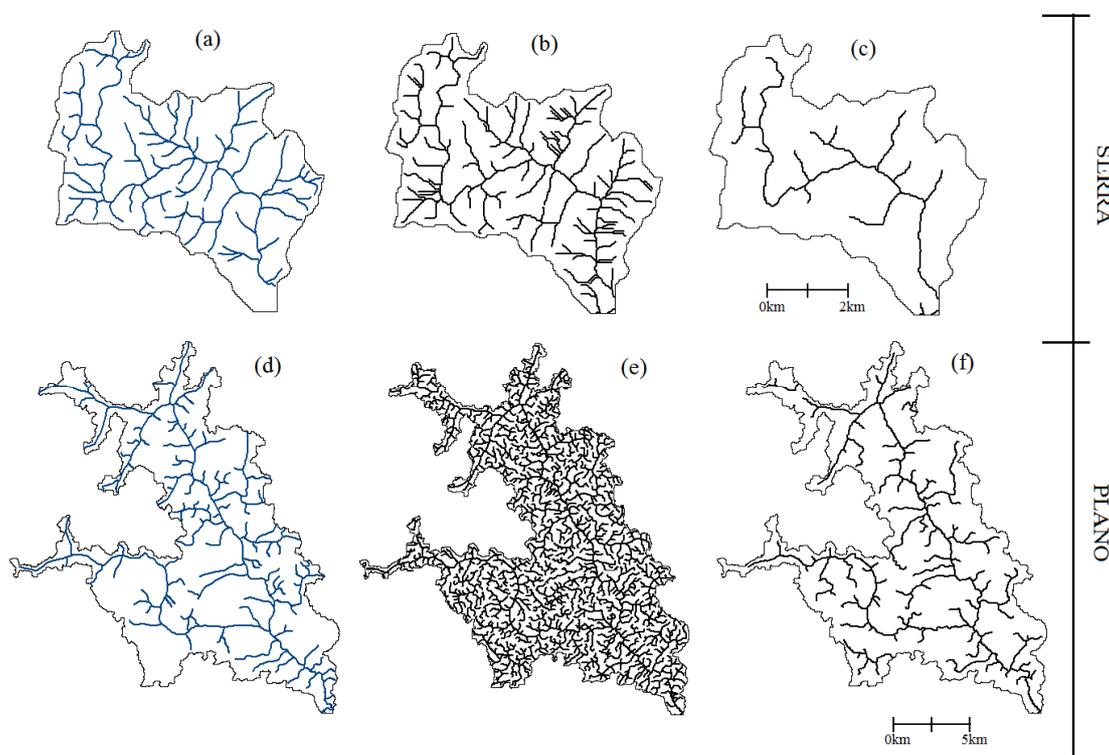


Figura 4. 12 - Efeito da aplicação de um único valor de limiar de área da captação em áreas com relevos diferentes. (a) Rede de drenagem de referência para MB1, (b), (e) extraída usando  $L = 8,75 \cdot 10^{-3} \text{ Km}^2$  (L: Limiar), (c), (f)  $L = 0,4 \text{ km}^2$  e (d) rede de referência MB4. O algoritmo de fluxo utilizado foi o Dinf e o MDE do Topodata (para MB4, o dado Topodata foi filtrado).

Observando a Figura 4.12, pode-se verificar o efeito do tratamento unificado (com um único limiar de área de captação) de áreas com diversos relevos. Como é mostrado na Figura 4.12b, a rede parece coerente, mas apresenta linhas paralelas que podem se con-

siderar erros quando são verificadas. Ao contrário, quando foi utilizado o limiar maior, apenas foi possível definir os traços principais da rede de drenagem. Por outro lado, limiar baixo para a MB4 (Figura 4.12e) resultou em segmentos excessivos, não correspondentes com a realidade, enquanto o resultado de limiar alto na mesma área (Figura 4.12f) se ajustou coerentemente. Estes resultados estão especificados na Tabela 4.6.

Tabela 4. 6 - Parâmetros analisados para MB1 e MB4. Onde Ns: numero de segmentos; Ct: comprimento total de rios, Dd densidade de drenagem, L: Limiar e RMB: rede de referência

	L: $8,75 \cdot 10^{-3} \text{ Km}^2$		L: $0,4 \text{ Km}^2$			
	RMB1	RMB4	MB1	MB4	MB1	MB4
Ns	159	215	185	1598	26	173
Ct (km)	151,81	218,63	79,26	748,67	25,40	207,22
Dd(km/km <sup>2</sup> )	0,79	1.03	3,14	3,54	1,01	0,98

Segundo Lopez e Camarasa (1999), os métodos de extração automática das redes de drenagem dependem grandemente da definição do limiar apropriado (mínimo de células requeridas para formar um canal). Os mesmos autores concluíram em seu estudo que este número é dependente das feições geomorfológicas da bacia de drenagem, o que varia muito dentro da mesma de um lugar a outro. Assim, o mais adequado é aplicação de limiares diferentes em cada setor, segundo as características geomorfológicas (LOPEZ; CAMARASA, 1999; FERNANDEZ et al., 2010).

Em relação à densidade de drenagem, foram extraídas redes de drenagem com mesmo relevo e densidade de drenagem diferente. MB2 (Figura 4.13a e 4.13b) possui densidade de drenagem  $0,78 \text{ km/km}^2$ , enquanto a densidade de drenagem da MB3 é de  $1,27 \text{ km/km}^2$ . Com o mesmo algoritmo de fluxo (Dinf), foi necessário aplicar limiares de área de captação diferentes,  $0,5 \text{ km}^2$  (555 células) e  $0,2 \text{ km}^2$  (222 células), em MB2 e MB3, respectivamente. Este caso permite associar o estabelecimento do limiar de área de captação à densidade de drenagem, independentemente da semelhança de relevo.

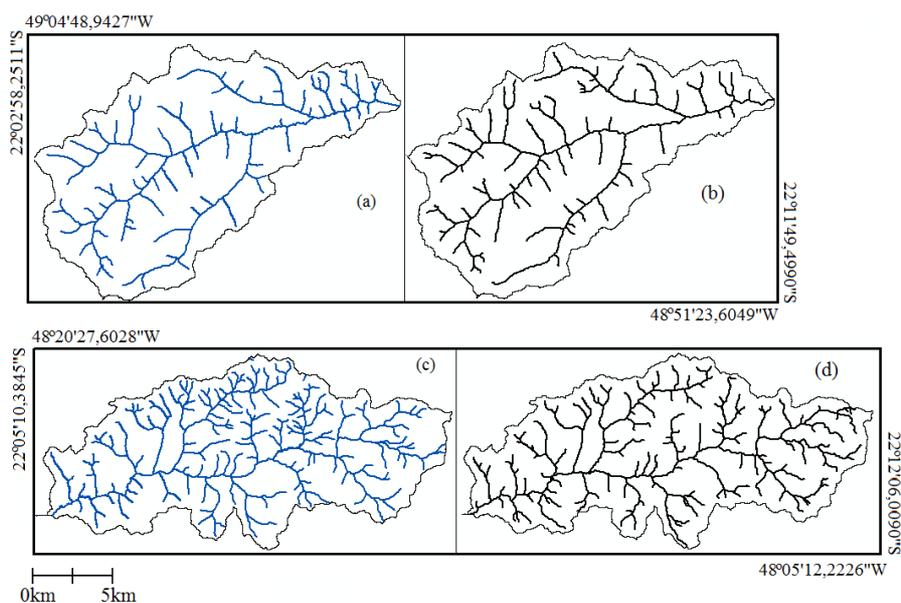


Figura 4. 13 - Áreas com mesmo tipo de relevo e densidades de drenagem diferentes. (a) e (c) drenagens de referência para as MB2 (Relevo de colina com baixa densidade de drenagem) e MB3 (Relevo de colina com alta densidade de drenagem) respectivamente. (b) e (d) Drenagens obtidas a partir de dados de Topodata usando o algoritmo Dinf.

A Tabela 4.7 apresenta os parâmetros correspondentes às redes de referências das MB apresentadas na Figura 4.13 e àquelas geradas com o algoritmo Dinf. Os limiares de área de captação selecionados para cada microbacia foram diferentes devido às variações das densidades de drenagem para cada MB, mesmo que se tenha utilizado o mesmo dado, com mesmo relevo e mesmo algoritmo. Esta relação entre densidade de drenagem e limiar de área de captação foi observada em vários estudos (GARCIA; CAMARASA, 1999; MCMASTER, 2002; LI et al., 2008; FERNANDEZ et al., 2010).

Tabela 4. 7 - Parâmetros considerados nas redes de drenagem extraídas. Onde Ns: numero de segmentos; Ct: comprimento total de rios, Dd densidade de drenagem e RMB: rede de referência

Parâmetros	MB2	RMB2	MB3	RMB3
Ns	143	159	260	326
Ct	157,52	151,81	220,33	245,68
Dd	0,8174	0,7878	1,1464	1,2784

### 4.3. Avaliação dos resultados

Foram calculadas as densidades de drenagem de cada rede extraída automaticamente, os resultados são mostrados na Figura 4.14. Os resultados mostraram uma correspondência parcial das densidades de drenagem calculadas para as redes extraídas em relação às redes de referências em todas as MB, quando os dados numéricos foram observados isoladamente (Tabela 4.8).

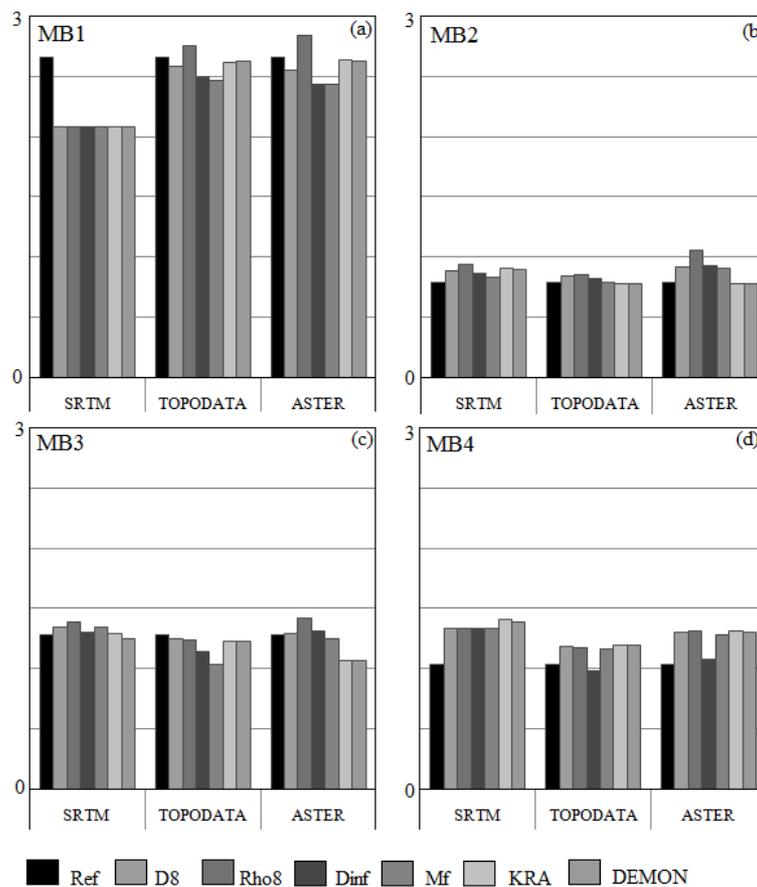


Figura 4. 14 - Densidades de drenagens ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) calculadas para cada uma das microbacias com cada um dos algoritmos de fluxo usando os diferentes modelos digitais de elevação. A barra em cor preta representa a densidade de drenagem da rede de referência. As barras em tons de cinza representam as densidades de drenagens estimadas a partir dos três MDE utilizados e os diferentes algoritmos de fluxo.

Quando as redes foram sobrepostas para visualização em detalhe, variados graus de deslocamento foram observados. No caso da MB1, as maiores discrepâncias foram ob-

servadas com dados SRTM, devido à interação entre características deste dado e a configuração do relevo nesta MB, de relevo de serra.

Junto com deslocamentos, a porcentagem de erros e de acertos foi avaliada conjuntamente, conforme se descreve a seguir. De acordo com a Figura 4.14 e a Tabela 4.8 correspondente, observa-se um padrão na funcionalidade dos algoritmos nas MB1 e MB2, caracterizado pelo melhor desempenho dos algoritmos KRA e DEMON, seguidos de Rho8, D8, Dinf e Mf num grupo de desempenho inferior, com subestimativa da densidade de drenagem em alguns casos (Figura 4.14a). Os resultados para MB3 e MB4 não apresentaram o mesmo padrão das demais microbacias. Estas variações se devem a diferenças nas características dos MDE utilizados em combinação com as características do relevo das MB analisadas.

Tabela 4. 8 - Densidades de drenagem calculadas para cada microbacias analisadas

Microbacia	Dado	Ref	D8	Rho8	Dinf	Mf	KRA	DEMON
MB1	SRTM		2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
	Topodata	2.66	2.58	2.75	2.50	2.47	2.62	<b>2.62</b>
	ASTER		2.56	2.84	2.43	2.44	<b>2.63</b>	<b>2.62</b>
MB2	SRTM		0.89	0.94	0.86	0.84	0.91	0.90
	Topodata	0.79	0.84	0.86	0.82	0.78	<b>0.78</b>	<b>0.78</b>
	ASTER		0.92	1.06	0.93	0.91	<b>0.78</b>	<b>0.78</b>
MB3	SRTM		1.35	1.39	1.30	1.34	<b>1.29</b>	1.25
	Topodata	1.28	<b>1.25</b>	1.23	1.15	1.04	1.23	1.23
	ASTER		1.30	1.42	1.31	1.25	1.07	1.07
MB4	SRTM		1.34	1.34	<b>1.33</b>	1.34	1.41	1.39
	Topodata	1.03	1.18	1.18	<b>0.98</b>	1.16	1.19	1.19
	ASTER		1.30	1.31	<b>1.08</b>	1.28	1.31	1.31

No caso da MB2, o resultado mais próximo da densidade de drenagem de referência foi calculado com o algoritmo Mf operado sobre dados SRTM. Por outro lado, valores mais próximos da referência obtidos foram com os algoritmos DEMON e KRA (Figura 4.14b) nas redes extraídas a partir de dados Topodata e GDEM. A mesma análise para a MB3 resulta no mesmo padrão quando foram usados dados e limiares diferentes. Os

valores de densidade de drenagem calculados nas redes geradas a partir de dados Topodata resultaram mais próximos numericamente da rede de referência usando os algoritmos KRA e DEMON. Para MB4, os resultados mostraram melhor desempenho de Topodata independentemente do algoritmo, ainda que estes resultados mostrassem subestimação, a pesar de testar limiares diferentes segundo cada dado utilizado. Nas redes de drenagem derivadas dos dados SRTM e GDEM, foram obtidas densidades de drenagem maiores do que a referência, mas os resultados obtidos com os algoritmos de fluxo são semelhantes aos obtidos com os dados Topodata.

Foram calculados os erros e acertos de cada rede de drenagem gerada em relação à rede de referência. Os resultados estão apresentados na Figura 4.15. Em termos gerais, pode-se dizer que as melhores redes de drenagem foram aquelas produzidas a partir do MDE de SRTM, seguidas das derivadas do MDE de Topodata, com exceção da MB4 localizada em relevo típico da Amazônia, baixo e com MDE marcado por efeito dossel. As Figuras 4.15c representam os acertos obtidos, ou seja, a porcentagem de células da drenagem de referência identificadas como tal no processo de extração. Aqui se observa a baixa correspondência das redes geradas com as respectivas referências, onde o valor maior de acerto obtido foi de 40,34% (Tabela 4.9) para a rede derivada de Topodata na MB4, em que as redes foram geradas usando os algoritmos DEMON/KRA. Como foi dito anteriormente, estes dois algoritmos geram resultados muito semelhantes, o que foi corroborado nesta análise. O menor grau de acerto observado foi de 10,22% (Tabela 4.9) quando os algoritmos DEMON/KRA foram usados, o que indica que o desempenho do algoritmo varia de acordo com as características da MB representadas no MDE, além da resolução do dado. Os algoritmos que apresentaram melhor desempenho (maiores porcentagens de acerto) foram os de fluxo múltiplo DEMON e KRA (Figura 4.15c), sobre os três MDE para MB1 e MB4. No entanto, para as MB2 e MB3, os maiores acertos foram obtidos com o algoritmo Rho8 sobre dados SRTM e ASTER; no caso, em que a rede foi derivada de Topodata, os maiores acertos foram obtidos com os algoritmos Dinf e DEMON (Tabela 4.9).

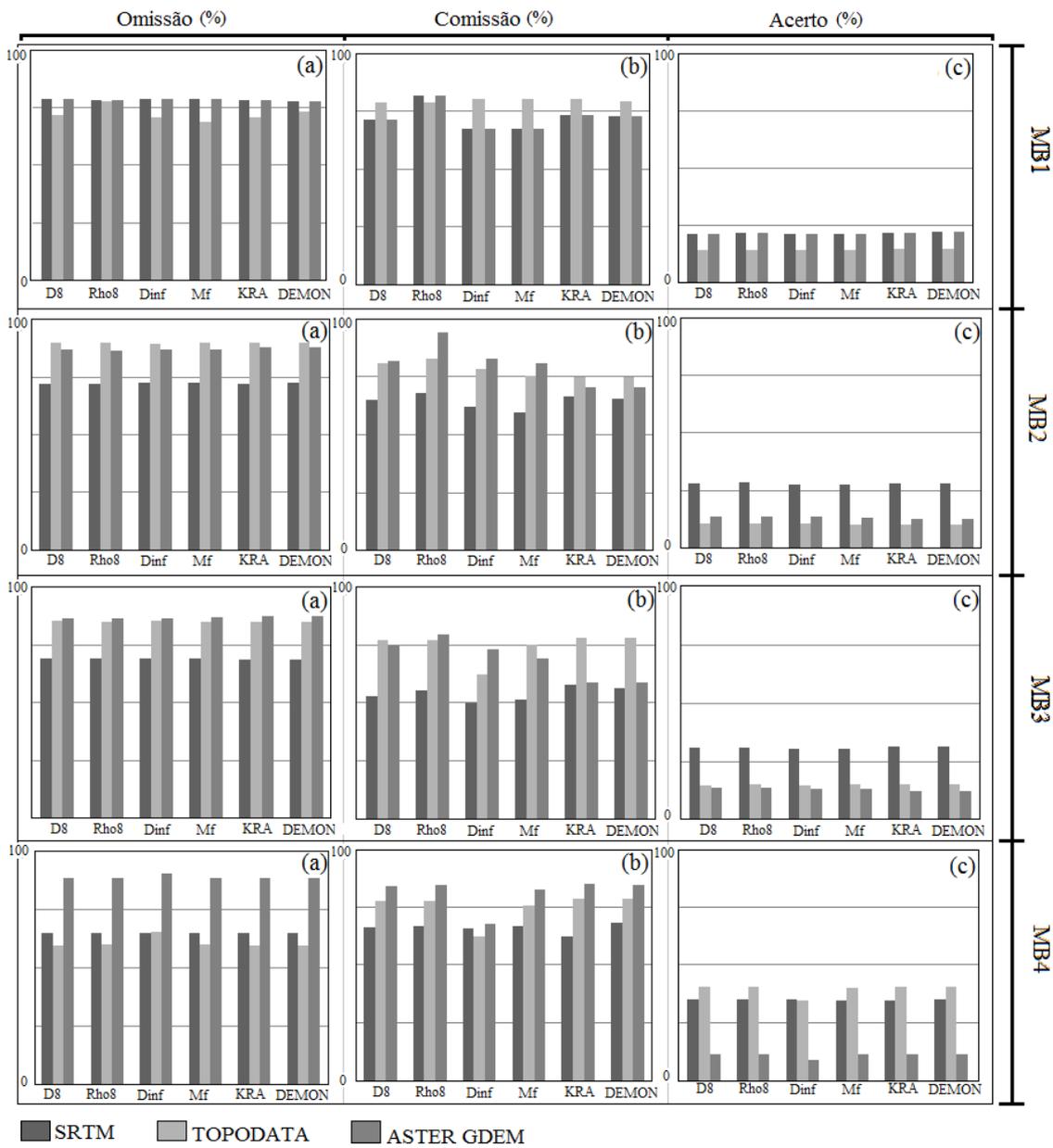


Figura 4. 15 – Erros calculados nas redes de drenagem extraídas em cada uma das MB a partir de cada MDE com cada um dos algoritmos de fluxo utilizados. As barras representam os MDE utilizados e cada três barras correspondem um algoritmo de fluxo. Cada linha corresponde com uma MB, cada coluna com os erros e acertos; (a) % de erros de omissão, (b) % de erros de comissão e (c) % de acertos.

Tabela 4. 9 – Erros (omissão e comissão, %) e acertos (%) calculados para cada rede de drenagem de cada MB derivada dos diferentes MDE utilizados

			D8	Rho8	Dinf	Mf	Kra	DEMON
MB1	SRTM	Omissão	78.56	78.26	78.80	78.71	77.96	77.72
		Comissão	71.64	82.07	67.89	67.54	73.57	73.22
		Acerto	21.44	21.74	21.20	21.29	22.04	<b>22.28</b>
	Topodata	Omissão	71.97	77.76	70.79	68.97	70.79	73.34
		Comissão	78.84	78.94	80.66	80.71	80.66	79.33
		Acerto	14.14	14.35	14.56	14.14	14.93	<b>15.03</b>
	ASTER	Omissão	78.56	78.26	78.80	78.71	77.96	77.72
		Comissão	71.64	82.07	67.89	67.54	73.57	73.22
		Acerto	21.44	21.74	21.20	21.29	22.04	<b>22.28</b>
			D8	Rho8	Dinf	Mf	Kra	DEMON
MB2	SRTM	Omissão	72.07	71.68	72.34	72.45	72.07	72.29
		Comissão	64.68	67.71	62.04	59.23	66.12	65.45
		Acerto	27.93	<b>28.32</b>	27.66	27.55	27.93	27.71
	Topodata	Omissão	89.49	89.45	89.33	89.72	89.78	89.78
		Comissão	80.75	82.44	78.30	75.09	74.57	74.62
		Acerto	10.51	10.55	<b>10.67</b>	10.28	10.22	10.22
	ASTER	Omissão	86.58	86.28	86.53	86.78	87.47	87.47
		Comissão	81.84	93.91	82.82	80.80	70.34	70.29
		Acerto	13.42	<b>13.72</b>	13.47	13.22	12.53	12.53
			D8	Rho8	Dinf	Mf	Kra	DEMON
MB3	SRTM	Omissão	69.23	69.13	69.30	69.40	68.59	68.52
		Comissão	52.88	55.54	50.05	51.43	58.07	56.69
		Acerto	30.77	<b>30.87</b>	30.70	30.60	31.41	31.48
	Topodata	Omissão	85.20	84.86	85.20	84.86	84.88	84.90
		Comissão	77.10	77.31	62.29	75.34	78.25	78.29
		Acerto	14.80	15.14	14.80	15.14	15.12	<b>15.10</b>
	ASTER	Omissão	86.41	86.30	86.50	86.80	87.49	87.49
		Comissão	74.49	79.66	73.34	69.36	59.06	59.06
		Acerto	13.59	13.70	13.50	13.20	12.51	12.51
			D8	Rho8	Dinf	Mf	Kra	DEMON
MB4	SRTM	Omissão	64.83	64.83	64.87	65.00	65.00	64.79
		Comissão	66.02	66.27	65.33	66.27	62.17	68.16
		Acerto	35.17	35.17	35.13	35.00	35.00	<b>35.21</b>
	Topodata	Omissão	59.83	59.91	65.33	60.28	59.66	59.66
		Comissão	77.10	77.31	62.29	75.34	78.25	78.29
		Acerto	40.17	40.09	34.67	39.72	40.34	<b>40.34</b>
	ASTER	Omissão	88.81	88.82	90.61	88.78	88.72	88.71
		Comissão	83.63	84.40	67.64	82.31	84.51	84.13
		Acerto	11.19	11.18	9.39	11.22	11.28	<b>11.29</b>

Como se observa na Tabela 4.9, não foram obtidos grandes valores de acerto para as redes obtidas nas MB1, MB2 e MB3, onde o maior valor foi de 30,87% e, no caso da MB4, atingiu 40,34%, ainda quando as características morfométricas da MB4 foram as menos favoráveis, no sentido de caracterizar um relevo plano; isto pode ser pela rede de referência usada compatível com escala 1:100.000 e pela forma em que esta foi produzida. Como comentado nos capítulo Material e Métodos, as redes de drenagem utilizadas foram derivadas de diferentes fontes, assim, a rede da MB4 foi atualizada com dados SRTM, entre outros insumos, o que explicaria a maior coincidência das redes extraídas de SRTM e seu correspondente refinado, Topodata.

A Figura 4.16 corresponde às medidas de deslocamentos máximos obtidos nas redes extraídas em relação à referência. Obtivemos valores de deslocamentos máximos e médios. Os deslocamentos máximos (Figura 4.16 a, c, e, g) indicaram os dados de menores deslocamentos, enquanto as médias (Figura 4.16 b, d, f, h) permitiram identificar o algoritmo que aprestou melhor proximidade à referência. Assim, os resultados mostraram que, para MB1 e MB3, os deslocamentos observados foram menores com dados Topodata, de modo geral. Quando se utiliza o algoritmo Dinf, os maiores deslocamentos foram encontrados na MB4, onde ocorre o oposto, com uma distância ligeiramente maior para dados Topodata em relação a SRTM e GDEM. O valor máximo apresentado na Tabela 4.10 correspondeu a 3485,93m, enquanto o mínimo (das distâncias máximas) foi de 489,3m. Ainda na Figura 4.16 observa-se que as distâncias de deslocamento foram maiores na MB3 quando o dado GDEM foi analisado com os algoritmos de fluxo D8, Rho8, Dinf e Mf. No caso em que KRA e DEMON foram usados, o comportamento foi inverso, isto é, houve maiores deslocamentos nos dados Topodata em relação à rede de referência do que para GDEM. Na MB3, os valores de deslocamento em relação à referência resultaram menores quando Topodata foi usado com os algoritmos D8, Rho8, Dinf, e MF. No entanto, para a mesma MB, com os algoritmos de fluxo KRA e DEMON, as distâncias foram maiores quando o dado Topodata foi usado.

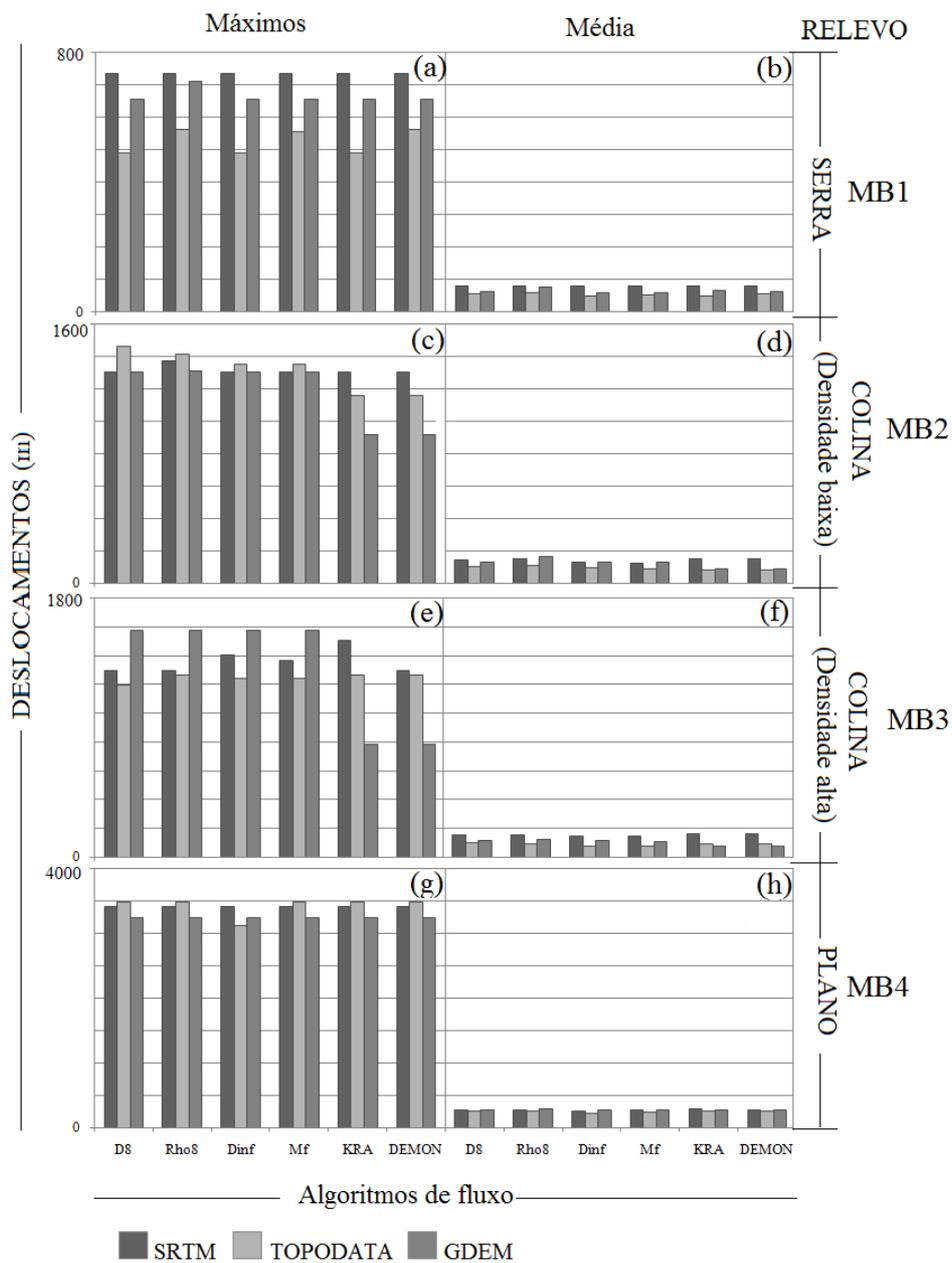


Figura 4. 16 – Deslocamentos apresentados pelas redes extraídas em relação às redes de referência. (a) distância máxima de deslocamento obtida para cada rede de drenagem gerada com cada um dos algoritmos de fluxo me todas as MB e (b) distância média de deslocamento obtida para cada rede de drenagem gerada com cada um dos algoritmos de fluxo para cada MB.

Em relação às médias das distâncias (Figura 4.16b), os valores máximos foram obtidos na MB4 quando o dado SRTM e o algoritmo de fluxo KRA foram usados. O valor má-

ximo da média da distância obtida foi de 280,15 m. O valor mínimo da média da distância obtida foi de 48,3 m obtido na MB1 com o algoritmo KRA. Estes valores encontram-se em negrito na Tabela 4.12.

Tabela 4. 10 – Deslocamentos (m) calculados para as redes extraídas automaticamente com cada um dos algoritmos de fluxo em cada MB

<b>MB1</b>							
Dado	Deslocamentos	D8	Rho8	Dinf	Mf	KRA	DEMON
SRTM	Máxima	735.2	735.2	735.2	735.2	735.2	735.2
	Media	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3
Topodata	Máxima	489.3	562.6	489.3	556.0	489.3	562.6
	Media	52.0	58.5	48.3	50.6	<b>48.3</b>	54.0
ASTER	Máxima	654.0	709.5	654.0	654.0	654.0	654.0
	Media	60.3	76.0	56.2	55.7	64.4	61.9
<b>MB2</b>							
Dado	Deslocamentos	D8	Rho8	Dinf	Mf	KRA	DEMON
SRTM	Máxima	1302.7	1373.2	1302.7	1302.7	1302.7	1302.7
	Media	141.8	151.96	130.66	120.25	148.17	146.46
Topodata	Máxima	1465.1	1415.1	1350.5	1350.5	1157	1156.95
	Media	98.24	105.51	91.85	86.07	81.35	81.49
ASTER	Máxima	1302.7	1310.7	1302.7	1302.7	915.46	915.46
	Media	130.65	161.97	130.95	126.95	87.1	87.07
<b>MB3</b>							
Dado	Deslocamentos	D8	Rho8	Dinf	Mf	KRA	DEMON
SRTM	Máxima	1294.9	1294.9	1404.5	1363.4	1503.6	1294.86
	Media	152.07	155.13	147	147.86	163.59	158.87
Topodata	Máxima	1198.1	1262.6	1238.1	1238.1	1262.6	1262.58
	Media	96.28	90.22	75.2	75.2	89.12	89.21
ASTER	Máxima	1576.7	1576.7	1576.7	1576.7	784.63	784.63
	Media	110.78	121.25	111.2	106.37	73.2	73.24
<b>MB4</b>							
Dado	Deslocamentos	D8	Rho8	Dinf	Mf	KRA	DEMON
SRTM	Máxima	3407.8	3407.8	3407.8	3407.8	3407.8	<b>3407.82</b>
	Media	266.12	268.83	258.67	264.85	<b>280.15</b>	275.46
Topodata	Máxima	3481.8	3481.8	3122	3481.8	3481.8	3481.82
	Media	244.74	244.2	211.79	237.76	248.43	247.8
ASTER	Máxima	3239.1	3239.1	3239.1	3239.1	3239.1	3239.07
	Media	271.88	278.3	262.1	274.7	272.85	272.11

Com base nestes resultados (Figura 4.15 e Figura 4.16), pode-se dizer que as redes geradas a partir dos dados Topodata na MB2, em comparação com o dado GDEM, apresentaram maior percentagem de acerto (Tabela 4.9) e os menores deslocamentos, exceto quando os algoritmos DEMON e KRA foram utilizados (Tabela 4.10).

As baixas correspondências entre as drenagens extraídas e a referência (Tabela 4.19) podem ser atribuídas em grande parte à incapacidade do método de extração automática para considerar os aspectos dinâmicos envolvidos no sistema de drenagem, (LOPEZ; CAMARASA, 1999; LIN et al., 2006, HANCOCK et al., 2006). Estes autores também afirmam que o problema está em considerar a bacia de drenagem como uma simples superfície topográfica.

Comparando as redes obtidas a partir de dados MDE para a MB4, Topodata resultou em maior percentagem de acerto e nos menores deslocamentos calculados em relação àqueles obtidos com SRTM e GDEM. Isto pode estar relacionado com a resolução dos dados, mesmo tendo os dados Topodata sido produzidos a partir dos dados SRTM. Para obter redes de drenagem compatíveis com a rede de referência (escala 1:100.000) foi necessário um limiar de área de captação de 400.000 m<sup>2</sup> (~444 células), no caso de Topodata, e de 200.000 m<sup>2</sup> (24,69 células), para o dado SRTM.

A Figura 4.17 corresponde a três detalhes na rede de drenagem da MB2. Estes foram representados em diferentes escalas: (a) escala 1:100.000, (b) escala 1:50.000 e (c) escala 1:25.000. No primeiro caso, a rede de drenagem parece coerente e coincide quase perfeitamente com a rede de referência, de modo geral. Na medida em que se amplia o detalhe (Figura 4.17b), as linhas de drenagem criadas começam apresentar um leve deslocamento, mais notável na Figura 4.17c, onde a escala corresponde a 1:25.000. Isto aconteceu em todas as redes de drenagem geradas. Este exame ilustra a limitação dos dados aqui utilizados (SRTM, Topodata e GDEM) como insumos para a extração de drenagem nestas escalas detalhadas.

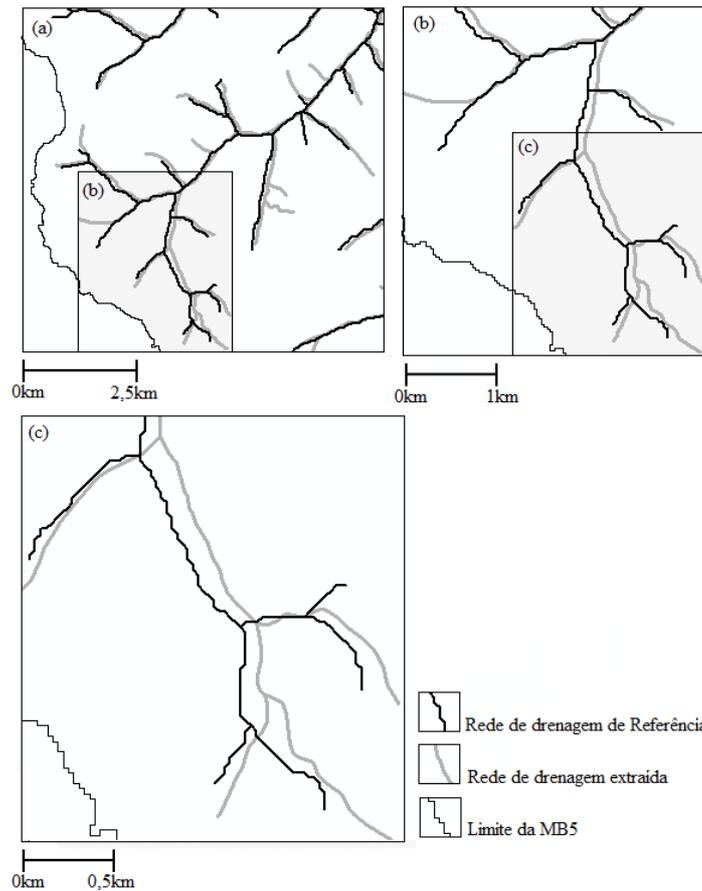


Figura 4. 17 – Detalhe mostrando em os erros de posicionamento das redes extraídas em relação à referência. Fragmento de rede de drenagem da MB2. (a) Detalhe a escala 1:100.000, (b) escala 1:50.000 e (c) escala 1:25.000. Os traços em cinza correspondem com a referência e os pretos com as redes extraídas.

Foram selecionadas a redes de drenagem consideradas as melhores derivadas de cada MDE (Figura 4.18). Esta escolha foi feita ponderar em primeiro lugar, a porcentagem de acerto em cada caso, segundo o MDE e o algoritmo usado, deslocamentos e análise visual e, finalmente, os valores dos parâmetros utilizados para escolha dos limiares (Ns, Ct, Dd). Com isto, para MB1, MB2 e MB3 as melhores redes foram obtidas do MDE de SRTM usando o algoritmo DEMON (MB1) e Rho8 (MB2 e MB3) (Figura 4.18 a, d, g).

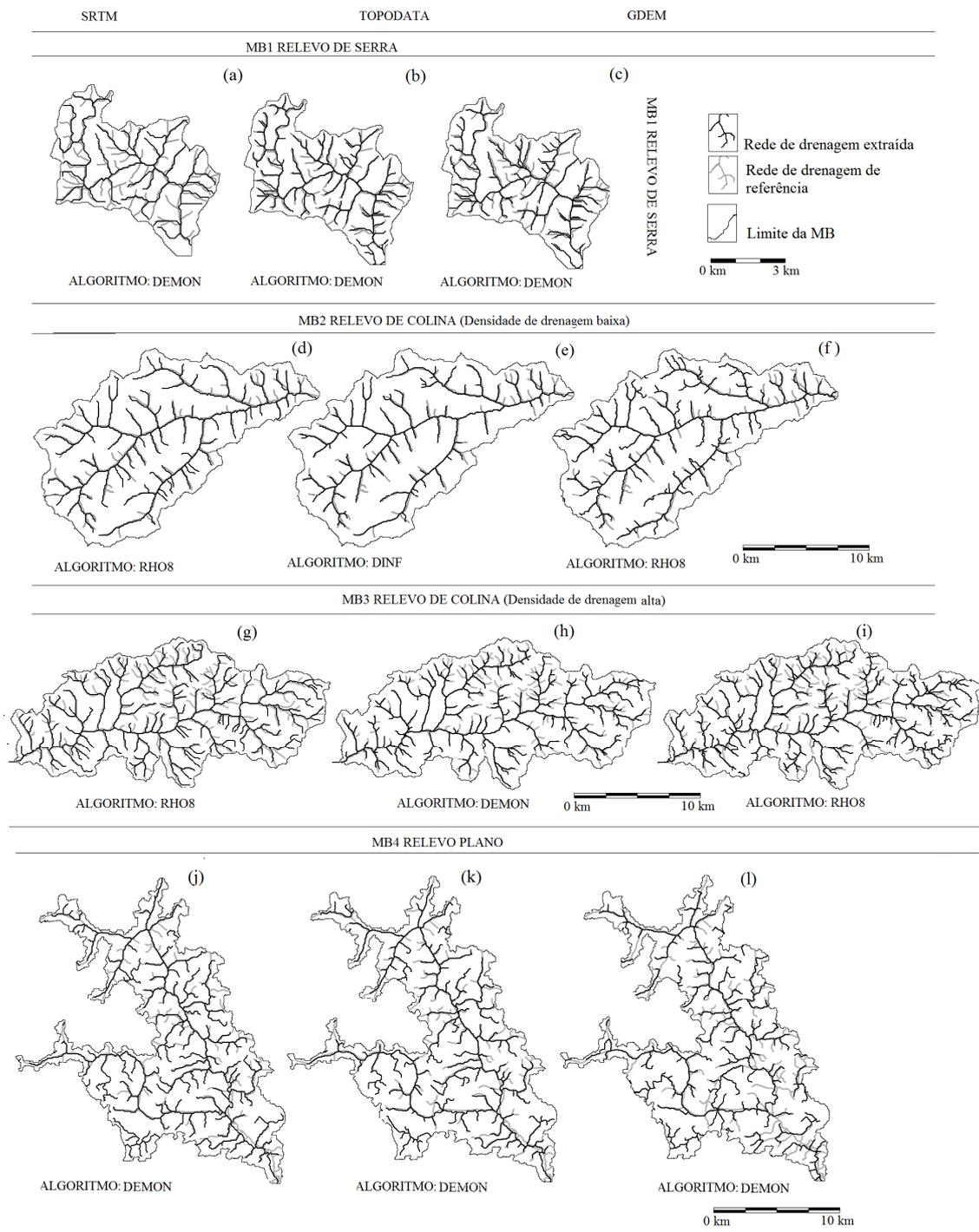


Figura 4. 18 – Melhores redes de drenagem obtidas para todas as MB usando os diferentes MDE e os algoritmos de fluxo. Em preto as linhas produzidas por processos automáticos e em cinza claro a rede de referência. (a), (b), (c) Redes da MB1; (d), (e), (f) redes MB2; (g), (h), (i) redes MB3 e (j), (k), (l) redes MB4. (a), (d), (g), (j) derivadas do MDE de SRTM; (b), (e), (h), (k) do MDE de Topodata e (c), (f), (i), (l) do MDE de GDEM.

## 5. CONCLUSÕES

- A partir dos dados topográficos de Topodata, foi possível gerar redes de drenagem coerentes compatíveis com escala 1:100.000, embora estas ainda requeiram trabalho de edição.
- Os dados Topodata, GDEM e SRTM produzem áreas de captação diferentes ainda quando os mesmos métodos para sua estimação são utilizados.
- Neste estudo verificou-se que a filtragem melhora significativamente as redes extraídas a partir de Topodata, mas também favorece a geração segmentos não existentes.
- O limiar mais adequado de valor de área de captação influi diretamente nos resultados das redes geradas. Assim, quanto maior é o limiar selecionado as redes criadas são mais generalizadas, e quando menor é este limiar as redes se tornam mais complexas.
- Os valores de área de captação independem do tamanho da bacia da qual é calculado. Devem se considerar as características geomorfométricas da bacia de drenagem estudada para a seleção do limiar, já que o desempenho do mesmo vai depender disso.
- A estratificação do processo em diferentes limiares é um cuidado fundamental para acolher as diferenças de resposta devidas a diferentes condições do relevo.
- Os algoritmos de fluxo múltiplo KRA e DEMON apresentaram o melhor desempenho na maioria das MB analisadas, com resultados de área de captação e redes de drenagem muito semelhantes.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. M. P. E CASTRO, P. T. A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio do Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamento. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 117-124, 2003.

ANDRADES FILHO, C. O.; ZANI, H. ; GRADELLA, F. S. Extração automática das redes de drenagem no Pantanal de Aquidauana: estudo comparativo com dados SRTM, ASTER e Carta Topográfica DSG. **Geografia** (Rio Claro. Impresso), v. 34, p. 731-743, 2009.

BERTANI, T. C. **Sensoriamento remoto e mapeamento de paleomorfologias no interflúvio Madeira-Purus, sudoeste da Amazônia brasileira**. 104p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos: INPE, 2011.

BÖHNER, J.; CONRAD, O. **System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)**. 2.0.5. Hamburg, 2004. Disponível em: <<http://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/>>. Acesso em: 20 jun. 2010.

CAMARGO, F. F. **Análise orientada a objeto aplicada ao mapeamento de unidades geomorfológicas a partir de dados ASTER/TERRA**. 2008. 171 p. (INPE-15253-Topodata/1339). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/03.17.19.50>>. Acesso em: 23 mar. 2010.

CANO, M. I. C. Impacto del algoritmo d en la extracción Automática de redes de drenaje a partir de modelos Digitales de elevaciones. **Cuaternario y geomorfología: Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario**, v.19 (1-2), p. 23-33. 2005.

CARDOSO, C.A. DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, E. S. V. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo-RJ. **Árvore, Viçosa**, v.30, n.2, p.241-248, 2006.

CHARLEUX-DEMARGNE, J.; PUECH, C. Quality assessment for drainage networks and watershed boundaries extraction from a Digital Elevation Model (DEM). In: ACM international symposium on advances in geographic information systems, 8., 2000, Washington, DC. **Proceedings...** Washington: ACM, 2000.

CHEREM, L. F. S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P.; FARIA, S. D. Análise morfológica de rede de drenagem extraída de MDE-SRTM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Cam-

pos: INPE, 2009. p. 7251-7258. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/10.25.17.54>>. Acesso em: 24 ago. 2010.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise de bacias hidrográficas. In: \_\_\_\_\_. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher LTopodataA, 1980. p. 185. ISBN 978-85-212-0130-4.

COLOMBO, R. VOGT, J.V. SOILLE, P. PARACCHINI, M.L. DEJAGER, A. Deriving river networks and catchments at the European scale from medium resolution digital elevation data. **Catena**, v.70, p. 296–305, 2007.

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

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). GEOBANK- Dados da Geodiversidade, 2007.

Disponível em: <

[http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/geoambiental.geoambiental.consultar?p\\_webmap=N](http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/geoambiental.geoambiental.consultar?p_webmap=N)> Acesso: 5 Dez. 2010.

CURKENDALL, D. W.; FIELDING, E. J.; CHENG, T.; POHL, J. M. A Computational-Grid Based System for Continental Drainage Network Extraction Using SRTM Digital Elevation Models, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PARALLEL PROCESSING WORKSHOPS (ICPPW'03), 2003, Kaohsiung, Taiwan. **Proceedings...** [S.l]: IEEE, 2003, p.181,.

SILVA FILHO, E. P., PEREIRA, E. C.; CARNEIRO, C. **Avaliação da compactação de solos em área de pastagem no Município de Porto Velho – RO** - Amazônia Ocidental. Primeira versão. Porto Velho: EDUFRO, v.7, n. 108, 2003.

DESMET, P.P.J.; GOVERS, G. Algorithms to route flow over digital landscapes: a comparison and their implications for predicting ephemeral gullies/comparaison d'algorithmes de l'écoulement appliqués à des m.n.t. : leur apport pour la prévision des ravinements temporaires. **Géomorphologie: relief, processus, environnement**, v.2, n.2-3, p.41-50, 1996.

DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; MONTGOMERY, D. R. e MCKEAN, J. Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology using a digital terrain model. **Journal of Geology**, v.101, n. 2, p. 161-180, 1993.

EASTMAN, R. IDRISI ANDES 15. Clark Labs, Clark University, 2006.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. p. 412.

ENDRENY, T. A.; WOOD, E. F. Maximizing spatial congruence of observed and DEM-delineated overland flow networks. **International Journal of Geographical Information Science**, v.17, n. 7, p. 699-713, 2003.

EARTH REMOTE SENSING DATA ANALYSIS CENTER (ERSDAC). **ASTER GDEM**. 2009. Disponível em: <http://www.GDEMem.aster.ersdac.or.jp/index.jsp>. Acesso em: 20 jun. 2010.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS Professional GIS for the desktop**. Version 9.3.1. Software. 2009.

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

FERN, A. MUSAVI, M. T. MIRANDA, J. Automatic Extraction of Drainage Network from Digital Terrain Elevation Data: A Local Network Approach. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 3, p. 1007-1011, 1998.

FERNÁNDEZ, D. C. J.; VALERIANO, M. M.; PERDOMO, J. E. F.; ARASATO, L. S. Teste de limiares de área de captação para extração automática de redes de drenagem em dados SRTM. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 8., 2010, Recife, PE Recife, PE. **Anais...** Recife: UFPE, 2010. DVD. Disponível em: <http://www.ufpe.br/gequa/> . Acesso em: 22 feb. 2011.

FERNANDES, N. F.; RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; REDIVO, A. L.; JÚNIOR, O. A. DE C.; GOMES, R. A. T. Avaliação de Metodologias de Determinação do Cálculo de Áreas de Contribuição. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n. 2, p.41-49, 2003.

FERRERO, V. O. **Hidrología computacional y modelos digitales del terreno: eoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico**. 2004. p. 391. Disponível em: [http://www.gabrielortiz.com/descargas/Hidrologia Computacional MDT SIG.pdf](http://www.gabrielortiz.com/descargas/Hidrologia_Computacional_MDT_SIG.pdf)>. Acesso em: 25 de abr. 2010.

FERRERO, V.O.; CONRAD, O. Geomorphometry in SAGA. In: **Developments in Soil Science- Volume 33: GEOMORPHOMETRY Concepts, Software, Applications**. 1 Ed. Hungary: A.E. Hartemink and A.B. McBratney, 2009, p.796.

FLORENZANO, T.G.; CSORDAS, S.M. **Mapa geomorfológico da região do Vale do Paraíba e Litoral Norte do Estado de São Paulo**. São Jose dos Campos, SP : INPE, 1993. 28 p. (INPE-5531-PRP/179).

FREEMAN, T. G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers and Geosciences**, v. 17, n. 3, p. 413-22, 1991.

GALLANT, J. C.; WILSON, J.P. TAPES-G: A grid-based Terrain Analysis Program for the environmental sciences. **Computer & Geosciences**. v. 22, n.7, p. 713-722, 1996.

GARBRECHT, J., OGDEMEN, F.L., DEBARRY, P.A.; MAIDMENT, D.R. GIS and distributed watershed models: I, Data coverages and sources. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.6, n.6, p. 506–514, 2001.

GARDNER TW, SOSOWSKY KC, DAY RC. Automated extraction of geomorphic properties from digital elevation data. **Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband**, v. 80, p. 57–68, 1991.

Global Mapper Software LLC. v11.01. 2002.

GUERRA, A. T. **Dicionário geológico geomorfológico**. 8. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993. 446p .ISBN 85-240-0458-4.

HANCOCK, G. R.; MARTINEZ, C.; EVANS, K. G.; MOLIERE, D. R. A comparison of SRTM and high-resolution digital elevation models and their use in catchment geomorphology and hydrology: Australian examples. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, n. 11, p. 1394-1412, 2006.

HIRT, C. AND FILMER, M.S. AND FEATHERSTONE, W.E. Comparison and validation of recent freely-available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. **Australian Journal of Earth Sciences**, v.57, n. 3, p. 337-347, 2010.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: geophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America (GSA)**, v.56, n.3, p. 275-370, 1945.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA, IBGE. **Banco de dados digital sobre relevo da Amazonia Legal**. 2009. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/>. Acesso em: 28 jan. 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). 1981. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**, 1:500.000, Nota explicativa. São Paulo, IPT. 126p. (Série Monografia nº 6).

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

KISS, R. Determination of drainage network in digital elevation models, utilities and limitations. **Journal of Hungary Geomathematics**, v. 2, p. 1-14, 2004.

LAM, C. S. **Comparison of flow routing algorithms used in geographic information systems**. (2004). f. 105. Disertacao (Mestrado em Geografia) - Faculty of the Graduate School University of Southern California. Disponivel em: <[http://spatial.usc.edu/Users/christineslam/Lam\\_2004\\_MSThesis.pdf](http://spatial.usc.edu/Users/christineslam/Lam_2004_MSThesis.pdf)> Acesso em: 15 fev. 2010.

LEA, N.L., An Aspect driven kinematic routing algorithm. In: Parsons, A. J.; Abrahams, A. D.; **Overland flow: hydraulics and erosion mechanics**. London: Chapman & Hall, 1992. p. 147-175.

LEHNER, B., DÖLL, P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. **Journal of Hydrology**, v. 296, n. 1-4, p.1-22. 2004.

LI, L.; WANG, J.; HAO, Z.C. Appropriate contributing area threshold of a digital river network extracted from DEM for hydrological simulation. Hydrological Research in China: Process Studies, Modelling Approaches and Applications (Proceedings of Chinese PUB International Symposium, Beijing, September 2006). IAHS Publ. 322, 2008. Disponivel em: <[http://hydro.ou.edu/PUB/LiLi\\_Appropriate\\_Contributing.pdf](http://hydro.ou.edu/PUB/LiLi_Appropriate_Contributing.pdf)>. Acesso em: 28 abr. 2010.

LIN, W.; CHOU, W.; LIN, C.; HUANG, P.; TSAI, J. Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds. **Hydrological Processes**, v. 20, p. 289-306, 2006.

LINDSAY, J. B. Geomorphometry in TAS GIS. In: **Developments in Soil Science- Volume 33: GEOMORPHOMETRY Concepts, Software, Applications**. 1 Ed. Hungary: A.E. Hartemink and A.B. McBratney, 2009, p.796.

LOPEZ, M. J. G. CAMARASA, A. M. Use of geomorphological units to improve drainage network extraction from a DEM. Comparison between automated extraction and photointerpretation methods in the Carraixet catchment (Valencia, Spain). **JAG I**, v. 1, n. 3/4, 1999.

MCMASTER, K. J. Effects of digital elevation model resolution on derived stream network positions. **Water Resources Research**, v.38, n. 4, p.1-8, 2002.

MAGINI, C.; CHAGAS, R. L. Microzoneamento e diagnóstico físico-químico do Ribeirão das Araras, Araras – SP. **Geociências**. v. 22, n. 2, p.195-208, 2003.

MARK, D.M. Automated detection of drainage networks from digital elevation models. In: WELLER, B.S. (ed.). **Auto-Carto 6. v. 2. automated cartography: international perspectives on achievements and challenges**. Ottawa, p. 288 - 298. 1983.

MEISELS, A.; RAIZMAN, S.; KARNIELI, A. Skeletonizing a DEM into drainage network. **Computers & Geosciences**, v. 21, n. 1, p. 187-196, 1995.

MONIZ, A.C. **Elementos de pedologia**. São Paulo: USP, 1972. 459p.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Channel Initiation and the Problem of Landscape Scale. **Science**, v.255, n. 5046, p. 826-830,1992.

MONTGOMERY, D. R.; FOUFOULA-GEORGIU, E. Channel network source representation using digital elevation models, **Water Resources Research**, v. 29, n.12, p. 3925-3934, 1993.

MORELLI, A. F. **Identificação e transformação das unidades da paisagem no município de São José dos Campos (SP) de 1500 a 2000. 2002**. 408f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro.

NASCIMENTO, R. P. S. DE. Aspectos geomorfológicos do Município de São José dos Campos (SP): ênfase na área urbana. **Geoambiente online: Revista Eletrônica do Curso de Geografia do Campus Avançado de Jataí-GO, n4 2005**. Disponível em: <http://www2.jatai.ufg.br/ojs/index.php/geoambiente/article/view/24/0>>. Acesso em: 15 jan. 2009.

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.328-344, 1984.

OGUCHI, T. SIG applications in geomorphology – a review. In: REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 6., 2006, Goiânia -Brazil. **Proceedings...** [S.l]: UGB, 2006.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; FILHO, B. C. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**. Campinas/SP:IAC/EMBRAPA-Solos, 1999.

ORLANDINI, S., MORETII, G., FRANCHINI, M., ALDIGHERI, B., TESTA, B., 2003. Path-based methods for the determination of nondisper- sive drainage directions in grid-based digital elevation models. **Water Resources Research**. v.39, n.6, p.1144, 2003.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2, p. 84-95, 2008.

PELLETIER, J. Flow Routing. In: \_\_\_\_\_ **Quantitative modeling of earth surface processes**. 1 ed. United KinGDEMom: University Press, Cambridge, 2008. p. 295. ISBN 978-0-521-85597-6.

PEUCKER, T.K.; DOUGLAS, D.H. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 4, p. 375-387, 1975.

PINTO, L. F. G.; CRESTANA, S. VIABILIDADE DO USO DA ADUBAÇÃO VERDE NOS AGROECOSSISTEMAS DA REGIÃO DE SÃO CARLOS, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p.329-336, 1998.

PLANCHON O.; DARBOUX F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. **Catena**, v.42, p 159-176, 2001.

POGGIO, L.; SOILLE, P. Influence of Spurious Pit Removal Methods from SRTM on River Network Positioning. In: GEOMORPHOMETRY, 2009, Zurich, Switzerland. **Proceedings...** Zurich, Switzerland, 2009.

QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v. 5, p 59-79. 1991.

RAHMAN, M. M., ARYA, D. S., E. GOEL, N. K. Limitation of 90 m SRTM DEM in drainage network delineation using D8 method a case study in flat terrain of Bangladesh. **Applied Geomatics**. v. 2, n. 2, p.49-58, DOI: 10.1007/s12518-010-0020-2. 2010 10p.

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**, New York, v.112, n.9, p.3469-3481, 2008.

RIVIX, LLC. **RiverTools**: broomfield. Colorado. 2004. Disponível em: <http://www.rivertools.com/> .Acesso em: 25 mar. 2010.

ROSS, J.L.S. Natureza e sociedade nos espaços agroambientais do Brasil. In:\_\_\_\_\_. **Ecogeografia do Brasil**: subsidio para planejamento ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 208p. ISBN 85-86238-60-0.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I.C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo** - laboratório de geomorfologia. São Paulo: Departamento Geografia- FFLCH-USP/ Laboratório de Cartografia Geotécnica - Geologia Aplicada - IPT/FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo- Mapas e Relatório, 1997.

SOUZA, A. A.; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R. Análise fisiográfica e morfoestrutural no reconhecimento de padrões de solos no Município de Porto Velho - RO. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6981-6985. CD-ROM, On-line. ISBN

978-85-17-00031-7. Disponível em:

<<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.23.59>>. Acesso em: 22 fev. 2011.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v.63, p.1117– 1142, 1952.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. F.; ITURBE, I.R. On extraction of channel networks from digital elevation data. **Hidrological Processes**. v.5, n. , p. 81-100,1991.

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

TARBOTON, D. G.; AMES, D. P. Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data. In : WORLD WATER AND ENVIRONMENTAL RESOURCES CONGRESS, 2001, Orlando, Florida. **Proceedings...** Orlando: ASCE, 2001.

TEMME, A.J.A.M.; SCHOORL, J.M.; VELDKAMP, A. Algorithm for Dealing with Depressions in Dynamic Landscape Evolution Models. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. , p. 452-461, 2006.

TEODORO, V.L.I; TEIXEIRA, D. COSTA, D. J. L; FULLER, B.B. O conceito de Bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **UNIARA**, n.20, p.136-156, 2007. Disponível em: <[http://www.uniara.com.br/revistauniara/pdf/20/RevUniara20\\_11.pdf](http://www.uniara.com.br/revistauniara/pdf/20/RevUniara20_11.pdf)> Acesso em: 12 fev. 2010.

THOMMERET, N; BAILLY; J.S, PUECH, C. Extraction of thalweg networks from DTMs: application to badlands. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.14, n. 8, p. 1527-1536, 2010. Disponível em: <<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/1527/2010/hess-14-1527-2010.pdf>> Acesso em: 05 abr. 2010.

TONELLO, K.C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhões, MG**. 2005. f. 85. Tese (Doutorado em Ciências Florestal) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2005. Disponível em: <[http://cediap.ourinhos.unesp.br/material/analise\\_hidroambiental\\_em\\_microbacias.pdf](http://cediap.ourinhos.unesp.br/material/analise_hidroambiental_em_microbacias.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2011.

TRIBE, A. Towards the automated recognition of landforms (valley heads) from digital elevation models. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HANDLING, 4., 1990, Zurich, Switzerland. **Proceedings...**, Zurich, Switzerland, 1990, p.45-52.

TUCKER, G. E.; CATANI, F.; RINALDO, A.; BRAS, R. L. Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. **Geomorphology**. v. 36, n. 3/4 , p. 187-202, 2001.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA. DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO. GRUPO DE RECURSOS HIDRICOS. **Bacia hidrográfica**. Cap. 2. (20 --). Disponível em:

[http://www.geografia.ufmt.br/download/graduacao/hidro/3baciahidrografica\\_bahia.pdf](http://www.geografia.ufmt.br/download/graduacao/hidro/3baciahidrografica_bahia.pdf)

Acesso em: 24 mar. 2010.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS)/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) - "Finished"**. 2009. Disponível em: <

[http://eros.usgs.gov/#/Find\\_Data/Products\\_and\\_Data\\_Available/SRTM](http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/SRTM)>. Acesso em:

13 jun. 2010.

VALERIANO, M. M. **Topodata**: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p. (INPE-15318-RPE/818). Disponível em:

<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24>>. Acesso em: 23 nov. 2009

VALERIANO, M.M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. **Topodata**: processamento dos dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2010. 79 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.42-RPQ). Disponível em:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37FCH9B>>. Acesso em: 14 dez. 2010.

VALERIANO, M.M.; ROSSETTI, D. F. **Topodata**: seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2010. 74 p. (INPE-16701-RPQ/853). Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.35>>. Acesso em: 14 out. 2010.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. 1 ed. São Paulo: McGRAWHill do Brasil, 1975. 245p.

WALLIS, C.; WALLACE, R.; TARBOTON, D.G.; WATSON D.W.; SCHREUDERS K.A.T; TESFA, T.K. Hydrologic Terrain Processing Using Parallel Computing. In: WORLD IMACS CONGRESS AND MODSIM09 INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION, 18., 13-17 jul. 2009, Cairns, Australia. **Proceedings...** Cairns: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation, 2009. p. 2540-2545. ISBN: 978-0-9758400-7-8 Disponível em:

<<http://www.mssanz.org.au/modsim09/F13/wallis.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2010.

WILSON, J.P.; AGGETT, G.; DENG, Y.; LAM, C. S. Water in the Landscape: A Review of Contemporary Flow Routing Algorithms. In: ZHOU, Q.; LEES, B.; TANG, G. **Advances in digital terrain analysis**. Berlin: Springer-Berlag, 2008. p. 472. ISBN: 978-3-540-77799-1 e-ISBN: 978-3-540-77800-4.

WILSON, J. P.; GALLANT, J.C. Digital terrain analysis In: \_\_\_\_\_. **Terrain analysis: principles and applications**. New York: John Wiley and Sons, 2000. p. 1–28. ISBN 0-471-32188-5.

WOOD, J. Overview of Software Packages Used in Geomorphometry. In: Developments in Soil Science- Volume 33: GEOMORPHOMETRY Concepts, Software, Applications. 1 Ed. Hungary: A.E. Hartemink and A.B. McBratney, 2009, p.796.

XU, X.; DAFANG, Z. Automated Extraction of Drainages in China Based on DEM in GIS Environment In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS 2003), 2003, Toulouse. **Proceedings...** Toulouse, France : IEEE, 2003. (IEEE Cat. No.03CH37477).

YAN, W.; HONG, P.; PENG, C.; WANSHUN, Z.; FEI, Q.; CAI'ER, C.  
A new treatment of depression for drainage network extraction based on DEM.  
**Journal of Mountain Science** , v.6, n. 4, p.311-319, 2009.