



Número: 100/2009
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
ANÁLISE AMBIENTAL E DINÂMICA TERRITORIAL

NILTON DE JESUS

**AVALIAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO ASTER PARA
ANÁLISE MORFOMÉTRICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Tese apresentada ao Instituto de Geociências como
parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor
em Ciências, Análise Ambiental e Dinâmica Territorial.

Orientador: Prof. Dr. Marcos César Ferreira

CAMPINAS - SÃO PAULO

Agosto / 2009

**Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca
do Instituto de Geociências/UNICAMP**

J499a Jesus, Nilton de.
Avaliação do modelo digital de elevação ASTER para análise
morfométrica de bacias hidrográficas / Nilton de Jesus--
Campinas,SP.: [s.n.], 2009.

Orientador: Marcos César Ferreira.
Tese (doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de
Geociências.

1. Bacias hidrográficas. 2. Processamento digital de imagens –
Técnicas digitais. 3. Morfometria. I. Ferreira, Marcos César. II.
Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III.
Título.

Título em inglês Evaluation of ASTER digital elevation model for morphometric analysis of
drainage basins;

- Drainage basin;
- Digital image processing;
- Morphometry.

Área de concentração: Análise Ambiental e Dinâmica Territorial

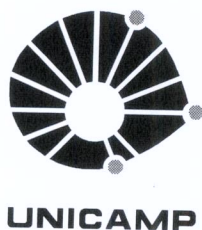
Titulação: Doutor em Ciências.

Banca examinadora: - Marcos Cesar Ferreira;

- Ailton Luchiari;
- Alfredo Pereira de Queiroz Filho;
- Lindon Fonseca Matias;
- Reinaldo Paulo Perez Machado.

Data da defesa: 18/08/2009

Programa de Pós-graduação em Geografia.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM
GEOGRAFIA

AUTOR: Nilton de Jesus

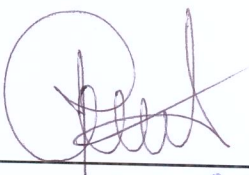
“Avaliação do MDE ASTER para Análise Morfométrica de Bacias Hidrográficas”.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcos César Ferreira

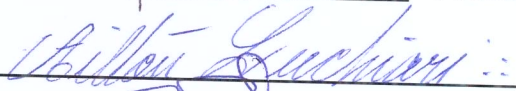
Aprovada em: 18 / 08 / 2009

EXAMINADORES:

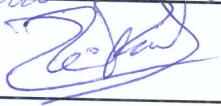
Prof. Dr. Marcos César Ferreira


_____- Presidente

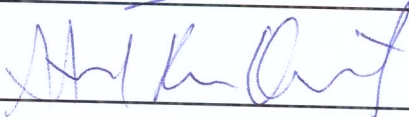
Prof. Dr. Ailton Luchiari



Prof. Dr. Reinaldo Paul Pérez Machado



Prof. Dr. Alfredo Pereira de Queiroz Filho



Prof. Dr. Lindon Fonseca Matias



Campinas, 18 de agosto de 2009.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcos César Ferreira por sua eficiente orientação no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Ailton Luchiari pelo incentivo e apoio na elaboração desta pesquisa.

Aos Professores Dr. Lindon Fonseca Matias e Dr. Ailton Luchiari por suas contribuições apresentadas no exame de qualificação.

Aos Professores Dr. Alfredo Pereira de Queiroz Filho e Dr. Reinaldo Paulo Perez Machado por suas contribuições apresentadas no exame de defesa de Tese.

Ao Prof. Dr. Archimedes Perez Filho por sua contribuição quando da apresentação do projeto de pesquisa na disciplina seminários.

Ao curso de Pós-Graduação em Geociências pela oportunidade e apoio oferecidos e a Valdirene e Ednalva da SPG pela atenção dispensada.

Ao curso de Pós-Graduação em Geociências pela concessão do uso de seu laboratório de geoprocessamento.

Ao Prof. Dr. David G. Tarboton (*Utah State University, USA*) pela permissão à consulta de material bibliográfico e concessão do *software* livre *TauDEM*.

Ao JPL/LPDAAC (*Land Processes Distributed Active Archive Center*) pelo pronto atendimento e concessão da imagem orbital do sensor ASTER.

Ao Prof. Dr. Ricardo Iannace pela revisão textual e pela amizade e apoio durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À geógrafa Ms. Adriana Domingues Gomes pelo auxílio na correção dos textos e pela companhia sempre presente.

À ecóloga Dra. Nilda de Jesus pela correção e sugestões no desenrolar da pesquisa e pelo convívio sempre motivado pelas discussões ambientais na esperança de um mundo melhor.

Aos meus familiares e a todos, aqui não mencionados, que contribuíram de forma direta ou indireta, com seu apoio e amizade durante esta pesquisa.

SUMÁRIO

ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
LISTA DE SIGLAS.....	xv
ANEXOS.....	xvii
RESUMO.....	xix
ABSTRACT.....	xxi
INTRODUÇÃO.....	01
II - OBJETIVOS.....	05
III – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	07
IV – MATERIAL E MÉTODOS.....	65
V – RESULTADOS OBTIDOS.....	99
VI - BIBLIOGRAFIA	135

ÍNDICE

I - INTRODUÇÃO	01
II - OBJETIVOS	05
2.1.- OBJETIVO GERAL	05
2.2.- OBJETIVOS ESPECIFICOS	05
III - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	07
3.1.- MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)	07
3.1.1.- Fonte de dados para elaboração de MDEs.....	09
3.1.2.- Interpolação de Modelos Digitais de Elevação (MDEs)	12
3.1.3.- Sensores orbitais que permitem a produção do MDE.....	15
3.2.- O SENSOR ASTER A BORDO DO EOS-TERRA (AM-1)	17
3.2.1.- MDE a partir de imagens do sensor ASTER.....	22
3.2.2.- Acurácia e a escala do MDE do sensor ASTER... ..	24
3.3.- EXTRAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM A PARTIR DO MDE	32
3.3.1.- Conceitos, aplicações e estrutura de dados	32
3.3.2.- A extração da rede de drenagem.....	38
3.3.3.- Remoção das depressões	46
3.3.4.- <i>Threshold</i> de área para formação de canais	49
3.3.5.- Definição de hierarquia fluvial e sub-bacias.....	58
3.4.- PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS ..	60
IV - MATERIAL E MÉTODOS	65
4.1.- MATERIAL	65
4.1.1.- Material bibliográfico e cartográfico	66
4.1.2.- Material de apoio computacional	66
4.1.3.- Área de estudo: bacia do Reservatório Atibainha	69
4.2.- MÉTODOS.....	74
4.3.- PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	77
4.3.1.- Seleção da imagem orbital ASTER.....	77
4.3.2.- Instalação do SIG <i>MapWindow</i> e do <i>TauDEM</i>	79
4.3.3.- Entrada de dados e recorte da área de estudo	80
4.3.4.- Extração da rede de drenagem e de bacias hidrográficas	81
4.3.5.- Obtenção dos parâmetros morfométricos	95
4.3.6.- Análise dos dados por regressão e correlação linear simples	96
V - RESULTADOS OBTIDOS	99
5.1.- CONSIDERAÇÕES SOBRE O MDE ASTER	99
5.2.- A REDE DE DRENAGEM DA BACIA DO RESERVATÓRIO ATIBAINHA ..	102
5.3.- SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS	107
5.4.- ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS ..	110
5.5.- CONSIDERAÇÕES FINAIS	130
VI – BIBLIOGRAFIA	135
6.1.- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135
6.2.- BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Deslocamento de paralaxe de um poste.....	10
Figura 3.2 - Retirada de medidas em fotografias aéreas	11
Figura 3.3 - Geometria de aquisição das imagens ASTER/VNIR.....	20
Figura 3.4 - Diferença de paralaxe do sensor ASTER/VNIR.....	23
Figura 3.5 - Acurácia horizontal do MDE por sistemas de produção.....	29
Figura 3.6 - Acurácia vertical do MDE por sistemas de produção	29
Figura 3.7 - Origens e aplicações da Geomorfometria.....	33
Figura 3.8 – Identificação de áreas côncavas	39
Figura 3.9 – Direção de fluxo à jusante para pixel vizinho	40
Figura 3.10 – Vetores LDD (Local Drain Directions) fluxo à jusante	40
Figura 3.11 – A / B / C / D Representação do fluxo acumulado	42
Figura 3.12 – Fluxo de direção do algoritmo Dinf.....	45
Figura 3.13 – Forma e processos atuantes das encostas	51
Figura 3.14 – Área de contribuição por unidade de contorno	54
Figura 3.15a – Rede de conexão <i>raster</i>	59
Figura 3.15b – Rede de conexão vetorial	59
Figura 4.1 – Mapa Físico e de localização da área de estudo	70
Figura 4.2 – Mapa Geológico da bacia do reservatório Atibainha	71
Figura 4.3 – Mapa Pedológico da bacia do reservatório Atibainha	72
Figura 4.4 (a-m) – Imagens do Sensor ASTER (<i>quick look</i>)	78
Figura 4.5 – Recorte da área de estudo	80
Figura 4.6 – Remoção das depressões.....	81
Figura 4.7 – Direção do fluxo D8.....	82
Figura 4.8 – Grade da direção de fluxo D8	83
Figura 4.9 – Grade da declividade D8.....	83
Figura 4.10 – Grade da direção de fluxo Dinf.....	84
Figura 4.11 – Grade de declividade Dinf	85
Figura 4.12 – Rede de conexão da direção de fluxo D8	85
Figura 4.13 – Cálculo da área de contribuição	86
Figura 4.14 – <i>Threshold</i> de área para formação do canal.....	86
Figura 4.15 – Grade da área de contribuição D8	87
Figura 4.16 – Grade da área de contribuição do Dinf.....	88
Figura 4.17 – Grade dos comprimentos dos canais	89
Figura 4.18 – Delineação da rede de drenagem	90
Figura 4.19 – Seleção das saídas de sub-bacias hidrográficas	91
Figura 4.20 – Rede de drenagem para 85 sub-bacias	92
Figura 4.21 – Análise da constante de Drop	93
Figura 4.22 – Rede de drenagem da bacia do reservatório Atibainha	93
Figura 4.23 – Hierarquia dos canais fluviais (<i>Strahler</i>).....	94
Figura 4.24 – Limite de sub-bacia hidrográfica.....	95
Figura 5.1 – Composição colorida sensor ASTER	100
Figura 5.2 – Modelo Digital de Elevação (área de estudo)	101
Figura 5.3 – Rede hidrográfica da bacia do reservatório Atibainha (ASTER)	103
Figura 5.4 – Rede hidrográfica da bacia do reservatório Atibainha (carta topogr.) .	104

Figura 5.5 – Sobreposição das redes hidrográficas (ASTER e carta topográfica)	106
Figura 5.6 – Sub-bacias hidrográficas do reservatório Atibainha	108
Figura 5.7 – Gráfico de Regressão da F_1 para <i>Threshold 5</i>	115
Figura 5.8 – Gráfico da Regressão da F_1 para <i>Threshold 8</i>	115
Figura 5.9 – Gráfico da Regressão da F_1 para <i>Threshold 11</i>	116
Figura 5.10 – Mapa classificado do Fator Topográfico	118
Figura 5.11 – Sub-bacia 79 (<i>Threshold 5</i>)	119
Figura 5.12 - Sub-bacia 91 (<i>Threshold 5</i>)	120
Figura 5.13 - Sub-bacia 82 (<i>Threshold 5</i>)	121
Figura 5.14 - Sub-bacia 43 (<i>Threshold 5</i>)	122
Figura 5.15 - Sub-bacia 22 (<i>Threshold 5</i>)	123
Figura 5.16 – Gráfico de regressão do lc	125
Figura 5.17 – Gráfico de regressão da Dm	125
Figura 5.18 – Gráfico de regressão do F_t	126
Figura 5.19 – Gráfico de regressão da F_1 adotando o mapa F_t	127

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características orbitais do satélite TERRA	17
Tabela 3.2 – Características do Sensor ASTER	19
Tabela 3.3 – Níveis de processamento do EOS TERRA	21
Tabela 3.4 – Produtos padrão do sensor ASTER	25
Tabela 3.5 - Equivalente acurácia RMSE para escala do mapa.....	25
Tabela 3.6 - Resolução do MDE e erro de Declividade de 5°.....	26
Tabela 5.1 – Parâmetros morfométricos	111/113
Tabela 5.2 – Testes de normalidade	114
Tabela 5.3 - Parâmetros morfométricos sub-bacia 79.....	119
Tabela 5.4 – Parâmetros morfométricos sub-bacia 91	120
Tabela 5.5 – Parâmetros morfométricos sub-bacia 82.....	121
Tabela 5.6 – Parâmetros morfométricos sub-bacia 43.....	122
Tabela 5.7 – Parâmetros morfométricos sub-bacia 22.....	123
Tabela 5.8 – <i>Threshold</i> de área por classe do mapa do Ft.....	127
Tabela 5.9 – Classes do mapa do Ft com Dm e amplitude altimétrica.....	129

LISTA DE SIGLAS

A	Área
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
D8	Algoritmo de 8 direções possíveis
Dinf	Algoritmo de infinitas direções entre 0° e 360°
Dd	Densidade de drenagem
EOS	Earth Observing System (sistema de gestão do satélite Terra)
Dm	Declividade média
ERSDAC	Earth Remote Sensing Data Analysis Center (distribuição imagem Japão)
F ₁	Frequência de canais de primeira ordem
Ft	Fator topográfico
GDS	Ground Data System (distribuição imagem no Japão)
GPS	Global Position Systems
Ic	Índice de circularidade
LPDAAC	Land Processes Distributed Active Archive Center (distrib. imagem EUA)
MDE	Modelo digital de elevação
Rh	Taxa de relevo
Sb(s)	Sub-bacia(s)
SIG	Sistema de informação geográfica
Silcast	Software do sistema SILC
SR	Sensoriamento remoto
VNIR	Very Near Infra Red
TauDEM	Software livre: Terrain Analysis Using Digital Elevation Models
Terra-AM1	Satélite orbital
Threshold	Limiar de área para produção de um canal de drenagem

ANEXOS

Anexo 1 – United States National Map Accuracy Standards (Extracted from Bureau of the Budget, 1947)	149/150
Anexo 2 – Definition Of Root Mean Square Error With Respect To Cartography....	151
Anexo 3 – ASPRS Accuracy Standards For Large-Scale Maps.....	152/153
Anexo 4 –	154



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
ANÁLISE AMBIENTAL E DINÂMICA TERRITORIAL**

**Avaliação do modelo digital de elevação ASTER para análise morfométrica
de bacias hidrográficas**

RESUMO

Tese de Doutorado

Nilton de Jesus

Nos últimos anos, as aplicações da tecnologia SIG têm contribuído às pesquisas geomorfológicas com uma série de novas possibilidades para quantificação das formas de relevo. Ênfase particular tem sido dada à extração de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas, a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE). As aplicações da tecnologia SIG vêm se tornando importante ferramenta para modelagem de processos geomorfodinâmicos, a partir destes parâmetros quantitativos. Neste contexto, a presente pesquisa tem como objetivo apresentar um procedimento para extração da rede de drenagem e dos divisores de bacias hidrográficas, de modo automatizado, a partir do modelo digital de elevação de imagens estereoscópicas do sensor óptico orbital ASTER. Com estes resultados foi calculado parâmetros morfométricos para comparar com parâmetros morfométricos calculados de forma analógica a partir de cartas topográficas do IBGE na escala de 1:50.000. A metodologia utiliza trabalhos no campo da geomorfometria com destaque para a adoção do algoritmo *Dinf* na definição da rede e de bacias hidrográficas apoiado pelo SIG *MapWindow* versão 4.4 com *plug-in TauDEM* (*software* livre) e pelo SIG *Idrisi 32* no cálculo e comparação dos parâmetros morfométricos. Os resultados mostraram que é possível a extração da rede de drenagem e das bacias hidrográficas a partir dos dados do MDE ASTER sem a perda da qualidade para os parâmetros morfométricos tais como, o *Índice de Circularidade*, *Declividade Média*, *Frequência de Canais de Primeira Ordem* e *Fator Topográfico*.



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
ANÁLISE AMBIENTAL E DINÂMICA TERRITORIAL**

**Avaliação do modelo digital de elevação ASTER para análise morfométrica
de bacias hidrográficas**

ABSTRACT

Tese de Doutorado

Nilton de Jesus

In the last years, the applications of the Geographical Information System (GIS) technology have been contributing for the geomorphologic researches bringing several new possibilities for quantification landform surface. A particular emphasis has been to the extraction morphometric parameters in watershed supported by Digital Elevation Models (DEM). The applications of the technologies GIS are becoming an important tool for modelling geomorphodynamics processes, based on quantified parameters. In this context, the research focus on the extraction of automated drainage networks and watersheds with DEM from stereoscopic images of the optical sensor orbital ASTER, in order to compare and calculate morphometric parameters with DEM from topographic maps of IBGE, in scale of 1:50.000. This method is based in the field of the geomorphometric with prominence for the adoption of the algorithm Dinf in the determination of drainage network and watershed by GIS *MapWindow* version 4.4 and *plug-in TauDEM* (free software) and by GIS *Idrisi 32* in the calculation and comparison of the morphometric parameters. It was verified that ASTER DEM extraction morphometric is possible without losing quality for the morphometric parameters as the *Circularity Ratio*, *Medium Slope for watershed*, *Frequency of First Order Stream* and *Topography Factor*.

I – INTRODUÇÃO

Atualmente as pressões antrópicas sobre os recursos naturais desencadeiam processos que desequilibram estes ambientes, gerando a necessidade de diagnósticos e prognósticos que orientem um planejamento que minimize impactos ambientais. No caso dos recursos hídricos, é imprescindível uma exploração racional, o que requer um planejamento consistente que priorize tanto a qualidade como a quantidade da água, visando atender as demandas de consumo humano, agrícola, industrial e de fornecimento de energia.

Nesse sentido, para um planejamento ambiental adequado, a bacia hidrográfica constitui-se em objeto de análise por ser um importante sistema de interrelações entre elementos antrópicos e físicos, devido à rede de drenagem, feições topográficas e cobertura vegetal, quaisquer alterações no comportamento desses elementos podem ser diagnosticadas e mapeadas através de técnicas modernas aplicadas em Sensoriamento Remoto (SR) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Muitos estudos realizados no âmbito de bacias hidrográficas voltados para a questão ambiental indicam que fatores físicos como a litologia, os solos e a cobertura vegetal exercem controle decisivo no potencial hidrológico e no comportamento morfogenético, definindo características espaciais específicas para uma dada área. O avanço da tecnologia do geoprocessamento nas últimas décadas vem promovendo alterações significativas na forma de obtenção e tratamento de dados espaciais, podendo ou não ser transformados em informação capaz de gerir espaços geográficos.

A dúvida repousa na capacidade do *peopleware* (usuários) em selecionar, manipular e correlacionar estes dados na busca de produtos confiáveis e aceitáveis para fornecer suporte ao planejamento. A facilidade e infinidade de dados podem confundir o pesquisador na obtenção dos resultados, requerendo deste uma base conceitual e metodológica profícua. Muitos estudiosos do geoprocessamento consideram a qualificação do *peopleware*, associada ao desenvolvimento de métodos e de procedimentos como os componentes mais suscetíveis dessa tecnologia na atualidade.

Um dos modos de superar tal vulnerabilidade é revalidando metodologias já consagradas; para isso, conta-se com a inserção destes novos dados no ambiente dos Sistemas de Informação Geográfica. Deste modo, testam-se métodos e propõem-se novos procedimentos, assegurando-se, sempre, da eficácia e da confiabilidade dos resultados obtidos.

Em face desse contexto, apresenta-se como hipótese desta pesquisa, a possibilidade da determinação de parâmetros morfométricos em bacias hidrográficas, utilizando como base de dados, o Modelo Digital de Elevação (MDE) oriundo de imagens estereoscópicas do sensor orbital ASTER para utilização em escala de 1:50.000. Para certificar-se da acurácia dos mesmos foi estabelecido uma análise estatística comparativa com parâmetros morfométricos advindos de cartas topográficas na escala de 1:50.000.

O ASTER dispõe de imagens estereoscópicas com resolução espacial de até 15m, o que possibilita a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) de modo rápido, com baixo custo e boa acurácia. Além de permitir os usos mais convencionais, como a identificação de feições da cobertura vegetal.

A pesquisa, então, num primeiro momento, obteve a delineação da rede de drenagem e de suas sub-bacias de modo automatizado, tendo como base de dados, o MDE do sensor ASTER, empregou-se o *software* livre de modelagem da superfície do terreno — *TauDEM* (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models) — produzido por David Tarboton (2004) da *Utah State University* que trabalha acoplado ao SIG *MapWindow*, também um *software* livre.

A partir dessa rede drenagem e dos limites das sub-bacias hidrográficas foi possível a obtenção dos seguintes parâmetros morfométricos: Frequência de canais de primeira ordem (F_1), Índice de circularidade (I_c), Declividade média (D_m) e o Fator Topográfico (F_t). Após a obtenção desses parâmetros morfométricos por sub-bacias hidrográficas esses foram comparados por análise de regressão linear simples aos parâmetros morfométricos extraídos de cartas topográficas na escala de 1: 50.000.

Esta proposta se justifica pela capacidade dos conjuntos *hardware-software* disponíveis atualmente. Além de suportarem enorme quantidade de dados provenientes

de imagens de satélite de média e alta resolução com aplicações diversas na gestão dos espaços geográficos, no caso de imagens estereoscópicas, a geração de MDEs com todos os produtos derivados em forma de mapas, gráficos e tabelas possibilitando uma análise morfométrica profícua.

Os equipamentos atuais permitem o armazenamento e a correlação de um volume de dados muito expressivo, e os *softwares*, representados aqui pelos SIGs, possuem ferramentas das mais variadas, desde processamento de imagens até análise estatística e geográfica. Quando esses são insuficientes, os SIGs permitem a inserção de pacotes de programação externos, aumentando muito a capacidade de produção da informação digital espacial, e não espacial, em áreas mais específicas das geociências, como, por exemplo, na hidrologia e na geomorfologia.

A modelagem da superfície do terreno se configura como uma metodologia moderna para rápida e acurada extração de dados espaciais que podem ser utilizados na elaboração de diversos mapeamentos (topográficos, hidrológicos, geomorfológicos, ambientais etc.), facilitando significativamente o planejamento estratégico.

Outra consideração importante é a possibilidade de obtenção rápida de dados em grandes e médias escalas para áreas sem mapeamento topográfico adequado, obtendo assim, um maior grau de acurácia. Estes procedimentos podem contribuir para uma análise espacial mais consistente, reduzindo o grau de subjetividade, a morosidade e o custo operacional do processo.

II - OBJETIVOS

2.1 – OBJETIVO GERAL

Obtenção de parâmetros morfométricos extraídos por sub-bacias hidrográficas, tendo como base de dados o Modelo Digital de Elevação (MDE) oriundo de imagens orbitais estereoscópicas do sensor ASTER, visando apoiar pesquisas e gestão dos espaços geográficos: um exemplo aplicado na bacia do reservatório Atibainha (Sistema Cantareira) — Estado de São Paulo.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Extração da rede hidrográfica e de suas sub-bacias hidrográficas com o *software TauDEM*, considerando o limiar de área (*threshold*) e a resolução espacial MDE do sensor ASTER.
- Obtenção de parâmetros morfométricos de sub-bacias hidrográficas, mais especificamente, Frequência de canais de primeira ordem (F_1), Índice de circularidade (I_c), Declividade média (D_m) e o Fator Topográfico (F_t).
- Validação estatística por meio da análise de regressão linear simples entre parâmetros morfométricos obtidos de MDEs de imagens estereoscópicas do sensor ASTER e de cartas topográficas na escala de 1:50.000.
- Avaliação dos resultados obtidos com recomendações visando apoiar futuras pesquisas que utilizam o MDE como base de dados para análise morfométrica.

III – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)

O avanço da informática vem transformando diversas áreas técnicas; a topografia, base de suporte para a Cartografia, que, por sua vez, sustenta as análises espaciais atuais, recebeu esta influência, desde a obtenção de dados em campo até a conclusão de um mapa final.

O volume de cálculos envolvidos nos levantamentos topográficos é muito elevado. Em um primeiro momento, estes cálculos foram auxiliados pelas calculadoras mecânicas, posteriormente entraram em cena as calculadoras eletrônicas com funções trigonométricas, sendo estas recebidas com entusiasmo pelos usuários (CINTRA, 1990).

Na década de 50 foi desenvolvido pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) um dos primeiros programas de cálculo para estradas e topografia, o COGO (*Coordinate Geometry*), que obteve grande destaque na época; com diversas atualizações posteriores, foi considerado um importante instrumento no tocante à facilidade do ajuste de coordenadas, de soluções geométricas e de traçado de curvas de nível (CINTRA, 1990).

É nesse contexto, por intermédio de trabalhos publicados a partir de 1957 pelo professor Charles I. Miller do MIT (Miller, 1957 e Miller e Lafflame, 1958a e 1958b), que surge pela primeira vez a expressão e o conceito de Modelo Digital de Terreno (MDT) (CINTRA, 1990; TEIXEIRA *et al.*, 1992).

Apesar desses avanços, nessa fase, o computador foi utilizado como uma poderosa, mas simples máquina de calcular. No entanto, com a disponibilidade do equipamento e com a confiabilidade apresentada, ampliou-se rapidamente sua utilização para a solução dos problemas da topografia, diminuindo o impacto dos levantamentos para relevos acidentados, áreas urbanas e grandes loteamentos. Esse

conjunto de dados poderia então ser gerenciado pelo computador, aliado ao desenvolvimento de um novo conceito, o de Banco de Dados (CINTRA, 1990).

Paralelamente a esse avanço, desenvolveu-se a técnica da computação gráfica que, aliada aos dispositivos de saída “*plotters*”, substituiu, em certa medida, o trabalho do desenhista — isso porque ainda se dependia deste profissional para o traçado subjetivo das curvas de nível. Também não se alteraram os métodos de cálculos que envolviam a altimetria, volume, perfis, traçado de estradas, dutos, redes de eletrificação etc. Essas dificuldades somente foram superadas com a integração do computador ao projeto e ao trabalho do projetista, facilitando suas possibilidades de criação com técnicas acuradas (CINTRA, 1990).

Deste modo, a inserção da computação gráfica evoluiu, aperfeiçoando os sistemas do tipo AM/FM (*Automated Mapping/Facilities Management*) e, especificamente, os CAD (*Computer Aided Design*), cujos produtos vetoriais (arquivos *dxf*) podiam ser anexados aos bancos de dados espaciais dos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs). Estes sistemas são constituídos por programas e processos de análise espacial cuja característica principal é determinar o relacionamento de fenômenos da realidade com sua localização espacial (CINTRA, 1990; DANGERMOND, 1992; TEIXEIRA *et al.*, 1992).

Nessa fase, o objetivo é ir diretamente às fontes, ou seja, representar o relevo no computador, utilizando-se do Modelo Digital de Terreno que passa a ser ferramenta indispensável no trabalho dos topógrafos, cartógrafos e atualmente incorporado às metodologias de análise em diversas áreas das geociências.

Burrough (1986) argumenta que o termo DEM do inglês *Digital Elevation Model* para nos Modelo Digital de Elevação (MDE) é preferencialmente utilizado para uma representação digital de uma variação contínua do relevo sobre o espaço (elevação), sendo que o termo DTM, do inglês *Digital Terrain Model*, ou seja, Modelo Digital de Terreno (MDT), em função da palavra terreno, implica em outros atributos da paisagem que não somente a elevação. Neste trabalho adotou-se o termo MDE conhecido na literatura internacional como DEM para especificamente designar um valor de elevação do terreno.

3.1.1 Fonte de Dados para elaboração de MDEs

A construção de MDEs necessita de dados espaciais de elevação que podem ser extraídos de levantamentos topográficos, de levantamentos a partir de GPS (*Global Position Systems*), de restituição fotogramétrica, adquiridas por meio de mapas existentes e, mais recentemente de pares estereoscópicos de imagens orbitais.

Os levantamentos topográficos baseiam-se em medições lineares e angulares da superfície do terreno e de cálculos trigonométricos para medidas inferidas a partir das medidas conhecidas para a determinação das coordenadas (x , y). Já para as medidas de altitude (z) são utilizados basicamente métodos de nivelamento barométrico, o qual se fundamenta na diferença de pressão atmosférica entre dois pontos (CAMPOS, 1994).

O “*Global Position System*” é fruto da fusão de dois projetos norte- americanos, o TIMATION (*Time Navigation*) da Marinha e o 621B da Força Aérea, projetados para obter as coordenadas de um ponto sobre um modelo tridimensional da realidade. São necessários no mínimo quatro satélites para a obtenção das coordenadas de um ponto. As medidas são obtidas por diferenças de tempo no percurso do sinal entre o satélite e o receptor multiplicado pela velocidade da luz (ANDRADE e BLITZKOW, 1990).

Os instrumentos topográficos modernos aliados ao computador e a uma grande variedade de *softwares* possuem alta precisão e alta capacidade de transferência de dados. Desse modo, permitem maior acurácia nos sistemas de medições e nas suas aplicações, desde os trabalhos de campo até a finalização do produto em laboratório.

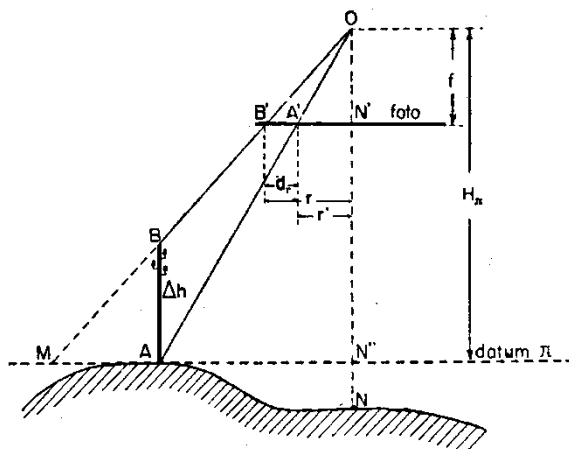
De acordo com Garcia e Piedade (1984), um dos ramos da Topografia é a Fotogrametria, que permite avaliações tanto por intermédio de Fotogrametria terrestre como por meio de Aerofotogrametria, configura-se atualmente como o principal método para representar a área e a forma do terreno, especialmente em se tratando de grandes extensões.

A Fotogrametria tem por finalidade determinar as dimensões de um dado objeto por meio de fotografias, o que permite a obtenção de mapas topográficos e geográficos. Nesse conceito estão incluídos dois aspectos distintos da fotogrametria: o quantitativo ou geométrico, o qual engloba medições dimensionais precisas sobre os objetos

fotografados, e o qualitativo ou semântico, o qual engloba o reconhecimento e a interpretação dos objetos fotografados (MARCHETTI e GARCIA, 1984; OLIVEIRA, 1993; RICCI e PETRI, 1965).

Uma das grandes vantagens da fotografia aérea é a possibilidade de visão tridimensional ou estereoscópica. Essa visão é possível devido ao chamado efeito de paralaxe. Numa projeção ortogonal (carta topográfica), dois pontos do terreno com cotas altimétricas distintas que se encontram numa mesma linha vertical são representados por um único ponto. Geralmente em uma fotografia aérea esses pontos aparecem em duas posições distintas em função da projeção central (NOVO e PONZONI, 2001; RICCI e PETRI, 1965).

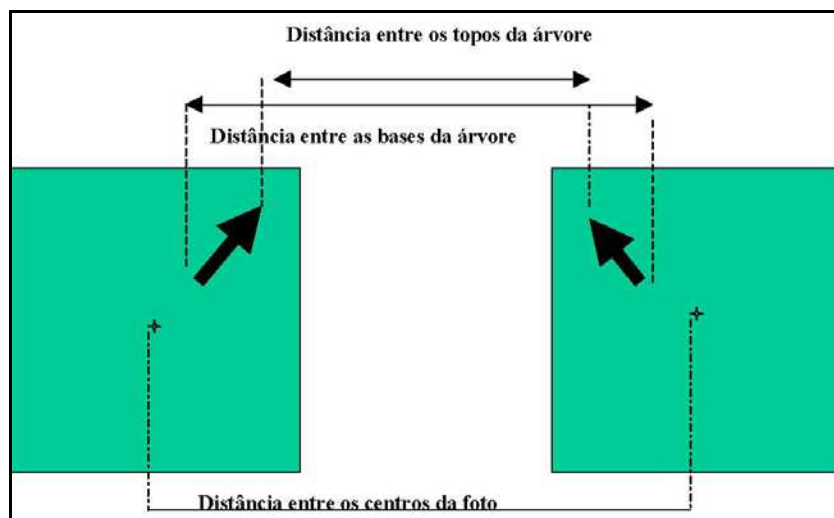
Esses deslocamentos são bem evidentes em fotos aéreas nas quais aparecem, em posição periférica, chaminés, altos edifícios, árvores, postes (Figura 3.1) e outras estruturas verticais que se apresentam inclinadas para fora a partir do nadir (ponto central da foto vertical) (RICCI e PETRI, 1965).



Fonte: Ricci e Petri (1965)

Figura 3.1 - Deslocamento de paralaxe de um poste

A propriedade de paralaxe do modelo estereoscópico permite a aquisição de medidas de altura a partir das fotografias aéreas (Figura 3.2).



Fonte: Novo e Ponzoni (INPE, 2001)

Figura 3.2 - Retirada de medidas em fotografias aéreas

Os levantamentos aerofotogramétricos podem gerar um modelo estereoscópico do terreno a partir de um par de fotografias aéreas adjacentes e recobertas com uma marca de referência que se desloca sobre o estéreo modelo nos eixos x , y e z . Deste modo, obtém-se uma fotometria, que possibilita todo tipo de medição e a construção de mapas para diversos propósitos em um processo que envolve diversos equipamentos eletrônicos (restituidores fotogramétricos) (CAMPOS, 1994; CINTRA, 1990).

Os restituidores fotogramétricos possibilitam realizar um levantamento através de uma malha regular gerada sobre o modelo estereoscópico, cabendo ao operador o posicionamento de pontos da malha sobre o modelo de terreno. Esse método facilita muito a elaboração de um MDE a partir de uma grade (CAMPOS, 1994; CINTRA, 1990).

Os avanços da eletrônica e da informática possibilitaram o surgimento da fotogrametria digital, que engloba tanto a aquisição quanto a análise de dados monitorada por uma estação de trabalho aliada aos algoritmos matemáticos. Este sistema se constitui em um restituidor digital que possibilita a geração automática de um MDE (CAMPOS, 1994; TEMBA, 2000).

No processo de aquisição de dados a partir de mapas existentes, pode-se destacar o método de digitalização com uso de uma mesa digitalizadora ou por meio de digitalização automática, utilizando-se de um *scanner*.

No primeiro caso, utiliza-se uma mesa digitalizadora acoplada a um computador com o apoio de um *software* específico (exemplo, *Auto Cad*). O método consiste em seguir as linhas das curvas de nível do mapa sobre a mesa digitalizadora com um cursor que, a cada acionamento do operador, registra um par de coordenadas (x, y) (CAMPOS, 1994; MENEGUETTE, 1998). Atualmente, vem-se utilizando a digitalização a partir da visualização do mapa em formato *raster*, na tela do computador, com o *mouse* substituindo a função do cursor.

No caso da digitalização automática ou semi-automática, faz-se necessário a utilização de um *scanner* com um sensor que ilumina e varre uma área do mapa em pequenas quadrículas denominadas *pixels*, cada *pixel* recebe um número digital proporcional à intensidade de luz refletida, resultando em uma imagem do mapa que pode ser em preto e branco ou colorido. A edição vetorial pode ser realizada no ambiente SIG ou CAD (*Cad overlay*) em um processo que transforma *pixels* em feições lineares (MENEGUETTE, 1998).

Segundo Burrough e McDonnell (1998), muitos esforços estão sendo realizados visando capturar automaticamente estas curvas de nível por meio de *scanners*, mesmo havendo argumentos contrários de que a digitalização de curvas de nível a partir de mapas existentes produza uma baixa qualidade dos MDEs do que medidas obtidas diretamente da fotogrametria.

3.1.2 Interpolação de Modelos Digitais de Elevação (MDEs)

MDEs podem ser modelados de vários modos em superfícies definidas por modelos matemáticos, por pontos ou, ainda, por isolinhas. Essas isolinhas podem representar curvas de nível de uma base topográfica além dos pontos cotados de topos e vales. Atualmente, os MDEs são modelados em Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) com o auxílio de algoritmos de análise por meio de duas estruturas de dados: grades regulares (*matrizes de altitude*) e redes irregulares triangulares (*TINs*). As duas formas são conversíveis e a preferência por uma ou por outra depende do tipo de análise de dados que precisa ser realizada (BURROUGH e McDONNELL, 1998; FELGUEIRAS, 2005).

Os modelos de superfícies definidos matematicamente empregam equações analíticas de uma função contínua de $z(x, y)$ que melhor se adapte aos pontos amostrados da superfície do terreno. O ideal seria uma equação que considerasse todos os pontos amostrados; no entanto, isto pode acarretar em gasto excessivo de tempo nos cálculos sem ganho efetivo de qualidade. O correto é uma seleção criteriosa dos pontos amostrados, evitando-se redundâncias ou escassez de informação. A vantagem desse método é que se pode estabelecer a cota de qualquer ponto ao longo de uma linha inferida (CINTRA, 1990; FELGUEIRAS, 2005).

A grade regular é uma representação matricial onde cada elemento da matriz está associado a um valor numérico. Para a geração da grade torna-se necessário estimar, através de interpoladores matemáticos, os valores para as células que não possuem medidas de elevação, a partir de medidas de elevação conhecidas da vizinhança (FELGUEIRAS, 2005).

Os procedimentos de interpolação para geração de grades regulares a partir de amostras variam de acordo com a grandeza medida. No caso da altimetria, é comum o uso de funções de ponderação por inverso do quadrado da distância. Já para variáveis geofísicas, procedimentos de filtragem bidimensional ou de geoestatística, como a *krigagem*, são mais empregados (FELGUEIRAS, 2005).

As grades regulares são consideradas a forma mais comum de se representar superfícies de elevação discretas. Originalmente são derivadas de medidas de fotografias aéreas estereoscópicas produzidas em *stereoplotters* analíticos. Em função da facilidade pela qual matrizes são operadas no computador, em particular, no caso de ambientes SIGs de base *raster*. O MDE no formato de grade regular tornou-se mais popular na Inglaterra, Austrália, Estados Unidos e vem sendo disponibilizado pela Internet em boa parte do mundo. Muitas informações da superfície podem ser derivadas da grade regular, como a declividade, perfis de encosta (convexa, côncava e plana), orientação de vertente, irradiância solar, divisores de águas, topologia da superfície etc. (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

A malha triangular ou TIN (do inglês *Triangular Irregular Network*) é uma estrutura do tipo vetorial com topologia do tipo *nó-arco* e representa uma superfície por

meio de um conjunto de faces triangulares interligadas. Para cada um dos três vértices da face do triângulo são armazenadas as coordenadas de localização (x , y) e o atributo z , com o valor de elevação. Nos SIGs em geral, os algoritmos para geração da grade triangular baseiam-se na triangulação de *Delaunay* com restrição de região. Quanto mais equiláteras forem as faces triangulares, maior a exatidão com que se descreve a superfície. O valor de elevação em qualquer ponto dentro da superfície pode ser estimado a partir das faces triangulares, utilizando-se interpoladores (FELGUEIRAS, 2005).

A Rede Irregular Triangular (TIN) foi projetada por Peucker e outros pesquisadores (Peucker *et al.*, 1978) para modelagem de elevação digital que evita as redundâncias da matriz de altitude; ao mesmo tempo, também se apresenta com maior eficiência para muitos tipos de processamento, tais como: a declividade obtida a partir de curvas de nível digitalizadas (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

Diferentemente das grades regulares, a TIN permite capturar informação extra em áreas de relevo complexo sem a necessidade de enormes quantidades de dados redundantes em setores de relevo simples. Assim, os dados podem ser capturados de cumes, linhas de canais e outras características topológicas importantes podendo ser digitalizados para obtenção de maior acurácia (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

O modelo mais comum é o conjunto de linhas provenientes de curvas de nível de mapas impressos. A digitalização destas curvas de nível disponibiliza uma fonte de dados acabada para o MDE. Infelizmente, a digitalização de curvas de nível não é totalmente satisfatória para o processamento de modelos de declividade ou orientação de vertentes. Faz-se necessária a conversão destas curvas para uma matriz de altitude (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

Frequentemente são obtidos resultados insatisfatórios quando se tenta criar o próprio MDE, digitalizando curvas de nível e usando funções de interpolação de curvas de nível digitalizadas para uma grade regular. O problema não é tanto com os métodos computacionais de interpolação por ponderação ou com a escolha da geometria dos algoritmos. O problema está em assumir aquelas linhas de curvas de nível como verdadeiras representações do terreno, erros de localização simplesmente são

causados por deformação do papel e deslocamento da mesa digitalizadora, por maior cuidado que se tome ao digitalizar uma linha de curva de nível com muitos pontos. Com isso, a interpolação de curvas de nível digitalizadas para uma grade regular pode resultar na criação de erros na superfície resultante (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

Apesar de digitalizadas com precisão, conjuntos de curvas de nível de mesma altitude (z), que voltam sobre si mesmas, apresentam inconsistências no processo de interpolação, pois nos setores de retorno da linha surgem terraços sem alteração da altitude. O problema é ainda maior em áreas de relevos baixos onde as curvas de nível estão muito distantes e o algoritmo de busca somente registra dados de uma única curva de nível. A melhor solução é estreitar os pontos das curvas de nível digitalizadas para o mínimo possível e inserir pontos de picos, cumes, fundos de vale e quebras de declive além de interpolar com um amplo quadro de busca que utiliza muitos dados de pontos. Esse processo é mais demorado, mas garante a qualidade do MDE (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

3.1.3 Sensores orbitais que permitem a produção do MDE.

De acordo com Cuartero, Felicísimo e Ariza (2004), técnicas fotogramétricas para a elaboração de MDEs são conhecidas há décadas, mas a possibilidade do uso de imagens orbitais para a confecção de MDE não é anterior ao lançamento da primeira série do satélite francês SPOT em 1986. Atualmente, além do SPOT, muitos outros sensores orbitais ópticos oferecem a possibilidade da estereoscopia, como o MOMS, IRS, KOMSAT, AVNIR, ASTER/TERRA e, mais recentemente, *scanners pushbroom* de alta resolução IKONOS (setembro, 1999), EROS-A1 (Dezembro 2000), QUICKBIRD-2 (Outubro 2001), SPOT 5 (Maio 2002), e ORBVIEW-3 (Junho 2003). Estudos demonstram a eficácia da geração de MDE com sensores de alta resolução IKONOS (LI *et al.*, 2000; TOUTIN, 2001), EROS A1 (CHEN e TEO, 2001), SPOT 5 (PETRIE, 2001).

Outros sistemas sensores ativos, como o RADAR (*Radio Detection and Ranging*), operam na faixa espectral de rádio ou microondas, especialmente os que

operam por radares de abertura sintética ou SAR (*Synthetic Aperture Radar*). O SAR é um dispositivo imageador em radiofrequência que fornece uma imagem bidimensional da realidade tridimensional. Esses sensores permitem o imageamento em condições adversas, sem iluminação solar penetrando nuvens, brumas, fumaças, chuvas (dependendo da frequência usada) e com penetrabilidade na copa vegetal, produzindo imagens com resolução espacial comparável aos sensores ópticos de alta resolução (PARADELLA *et al.*, 2001).

A análise do cenário de programas espaciais revela presença cada vez maior de missões com radares imageadores (SIRs, ERS-1, JERS-1, ERS-2, RADARSAT-1, RADARSAT-2, ENVISAT-ASAR, ALOS-PALSAR, TerraSAR e SRTM) (PARADELLA, 2005; TOUTIN e GRAY, 2000).

O Brasil tem experiência reconhecida em aplicações com radar na Amazônia (Programas RADAMBRASIL, SAREX 92, INTERA, SIR-C/X-SAR, ERS-1 e 2, JERS-1, RADARSAT-1). A Alemanha é referência mundial em tecnologia SAR (MRSE, SIR-C/X-SAR, E-SAR, X-SAR/SRTM, TerraSAR, SAR-LUPE) (PARADELLA, 2005).

O INPE, em colaboração de mais de 20 anos com a DLR (Agência Aeroespacial da Alemanha), vem desenvolvendo estudos a partir de 2001 para a construção de um satélite orbital com tecnologia SAR, o MAPSAR (*Multi-Application Purpose SAR*). Se esta viabilidade for confirmada, o MAPSAR passa a ser uma das opções mais consistente do Programa Espacial Brasileiro (PARADELLA, 2005). O programa é dividido em iguais proporções entre os dois países com a possibilidade de intercâmbio tecnológico com custo estimado em 100 milhões de euros, incluído o lançamento, previsto para 2013 (http://www.mundogeo.com.br/noticias-diarias.php?id_noticia=10761 acessado em 06/07/2009).

A obtenção dos MDEs a partir de imagens estereoscópicas será discutida com maior ênfase no capítulo seguinte, com destaque para o sensor estereoscópico óptico ASTER/TERRA, considerando que este sistema foi o escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa.

3.2 O SENSOR ASTER A BORDO DO EOS-TERRA (AM-1)

O ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) é um sensor multiespectral avançado cujo lançamento a bordo do satélite orbital Terra da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) data de dezembro de 1999 (ABRAMS e HOKK, 2002).

O EOS Terra (AM-1) é o primeiro de uma série de satélites orbitais multi-instrumento, formando o EOS (*Earth Observing System*) da NASA. Trata-se de um satélite de órbita polar com baixa inclinação para observações globais de longo prazo da superfície da terra, biosfera, geologia, atmosfera e oceanos. Configura-se como um sistema de informação de dados direcionado para a pesquisa denominada EOSDIS (*Earth Observing System Data and Information System*) (KING *et al.*, 2004).

Tabela 3.1 – Características orbitais do satélite TERRA.

CARACTERÍSTICAS ORBITAIS DO SATÉLITE TERRA	
Altitude	705 km no equador
Inclinação	$98,2^{\circ} \pm 0,15^{\circ}$
Revoluções por dia / Período	~14 / ~99 min
Período de revisita	16 dias
Cruzamento do equador	10h30 $\pm$ 15 min

Fonte: NASA (1999)

O ASTER é resultado de um esforço cooperativo entre a NASA e o METI (*Ministry of Economy Trade and Industry*) do Japão, da comunidade científica e de instituições privadas de ambos os países (ABRAMS e HOOK, 2002).

O sensor ASTER está em uma órbita sol-síncrona e cruza o equador aproximadamente às 10h30 (hora local). Pode adquirir dados do globo inteiro com um ciclo livre médio de 8% por órbita, portanto, 8 minutos de imageamento por órbita de 99 minutos do satélite EOS Terra (AM-1). Isto representa cerca de 650 cenas por dia que são processadas para o Nível 1A, sendo que, destas, 150 são processadas para o Nível-1B (ver Tabelas 3.1 e 3.3). Além do ASTER, outros instrumentos estão a bordo do

satélite Terra, como o MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*), o MISR (*Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer*), o CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) e o MOPITT (*Measurements of Pollution in the Troposphere*) (ABRAMS e HOOK, 2002).

O sensor ASTER é constituído de três subsistemas de telescópios distintos com 14 bandas espectrais, sendo três delas no VNIR (*Very Near Infra Red*), faixa espectral do visível e infravermelho próximo 0,52 a 0,86 μm com resolução espacial de 15m, seis delas no SWIR (*Short Wave Infra Red*), faixa espectral de infravermelho de ondas curtas 1.600 a 2.430 μm com resolução espacial de 30m e cinco no TIR (*Thermal Infra Red*), faixa espectral do infravermelho termal 8.125 a 11.65 μm com resolução espacial de 90m. Cada cena do ASTER cobre uma área de 60 x 60 km (ABRAMS e HOOK, 2002).

Tabela 3.2 – Características do sensor ASTER

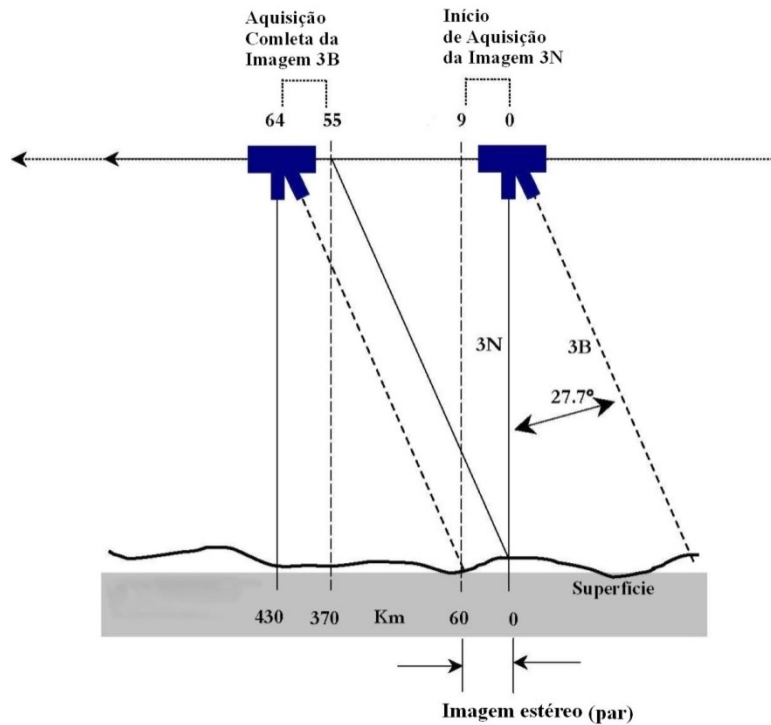
Subsistema	Banda	Intervalo Espectral (μm)	Resolução Espacial	Níveis de Quantização
VNIR	1	0,52 – 0,60	15 m	8 bits
	2	0,63 – 0,69		
	3N*	0,78 – 0,86		
	3B*	0,78 – 0,86		
SWIR	4	1.600 – 1.700	30 m	8 bits
	5	2.145 – 2.185		
	6	2.185 – 2.225		
	7	2.235 – 2.285		
	8	2.295 – 2.365		
	9	2.360 – 2.430		
TIR	10	8.125 – 8.475	90 m	12 bits
	11	8.475 – 8.825		
	12	8.925 – 9.275		
	13	10.25 – 10.95		
	14	10.95 – 11.65		
Razão Base/Altura em estéreo			0,6 (<i>along-track</i>)	
Período de imageamento por órbita			8 min	
Largura de faixa			60 km	

* 3N = visada no nadir; * 3B = visada inclinada.

Fonte: Abrams e Hook (2002) e Oliveira (2005).

Uma banda extra é gerada a partir da terceira banda no infravermelho próximo 0.78 a 0.86 μm , bandas 3N (*Nadir*) e 3B (*Back*), que possui uma visada inclinada, gerando um par de imagens estereoscópicas da qual se pode extrair automaticamente o MDE. Também é possível visualizar a imagem 3D e produzir um vetor em 3D (ABRAMS e HOOK, 2002).

O par estereoscópico (Figura 3.3) é obtido, com o início da aquisição da imagem 3B, 55, segundos após o término da aquisição da imagem 3N, com um ângulo de 27,7° entre ambas definindo uma relação base/altura (b/h) fixa de 0,6, valor dado pela tangente α , ângulo entre visada nadir 3N e a visada inclinada 3B (ERSDAC,2001).



Fonte: Welch e Lang (1999)

Figura 3.3 - Geometria de aquisição das imagens ASTER/VNIR

Os sensores ópticos que utilizam dispositivos de varredura para registrar a cena (*scanners*) podem obter o par de imagens estereoscópicas de duas formas: (*along-track*) na mesma órbita, como é caso do ASTER/VNIR (Figura 3.3) ou em órbitas distintas (*across-track*), como o é o caso do CBERS, SPOT, etc. (TOUTIN e GRAY, 2000).

Segundo Hirano (2003), a maior vantagem da aquisição de dados na mesma órbita (*along-track*), em comparação ao modo de aquisição em órbita distinta (*cross-track*), é que as imagens que formam o par estereoscópico são adquiridas em poucos segundos, em vez de dias, com condições de iluminação e ambientais uniformes, resultando em um par estereoscópico de alta qualidade, bem como mais apropriado para a geração MDE por técnicas de automação.

Embora somente as imagens do VNIR sejam utilizadas para a geração do MDE, as outras bandas possuem muitas informações úteis para aplicações nas geociências, podendo ser agregadas a um banco de dados geo-referenciado.

Por se tratar de um projeto experimental voltado para a pesquisa científica, os dados podem ser disponibilizados mediante a apresentação de projetos ou por um baixo custo. Atualmente, o custo é de \$ 85,00 dólares, junto ao JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) / LP-DAAC (*Land Processes Distributed Active Archive Center*) ou, ainda, ao ERSDAC (*Earth Remote Sensing Data Analysis Center*)/ASTER GDS (*ASTER Ground Data System*) que é o sistema de processamento e distribuição de dados do sensor ASTER no Japão. Ambos os sistemas de processamento e distribuição são gerenciados pela NASA.

Os Dados EOS Terra (AM-1) são processados em diferentes níveis de processamento, conforme descrição da Tabela 3.3 a seguir.

Tabela 3.3 - Níveis de processamento do EOS Terra

NÍVEIS DE PROCESSAMENTO	
Level 0	Reconstruído de instrumento sem processamento/dados carregados com resolução bruta, com alguns ou todos os artefatos de comunicação removidos (ex.: estrutura sincronização, comunicação <i>headers</i>)
Level 1A	Dados reconstruídos de instrumento sem processamento com resolução bruta, referência de tempo e com anotações de informações auxiliares, incluindo coeficientes de calibração geométrica e radiométrica, e parâmetros de geo-referenciamento (ex.: efemérides da plataforma) computados e anexados, mas não aplicáveis para dados de Nível 0.
Level 1B	Dados de Nível 1A que foram processados de um sensor (nem todos os instrumentos possuem um Nível 1B equivalente).
Level 2	Variáveis geofísicas derivadas com a mesma resolução e locação dos dados do nível1
Level 3	Variáveis mapeadas em grades regulares, geralmente com a mesma perfeição e consistência (ex.MDE).
Level 4	Saída de modelos ou resultados de análise de dados de nível inferior (ex. : derivado de variáveis de múltiplas medidas).

Fonte: King *et al.* (2004)

Todas as cenas são transferidas para o arquivo do EOSDIS do EROS Data Center's (EDC/LP-DAAC), onde são armazenadas, processadas e distribuídas para produtos de alto nível em um formato de arquivo específico *Hierarchical Data Format* HDF-EOS (ABRAMS e HOOK, 2002).

O HDF é um formato padrão para todos os produtos desenvolvidos pelo EOS da NASA. É um formato de arquivo multi-objeto desenvolvido em 1988 pelo *National Center for Supercomputing Applications* (NCSA) na Universidade de Illinois (<http://hdfeos.org/index.php> acessado 16/04/2009).

O formato HDF opera em diversos sistemas operacionais e em plataformas com suporte para uma variedade de tipos de dados científicos de formato adimensional, tabelas, texto, imagens *raster* com suas paletas de cor associadas e metadados. Entretanto, o fato de esses não estarem georeferenciados, levou a NASA a desenvolver o formato HDF-EOS com suporte para três tipos de dados espaciais (grade, ponto e linha), o que permite a consulta aos dados por meio de coordenadas geográficas e temporal (se existir esta dimensão espacial no conjunto dos dados). (<http://hdfeos.org/index.php> acessado 16/04/2009).

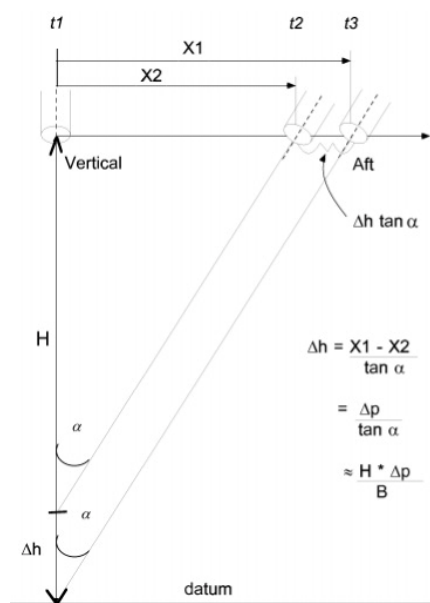
Os produtos do sensor ASTER estão disponibilizados nos níveis 1A, nível 1B, nível 2 e nível 3. Assim, as imagens podem ser adquiridas nos níveis 1A e 1B, e produtos derivados processados nos níveis 2 e 3. O MDE trata-se de um produto de nível 3 com identificação de AST14 (KING *et al.*, 2004).

3.2.1 MDE a partir de imagens do sensor ASTER

O ATBD (*Algorithm Theoretical Basis Document*) é o documento que prognosticou o padrão de acurácia do produto AST14 (MDE). Consiste em um trabalho realizado por vários cientistas e instituições: Membros do ADEMWWG (*ASTER Digital Elevation Model Working Group*); JPL ASTER Project Office (Bob Hekl e Ron Cohen); Análise Geométrica do Sistema Estéreo por Kohei Arai da Universidade de Saga no Japão; USGS LP DAAC por Bryan Bailey e Glenn Kelly, dentre outros (WELCH e LANG, 1999).

Uma correlação estéreo digital automática é utilizada para calcular diferenças de paralaxe e derivar MDEs de pares de imagens estéreos do sensor ASTER em Nível 1. O LP-DAAC é o departamento responsável pelas operações de processamento das imagens para aquisição do produto AST14 (WELCH e LANG, 1999).

A partir de pares de imagens estéreo do subsistema VNIR (3N e 3B) com resolução espacial de 15m no Nível 1A como também Nível 1B pode-se gerar MDEs relativos (sem pontos de controle no terreno) e MDEs absolutos (com pontos de controle no terreno). Um formato de MDE relativo consiste de uma disposição regular das elevações (em metros) a partir da menor elevação da cena. Por outro lado, um MDE absoluto consiste de uma medida de elevação acima do nível do mar (*datum*) e projetado para o sistema de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*).



Fonte: Welch e Lang (1999).

Figura 3.4 - Diferença de paralaxe do sensor ASTER/VNIR

O processo para a geração de MDEs utilizando *PCI OrthoEngine* ou qualquer outro sistema requer o registro das duas imagens do par estéreo. Algumas diferenças de posição, paralela à direção do satélite (diferenças de paralaxe Δp) (Figura 3.4) permitem a definição de elevações relativas determinadas pelas medidas do Δp no registro das imagens que podem ser convertidas para formato de dados de elevação relativa ou absoluta.

Antes de gerar um modelo para grandes áreas, é prudente executar o processo em uma pequena área, possibilitando identificar e, se possível, remediar a quantidade de falhas. Essas tendem a ocorrer em áreas da imagem com baixo contraste, tais como sombras, nuvens, corpos d'água e neve. As pequenas falhas podem ser corrigidas

automaticamente pela interpolação. Por outro lado, as grandes falhas requerem uma edição manual para completar o MDE (SELBY, 2003).

Cabe ao usuário indicar as imagens de nível 1A ou 1B ao LP-DAAC com a responsabilidade da escolha da imagem com relação à cobertura de nuvens para a geração do produto AST14 nível 3 (MDE acabado).

3.2.2 Acurácia e a escala do MDE do sensor ASTER

Segundo Welch e Lang (1999), muitos fatores interferem na acurácia de um MDE como informações inadequadas de efemérides e ajuste dos pontos de controle no terreno, principalmente para utilização das do sensor ASTER com *pixel* de 15m, o que requer uso de pontos de controle no terreno para a geração MDE absoluto. Em função da não exatidão da posição da plataforma EOS AM-1, que pode variar cerca de 300m nos eixos x e y (O'NEILL; DOWMAN, 1993). A acurácia prevista para os eixos x e y deverá ser de 50m para imagens de Nível 1, de acordo com Fujisada (1998).

A estimativa de erro para planimetria e altimetria para produtos cartográficos existe há mais de meio século (*Bureau of the Budget*, 1947, Anexo 1). Com o advento de dados cartográficos digitais, esses padrões de acurácia dos mapas e, conseqüentemente, da escala do mapa vêm sendo aprimorados para incorporar acurácia por meios estatísticos. Geralmente o índice estatístico mais utilizado é o erro médio quadrático RMSE – *Root Mean Square Error* (Anexo 2) em xy (planimetria) em z (elevação) (Anexo 3).

A Tabela 3.4 apresenta as especificações do produto padrão MDE ASTER para estimar a acurácia com o RMSExyz, produzido pela integração de resultados de análises geométricas, analogia com outros sistemas de satélites e simulações de dados do sensor ASTER (WELCH e LANG, 1999).

Tabela 3.4 – Produtos padrão do sensor ASTER

NOME DO PRODUTO	# OF GCPs (MÍNIMO)	ACURÁCIA GCP (RMSE _{xyz})	ACURÁCIA MDE (RMSE _{xyz})
MDE Relativo	0	N/A	10 - 30 m*
MDE Absoluto	1	15 - 30 m	15 - 50 m**
MDE Absoluto	4	5 - 15 m	7 - 30 m**

* Z valores referentes ao *pixel* de mais baixa elevação do MDE, a acurácia é relativa a este *pixel*.

** Z valores referentes ao datum vertical absoluto (média do nível do mar) Resolução espacial de saída 30m

Fonte: Welch e Lang (1999).

Como apontado por Gesch (1993), Bolstad e Stowe (1994) e Ackermann (1994), o RMSE_{xyz} sozinho é um índice insuficiente para testar a qualidade do MDE para aqueles que utilizam os dados do MDE para aplicações científicas. Outros parâmetros podem incluir: resolução espacial (xy), resolução do MDE na vertical (z), equivalência de padrões de acurácia com as escalas do mapa (Tabela 3.5) e, acurácia da declividade (medida dependente do RMSE_z, bem como medidas no eixo xy)(Tabela 3.6) (WELCH e LANG, 1999).

Tabela 3.5 – Equivalente acurácia do RMSE para escala do mapa

Escala do Mapa	RMSE _{xy} (m)	RMSE _z (m)*
1:500.000	150	30
1:250.000	75	15 - 30 m
1:100.000	30	6 - 15 m
1:50.000	15	6
1:25.000	7.5	3

* Com base em medidas de elevação do spot e utilizando curvas de nível de mapas topográficos de base em escalas específicas.

Fonte: Welch e Lang (1999) (Anexo1) (Após WELCH e MARKO, 1981)

Tabela 3.6 – Resolução do MDE e erro de Declividade de 5°

PIXEL MDE/ MEDIDA HORIZONTAL	ERRO DE DECLIVIDADE 5°
30 m	2.6m
50 m	4.5m
100 m	8.7m
200 m	17.5m
500 m	43.7m
1000 m	87.0m

Obs.: MDE ASTERs deverão apresentar erro de declividade menor que 5° em distância acima de 100 m.

Fonte: Welch e Lang (1999)

A Tabela 3.6 apresenta que em função das expectativas dos valores do RMSEz para os MDEs ASTER (± 10 -50 m, de acordo com a Tabela 3.4). A acurácia da declividade de 5° deverá ser obtida em distâncias de 100m a 500m ou intervalos mais longos. Neste contexto, Welch e Lang (1999) estimaram conservadoramente que MDEs ASTER deverão, em geral, ser utilizados para mapeamentos em escala de 1:100.000 a 1:250.000. Em alguns casos, os MDEs ASTER poderão ser de suficiente qualidade para mapeamentos em escala 1:50.000.

Essas expectativas foram confirmadas após o lançamento do sensor ASTER em dezembro de 1999 e, de acordo com o *EOS Data Products Handbook*, revisado em 2004. O produto AST14 (MDE), em função da alta resolução espacial das imagens do sensor ASTER/VNIR, permite gerar MDEs absolutos com erro médio quadrático (RMSE – *Root Mean Square Error*) de até 7m de acurácia vertical e horizontal com pontos de controle no terreno apropriados, e os MDEs relativos com valores de RMSE de até 10 metros. Esses MDEs possuem um padrão de acurácia que permite usos em escalas de 1:50.000 a 1:250.000 com resolução espacial de saída de 30m (KING *et al.*, 2004).

Hirano *et al.* (2003) geraram MDEs do ASTER de imagens nível 1A de quatro áreas: Monte Fuji (Japão), Cordilheira dos Andes (Chile e Bolívia), San Bernardino (Califórnia, USA) e Huntsville (Alabama, USA) utilizando pontos de controle no terreno a partir de cartas topográficas e de GPS, para ambas as imagens do par estereoscópico,

obtendo um RMSE entre 7,3 a 14,7 para pontos de controle no terreno obtidos com GPS, e valores entre 15,8 a 26,3 metros para pontos de controle no terreno extraídos de cartas topográficas. Assim, atestaram que estes MDEs podem ser utilizados para áreas de relevo acidentado em escalas que variam entre 1:50.000 a 1:100.000.

A acurácia dos MDEs elaborados a partir de pares estereoscópicos aéreos foi exaustivamente testada, mas nem todo o conhecimento pode ser transferido para o caso das imagens estereoscópicas. Alguns fatores, como a resolução espacial da imagem, o tempo e a geometria de aquisição, diferenças radiométricas de duas imagens obtidas em datas diferentes podem, por exemplo, dificultar a identificação dos pontos de controle no terreno, ou ainda podem dificultar o processo de fusão dos pares estereoscópicos (CUARTERO; FELICÍSIMO; ARIZA, 2004).

Os autores acima, ainda apontam alguns problemas, como as poucas pesquisas que testam a acurácia do MDE ASTER em função do recente lançamento e, especialmente, de duas condições imprescindíveis na determinação da acurácia MDEs, que são: a) alta acurácia dos pontos de checagem e b) uma quantidade satisfatória de pontos checagem para garantir um controle da confiabilidade do erro. Afirmam que a maioria das pesquisas não satisfaz estas condições, sendo que uma fonte comum de pontos de checagem é oriunda de mapas topográficos dos quais não se conhece muito bem o padrão de acurácia.

Em função desses fatores, determinaram a acurácia do MDE do ASTER em uma área retangular 23km x 28km na província de Granada (Sul da Espanha) com relevo acidentado (300m a 2800m de altitude) por meio de 315 pontos de checagem distribuídos aleatoriamente, nos quais as coordenadas foram definidas por técnicas de Diferencial GPS (DGPS). Essa técnica consiste na correção de erros intencionais ou não, fornecidos pelos satélites orbitais, os quais podem ser corrigidos mediante a retransmissão dos pontos de coordenadas “verdadeiros” conhecidos por meio de estações de rastreamento em terra. O método de observação contínua foi utilizado para garantir uma margem de erro menor que 10 cm.

A partir de 55 MDEs das imagens do sensor ASTER com resoluções espaciais de 10m a 120m, utilizando os *softwares Erdas Imagine 8.5/OrthoBase* e o *Geomatic*

8.2/*OrthoEngine*, obtendo os melhores resultados de acurácia com este último, pois o *Geomatics/OrthoEngine* possui um modelo específico do ASTER que compensa a falta de parâmetros orbitais. Entretanto, produz uma fusão do par estereoscópico inferior ao *Erdas/OrthoBase*.

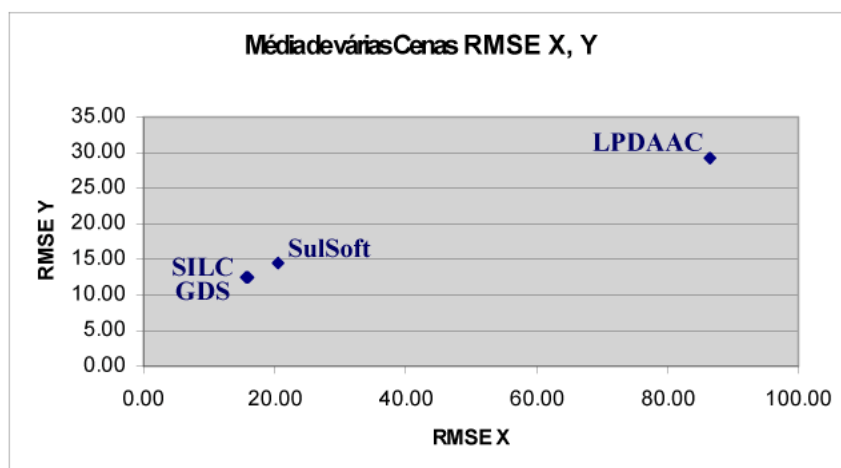
Os melhores resultados do RMSE são obtidos com uma resolução espacial de 30m. A maior vantagem dos MDEs ASTER é seu baixo custo associado a um padrão de acurácia do RMSEz menor que o tamanho do *pixel* com a adoção de programas apropriados (CUARTERO; FELICÍSIMO; ARIZA, 2004).

Estudos realizados por Subramanian *et al.*(2003) revelaram que, a partir de pares estéreos de imagens de três diferentes satélites — IRS 1-C, *Radarsat standard beam mode*, ASTER bandas do VNIR e Spot Pan —, o ASTER foi o que apresentou os melhores resultados. Isto foi possível em função de uma pequena diferença temporal entre a obtenção das imagens do par estéreo (somente 4s), considerando a variação temporal maior em relação aos outros satélites. Os resultados também apontaram para uma boa fusão *raster* devido à diferença temporal curta. Além disto, a relação de *base/height* (b/h) fixa da imagem estéreo rendeu resultados mais consistentes e melhores sobre vários terrenos. O custo do MDE derivado de imagens ASTER foi muito menor quando comparado ao IRS e SPOT, que custam quase três vezes mais.

Desde abril de 2001, o LP DAAC oferece um MDE (AST14) produzido a partir de dados do ASTER Nível-1A como um produto de dados padrão. Duas versões do produto, até então, estavam disponíveis: um MDE relativo, sem pontos de controle no terreno, e um MDE absoluto, que requeria pontos de controle no terreno disponibilizado pelo usuário. Somente os produtos de alta qualidade foram arquivados e disponibilizados por encomendas para os usuários. O MDE relativo tornou-se muito mais popular com uma crescente solicitação do produto, necessitando, portanto de uma atualização por parte do LP DAAC (<https://lpdaac.usgs.gov/> acessado em 16/04/2009).

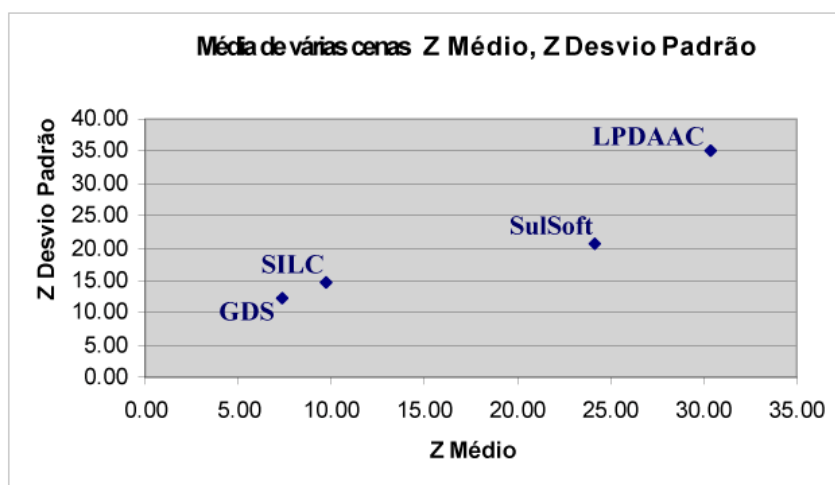
Uma avaliação mais rigorosa da acurácia do MDE do ASTER foi apresentada por Bailey *et al.*, (junho/2005) no *SRTM Workshop USGS National Center* em Reston, VA. O trabalho teve como objetivo verificar a possibilidade de mudança do *software* de

produção do MDE pelo LP DAAC. Para tanto foram selecionadas cinco áreas com relevos variados empregando *softwares* distintos (ver Figura 3.5 e Figura 3.6).



Fonte: Watanabe (2005).

Figura 3.5 – Acurácia horizontal do MDE por sistemas de produção.



Fonte: Watanabe (2005).

Figura 3.6 – Acurácia vertical do MDE por sistemas de produção.

Dos sistemas avaliados, o *software Silcast* do sistema SILC foi o mais eficiente, sendo que a acurácia do sistema SILC e GDS são bem próximas, mas ambos foram significativamente mais acurados que os MDEs produzidos pelo sistema da *SulSof* e da LP DAAC (*PCI OrthoEngine*). Com base nesses resultados, o sistema utilizado pelo LP DAAC deverá ser mudado, podendo ser o mesmo sistema utilizado pelo GDS ou uma versão do sistema SILC (BAILEY *et al.*, 2005).

A partir de 24 de maio de 2006 o LP DAAC iniciou a utilização de um novo *software* para a produção mais eficiente do MDE. Fundamentado em um método automatizado de estéreo-correlação, esse novo *software* tem capacidade para gerar 50 ou mais MDEs relativos por dia sem pontos de controle no terreno, utilizando efemérides e altitudes derivadas de ambos, o sensor ASTER e o satélite Terra (<https://lpdaac.usgs.gov/> acessado em 16/04/2009).

A acurácia dos novos MDEs atinge ou excede as especificações de exatidão fixadas para o MDEs ASTER relativo fixadas pelo ATBD (*Algorithm Theoretical Basis Document*). Os testes de validação desses MDEs revelaram que são mais precisos em cerca de 25 metros do RMSE_{xyz} (ver Figuras 3.5 e 3.6) (<https://lpdaac.usgs.gov/> acessado em 16/04/2009).

O novo MDE é um produto de uma única banda com 30 metros de resolução espacial geocodificado e referenciado para o sistema de coordenadas UTM utilizando o geóide EGM96. Em comparação aos produtos anteriores, as diferenças são dadas pelo processo automatizado sem edição manual, extensos corpos d'água são detectados e recebem um único valor, áreas com falhas permanecem como ocorrem, áreas com nuvens aparecem com brilho intenso. Para obtenção de melhores resultados deverá ser selecionada, na formulação do pedido, uma imagem de nível 1A de alta qualidade, sem cobertura de nuvens (<https://lpdaac.usgs.gov/> acessado em 16/04/2009).

A boa qualidade dos MDEs pode ser obtida de diferentes satélites que produzem pares de imagens estereoscópicas. Entretanto, vários fatores podem contribuir na escolha do tipo de sensor visível-infravermelho ou radar, este último com a vantagem de não depender da iluminação solar e não sofrer interferência da cobertura de nuvens, que é muito comum em regiões tropicais.

No caso dos sensores que operam no espectro do visível-infravermelho, o ASTER se destaca em função do baixo custo de aquisição, aliado à boa resolução espacial e à forma de obtenção do par de imagens estereoscópicas na mesma órbita (*along-track*). Uma relação b/h fixa permite uma melhor qualidade da fusão do par de imagens estereoscópicas. Entretanto, a boa qualidade dos MDEs está suscetível ao

desempenho do *software* adotado, como demonstrado por Bailey *et al.* (2005), expressos nas Figuras 3.5 e 3.6 de Watanabe (2005).

3.3. EXTRAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM A PARTIR DO MDE

3.3.1 Conceitos, aplicações e estrutura de dados

Desde meados do século 20, varias técnicas de representação da superfície do terreno vem sendo desenvolvidas concomitantemente com a tecnologia da computação, da matemática moderna e da computação gráfica. Atualmente, o uso do computador tornou-se um marco na era da informação (LI; ZHU; GOLD, 2005).

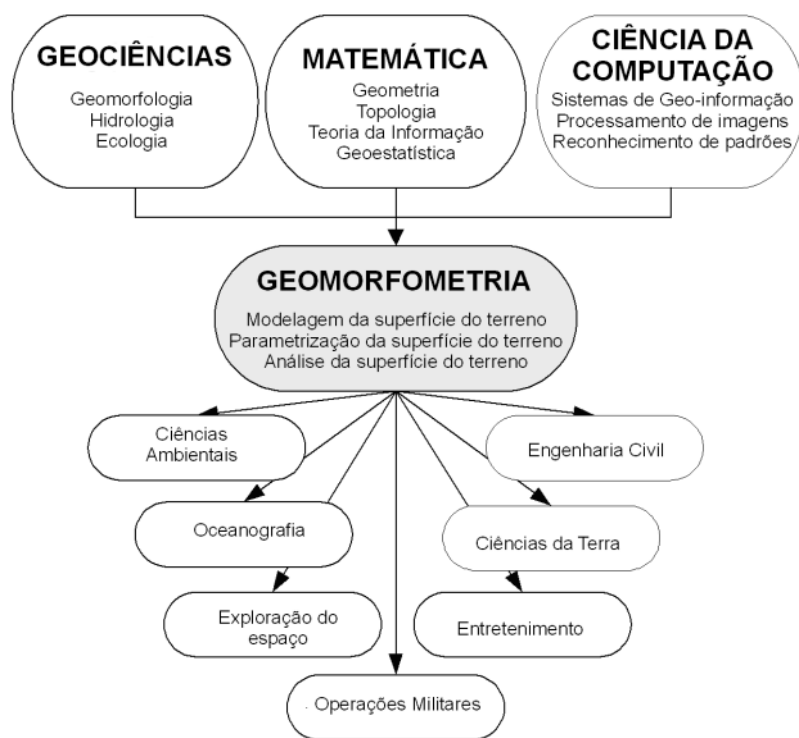
Dikau (1989), Douglas (1986) e Pike (1988) destacam o importante papel desempenhado pelas aplicações da tecnologia SIG, que vem contribuindo para as pesquisas geomorfológicas com uma série de novas possibilidades para a quantificação das formas de relevo. A derivação automática de formas de relevo tornou-se uma necessidade para análises quantitativas, configurando-se como uma importante ferramenta para o gerenciamento, análise de dados numéricos e especialmente para o mapeamento geomorfológico, que inclui: armazenamento de dados espaciais digitalizados de diferentes planos de informação; avaliação destes dados para propostas de aplicação e para outras disciplinas das Geociências; simplificação de processos de mapeamento por meio da modelagem da superfície e; modelagem de processos geomorfodinâmicos a partir de parâmetros quantificados.

Esses quatro pontos resumem os conteúdos das pesquisas para a elaboração de mapas geomorfológicos que servem de base para um sistema de informação geomorfológica na Alemanha. A função central do trabalho consiste na obtenção de dados a partir da classificação e modelagem das formas de relevo de MDEs. Estas pesquisas também estão sendo testadas em aplicações geoecológicas e pedológicas (DIKAU, 1989).

Segundo Burrough e McDonnell (1998) e Pike *et al.* (2008) a maturidade da tecnologia SIG e do Sensoriamento Remoto (SR) tem contribuído para a geomorfometria emergir como uma área técnica possuindo módulos eficazes de análise. No início do século 21, surge não somente condicionada à quantificação da superfície do terreno, mas como uma área independente do conhecimento, comparável a muitas outras disciplinas.

A Geomorfometria é uma ciência da análise quantitativa da superfície do terreno, uma mescla entre as ciências da terra, computação, engenharia e matemática. Este é um novo campo de análise em sintonia com a cartografia e a tecnologia SIG desenvolvido a partir da geomorfologia e da análise quantitativa do terreno que são duas disciplinas originadas no século 19 oriundas da geometria, da geografia física e da retirada de medidas do relevo (PIKE, *et al.*, 2008).

A Geomorfometria fornece suporte a outras áreas como: ciências da terra e ambiental (incluindo a oceanografia e explorações planetárias), engenharia civil, operações militares e entretenimento por vídeo.



Fonte: Adaptado de Pike *et al.* (2008)

Figura 3.7 - Origens e aplicações da Geomorfometria

A morfometria clássica (orometria) tem por base a hipsometria, formas das encostas, cálculo de medidas de elevação e declividade, volume, amplitude altimétrica, densidade de drenagem de mapas topográficos. A moderna geomorfometria está direcionada para o refinamento e processamento de dados de elevação, descrição e visualização da topografia e uma ampla variedade de análises numéricas com base em

topografia digital expressa pelo MDE, embora ambas estejam focadas na análise espacial, extração de parâmetros e análise da superfície do terreno (PIKE, *et al.*, 2008).

Ainda de acordo com os autores, o rápido crescimento das fontes de dados para produção de MDEs, como, por exemplo, o *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), tem contribuído para um aumento significativo da utilização dos parâmetros da superfície de terreno em diversas áreas, como agricultura de precisão, modelagem pedológica, aplicações hidrológicas e climáticas, planejamento urbano, educação, exploração do fundo oceânico e ainda superfícies planetárias — é o caso do planeta Marte. Neste contexto, a topografia da terra possui atualmente cobertura por MDE em resolução espacial de 100m, ou ainda menor.

Muitos estudos geomorfológicos, a partir da década de 60, buscam relacionar as vertentes e seus canais sendo exaustivamente investigados a partir da extração de parâmetros morfométricos das bacias hidrográficas (CHRISTOFOLETTI, 1970; MORISAWA, 1962; ZAVOIANU, 1985).

A bacia hidrográfica é, sem dúvida o objeto de investigação dominante na superfície do terreno e sua análise é estritamente um ramo específico da geomorfometria. Contudo, considerando que a rede fluvial ocupa boa parte da superfície da Terra, a análise da distribuição dos sistemas de drenagem é preponderante na maioria dos processos orientados para a geomorfometria geral (PIKE, *et al.*, 2008). Nesse contexto, particular ênfase tem sido dada à geomorfometria com relação à extração de parâmetros em bacias hidrográficas a partir do MDE (BAND, 1986; FERREIRA, 1997; JENSON e DOMINGUE, 1988; MARK, 1984; TARBOTON, 1997; WILSON e GALLANT, 2000).

A representação hidrográfica é fundamental, não somente pela importância da representação em um mapa, mas também porque esta informação é utilizada em análises de modelagem do terreno, gestão de recursos naturais e ambientais, estudos hidrológicos entre outros. Haja vista o fato de a rede de drenagem apresentar um arranjo para todas as formas de relevo em uma carta topográfica. Isso pode indicar a predominância de uma forma de relevo em uma área, determinando, por vezes, o

melhor conhecimento de um fenômeno em substituição ao de outras características (MARTINEZ-CASANOVAS e STUIVER, 1998; FERREIRA, 1996, 1997).

A representação hidrográfica é composta por um conjunto de linhas ou áreas e uma lista de atributos, os quais descrevem características relevantes das informações. Diferentes entidades são reconhecidas como a área onde ocorre a precipitação e a rede na qual ela atravessa em busca da saída. Tais características definem um sistema de drenagem. Uma bacia, portanto, é uma área na qual a água, sedimentos e materiais dissolvidos fluem em um escoamento concentrado para uma saída comum. O limite entre duas bacias é denominado de divisor topográfico (MARTINEZ-CASANOVAS; STUIVER, 1998).

Atualmente o conceito de bacia hidrográfica foi ampliado, considerando todo o sistema que compreende um volume de materiais sólidos e líquidos e os processos atuantes que preenchem todos os espaços de circulação, armazenamento, saídas da água e do material transportado que mantêm relações com a rede de drenagem (RODRIGUES e ADAMI, 2005).

Antes da bacia hidrográfica e da rede de drenagem serem analisadas quantitativamente, estas devem ser laboriosamente copiadas de fotografias aéreas ou impressas a partir de mapas topográficos. Em áreas de relevo suave não é fácil identificar visualmente sobre uma fotografia aérea onde a linha divisória de uma bacia deverá estar tornando-se difícil até mesmo ver os canais de drenagem sobre uma camada espessa de floresta. Além de ser um trabalho tedioso, pode acarretar um aumento inevitável de erros na base de dados (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

Igualmente sobre mapas topográficos muito detalhados, a rede de drenagem representada por linhas azuis pode seriamente subestimar o padrão real do potencial hidrográfico. Isso pode ser minimizado com informações vindas do sensoriamento remoto e de canais extraídos de um MDE, pois, por exemplo, pode-se separar os canais com água dos canais secos em diferentes períodos do ano (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

Quando discutimos o uso do MDE, é importante considerar o formato de representação da superfície que será utilizado, pois a estrutura ideal para MDE pode

ser diferente se for utilizada para modelos hidrológicos dinâmicos ou se for utilizada para a determinação de atributos topográficos da paisagem.

Três principais estruturas de dados de elevação são empregadas: *TIN*, *Raster* e *Vetorial*. Entre estas, a mais difundida é a estrutura *raster*, em função da facilidade de implementação e eficiência computacional; apesar de apresentar algumas desvantagens, como a dificuldade na identificação de mudanças abruptas do relevo, pois a escala da grade afeta a eficiência computacional e os resultados obtidos. A delineação do fluxo de água tende a um ziguezague irreal, além de imprecisões na determinação das sub-bacias. Com isso, as grades regulares devem ser ajustadas de acordo com a rugosidade do relevo, uma vez que podem ser significativas as redundâncias nas áreas mais suaves do relevo (BURROUGH e McDONNELL, 1998; MOORE *et al.*, 1991).

Nestas circunstâncias, um MDE originado em uma estrutura TIN pode ser mais flexível e eficiente, pois este pode incorporar na sua base de dados formas mais específicas do relevo, como picos, quebras de declive e depressões. Entretanto, existem dificuldades na conexão das faces triangulares superiores, e a irregularidade da estrutura de dados gera maior dificuldade na computação de atributos em relação aos métodos em grade quadrada (BURROUGH e McDONNELL, 1998; HENGEL *et al.*, 2003; MOORE *et al.*, 1991).

De outro modo, os métodos baseados em curvas de nível apresentam dificuldades de armazenamento dos dados, não dispondo de maiores vantagens computacionais. Contudo, essa estrutura é a que melhor representa o fluxo de água sobre a superfície, pois as linhas de fluxo de água são ortogonais às curvas de nível, marcando áreas de convergência e divergência do relevo, o que simplifica as equações na delineação do fluxo de água (MOORE *et al.*, 1991, 1993; RENNÓ, 2003).

A rede de drenagem com seus canais e suas bacias são expressas e identificáveis por divisores de água ou divisores topográficos, revelando importantes propriedades de uma paisagem, o que contribui para melhor análise de fluxos de material. A derivação automática da rede drenagem tem disposto novas ferramentas para os hidrologistas, permitindo estimar o fluxo de água e sedimentos sobre o relevo,

além de análises de processo em modelos hidrológicos dinâmicos em ambiente SIG (BURROUGH e McDONNELL, 1998; MOORE *et al.* 1991).

Muitos dos atributos topográficos mais utilizados, como a declividade (*slope*), área específica de sub bacia (*specific catchment area*), orientação de vertente (*aspect*), forma da encosta (*plan e profile curvature*), podem ser derivados dos três tipos de dados —*TIN, raster e vetorial*— sendo expressos por uma função de sua vizinhança (MOORE *et al.*, 1991, MOORE *et al.*, 1993; WILSON e GALLANT, 2000).

De acordo com Wilson e Gallant (2000), os parâmetros de relevo podem ser classificados de vários modos com base nas características dos atributos computados e/ou a partir da extensão espacial destes. Alguns autores distinguem ferramentas que executam operações em vizinhança local (ex., sub-matriz quadrada de 3x3) daquelas que executam operações em extensão da vizinhança (ex.: cálculo de áreas de drenagem a montante, técnicas de sombreamento etc.).

Moore *et al.* (1991, 1993) distinguem atributos primários computados diretamente do MDE e atributos secundários que envolvem uma combinação de atributos primários e constituem-se numa base fisicamente ou empiricamente derivada de índices que podem caracterizar a variabilidade espacial de processos específicos que ocorrem nas paisagens.

Entre os atributos primários, destaca-se a declividade com relevância (na taxa de escoamento e velocidade do fluxo subsuperficial e superficial, precipitação, vegetação, geomorfologia, umidade do solo e classes de capacidade de uso); orientação de vertente com relevância (na radiação solar, evapotranspiração, distribuição e abundância da fauna e flora), forma da encosta (no fluxo convergente e divergente, umidade no solo, características do solo); comprimento do canal com relevância (na taxa de erosão, produção de sedimentos, tempo de concentração) área de contribuição à montante com relevância (no volume de escoamento, taxa de escoamento fixo) (MOORE *et al.*, 1991; SPEIGHT, 1974; WILSON e GALLANT, 2000).

A maioria desses atributos topográficos é calculada de derivação direcional de uma superfície topográfica. Eles podem ser computados diretamente como um

esquema de diferença finita de segunda ordem ou por ajuste de função de interpolação para cálculo do MDE e das funções derivadas (WILSON e GALLANT, 2000).

O objetivo principal é poder usar os atributos computados para descrever a morfometria do relevo, definindo parâmetros das vertentes e dos canais de drenagem que incluem as bacias hidrográficas (FERREIRA, 1997, 1999b; JENSON e DOMINGUE 1988; TARBOTON e AMES, 2001; WILSON e GALLANT, 2000).

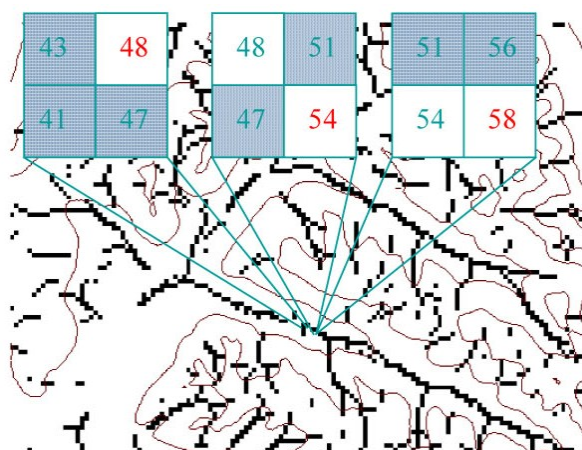
Entre os atributos secundários destacam-se quatro conjuntos de índices: topográficos de umidade (*Topographic wetness indices*), potência do fluxo do canal (*Stream-power indices*), radiação (*Radiation indices*) e da temperatura (*Temperature indices*). Todos computados de dois ou mais atributos primários — são importantes por oferecerem uma oportunidade para descrever padrões como processos de uma função. Esses atributos quantificam o papel desempenhado pela topografia na redistribuição de água na paisagem e na alteração da quantidade de energia solar recebida pela superfície, possuindo importantes consequências hidrológicas, geomorfológicas e ecológicas em varias paisagens (BURROUGH e McDONNELL, 1998; MOORE *et al.*, 1991; WILSON e GALLANT, 2000).

Esses atributos podem afetar características do solo, pois cumpre assinalar que a pedogênese da catena de um solo é afetada no modo pelo qual a água se move no ambiente em diversas paisagens. A distribuição e abundância de água no solo revelam a suscetibilidade das paisagens para a erosão hídrica, como também para distribuição e abundância da flora e fauna (WILSON e GALLANT, 2000).

3.3.2. A Extração da rede de drenagem

De acordo com Mark (1984), vários algoritmos foram descritos para extração de características da drenagem por Peucker e Douglas (1975). Estes algoritmos identificam porções côncavas onde a superfície de escoamento tende a uma concentração. Assim, um mapa de zonas côncavas oriundo de um MDE pode ser um indicador da rede de drenagem. Mas estes apresentam feições locais sem apresentar

uma continuidade, com muitas depressões aparecendo em *pixels* isolados como consequência os canais se apresentam “quebrados” (MARK, 1983) (Figura 3.8).



Fonte: Peucker e Douglas (1975)

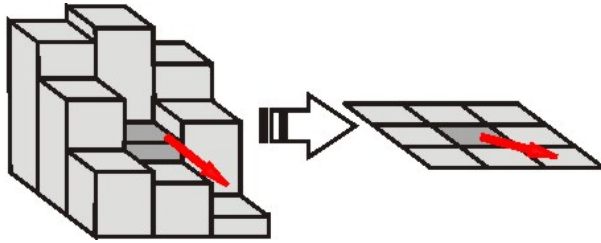
Figura 3.8 – Identificação de áreas côncavas

Muitos algoritmos vêm sendo utilizados em SIGs ou em softwares *stand-alone* para a delimitação de canais e cálculo áreas de contribuição em MDE em estrutura de grade. Entre estes, destaca-se o algoritmo D8 (*deterministic eight-node*), algoritmo de O'Callaghan e Mark (1984); outros se sucederam a este como: o algoritmo Rho8 (*random eight-node*) — versão estatística do algoritmo D8 de Fairfield e Leymarie (1991); o algoritmo FD8 e FRh08, cujo o fluxo é distribuído em função do declive (Freeman, 1991 e Quinn *et al.*, 1991) e o algoritmo DEMON, cujo o fluxo é orientado seguindo a orientação da vertente desenvolvido por Costa-Cabral e Burges (1994). Um método mais recente, o algoritmo D-infinity (Dinf), desenvolvido por Tarboton (1997), surge como uma adaptação do algoritmo DEMON, com vantagens para direcionar o fluxo entre 0 e 2π , ainda pouco empregado, inserido no módulo *TauDEM* (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*) software livre, um *plug-in* que trabalha junto ao ArcGIS ou MapWindow.

Moore (1996), Tarboton (1997), Burrough e McDonnell (1998), e Wilson e Gallant (2000) afirmam que o método D8 (8 direções de fluxo) de O'Callaghan e Mark (1984) é o mais simples para delinear direções de fluxo de um *pixel* central para um de seus oito vizinhos adjacentes ou diagonalmente na direção do declive mais acentuado. Em função disso, este vem sendo incorporado em muitos SIGs comerciais e amplamente

utilizado por Marks *et al.* (1984); Band (1986); Jenson e Domingue (1988); Mark (1988); Morris e Heerdegen (1988); Tarboton *et al.* (1988); Tarboton (1989); Jenson (1991); Martz e Garbrecht (1992).

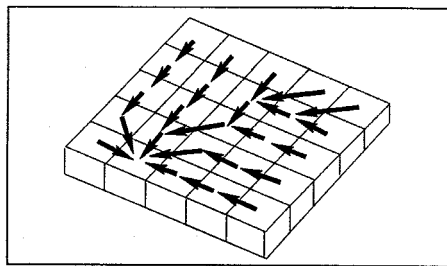
A Figura 3.9 ilustra o direcionamento do fluxo do *pixel* central para a declividade mais acentuada ou para a mais baixa cota de elevação com um único *pixel* vizinho à jusante capaz de receber este fluxo.



Fonte: Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS, s.d.).

Figura 3.9 - Direção de fluxo à jusante para *pixel* vizinho

O produto resultante do processamento do fluxo do canal em 8 direções é denominado LDD (*local drain directions*), Figura 3.10, no qual cada *pixel* recebe um valor inteiro para uma direção de fluxo, podendo ser expresso em graus ou em códigos numéricos (BURROUGH e McDONNELL, 1998).



Fonte: Burrough e McDonnell (1998)

Figura 3.10 - Vetores LDD (Local Drain Directions) fluxo à jusante

A grade de fluxo de direção então é codificada com um valor específico para indicar a direção de fluxo. Este processo é muito variável em função do *software* adotado. No caso do SIG *ILWIS*, o *pixel* central da Figura 3.9 receberia a letra SE (para direção sudeste), já para o *TauDEM* receberia o valor 8, considerando a codificação a partir do E no sentido anti-horário.

A característica básica do algoritmo D8 é que o fluxo pode acumular em um *pixel* de vários *pixels* à montante, mas somente pode fluir à jusante para um único *pixel* de oito possíveis direções. Esse método pode modelar a convergência do fluxo em vales, mas não a divergência do fluxo em áreas de topo. Outra limitação desse algoritmo é a delineação do fluxo à jusante sobre uma sub-matrix 3x3, o que conduz automaticamente para uma discretização do fluxo em um ângulo fixo de 45° nas direções diagonais. Alguns pesquisadores consideram este fato como uma séria deficiência (COSTA-CABRAL e BURGESS, 1994; FAIRFIELD e LEYMARIE, 1991; QUINN *et al.*, 1991; TARBOTON, 1997).

Diversas regras foram criadas para solucionar alguns problemas, como: preencher depressões simples, situações nas quais mais de um *pixel* vizinho apresenta declividades iguais, e quando ocorrem regiões planas. Esses fatores podem impedir a delineação do fluxo de drenagem (JENSON e DOMINGUE, 1988).

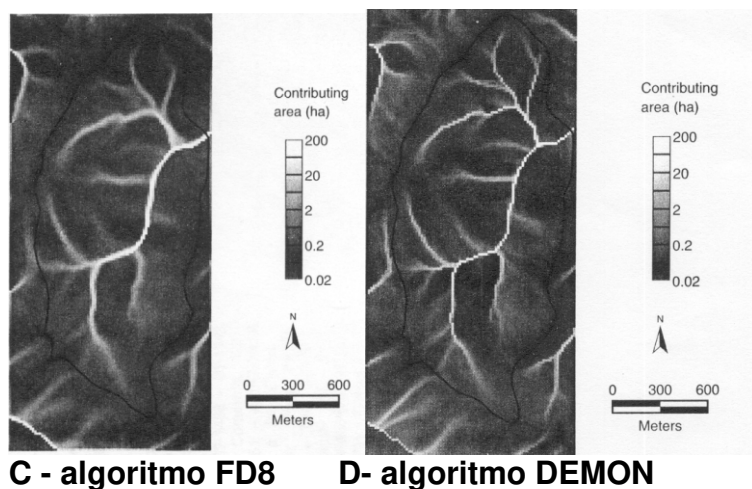
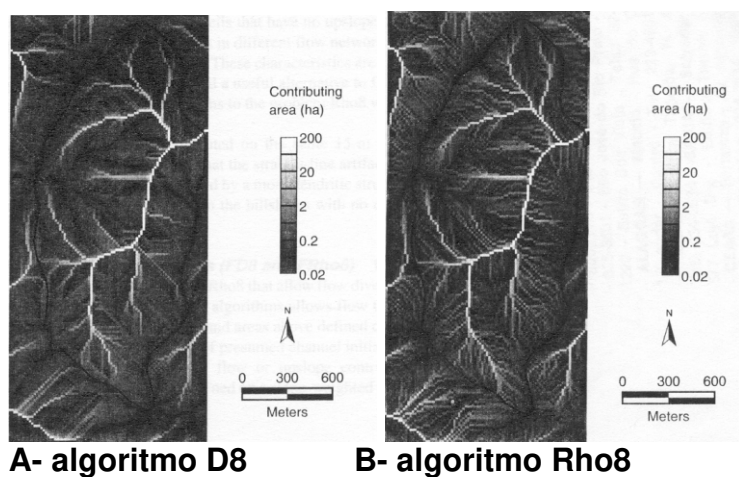
Apesar dessas limitações, o algoritmo D8 ainda é o mais empregado, especialmente em função de sua simplicidade na determinação de áreas de contribuição à montante do canal. Mesmo com a incapacidade de modelar fluxo divergente, é adequado para delinear os limites de sub-bacias (WILSON e GALLANT, 2000).

Para a definição da rede de drenagem, ainda se faz necessário gerar uma grade de fluxo acumulado. As áreas de drenagem acumuladas são determinadas a partir de uma grade de direção de fluxo (LDD) e a partir da escolha de um *threshold* de área, ou seja, um valor de área de drenagem capaz de formar um canal de drenagem. Assim, cada *pixel* recebe o valor correspondente à soma de todas as áreas de drenagem de todos os *pixels* à montante cujo escoamento contribui para o *pixel* analisado (JENSON e DOMINGUE, 1988; MARK, 1984).

A extração da rede de drenagem, então, é realizada por meio da grade de fluxo de direção e do *threshold* de área adotado. Este *threshold* é um dos fatores mais sensíveis nesse processo, pois se o valor do *threshold* escolhido for muito baixo a rede de drenagem será muito densa. Por outro lado, se o valor de *threshold* for muito alto, poderá resultar em uma rede de drenagem muito esparsa. Portanto, a rede de

drenagem é definida pelos *pixels* com valor de fluxo acumulado maior ou igual ao valor de *threshold* de área adotado (WILSON e GALLANT, 2000).

As Figuras 3.11 A / B / C / D apresentam a área de contribuição computada a partir do algoritmo D8, Rho8, FD8 e DEMON, respectivamente, a partir do MDE com resolução espacial de 15m do Ribeirão *Cottonwood*. Os fundos de vale estão definidos por um segmento claro indicando valores altos da área de contribuição e os cumes definidos por *pixels* mais escuros, indicando valores baixos da área de contribuição. Ambos definem o divisor topográfico das sub-bacias.



Fonte: Wilson e Gallant (2000)

Figura 3.11 A / B / C / D - Representação do fluxo acumulado

O algoritmo D8 possui artefatos óbvios visíveis em linhas retas, devido à ausência de dispersão e a inability de responder a mudanças sutis na orientação da

vertente. O limite da sub-bacia, determinado a partir das curvas de nível, nem sempre corresponde ao limite estabelecido pelas nascentes nas áreas de topo (parte central ocidental Figura 3.11-A) (WILSON e GALLANT, 2000).

O algoritmo Rho8 (*random*) é uma versão estatística do algoritmo D8, que foi introduzido para melhor representar os aspectos estocásticos do terreno, substituindo o valor das diagonais $1/\sqrt{2}$ para $1/(2-r)$, onde r é uma variável aleatória distribuída uniformemente entre 0 e 1. Moore (1996) chama isto de simular mais realisticamente redes de drenagem. Apesar do algoritmo Rho8 não poder modelar a dispersão, isto pode ser gerado por repetidas simulações a partir do D8, proporcionando a mais provável rede de drenagem (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

Na Figura 3.11-B percebe-se que as linhas retas produzidas pelo algoritmo D8 desaparecem em grande parte e são substituídas por uma estrutura mais dendrítica, em fluxos longos e paralelos com muito mais *pixels*, sem conexão nas áreas de topo. Por outro lado, produz pouco efeito, onde uma direção está claramente definida como em fundos de vales íngremes e fechados (WILSON e GALLANT, 2000).

Como o algoritmo D8, o algoritmo Rho8 não pode modelar a dispersão de fluxo, mas simula redes de canais mais próximas da realidade. O processo randômico resulta também em uma rede de drenagem com direções diferentes a cada passo que o programa executa a operação. Essas características são indesejáveis e o algoritmo Rho8 deixa de ser uma alternativa interessante em relação ao algoritmo D8. Os algoritmos FD8 e o DEMON possuem melhores soluções aos problemas apresentados pelo algoritmo Rho8 (WILSON e GALLANT, 2000).

Os algoritmos FD8 e FRho8 são modificações dos algoritmos originais D8 e Rho8 que permitem a representação da divergência do fluxo. Esse par de algoritmos permite que o fluxo seja distribuído para múltiplos vizinhos nas áreas de topo sobre canais definidos e utiliza os algoritmos D8/Rho8 para pontos abaixo da presumida nascente do canal. Nas áreas de topo a proporção do fluxo é definida para cada *pixel* vizinho à jusante por uma medida ponderada do declive (FREEMAN, 1991; QUINN *et al.*, 1991; WILSON e GALLANT, 2000).

Os algoritmos FD8 e FRho8 fornecem uma distribuição mais realística da área de contribuição em áreas de topo, como também eliminam os caminhos de fluxo paralelo do algoritmo D8. A dispersão do fluxo pode ser considerável nos vales, pois geralmente os canais estão bem definidos. Para superar isto, o algoritmo de fluxo-dispersão é desativado e substituído pelo D8 (ou Rho8), onde quer que a área de contribuição exceda um *threshold* especificado pelo usuário no *software TAPES-G* (WILSON e GALLANT, 2000).

A Figura 3.11-C emprega o algoritmo FD8 com uma área máxima de *threshold*. Deste modo, a dispersão do fluxo é aplicada para toda a área. Nota-se a variação suave da área de contribuição nas áreas de topo em contraste com os resultados do algoritmo D8 e Rho8 com considerável dispersão do fluxo nas áreas de vale (WILSON e GALLANT, 2000).

O algoritmo denominado DEMON (Figura 3.11-D) atua de modo diferente na delineação do fluxo de acumulação e de dispersão. Este método é conceitualmente similar a “fluxo em tubo” *stream-tube* com base em curvas de nível do MDE.

Primeiramente foi proposto por Lea (1992), que considera o fluxo como se fosse uma esfera solta sobre uma superfície plana na direção do declive mais íngreme, ou ângulo da orientação da vertente, partindo-se do princípio de que a esfera foi solta do centro de bloco de grade (3x3). Então, um plano é ajustado pela média das elevações dos *pixels* deste bloco. Este algoritmo determina a direção de fluxo em função do ângulo da orientação da vertente local a cada 1° (em vez dos 45° adotados no D8). Costa-Cabral e Burges (1994) ampliam as idéias de Lea (1992) e adotam os valores de elevação nas extremidades do *pixel* e assim uma superfície plana é ajustada para cada *pixel*, em vez de ser centrado e um bloco de grade (3x3).

O algoritmo DEMON, em relação ao tempo de processamento, é muito similar ao FD8/FRho8, com resultados iguais ou melhores que estes, produzindo poucos artefatos, embora apresente uma tendência para definir o fluxo nas direções cardinais norte, sul, leste, oeste (WILSON e GALLANT, 2000).

Tarboton (1997) identifica problemas na geometria dos métodos empregados por Lea e DEMON, gerando um fluxo de direção inconsistente, além das dificuldades no

dispersão será introduzida, mas isto será minimizado em função de que o fluxo nunca será distribuído entre mais que dois *pixels* descendentes (TARBOTON, 1997).

Muitos pesquisadores, entre eles Garbrecht e Martz (2000), criticam o uso do algoritmo D-8 na determinação da área de bacia e da rede de drenagem em função de permitir somente uma única direção de fluxo sobre a grade do MDE. O algoritmo D-8 falha ao tentar representar o fluxo divergente sobre declives convexos (COSTA-CABRAL e BURGESS, 1994; FREEMAN, 1991; QUINN *et al.*, 1991), o que pode comprometer a direção do fluxo do canal (FAIRFIELD e LEYMAIRE, 1991).

Garbrecht e Martz (2000) afirmam ainda que o algoritmo de direção de fluxo múltiplo parece dar resultados superiores nas áreas de nascente. Por outro lado, o algoritmo de direção de fluxo único é superior em zonas de fluxo convergente e ao longo de vales bem definidos (FREEMAN, 1991; QUINN *et al.*, 1991). Para se determinar o fluxo sobre áreas de topo, o algoritmo de fluxo múltiplo pode ser mais apropriado, mas, se o objetivo primário for a delineação da rede de drenagem para amplas áreas de drenagem com canais bem desenvolvidos, o uso do algoritmo de direção de fluxo único apresenta melhores resultados (MARTZ e GARBRECHT, 1992).

3.3.3 Remoção das depressões

Segundo Garbrecht e Martz (2000), o método do algoritmo D-8, como também outros métodos, apresenta dificuldades na identificação da drenagem na presença de depressões e áreas planas com interrupção do fluxo (GARBRECHT e STARKS, 1995; MARTZ e GARBRECHT, 1998). Essas características são frequentemente resultado de ruído nos dados, erros de interpolação e erros sistemáticos nos valores de elevação no processo de geração do MDE. Tais fatos ocorrem na maioria dos MDEs e são considerados como dados falsos, principalmente por causa da origem predominantemente numérica destes. As dificuldades surgem do fato de que *os pixels* da grade *raster* em depressões, áreas baixas e áreas planas não possuem nenhum *pixel* vizinho com a mais baixa elevação e, por conseguinte, não possui nenhum caminho de fluxo descendente para um *pixel* vizinho. É uma prática muito comum remover as depressões e áreas planas antes da delineação da rede de drenagem.

Segundo Burrough e McDonnell (1998), quando uma superfície contínua é aproximada para uma grade quadrada, é inevitável que alguns *pixels* estejam cercados por vizinhos que possuam elevações mais altas. Essas depressões fechadas podem ser reais ou simplesmente artefatos gerados no processo de geração das grades. Depressões com problemas são frequentemente geradas em vales estreitos, onde a largura do fundo do vale é menor que o tamanho do *pixel* e pode ocorrer em todos os níveis de resolução. Eles também podem acontecer em áreas de relevo suave por erros de interpolação.

De acordo com Garbrecht e Martz (2000), pode-se ou não desejar remover primeiramente as depressões de um MDE, e especificam-se uma ou mais regras para determinar direções de drenagem e a conectividade dos *pixels* individuais para determinar comprimentos de fluxo de canal e áreas de contribuição à montante, seguindo procedimentos desenvolvidos por Jenson e Domingue (1988) e Martz e De Jong (1988).

O problema com artefatos em depressões é que estas interrompem a topologia de drenagem e precisam ser removidas, geralmente por estratégias de corte ou preenchimento. Cortar por meio de máscaras no limite dos *pixels* até encontrar o próximo *pixel* de elevação mais baixa requer o aumento do quadro de busca, para encontrar o *pixel* ou a série dos *pixels* de mesma elevação ou o *pixel* mais baixo da depressão. Uma vez estabelecida a trajetória, as ligações topológicas apropriadas são anexadas para os *pixels* ao longo da rota com suas verdadeiras elevações. O preenchimento envolve o aumento das elevações dos *pixels* centrais para um ou mais *pixels* vizinhos e, então, examina-se se o fluxo da drenagem a jusante toma outra rota. Se isso não ocorrer, a elevação deve ser aumentada novamente até que seja estabelecida a ligação (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

Band (1986) simplesmente aumentou a elevação dos *pixels* da depressão desde o caminho descendente até um *pixel* que esteja disponível com a restrição de que o fluxo não retorne a um *pixel* da depressão.

O'Callaghan e Mark (1984) sugerem uma suavização do MDE *a priori* para reduzir o tamanho e número das depressões. Contudo, Jenson e Domingue (1988)

relatam que esse procedimento remove depressões rasas, mas depressões mais profundas permanecem. Uma discussão mais apropriada pode ser encontrada em Tribe (1992) com comentários subsequentes por Martz e Garbrecht (1995).

Garbrecht e Martz (2000) relatam que estes métodos lidam com situações topográficas complexas, como depressões aninhadas, depressões com área planas, depressões truncadas e áreas planas na margem do MDE. Eles envolvem preenchimento para cada depressão no MDE, até a elevação de transbordamento da depressão. Esse procedimento considera que todas as depressões são resultados da subestimação da elevação. Entretanto, algumas depressões surgem da obstrução de caminhos de fluxo através de elevações superestimadas. Nestes casos, a quebra da obstrução é mais apropriada do que o preenchimento da depressão (MARTZ e GARBRECHT, 1999). A quebra da obstrução é mais eficaz em MDEs de paisagens de relevo baixo relacionado à resolução vertical de um MDE, pois depressões causadas por obstrução do caminho do fluxo são mais comuns nessas situações. O preenchimento combinado com o método de quebra foi proposto por Garbrecht *et al.* (1996).

Um método mais recente foi apresentado por Garbrecht e Martz (1995). Este método parte do pressuposto que a superfície de drenagem em paisagens naturais se concentra em terrenos mais baixos e distancia-se dos terrenos mais altos. Para reproduzir tal tendência em uma superfície plana são necessários dois gradientes baixos para forçar o fluxo para longe dos terrenos mais altos cercados por áreas planas e atrair o fluxo para os terrenos mais baixos da vizinhança com áreas planas. Esse método resulta em um padrão de direção de fluxo convergente sobre superfícies planas (GARBRECHT *et al.*, 1996).

A remoção das depressões é um processo interativo considerado por alguns como um mal necessário, pois superfícies planas não só é o resultado do preenchimento da depressão, como também podem representar uma paisagem verdadeiramente plana (o que raramente acontece). Do mesmo modo, depressões fechadas e/ou semifechadas podem ser características reais em algumas paisagens naturais (relevos de origem glacial ou cárstico). Em Alberta, no Canadá, um estudo de

armazenamento de água de superfície depois do derretimento da neve da primavera depende parcialmente da presença de muitas depressões parcialmente interconectadas. Ainda, pode ser também o resultado de uma baixa resolução vertical ou horizontal de um MDE (BURROUGH e McDONNELL, 1998; GARBRECHT e MARTZ, 2000).

Uma vez identificados depressões e platôs, o MDE pode ser ajustado de forma que estes sejam removidos. Para um conjunto de dados extensos e complexos com baixa resolução espacial, tem-se uma série de alternativas práticas, a saber: digitalizar o traçado da rede de drenagem, converter os vetores do canal para uma grade e, então, assinar os *pixels* deste canal com um nível mais baixo na rede de drenagem (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

3.3.4 *Threshold* de área para formação de canais

Segundo Christofolletti (1980), o escoamento pluvial inicia-se quando a quantidade de água precipitada é maior que a velocidade de infiltração. Os minúsculos filetes de água formados vão se engrossando à medida que descem pela encosta definindo um escoamento concentrado em forma de enxurradas, deixando marcas sensíveis na superfície da encosta, especialmente nas vertentes desnudas da cobertura vegetal.

As vertentes configuram-se como o cenário no qual se processa a formação de canais e constitui-se em um dos setores mais importantes da pesquisa geomorfológica, englobando a análise de processos e formas, sendo que essas são representativas do sistema morfogénético (CHRISTOFOLLETTI, 1980).

Christofolletti e Perez Filho (1975a) em estudo comparativo de mapas topográficos e fotografias aéreas para análise da drenagem diferenciam a rede de sulcos esculpida pelas enxurradas, do rio no seu vale fluvial, pois este possui uma grandeza maior que os sulcos e caneluras observadas na vertente. Essa diferenciação é importante considerando-se o processo de fotointerpretação utilizado para a definição da rede de drenagem.

Em seu sentido amplo, vertente significa superfície inclinada, não horizontal, sem apresentar qualquer implicação genética ou de posicionamento. Seu conceito define a superfície propriamente dita, bem como sua declividade, frequentemente conhecida como vertente de morro ou vertente lateral de vale (CHRISTOFOLETTI, 1980; BIGARELLA, 2007).

Dylik (1968) *apud* Christofolletti (1980) e Bigarella (2007) descreve a vertente como uma forma tridimensional modelada pelos processos de denudação atuantes tanto no passado como no presente, representando a conexão dinâmica entre o interflúvio e o fundo de vale.

Segundo Christofolletti (1980), os elementos que levaram Jan Dylik (1968) a propor a definição acima são o limite superior que indica o divisor de águas numa área mais alta e mais distante, de onde provêm um transporte contínuo de materiais sólidos para a base da vertente; limite inferior caracterizado pela alteração de processos atuantes com presença de descontinuidade naturais, como terraços, pedimentos, falésias e outros; limite interno caracterizado pelo processo de meteorização do embasamento rochoso e o processo de escoamento que abarca tanto os movimentos de massa como os processos fluviais.

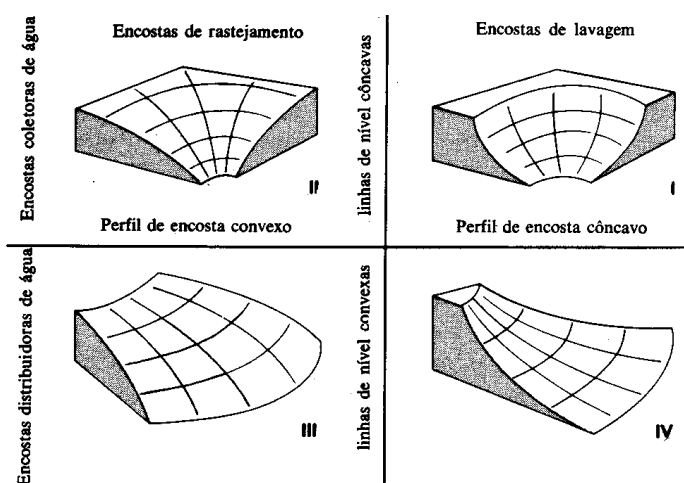
De acordo com Derruau (1965), Christofolletti (1980) e Bigarella (2007), o perfil típico da vertente apresenta uma convexidade no topo e uma concavidade na parte inferior, separados por um ponto de inflexão ou por um segmento retilíneo para uma vertente considerada normal, ou seja, lisa e sem ravinamentos.

A convexidade das partes superiores da encosta, em geral, é explicada pelo escoamento difuso (conjunto de pequenos filetes com ação erosiva fraca que se faz no sentido lateral e não vertical) e pelo rastejamento ou *creep* (movimento lento que afeta a porção superficial pela ação da gravidade). Ambos os processos são incapazes de formar concavidades (PENTEADO, 1978).

Nos locais onde as curvas de nível apresentam convexidade na baixa vertente, nota-se a presença de esporões, narizes ou protuberâncias do terreno, nos quais o movimento do fluxo superficial segue sentido diverso. Os esporões tendem a ser mais secos que as concavidades adjacentes, onde as curvas de nível se apresentam

côncavas. A água procedente das vertentes superiores tende a concentrar-se nas concavidades do terreno (BIGARELLA, 2007; BLOOM, 1978).

Bloom (1972), utilizando-se dos modelos geométricos de vertente de Troeh (1965), divide os quatro principais tipos de encostas em dois grupos (Figura 3.13): a) “coletoras de água”, com linhas de nível côncavas (quadrantes I e II); e b) “distribuidoras de água”, com linhas de nível convexas (quadrantes II e IV). O eixo vertical do diagrama separa as encostas com perfis convexos, que facilitam o desenvolvimento do rastejamento (quadrantes II e III) das encostas com perfis côncavos, que favorecem a lavagem pela água das chuvas (quadrantes I e IV).



Fonte: Troeh (1965)

Figura 3.13 – Forma e processos atuantes das encostas

Segundo Christofolletti (1980), as vertentes constituem partes integrantes das bacias hidrográficas e não podem ser analisadas sem que se considerem as relações entre elas e a rede hidrográfica. A forma e o ângulo das vertentes deverão estar ajustadas para fornecer a quantidade de detritos que o curso d'água pode transportar. Inversamente, os parâmetros hidráulicos deverão estar ajustados para transportar a quantidade de material fornecido pelas vertentes.

O autor ainda argumenta que existe uma relação entre o comprimento e a declividade das vertentes com a densidade de drenagem. A distância horizontal média entre dois cursos d'água corresponde à recíproca da Densidade da drenagem (Dd) (comprimento total dos canais dividido pela área da bacia) ($1/Dd$) e a distância

horizontal entre o interflúvio e o canal fluvial é a metade da anterior ($1/2D_d$), sendo que o ângulo de inclinação de uma vertente é dado pela relação entre a amplitude altimétrica e a distância do interflúvio até o canal fluvial.

A partir dessa relação, pode-se inferir que, quanto maior a densidade de drenagem e uma área com relevo constante, menores e mais inclinadas serão as vertentes; por outro lado, quanto maior a amplitude altimétrica e uma área de densidade de drenagem constante, mais longas e mais inclinadas serão as vertentes (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Ferreira (1999a) gerou um modelo espacial da Densidade de drenagem (D_d) denominado de Modelo de Distâncias Interfluviais (MDI) e destacou a importância do Coeficiente de manutenção (C), definido por Schumm (1977a) como o inverso da D_d (área da bacia dividida pelo comprimento total dos canais). De acordo com Morisawa (1962), esse parâmetro representa a área de drenagem necessária para manter uma unidade de comprimento de canal fluvial na bacia hidrográfica.

Segundo Schumm (1977b), um dos problemas e uma das questões críticas em geomorfologia recai sobre quais condições de *stress* deverá ocorrer uma dramática alteração no sistema geomórfico com modificação da paisagem, a considerar que isso depende do *stress* exercido pelas condições externas, bem como na própria resistência dos materiais. Geralmente é nesse contexto que os limiares (*thresholds*) são considerados. No caso dos *thresholds* hidráulicos, estes nem sempre se apresentam como uma reação progressiva do sistema, mas sim por um aumento muito lento do *stress*.

Montgomery e Dietrich (1992) relatam que Gilbert (1909) é o primeiro a reconhecer a aparente extensão finita para a dissecação da paisagem. Horton (1945) propôs que esta dissecação seja estabelecida a partir do comprimento da vertente que poderia ser tão curta quanto o necessário para gerar o fluxo suficiente para iniciar uma superfície de erosão e, por conseguinte, a formação de canais.

Desde os anos 40, tem-se proposto que a dissecação do relevo em vales distintos é controlada por um *threshold* de formação do canal, que estabelece uma escala finita à paisagem. Este *threshold* é a distância mais curta do topo da vertente à

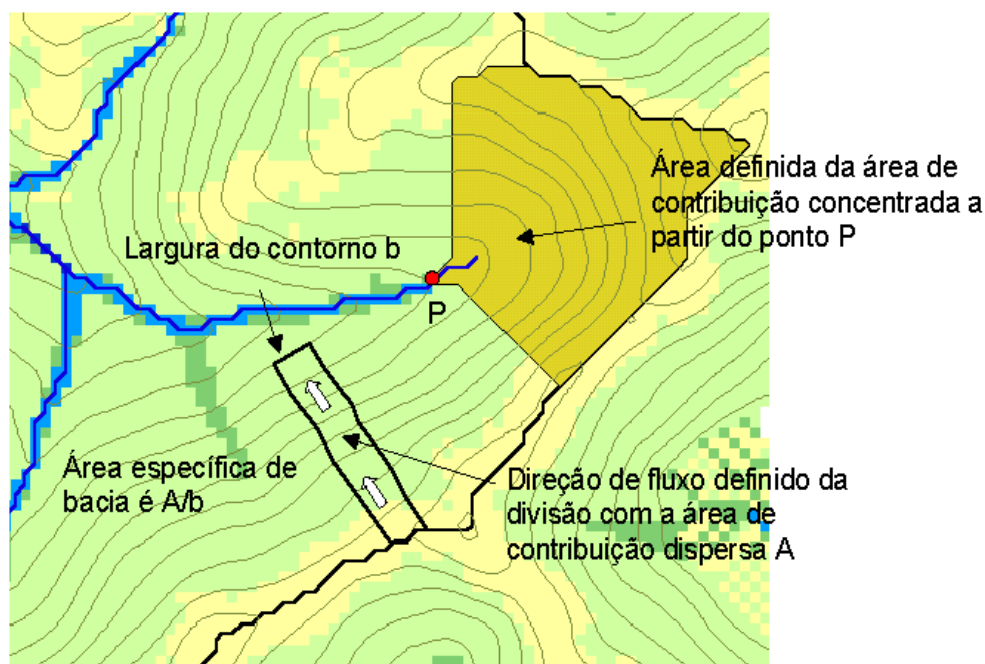
jusante necessária para produzir uma nascente de canal. Esse campo de pesquisa também aponta que este *threshold* topográfico está associado ao posicionamento das nascentes, demarcando também o limite entre uma área de relevo suave, vertentes não dissecadas e vales profundos para os quais a água flui (MONTGOMERY e DIETRICH, 1992).

As características da rede de drenagem dependem da definição da nascente do canal no MDE, uma vez que as nascentes de canal sejam definidas essencialmente pelas características morfométricas e topológicas da rede de drenagem o que implica uma relação de dependência com essas nascentes. Assim, a própria identificação das nascentes é considerada como um fator crítico para a extração representativa da rede de drenagem em MDEs (GARBRECHT e MARTZ, 2000; TARBOTON *et al.*, 1991).

O método do algoritmo D-8 define um único caminho de fluxo descendente por meio do *pixel* mais íngreme. A rede de drenagem é identificada pela seleção de uma área de bacia à montante na qual a nascente de um canal se origina; todos os *pixels* com uma área maior que este *threshold* de área são definidos como parte da rede de drenagem. Esse procedimento define uma rede drenagem de modo simples e gera automaticamente redes conectadas (MARTZ e GARBRECHT, 1992).

Tarboton e Ames (2001) destacam que os processos hidrológicos são diferentes em áreas de topo e em vales. Nos vales o fluxo é concentrado e a largura do canal está associada à descarga, de acordo com a geometria hidráulica (LEOPOLD *et al.*, 1964).

Ainda segundo Tarboton e Ames (2001) a partir da escala da paisagem, um canal geralmente é representado por uma linha sem nenhuma medida de largura, assim a área de drenagem ($A = m^2$) que contribui para cada ponto em um canal pode ser quantificada. Os fluxos nas áreas de topo são dispersos, sendo assim, a área que drena para um ponto é zero, pois a largura de um caminho de fluxo que escoar para um determinado ponto desaparece. Logo, nas áreas de topo, o fluxo e a área de drenagem necessitam ser quantificados por unidade de largura (ex.: $m^3/s/m = m^2/s$ por fluxo). A área específica de bacia (*specific catchment area*), **a**, é definida como área de contribuição por unidade de contorno (*upslope drainage area per unit contour*), **b**, ($a = A/b$) (MOORE *et al.* 1991) com unidade de medida (ex.: $m = m^2/m$) (ver Figura 3.14).



Fonte: Adaptado de Tarboton e Ames (2001)

Figura 3.14 - Área de contribuição por unidade de contorno

Fernandes *et al.* (2001), com base em diversos estudos geomorfológicos sobre a vulnerabilidade das encostas, comprovam a eficiência do parâmetro topográfico — área de contribuição por unidade de contorno (*specific catchment area*). Pois esse se relaciona diretamente com a concentração dos fluxos de água e com a consequente saturação dos solos, podendo ser adotado em modelos hidrológicos, geomorfológicos e ambientais (áreas susceptíveis a deslizamentos).

Segundo Garbrecht e Martz (2000), dois métodos prevalecem para a definição das nascentes de uma rede de drenagem nos MDEs: o método de *threshold* de área constante e o método de área com suporte crítico dependente do declive (MONTGOMERY e FOUFOULA-GEORGIOU, 1993; TRIBE, 1992).

O método de *threshold* de área constante assume que as nascentes de um canal representam a transição entre o perfil convexo (fluxo disperso) e o perfil côncavo (fluxo concentrado) das vertentes de um canal. Esse método possui uma aplicação bem difundida em Band (1986); Morris e Heerdegen (1988); Tarboton *et al.* (1991); Gardner *et al.* (1991), e um detalhamento desta aplicação, uso e implicações são discutidos por

Tarboton *et al.* (1991) e Montgomery e Foufoula-Georgiou (1993) (GARBRECHT e MARTZ, 2000).

O método de *threshold* de área com suporte crítico dependente do declive assume que a nascente do canal representa um *threshold* erosivo. Essa suposição considera que a nascente do canal é o resultado de uma mudança de processos de transporte de sedimento em fluxo disperso para um fluxo concentrado, em vez de uma transição espacial nos perfis de declive longitudinais. Esse método foi apresentado por Montgomery e Foufoula-Georgiou (1993) e está fundamentado no trabalho de identificação das nascentes de um canal Dietrich *et al.* (1993) (GARBRECHT e MARTZ, 2000).

A principal diferença entre os métodos de *threshold* de área constante e dependente do declive é a variabilidade espacial da declividade. Montgomery e Foufoula-Georgiou (1993) relatam que o método de *threshold* de área dependente do declive apresenta uma densidade de drenagem maior nas áreas mais íngremes do relevo, assemelhando-se ao que é encontrado nas paisagens naturais (GARBRECHT e MARTZ, 2000).

Tarboton *et al.* (1991), em seus trabalhos, propõem uma revisão da literatura considerando a importância da descrição quantitativa de um sistema fluvial estabelecida por Horton (1932/1945), Stralher (1952,1957) e Shreve (1966), permitindo definir relações aproximadamente constantes entre o número de canais, comprimento dos canais, área de contribuição do canal e declive do canal com as ordens hierárquicas sucessivas das bacias. Horton/Stralher consideram a ordem do canal como uma medida topológica e dimensional do tamanho ou escala do segmento de um canal ou da rede de drenagem — uma escala física associada com a dissecação da paisagem elaborada pela rede de drenagem expressa pelo parâmetro morfométrico Densidade de drenagem (Dd), definida por Horton (1932,1945).

Broscoe (1959) *apud* Tarboton *et al.* (1991) observou que a medida de *drop* H_w ao longo de canais de ordem w foi aproximadamente constante (ex.: independente da ordem). A medida de *drop* é definida pela diferença das elevações entre o início e o fim dos segmentos de canais de diferentes ordens hierárquicas de Stralher.

Tarboton *et al.* (1991) estipularam que as leis geomorfológicas, incluindo a lei da constante de *drop* do canal (Broscoe, 1959), podem assegurar a geração de uma rede de drenagem similarmente ao apresentado em campo. Então sugerem a utilização do teste *t* de *Student* para avaliar a diferença das altitudes de canal de 1° ordem e das altitudes de canais de todas as ordens superiores para uma rede de drenagem gerada a partir de diferentes valores de *threshold* de área. Um *threshold* de área mínimo resulta em uma rede de drenagem onde o teste *t* de *Student* indica que a medida da área não seja estatisticamente diferente de um intervalo de confiança de 95% (ex.:, $t \sim 2$) que deverá ser adotado.

Garbrecht e Martz (1995, 2000) ampliaram o uso do método *threshold* de área constante permitindo que o *threshold* de área variasse com o MDE. Isso é particularmente útil em bacias grandes nas quais litologia e as características de rede de drenagem exibem padrões espaciais distintos. Porém, o usuário tem que estabelecer *a priori* os valores de *threshold* de área constante em sua área de estudo.

O SIG *ILWIS* apresenta a possibilidade na qual podem ser adicionados o tipo de litologia e solo à modelagem hidrológica, enfatizando a variabilidade espacial. Se um mapa geológico ou pedológico está disponível, as unidades deste mapa podem ser reclassificadas para representar valores *threshold* para o fluxo acumulado. Por exemplo, unidades com solos arenosos profundos podem ter *thresholds* mais altos comparados a solos mais rasos sobre xistos (refletindo uma baixa permeabilidade e pouca resistência à erosão) (MAATHUIS, 2006). O módulo do *TauDEM* também permite a inserção de uma grade de pesos para a definição de um *threshold* mais adequado às características físicas da paisagem (TauDEM, 2005).

O método de *threshold* de área constante é mais prático e mais utilizado. A preferência atual por este método pode estar relacionada ao fato de que os valores de declive local são difíceis de serem obtidos pelos MDEs. Realmente, um MDE com resolução horizontal e vertical de 30m e 1m, respectivamente, poderá produzir somente declives locais zero, 0,03 ou perto disso. Assim, uma estimativa precisa do declive local requer também uma alta resolução do MDE ou de medidas em campo (GARBRECHT e MARTZ, 2000).

Outro assunto discutido por Garbrecht e Martz (2000) é a frequente preocupação com relação à extração das redes hidrográficas em MDEs e o posicionamento preciso dos canais sobre o modelo digital da paisagem. Comparações com mapas atuais ou fotografias aéreas mostram frequentemente discrepâncias contínuas, particularmente em paisagens de planície.

O argumento primário para essa discrepância está em função da aproximação dos MDEs que não podem capturar informação topográfica detalhada, encoberta pela resolução do MDE. Embora a posição do canal no modelo digital da paisagem seja consistente com a topografia digital, poderá não refletir o caminho de drenagem atual em campo. De um ponto de vista prático, este dilema pode ser superado "fundindo" o caminho dos canais junto com os caminhos pré-digitalizados. Isso pode ser alcançado reduzindo a elevação dos *pixels* do MDE artificialmente ao longo das linhas digitalizadas ou elevando todo o MDE, excluindo-se ao longo de caminhos de fluxo (CLUIS *et al.*, 1996; MAIDMENT *et al.*, 1996). Contudo, muitos cuidados devem ser tomados com esse procedimento, pois poderá produzir caminhos de fluxo que não são consistentes com a topografia digital.

Apesar da necessidade de se representar a rede de drenagem com base em padrões seguros de *thresholds* de área, experiências de Maidment (2002) sugerem uma faixa entre 100 e 10.000 *pixels* e que na prática o importante é analisar visualmente a rede de drenagem resultante para avaliar se a mesma é ou não representativa da hidrografia real. Caso se considere insuficiente, adota-se um valor maior ou menor até se chegar a uma rede de drenagem consistente a uma densidade desejada.

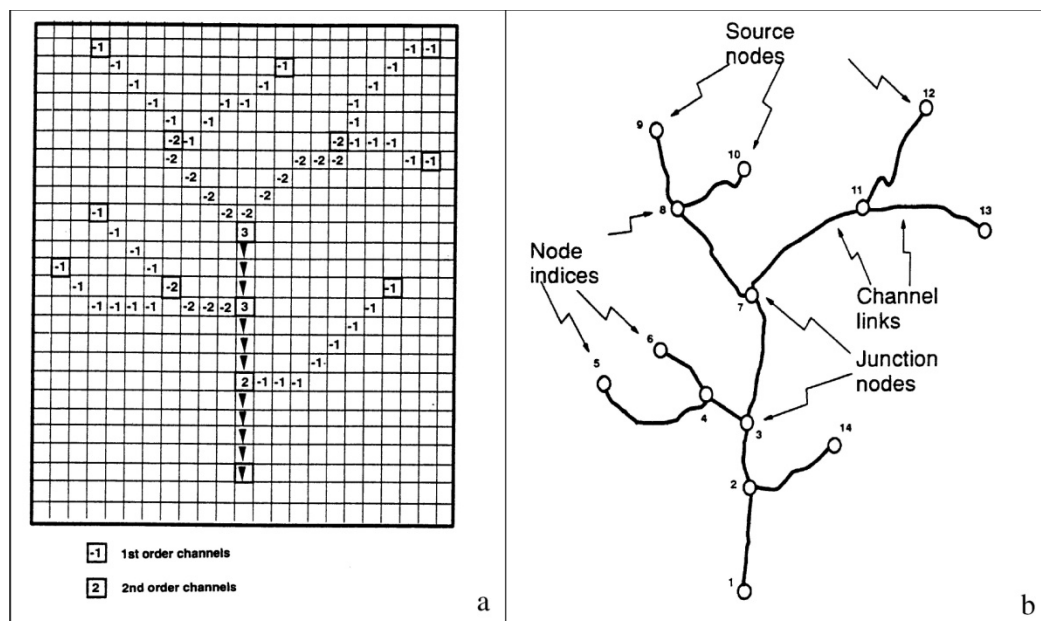
De acordo com Rodrigues e Adami (2005), um conjunto de fatores pode influenciar a extração da rede de drenagem a partir de MDEs, como a resolução espacial deste, o pré-processamento dos dados, com a retirada das depressões ou forçando o fluxo em áreas planas, a utilização ou não de uma rede preexistente. Contudo, estes métodos contam com a eficiência e a rapidez no processamento, mas em muitos casos não substituem informações morfométricas retiradas de fotos aéreas, quando se possui profissionais bem qualificados.

3.3.5 Definição da hierarquia fluvial e sub-bacias

Com a definição da grade de fluxo acumulado com base no *threshold* de área, um canal de drenagem será delineado a partir de uma área mínima de drenagem. Deste modo, áreas ou fluxos acumulados menores que este valor de *threshold* serão considerados canais. Estes conceitos definem o processo de segmentação da bacia e todas as características espaciais da topologia da rede de drenagem e das sub-bacias resultantes. Antes dos canais serem definidos, uma saída é atribuída pelo usuário, indicando o final da rede de drenagem. O divisor de drenagem é definido pela posição das células que escoam para esta saída (GABRECHT e MARTZ, 2000).

A partir da definição de uma rede de drenagem oriunda de um MDE no formato *raster* e, de acordo com o proposto por Horton (1945), uma rede consiste de um conjunto de ligações de canais conectados por nós. No ambiente, SIGs e de modelagem hidrológica, estas ligações de canais e áreas de contribuição adjacentes são associadas com informação topológicas à montante e à jusante da ligação, estabelecendo uma conectividade (GABRECHT e MARTZ, 2000).

A definição da hierarquia fluvial com o nó indexado é fundamental para o controle da automação da rotina de fluxo e da indexação numérica dos nós, permitindo a ligação a atributos tabulados da rede de drenagem (GABRECHT e MARTZ, 1997a), o que permite diversas análises espaciais em ambiente SIG.



Fonte: Garbrecht e Martz (1997a)

Figura 3.15a - Rede de conexão *raster*

Figura 3.15b - Rede de conexão vetorial

Garbrecht e Martz (1997a), a partir de um *raster*, desenvolveram um modelo numérico que utiliza o método de hierarquia fluvial de Strahler (1957) e Shreve (1967). As ordens de Strahler são definidas *pixel a pixel* a partir dos nós de ligação de canais em direção de jusante até o nó de saída (Figura 3.15a), sendo que as coordenadas de cada ligação são armazenadas em uma tabela de atributos. Como procedimento posterior, as ordens Shreve utilizam esta tabela para buscar e indexar nós a partir do nó de saída, seguindo sempre à esquerda até que o próximo nó de saída seja alcançado (Figura 3.15b), a indexação é armazenada em uma tabela.

Maidment (2002) apresentou procedimentos para o formato vetorial utilizando o banco de dados em ambiente SIG (*ArcGIS*) com as informações conectadas em planos de informação distintos. A estrutura básica é uma rede geométrica linear com topologia, o que permite uma maior intervenção do usuário no processo de determinação dos fluxos, bacias, corpos de água e pontos (locais de medida), canais podem ser digitalizados ou convertidos de *raster* para vetor. O SIG automaticamente atualiza as informações no banco de dados.

3.4 PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

A rede de drenagem e as características topográficas, desde há muito tempo, configuram-se como elementos fundamentais na análise da paisagem, bem como para a obtenção de informações sobre a capacidade hidrológica de bacias hidrográficas.

Segundo Christofolletti (1970), os primeiros trabalhos realizados com o intuito de medir as formas de relevo através de processos sistemáticos e racionais datam do final do século XIX, especialmente entre os pesquisadores sediados nos países germânicos, mais propriamente na Alemanha, Áustria e Suíça.

Mas é somente com a objetividade de Horton (1945) que a análise morfométrica deixa de ser abordada de forma qualitativa. Termos utilizados para descrever as bacias são substituídos por medidas lineares, procurando responder como processos erosivos podem ser quantificados a partir do escoamento superficial. A abordagem quantitativa das bacias de drenagem serviu de base para uma nova concepção metodológica e passou a ser adotada e empregada pelos pesquisadores na análise morfométrica em bacias hidrográficas.

Esse autor introduziu uma sutil modificação no conceito de Densidade de drenagem (D_d), como sendo o comprimento total dos canais de escoamento no interior de determinada bacia hidrográfica, e não mais de uma área qualquer.

O conjunto da rede de drenagem pode ser considerado como resposta às condicionantes ambientais. Assim, a D_d representa uma medida de eficiência do sistema de drenagem em remover o excesso da precipitação que se transforma em escoamento superficial da bacia. Se a rede está devidamente ajustada, é possível estabelecer correlação entre a D_d e as condições ambientais controladoras (CHRISTOFOLETTI, 1981; FERREIRA, 1996, PATTON e BACKER, 1976). Outra característica D_d é com relação a sua dependência ao tamanho da área. Assim, os seus valores tendem a ser maiores nas bacias de ordem hierárquica menor (GREGORY e WALLING, 1973).

Para a ordenação dos canais, Horton (1945) estabelece o curso principal, como de mesma ordem desde a sua nascente até sua foz. Com o desenvolvimento das pesquisas, Strahler (1952) definiu que a confluência de um canal de mesma ordem estabelece uma ordem superior à jusante.

Horton (1945) foi o primeiro a definir a F_1 como a relação existente entre o número de rios ou cursos de água e a área da bacia hidrográfica. Ao adotar o sistema de ordenação de Strahler (1952), aplica-se a seguinte fórmula:

$$F_1 = \Sigma n_1 / A \text{ onde:}$$

F_1 = Frequência de canais de 1º ordem

n_1 = número de segmentos de canal de 1º ordem

A = área da bacia

Estudos realizados indicam que a F_1 é influenciada pela resistência à erosão e pela permeabilidade, especialmente nas camadas superficiais da litologia. Assim, representa a capacidade de gerar novos cursos de água, bem como reflete as condições climáticas e o comportamento hidrológico do sistema de drenagem, delineando feições geomorfológicas. Portanto, o conjunto da rede de drenagem pode ser indicativo de condicionantes ambientais (CARLSTON, 1963; CHRISTOFOLETTI, 1981; FERREIRA, 1996; PATTON e BACKER, 1976; ZAVOIANU, 1985;).

Miller (1953) propôs o I_c , definido pela relação existente entre a área da bacia e a área do círculo de mesmo perímetro. A fórmula mais empregada na literatura pelos pesquisadores é a seguinte:

$$I_c = A / A_c \text{ onde:}$$

I_c = o índice de circularidade

A = área da bacia considerada

A_c = a área do círculo de bacia de perímetro igual a da bacia considerada.

O valor máximo a ser encontrado é igual a 1,0, sendo que, quanto mais próximo da unidade, mais próximo da forma circular estará a bacia de drenagem.

O formato de uma bacia hidrográfica condiciona o modo pelos quais os canais são formados e alterados. Em função da velocidade e da força do fluxo das águas nas bacias de formato mais circular, os processos de erosão e a capacidade de transporte também são maiores; como consequência, o material carregado em suspensão é elevado, portanto, acelerando o processo de evolução destas bacias de drenagem (CHRISTOFOLETTI, 1970; CHRISTOFOLETTI e PEREZ FILHO, 1975b; MORISAWA, 1962; ZAVOIANU, 1985).

A Declividade da bacia sempre foi considerada como fator determinante no desencadeamento de processos erosivos. Em um sistema de drenagem, os vales e a declividade dos canais controlam diretamente o potencial de energia cinética do fluxo de água, e deste modo a intensidade do escoamento pluvial, dos processos de erosão e do transporte. Esses fatores tendem a estabelecer o equilíbrio em relação a todas as condicionantes geográficas locais (ZAVOIANU, 1985).

Christofoletti e Perez Filho (1975b) observaram que o procedimento para o cálculo da Taxa de Relevô (Rh) acarreta, por vezes, diversas decisões subjetivas, principalmente quando o rio é sinuoso, ou ainda quando a bacia de drenagem possui um formato incomum.

Em estudos realizados por Jesus (2001), com a Taxa de Relevô (Rh), esta subjetividade também foi confirmada. Assim, este parâmetro foi substituído pela Dm que considera em seu cálculo toda a extensão areal da bacia, obtido através de uma matriz quadrada formada por *pixels*, onde cada *pixel* desta matriz recebe o valor de declividade correspondente. Deste modo, a Dm é definida pela relação entre a somatória dos valores de declividade de todos os *pixels* de uma bacia e número total dos *pixels* da bacia considerada.

Morisawa (1962) estabeleceu para as bacias do Platô Apalachiano uma correlação de parâmetros morfométricos com parâmetros hidrológicos e concluiu que a F_1 , o I_c e a Rh podem ser substituídas unicamente pelo Fator topográfico definido pela relação do maior canal principal por unidade de área quadrada pela taxa de inclinação do canal da nascente até a foz.

A autora acrescenta, ainda, que a F_1 , o lc e a Rh são parâmetros que não duplicam nenhum fator geomórfico e, além disto, são independentes da área. Associados, esses parâmetros representam a forma, a declividade e a composição da rede de canais de uma bacia hidrográfica, comportando-se, assim, como parâmetros determinantes das características hidrológicas das bacias hidrográficas. Deste modo, definiu o F_t como um fator de alta correlação com o pico de intensidade do escoamento pluvial expresso pelo produto destes três parâmetros morfométricos através da seguinte equação:

$$F_t = F_1 \cdot lc \cdot Rh$$

Ferreira (1991) adotou o F_t como um de seus parâmetros para identificação de regiões homogêneas em função do potencial hidrológico, encontrando fortes correlações com aspectos fisiográficos do ambiente.

Jesus (2001) considerando essas evidências adotou o F_t como parâmetro morfométrico buscando um zoneamento ambiental em sub-bacias hidrográficas que estabelecesse maior proteção dos seus mananciais, tendo em vista que um maior fluxo de água, revela também, como consequência, maior capacidade de desencadeamento de processos erosivos. Nesse trabalho a Taxa de Relevo (Rh) foi substituída pela Dm da sub-bacia, com isso a equação do Fator topográfico tornou-se:

$$F_t = F_1 \cdot lc \cdot Dm$$

IV – MATERIAL E MÉTODOS

4.1. MATERIAL

O material bibliográfico utilizado destaca temas relacionados aos fundamentos teóricos da Aerofotogrametria com ênfase para as últimas décadas em função do avanço dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e do Sensoriamento Remoto (SR) com a inserção dos dados oriundos dos sensores orbitais para a elaboração dos MDEs, como é o caso do sensor ASTER.

Estes MDEs permitem a retirada de diversas medidas morfométricos do relevo, além da representação cartográfica de base e temática. Neste estudo, destacam-se aspectos referentes à hidrografia, não somente pela importância da representação em um mapa, mas também porque esta informação é muito utilizada em análises da superfície do terreno, gestão de recursos naturais e ambientais, estudos hidrológicos, geomorfológicos etc.

Muitos pacotes de *softwares* que operam independentemente ou inseridos como ferramentas adicionais aos SIGs, ou, ainda, neles disponibilizados, permitem a retirada da rede drenagem com suporte a análise da superfície do terreno. O *TauDEM* desenvolvido por David Tarboton aqui empregado é um exemplo oportuno.

Para efeito de comparação entre os parâmetros morfométricos obtidos a partir do MDE oriundo de imagens orbitais estereoscópicas do sensor ASTER com os parâmetros morfométricos obtidos de cartas topográficas digitalizadas em escala 1:50.000 (IBGE), foram utilizados os dados produzidos por Jesus (2001) da bacia hidrográfica do reservatório Atibainha.

A seção 4.1.3 deste capítulo (Área de estudo: bacia hidrográfica do reservatório Atibainha), bem como a seção 3.4 do capítulo 3 (Parâmetros morfométricos em bacias hidrográficas), foram fundamentados a partir da revisão bibliográfica do trabalho realizado por Jesus (2001).

4.1.1. Material bibliográfico e cartográfico

- Material bibliográfico, cartográfico e parâmetros morfométricos de F_1 , I_c , D_m e F_t obtidos de cartas topográficas em escala de 1:50.000 das Folhas: Piracaia, Igaratá, Itaquaquecetuba, Camanducaia, Santa Isabel (IBGE, 1984 – digitalizados pelo projeto PiraCena - www.cena.usp.br) (JESUS, 2001).
- Mapa geológico na escala 1:250.000, folha Santos (CPRM / DNPM, 1971).
- Mapa pedológico do estado de São Paulo na escala 1:500.000 (EMBRAPA / IAC, 1999).
- Imagens orbitais do sensor ASTER de 16/03/2001, 14 bandas espectrais, identificação de posição ID = SC:AST_L1A.003:2005505477 cedidas pelo LPDAAC (<http://lpdaac.usgs.gov/>).
- MDE produto *AST14DEM* via FTP no formato Geotif com resolução espacial de 30m pelo custo de U\$ 80,00 + taxa de envio U\$ 5,00.
- MDE produzido com o *Software Silcast* no formato Geotif com resolução espacial de 15m.

4.1.2. Material de apoio computacional

- Computador Pentium IV 2400 MHZ, 1280 MB RAM, monitor colorido 17".
- Impressora e Scanner Epson Stylus CX 4900.
- Programas: *Microsoft Office 2003*, *Corel Draw12*, *Auto Cad 14 e 2004*.
- Para extração da rede de drenagem foi utilizado *plug-in TauDEM* (software livre) <http://www.engineering.usu.edu/dtarb/> em conjunto ao SIG *MapWindow* versão 4.4 e 3.1 (software livre) <http://www.mapwindow.org/overview.php>.,
- Para o processamento dos parâmetros morfométricos, foi utilizado o SIG *IDRISI 32 for Windows*, (EASTMAN, 1999)
- Para apoio de entrada e saída de dados e processamentos relativos à rede de drenagem, foi empregado o SIG *ILWIS versão 3.3*.

- Para geração do MDE com resolução espacial de 15m, foi utilizado o *software Silcast* versão 1.07 (<http://www.silc.co.jp/en/index.html>).

O *software Silcast* é programado em IDL6.3 e foi desenvolvido exclusivamente para o processamento de imagens do sensor ASTER. As principais funções são: extração do MDE com resolução de saída de 15 e 30m, ortoreificação e geração de imagens de *Level-1B*. Ambos *Level-1A* e *Level-1B* estão disponíveis como entrada de dados para as funções *DEM* e *Ortho*. O *Silcast* no modo demonstração pode ser executado com *IDL VM* que, por sua vez, também pode ser utilizado sem licença.

O *TauDEM* é um conjunto de ferramentas para análise do relevo utilizando modelos digitais de elevação. Este incorpora programas e funções de análise de MDE desenvolvido por vários anos de pesquisa.

O *TauDEM* é um *software* que trabalha como uma ferramenta de extensão (*toolbar plug-in*) para ambos: *ESRI ArcGIS* (8.x e 9.0) e o *SIG MapWindow*. O *TauDEM* é um *software* (código fonte aberto) sem custos para os usuários, desenvolvido na *Utah State University* sobre os termos de *GNU General Public*, Licença versão 2, 1991 na *Free Software Foundation* (TARBOTON, 2005).

O *MapWindow* é um “Sistema de Informação Geográfica Programável” também sem custos para os usuários. Possui suporte para manipulação, análise e visualização de dados geoespaciais associados a atributos em vários formatos de dados para SIG o que permite o desenvolvimento de ferramentas de extensão. Existem muitas aplicações, particularmente nas geociências e engenharia, que são mais adaptáveis a versões *standalone*, em função da necessidade da distribuição de ferramentas para usuários que não possuem seu próprio SIG e não são especialistas da área.

Como resultado dessa demanda e de outras, o *MapWindow* foi desenvolvido como uma alternativa para a programação em SIG por um grupo de cientistas e programadores da *Utah State University (USU)*, ele não somente permite a visualização de mapas, como envolve um rápido acesso a imagens no formato *raster*, com uma interface APIs (*application programmer interfaces*) para acesso de dados *low-level* para o formato *raster*, vetor (*shape*), tabela, imagem e modelos 3D (TIN) <http://www.mapwindow.org/overview.php>.

O *MapWindow* versões 4.4 e 3.1 foi utilizado nesta pesquisa em função da sua facilidade de manuseio e aquisição sem custos, configurando-se como uma plataforma viável para executar a ferramenta de extensão do *TauDEM* desenvolvida por David Tarboton.

O SIG *IDRISI 32* foi utilizado para processamento dos parâmetros morfométricos no formato raster, configura-se como um Sistema de Informação Geográfica e de processamento de imagens desenvolvido pela *Clark University*. É desenhado para fornecer instrumentos de pesquisa geográfica em nível profissional com baixo custo, incluindo modelos de *krigagem* e geoestatística. Consiste de um sistema composto de 135 módulos de programas, que fornecem facilidades para entrada, visualização e análise dos dados geográficos. Estes dados são estruturados na forma de *layers* – mapas elementares que descrevem um tema singular. Apesar de ser conhecido como um sistema *raster*, o SIG *IDRISI 32* apresenta capacidade de trabalho tanto em formato vetorial como *raster* (EASTMAN, 1999).

O SIG *ILWIS 3.3* foi empregado como apoio em função de apresentar ferramentas específicas para análise da rede de drenagem, além de conter módulos de importação e exportação que facilitaram a transferência de dados entre os sistemas.

O SIG *ILWIS* é um sistema de informação geográfica e processamento de imagem desenvolvido pelo *International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC)* e foi criado com o intuito de fornecer suporte ao zoneamento do uso da terra e gerenciamento dos recursos hídricos. Trata-se de um *software* que fornece ferramentas para pesquisa geográfica em nível profissional sem nenhum custo, buscando atender às demandas do ITC, bem como a transferência de tecnologia para países em desenvolvimento.

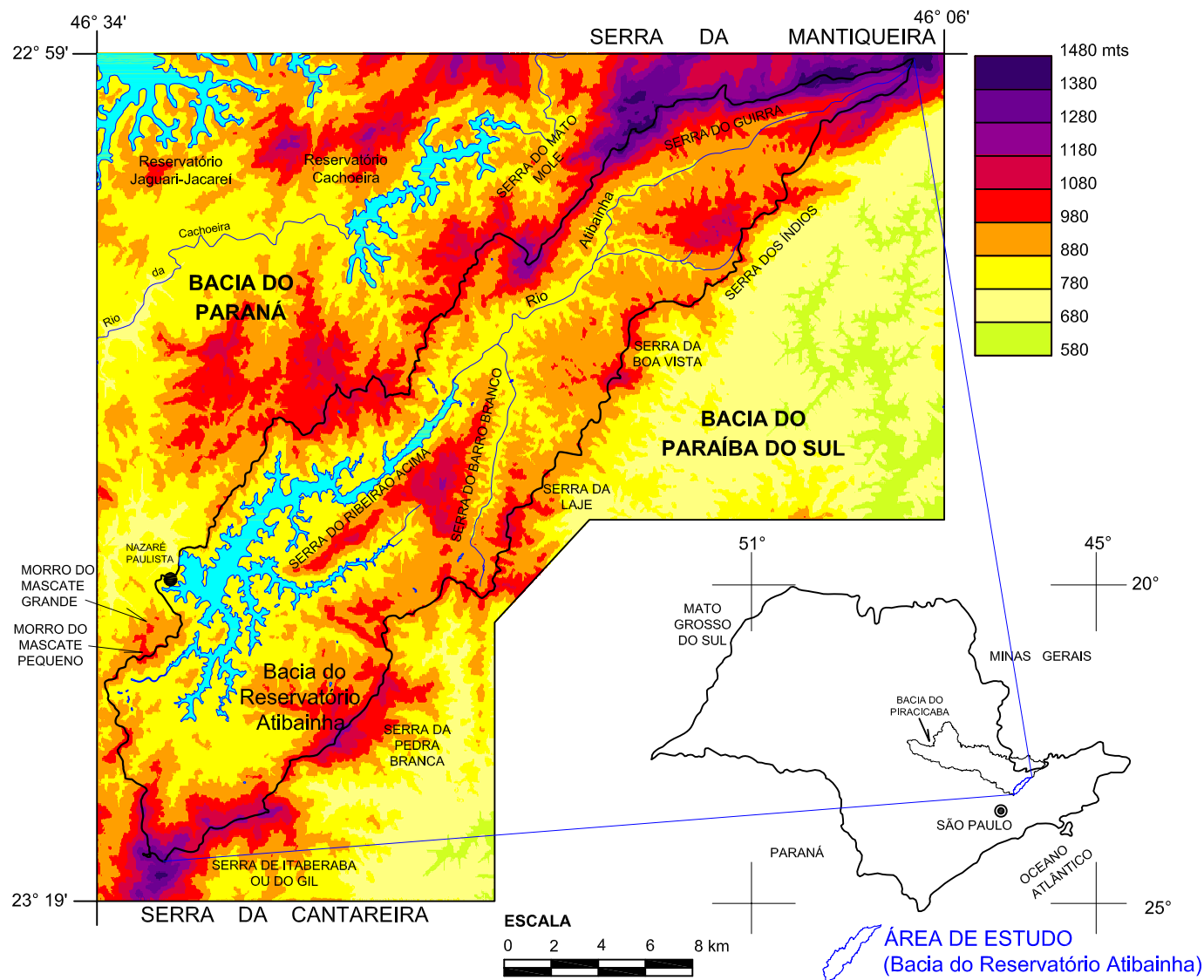
O SIG *ILWIS* trabalha tanto no modo *raster* como *vetorial*, possui processamento de imagens, visualização de MDE a partir de imagens estereoscópicas, análise estatística e espacial e um módulo específico *MDE hydro-process* com várias rotinas que permitem a definição dos canais de uma bacia de drenagem, limites de uma bacia hidrográfica e diversos parâmetros morfométricos com aplicação em gestão ambiental de bacias hidrográficas.

4.1.3. Área de estudo: bacia do reservatório Atibainha.

A bacia do reservatório Atibainha está posicionada na nascente oriental da bacia do rio Piracicaba; localizada a NE da Região Metropolitana de São Paulo, entre as coordenadas geográficas 22°59' e 23°19' latitude S e 46° 06' e 46° 34' longitude W, abrange uma área de 314,5 km² e encontra-se em áreas correspondentes ao embasamento cristalino (província geomorfológica do Planalto Atlântico), fazendo divisa a leste com a bacia do Paraíba do Sul (Figura 4.1).

A bacia do reservatório Atibainha é cortada pela falha de Jundiúvira em toda sua extensão longitudinal na direção SW-NE, aloja-se em faixa de xistos e filitos separando gnaisses e granitóides, controla segmentos de escarpa descontínuos em relevo de morros e montanhas a SW com amplitudes de 100 a 350 m, alonga-se a NE em serras com amplitudes de até 600m nos contrafortes da serra da Mantiqueira (PIRES NETO, 1996 e HASUI *et al.*, 1981) (Figura 4.2).

A NNE ocorre rochas metamórficas (gnaisses) do Arqueano (JANASI, 1986); em setores de SW a NE ocorrem os corpos granitóides do Proterozóico Superior do tipo granito-gnáissico com a presença marcante de Latossolos Vermelho Amarelo associado a Cambissolos Háplicos (LVA 23) (Figura 4.3). A Leste, granitos cobertos por Argissolos associados a Latossolos (PVA 55). A SW os filitos do Grupo São Roque cobertos por Argissolos Vermelho-Amarelos associados a Cambissolos Háplicos. A alta declividade, a associação a Cambissolos e o caráter mais arenoso dos Argissolos qualificam esses setores da bacia com características de alta suscetibilidade à erosão, impondo severas limitações ao uso agrícola, florestal ou mesmo pastoril (HASUI *et al.*, 1981; OLIVEIRA, 1999).



FONTE: Cartas Topográficas de Piracaia, Extrema, Itaquapecetuba, Igaratá, Sta.Isabel e Camanducaia
- IBGE - escala 1: 50 000 (Arquivos digitais do Projeto Piracena) Org. e Des. : Nilton de Jesus

Figura 4.1 - Mapa Físico e de Localização da área de estudo

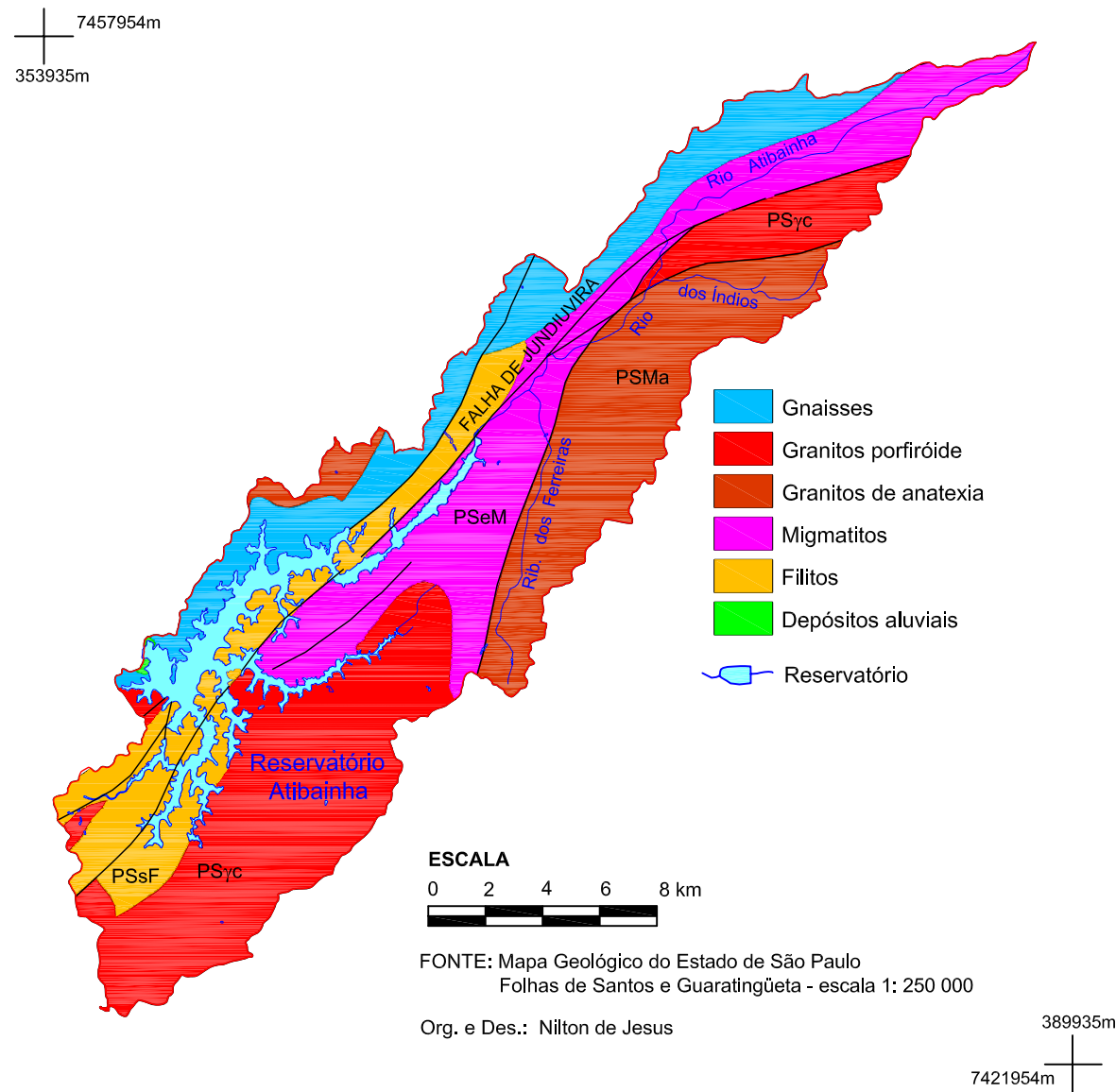


Figura 4.2 - Mapa Geológico da bacia do reservatório Atibainha

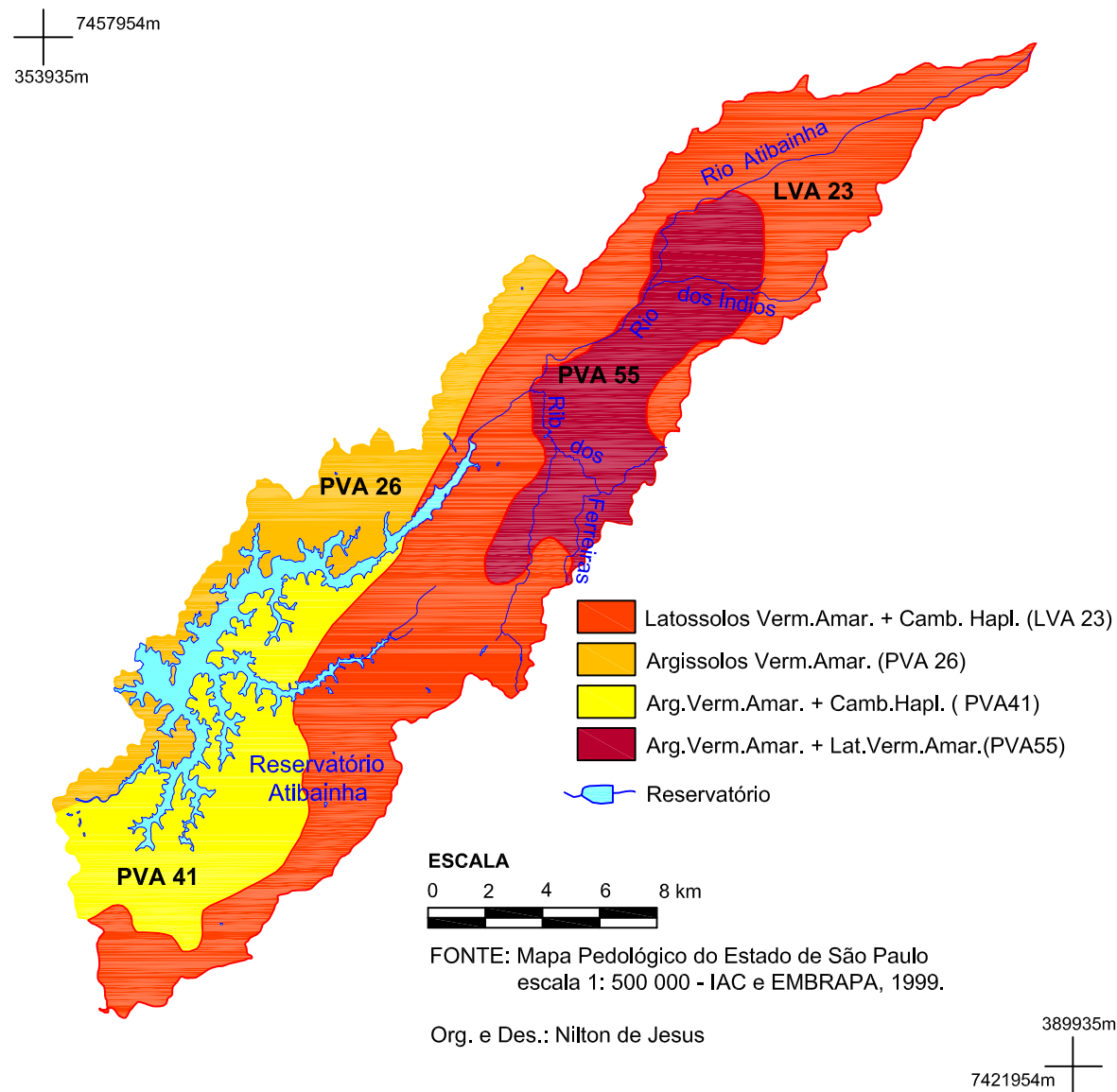


Figura 4.3 - Mapa Pedológico da bacia do reservatório Atibainha

A precipitação pluvial é elevada, especialmente a NE, onde os valores atingem de 1600 a 1700 mm anuais, fenômeno este atribuído ao fator orográfico imposto pelo relevo do Planalto Atlântico, em função da ascensão das correntes do leste no verão e das correntes do sul no inverno. Estudos realizados por Menardi Jr. (2000) e Feltran Filho (1982) caracterizaram a região como de clima tropical com estação seca definida.

A floresta ombrófila densa ocupava originalmente a bacia, mas atualmente esta formação foi substituída por pastagens, silvicultura, vegetação secundária nos mais variados estágios de desenvolvimento. Apenas em locais isolados permanece a floresta ombrófila densa, com maior ocorrência a NE (serra da Mantiqueira) e a SW (serra da Cantareira). As áreas agrícolas estão presentes, com maior intensidade, a N e NW da cidade de Nazaré Paulista.

4.2. MÉTODOS

Bertrand (1971) considera a paisagem como um todo no qual o espaço é parte de uma dinâmica de relações entre elementos físicos, biológicos e antrópicos num processo contínuo. Para tanto, estabelece três unidades superiores, tendo por base elementos climáticos e estruturais: Zona, Domínio e Região e mais três unidades inferiores vinculadas a fatores biogeográficos e antrópicos: geossistema, geofácia e geótopo.

Segundo Christofolletti (1999), o geossistema resultaria da combinação de um potencial ecológico (geomorfologia, clima, hidrologia), uma exploração biológica (vegetação, solo, fauna) e uma ação antrópica, não apresentando necessariamente homogeneidade fisionômica, e sim um complexo dinâmico.

O geossistema abrange uma área de alguns km² a centenas km², podendo ser decomposta em unidades menores fisionomicamente homogêneas, representado pelos geofácies e geótopos. A geofácia correspondendo a um setor fisionomicamente homogêneo que se sucede no tempo e no espaço no interior do geossistema. O geótopo constitui a menor unidade homogênea diretamente visualizada no terreno, podendo apresentar características particulares (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Nesse contexto, a bacia hidrográfica pode ser considerada como um geossistema cujos principais elementos componentes são representados pelas vertentes, as quais se relacionam diretamente com os canais fluviais. Cada um destes elementos pode ser agrupado em unidades componentes menores, as sub-bacias, nas quais se associam atributos ou variáveis, possibilitando a realização de estudos de aspectos morfológicos dinâmicos (CHRISTOFOLETTI, 1999). Apesar das novas concepções metodológicas para a análise da bacia hidrográfica em perspectiva tridimensional, neste estudo mantem-se a perspectiva bidimensional, a considerar que a análise morfométrica tem por base dados de cartas topográficas em projeção ortogonal.

SCHUMM (1977), buscando representar o sistema fluvial, definiu três zonas na direção de jusante: zona 1, produtora de nascentes e sedimentos; zona 2, transferência;

e zona 3, deposição destes sedimentos. Um sistema aberto funcionando em forma de cascata.

Ao considerar a bacia hidrográfica como uma unidade sistêmica, as técnicas de análise morfométricas configuram-se de fundamental importância para a caracterização morfológica do sistema. A definição dos limites das sub-bacias, a hierarquia fluvial, a declividade, a orientação das vertentes, a densidade de drenagem, a circularidade, a amplitude altimétrica, entre outras medidas, permitem produzir inferências sobre aspectos estruturais, litológicos, pedológicos e mesmo de cobertura vegetal (CHRISTOFOLETTI, 1970; FERREIRA, 1996; GREGORY e WALLING, 1973; HORTON, 1945; JESUS, 2001; SCHUMM, 1977; STRAHLER, 1952, 1958).

Até por volta de 1990, redes de drenagem e bacias hidrográficas eram definidas por cartas topográficas ou por interpretações de fotografias aéreas. Com o surgimento dos SIGs, esse tipo de procedimento é substituído gradativamente pela retirada de informações morfométricas de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) (FERREIRA e FERREIRA, 2003; MARTINEZ-CASANOVAS e STUIVER, 1998).

Técnicas automatizadas são disponíveis para a extração destes parâmetros de um MDE, considerando que a determinação manual é um processo subjetivo, tedioso, moroso e muito suscetível a erros (BURROUGH e McDONNELL, 1998; FERREIRA e FERREIRA, 2003; GARBRECHT e MARTZ, 2000).

Recentemente, com a entrada em órbita de satélites com a geração de imagens estereoscópicas, como o ASTER permitiu-se a geração de MDEs que podem ser obtidos de forma rápida com baixo custo e em áreas sem mapeamento topográfico adequado às pesquisas atuais permitindo o mapeamento topográfico com todo seu conjunto de informações: como curvas de nível, rede de drenagem, estradas, represas, uso da terra etc. Esse conjunto de informações armazenadas em um ambiente SIG configura-se como uma tecnologia indispensável no diagnóstico e prognóstico ambientais.

Segundo Burrough e McDonnell (1998) e Christofolletti (1999) uma característica marcante na modelagem dos sistemas ambientais foi o desenvolvimento ocorrido há

três décadas integrando a abrangência dos MDEs com a modelagem hidrológica nos ambientes SIGs.

Neste contexto, Pike *et al.* (2008) destaca a maturidade da tecnologia SIG, do Sensoriamento Remoto (SR) e das diversas fontes de dados para produção de MDEs, o que contribuiu para o surgimento de uma nova área do conhecimento — a Geomorfometria — consequentemente com um aumento significativo da utilização dos parâmetros da superfície de terreno em diversas áreas como agricultura de precisão, modelagem pedológica, aplicações hidrológicas e climáticas, planejamento urbano, educação, exploração do fundo oceânico etc.

Configuram-se como principais dados para extração da rede de drenagem, os divisores topográficos, a segmentação em sub-bacias, a declividade e a orientação de vertentes (CHRISTOFOLETTI, 1999; TARBOTON, 1991, 1997; TauDEM, 2005; WILSON e GALLANT, 2000).

Em função da variedade de dados que a modelagem pode requerer, nem todos os SIGs estão adaptados às necessidades de diferentes tipos de dados, entretanto, interfaces entre os *softwares* das geociências permitem uma integração da estrutura de dados em ambiente SIG. Alguns procedimentos neste estudo podem ser destacados:

- obtenção da base de dados (arquivos vetoriais e raster) para entrada em SIG.
- georeferenciamento e modelização da informação espacial;
- aquisição ou produção do MDE a partir da imagem orbital;
- execução das rotinas para obtenção dos parâmetros morfométricos;
- análise estatística dos parâmetros morfométricas obtidos a partir do MDE das imagens orbitais e de cartas topográficas da área de estudo;
- avaliação e considerações finais sobre os resultados obtidos.

4.3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos aqui empregados tem por base os trabalhos realizados por David G. Tarboton (*Utah State University, USA*) utilizando e desenvolvendo um *software* livre, o *TauDEM*, o qual incorpora um conjunto de funções para análise da superfície do terreno a partir de MDEs; trata-se de um *plug-in* que pode ser executado com o *ArcGIS* (ESRI) e o *MapWindow* (SIG livre código fonte aberto).

As rotinas incorporadas no *software* de modelagem hidrológica *TauDEM* tem por base diversos trabalhos realizados no campo da geomorfometria com destaque para a identificação de porções côncavas que concentram o escoamento superficial — Peucker e Douglas (1975) e Band (1986); extração da drenagem pelo método D8 (8 direções de fluxo) — O'Callaghan e Mark (1984); remoção de depressões, Jenson e Domingue (1988); forçando o fluxo em áreas planas — Garbrecht e Martz (1997b); definição do fluxo entre 0 e 2π (Dinf) — Tarboton (1997); *threshold* em função da hierarquia fluvial para delinear fluxos — Peckham (1995); *threshold* para definição de canais a partir da relação da área x declive — Montgomery e Dietrich (1992); *threshold* área para delineação de rede de canais definido pela relação entre a área e o comprimento de canais fundamentado pela lei de Hack; *threshold* área para delineação de rede de canais definido a partir do teste *t* de *Student* da constante de *drop* de canais — Broscoe (1959) (Tarboton *et al.* 1991, 1992) e (Tarboton e Ames, 2001).

4.3.1. Seleção da imagem orbital ASTER

A escolha da imagem para aquisição do MDE é a primeira etapa e, certamente, um dos procedimentos mais importantes, tendo em vista que as bandas 3N e 3B do sensor ASTER obtêm imagens em comprimento de onda sensível à cobertura de nuvens. Esta tarefa foi muito difícil, pois o ASTER é um sensor de caráter experimental que não mantém uma resolução temporal contínua, isto somado às características geográficas da região, que apresenta intensa circulação de massas de ar, como se pode observar nas Figuras 4.4 (a – m) dos *quick look* disponíveis da área de estudo.

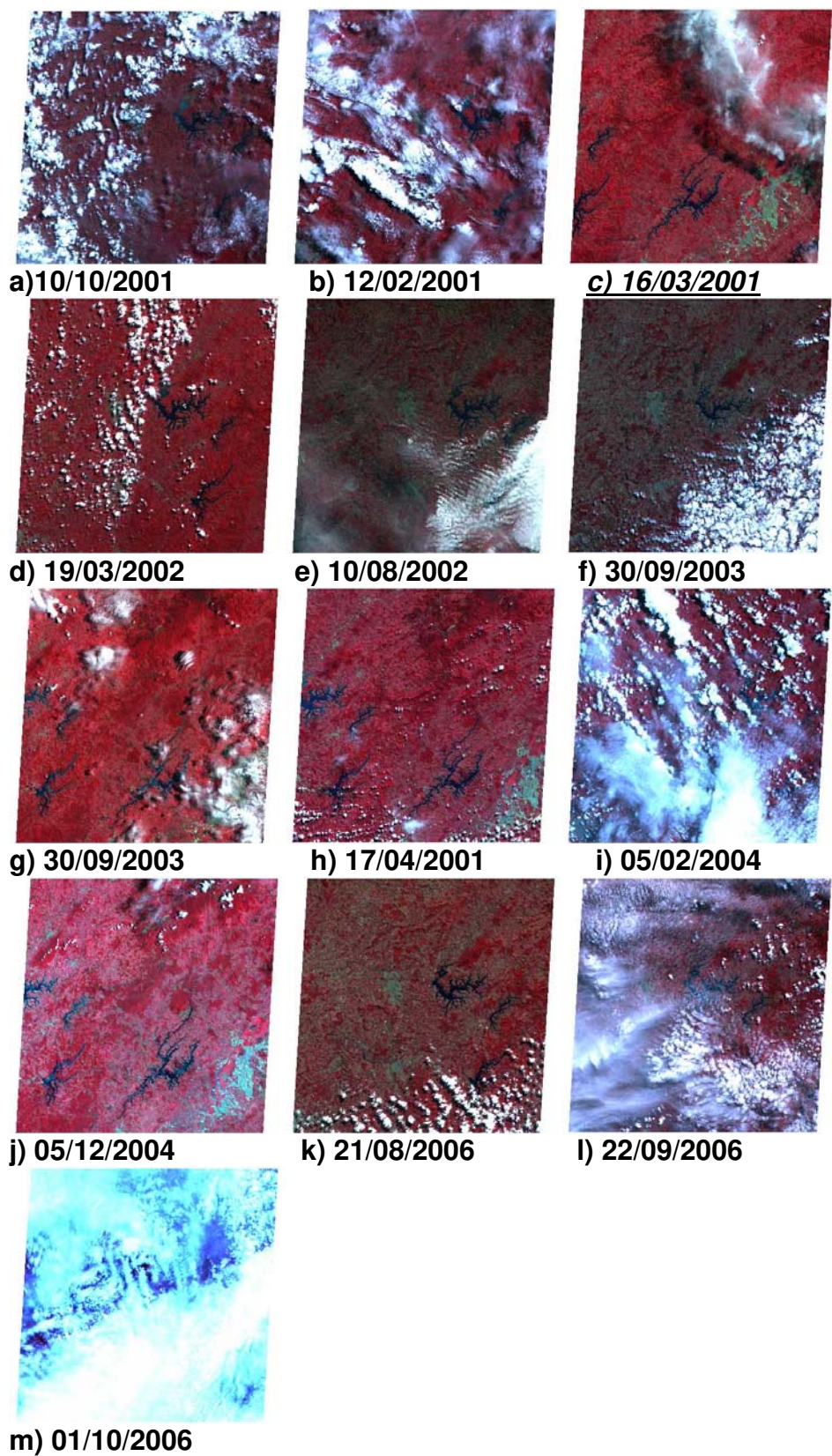


Figura 4.4 (a – m) – Imagens do sensor ASTER (*quick look*)

A imagem selecionada foi a (c) de 16/03/2001; apesar da perda de parte da bacia do reservatório Atibainha (porção SW) em função do limite da imagem, tem-se a certeza, nessa passagem, da ausência de nuvens ou nebulosidade sobre a área de estudo, o que poderia contribuir para alterações da elevação no MDE gerado pelo LPDAAC, o qual não se responsabiliza pelo fato.

O processo de aquisição é realizado no site <http://lpdaac.usgs.gov/>; o primeiro passo é identificar e visualizar a imagem por meio do *software* Glovis <http://glovis.usgs.gov/> o qual permite a compra por mídia ou FTP pelo custo de U\$ 85,00. No caso do produto MDE (AST14DEM), é necessária a identificação da imagem por meio do granule no *software* de visualização *Glovis* (exemplo da área de estudo ID = SC:AST_L1A.003:2005505477), sendo que essa identificação será utilizada na formulação do pedido em outro acesso: <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/> EDG (*Earth Observing System Data Gateway*). Nesse *site* estão disponibilizados outros modos de aquisição e produtos, junto aos quais há explicações em diversos tutoriais e telas de ajuda. No caso do produto *AST14DEM*, esse somente está disponibilizado no formato *Geotif* via FTP.

4.3.2. Instalação do SIG *MapWindow* e do *TauDEM*

Após obter os arquivos de instalação do SIG *MapWindow* versão 4.5 e da ferramenta *TauDEM*, basta instalar ambos no sistema operacional. O SIG *MapWindow* possui várias ferramentas de apoio *plug-ins* que podem ser obtidas sem nenhum custo e facilitam muito o processamento dos dados. Contudo, boa parte delas já se encontra pré-instalada nessa versão do SIG *MapWindow*, bastando apenas selecionar aquela ferramenta desejada na barra de tarefas *Plugins*. A versão 3.1 também foi obtida, mas apenas para orientar a seleção de algumas funções que aparecem cobertas por uma faixa preta na versão 4.5, provavelmente algum problema de programação.

4.3.3. Entrada de dados e recorte da área de estudo

Obs.: Todas as informações descritas abaixo, na seção 4.3.4 - cap.IV, relativas aos procedimentos necessários para a extração da rede de drenagem e das bacias hidrográficas, têm por base o tutorial de apoio para a utilização do TauDEM; encontram-se dispostas no site <http://hydrology.neng.usu.edu/taudem/> (TauDEM, 2005).

No barra de tarefas do *TauDEM / Select Base DEM Grid*, o arquivo do MDE pode ser carregado para o sistema.

Para o recorte da área de estudo foi utilizada a ferramenta *Shapefile Editor*, definida a partir de um retângulo com as respectivas coordenadas da área. A Ferramenta *GIS Tools / Raster / Clip Grid with Polygon* executa a operação de recorte (Figura 4.5).

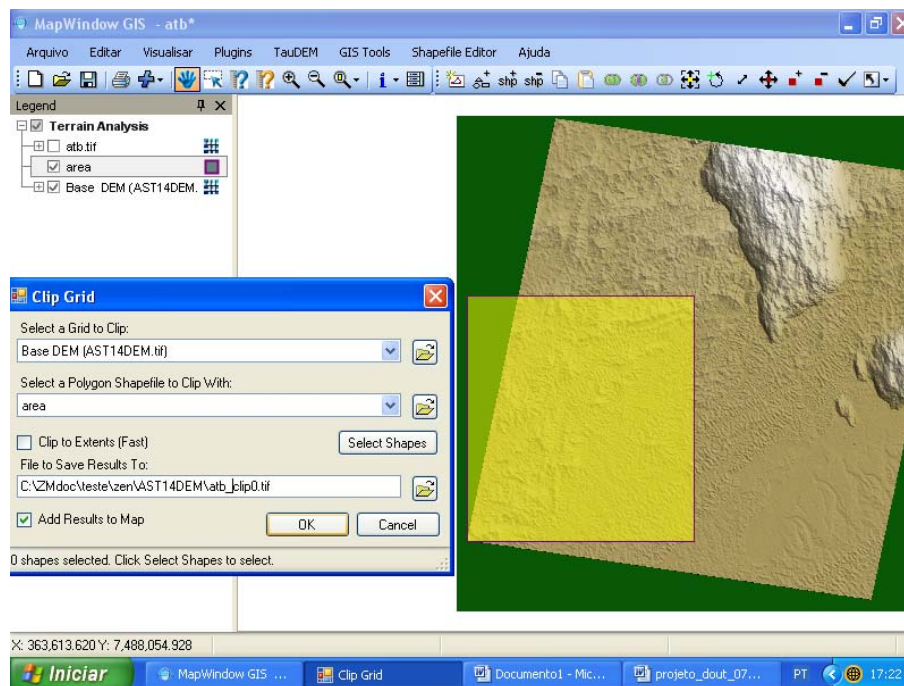


Figura 4.5. Recorte da area de estudo.

4.3.4. Extração da rede de drenagem e de bacias hidrográficas

1) Remoção das depressões (*Fill Pits*) — este é o primeiro passo a ser seguido com base nas orientações do módulo *TauDEM*; essas depressões são indesejadas, pois interrompem a rotina de delineação do fluxo. A remoção destas depressões é realizada subindo-se as cotas de altitude até o limite das altitudes da vizinhança da depressão (Figura 4.6).

Muitas depressões podem ser reais, e, se o usuário tiver certeza, pode manter os dados brutos do MDE renomeando-o com a extensão *(.fel)* utilizada pelo programa para o arquivo de saída do MDE, com as depressões removidas. De outro modo, pode-se desejar removê-las, deixando-se de lado a remoção de outras depressões. Para tanto, é necessário selecionar estas sem valores “*no data*”. Isto deverá interromper o processo de subida dos valores de altitude nestas áreas (TauDEM, 2005).

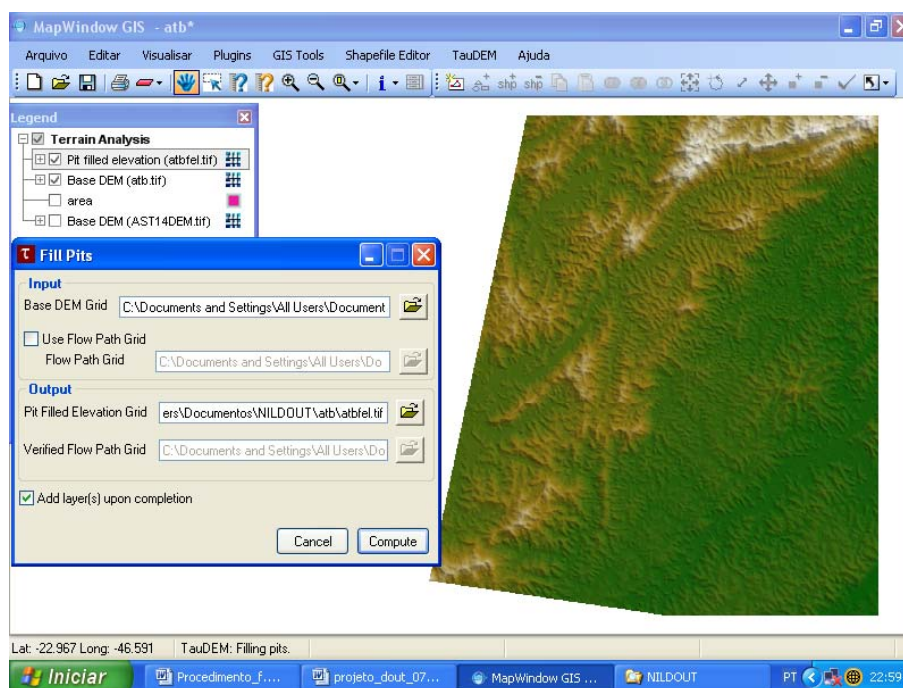
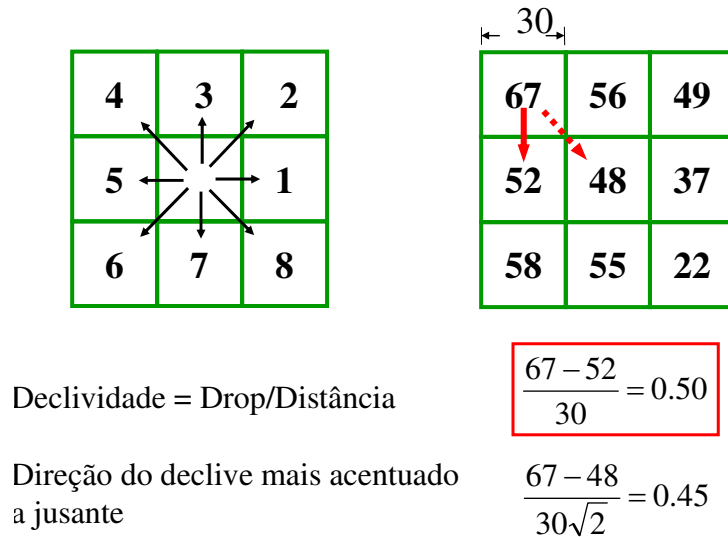


Figura 4.6. Remoção das depressões.

2) Direções de Fluxo D8 (*D8 Flow Directions*) — este método determina qual *pixel* vizinho receberá o fluxo de água a partir do *pixel* central de uma sub-matriz 3x3,

considerando-se a declividade mais acentuada a jusante, sendo que o cálculo é diferenciado entre as direções ortogonais e diagonais. No *TauDEM*, a codificação parte do E no sentido anti-horário com o valor 1 (Figura 4.7).



Fonte: Tarboton (2006)

Figura 4.7. Direção do fluxo do D8

Nas áreas planas o fluxo é forçado das áreas mais altas para as mais baixas, utilizando-se o método empregado por Garbrecht e Martz (1997b). Quando se utiliza um MDE sem remoção das depressões, aparecerão pontos sem valor “*no data*” nestas áreas (TauDEM, 2005).

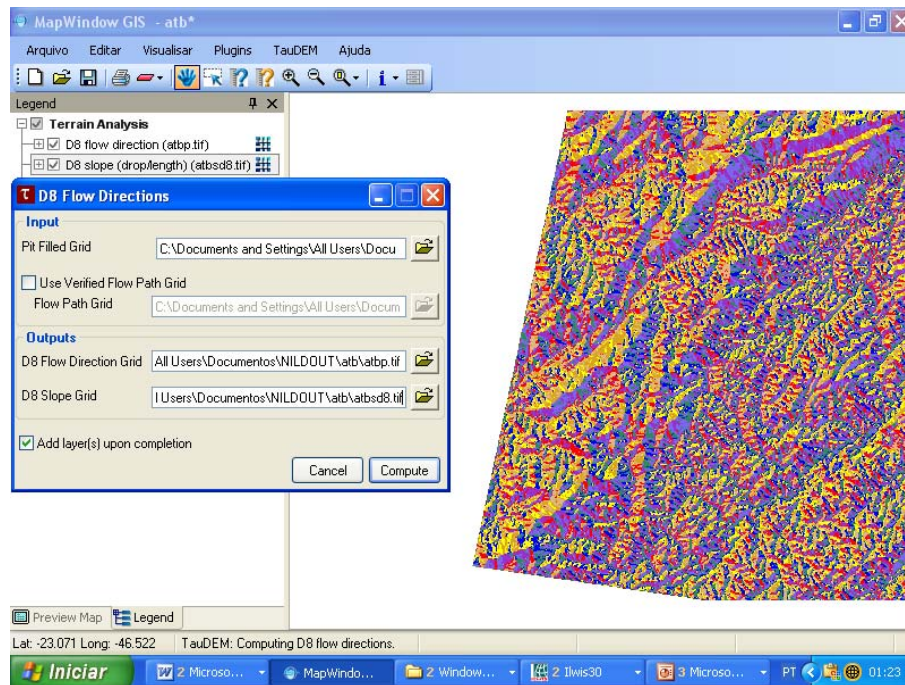


Figura 4.8. Grade da direção de fluxo do D8

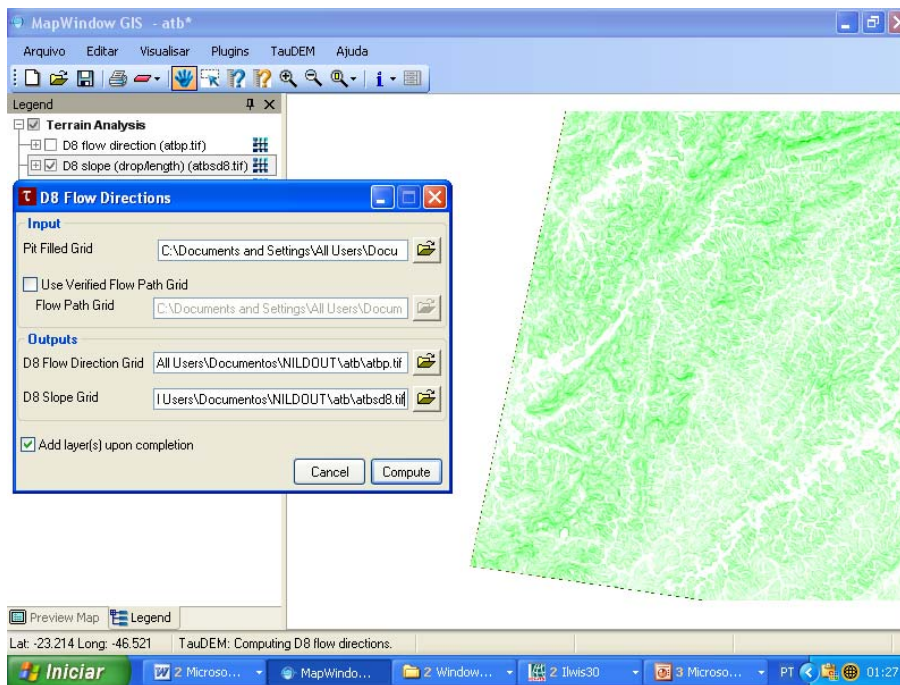


Figura 4.9. Grade da declividade do D8

3) Direções de Fluxo Dinf (*Dinf Flow Directions*) — este método desenvolvido por Tarboton (1997) determina quais *pixels* receberão o fluxo de água a partir da declividade mais acentuada a jusante sobre oito facetas triangulares em uma sub-matriz 3 x 3 (ver Figura 3.12). A direção de Fluxo é codificada a partir de ângulo em radianos, partindo-se do Leste no sentido anti-horário por um valor contínuo entre 0 e 2π (Figura 4.10) (TauDEM, 2005).

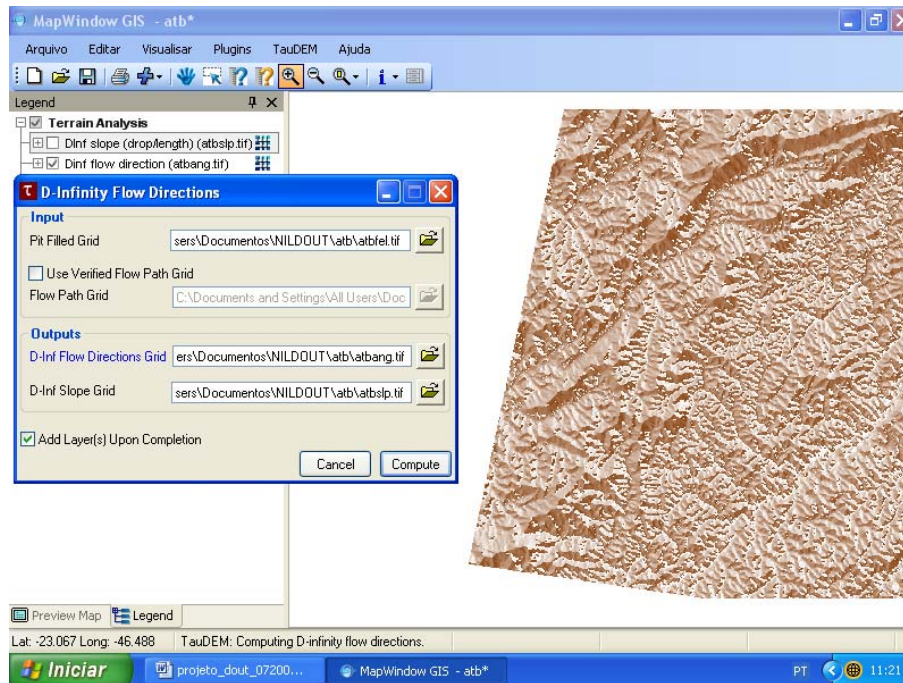


Figura 4.10. Grade da direção de fluxo *Dinf*

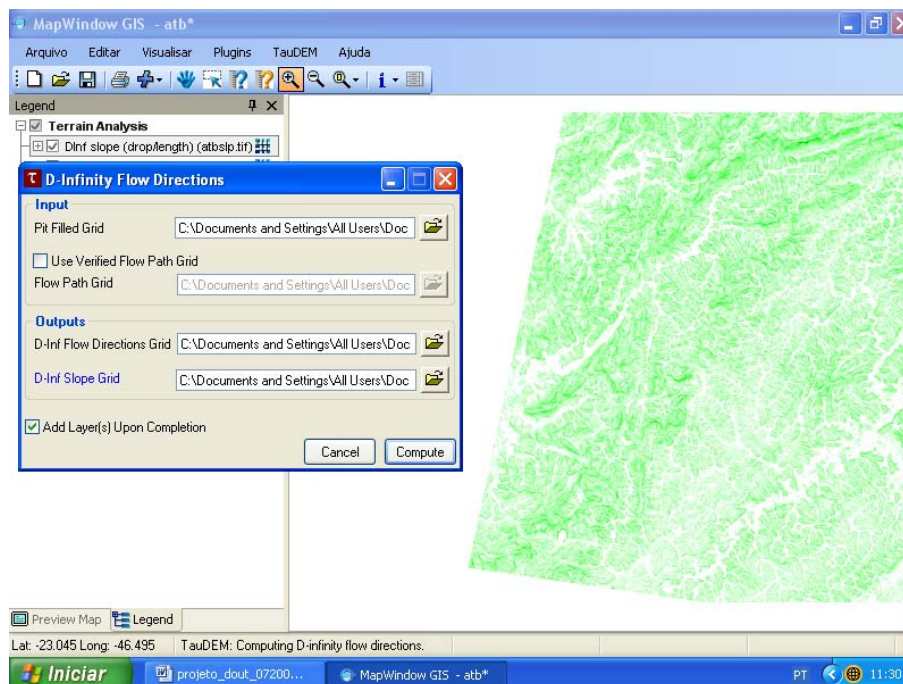
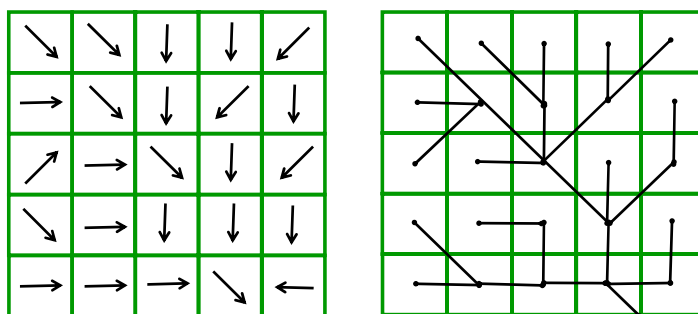


Figura 4.11. Grade de declividade *Dinf*

4) Área de Contribuição D8 (*D8 Contributing Area*) — a área de contribuição é definida com base nos trabalhos realizados por Mark (1988). Esse método considera a medida de contribuição do próprio *pixel* mais a contribuição dos *pixels* a montante que drenam para ele (Figura 4.13 e Figura 4.15) (TauDEM, 2005).



Fonte: Tarboton (2004)

Figura 4.12. Rede de conexão da direção de fluxo do D8

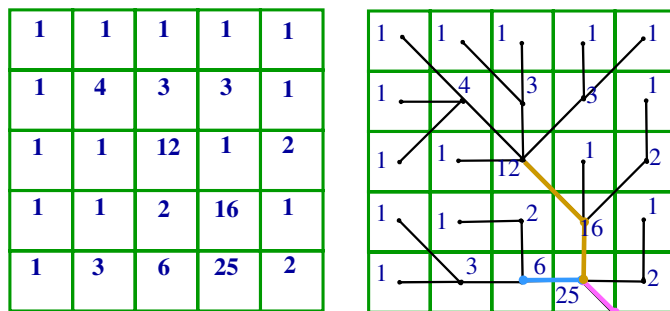
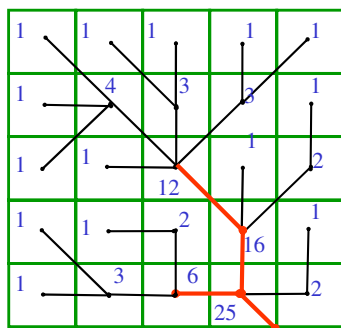


Figura 4.13. Cálculo da área de contribuição

Fonte: Tarboton (2004)

Obs.: Convenção do *TauDEM* para área de contribuição de cada *pixel*, incluindo o próprio *pixel* com *threshold* de área de 6 *pixels*.



Fonte: Tarboton (2004)

Figura 4.14. *Threshold* de área para formação do canal

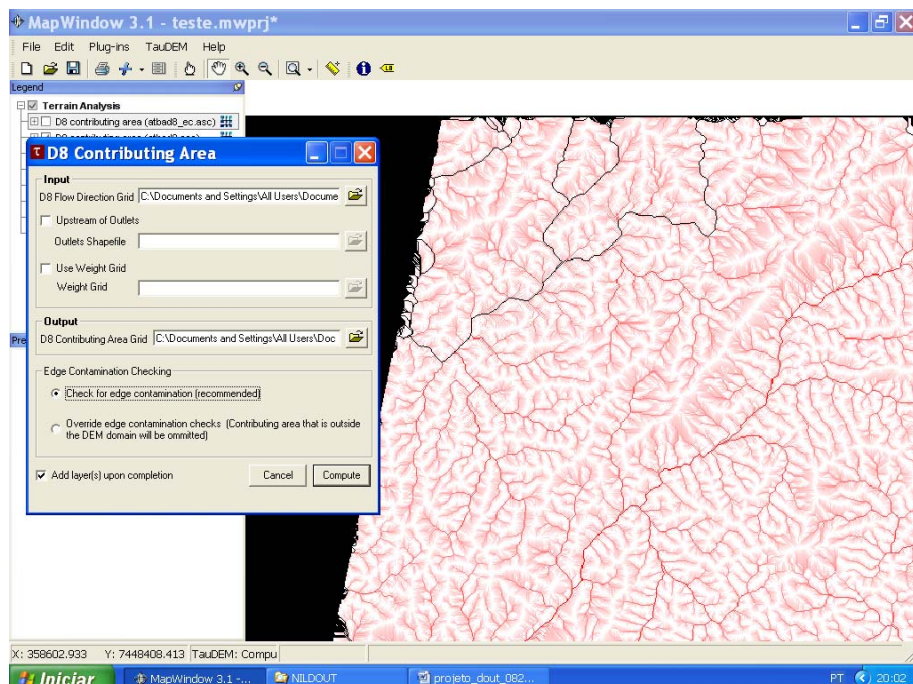


Figura 4.15. Grade da área de contribuição do D8

5) Área de Contribuição Dinf (*Dinf Contributing Area*) — a área de contribuição é calculada em função do número de *pixels* pela direção de fluxo múltiplo do Dinf, utilizando o procedimento que é uma extensão do eficiente algoritmo para direções únicas (Mark, 1988). A área de contribuição em cada *pixel* é considerada inicialmente como única (ou pode ser oriunda de uma grade de pesos, quando esta opção é utilizada). A área — contribuição de cada *pixel* — é considerada, então, como a sua própria contribuição mais a contribuição dos *pixels* vizinhos a montante que possuam alguma fração que escoar para este *pixel*. O fluxo de um *pixel* escoar para um único vizinho, quando o ângulo é perpendicular (0 , $\pi/2$, π , $3\pi/2$) ou diagonal ($\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$, $7\pi/4$); quando o ângulo cai entre estes ângulos (perpendicular, diagonal), o fluxo é proporcional ao ângulo entre os dois *pixels* vizinhos adjacentes (ver Figura 3.12). Para a definição de bacias hidrográficas desejadas pelo usuário, basta marcar o ponto de saída (*outlets*) em um arquivo no formato *shape* (TauDEM, 2005).

O programa confere a área de contribuição por contaminação de extremidade. Isto é definido como a possibilidade de um valor de área de contribuição que seja subestimado em função de *pixels* fora de um domínio, portanto, não sendo contabilizados. Esse fato ocorre quando uma drenagem adentra em limites ou em áreas

sem valores de elevação (*no data*). O algoritmo reconhece isto e relata como valores sem elevação para a área de contribuição. É comum que se percebam caminhos sem valores que se estendam para o interior dos limites de uma área ao longo de canais que entram no domínio de outro limite. Se este efeito for desejado e indicar áreas de contribuição para estes *pixels* que não são do conhecimento, em função de estarem fora de um domínio de dados disponíveis, a avaliação de contaminação por extremidade pode ser anulada para os casos nos quais o usuário saiba que isto não seja necessário ou queira ignorar estes problemas — por exemplo, se o MDE foi cortado ao longo dos limites de uma bacia hidrográfica (TauDEM, 2005).

Isso pode ser visualizado na Figura 4.15., Grade da Área de Contribuição D8 (com avaliação de contaminação por extremidade), e na Figura 4.16., Grade da Área de Contribuição do Dinf (sem avaliação de contaminação por extremidade).

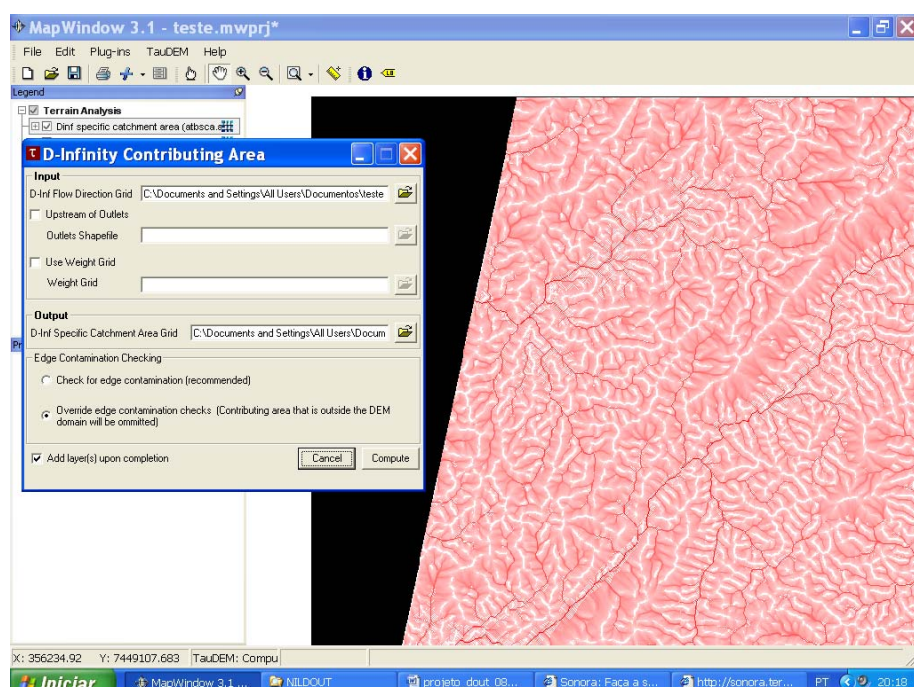


Figura 4.16. Grade da área de contribuição do Dinf

No caso da área de estudo em questão, tanto uma como outra possibilidade pode ser selecionada, pois a área de estudo se encontra mais para o centro da imagem, distante de áreas próximas das extremidades.

6) Hierarquia Fluvial e Comprimento de Canais (*Grid Network Order and Flow Paths Lengths*) — a partir da grade de Direção de Fluxo D8 é definida uma grade de rede que se estende para toda a área. Esta função ordena a rede de acordo com o sistema de hierarquia fluvial de Strahler. Os *pixels* que não possuam qualquer outro *pixel* que drene para ele são considerados de ordem 1. Quando dois (ou mais) canais de ordem diferente se unem prevalece a ordem à jusante do canal de ordem mais alta. Quando dois (ou mais) canais de ordem igual se unem, o canal a jusante tem sua ordem aumentada em 1. Essa lógica foi inserida no Algoritmo (TauDEM, 2005).

O mais longo comprimento a montante (*longest upslope length*) é o comprimento de um segmento de canal. O comprimento total a montante (*total upslope length*) é o comprimento de uma rede de canais a montante de um *pixel* da grade. Os comprimentos são medidos entre os centros dos *pixels*, considerando o tamanho do próprio *pixel* e a direção adjacente ou diagonal (Figura 4.17) (TauDEM, 2005).

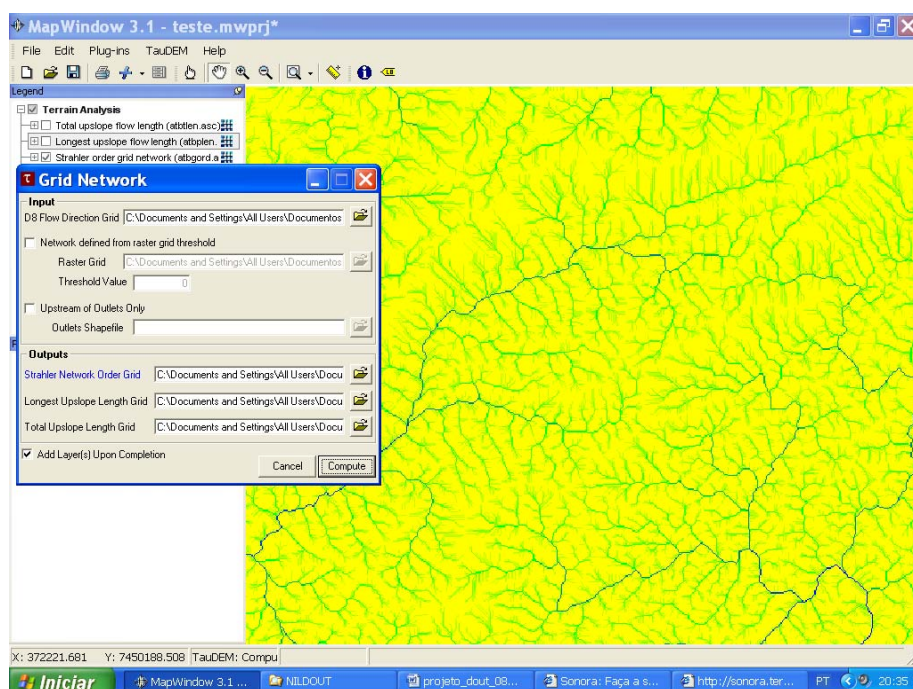


Figura 4.17. Grade dos comprimentos dos canais

7) Delineação da Rede de drenagem (*River Network Raster Function*) — o resultado é uma grade binária com a indicação dos canais com valor 1 e sem canais 0. Seis métodos para extração da rede de drenagem estão disponibilizados.

Este passo requer mais atenção e permite algumas considerações. Optou-se por seguir as recomendações expressas no documento de suporte do *TauDEM*, que indica o método de identificação de áreas côncavas de Peucker e Douglas (1975) para casos em que não se tenha uma base hidrográfica que possa orientar o fluxo. Nesse sentido, deve-se considerar o objetivo desta pesquisa, que é o de estabelecer uma comparação com dados oriundos da carta topográfica com dados do sensor ASTER.

Este método consiste em aplicar um filtro com medidas de centro, lado e diagonais, como especificado por Peucker e Douglas (1975) e Band (1986) para identificar a forma côncava das vertentes. O método sinaliza a grade inteira e, então, examina, em um único passo, cada quadrante de 4 *pixels* e desmarca os mais altos. Permanecendo *pixels* sinalizados, serão marcados como côncavos “*upwards curved*”; quando visualizados, assemelham-se a uma rede de drenagem, embora às vezes falte à conectividade destes *pixels* que são alcançados aqui, atribuindo uma área de contribuição para esses *pixels* côncavos, a fim de delinear a rede de drenagem.

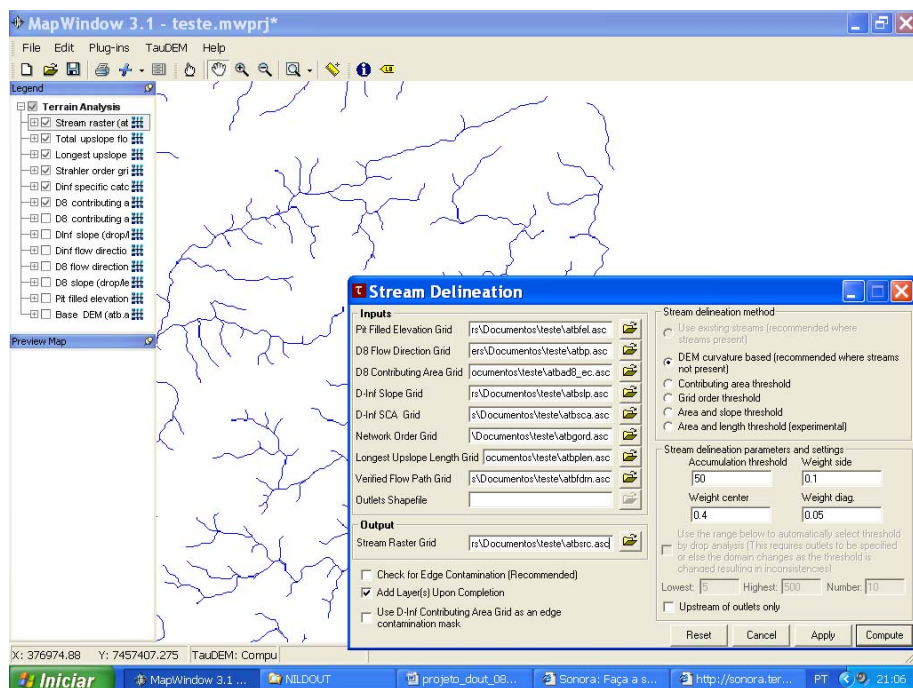


Figura 4.18. Delineação da rede de drenagem

O sistema no modo *default* obtém uma rede de drenagem com um *threshold* arbitrário com valor de 50, o que mostra uma rede de canais muito esparsa, mas que pode ser adensada, baixando-se este valor de *threshold* (ver Figura 4.18).

Essa primeira visualização da rede de drenagem possibilita ao usuário definir a saída da bacia ou das várias saídas. Isso é realizado através de um arquivo de ponto com extensão *shape* (.shp) marcada sobre a rede de drenagem obtida com a função *Shapefile Editor* (Figura 4.19). Deste modo, é possível marcar todas as possíveis saídas, individualizando a rede de drenagem desejada. Este arquivo de pontos será utilizado para gerar uma nova rede de drenagem, a fim de que o programa consiga realizar a análise estatística da constante de *drop* que considera os canais de primeira ordem e das ordens superiores da rede de drenagem selecionada.

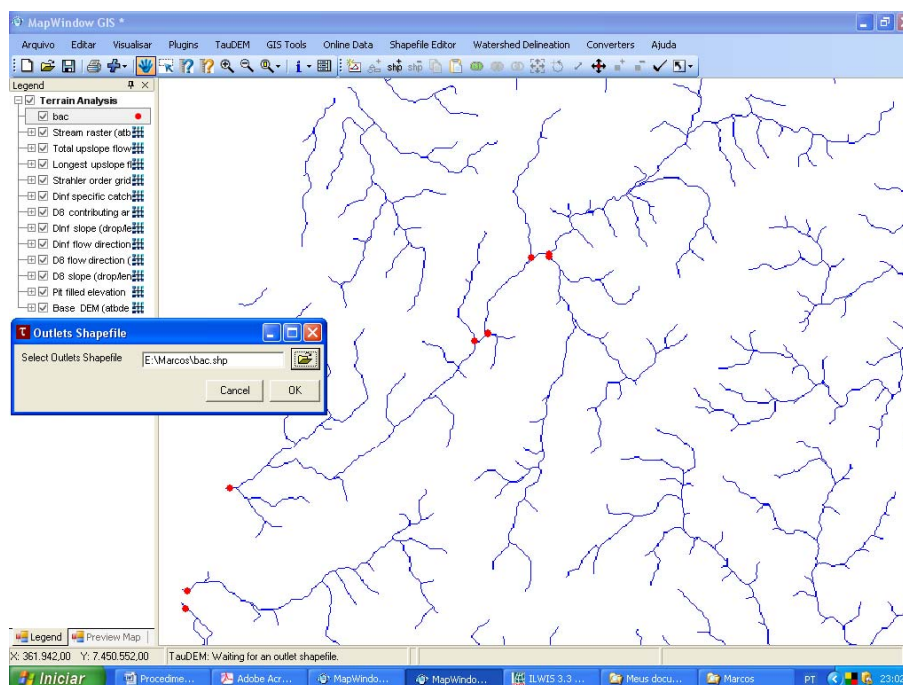


Figura 4.19. Seleção das saídas de sub-bacias hidrográficas

Quando a análise de *drop* é considerada, então o *threshold* é buscado entre os mais baixos e mais altos valores, utilizando uma escala logarítmica. Aqui é aconselhável fazer ajustes para que o *threshold* seja escolhido *pixel a pixel*, alterando a opção de mais alto (*Highest*) para um valor mais baixo e aumentando o número (*Number*) de *threshold* a ser processado.

Os trabalhos de Tarboton *et al.* (1991, 1992), Tarboton e Ames (2001) apresentam detalhes sobre a análise da constante de *drop*. O menor *threshold* com valor absoluto menor que 2 do teste *t* de *Student* será selecionado. Isso é automaticamente realizado durante o processamento da função (*River Network Raster*

Function). O *threshold* selecionado é salvo podendo ser apresentado posteriormente ao processamento. A análise da constante de *drop* somente pode ser avaliada quando forem especificadas saídas para as sub-bacias hidrográficas (TauDEM, 2005).

Uma nova rede de drenagem foi gerada agora utilizando o arquivo de pontos das saídas das sub-bacias, as mesmas saídas do trabalho realizado por Jesus (2001). Isso permitiu analisar estatisticamente os parâmetros morfométricos oriundos de ambas as fontes, cartas topográficas e do MDE do sensor ASTER. Das 99 sub-bacias dos arquivos oriundos da carta topográfica puderam ser selecionadas apenas 85 sub-bacias, dado o limite da imagem que gerou o MDE ASTER (Figura 4.20).

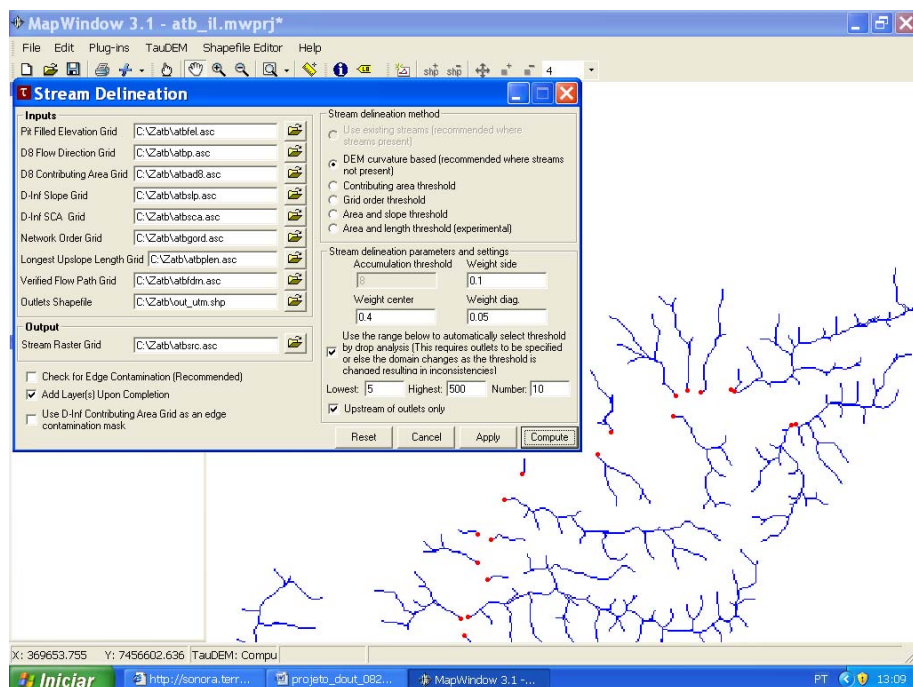


Figura 4.20. Rede de drenagem para 85 Sub-Bacias

Após o processamento da função (*River Network Raster Function*), pôde-se obter, por meio do comando *Constant Drop Analysis*, a tabela que apresenta na primeira coluna o valor de *threshold*, no nosso caso, com valor 8, e na última coluna a validação estatística do teste *t* de *Student* com valor -1,87. O programa automaticamente adota este *threshold* por apresentar o valor absoluto logo abaixo de 2 (Figura 4.21).

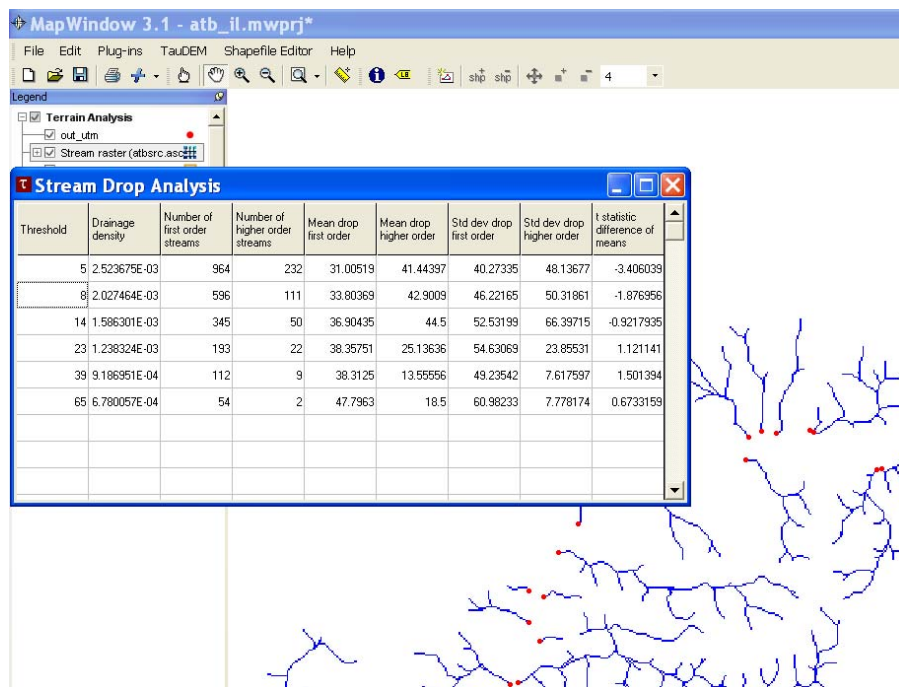


Figura 4.21. Análise da constante de Drop

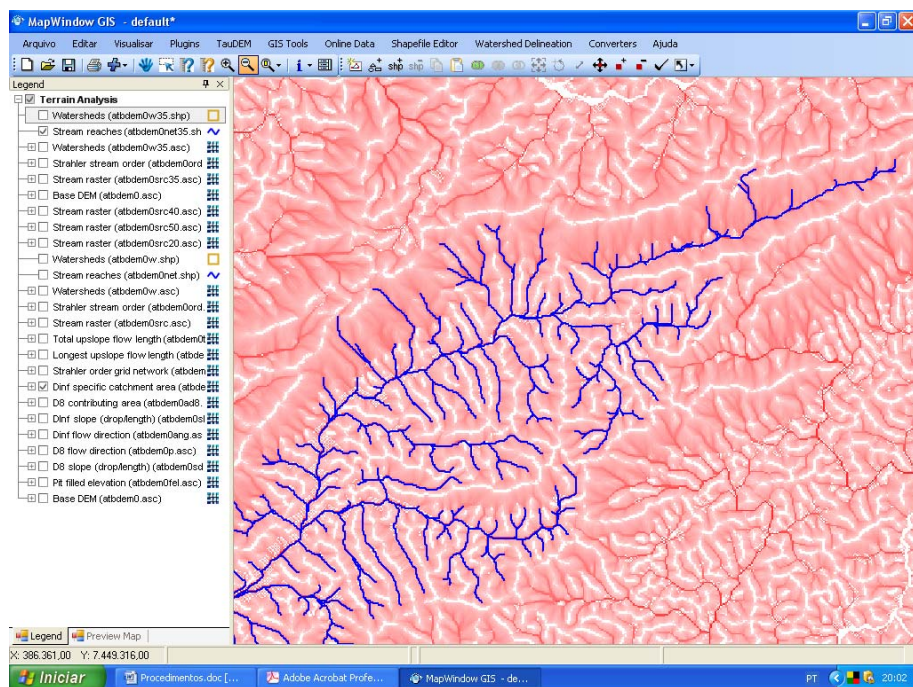


Figura 4.22. Rede de drenagem da bacia do reservatório Atibainha

Para efeito de comparação, também obtivemos redes de canais para *threshold* acima e abaixo de 8 *pixels* de fluxo acumulado, mais precisamente com 5 e 11 *pixels*. Foi também produzida uma rede de drenagem completa da bacia do reservatório

Atibainha, como apresentado na Figura 4.22, com análise da constante de *drop* apresentando um *threshold* 10.

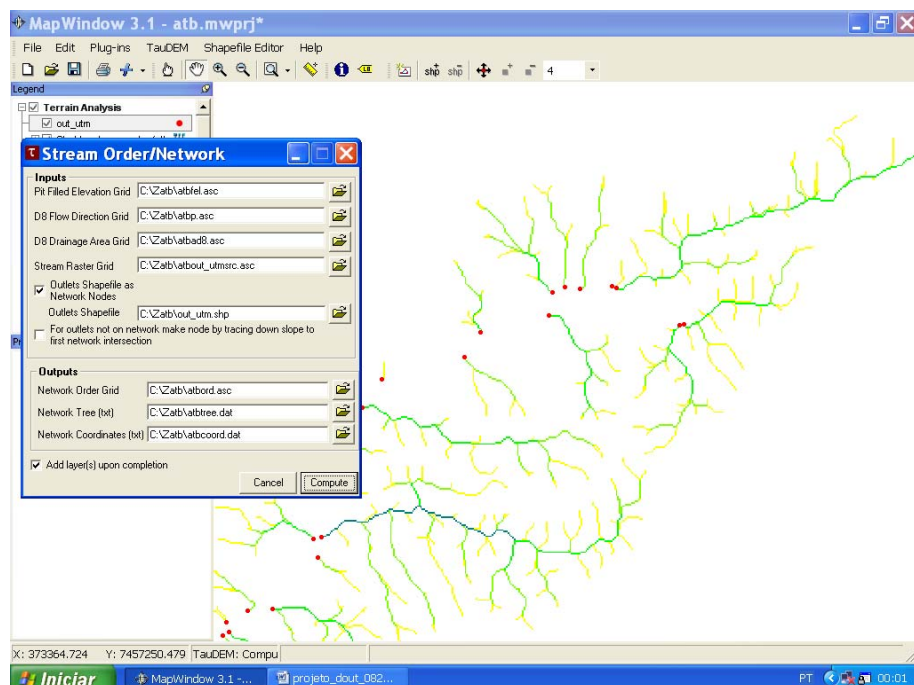


Figura 4.23. Hierarquia dos canais fluviais (Strahler)

A partir da seleção das saídas das sub-bacias, foi possível obter-lhes os limites topográficos. Primeiramente, definiu-se a ordem hierárquica da rede de drenagem (Figura 4.23) (*Stream Order / Network*); na sequência (*Stream Shapefile and Watershed Grid*), o processo foi realizado individualmente para cada ponto de saída de sub-bacia, conforme Figura 4.24; pois, quando realizado ao mesmo tempo para todas as sub-bacias, o *TauDEM* delineia uma sub-bacia para cada segmento de canal, o que se tornou incompatível com a necessidade deste estudo, que adota sub-bacias de 2ª e 3ª ordens.

Outra opção consiste em identificar e assinar estes polígonos por meio do arquivo *shape* no *Database Workshop*, utilizando o SIG *IDRISI 32*.

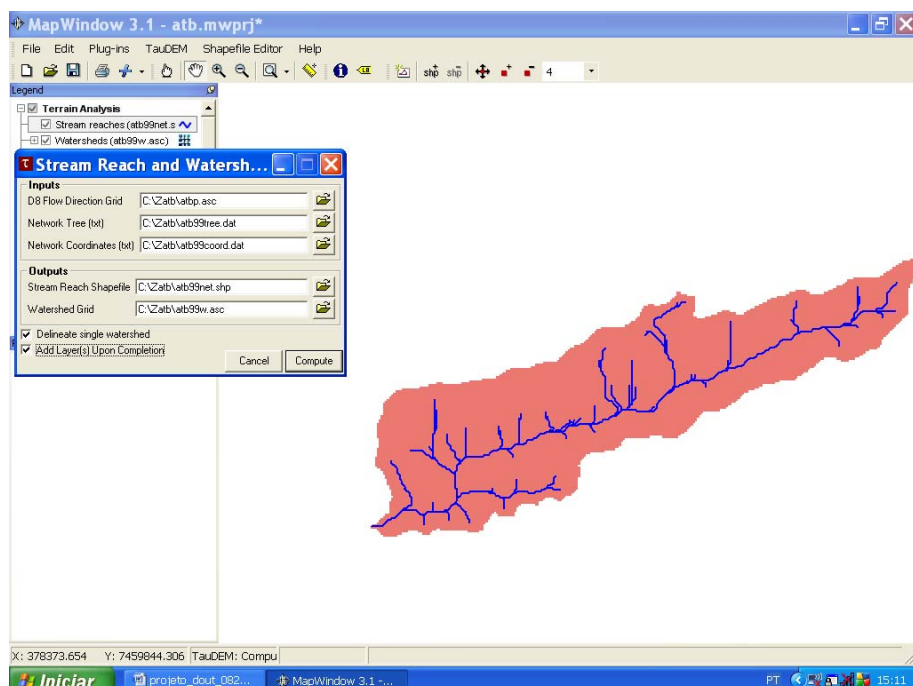


Figura 4.24. Limite de sub-bacia hidrográfica

4.3.5. Obtenção dos parâmetros morfométricos

O cálculo de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas efetuado tradicionalmente de forma manual e com base em mapas analógicos pode ser realizado totalmente em ambiente SIG.

Ferreira & Ferreira (2003) desenvolveram metodologia para o cálculo de diversos tipos de indicadores morfométricos utilizando-se dos módulos do SIG *IDRISI32*. Os autores apresentaram um procedimento digital para a estimativa de 18 índices morfométricos nas sub-bacias do Alto Rio Corumbataí e comprovaram, após a aplicação de análise de regressão linear entre valores estimados por meio de SIG e valores calculados por meio de técnicas convencionais, que este método pode ser empregado sem a perda da acurácia em relação ao método convencional.

Neste estudo, optou-se por utilizar as medidas de *área da bacia*, *comprimento de canais*, *número de canais de 1ª ordem* da tabela gerada junto ao arquivo (*shape*) da rede de drenagem produzida pelo *TauDEM*. As medidas de *perímetro* das sub-bacias foram retiradas com apoio do programa *AutoCad* e inseridas no *Database Workshop* do SIG *IDRISI 32*. A partir disto foi possível calcular, com a função *Calculate Field Values*,

os parâmetros morfométricos de F_1 , I_c , D_m e o F_t com as fórmulas descritas na seção 3.4 – cap.3.

O *TauDEM* é uma ferramenta desenvolvida especificamente para trabalhar com a modelagem hidrográfica. As medidas morfométricas já estão disponíveis em seu banco de dados. No caso do SIG *IDRISI 32*, alguns procedimentos são necessários para a retirada destas medidas no formato raster (Ferreira e Ferreira, 2003). O cálculo de área se mostrou muito eficiente, entretanto, medidas de comprimento apresentam inconsistências: no SIG *IDRISI 32*, o cálculo é feito contornando-se o pixel; no *TauDEM*, um vetor corta a diagonal do *pixel* — o que é uma diferença considerável.

4.3.6. Análise dos dados por regressão e correlação linear simples

Segundo Gerardi (1981), as técnicas de análises de correlação linear e regressão são importantes para a interpretação de dados e fenômenos geográficos envolvendo ao mesmo tempo duas variáveis (x e y). Na Geografia nem sempre as observações se colocam de forma exata sobre a linha de regressão, isto pode ser explicado pela variabilidade dos fenômenos que o geógrafo estuda. Contudo, uma análise criteriosa da correlação r , do coeficiente de determinação r^2 e dos resíduos poderá indicar outras possíveis variáveis desconhecidas que influenciam a variável dependente, podendo ser necessário a formulação de novas hipóteses ou, ainda, a indicação de áreas onde devem ser realizados estudos mais detalhados ou trabalhos de campo.

Ainda segundo Gerardi (1981), é necessária uma análise concisa dos dados para se utilizar de técnicas estatísticas que possuem como base a normalidade dos dados, como é o caso da correlação r de Karl Pearson; se houver outras distribuições, pode-se encontrar dificuldades na análise interpretativa dos dados.

Dois medidas são utilizadas para se medir o grau de afastamento da normalidade: a assimetria (cálculo de a_3) e a curtose (cálculo de a_4). As tabelas, para se verificar a assimetria e a curtose informam valores de a_3 e a_4 , sendo que ($a_4 = a_4 - 3$) devem estar próximos a zero para se considerar como uma distribuição normal.

Alguns procedimentos podem corrigir a falta de normalidade dos dados, como a transformação dos dados originais em logaritmos na base 10, aplicação da raiz quadrada ou, ainda, utilizar o coeficiente de correlação de Spearman, que não exige a normalidade dos dados em substituição à correlação r de Karl Pearson (GERARDI,1981).

O coeficiente de Spearman (r_s) é mais rápido e simples de se calcular, necessitando apenas da organização dos dados em escala ordinal, ou seja, de forma crescente ou decrescente (GERARDI,1981).

Neste trabalho foram realizados testes de normalidade dos parâmetros morfométricos oriundos das cartas topográficas (variável independente), além da utilização da correlação r de Karl Pearson e de alguns testes com o coeficiente de correlação de Spearman (ver seção 5.4, cap.5).

O coeficiente de correlação r dos parâmetros morfométricos de F_1 , I_c , D_m e F_t extraídos a partir do MDE ASTER e das cartas topográficas foram obtidos pelo comando *Statistics/Regress* no SIG *IDRISI* 32.

V - RESULTADOS OBTIDOS

5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MDE ASTER

O MDE digital do sensor ASTER foi adquirido do LPDAAC, conforme padrões de acurácia estabelecidos pelo ATBD (*Algorithm Theoretical Basis Document*), documento que fornece a qualificação para o produto AST14 (MDE), sendo que recentemente a produção de MDE foi aprimorada com a introdução de um novo *Software*: o *Silcast*, produzido especialmente para processar imagens no nível 1A e 1B do sensor ASTER. A acurácia do novo MDE atinge ou excede as especificações de exatidão fixadas para o MDE ASTER relativo (sem pontos de controle no terreno) pelo ATBD. Os testes de validação destes MDEs revelaram que são mais precisos cerca de 25 metros RMSE_{xyz}.

O *software Silcast* está fundamentado em um método automatizado de estéreo-correlação, utilizando efemérides de altitude derivadas de ambos, o sensor ASTER e o satélite Terra para ajustar as coordenadas de posicionamento, o que melhora bastante sua acurácia final, como demonstrado pelos trabalhos da seção 3.2.1 – cap.3. Deste modo, configura-se como um *software* de simples manuseio, não exigindo nenhuma informação adicional por parte do usuário para se gerar o MDE, pois é capaz de ler os *headers* das imagens dos três sensores do ASTER.

Um problema não resolvido inteiramente por esse programa é a definição dos corpos d'água, como pode ser observado na composição colorida da Figura 5.1 e na imagem do MDE (Figura 5.2). Não se constatou este limite, pois, na verdade, o algoritmo interpolou medidas de reflectância da água como medidas de altitude. Isto pode comprometer as cotas de altitude (z) no entorno próximo do reservatório. Após contatos por e-mail com equipe do LPDAAC para solucionar esse problema, não se obteve sucesso, pois o *software Silcast* é um programa que não permite interferência do usuário no processamento das imagens para a obtenção do MDE. Assim, foram solicitadas as imagens que geraram este MDE, no intuito de ao menos identificar o limite do reservatório criando uma máscara, ou ainda, gerar o próprio MDE. Essa solicitação foi atendida prontamente.

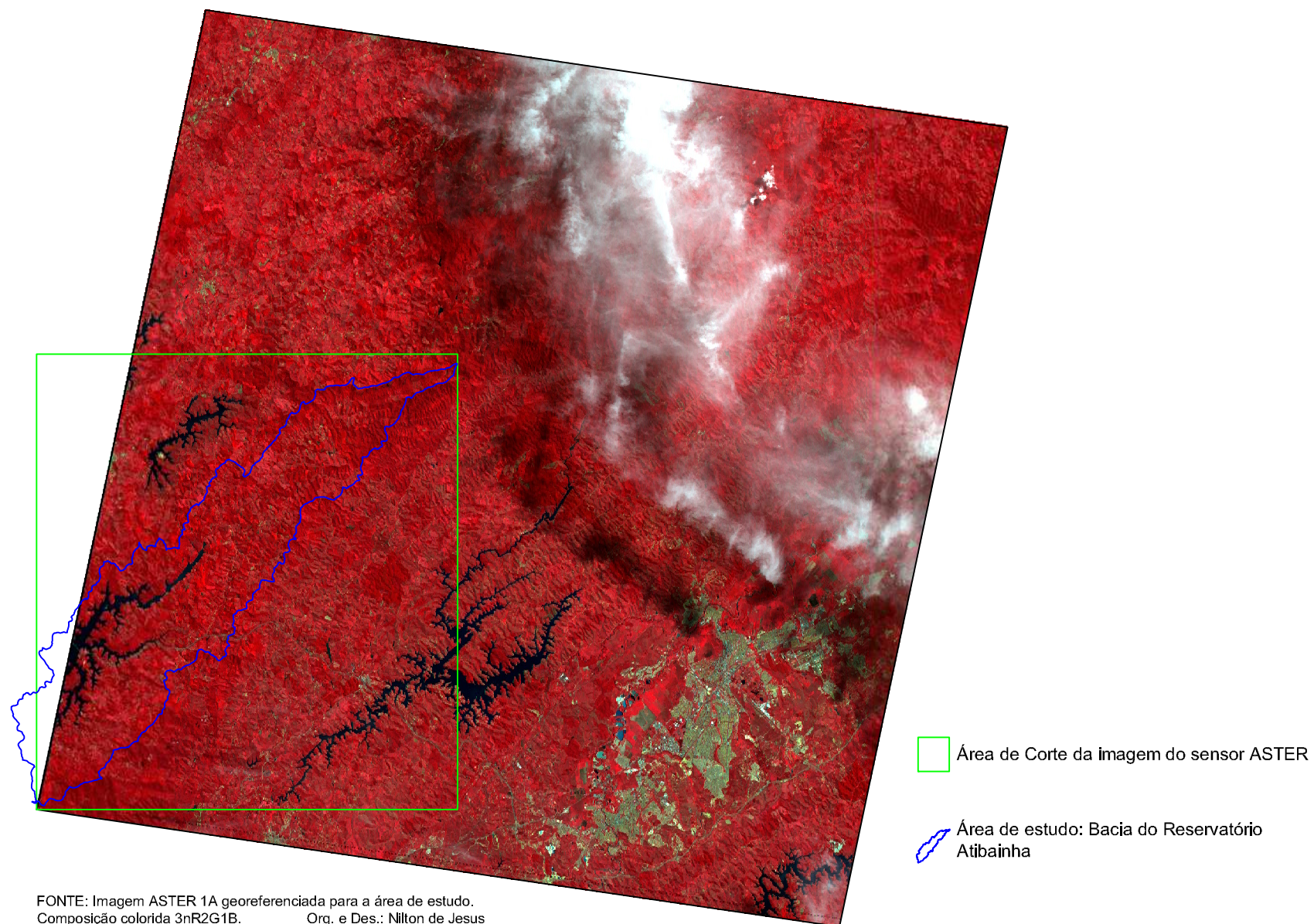


Figura 5.1 - Composição colorida do sensor ASTER (área de estudo)



FONTE: MDE ASTER produto AST14DEM produzido por
LPDAAC em 29 nov 2006. Org. e Des.: Nilton de Jesus

 Área de Corte do MDE ASTER

 Área de estudo: Bacia do
Reservatório Atibainha

Figura 5.2 - Modelo Digital de Elevação (área de estudo)

5.2. A REDE DE DRENAGEM DA BACIA DO RESERVATÓRIO ATIBAINHA.

Para uma melhor análise visual e comparativa do traçado da rede de drenagem oriunda das cartas topográficas, foi delineada uma rede de drenagem de toda a bacia do reservatório Atibainha com o módulo do *TauDEM* no SIG *MapWindow*.

O *TauDEM* permite a extração da rede de drenagem por meio de seis métodos, conforme descrito na seção 4.3.4, cap.4. A considerar o fato de que a nossa intenção consiste no estabelecimento de uma análise comparativa entre as redes de canais, optou-se nesta pesquisa pela adoção do segundo método, que seleciona os *pixels* de altitude mais baixa em uma matriz quadrada (2x2), como definido por Peucker e Douglas (1975) e Band (1986), definindo-se, então, a rede de canais que fazem parte da bacia do reservatório Atibainha. Este método é aconselhado pelo *TauDEM*, quando não se dispõe de rede de canais para se orientar o fluxo. O *threshold* de acumulação adotado pela análise da constante *drop* foi de 10 *pixels* para toda a bacia do reservatório Atibainha (Figura 5.3).

Esta rede de drenagem da bacia do reservatório Atibainha permitiu orientar a definição dos pontos de saídas das sub-bacias desejadas, tendo em vista que estes pontos devem estar posicionados exatamente dentro do *pixel* pertencente ao canal. Isso permitiu a definição dos parâmetros morfométricos das sub-bacias para posterior análise estatística, bem como uma primeira análise visual comparativa (Figura 5.5) com a rede de drenagem extraída da carta topográfica do IBGE em escala 1:50.000 (Figura 5.4).

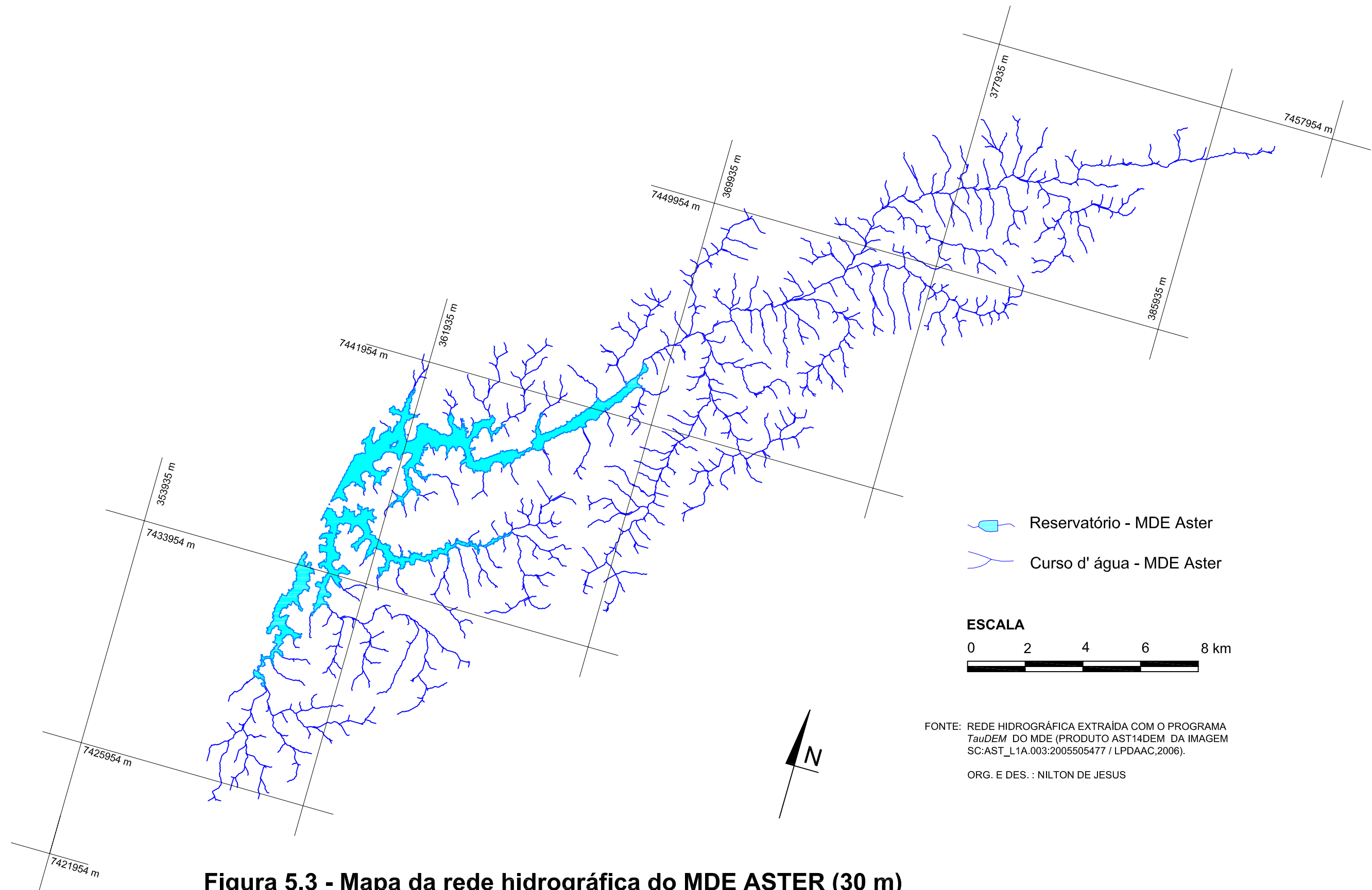


Figura 5.3 - Mapa da rede hidrográfica do MDE ASTER (30 m)

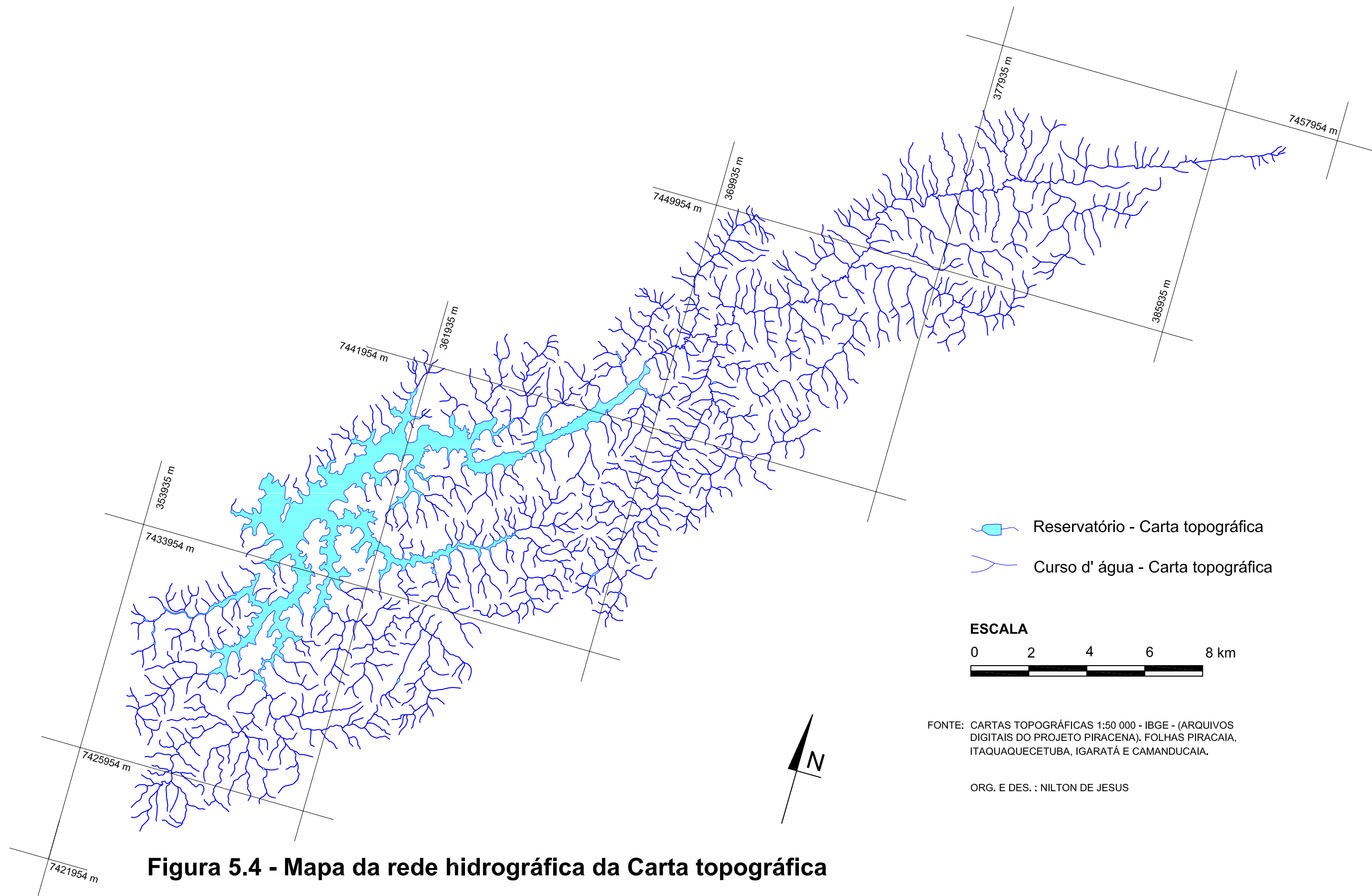


Figura 5.4 - Mapa da rede hidrográfica da Carta topográfica

A partir da análise visual de ambas as redes hidrográficas, alguns problemas puderam ser identificados, como a ausência de muitos canais de 1ª ordem ou, ainda, canais muito curtos. Duas áreas da rede de drenagem foram sinalizadas por uma seta verde (Figura 5.5) onde os traçados dos canais não coincidem com a rede de canais da carta topográfica, com significativa mudança na direção do fluxo da rede de canais proveniente do MDE.

Outro problema foi a identificação de muitos canais fora da posição geográfica quando comparados aos canais da carta topográfica. Esses problemas foram antecipados pelas observações de Garbrecht e Martz (2000) com relação a uma baixa resolução espacial do MDE. Pois a resolução espacial do MDE pode ocultar a identificação de áreas mais baixas ou mais altas do relevo, que por vezes definem a direção do fluxo da rede de canais.

Uma análise mais criteriosa de ambas as redes hidrográficas demonstra um erro sistemático, pois ocorre do mesmo modo em toda a extensão da bacia hidrográfica. Observou-se um desvio contínuo para sudoeste de toda a rede de canais extraída do MDE ASTER. Esse tipo de erro pode ser atribuído a problemas de georeferenciamento do modelo digital de elevação ou mesmo das cartas topográficas que compõem a área de estudo. De certo modo, isso pode ser corrigido e isenta o processo de extração da rede canais com apoio do *software TauDEM* e do MDE ASTER com relação as diferenças de posicionamento dos canais de drenagem.

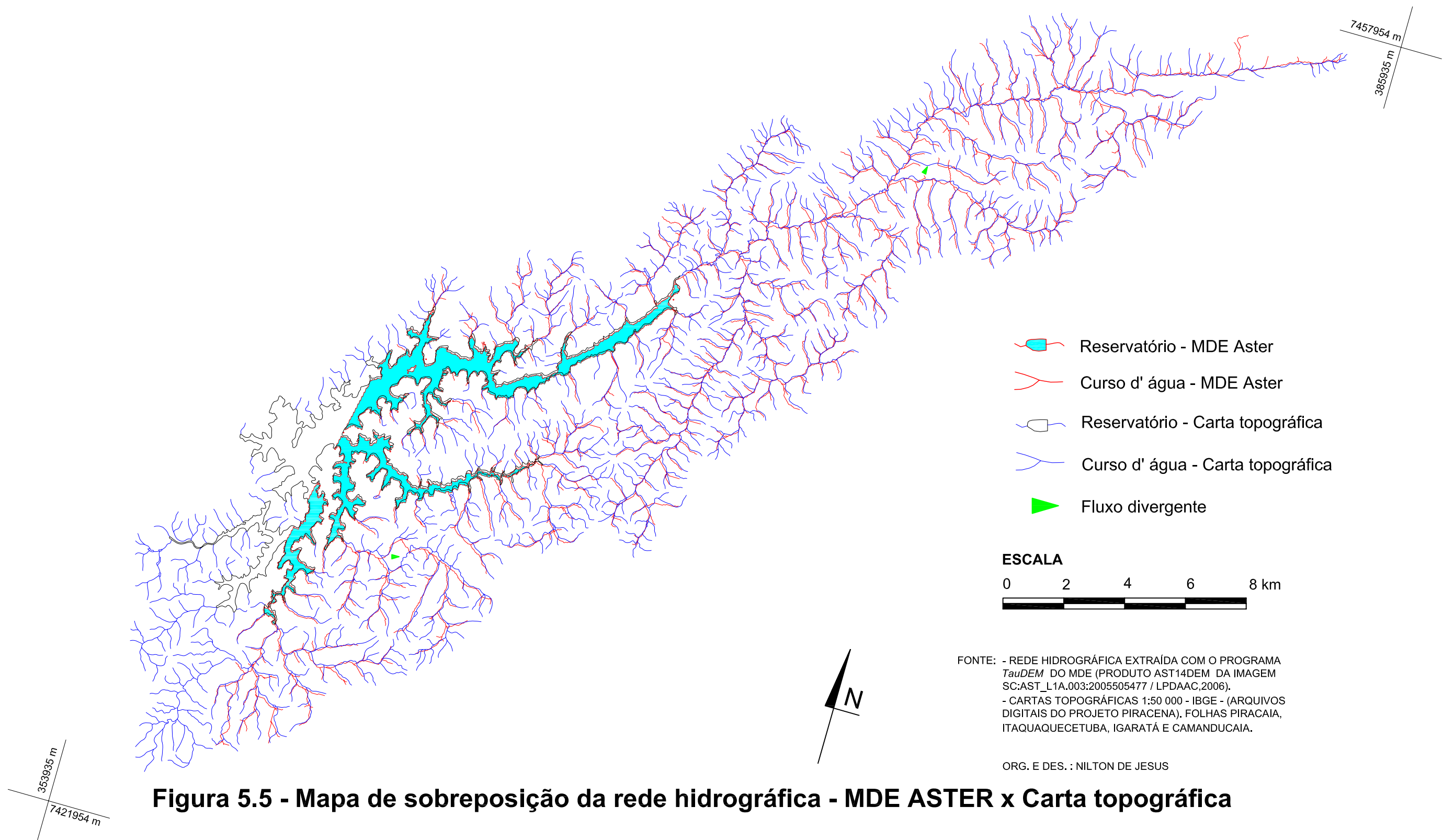


Figura 5.5 - Mapa de sobreposição da rede hidrográfica - MDE ASTER x Carta topográfica

5.3. SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

As sub-bacias hidrográficas foram definidas a partir dos mesmos pontos de saída (exutório) dos arquivos das sub-bacias de 2ª e 3ª ordens definidas no trabalho realizado por Jesus (2001). Nem todas as sub-bacias puderam ser delimitadas em função dos limites da imagem do sensor ASTER que produziu o MDE. Das 99 sub-bacias (linhas em vermelho) foi possível delimitar 85 sub-bacias como definido no mapa da Figura 5.6.

De modo geral, percebe-se um ajuste adequado dos limites topográficos, considerando que os limites das 99 sub-bacias foram extraídos de modo manual no programa *Auto Cad*, seguindo os divisores topográficos entre as curvas de nível de mesma altitude e os pontos cotados das cartas topográficas em escala 1:50.000.

O procedimento automatizado, utilizando a área de contribuição a montante do ponto de saída da bacia, certamente é um procedimento mais seguro de delimitação desses limites, além de ser um processo muito mais rápido. Por outro lado, o procedimento manual, além de ser muito moroso, insere um alto grau de subjetividade nesse procedimento que pode acarretar em erros da definição dos limites das sub-bacias, especialmente em escalas pequenas, pois ocorre uma generalização expressiva das curvas de nível nos mapas topográficos.

Certo inconveniente foi observado no processo da extração dos limites das sub-bacias, pois o *TauDEM* delinea um limite de área de bacia para cada segmento de canal, o que obriga a necessidade da fusão desses limites. Apesar de existir uma opção em *Stream Shapefile and Watershed Grid* para se delinear uma única bacia, esta pode fundir sub-bacias adjacentes atribuindo um único identificador, forçando o usuário a definir o limite das sub-bacias (uma de cada vez), o que torna esse processo muito trabalhoso.

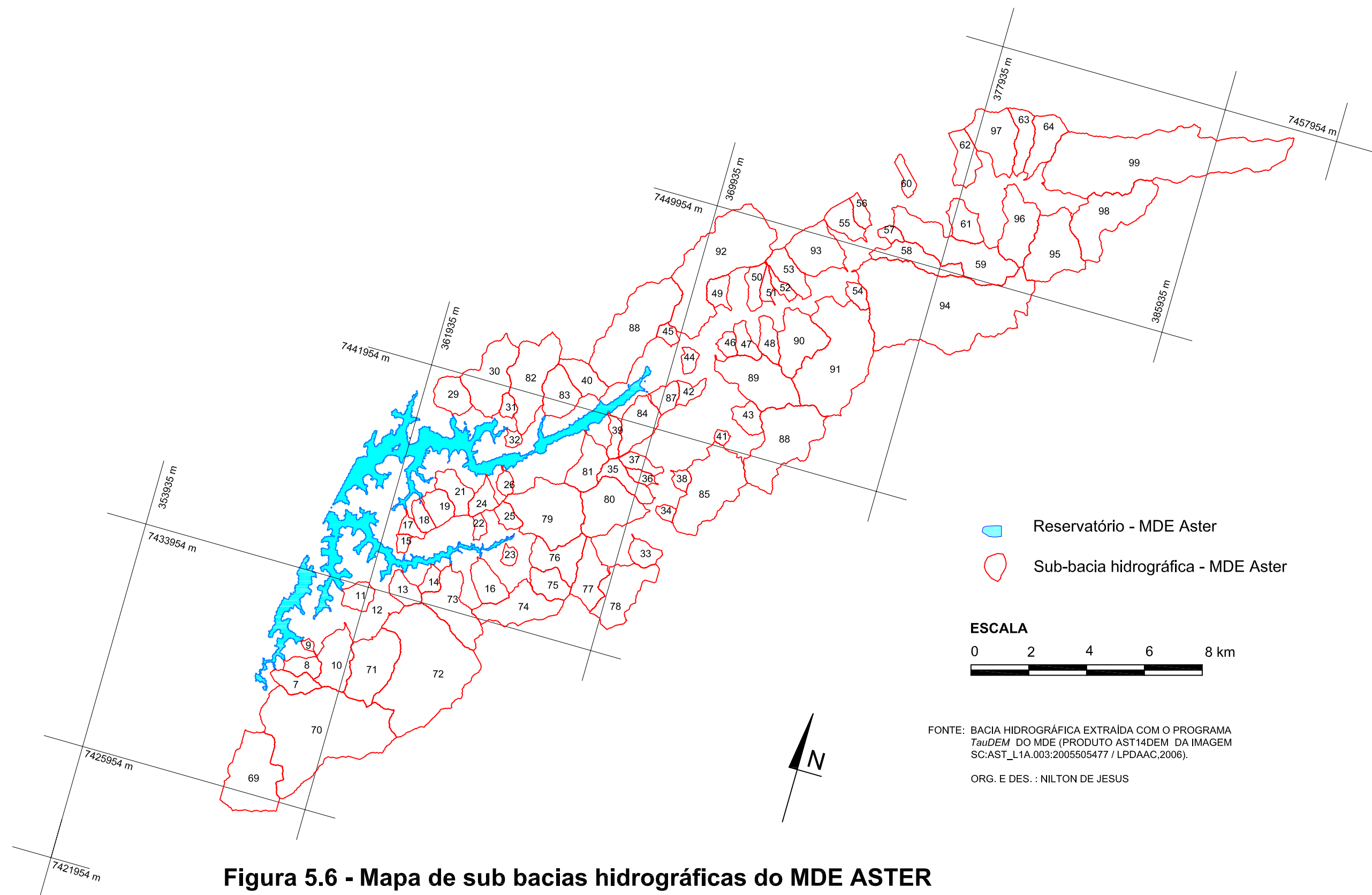


Figura 5.6 - Mapa de sub bacias hidrográficas do MDE ASTER

Para evitar tantos processamentos, foi identificado na tabela do arquivo *shape* dos canais processados no *TauDEM* o nó identificador (*DSNODEID*) do último segmento de canal da sub-bacia que apresenta o valor zero, a partir disto foi mais fácil fundir as sub-bacias, assim como obter muitas medidas morfométricas como área da bacia (*DS_Cont_Ar*), comprimento dos canais (*Length*) e o número de canais de 1ª ordem (*Order*), entre outras.

Isso facilitou muito a retirada e a organização das medidas lineares, evitando-se a conversão para o formato *raster* para retirada de medidas, pois sempre se perde alguma qualidade no processo de conversão, que depende muito da resolução espacial do modelo. Considerando que neste trabalho estamos preocupados em avaliar a qualidade dos parâmetros morfométricos, evitou-se ao máximo esse tipo de procedimento. Além disto, o *TauDEM* é um *software* específico de modelagem hidrológica adequado para a retirada dessas medidas.

O SIG *ILWIS* também possui um conjunto de ferramentas apropriado para modelagem hidrológica, inclusive com algumas vantagens na delimitação de sub-bacias, pois permite a individualização por ordem hierárquica de Strahler, acrescida da opção de escolher a dimensão mínima de um canal de 1ª ordem, como o de fornecer parâmetros morfométricos automaticamente, tal qual a Densidade de drenagem. Alguns testes foram realizados utilizando os arquivos da rede de canais extraída do *TauDEM* no SIG *ILWIS*; foi necessário alterar a codificação da grade de fluxo de direção que é diferente em ambos os sistemas.

Contudo, em função da complexidade dos processamentos necessários, optou-se por não utilizar esses resultados na análise estatística, tendo em vista que toda a base de dados oriunda das cartas topográficas estava no formato do SIG *IDRISI 32*. Além disso, o *TauDEM* disponibilizou a maioria das medidas morfométricas necessárias para a obtenção dos parâmetros morfométricos, o que atendeu os requisitos dessa pesquisa.

Com o aperfeiçoamento contínuo dos SIGs com módulos específicos para a modelagem hidrológica caberá às pesquisas futuras uma avaliação mais criteriosa do desempenho dos mesmos.

5.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS

As medidas lineares e de área das sub-bacias oriundas do *TauDEM* foram carregados no *Database Workshop* do SIG *IDRISI* 32. A partir disto foi possível calcular os parâmetros morfométricos de F_1 , I_c , D_m e o F_t oriundos do MDE ASTER, haja visto que os parâmetros morfométricos das Cartas topográficas já haviam sido calculados por JESUS (2001). Ambas as bases de dados tabular estão dispostas conforme a Tabela 5.1.

As seguintes abreviações foram utilizadas nesta tabela:

SB = Sub-Bacias

A = Área (km^2)

ATB = Parâmetros morfométricos oriundos da Carta topográfica

30 = Resolução do MDE

15 = Resolução do MDE

F_1 = Frequência de Canais e Primeira Ordem (c/km^2)

I_c = Índice de Circularidade

D_m = Declividade Média (%)

F_t = Fator Topográfico

Tabela 5.1 Parâmetros Morfométricos

SB	A_ATB	A_SB30	A_SB15	F1_ATB	F1_TH5	F1_TH8	F1_TH11	F1_15_FT	IC_ATB	IC_30	IC_15	DM_ATB	DM_30	DM_15	FT_ATB	FT_30	FT_15
7	0.93	0.91	0.89	2.15	3.29	2.19	1.10	3.37	0.56	0.53	0.53	17.61	15.72	16.09	21.31	9.20	28.47
8	0.78	0.73	0.71	2.58	8.23	4.11	2.74	2.81	0.51	0.59	0.63	16.85	15.62	16.03	22.23	25.40	28.22
9	0.36	0.14	0.14	5.57	21.72	7.24	7.24	21.04	0.74	0.49	0.48	15.43	13.08	13.62	63.63	46.34	136.14
10	2.03	2.05	2.08	2.96	4.38	2.92	2.92	2.89	0.65	0.52	0.52	16.04	14.04	14.53	30.81	21.32	22.03
11	0.91	0.83	0.89	2.19	4.79	3.59	2.40	3.37	0.78	0.74	0.65	13.66	11.99	12.42	23.21	21.17	27.01
13	0.83	0.87	0.84	3.60	8.04	3.45	2.30	10.69	0.73	0.70	0.67	18.06	14.77	15.40	47.41	23.60	109.80
14	0.53	0.49	0.48	3.79	6.13	4.09	2.04	10.45	0.68	0.64	0.62	19.32	16.87	17.50	49.55	21.99	113.92
15	0.38	0.26	0.28	5.25	7.65	7.65	7.65	18.07	0.83	0.66	0.65	23.86	20.12	20.20	104.05	101.84	235.90
16	1.34	1.28	1.28	2.98	3.12	2.34	2.34	7.05	0.75	0.66	0.63	17.79	16.65	17.09	39.55	25.83	75.84
17	0.40	0.42	0.40	4.98	7.19	2.40	2.40	10.12	0.51	0.44	0.39	21.09	19.83	20.81	54.04	20.76	82.61
18	0.62	0.55	0.50	3.25	1.81	1.81	1.81	6.06	0.73	0.67	0.67	21.00	18.73	20.31	49.52	22.76	81.90
19	0.93	0.98	0.99	3.24	3.07	2.05	2.05	9.06	0.82	0.77	0.75	19.13	16.95	17.11	50.46	26.62	115.54
21	1.17	1.18	1.17	3.42	4.23	3.38	1.69	2.56	0.51	0.49	0.48	16.54	15.55	16.05	29.03	12.99	19.69
22	0.50	0.32	0.34	3.97	3.08	3.08	3.08	11.68	0.65	0.61	0.61	26.28	22.01	22.54	67.83	41.24	160.78
23	0.35	0.30	0.31	5.73	6.76	3.38	3.38	9.73	0.85	0.71	0.70	18.59	14.35	15.34	90.63	34.44	104.13
24	0.72	0.78	0.76	2.76	3.84	2.56	2.56	2.63	0.54	0.55	0.56	19.38	17.12	17.64	28.75	24.10	26.17
25	0.52	0.56	0.55	5.81	5.33	3.55	3.55	10.99	0.80	0.66	0.57	18.99	16.67	17.00	88.19	38.80	105.86
26	0.77	0.38	0.37	2.61	5.20	5.20	2.60	5.44	0.57	0.58	0.56	17.28	16.88	17.43	25.77	25.40	52.79
29	1.30	1.30	1.29	2.30	6.93	3.85	3.85	6.18	0.82	0.75	0.72	20.16	17.24	17.64	38.06	49.98	78.64
30	3.16	3.10	3.12	2.53	4.19	2.90	1.93	3.52	0.56	0.53	0.51	20.83	16.87	17.39	29.43	17.25	31.32
31	0.41	0.37	0.39	4.91	5.40	5.40	2.70	17.99	0.72	0.70	0.60	23.41	17.75	17.84	83.06	33.63	192.90
32	0.29	0.27	0.26	6.93	7.37	3.69	3.69	23.14	0.86	0.67	0.69	17.60	11.55	12.16	105.13	28.66	193.27
33	0.89	0.76	0.76	3.37	5.24	3.93	3.93	9.26	0.65	0.63	0.56	19.74	15.81	16.29	43.11	39.39	84.11
34	0.31	0.29	0.28	6.40	3.49	3.49	3.49	10.60	0.78	0.74	0.73	23.53	19.48	20.27	118.00	50.41	157.28
35	1.08	1.10	1.11	1.85	4.53	3.62	2.72	3.59	0.39	0.36	0.35	19.41	14.61	15.18	14.10	14.23	19.36
36	0.44	0.37	0.39	4.51	8.18	2.73	2.73	5.18	0.54	0.49	0.49	19.48	15.30	15.83	47.67	20.37	39.97
37	0.61	0.63	0.64	3.31	4.80	1.60	1.60	4.70	0.48	0.50	0.47	21.49	16.16	16.56	34.43	12.98	36.77
38	0.43	0.36	0.35	4.62	5.53	5.53	2.77	8.53	0.65	0.62	0.59	19.95	16.21	16.86	59.98	27.68	85.54
39	0.59	0.54	0.52	5.11	9.27	5.56	3.71	13.39	0.42	0.40	0.39	20.38	17.21	17.57	43.55	25.80	92.70
40	1.31	1.26	1.26	3.82	3.98	2.39	1.59	10.31	0.67	0.57	0.56	23.47	19.39	19.87	60.06	17.73	114.53
41	0.25	0.21	0.21	8.03	9.48	4.74	4.74	23.91	0.81	0.80	0.71	15.98	13.96	14.17	104.42	53.02	240.11

Tabela 5.1 Parâmetros Morfométricos

SB	A_ATB	A_SB30	A_SB15	F1_ATB	F1_TH5	F1_TH8	F1_TH11	F1_15_FT	IC_ATB	IC_30	IC_15	DM_ATB	DM_30	DM_15	FT_ATB	FT_30	FT_15
42	0.59	0.54	0.83	5.09	7.38	3.69	3.69	2.42	0.46	0.45	0.58	17.47	13.76	14.74	40.75	22.75	20.67
43	0.81	0.84	0.83	3.69	8.34	3.57	2.38	9.68	0.78	0.66	0.62	17.66	14.50	14.81	51.07	22.82	88.38
44	0.42	0.40	0.37	4.77	5.01	5.01	5.01	10.79	0.82	0.63	0.57	14.77	12.64	12.95	57.41	39.88	80.26
45	0.33	0.38	0.38	6.08	7.82	2.61	2.61	13.07	0.67	0.69	0.66	20.86	15.50	15.89	85.51	27.89	137.48
46	0.44	0.45	0.42	6.80	4.46	2.23	2.23	16.80	0.78	0.70	0.70	18.56	15.23	15.95	98.88	23.90	187.76
47	0.74	0.72	0.71	2.71	4.16	2.78	2.78	2.82	0.61	0.54	0.51	17.82	15.86	16.45	29.58	23.70	23.42
48	0.83	0.87	0.88	4.84	6.89	2.30	1.15	7.94	0.58	0.54	0.49	14.20	12.35	12.80	39.65	7.61	49.36
49	0.88	0.71	0.76	4.54	5.64	5.64	2.82	11.83	0.69	0.56	0.49	19.83	15.87	15.81	61.71	25.26	91.78
50	0.76	0.76	0.79	2.62	5.23	1.31	1.31	2.52	0.56	0.52	0.48	20.71	19.21	19.76	30.15	12.96	24.06
51	0.60	0.38	0.55	3.36	7.83	2.61	2.61	1.81	0.44	0.35	0.40	18.86	19.42	17.59	28.06	17.64	12.76
52	0.45	0.41	0.39	4.49	4.91	2.46	2.46	5.08	0.46	0.39	0.36	17.06	17.30	17.73	35.57	16.60	32.33
53	1.29	1.27	1.30	3.10	3.15	2.36	1.57	3.85	0.61	0.56	0.55	21.31	19.99	20.33	40.35	17.70	43.32
54	0.50	0.50	0.48	3.99	5.97	3.98	3.98	12.38	0.70	0.66	0.62	16.11	18.60	19.10	45.07	48.82	147.57
55	1.07	1.12	1.12	2.81	4.45	3.56	2.67	6.27	0.66	0.55	0.48	19.66	18.21	18.84	36.40	26.64	56.95
56	0.82	0.51	0.50	3.64	3.94	1.97	1.97	9.91	0.65	0.58	0.55	21.83	18.13	18.34	51.43	20.78	99.78
57	0.43	0.36	0.32	4.60	5.60	2.80	2.80	9.42	0.67	0.62	0.42	14.78	15.78	16.07	45.37	27.36	63.45
58	1.87	1.69	1.69	1.60	6.49	3.54	2.95	7.69	0.29	0.29	0.28	17.78	16.67	17.59	8.26	14.31	37.30
59	4.23	4.49	4.51	1.89	4.91	3.12	2.45	4.22	0.33	0.33	0.32	16.79	15.81	16.53	10.52	12.95	22.51
60	0.62	0.50	0.64	3.23	1.99	1.99	1.99	1.55	0.57	0.47	0.57	22.28	17.18	18.43	40.82	16.20	16.35
61	1.22	1.26	1.20	2.47	2.38	2.38	1.59	2.51	0.68	0.63	0.58	16.57	14.96	15.59	27.92	14.90	22.82
62	1.34	1.38	1.39	1.50	5.80	3.62	2.17	3.60	0.59	0.54	0.51	22.25	20.85	21.19	19.70	24.44	38.95
63	1.32	1.25	1.30	2.27	4.80	2.40	2.40	2.31	0.43	0.41	0.40	21.72	19.56	20.12	21.35	19.48	18.63
64	1.75	1.68	1.67	1.71	2.98	1.79	1.19	3.00	0.44	0.46	0.43	22.00	21.18	21.64	16.52	11.66	28.08
69	4.20	4.28	4.73	1.91	5.13	3.50	2.57	3.17	0.57	0.60	0.50	16.95	14.51	14.74	18.53	22.50	23.42
70	10.43	10.54	10.51	2.30	4.93	2.85	1.90	4.28	0.52	0.49	0.48	15.93	14.33	14.69	19.19	13.35	30.20
71	2.88	3.29	2.80	2.78	4.56	3.34	2.43	2.85	0.65	0.60	0.58	16.25	14.96	15.39	29.19	21.74	25.53
72	10.29	9.74	10.19	2.92	3.59	2.57	1.74	2.26	0.63	0.52	0.49	17.21	15.55	15.97	31.66	14.06	17.82
73	2.76	2.73	2.73	2.54	5.13	2.93	2.20	3.66	0.48	0.42	0.41	15.87	14.55	15.14	19.27	13.53	22.95
74	2.72	2.55	2.54	4.04	5.88	3.53	2.35	2.76	0.44	0.43	0.43	15.27	13.00	13.51	27.40	13.08	15.97
75	1.14	1.16	1.19	4.37	6.06	3.46	2.60	6.74	0.65	0.66	0.65	15.01	13.95	14.45	42.90	24.08	63.65
76	1.93	1.89	1.67	4.15	5.28	3.17	2.64	3.00	0.43	0.42	0.45	16.73	14.58	15.27	30.02	16.33	20.52

Tabela 5.1 Parâmetros Morfométricos

SB	A_ATB	A_SB30	A_SB15	F1_ATB	F1_TH5	F1_TH8	F1_TH11	F1_15_FT	IC_ATB	IC_30	IC_15	DM_ATB	DM_30	DM_15	FT_ATB	FT_30	FT_15
77	1.77	1.80	1.80	4.51	4.46	3.34	2.79	11.64	0.57	0.48	0.47	17.98	15.44	16.02	45.82	20.79	87.65
78	2.78	2.78	2.81	3.60	4.67	3.59	2.52	2.49	0.49	0.46	0.46	16.54	14.12	14.62	28.98	16.43	16.58
79	4.44	4.38	4.89	3.60	5.25	3.88	2.51	10.22	0.66	0.62	0.54	19.24	16.46	17.23	45.88	25.53	94.63
80	2.97	3.07	3.09	3.03	4.23	2.60	2.28	6.16	0.68	0.63	0.62	19.85	15.59	16.24	40.54	22.46	62.25
81	1.61	1.64	1.64	2.48	5.50	3.06	3.06	4.27	0.59	0.55	0.54	19.84	17.75	18.05	28.80	29.90	41.52
82	3.43	3.52	3.53	4.38	4.54	3.41	3.12	5.10	0.48	0.46	0.44	19.23	15.51	16.02	40.70	22.47	36.11
83	1.67	1.70	1.65	3.59	5.30	3.53	2.35	9.11	0.76	0.74	0.73	21.33	17.08	17.53	58.35	29.58	116.88
84	1.86	1.80	1.79	2.69	4.45	3.34	2.23	4.47	0.67	0.58	0.58	19.47	15.97	16.38	34.93	20.67	42.22
85	4.55	4.50	4.50	4.18	5.11	3.33	2.66	4.89	0.57	0.54	0.49	16.82	14.09	14.68	40.18	20.16	35.27
86	5.75	5.73	5.73	3.82	5.41	2.97	2.62	6.29	0.56	0.54	0.53	19.76	16.35	17.00	42.63	23.27	56.40
87	0.75	0.75	0.80	5.37	8.00	14.66	9.33	19.91	0.72	0.68	0.68	19.17	16.65	16.99	73.84	106.21	229.96
88	4.92	4.79	4.81	2.24	4.59	3.34	2.92	3.53	0.49	0.47	0.45	16.35	14.31	14.83	18.00	19.70	23.64
89	3.55	3.47	3.47	3.38	4.90	2.88	2.59	5.19	0.60	0.51	0.50	17.68	15.04	15.54	35.71	19.88	40.38
90	2.65	2.60	2.61	3.78	2.70	3.85	2.31	4.99	0.67	0.57	0.54	15.80	14.23	14.82	39.82	18.62	40.25
91	7.27	7.29	7.29	2.34	5.62	3.98	3.15	3.98	0.56	0.48	0.47	16.77	15.43	15.94	21.96	23.31	29.60
92	7.48	7.53	7.49	4.01	4.38	2.79	2.52	6.01	0.45	0.40	0.39	20.58	17.78	18.36	37.39	18.11	43.24
93	2.56	2.53	2.55	2.35	3.55	2.76	2.37	2.74	0.70	0.64	0.66	18.87	17.52	17.78	31.04	26.63	32.14
94	13.51	13.35	13.29	2.89	1.12	3.15	2.55	3.23	0.49	0.42	0.39	16.53	15.47	16.18	23.20	16.44	20.37
95	3.51	3.51	3.51	2.28	5.41	4.84	3.70	4.55	0.67	0.58	0.56	17.33	15.53	16.35	26.28	33.49	41.47
96	2.61	2.58	2.55	2.30	4.64	2.32	2.32	2.75	0.60	0.50	0.47	17.56	16.62	17.18	24.12	19.35	22.44
97	2.64	2.74	2.74	1.52	4.01	2.19	1.82	4.01	0.61	0.60	0.57	22.00	20.17	20.58	20.16	22.03	46.74
98	4.31	3.94	3.95	2.78	5.59	3.30	3.30	3.80	0.48	0.42	0.42	15.45	14.46	15.30	20.44	20.12	24.51
99	12.93	13.04	12.73	1.86	4.68	2.84	1.84	3.46	0.38	0.33	0.32	21.11	20.62	21.21	15.04	12.48	23.30

Muitos testes foram realizados visando a resultados promissores. Para tanto, seguiram-se as recomendações de Gerardi (1981) com relação à verificação e à transformação dos dados, nos quais se buscou a normalidade (Tabela 5.2).

Tabela 5.2. Testes de normalidade

Testes de Normalidade	Parâmetros Morfométricos				
	F ₁	Ic	Dm	Ft	Dd
a3	0.834	0.339	0.382	1.327	5.224
a4	3.514	2.973	2.782	4.277	37.418
(a4-3)	0.514	-0.027	-0.218	1.277	34.418

Os parâmetros morfométricos do Ic e da Dm apresentaram uma assimetria negativa muito próxima a zero, indicando distribuição normal para ambas as medidas de assimetria (a3) e curtose (a4-3).

A F₁, o Ft e a Densidade de drenagem (Dd) oriundos da carta topográfica apresentaram assimetria positiva, ou seja, os valores se concentraram à esquerda da média em um gráfico de distribuição da frequência.

O maior desvio da assimetria e da curtose foi observado para a Dd; testes que buscaram a normalidade dos dados com aplicação da correlação r foram realizados. No entanto, o melhor resultado obtido aplicando a transformação logarítmica foi de $r = 0.236$; tal resultado nos levou a retirar esse parâmetro da análise comparativa dos dados.

A F₁ e o Ft apresentaram valores de assimetria e curtose mais distantes de zero. Em função desses resultados foram realizados vários testes de transformação dos dados para logaritmos na base 10, raiz quadrada e elevação ao quadrado. A melhora na normalidade dos dados foi encontrada para a raiz quadrada, na qual foi aplicada uma correlação r com a rede de drenagem extraída com *threshold* 5 apresentando uma correlação $r = 0.377$ abaixo da correlação r sem a correção da normalidade 0.4048 (Figura 5.7). O mesmo ocorreu com o Ft, que apresentou correlação $r = 0.485$, também abaixo da correlação sem a correção da normalidade.

Por fim, para a F_1 , ainda se aplicou a correlação r_s de *Spearman* que não exige a normalidade dos dados, e foi obtido um valor de $r_s = 0.362$. Também abaixo da correlação r com *threshold* 5.

A partir desses resultados, optou-se, em função das pequenas diferenças entre as correlações, não adotar nenhuma transformação de dados dos parâmetros morfométricos de F_1 , I_c , D_m e do F_t , que foram escolhidos para estabelecer a comparação estatística adotando o coeficiente de regressão linear simples (r) entre parâmetros morfométricos obtidos a partir do MDE ASTER (variável dependente) e das cartas topográficas na escala 1:50.000 (variável independente).

O ajuste da reta e o coeficiente de correlação (r) estão apresentados nos gráficos a seguir:

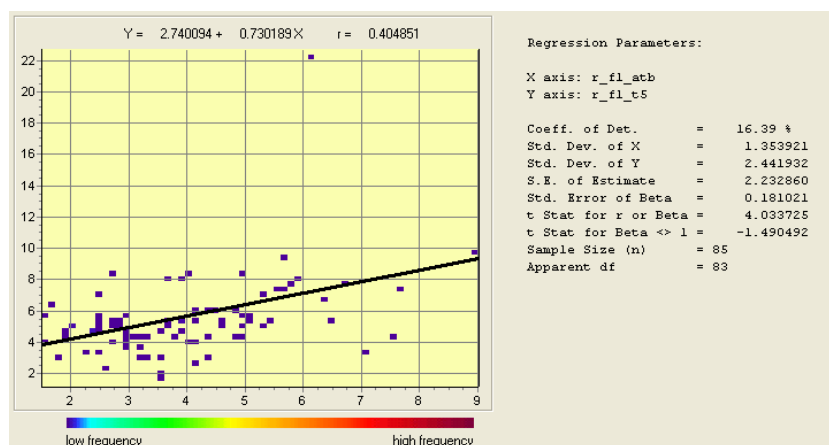


Figura 5.7. Gráfico de regressão da F_1 para *threshold* 5

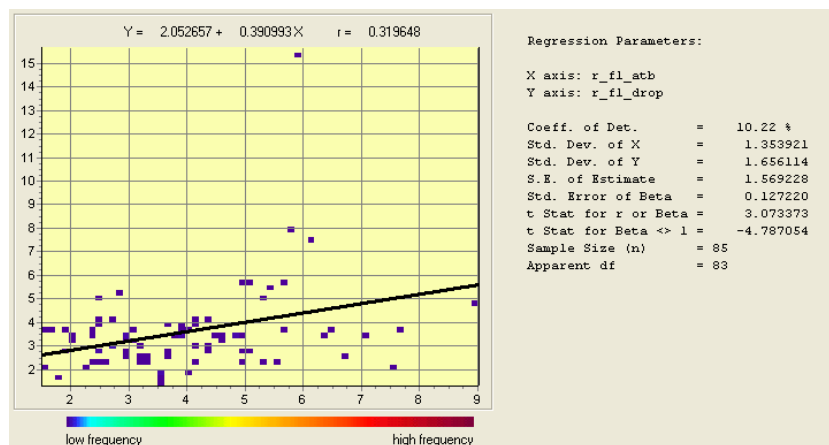


Figura 5.8. Gráfico de regressão da F_1 para *threshold* 8

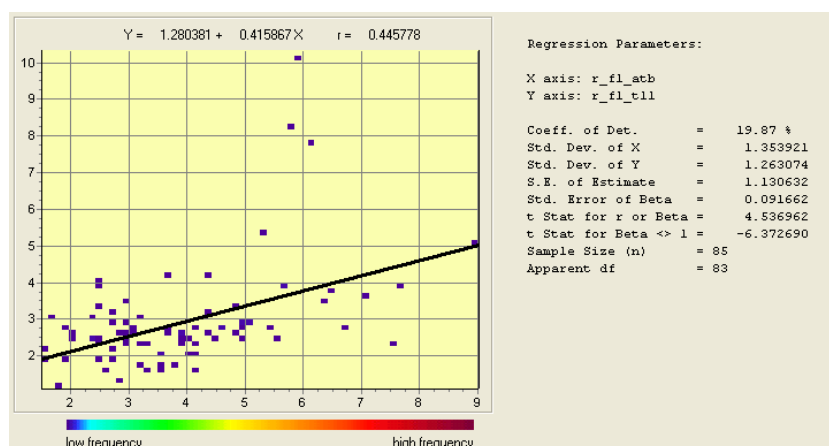


Figura 5.9. Gráfico de regressão da F_1 para *threshold* 11

O melhor ajuste de correlação foi obtido para o *threshold* de área de 11 *pixels*. Contudo, apresentou um coeficiente de correlação $r = 0.4457$ aquém do esperado, o que suscitou uma análise mais criteriosa.

Para melhor compreender esse fato, foram processados outros coeficientes de correlação r , utilizando canais de 1ª ordem acima de 90m para dados oriundos do MDE do sensor ASTER. Considerou-se esse tamanho em razão de que na análise das cartas topográficas em escala de 1:50.000 da área de estudo (bacia do reservatório Atibainha) não foi encontrado nenhum canal 1ª ordem com medidas de comprimento abaixo de 86 mts. Além disso, o *TauDEM* define o canal mínimo em função da resolução espacial do MDE — neste caso, de 30m. Contudo, esses procedimentos não apresentaram melhora no coeficiente de correlação entre os parâmetros morfométricos.

Segundo Christofolletti e Perez Filho (1975b), canais de primeira ordem nem sempre podem ser considerados como canais fluviais, a rede de sulcos esculpida pelas enxurradas pertence ao domínio das vertentes. O rio configura-se como algo de maior grandeza. A experiência na fotointerpretação e o trabalho de campo auxiliam na distinção de ambos. No caso da extração da rede de canais apoiada pelo MDE ASTER, a própria resolução espacial de 30m impede a definição de sulcos e favorece a identificação de vales fluviais.

Diante disso, cinco sub-bacias que segundo Jesus (2001) ocupam áreas com características fisiográficas distintas (ver Figura 5.10) foram selecionadas para uma inspeção mais detalhada dos parâmetros morfométricos, tanto para os dados oriundos das cartas topográficas como também para os dados oriundos do MDE ASTER.

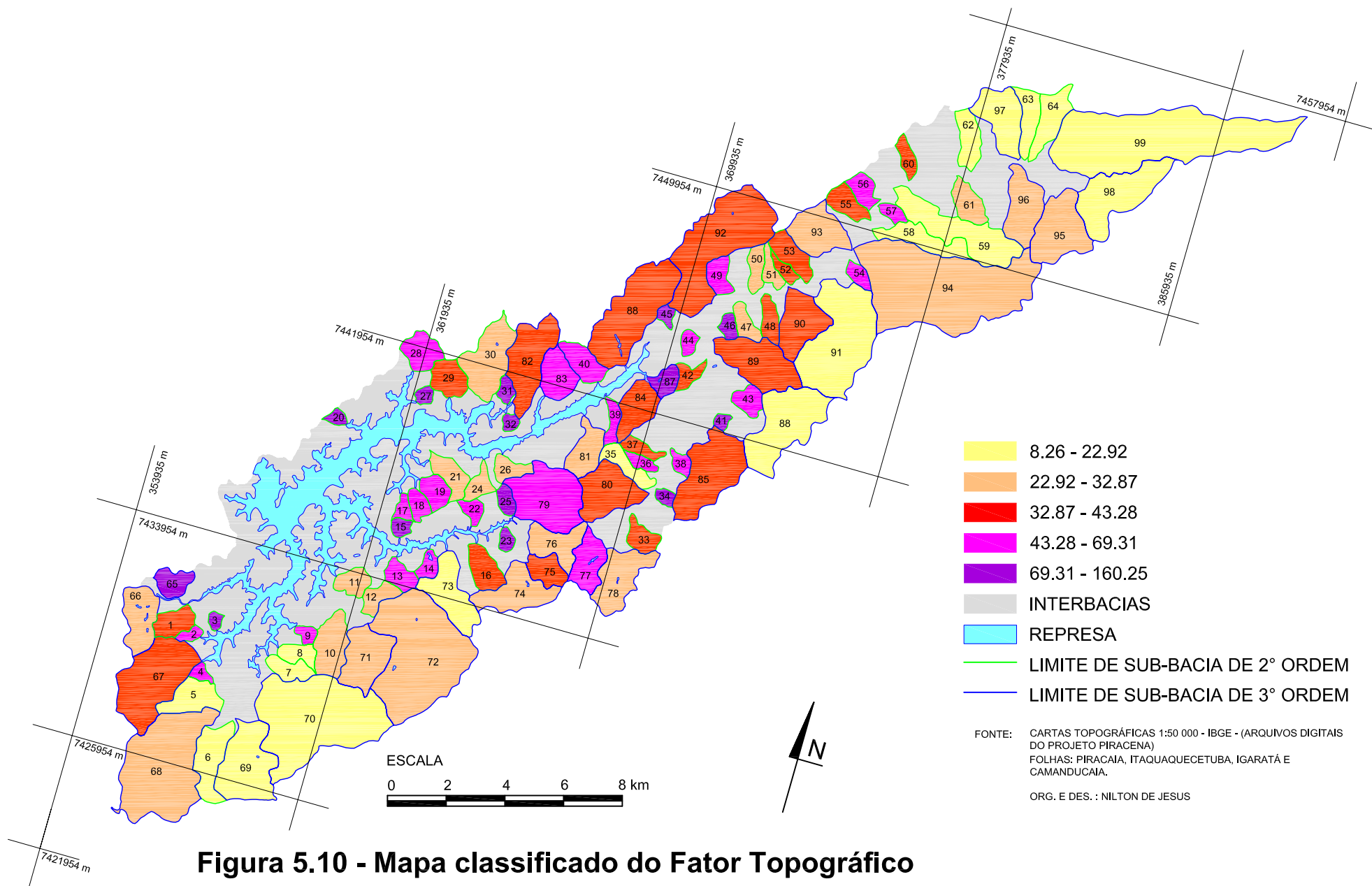


Tabela 5.3. Parâmetros Morfométricos Sub-bacia 79

Parâmetros Morfométricos	Carta Topográfica	MDE do ASTER		
		Threshold 5	Threshold 8	Threshold 11
n° canais 1ª ord	16	23	17	11
Freq. can 1ª ord	3,6	5,25	3,88	2,51
Área bacia (km ²)	4,44	4,38	4,38	4,38
Compr. Canais (km)	38,85	28,08	24,66	19,80
Dens. Drenagem	8,75	6,41	5,63	4,52

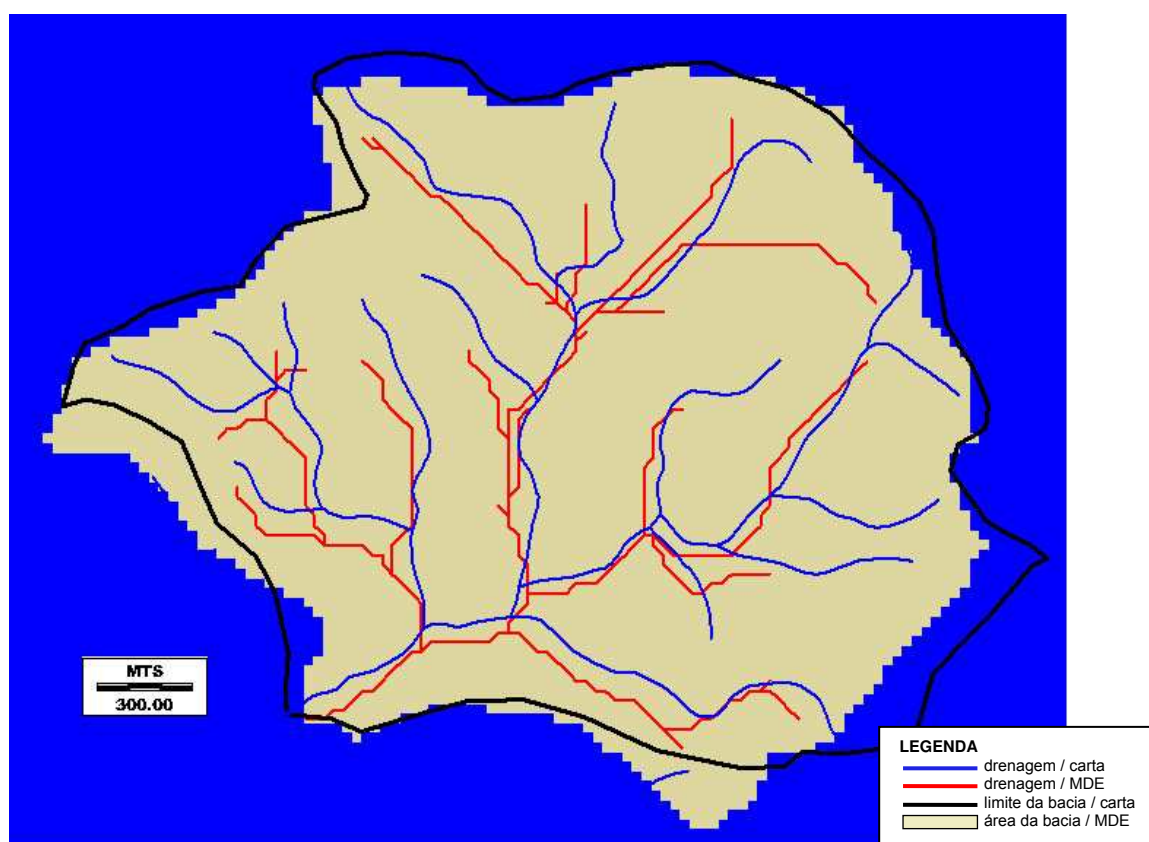


Figura 5.11. Sub-bacia 79 (threshold 5)

Tabela 5.4. Parâmetros Morfométricos Sub-bacia 91

Parâmetros Morfométricos	Carta Topográfica	MDE do ASTER		
		Threshold 5	Threshold 8	Threshold 11
n° canais 1ª ord	17	41	29	23
Freq. can 1ª ord	2,33	5,62	3,90	3,15
Área bacia (km ²)	7,27	7,29	7,29	7,29
Compr. Canais (km)	45,59	46,32	42,32	35,04
Dens. Drenagem	6,27	6,35	5,80	4,81

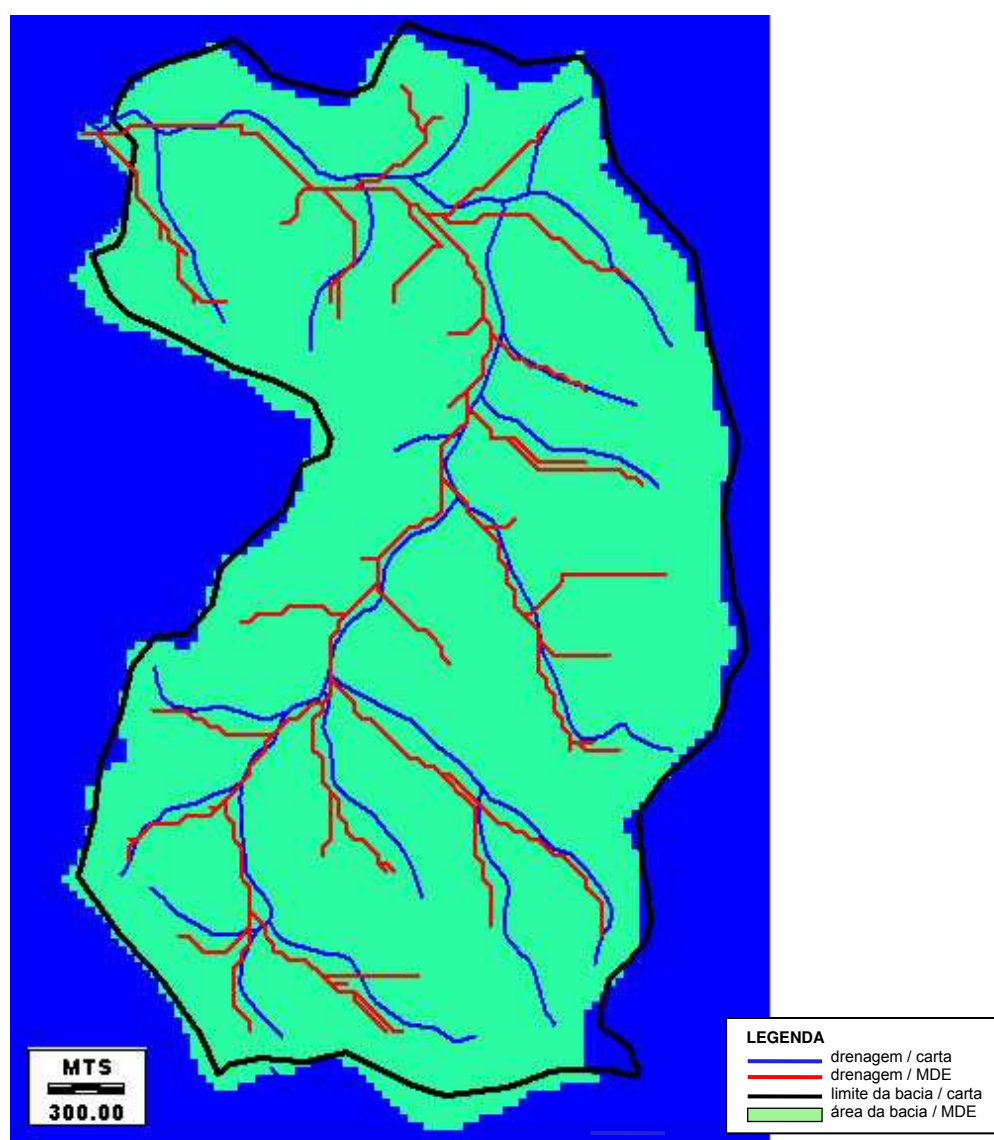


Figura 5.12. Sub-bacia 91 (threshold 5)

Tabela 5.5. Parâmetros Morfométricos Sub-bacia 82

Parâmetros Morfométricos	Carta Topográfica	MDE do ASTER		
		Threshold 5	Threshold 8	Threshold 11
n° canais 1ª ord	15	16	12	11
Freq. can 1ª ord	4,375	4,576	3,432	3,146
Área bacia (km ²)	3,428	3,49	3,49	3,49
Compr. Canais (km)	32,31	23,46	20,64	16,08
Dens. Drenagem	9,425	6,709	5,903	4,598

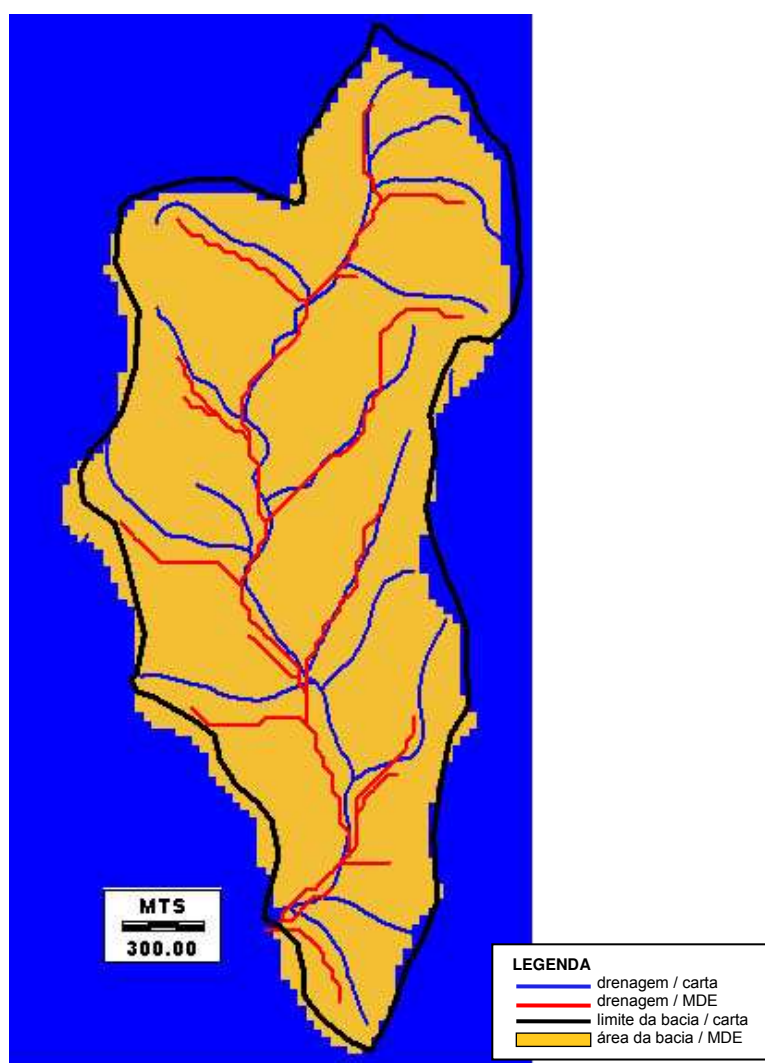


Figura 5.13. Sub-bacia 82 (threshold 5)

Tabela 5.6. Parâmetros Morfométricos Sub-bacia 43

Parâmetros Morfométricos	Carta Topográfica	MDE do ASTER		
		Threshold 5	Threshold 8	Threshold 11
nº canais 1ª ord	3	7	3	2
Freq. can 1ª ord	3,693	8,336	3,572	2,382
Área bacia (km ²)	0,8119	0,839	0,839	0,839
Compr. Canais (km)	5,4	4,79	4,44	3,059
Dens. Drenagem	6,65	5,716	5,287	3,644

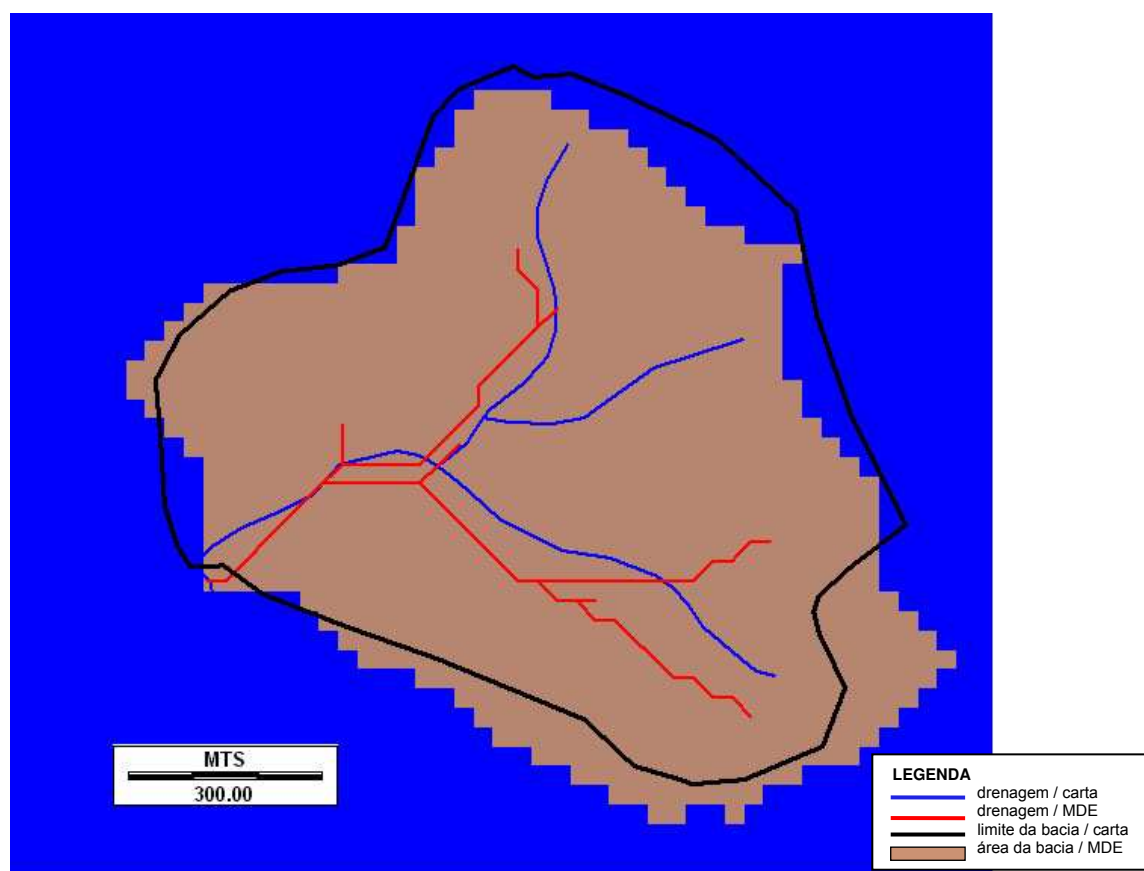


Figura 5.14. Sub-bacia 43 (*threshold 5*)

Tabela 5.7. Parâmetros Morfométricos Sub-bacia 22

Parâmetros Morfométricos	Carta Topográfica	MDE do ASTER		
		Threshold 5	Threshold 8	Threshold 11
nº canais 1ª ord	2	1	1	1
Freq. can 1ª ord	3,996	3,077	3,077	3,077
Área bacia (km ²)	0,504	0,3249	0,3249	0,3249
Compr. Canais (km)	3,99	1,62	1,32	1,14
Dens. Drenagem	7,916	4,986	4,062	3,508

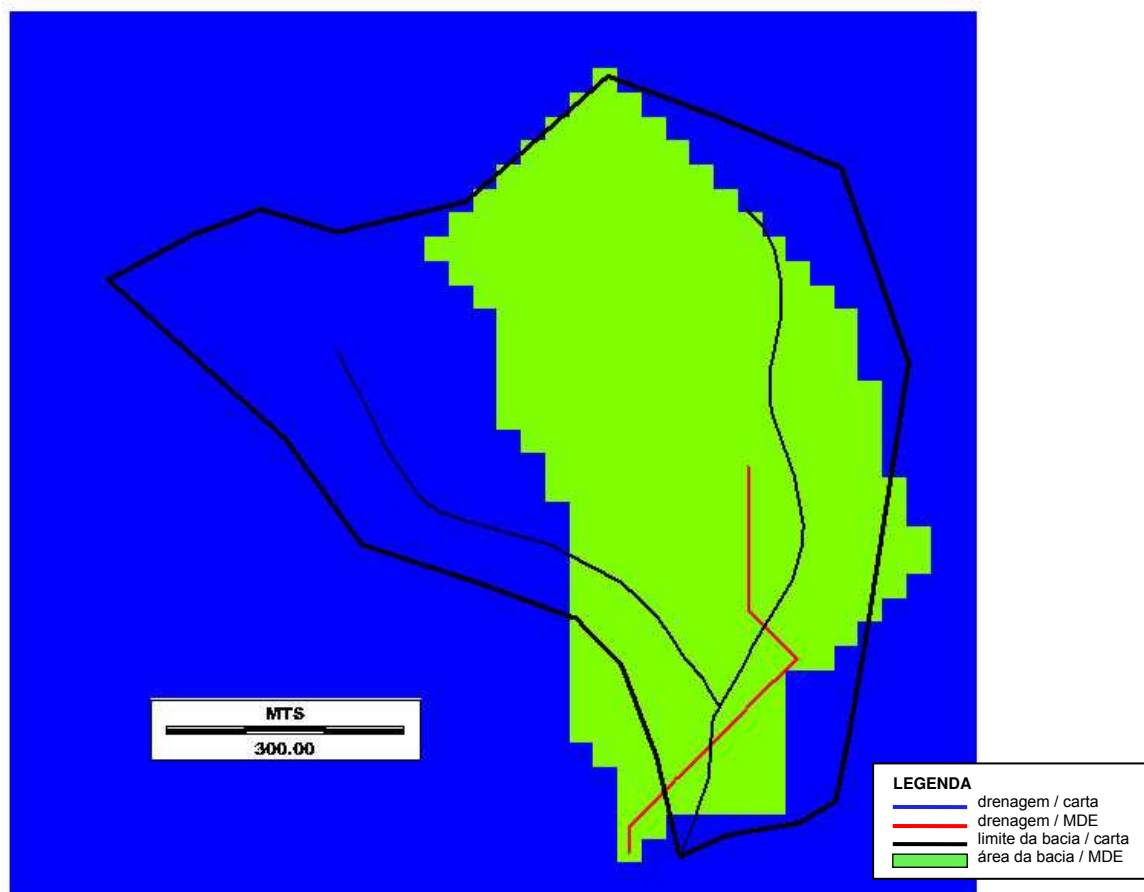


Figura 5.15. Sub-bacia 22 (threshold 5)

Todas as sub-bacias analisadas apresentaram, em geral, menor comprimento de canais. A única exceção foi a sub-bacia 91, que apresentou número de canais de primeira ordem bem elevado, mas com o comprimento de canais muito próximo ao da rede de drenagem original traçada da carta topográfica. No *TauDEM*, um segmento de canal mínimo pode ter 30m, ou seja, um *pixel* da resolução espacial do MDE adotado. O que justifica em parte um valor mais alto para o n° de canais de primeira ordem.

Por outro lado, a ausência de canais também pode comprometer o processamento para a definição da área da bacia, conforme a análise visual da sub-bacia 22. Fato esse que dificulta ainda mais o cálculo dos parâmetros morfométricos, pois todos utilizam esse parâmetro em suas fórmulas.

Muitos canais em linha reta e paralelos foram observados, demonstrando certa dificuldade em delinear fluxos em áreas mais altas do relevo, ou, ainda, quando o canal segue um caminho mais curvo. Esses artefatos podem comprometer tanto a F_1 como o comprimento dos canais, comprometendo assim parâmetros como a Densidade de drenagem.

Outros fatores, como a variação de aspectos físicos da paisagem, levam também a uma variação do *threshold* de área. Assim, o mesmo *threshold* pode apresentar um número de canais alto para uma sub-bacia e baixo para outra, além da limitação imposta pela resolução espacial de 30m do MDE ASTER. Isso afastou a possibilidade de um melhor ajuste do coeficiente de correlação (r) na análise por regressão linear simples.

Cada paisagem possui características próprias que não são uniformes; assim, um mesmo *threshold* pode induzir erros na delineação de redes hidrográficas, mesmo em se tratando de uma escala local, como em uma vertente ou como em um fundo de vale. Esse problema pode ser acentuado quando a delineação da rede de drenagem ocorre em áreas mais extensas, pois há aumento também na heterogeneidade da paisagem com suas diferenças litológicas, pedológicas e de cobertura vegetal.

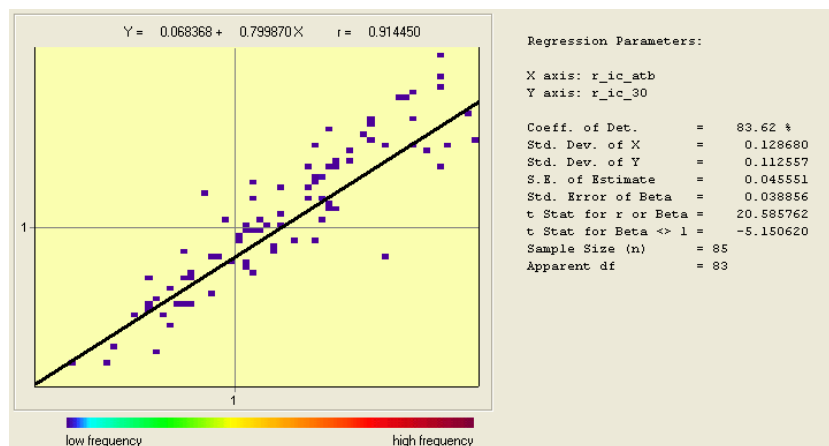


Figura 5.16. Gráfico de regressão do Ic

Para o Ic foram utilizados os limites das sub-bacias obtidos da carta topográfica digitalizados no formato vetorial no programa *Auto Cad 14*. Para o MDE do ASTER o processo foi obtido de modo automatizado no *TauDEM*, utilizando a grade de fluxo acumulado do D8. Esse método é muito mais consistente para se definir os divisores topográficos que um processo manual, sujeito, a rigor, à interpretação do usuário.

O resultado da correlação $r = 0,9144$ foi considerado muito satisfatório, tendo em vista que as medidas da variável independente foram retiradas de modo manual. Testes realizados com a correlação r utilizando o MDE com resolução espacial de 15m apresentaram correlação $r = 0.8556$; deve-se essa ligeira queda ao maior nível de detalhamento dos limites topográficos com consequente aumento do perímetro da bacia, o que interfere no cálculo do Ic.

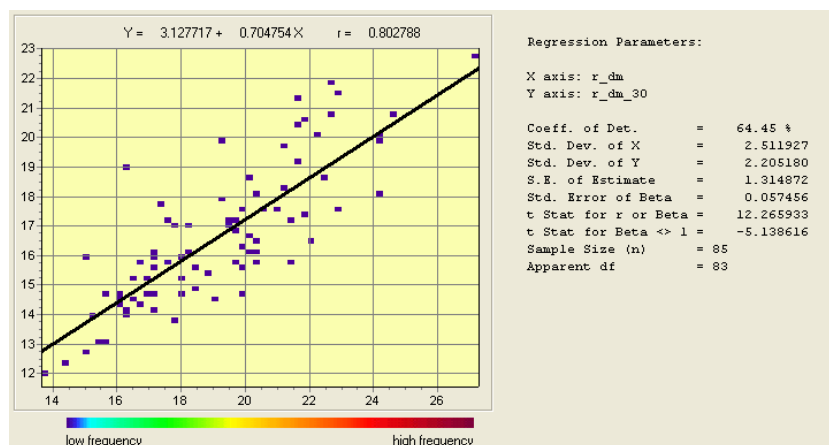


Figura 5.17. Gráfico de regressão da Dm

Para a Dm por sub-bacia foram utilizados os limites das sub-bacias obtidos da carta topográfica e do MDE. Trata-se de alta correlação $r = 0,8027$, considerando-se a resolução espacial e o padrão de acurácia do modelo que indica estudos em escala acima de 1:50.000. Testes realizados com MDE com 15m de resolução espacial não apresentaram mudanças significativas do valor da correlação $r = 0.8074$.

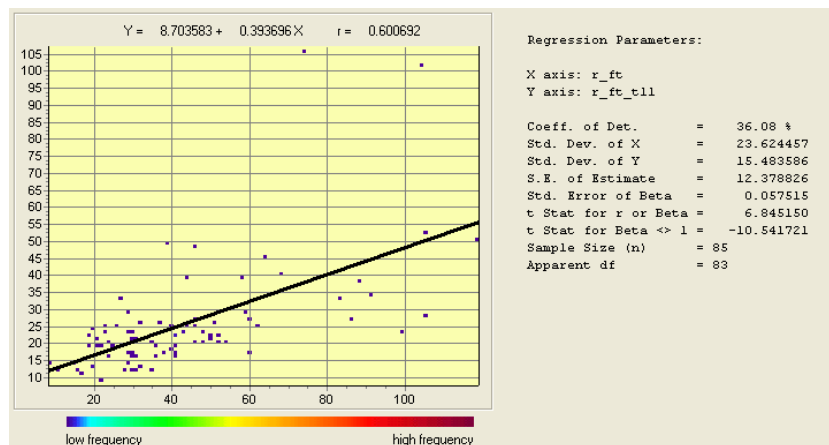


Figura 5.18. Gráfico de regressão do Ft

O Ft é um índice robusto e consistente, pois incorpora três índices morfométricos importantes e bem distintos, a F_1 , o I_c e a D_m das sub-bacias hidrográficas. A correlação obtida $r = 0.6$ pode ser considerada regular, pois empregou a melhor correlação r da F_1 de 0.4457 com MDE ASTER de resolução espacial de 30m e adotando o *threshold* 11, não tão expressivos como os valores do I_c e da D_m .

Em função do baixo valor de correlação linear da F_1 , decidiu-se por gerar o próprio MDE com as imagens cedidas pelo LPDAAC no nível 1A, com a intenção de se utilizar a opção de alta definição espacial do *software Silcast*, que possibilita a geração do MDE com resolução espacial de 15 metros.

O Ft é um índice capaz de identificar características fisiográficas homogêneas de acordo com os trabalhos realizados por Ferreira (1991) e Jesus (2001). Essa evidência nos levou a utilizar o Mapa classificado do Fator topográfico com cinco grupos de sub-bacias hidrográficas, produzido por Jesus (2001) (ver Figura 5.10) como um critério de seleção de áreas para a obtenção de uma nova rede de drenagem, utilizando o novo MDE de 15m gerado com o *software Silcast*. Deste modo, buscou-se atender a

variabilidade do *threshold* de área em função das características fisiográficas de cada área.

Outra medida empregada foi a obtenção da rede de drenagem, utilizando a análise da constante de *drop* para a escolha do melhor *threshold* de área, visando a um método mais criterioso com um menor grau de interferência do usuário na definição da rede de drenagem.

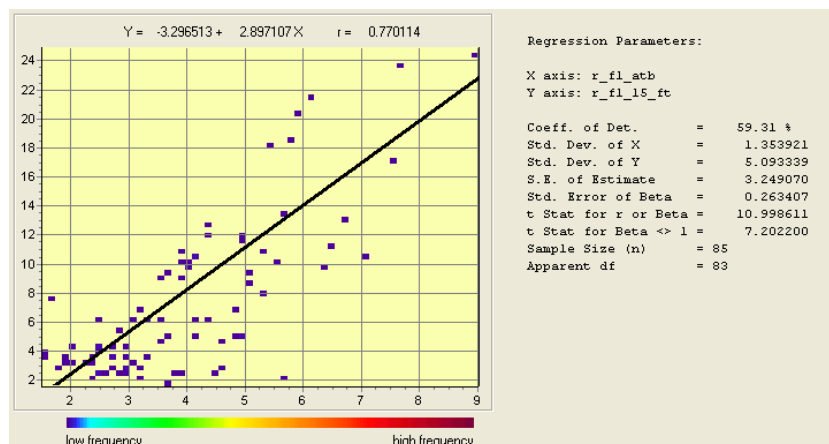


Figura 5.19. Gráfico de regressão da F_1 adotando o mapa do Ft

Tabela 5.8. *Threshold* de área por classe do mapa do Ft

Mapa Ft por Classes	Threshold		Regressão linear r
	drop	adotado	
1	12		0,77
2	14		
3	8		
4	5		
5	4		
Todas sub-bacias	13		0,36
Todas sub-bacias		9	0,29

O valor de correlação linear $r = 0,77$ foi o melhor resultado obtido até aqui para F_1 . Outros processamentos foram realizados para se certificar do uso do Ft como índice de suporte para determinação do *threshold* de área. A análise da constante *drop* foi utilizada para a extração da rede de drenagem de todas as sub-bacias do reservatório

Atibainha, indicando um *threshold* de área constante de 13 *pixels* e mais uma rede de drenagem com *threshold* de área adotado de 9 *pixels*, buscando a formação de mais canais. Contudo, ambas as redes de drenagem não apresentaram melhoras nos resultados dos coeficientes de correlação $r = 0,36$ e $r = 0,29$ respectivamente (anexo 4).

A seleção de áreas distintas para obtenção da rede de drenagem configura-se como um procedimento eficiente para se obter uma rede de drenagem mais adequada. Isto pode ser mais bem compreendido a partir dos valores obtidos de *threshold* de área para cada classe do mapa do Ft.

A primeira classe em amarelo recebeu o valor de *threshold* 12 e as demais 14, 8, 5 e 4 respectivamente. Esses valores foram obtidos com a análise da constante de *drop*, menos para a última classe, que indicou um valor de *threshold* 1 que foi substituído por 4; pois, conforme nossa experiência na obtenção de redes, um *threshold* muito baixo duplica canais espessando a rede de drenagem. Isto não contribui para o aumento do número de canais, assim como de sua extensão. Esse critério, como diz Tarboton (2005), determina um grau de subjetividade no processamento que requer a intervenção de um usuário atento e experiente.

Essa divergência entre os *threshold* de área demonstra diferença das características fisiográficas da área de estudo (ver Figuras 4.1, 4.2 e 4.3) quando comparados ao mapa do Ft (ver Figura 5.10). Revela de forma genérica as classe 1 e 2 ocupando áreas serranas compostas por morros e montanhas, predomina o substrato rochoso granítico com exceção da porção a NE composta por gnaisses, a área está coberta predominantemente por latossolos e associação de latossolos a argissolos. A resistência dos granitos e dos gnaisses mais a presença dos latossolos dificultam a esculturação de canais nessa zona, o que contribui para *thresholds* de área mais elevados.

Por outro lado, as classes 3, 4 e 5 estão posicionadas na parte central da bacia do reservatório Atibainha, em relevo com predominância de morros em vales mais abertos, na qual ocorrem três tipos de litologia (gnaiesses, migmatitos e filitos), com contato definido por falhamentos com destaque para a falha de Jundiuvira.

Com relação às unidades pedológicas, ocorre predominância de argissolos e argissolos associados a cambissolos. Em função dessas características, essa zona está mais propensa à esculturação de canais. Além disto, possui sub-bacias mais circulares, o que também favorece a formação de canais.

As amplitudes altimétricas são menores que nas classes 1 e 2, no entanto, as vertentes em rampas mais curtas contribuem para uma forte declividade média nessa zona (Tabela 5.9).

Tabela 5.9 – Classes do mapa do Ft com Dm e Amplitude altimétrica

Mapa Ft por classes	Decl média (%)	Ah média (m)
1	17,8	414
2	17,4	357
3	18,5	316
4	19,4	281
5	20,4	195

Outro aspecto relevante é a eficácia do Ft como um parâmetro morfométrico consistente na identificação das características fisiográficas de uma área. Isso vem ao encontro dos trabalhos realizados por Ferreira, a partir de 1991, incluindo o trabalho de Jesus (2001).

Esses resultados apontam para a necessidade de se apoiar a extração da rede de drenagem com suporte de análise espacial entre mapas pedológicos e geológicos para identificação de áreas homogêneas. No caso de essas opções não serem possíveis, dada a ausência desses mapas, deve-se restringir a extensão da área, apoiando-se na premissa de que áreas mais próximas tendem a ser mais homogêneas.

Para uma extração da rede de canais adequada com a escala de 1:50.000 os resultados apontam para a necessidade de MDE com resolução espacial abaixo dos 30m, mas outros parâmetros como cálculo de áreas e a declividade apresentaram valores apropriados nesta resolução espacial.

5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constatou-se que a obtenção de parâmetros morfométricos a partir do MDE do sensor ASTER é eficiente, especialmente para os parâmetros morfométricos que envolvem extensão areal, como o L_c e a D_m por sub-bacia. Por outro lado, parâmetros que possuem informações lineares, como a F_1 , apresentaram valores do coeficiente de correlação mais baixos, o que não impede sua utilização, desde que se obtenha a rede de drenagem condicionada a um *threshold* de área variável em função dos fatores fisiográficos.

A resolução do MDE também é um fator determinante na obtenção da rede de drenagem; para parâmetros como a F_1 aconselha-se que seja retirado de MDE com resolução espacial abaixo dos 30m — no caso do ASTER, foi utilizado a resolução espacial de 15m, que apresentou melhores resultados do coeficiente de correlação.

Há de se destacar o ótimo desempenho do *software Silcast* para geração do MDE, tanto no que se refere ao padrão de acurácia, de acordo com a revisão da literatura, como no que se refere à facilidade de manuseio. É um exemplo apropriado de *software*: cumpre sua função básica, não requerendo nenhuma especialização técnica por parte do usuário.

A utilização de *softwares* como o *TauDEM* também é aconselhada, ou SIGs, como o *ILWIS 3.3*, que possuem módulos específicos para a modelagem hidrológica. Isto facilita muito a retirada das medidas necessárias para a obtenção dos parâmetros morfométricos, além de contar com maior precisão destas medidas.

Muito tem sido realizado no sentido de automatizar procedimentos para extração da rede de drenagem. Os primeiros trabalhos realizados por Peucker e Douglas (1975) e Band (1986), fundamentados na forma das encostas, apresentam bons resultados, pois identificam por meio da concavidade o caminho que a água percorre. Contudo, parece-nos frágil a geração digital de redes de drenagem, a considerar tão-somente as características topográficas do relevo. Parece claro que apenas um parâmetro não se mostra consistente para tal tarefa.

A revisão da literatura aconselha o uso de mapas pedológicos para a distinção do *threshold* de área, entretanto, sempre se constatará a falta de um procedimento comum, capaz de gerar redes de drenagem em áreas variadas, considerando-se as diferenças de escala e de procedimentos similares na obtenção destes mapas pedológicos, além da necessidade da definição de critérios ponderativos na análise espacial para a adoção do melhor *threshold* de área por unidade pedológica.

Outro parâmetro fundamental seria mapear a própria água, ou, ainda, a concentração de umidade no solo — isso certamente permitiria um mapeamento mais próximo da realidade. Assim, evitar-se-iam problemas como o preenchimento das depressões, delineação de canais em áreas planas ou, mesmo, a retirada do próprio *threshold* de área para a definição da nascente de um canal. Pois, de acordo com os resultados desta pesquisa e de outros trabalhos nela mencionados, este *threshold* pode variar em função das características de cada paisagem; quando não, em mesma vertente de uma bacia hidrográfica, o que impede um mapeamento uniforme e consistente com a realidade.

Alguns trabalhos na área do Sensoriamento Remoto vêm produzindo redes de drenagem a partir de classificação com resultados eficientes; o canal é identificado por uma zona mais úmida, não existe uma definição precisa deste canal, mas o caminho da água está marcado. Assim, a fusão de ambas as metodologias pode trazer resultados profícuos para as pesquisas futuras, com a vantagem de se utilizar uma única fonte de dados, como as imagens do sensor ASTER, que possui ótima resolução espectral, ainda muito pouco explorada.

Outra opção viável seria no caso do sensor ASTER que possui alta resolução espectral e espacial, explorar a possibilidade do mapeamento de indicadores pedológicos e geológicos, estabelecendo áreas distintas para a definição da rede de drenagem, ou fazer uma identificação de áreas úmidas e forçar o fluxo para essas áreas. Deste modo, partindo-se, apenas de uma fonte de dados — as imagens do sensor ASTER.

Neste contexto, estaríamos solucionando um dos problemas mais recorrentes na análise espacial em ambiente SIG que são as diversas escalas e métodos de confecção

dos mapas temáticos da base de dados. Isso seria muito significativo em áreas sem mapeamentos mais detalhados de topografia, pedologia, geologia e vegetação e mesmo nas áreas que os possuem, pois teríamos uma base de dados consistente e sem diferenças de escalas.

Apesar da utilização do Fator topográfico estar condicionada à existência de uma base de dados topográfica muitas vezes indisponível na escala desejada, o sucesso na identificação do melhor *threshold* de área para a extração da rede de drenagem é confirmado, haja vista os resultados expostos nos trabalhos desenvolvidos por Ferreira (1991) e Jesus (2001), na eficácia deste parâmetro como um identificador de áreas distintas da paisagem.

De modo algum é aconselhável a utilização de um mesmo *threshold* de área para extração da rede de drenagem em áreas extensas, nenhum dos testes realizados considerando toda área da bacia do reservatório Atibainha apresentou resultados positivos.

No caso do relevo brasileiro, encontramos uma diversidade de paisagens. O Planalto Atlântico possui, em geral, vales bem fechados, o que favorece a delineação da rede de drenagem pelo método apresentado. Por outro lado, regiões como o Pantanal, Pampas Gaúchos e a Planície Amazônica, caracterizadas por superfícies planas e periodicamente inundáveis, podem dificultar muito a extração automatizada da rede de drenagem sem uma intervenção acentuada do usuário na identificação dessas áreas. Assim como, áreas em relevos cársticos com a presença de muitos canais que mergulham sob o manto rochoso, pois os *softwares* de extração da rede de canais estão programados para manter um fluxo sem interrupção.

Esses problemas estão sendo identificados pelas pesquisas mais atuais, e algumas soluções, como análise espacial e inserção de outros parâmetros, estão sendo consideradas. O fato é que esse processo deve se intensificar nos próximos anos, tamanha é a velocidade na qual são criados novos avanços nos sistemas computacionais e aumento no volume de dados a serem analisados.

Importa destacar que, mesmo utilizando procedimentos automatizados de extração da rede de drenagem, por várias vezes, a experiência do usuário é

fundamental na geração da rede de drenagem. Isso de modo algum quer dizer que devamos voltar aos métodos tradicionais, mas sim nos aprimorarmos para extrair o máximo das disponibilidades atuais de fonte de dados e sistemas computacionais.

Estes procedimentos de extração da rede de drenagem com definição automatizada da morfometria a partir do MDE do sensor ASTER e de outros sensores de alta resolução espacial, especialmente os sistemas de sensores ativos que permitem imageamento com coberturas de nuvens RADAR/SAR, configuram-se como ricas fontes de dados para áreas onde não existam mapeamentos topográficos adequados, suprimindo, assim, diversas demandas nas áreas de pesquisa em geociências, bem como no planejamento em instituições privadas e/ou governamentais.

O desafio permanece no intuito de tentar validar esses modelos virtuais da realidade. Para isso, é preciso vencer um dos maiores obstáculos da modelagem, que é testar o próprio modelo, tendo em vista a falta de fontes seguras, ou seja, de base de dados temáticas das quais não se conhece bem a verdadeira acurácia.

VI – BIBLIOGRAFIA

6.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, M.; HOOK, S.; RAMACHANDRAN, B. **ASTER User Handbook**: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. version 2. NASA: Jet Propulsion Laboratory, 2002. 135p. Available at: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/> Acesso em: 17 out. 2008.

ACKERMANN, F. Digital image correlation: performance and potential application in photogrammetry: **Photogrammetric Record**, v. 11, n. 64, p. 429-439, 1984.

ANDRADE, J. B.; BLITZKOW, D. Navstar/GPS - Uma nova era para o posicionamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 1990, São Paulo. **Anais...** Escola Politécnica da USP, 1990, p. 189-197.

BAILEY, G. B.; GESCH, D.; EVANS, G.; ZHANG, Z.; DUDA, K.; REDLIN, M.; RAMACHANDRAN, B.; FUJISADA, H. Assessing the Accuracy of ASTER DEM's as Compared to SRTM DEM's. In: SRTM WORKSHOP USGS NATIONAL CENTERRESTON, VA June 14, 2005 USGS National Center for EROS. Available at: http://edcwww.cr.usgs.gov/conferences/SRTM/presentations/Slides10_Bailey.pdf Acesso em: 17 out. 2008.

BAND, L. E. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. **Water Resources Research**, 22(1): 15-24, 1986.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: esboço metodológico. **Cadernos de Ciências da Terra** (13). São Paulo: IG-USP, 1971.

BIGARELLA, J.J. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. 2. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2007. v.3, 1436 p.

BLOOM, A.L. **Superfície da Terra**. São Paulo: Edgard Blücher, 1972. 184 p.

BLOOM, A.L. **Geomorphology**: A systematic analysis of late cenozoic landforms. New Jersey: Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, 1978. 510 p.

BOLSTAD, P.V.; STOWE, T. An evaluation of DEM accuracy: Elevation, slope, and aspect. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 60, n. 1, p. 1327-1332, 1994.

BUREAU OF THE BUDGET, United States National **Map Accuracy Standards**: U.S. Bureau of the Budget, Washington, DC: 1947. 1 p.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographic information systems for land resources assessment**. Oxford: Claredon Press, 1986.

BURROUGH, P. A.; McDONELL, R.; **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford, Oxford University Press, 1998.

CAMPOS, I. O. **Análise de técnicas para o estabelecimento de Modelos Digitais de Terrenos – DTM**, 1994. Dissertação de Mestrado, EESC/USP.

CARLSTON, C.W. Drainage density and streamflow. **U.S. Geol. Survey Prof. Paper**, 422-C: 1-8, 1963.

CHEN, L.; TEO, T. Orbit Adjustment for EROS A1 High resolution satellite image. In: **22nd Asian Conference on Remote Sensing**, Singapore, 2001.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise morfométrica das bacias hidrográficas do planalto de poços de caldas (MG)**. 1970. 215p. Tese (Livre-Docência –Geografia) - Faculdade Filosofia, Ciências e Letras, Rio Claro.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 188p.

CHRISTOFOLETTI, A. A variabilidade espacial e temporal da densidade de drenagem. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 21, n. 41, p.1-127, dez 1981.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236p.

CHRISTOFOLETTI, A. GUERRA, C.E.C.; MAGNAVITA, I.M.P.; MARTINS, M.R.; TAVARES, A.C. Contribuição à análise morfométrica das regiões das bacias do Jequitinhonha e Extremo Sul, no estado da Bahia. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, 21(41):61-84, 1981.

CHRISTOFOLETTI, A.; PEREZ FILHO, A. Estudo Comparativo Entre Documentacao Cartografica (1:50.000) e Aerofotografica (1:25.000) Para Analise e Drenagem. **Notícia Geomorfológica**. v. 15, n. 30, p. 55-64, 1975a.

CHRISTOFOLETTI, A.; PEREZ FILHO, A. Estudos sobre a forma de bacias hidrográficas. **Boletim Geografia Teorética**, Rio Claro, 5 (9-10): 83-92, 1975b.

CINTRA, J. P. Modelos Digitais do Terreno. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO 23 a 25/05, 1990; **Anais...** São Paulo: Escola Politécnica/USP, 1990, p.53-65.

CLUIS, D.; MARTZ, L.W.; QUENTIN, E.; RECHATIN, C. Coupling GIS and DEM to Classify the Hortonian Pathways of Non-Point Sources to the Hydrographic Network. In: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management (Edited by KOVAR, K. and NACHTNEBEL, H. P.), **International Association of Hydrological Sciences Publication**, n. 235, 37-45, 1996.

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

CUARTERO, A.; FELICÍSIMO, A. M.; ARIZA, F. J. Accuracy of DEM generation from TERRA-ASTER stereo data. In: XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey. **Geo-Imagery Bridging Continents**. Commission 2. Available at: <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm2/comm2.html> Acesso em: 17 out. 2008.

DANGERMOND, J. What is a geographic information system (GIS)? In: JOHNSON, A. I.; PETTERSSON, C. B.; FULTON, J. L. **Geographic Information System (GIS) and mapping: practices and standards. ASTM STP 1126**. Philadelphia: Eds. American Society for Testing and Materials, 1992. p.11-17.

DERRUAU, M. **Précis de Géomorphologie**. 4. Ed. Paris: Masson et Cie., 1965.

DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; MONTGOMERY, D. R.; McKEAN, J. Analysis of Erosion Thresholds, Channel Networks and Landscape Morphology Using a Digital Terrain Model. **Journal of Geology**, 101: 259-278, 1993.

DIKAU, R. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: **Three dimensional applications in Geographical Information Systems**. London: Taylor & Francis, 1989.

DOUGLAS, D. H. Experiments to locate ridges and channels to create a new type of digital elevation model. **Cartographica**, 23(4), 29-61, 1986.

EARTH REMOTE SENSING DATA ANALYSIS CENTER (ERSDAC). **ASTER user's guide part-I**. General (Ver.3.1), Japan: 2001.

EASTMAN, J.R. **Idrisi for windows**: user's guide. Wonchester: Clark University, 1999.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informações; Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 1999. 412p.

FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, 27(5): 709-717, 1991.

FELGUEIRAS, C.A.; CÂMARA, G. Modelagem numérica do terreno. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C. & MONTEIRO, A.M.V., eds. **Introdução a ciência da geoinformação**. São José dos Campos, INPE, 2005. 38p. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/livros.html>.

FELTRAN FILHO, A. **Contribuição à análise fluviométrica da bacia do rio Piracicaba**. 1982. (Dissertação de Mestrado) – IGCE/UNESP, Rio Claro.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes Geomorfológicos dos

Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, volume 2, nº 1 p.51-71, 2001.

FERREIRA, F. R. B.; FERREIRA, M. C. – Modelagem de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas em sistemas de informação geográfica. In: GERARDI, L. H. O. **Ambientes: Estudos de Geografia**. Rio Claro: Programa de Pós-Graduação em Geografia, IGCE-UNESP/AGETEO, 2003. p.120-134.

FERREIRA, M. C. Regionalização de pequenas bacias hidrográficas a partir de imagens orbitais e sistema de informação geográfica. **Geociências**, v.15(1) p.163-184, 1996.

FERREIRA, M. C. Modelagem espaço-temporal e regionalização das cheias no norte de São Paulo: uma metodologia para geoprocessamento. **Geociências**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 467-490, 1997.

FERREIRA, M. C. Análise Espacial da Densidade de Drenagem em Sistema de Informação Geográfica. **Geociências**, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 7-22, 1999a.

FERREIRA, M. C. Modelagem espaço-temporal e regionalização das cheias no norte de São Paulo: uma metodologia para geoprocessamento. **Geociências**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 467-490, 1999b.

FREEMAN, T. G. Calculating Catchment Area with Divergent Flow Based on a Regular Grid. **Computers & Geosciences**, 17(3): 413-422, 1991.

FUJISADA, H. ASTER Level 1 data processing algorithm: IEEE Transactions on **Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p.1101-1112, 1998.

GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. Advances in Automated Landscape Analysis. In: Proceedings of the First International Conference on Water Resources Engineering, Eds. W. H. Espey and P. G. Combs, **American Society of Engineers**, San Antonio, Texas, August 14-18, 1995, Vol. 1, pp. 844-848. 1995.

GARBRECHT, J.; MARTZ, L.W. Automated channel ordering and node indexing for raster channel networks. **Computers & Geosciences**, 23 (9), p.961-966. DOI: 10.1016/S0098-3004(97)00055-1, 1997a.

GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. **Journal of Hydrology**, 193, p.204-213, 1997b.

GARBRECHT J.; MARTZ, L. W. Digital elevation model issues in water resource modeling In: **Hydrologic and hydraulic modeling with geographic information systems**. PI-26. ESRI Press, Redlands, CA, USA. ISBN: 1879102803, 2000.

GARBRECHT, J.; STARKS, P. Note on the Use of USGS Level 1 7.5-Minute DEM Coverages for Landscape Drainage Analyses. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 61(5):519-522, 1995.

GARBRECHT J.; STARKS, P. J.; MARTZ, L. W. New Digital Landscape Parameterization Methodologies. In: **Proceedings of AWRA Annual Symposium on GIS and Water Resources**, AWRA, September 22-26, 1996, Fort Lauderdale, FL, p. 357-365. 1996.

GARCIA, G. J.; PIEDADE, G. C. R. **Topografia Aplicada às Ciências Agrárias** – 5.ed. São Paulo: Nobel, 1984.

GARDNER, T. W.; SASOWSKY, K. C.; DAY, R. L. Automated Extraction of Geomorphic Properties from Digital Elevation Data. **Geomorphology Supplements**, 80:57-68, 1991.

GERARDI, L.H.O.; SILVA, B.C.N. **Quantificação em geografia**. São Paulo: Difel, 1981. 161p.

GESCH, D. B. Identification of requirements and sources for global digital topographic data, in Pecora 12 Symposium, Land Information from Space-Based Systems, Sioux Falls, South Dakota, August 1993, Proceedings: Bethesda, Maryland, **American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, in press. 1993.

GILBERT, G. K. The convexity of hilltops. **Journal of Geology**, v.17. 344-350, 1909.

GREGORY, K. J.; WALLING, D. E. **Drainage basin: form and process**. London: Edward Arnold, 1973. 456p.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; BRISTICHI, C. A. O embasamento pré-cambriano e eo-paleozóico em São Paulo. In: **Mapa Geológico do Estado de São Paulo** – escala 1: 500.000 – monografia 6, v.1, IPT/DMGA, p. 12-45, 1981.

HENGL, T.; GRUBER, S.; SHRESTHA, D.P. **Digital Terrain Analysis in ILWIS**. Lecture notes, International Institute for Geo-Information Science & Earth Observation (ITC), Enschede, Netherlands, pp. 56, 2003.

HIRANO, A.; WELCH, R.; LANG, H. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.57, p.356-370, 2003.

HORTON, R. E. Drainage Basin Characteristics. **Trans. American Geophysical Union**, 13: 350-361, 1932.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v.56, p.275-370, 1945.

ILWIS (Integrated Land and Water Information System) PC-based GIS & Remote Sensing software, developed by ITC up to its last release (version 3.3) in 2005. Available at: <http://www.itc.nl/ilwis/> Acesso em: 17 out. 2008.

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS (IPH). Univers. Federal do R.G. do Sul (UFRGS). http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/climarh/software/MGB_Gis.htm

JANASI, V. A. **Geologia e petrologia do maciço monzodiorítico-monzonítico de Piracaia**. 1986. 281f. Dissertação de mestrado – IG/USP, São Paulo.

JENSON, S. K. Applications of Hydrologic Information Automatically Extracted From Digital Elevation Models. **Hydrological Processes**, 5(1): p.31-44, 1991.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 54(11): 1593-1600, 1988.

JESUS, N. **Aplicação de metodologia para regionalização de bacias hidrográficas, visando conservação ambiental de áreas de mananciais: um exemplo na bacia do reservatório Atibainha**. 2001. 128f. Dissertação de Mestrado – UNESP/IGCE. Rio Claro.

KING, M. D; CLOSS, J.; SPANGLER, S.; GREENSTONE, R.; WHARTON, S.; MYERS, M. **EOS Data Products Handbook v.1 Revised 2004**, NASA/Goddard Space Flight Center Greenbelt, MD 20771, pp. Available at: http://eospsso.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/data_products/vol1.php
Acesso em: 17 out. 2008.

LEA, N. L. An aspect driven kinematic routing algorithm. In **Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanisms**, edited by A.J. Parsons and A. D. Abrahams, Chapman and Hall, New York. 1992.

LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. **Fluvial Processes in Geomorpholgy**. San Francisco: W. H. Freeman & Co. 1964. 522 p.

LI, R.; ZHOU, G.; YANG, S.; TUELL, G.; SCHMID, N. J.; FOWLER, C. A study of the potential attainable geometric accuracy of IKONOS satellite imagery. In: **19th ISPRS Congress**, Amsterdam, 2000.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital Terrain Modeling: Principles; Methodology**. Boca Raton: CRC Press. 2005.

MAATHUIS, B.H.P. Digital Elevation Model Based Hydro-processing. **Geocarto International**, vol. 21, n. 1, 21-26, March 2006.

MAIDMENT, D. R. **Arc Hydro GIS for water resources**. ESRI Press, Redlands, USA. ISBN15S94S0341, 2002.

MAIDMENT, D. R.; OLIVERA, J. F.; CALVER, A.; EATHERRAL, A.; FRACZEK, W. A Unit Hydrograph Derived From a Spatially Distributed Velocity Field. **Hydrologic Processes** 10(6): 831-844, 1996.

MAPWINDOW <http://emrg.usu.edu/software/mapwindow/> versão 3.1
<http://www.mapwindow.org/overview.php> versão 4.4. Acesso em: 17 out. 2008.

MARCHETTI, D.; GARCIA, G.J. **Princípios de Fotogrametria e Fotointerpretação**. São Paulo: Editora Nobel, 1984, 256 p.

MARK, D. M. Automated detection of drainage networks from digital elevation models, **Auto-Carto**, 6, 169-178, 1983.

MARK, D. M. Automatic Detection of Drainage Networks from Digital Elevation Models. **Cartographica**, 21(2/3):168-178, 1984.

MARK, D. M. Network models in geomorphology, Chapter 4 In: **Modelling in Geomorphological Systems**, Edited by M. G. Anderson, John Wiley. p.73-97, 1988.

MARKS, D. M.; DOZIER, J.; FREW, J. Automated Basin Delineation From Digital Elevation Data. **Geo. Processing**, 2: 299-311, 1984.

MARTÍNEZ-CASANOVAS, J. A.; STUIVER, H. J. Automatic delineation of drainage networks and elementary catchments from Digital Elevation Models. **International Journal of Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC Journal)**, 1998-3/4: 198-208, 1998.

MARTZ, L. W.; DE JONG, E. CATCH: A fortran program for measuring catchment area from digital elevation models. **Computers & Geoscience**, 14(5): 627-640, 1988.

MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. Numerical Definition of Drainage Network and Subcatchment Areas From Digital Elevation Models. **Computers and Geosciences**, 18(6): 747-761, 1992.

MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. Automated Recognition of Valley Lines and Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models: a Review and a New Method Comment. **Journal of Hydrology**, 167(1):393-396, 1995.

MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. The Treatment of Flat Areas and Closed Depressions in Automated Drainage Analysis of Raster Digital Elevation Models. **Hydrological Processes**, 12, 843-855, 1998.

MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. An Outlet Breaching Algorithm for the Treatment of Closed Depressions in a Raster DEM. **Computers & Geosciences** (in press). 1999.

MENARDI Jr., A. **Regime e ritmo das chuvas na bacia do rio Piracicaba: variações e impactos**. 2000. Tese de Doutorado – IGCE/UNESP, Rio Claro.

MENEGUETTE, A. A. C.; SANTIL, F.; PEREIRA, J. H. A. **Sistemas de informações geográficas e cartografia**. Hipertexto. Presidente Prudente: UNESP, 1998.
http://www.prudente.unesp.br/dcartog/arlete/gis/intro_t.htm

MILLER, C. L. The spatial model concept of photogrammetry. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 23(1), 31p. 1957.

MILLER, C. L.; LAFLAMME, R. A. **Digital terrain model system manual**. Massachusetts Dep. of Public Works and U.S. Bureau of Public Roads. Mass.HPS, 1 (13), 1958a.

MILLER, C. L.; LAFLAMME, R. A. The Digital Terrain Model – Theory & Application. **Photogrammetric Engineering**. 24 (3), p.433-442, 1958b.

MILLER, V. C. A quantitative geomorphic study of drainage basins characteristic in the Clinch Mountain area. Technical Report,3. **Dept. Geology, Columbia University**, 1953.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Channel Initiation and the Problem of Landscape Scale. **Science**, 225:826-830, 1992.

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

MOORE, I. D.; Hydrological modeling and GIS. In: M.F. GOODCHILD, et al. **GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues**. Fort Collins, CO: GIS World Books, 1996.143-8.

MOORE, I.D., GRAYSON, R.B., LADSON, A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, 5: 3-30, 1991.

MOORE, I. D.; TURNER, A. K.; WILSON, J. P.; JENSON, S. K.; BAND, L. E. GIS and landsurface - subsurface process modeling. In: GOODCHILD, M.F.; PARKS, B.O.; STEYAERT, L.T. **Environmental modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993. cap. 19, p. 196-230.

MORISAWA, M. E. Quantitative geomorphology of some watersheds in the Appalachian Plateau. **Geological Society of America Bulletin**, v.73, n.9, p.1025-1046, 1962.

MORRIS, D. G.; HEERDEGEN, R. G. Automatically Drained Catchment Boundries and Channel Netowrks and their Hydrological Applications. **Geomophology**, 1: 131-141, 1988.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. Terra: Flagship of the Earth Observing System. Press Kit November 1999. Release No. 99-120.

NOVO, E. M. L. M.; PONZONI, F. J. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2001. 68p.

O'NEILL, M.A.; DOWMAN, I.J. A simulation study of the ASTER sensor using a versatile general purpose rigid sensor modelling system: **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 3, p. 565-585. 1993.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The Extraction of Drainage Networks From Digital Elevation Data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, 28: 328-344, 1984.

OLIVEIRA, C. **Curso de Cartografia Moderna**. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação IBGE, 1993. 152p.

OLIVEIRA, C. G. **Avaliação de modelos digitais de elevação gerados a partir de sensores remotos orbitais ópticos (ASTER) e radar (RADARSAT-1, SRTM): um estudo para a região da Serra dos Carajás (PA)**. 2005. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos. 2005

OLIVEIRA, J. B. et al. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônomo; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 64p.

PARADELLA, W. R. Finalizada a campanha de aquisição de dados de radar com o SAR-R99B (SIPAM-SIVAM) na simulação do satélite MAPSAR. **Jornal da Ciência**, SBPC, 13 out. 2005. Disponível em: <http://www.jornaldaciencia.org.br/index2.jsp?id=954>>. Acesso em: 17 jan. 2006.

PARADELLA, W. R.; CECARELLI, I. C. F.; LUIZ, S.; MORAIS, M. C.; OLIVEIRA, C. G.; COTTINI, C., A geração de modelos digitais de elevação pela estereoscopia de radar: conhecimento atual e resultados com imagens RADARSAT-1 na Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10. 2001, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001.

PATTON, P. C.; BAKER, V. R. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. **Water resources research**, v.12, nº5, p.941-952, 1976.

PECKHAM, S. D. **Self-Similarity in the Three-Dimensional Geometry and Dynamics of Large River Basins**. 1995. PhD Thesis (Program in Geophysics) - University of Colorado.

PENTEADO, M. M. Processos exógenos de elaboração do relevo In: **Fundamentos de geomorfologia**, 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1978. p. 99-109.

PETRIE, G. The Future Direction of the SPOT Programme: Spot-5 International Conference. **Geoinformatics**, 4, pp. 12-17, 2001.

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

PEUCKER, T.K., FOWLER, R.J., LITTLE, J.J., MARK, D.M., The triangulated irregular network. In: Proceedings of the DTM Symposium. American Society of Photogrammetry - **American Congress on Survey and Mapping**, St. Louis, Missouri, 1978. pp. 24-31.

PIKE, R.J., EVANS, I.S., HENGL, T. Geomorphometry: a Brief Guide. In: HENGL, T.; REUTER, H.I. (Eds), **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Developments in Soil Science. Elsevier, 2008. vol. 33, p. 1-28.

PIRES NETO, A. G. **Estudo morfotectônico das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari, Jundiaí e áreas adjacentes no Planalto Atlântico e Depressão Periférica**. Rio Claro: IGCE-UNESP, 1996. 70p (Relatório de Pós-Doutoramento).

QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models. **Hydrological Processes**, 5: 59-80, 1991.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. 2003. 158f. Doutorado - INPE, São José dos Campos. (INPE – 10437-TDI/925).

RICCI, M.; PETRI, S. **Princípios de aerofotogrametria e interpretação geológica**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1965. v. 2.

RODRIGUES, C.; ADAMI, S. Técnicas Fundamentais para o estudo de bacias hidrográficas. In: VENTURI, L. A. B. (org.). **Praticando Geografia: técnicas de campo e laboratório**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. cap. 9, p.147-166.

SCHUMM, S. A. Applied fluvial geomorphology. In: HAILS, J.R. (ed.) **Applied Geomorphology**. Amsterdam: Elsevier, 1977a. p. 119-55.

SCHUMM, S. A. **The fluvial system**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1977b. 338p.

SELBY, R. Creating DEMs and ORTHOs from ASTER satellite imagery. Publication: **GEO: connexion**. 01 jul. 2003.

SHREVE, R. L. Statistical law of stream numbers. **Journal of Geology**, 74, 17-37, 1966.

SHREVE, R. L. Infinite topologically random channel networks. **Journal of Geology**, 75, 178-186, 1967.

SILC. Sensor Information Laboratory Corp. ASTER DEM/Ortho Software SILCAST ver.1.09 released version1.09: October 28, 2007. <http://www.silc.co.jp/en/index.html>

SPEIGHT, J. G. A parametric approach to landform regions. In: BROWN, E. H. & WATERS, R. S. (eds.). **Progress in Geo-morphology**. London: Alden Press, 1974. p.213-230.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society American Bulletin**, 63: 1117-1142, 1952.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Trans. American Geophysical Union**, 38: 913-920, 1957.

SUBRAMANIAN, K.S.S.; SINGH, A.; SUDHAKAR, M. Evaluation of Digital Elevation Models created from different satellite. In: **Map India Conference**, New Delhi, India, jan 2003 <http://www.gisdevelopment.net/proceedings/mapindia/2003/tt.ht>. Acesso em: 17 out. 2008.

TARBOTON, D. G. **The analysis of river basins and channel networks using digital terrain data**. 1989, Sc.D. Thesis, Department of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, MA, (Also available as Tarboton D. G., R. L. Bras and I. Rodriguez-Iturbe, (Same title), Technical report no 326, Ralph M. Parsons Laboratory for Water resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering, M.I.T., September 1989).

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, 33, 309–319, 1997. <http://www.neng.usu.edu/cee/faculty/dtarb/dinf.pdf> Acesso em: 17 out. 2008.

TARBOTON, D. G.; AMES, D. P. Advances in the Mapping of Flow Networks from Digital Elevation Data. **World Water and Environmental Resources Congress**, Orlando, Florida, May 20-24. ASCE. 2001. <http://www.neng.usu.edu/cee/faculty/dtarb/asce2001.pdf> Acesso em: 17 out. 2008.

TARBOTON, D. G. Terrain Analysis and Hydrologic Modeling using Digital Elevation Models and GIS, CUAHSI Cyberseminar presentation, March 5, 2004. [[Microsoft Producer Integrated Presentation](#)]. Acesso em: 17 out. 2008.

TARBOTON, D. G. Hydrologic Terrain Analysis in ArcGIS, University of Redlands/ESRI **Colloquium**, June 28, 2006. [Abstract](#). [[Powerpoint 12 MB](#)] Acesso em: 17 out. 2008.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. The Fractal Nature of River Networks. **Water Resources Research**, 24(8): 1317-1322, 1988. <http://www.neng.usu.edu/cee/faculty/dtarb/wrr88.pdf> Acesso em: 17 out. 2008.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the extraction of channel network from digital elevation models. **Hydrological Processes**, 5: 81–100, 1991. <http://www.neng.usu.edu/cee/faculty/dtarb/hp91.pdf> Acesso em: 17 out. 2008.

TauDEM - **Terrain Analysis Using Digital Elevation Models** - Copyright (C) 2004 (free software license GNU) por David G. Tarboton, May, 2005. Utah State University. <http://hydrology.neng.usu.edu/taudem/> Acesso em: 17 out. 2008.

TEIXEIRA, A. L. A.; MORETTI, E.; CHRISTOFOLETTI, A. **Introdução aos Sistemas de informação geográfica**. Rio Claro: Ed. do Autor, 1992. 80p.

TEMBA, P. **Fundamentos da fotogrametria**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Cartografia, 2000. Apostila.

TOUTIN, T. DEM generation from new VIR sensors: IKONOS, ASTER and Landsat-7. **IEEE-IGARSS Proceedings**, Sydney, Austrália, 2001.

TOUTIN, T.; GRAY, A. L. State-of-the-art of extraction of elevation data using satellite SAR data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 55, n. 1, p.13-33, 2000.

TRIBE, A. Automated Recognition of Valley Heads from Digital Elevation Models. **Earth Surface Processes & Landforms**, 16 (1):33-49, 1992.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal of Sciences** (263):616-627, 1965.

WATANABE, H. (ERSDAC, Japan) Global Coverage of ASTER Data And Its Accuracy and Availability. In: 11th CEReS International Symposium on Remote Sensing. 13 to 14 December 2005, Chiba Japan. **Maximization of the use of satellite data for understanding the earth environment**. Chiba University. <http://www2.cr.chiba-u.jp/symp2005/index4.htm> (documento em slides) Acesso em 17 out. 2008.

WELCH, R.; LANG, H.R. Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER Digital Elevation Models (Standard Product AST14) Version 3.0. **NASA EOS Publication ATBD-AST-08**, 1999.

WELCH, R.; MARKO, W. Cartographic potential of spacecraft line-array camera system: Stereosat. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 47, n. 8, p.1173-1185, 1981.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Eros: a grid-based program for estimating spatially distributed erosion indices. **Computers and Geosciences**, 22:707-712, 1996.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. **Terrain Analysis: Principles and Applications**. New York: John Wiley and Sons, 2000. 479 p.

ZAVOIANU, I. **Morphometry of drainage basins**. Co-edition by Editura Academiei, Bucharest, and Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1985. 238p.

6.2. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

BROSCOE, A. J. Quantitative analysis of longitudinal stream profiles of small watersheds. Office of Naval Research, Project NR 389-042, **Technical Report**, n. 18, Department of Geology, Columbia University, New York, 1959.

CHRISTOFOLETTI, A. A análise da densidade de drenagem e suas implicações geomorfológicas. **Geografia**, Departamento Geografia e Planejamento - IGCE, UNESP, Rio Claro. v.4, n.8, p.23-42, 1979.

DYLIK, J. Notion du versant en geomorphologie. **Bull. Acad. Pol. Sci. Série des Sc.Geor.Geogr.**, 16(2);125-132, 1968.

FERREIRA, M. C. Mapeamento de unidades de paisagem em sistemas de informação geográfica: alguns pressupostos fundamentais. **Geografia, AGETEO**. v.22(1) p.23-35, 1997.

FERREIRA, M. C. Utilização de modelos digitais de terreno na estimativa de enchentes em bacias hidrográficas: uma avaliação preliminar em escala regional. **Geociências**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 243-255, 1997.

HERMUCHE, P. M. *et.al.* Morfometria como suporte para elaboração de mapas pedológicos: Bacias hidrográficas assimétricas. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 2002. 25p.

LAM, C. S. **Comparasion of flow routing algorithms used in Geography Information Systems**. 2004. 97p. Thesis Presented to the Faculty of the Graduate School University Southern California, California.

MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models. **Hydrological Processes**. 12, p. 843-855, 1998.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. 251 p.

PROJETO RADAMBRASIL. **As regiões fitoecológicas, sua natureza e seus recursos econômicos. Estudos fitogeográficos**. Folha SF 23/24 Rio de Janeiro/Vitória, 1983. p.553-611.

TEIXEIRA, A. L. A.; CHRISTOFOLETTI, A. **Sistemas de Informação Geográfica: Dicionário Ilustrado**. São Paulo: Editora Hucitec, 1997. v. 1, 250p.

VENTURI, L. A. B. (Org.). **Praticando Geografia: técnicas de campo e laboratório**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. v. 1. 239 p.

SÍTIOS CONSULTADOS

ASTER Digital Elevation Model (informações técnicas MDE).

<http://lpdaac.usgs.gov/aster/ast14dem.asp>

Formato do Arquivo HDF-EOS.

<http://LPDAAC.usgs.gov/landdaac/tools/hdf/index.asp><http://newsroom.gsfc.nasa.gov/sdp/toolkit/toolkit.html>

Informações gerais do sensor ASTER

<http://asterweb.jpl.nasa.gov/index.asp>

SIG ILWIS

<http://www.itc.nl/ilwis/>

SIG MAPWINDOW

<http://emrg.usu.edu/software/mapwindow/>

<http://www.mapwindow.org/>

Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM)

<http://hydrology.neng.usu.edu/taudem/>

ANEXO 1

UNITED STATES NATIONAL MAP ACCURACY STANDARDS (EXTRACTED FROM BUREAU OF THE BUDGET, 1947)

With a view to the utmost economy and expedition in producing maps which fulfill not only the broad needs for standard or principal maps, but also the reasonable particular needs of individual agencies, standards of accuracy for published maps are defined as follows:

1. Horizontal accuracy. For maps on publication scales larger than 1:20,000, not more than 10% of the points tested shall be in error by more than 1/30 inch, measured on the publication scale; for maps on publication scales of 1:20,000 or smaller, 1/50 inch. These limits of accuracy shall apply in all cases to positions of well-defined points only. Well-defined points are those that are easily visible or recoverable on the ground, such as the following: monuments or markers, such as bench marks, property boundary monuments; intersections of roads, railroads, etc.; corners of large buildings or structures (or center points of small buildings); etc. In general, what is well-defined will also be determined by what is plottable on the scale of the map within 1/100 inch. Thus, while the intersection of two road or property lines meeting at right angles, would come within a sensible interpretation, identification of the intersection of such lines meeting at an acute angle would obviously not be practicable within 1/100 inch. Similarly, features not identifiable upon the ground within close limits are not to be considered as test points within the limits quoted, even though their positions may be scaled closely upon the map. In this class would come timber lines, soil boundaries, etc.
2. Vertical accuracy, as applied to contour maps on all publication scales, shall be such that not more than 10% of the elevations tested shall be in error more than one-half the contour interval. In checking elevations taken from the map, the apparent vertical error may be decreased by assuming a horizontal displacement within the permissible horizontal error for a map of that scale.
3. The accuracy of any map may be tested by comparing the positions of points whose locations or elevations are shown upon it with corresponding positions as determined by surveys of a higher accuracy. Tests shall be made by the producing agency, which shall also determine which of its maps are to be tested, and the extent of such testing.
4. Published maps meeting these accuracy requirements shall note this fact in their legends, as follows: "This map complies with National Map Accuracy Standards."
5. Published maps whose errors exceed those aforesaid shall omit from their legends all mention of standard accuracy.

ANEXO 1

6. When a published map is a considerable enlargement of map drawing (manuscript) or of a published map, that fact shall be stated in the legend. For example, "This map is an enlargement of a 1:20,000-scale map drawing", or "This map is an enlargement of a 1:24,000-scale published map".
7. To facilitate ready interchange and use of basic information for map construction among all Federal mapmaking agencies, manuscript maps and published maps, wherever economically feasible and consistent with the use to which the map is to be put, shall conform to latitude and longitude boundaries, being 15 minutes of latitude and longitude, or 7-1/2 minutes, or 3-3/4 minutes in size.

ANEXO 2

DEFINITION OF ROOT MEAN SQUARE ERROR WITH RESPECT TO CARTOGRAPHY Extracted from American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1990

The "root mean square" (rms) error is defined to be the square root of the average of the squared discrepancies. In this case, the discrepancies are the differences in coordinate or elevation values as derived from the map and as determined by an independent survey of higher accuracy (check survey). For example, the rms error in the X coordinate direction can be computed as:

$$\text{rms}_x = \sqrt{D^2/n}$$

where:

- $D^2 = d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2$
- $d =$ discrepancy in the X coordinate direction
 $= X_{\text{map}} - X_{\text{check}}$
- $n =$ total number of points checked on the map in the X coordinate direction

ANEXO 3

ASPRS ACCURACY STANDARDS FOR LARGE-SCALE MAPS Extracted from American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1990.

1. **Horizontal Accuracy:**

Horizontal map accuracy is defined as the rms error in terms of the project's planimetric survey coordinates (X,Y) for checked points as determined at full (ground) scale of the map. The rms error is the cumulative result of all errors including those introduced by the processes of ground control surveys, map compilation and final extraction of ground dimensions from the map. The limiting rms errors are the maximum permissible rms errors established by this standard. These limiting rms errors for Class 1 maps are tabulated in Table 1E (feet) and Table 1M (meters) along with typical map scales associated with the limiting errors. These limits of accuracy apply to tests made on well-defined points only.

Table 1E. Planimetric coordinate accuracy requirement (ground X or Y in feet) for well-defined points - Class 1 maps

PLANIMETRIC (X OR Y) ACCURACY (limiting rms error, feet)	TYPICAL MAP SCALE
0.05	1:60
0.1	1:120
0.3	1:360
0.4	1:480
0.5	1:600
1.0	1:1200
2.0	1:2400
4.0	1:4800
5.0	1:6000
8.0	1:9600
10.0	1:12000
16.7	1:20000

ANEXO 3

Table 1M. Planimetric coordinate accuracy requirement (ground X or Y in meters) for well-defined points - Class 1 maps

PLANIMETRIC (X OR Y) ACCURACY (limiting rms error, meters)	TYPICAL MAP SCALE
0.0125	1:50
0.025	1:100
0.050	1:200
0.125	1:500
0.25	1:1000
0.50	1:2000
1.00	1:4000
1.25	1:5000
2.50	1:10000
5.00	1:20000

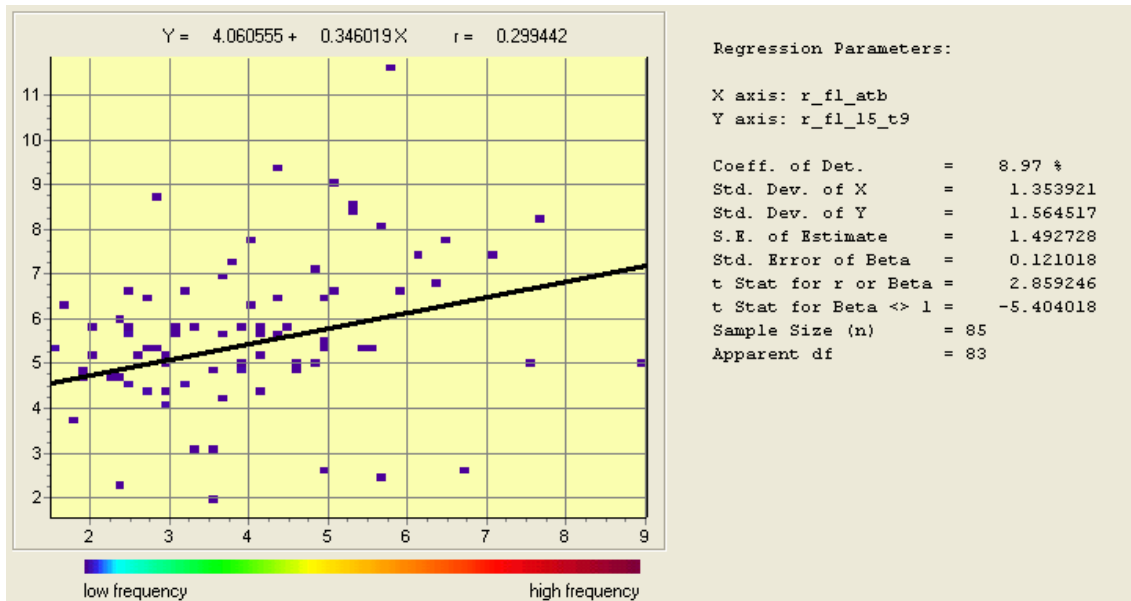
2. Vertical Accuracy:

Vertical map accuracy is defined as the rms error in elevation in terms of the project's elevation datum for well-defined points only. For Class 1 maps the limiting rms error in elevation is set by the standard at one-third the indicated contour interval for well-defined points only. Spot heights shall be shown on the map within a limiting rms error of one-sixth of the contour interval.

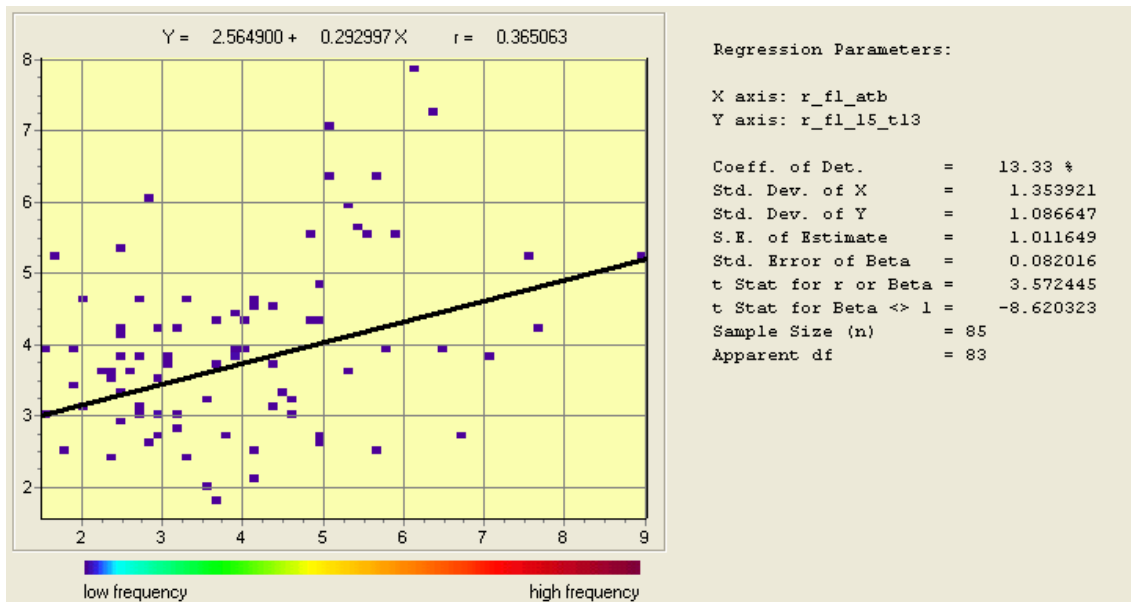
3. Lower-Accuracy Maps:

Map accuracies can also be defined at lower spatial accuracy standards. Maps compiled within limiting rms errors of twice or three times those allowed for a Class 1 map shall be designated Class 2 or Class 3 maps respectively. A map may be compiled that complies with one class of accuracy in elevation and another in plan. Multiple accuracies on the same map are allowed provided a diagram is included which clearly relates segments of the map with the appropriate map accuracy class.

ANEXO 4



THRESHOLD 9 MDE 15



THRESHOLD 13 MDE 15