

Programa de Pós-Graduação em **Engenharia Civil e Ambiental**

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Departamento de Engenharia Civil

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO
COMO ALTERNATIVA PARA ESTUDOS
HIDROLÓGICOS EM PEQUENAS BACIAS**

RONY LOPES LUNGUINHO

Campina Grande
Data: FEVEREIRO / 2011



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANITÁRIA

RONY LOPES LUNGUINHO

AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO COMO ALTERNATIVA PARA
ESTUDOS HIDROLÓGICOS EM PEQUENAS BACIAS

CAMPINA GRANDE
FEVEREIRO DE 2011

RONY LOPES LUNGUINHO

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO COMO ALTERNATIVA PARA
ESTUDOS HIDROLÓGICOS EM PEQUENAS BACIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.

Área de Concentração: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária

Orientadora: Prof^(a) Dr. Iana Alexandra Alves Rufino

Campina Grande, Fevereiro de 2011.



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

L963a

Lunguinho, Rony Lopes.

Avaliação de modelos digitais de elevação como alternativa para estudos hidrológicos em pequenas bacias / Rony Lopes Lunguinho. — Campina Grande, 2011. Rony Lopes Lunguinho

167 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)-Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadores: Prof^ª. Dr^ª Iana Alexandra Alves Rufino.

1. Hidrologia. 2. Geoprocessamento. 3. Topografia. I. Título.

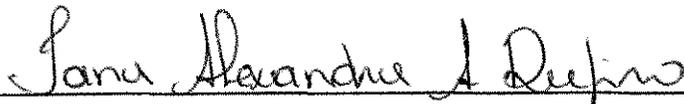
CDU – 556(043)

RONY LOPES LUNGUINHO

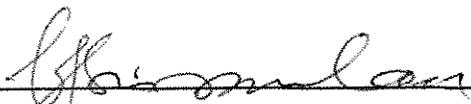
**AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO COMO ALTERNATIVA PARA
ESTUDOS HIDROLÓGICOS EM PEQUENAS BACIAS**

Dissertação aprovada em... 02/03/2011

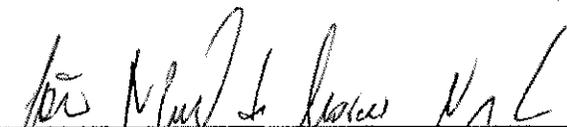
COMISSÃO EXAMINADORA:



Dra. Iana Alexandra Alves Rufino (Orientadora)
Universidade Federal de Campina Grande



Dr. Vajapeyan Srirangachar Srinivasan (Examinador Interno)
Universidade Federal de Campina Grande



Dr. João Miguel Moraes Neto (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande

DEDICATÓRIA

A vida aqui só é ruim
Quando não chove no chão
Mas se chover dá de tudo
Fartura tem de montão
Tomara que chova logo
Tomara meu Deus tomara
Só deixo o meu cariri
No último pau-de-arara...
Eu vou ficando por aqui
Que deus do céu me ajude
Quem sai da terra natal
Em outros cantos não para
Só deixo o meu cariri
No último pau-de-arara

Oh! Deus, perdoe este pobre coitado
Que de joelhos rezou um bocado
Pedindo pra chuva cair sem parar
Oh! Deus, será que o senhor se zangou
E só por isso o sol arretirou
Fazendo cair toda a chuva que há
Senhor, eu pedi para o sol se esconder um
tiquinho
Pedir pra chover, mas chover de mansinho
Pra ver se nascia uma planta no chão
Oh! Deus, se eu não rezei direito o Senhor me
perdoe,
Eu acho que a culpa foi
Desse pobre que nem sabe fazer oração
Meu Deus, perdoe eu encher os meus olhos de
água
E ter-lhe pedido cheinho de mágoa
Pro sol inclemente se arretirar
Desculpe eu pedir a toda hora pra chegar o
inverno
Desculpe eu pedir para acabar com o inferno
Que sempre queimou o meu Ceará

Este trabalho é dedicado com todo carinho ao povo nordestino que consegue transformar seca em arte e poesia. E em nome de um cariri melhor a cada dia. E aos meus pais que no ultimo pau de arara viajaram para dar a educação que tenho hoje E aos meus avós que na suplica cearense fizeram dos meus pais pessoas dignas e honradas.

Muito Obrigado Pai e Mãe e Povo do Nordeste

Créditos: Último Pau de Arara (Venâncio, Corumba e J. Guimarães) – Suplica Cearense (Gordurinha e Netinho)

AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus por ter me dado saúde e Paz para poder estudar e aos meus Pais por todo apoio e compreensão nas horas de estudo. A meus irmãos pelo apoio. A minha orientadora Iana pelo apoio e pela confiança em minha capacidade de desenvolver pesquisas. A Sarah, Allan e Isaias que foram minha segunda família durante o tempo de mestrado. A minha turma por todo o momento de descontração, e troca de experiências para uma pesquisa prospera e unida em especial a Ronaldo, Gonzaga, Ruy, Zacarias e José Guimarães. A todos do projeto de Cooperação Internacional do Semiárido (CISA) e do laboratório de Hidráulica I e II, nas pessoas de Mônica, Samilly, Ester, Itamara, Barbara, Rodolfo, Jonh, Douglas, Silvio, Isaque, Rodolfo e em especial a Marília, (sem a qual esta dissertação não se realizaria). A todos os professores, pelo ensino e dedicação, em especial aos professores Carlos Galvão, Zezineto, Lêde Chaves e Hugo Alcântara pelo conhecimento de campo passado para o desenvolvimento do trabalho e Vajapeyan Srinivassan por com muito orgulho ter feito parte da sua última turma ministrada no PPGECA. Aos funcionários da UFCG, em especial os mais próximos como Valdomiro, Aurezinha e Josete que sempre ajudaram os alunos em qualquer problema ocorrido durante o mestrado. E a CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa de mestrado. A UFCG pela acolhida no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental.

O desenvolvimento de metodologias relacionadas a pequenas bacias tem sido objeto constante de pesquisas em recursos hídricos. No caso da topografia, as resoluções espaciais apresentadas por produtos orbitais normalmente são incompatíveis com as dimensões da bacia hidrográfica e a falta de dados topográficos suficientes para representá-la adequadamente pode dificultar a utilização de alguns modelos hidrológicos. Um modelo digital de elevação (MDE) além de auxiliar na representação da superfície terrestre pode ser utilizado como parâmetro de entrada em modelos hidrológicos. Entretanto diferentes MDE podem resultar em representações completamente divergentes da mesma área. A utilização destes MDE (Imagens de satélite obtidas por sensores ativos (radar), imagens óticas orbitais ou a partir de aviões (aerofotogrametria), interpolações por diferentes algoritmos e etc.) em estudos hidrológicos precisa ser criteriosa. O objetivo deste trabalho é testar diferentes possibilidades de interpolação para levantamentos topográficos existentes e estabelecer comparações e diretrizes de escolha, analisar a aplicabilidade das imagens de radar (SRTM e ASTER) em pequenas bacias do semiárido e gerar MDE como dado de entrada para um modelo hidrossedimentológico comparando os diferentes resultados obtidos a partir de MDE diferentes a fim de nortear outros trabalhos de pesquisa voltados aos recursos hídricos. Através da geração de diversos MDE proveniente de dois levantamentos topográficos (convencional e automatizado) e imagens orbitais apoiado por *softwares* específicos de geotecnologias foi possível obter resultados que caracterizaram a Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) em seus aspectos de drenagem, limite, relevo e de geomorfologia. Os resultados obtidos apontam para a necessidade de dados no entorno da bacia hidrográfica para uma caracterização mais confiável, bem como a possibilidade de utilização de um dado "híbrido" com amostras de entrada advindas de diferentes formas de aquisição (imagens, levantamentos de campo, etc). Ressalta-se também que no caso de pequenas bacias, os produtos orbitais disponíveis ainda apresentam resultados insatisfatórios para a maior parte das análises efetuadas. Por fim, o trabalho apresenta algumas comparações de diferentes resultados obtidos de forma a subsidiar a escolha de um MDE em situações semelhantes.

Palavras chave: Hidrológicos; Modelos Hidrológicos, Modelos Digitais de Elevação, Métodos de Interpolação.

The development of methodologies related to the river has been the subject of many studies on water resources. In the case of the topography, the spatial resolutions presented by orbital products are usually incompatible with the dimensions of the basin and the lack of sufficient topographic data to represent it properly can make it difficult to use some hydrological models. A digital elevation model (DEM) and assists in representing the earth's surface can be used as input parameter in hydrological models. However MDE can result in completely different representations of the same area. The use of MDE (Satellite images obtained by active sensors (radar), optical images from orbital or aircraft (aerial photography), by different interpolation algorithms and so on.) In hydrological studies need to be careful. The objective is to test different possible interpolation for surveying existing guidelines and establish comparisons and selection, examine the applicability of radar imagery (ASTER and SRTM) in small basins of semiarid and generate DEM as input to a model hydrosedimentological comparing the different results from different MDE in order to guide other research projects focused on water resources. By generating two different DEM from topographic surveys (conventional and automated) and satellite images supported by geo-specific software was possible to obtain results that characterize the Experimental Basin of São João do Cariri (EBSJC) on aspects of drainage, boundaries, relief and geomorphology. The results point to the need of data surrounding the basin for a more reliable characterization, as well as the possibility of using a particular "hybrid" with input samples that come in different forms of acquisition (images, field surveys, etc.). We also emphasize that for small basins, the products available orbital still have unsatisfactory results for most of the analysis performed. Finally, the paper presents some comparisons of different results obtained in order to support the choice of an DEM in similar situations.

Keywords: hydrological, hydrological models, Digital Elevation Models, Methods of Interpolation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Drenagem Bacia Apucarantina	20
Figura 2 - Geração de Rede de Drenagem	21
Figura 3 - Instrumentos SRTM.....	22
Figura 4 - Fluxo de Tratamento dos Dados SRTM para Elaboração do MDE.....	23
Figura 5 - Exemplo Estereoscopia.....	24
Figura 6 - Cobertura de Vôo	25
Figura 7 - Estereoscopia ASTER.....	26
Figura 8 - HRS SPOT 5	27
Figura 9 - Pontos Cotados e Curvas de Nível	27
Figura 10 - Distribuição para precipitação média anual do estado de São Paulo.....	28
Figura 11 - Exemplo de Grade Regular.....	33
Figura 12 - Exemplo de Grade Irregular	34
Figura 13 - Vizinho mais Próximo.....	34
Figura 14 - Média Simples.....	35
Figura 15 - Média Ponderada por Quadrante.....	36
Figura 16 - Média Ponderada por Cota Quadrante	36
Figura 17 - Grade Retangular 5 x 3 Fonte: INPE (2010).....	37
Figura 18 – Sobreposição Fonte: INPE (2010)	37
Figura 19 - Sobreposição centro da grade Fonte: INPE (2010).....	37
Figura 20- Critério do circuncírculo para geração de triangulações de Delaunay: (a) T1 e T2 são triângulos de Delaunay e (b) T1 e T2 não são triângulos de Delaunay	38
Figura 21 - Grade Triangular sem Linhas de Quebra (a) e com Linhas de Quebra (b)	40
Figura 22 - Histograma de Altitude e Declividade obtido sobre MDE gerado para a mesma área a partir de dados de cartas topográficas e interpolados.....	42
Figura 23 - Processo de Determinação das Direções de Fluxo Fonte: JENSON & DOMINGUE (1988)	43
Figura 24 - Delimitação da Bacia do Rio Japarutuba a partir dos MDEs (A) SRTM e (B) GDEM/ASTER "híbrido".....	44

Figura 25 - Falha na Delimitação na Bacia do Rio Japarutuba. (A) Sub-Bacia contribuinte erroneamente a bacia do rio São Francisco; (B) Recorte da Sub-Bacia com indicação do ponto de divergência do fluxo; (C) Fotografia do local obtida em vista a campo.....	44
Figura 26 - Ordem dos Cursos de Água de uma Bacia Segundo Strahler	47
Figura 27 - Comprimentos de uma Bacia Hidrográfica	47
Figura 28 - Área de Estudo.....	52
Figura 29 - Perfil Leste Oeste da Parte Norte do Semiárido Brasileiro.....	54
Figura 30 - Área das Sub-bacias e Distribuição dos Solos na Bacia	55
Figura 31 - Produção de Sedimentos – Evento 24/04/2006.....	57
Figura 32 - Fluxograma Metodológico	61
Figura 33 - Mapa Levantamento Topográfico Convencional.....	62
Figura 34 - Pontos Cotados da Carta da SUDENE.....	63
Figura 35 - Imagens Orbitais	64
Figura 36 - Processo de Interpolação.....	65
Figura 37 - Interpolações Grade Retangular SPRING	65
Figura 38 - Exemplo de MDE por Grade Retangular	66
Figura 39 - Geração de Grades Triangulares.....	67
Figura 40 - (A) TIN Delaunay sem Linhas de Quebra; (B) TIN Delaunay com Linhas de Quebra, Pontos de Levantamento Automatizado.....	68
Figura 41 - (A) TIN Delaunay sem Linhas de Quebra; (B) TIN Delaunay com Linhas de Quebra, Pontos de Levantamento Automatizado	68
Figura 42 - Inverso do Quadrado da Distância.....	70
Figura 43 - A) Krigagem Ordinal Esférica e Universal Linear Pontos Automatizado B) Krigagem Ordinal Esférica e Universal Linear Pontos Convencional.....	71
Figura 44 - A) Krigagem utilizando cinco pontos de busca B) Krigagem utilizando dois pontos de busca.....	71
Figura 45 - Análise Exploratória SPRING.....	73
Figura 46 - Pixel com ponto do levantamento automatizado	73
Figura 47 – Tela do Programa ArcGis que Apresenta a Tela de Extração de Pontos.....	74
Figura 48 - Distribuição dos Pontos nas duas áreas a serem preenchidas.....	75
Figura 49 - Análise de Divergências.....	76
Figura 50 - Dado Híbrido	77
Figura 51 - Geração e Aspectos Direção de Fluxo (A) e Fluxo Acumulado (B).....	78

Figura 52 – Tela do SIG Apresentando a Condição para a Geração da Rede Drenagem.....	79
Figura 53 - Aspecto de Drenagem.....	79
Figura 54 - Procedimento para a Geração da Rede de Drenagem.	80
Figura 55 – Tela do programa SPRING da Geração de Declividade.....	80
Figura 56 – Telas do Programa SPRING da Criação das Classes de Declive.	81
Figura 57 – Etapa do Processo de Geração de Declividade.....	81
Figura 58 – Tela do SPRING Apresentando o Procedimento de Quantificação das Classes	82
Figura 59 - Geração de Isolinhas SPRING.....	82
Figura 60 Exemplo de dois MDE por Grade Retangular gerado pelas Curvas de Nível de 10 metros do levantamento convencional	83
Figura 61 - Exemplo de três MDE por Grade Retangular gerado pelas Curvas de Nível de 5 metros do levantamento convencional	84
Figura 62 - Exemplo de dois MDE por Grade Retangular gerados pelos Pontos Cotados do levantamento convencional	85
Figura 63 - Comparação entre IQD Fixo e IQD Variável dos Pontos Cotados do Levantamento Convencional	86
Figura 64 - MDE por Grade Retangular dos Pontos Cotados do Levantamento Automatizado.....	87
Figura 65 - MDE por Grade Retangular dos Pontos Cotados Híbrido	88
Figura 66 - Comparações entre os MDE por IQD por Pontos Cotados do Levantamento Automatizado e Híbrido.....	89
Figura 67 - MDE por Krigagem dos Pontos Cotados Híbrido.....	90
Figura 68 – Comparações entre Drenagens – Curvas de Nível de 10 metros levantamento convencional.	92
Figura 69 - Comparações entre Drenagens – Curvas de Nível 5 metros levantamento convencional. 93	
Figura 70 – MDE interpolado por Vizinho mais Próximo – Curvas de Nível 5 metros levantamento convencional	94
Figura 71 - Direção de Fluxo (MDE interpolado por Vizinho mais Próximo) – Curvas de Nível 5 metros levantamento convencional	95
Figura 72 - Comparações entre Drenagens – Pontos Cotados levantamento convencional.	96
Figura 73 – Caracterização de inconsistência da drenagem – Pontos cotados levantamento convencional.	97
Figura 74 - Comparações entre Drenagens – Pontos cotados levantamento automatizado.....	98
Figura 75 - Comparações entre Drenagens – Dados Híbridos	99

Figura 76 – Comparações entre Drenagens Provenientes dos MDE Interpolados por Interpoladores Estatísticos – Dados Híbridos.....	100
Figura 77 – Drenagem do MDE Interpolado por Vizinho mais Próximo – Dados Híbridos.....	101
Figura 78 – Comparações entre Drenagens – Produtos Orbitais	101
Figura 79 – Comparações ente Limites – Curvas de Nível de 10 metros levantamento convencional	103
Figura 80 – Comparações entre limites dos MDE por Vizinhança e Spline – Curvas de Nível de 10 metros levantamento convencional.	104
Figura 81 – Comparações entre limites – Curvas de nível de 5 metros levantamento convencional.	105
Figura 82 - Verificação do exutório do MDE do interpolador média ponderada cota quadrante do produto de curvas de nível de 5 metros do levantamento convencional.	106
Figura 83 – Comparações entre limites – Pontos cotados levantamento convencional.	108
Figura 84 – Comparações entre limites dos MDE interpolado por interpoladores de média – Pontos Cotados Levantamento Automatizado.....	108
Figura 85 – Comparações entre limites dos MDE interpolados por Splines – Pontos Cotados Levantamento Automatizado.	109
Figura 86 – Limites MDE interpolado por Vizinho mais próximo – Pontos cotados levantamento automatizado.	110
Figura 87 – Comparações entre limites dos MDE por interpolado por IQD – Pontos cotados levantamento automatizado.....	110
Figura 88 - Esquema de coleta de produtos orbitais.....	111
Figura 89 – Comparações entre limites dos MDE interpolados por média – Dados Híbridos.	112
Figura 90 - Vizinho mais próximo – Dados Híbridos	113
Figura 91 – Comparações entre limites dos MDE por interpoladores estatísticos e Splines – Dados Híbridos.....	115
Figura 92 – Comparações entre limites – Produtos Orbitais.....	115
Figura 93 – Comparações entre curvas de nível – MDE pontos cotados levantamento convencional	116
Figura 94 – Comparações entre curvas de nível – Pontos cotados levantamento automatizado	117
Figura 95 – Comparações entre curvas de nível – Dados Híbridos.....	117
Figura 96 – Comparações entre curvas de nível – Imagens Orbitais.	118
Figura 97 – Comparações entre direções de fluxo.....	144
Figura 98 – Comparações entre limites com restrição das direções de fluxo.....	147

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Produtos de grades retangulares a partir de uma TIN.....	69
Quadro 2 - Modelos Digitais de Elevação Escolhidos para a Restrição da Direção de Fluxo.....	146

Tabela 1 - Parâmetros Morfométricos da BESJC	54
Tabela 2 - Comparações Estatísticas entre as Imagens Orbitais	74
Tabela 3 – Classes de Declividade MDE Curvas de Nível 10 metros Levantamento Convencional..	119
Tabela 4 – Classes de Declividade MDE Curvas de Nível 5 metros Levantamento Convencional....	119
Tabela 5 – Classes de Declividade MDE Pontos Cotados Levantamento Convencional.....	120
Tabela 6 – Classes de Declividade MDE Pontos Cotados Levantamento Automatizado.	121
Tabela 7 – Classes de Declividade MDE Dados Híbridos.	121
Tabela 8 – Classes de Declividade MDE Imagens Orbitais.....	122
Tabela 9 – Classes de Relevos MDE Curvas de Nível de 10 metros.....	122
Tabela 10 – Classes de Relevos MDE Curvas de Nível de 5 metros.....	123
Tabela 11 – Classes de Relevos MDE Pontos Cotados Levantamento Convencional.....	124
Tabela 12 – Classes de Relevos MDE Pontos Cotados Levantamento Automatizado.....	124
Tabela 13 – Classes de Relevos MDE Dados Híbridos.....	125
Tabela 14 – Classes de Relevos MDE Imagens Orbitais.....	126
Tabela 15 - Estatísticas dos MDE por Curvas de Nível 10 metros.....	127
Tabela 16 - Estatísticas dos MDE por Curvas de Nível 5 metros.....	128
Tabela 17 - Estatísticas dos MDE por Pontos Cotados Levantamento Convencional	129
Tabela 18 - Estatísticas dos MDE por Pontos Cotados Levantamento Automatizado.....	130
Tabela 19 - Estatísticas dos MDE por Dados Híbridos.....	131
Tabela 20 - Estatísticas dos MDE dos Produtos Orbitais.....	132
Tabela 21 - Parâmetros Morfométricos Curvas de Nível 10	133
Tabela 22 - Parâmetros Morfométricos Curvas de Nível 5 metros	135
Tabela 23 - Parâmetros Morfométricos Pontos Cotados Levantamento Convencional	137
Tabela 24 - Parâmetros Morfométricos Pontos Cotados Levantamento Automatizado	139
Tabela 25 - Parâmetros Morfométricos Dados Híbridos	141

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
AGWA	Automated Geospatial Watershed Assessment Tool
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BESJC	Bacia Experimental de São João do Cariri
CCA	Centro de Ciências Agrárias
DN	Digital Number
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EOS	Earth Observing System
ERSDAC	Earth Remote Sensing Data Analysis Center
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
FUNPEC	Fundação Norte Rio-Grandense de Pesquisa e Cultura
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IQD	Inverso do Quadrado da Distância
KINEROS	Kinematic Runoff and Erosion Model
MDE	Modelo Digital de Elevação
MNT	Modelo Numérico do Terreno
MHC	Modelo Hidrológico Consistente
MDT	Modelo Digital do Terreno
NASA	National Aeronautics and Space Administration
REHISA	Rede Hidrológica do Semiárido
SAD69	South American Datum 1969
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
TIN	Triangulated Irregular Network
WEPP	Water Erosion Prediction Project
WESP	Watershad Erosion Simulation Program
UFC	Universidade Federal do Ceara
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
USGS	U. S. Geological Survey
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
UTM	Universe Transverse Mercator

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO	15
---------------------	----

CAPÍTULO 2

2. GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AOS RECURSOS HÍDRICOS: ASPECTOS CONCEITUAIS	17
--	----

2.1 Geoprocessamento.....	18
---------------------------	----

2.2 Sensores Remotos	18
----------------------------	----

2.3 Modelos Numéricos Do Terreno (MNT)	19
--	----

2.3.1 Definição	19
------------------------------	----

2.3.2 Aplicações em Recursos Hídricos	20
--	----

2.4 Fontes de Dados para a Geração de MNT	21
---	----

2.4.1 Imagens de Radar	21
-------------------------------------	----

2.4.1.1 <i>Projeto SRTM</i>	22
-----------------------------------	----

2.4.1.2 <i>Projeto TOPODATA</i>	23
---------------------------------------	----

2.4.2 Estereoscopia	23
----------------------------------	----

2.4.2.1 <i>Aerofotogrametria</i>	24
--	----

2.4.2.2 <i>Estereoscopia por Satélites</i>	25
--	----

2.4.3. Levantamento de Campo e Interpolação Espacial	27
---	----

2.4.3.1 <i>Conceitos Estatísticos</i>	29
---	----

2.4.3.2 <i>Conceitos Geoestatísticos</i>	32
--	----

2.4.3.3 <i>Principais Métodos de Interpolação</i>	33
---	----

2.5. Produtos Gerados a partir de MNT em Aplicações de Recursos Hídricos.	42
---	----

2.5.1 Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas.	42
--	----

2.5.2. Extração Automática de Parâmetros Morfométricos.	45
--	----

2.6. Modelos Hidrológicos.	50
---------------------------------	----

CAPÍTULO 3

3. ÁREA DE ESTUDO.....	52
3.1 Localização e Caracterização.....	52
3.2 Breve Histórico.....	53
3.3 Geomorfologia.....	53
3.4 Estudos na Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC).....	55

CAPÍTULO 4

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	58
4.1 Materiais.....	58
4.1.1 Softwares Utilizados.....	58
4.1.2 Hardwares Utilizados.....	59
4.1.3 Aquisição de Dados.....	59
4.2 Métodos.....	60
4.2.1 Preparação e Processamento Inicial dos Dados.....	62
4.2.2 Processamento e Geração dos MNT.....	64
4.2.2.1 <i>Interpolações por Grade Retangular.....</i>	64
4.2.2.2 <i>Interpolações por Grades Triangulares.....</i>	67
4.2.2.3 <i>Interpolações por Inverso do Quadrado da Distância (IQD).....</i>	69
4.2.2.4 <i>Interpolações por Krigagem.....</i>	70
4.2.2.5 <i>Extração de Pontos de Imagens Orbitais.....</i>	72
4.2.3 Parâmetros Hidrológicos.....	78
4.2.4 Aspectos de Relevo.....	80

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
5.1 Comparação Entre os Produtos Primários.....	91
5.1.1 Drenagem.....	91
5.1.2 Limites.....	102
5.1.3 Curvas de Nível.....	115

5.1.4Declividade	119
5.1.5Relevo	122
5.2Comparações Estatísticas	126
5.3Análise Comparativa dos Parâmetros Morfométricos	132
5.4Análise das Interpolações por Grades Irregulares (TIN)	144
5.5Proposta de Restrição da Direção de Fluxo na BESJC	146
5.6Análise de MNT como Dado de Entrada em um Modelo Hidrossedimentológico	150
CAPÍTULO 6	
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	152
6.1Conclusões	152
6.2Recomendações.....	154
CAPÍTULO 7	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155
ÂPENDICE	161

1. INTRODUÇÃO

Um Modelo Numérico do Terreno (MNT) pode representar qualquer fenômeno que ocorra de forma contínua na superfície terrestre, como por exemplo, a distribuição de agrotóxicos encontrados em uma certa área ou dados como temperatura, chuva ou clima. Os modelos que apresentam aspectos de relevo são denominados Modelos Digitais de Elevação (MDE). Neste sentido percebe-se um uso crescente de MDE para viabilizar uma melhor compreensão física de bacias hidrográficas e a utilização destes parâmetros como dado de entrada em modelos hidrológicos.

A Bacia Experimental de São João do Cariri, tem sido estudada em diversos trabalhos, integrando Sistemas de informação Geográfica e Modelagem Hidrológica MELO (2010). Com uma área de aproximadamente 13 km² a Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) no estado da Paraíba é um laboratório externo a UFCG, no qual têm sido desenvolvidos ao longo dos últimos anos diversos estudos hidrológicos (LOPES (2003), CRUZ (2004), SANTOS (2008)). Através dos estudos desenvolvidos nesta bacia, pode se ter uma compreensão da área e do bioma caatinga.

Neste contexto, o uso crescente de geotecnologias tem auxiliado no apoio aos estudos de campo para a caracterização do solo, vegetação e da paisagem desta bacia hidrográfica, dentre outros aspectos que podem ser mapeados. Além disto, o potencial das geotecnologias em disponibilizar parâmetros de entrada para modelos hidrológicos tem sido bastante estudado MELO (2010), entretanto ainda há uma grande divergência no que diz respeito à adequabilidade dos modelos digitais de elevação de acordo com a metodologia de obtenção dos mesmos (imagens orbitais, interpolações, etc.). Um dos aspectos importantes a ser considerado é a resolução dos modelos digitais existentes e a dimensão da BESJC. Para simulações hidrológicas, resoluções inadequadas podem levar a resultados completamente errôneos e que não representam os processos físicos reais da bacia em estudo.

Diante desta problemática este trabalho tem como objetivo investigar diferentes MDE a partir de levantamentos pré existentes e produtos orbitais com vistas a sua

utilização em estudos hidrológicos e ambientais na BESJC, estabelecendo comparações e diretrizes de escolhas voltadas a pequenas bacias. As comparações foram efetuadas através de aspectos de relevo, parâmetros estatísticos e morfométricos, geração de curvas de nível, rede de drenagem e limites, onde foi possível nortear a escolha de um MDE adequado para a área de estudo.

2. GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AOS RECURSOS HÍDRICOS: ASPECTOS CONCEITUAIS

A aplicação de geotecnologias voltadas aos recursos hídricos podem envolver desde aspectos relacionados ao tratamento e a qualidade da água, passando pela gestão e disponibilidade, além da utilização integrada de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Modelos Hidrológicos. Pesquisas diversas no uso de SIG em recursos hídricos JEMMA (1993), SILVA (2005), OLIVEIRA (2007), tem demonstrado a eficiência destes sistemas nesta área de conhecimento. Além disso, os avanços na área de sensoriamento remoto tem permitido a obtenção de informações das mais diversas sobre as bacias hidrográficas estudadas que vão desde o uso do solo a produtos derivados como índices de vegetação, grau de degradação entre outros, os quais são muito uteis na identificação de impactos antrópicos.

Apoiado por imagens de satélite LINDNER *et al* (2007) aplica sensoriamento remoto na caracterização morfométrica e classificação do uso do solo na bacia do rio do peixe no estado de Santa Catarina, concluindo que as imagens facilitam na identificação das classes de uso permitindo ampliar as leituras das informações em conjunto com os parâmetros morfométricos das bacias hidrográficas.

No âmbito geral, pode-se afirmar que as geotecnologias são atualmente imprescindíveis para uma gestão de sucesso dos recursos hídricos. Em pesquisas recentes, FLAUZINO *et al* (2010) aplica a geotecnologia na gestão dos recursos naturais da bacia hidrográfica do rio Parnaíba no cerrado mineiro auxiliando na gestão e preservação destes recursos. Os resultados apresentados por este autor a partir da obtenção armazenamento, manipulação e apresentação de dados georreferenciados mostram o diagnóstico da área estudada e permitem um avanço nos estudos ambientais. De acordo com UMBELINO *et al* (2007) a aplicação do geoprocessamento e SIG revela-se indispensável para aplicações para estudos de preservação dos recursos hídricos e estudos de vulnerabilidade social possibilitando avaliar com precisão áreas de interesse em relação a expansão urbana bem como mapear e interpretar a vulnerabilidade socioambiental.

Para poder obter uma compreensão das dimensões das pesquisas relacionadas aos recursos hídricos utilizando geotecnologias, são apresentados a seguir alguns conceitos importantes.

2.1 Geoprocessamento

O geoprocessamento pode ser definido como um conjunto de tecnologias voltadas à coleta e tratamento de informações espaciais para um objetivo específico. Assim as atividades que envolvem o geoprocessamento são executadas por sistemas específicos para cada aplicação. Estes sistemas são comumente tratados como Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Um sistema de geoprocessamento é destinado ao processamento de dados referenciados geograficamente (ou georeferenciados), desde a sua coleta até a geração de saídas na forma de mapas convencionais, relatórios, arquivos digitais e etc.; devendo prever recursos para sua estocagem, gerenciamento, manipulação e análise MENDES (2001).

O termo geoprocessamento denota uma disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento de informações geográficas. Esta tecnologia, denotada por geoprocessamento, tem influenciado de maneira crescente as áreas de cartografia, análise de recursos naturais, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional. Nos países de grande dimensão e com carência de informações adequadas para tomada de decisões sobre problemas urbanos e ambientais, o geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente se baseado em tecnologias de custo relativamente baixo, em que o conhecimento é adquirido localmente. (CÂMARA; MEDEIROS, 1998, p. 3)

2.2 Sensores Remotos

De acordo com FLORENZANO (2002), o sensoriamento remoto é a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados, da superfície terrestre, através da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície.

Sensoriamento remoto é a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamento de transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves etc, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e das análises das interações entre a radiação eletromagnética e as substancias componentes do planeta terra em suas mais diversas manifestações. (NOVO, 1995 p. 157).

ROCHA, (2000) mostra a principal contribuição do sensoriamento remoto no mundo.

A principal contribuição do sensoriamento remoto veio com as primeiras imagens orbitais do planeta terra. Desde então, o homem tem verificado uma grande degradação do meio ambiente terrestre provocado por uma visão consumidora e descartável dos recursos naturais como se fossem inesgotáveis poluindo o solo, a água, e o ar e deixando uma perspectiva negativa para as gerações futuras. Esta visão tem contribuído muito para o desenvolvimento sustentável. (ROCHA, 2000 p. 115)

O sensoriamento remoto tem evoluído muito ao longo do tempo com a inserção de novos satélites, satélites específicos para determinados estudos como estudos ambientais. Mas a maior evolução pode ser observada na capacidade dos sensores de obter informações cada vez mais precisas da superfície da terra, além do aumento da capacidade espectral (sensores hiperespectrais). As potencialidades dos sensores faz com que se tenha resoluções melhores a cada dia, o que pode aumentar a aplicabilidade em áreas como levantamento de recursos ambientais, análise ambiental, geologia, agricultura, florestas, estudos urbanos ROCHA (2000).

Os sensores remotos são dispositivos capazes de detectar a energia eletromagnética (em determinadas faixas do espectro eletromagnético) proveniente de um objeto, transformá-las em um sinal elétrico e registrá-las, de tal forma que este possa ser armazenado ou transmitido em tempo real para posteriormente ser convertido em informações que descrevem as feições dos objetos que compõem a superfície terrestre. (MORAES, 2000, p. 18)

2.3 Modelos Numéricos Do Terreno (MNT)

2.3.1 Definição

Segundo FELGUEIRAS (1998), apud ROCHA (2000), um Modelo Numérico do Terreno é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial, que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre. Dados de relevo, informação geológica, levantamento de profundidades do mar ou de um

rio, informação meteorológica e dados geofísicos e geoquímicos são exemplos típicos de fenômenos representados por um MNT. A geração de um MNT passa pela aquisição de dados, edição de dados e geração do MNT. Quando o Modelo Numérico representa dados topográficos pode-se denominar MDE ou Modelo Digital de Elevação. ALCARAZ (2008) discute as divergências relativas à precisão nos estudos de delimitação de bacias hidrográficas e geração automática de rede de drenagem, destacando aspectos positivos e negativos. WALKER & WILLGOOSE (1999), fazem uma comparação entre diferentes métodos de obtenção de MDE.

2.3.2 Aplicações em Recursos Hídricos

Um MDE tem aplicabilidade direta nos estudos em recursos hídricos pela relação evidente entre a hidrografia e a topografia de uma área.

LOPES & SANTOS (2009) propõem uma nova metodologia para a geração de Modelos Hidrologicamente Consistentes (MHC) que consiste em ser um MDE com o mínimo de imperfeições topográficas visando a uma representação digital adequada de acordo com a metodologia do autor para uso em estudos e simulações diversas. A metodologia desenvolvida para a bacia hidrográfica Apucarantina no estado do Paraná partiu do desenvolvimento de MDE de grades triangulares a partir de cartas topográficas utilizando curvas de nível e pontos cotados gerando divisores de água e hidrografia para assim se chegar a um MHC.

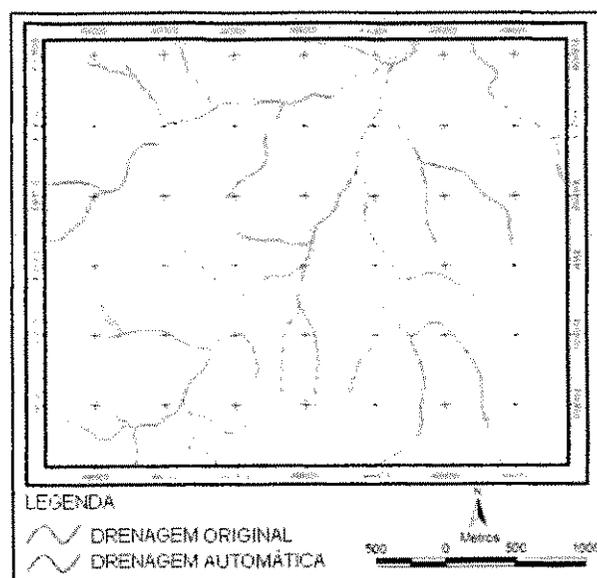


Figura 1 - Drenagem Bacia Apucarantina
Fonte: LOPES & SANTOS (2009)

LOPES & SANTOS (2009), verificaram uma diminuição das áreas planas nos modelos digitais de elevação a partir da incorporação da rede de drenagem e da inserção de divisores de água como pontos de triangulação Triangular Irregular Network (TIN) representou melhor as vertentes no modelo de elevação do terreno e nos mapas de índices topográficos. Estes autores salientam que esta metodologia é mais adequada para grandes bacias com relevo movimentado o que favorece o uso da TIN.

SOUSA *et al.* (2006) apresenta metodologias de processamento de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) para a produção de modelos digitais de direções de escoamento. Ao analisar as bacias contributivas da península ibérica e verificar a consistência das direções de escoamento obtidos a partir do dado SRTM obteve – se uma rede de drenagem compatível com a realidade.

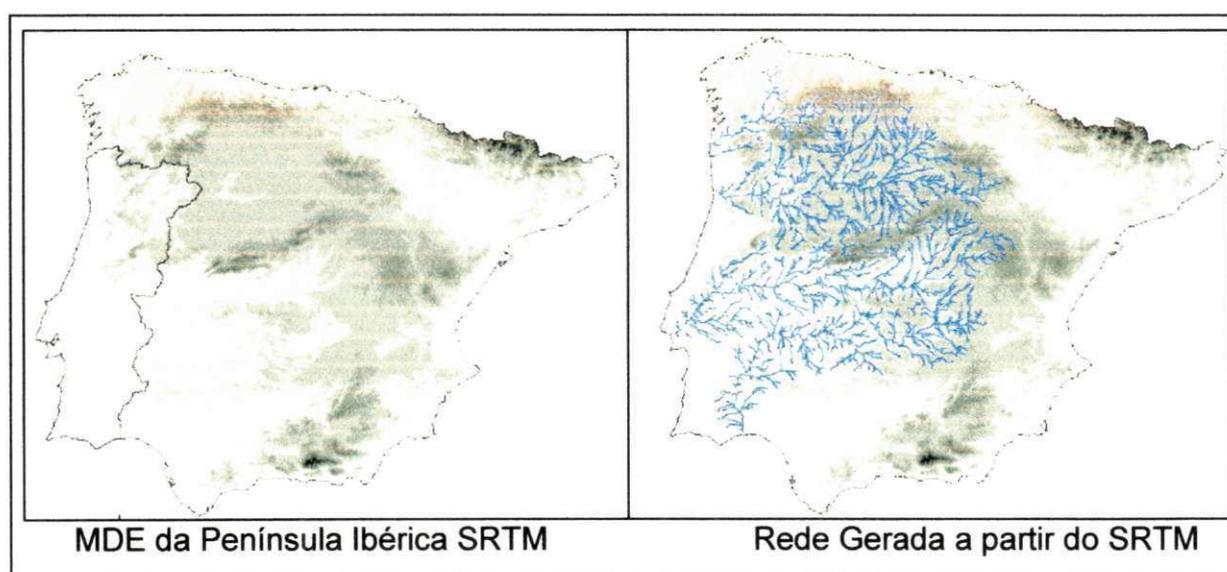


Figura 2 - Geração de Rede de Drenagem
Fonte: SOUSA et al (2006)

2.4 Fontes de Dados para a Geração de MNT

2.4.1 Imagens de Radar

Uma das formas de coleta de informações da superfície da terra é o imageamento por RADAR que são transmissões de micro-ondas ativas de comprimento de ondas mais longos (3 a 25 cm) através da atmosfera e na detecção de quantidade de energia retroespalhada pela superfície do terreno JENSEN (2009).

O RADAR pode ser de abertura real ou sintética, onde a abertura sintética consiste em uma técnica de imageamento que se vale do movimento do veículo ao qual o radar está acoplado para sintetizar o efeito de abertura de uma antena maior do que a real e obter uma melhor resolução.

2.4.1.1 Projeto SRTM

O projeto SRTM utilizou um radar de abertura sintética, pois o mesmo usa uma antena de 1 – 2 m, porém com uma capacidade de simular uma antena muito maior melhorando sua capacidade de resolução JENSEN (2009). A SRTM consiste num sistema de radar especialmente modificado que voou a bordo do ônibus espacial *Endeavour* que foi lançada em 11 de fevereiro de 2000, usou um radar de abertura sintética interferométrico¹, (banda C e banda X)², para adquirir dados topográficos em mais de 80% da área emersa da terra, entre 60° N e 56° S, durante 11 dias de duração da missão da SRTM, NASA (2010a). Antes do lançamento do SRTM, as coordenadas x,y,z eram compilados a partir de várias fontes *in situ* e de sensoriamento remoto para produzir MDE globais com uma resolução espacial de 30 arc-seg (1km x 1km), NASA (2010a) Os MDEs de resolução mais alta são trabalhados especificamente sendo muitos MDE com resolução de 1-arc-seg (30m) ou de 3-arc-seg (90m), NASA (2010a).

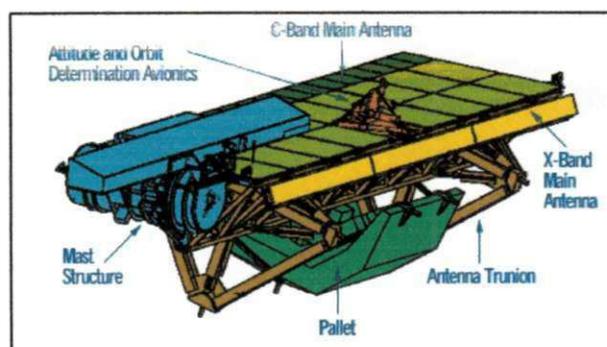


Figura 3 - Instrumentos SRTM
Fonte: NASA (2010)

¹ Em interferometria duas imagens são obtidas a partir de diferentes pontos de vista de uma mesma área. A ligeira diferença nas duas imagens permite aos cientistas determinar a altura da superfície.

² Uma das antenas foi chamado de Banda C que pode transmitir e receber comprimentos de onda de radar que são de 5,6 centímetros de comprimento. Durante a missão do radar da Banda C, com uma largura de faixa de 225 km percorreu cerca de 80% da terra. A antena de Banda X pode transmitir comprimentos de ondas de radar de 3 centímetros, com uma largura de faixa de 50 km, produz mapas topográficos com uma resolução um pouco maior do que os da Banda C, mas não tem uma cobertura totalmente global.

2.4.1.2 Projeto TOPODATA

O projeto TOPODATA VALERIANO (2004) consiste na oferta de dados topográficos e suas derivações básicas em cobertura nacional, ora elaborados a partir dos dados SRTM disponibilizados pelo USGS (*U.S. Geological Survey*) pela internet. Estes dados foram refinados da resolução espacial original de 3 arco-segundos (~90m) para 1 arco-segundo (~30m) por um técnica conhecida como krigagem (do inglês kriging). Estes dados são, declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical, curvatura horizontal, forma do terreno, delineamento de microbacias, além de arquivos em formato “.TIF” com os MDE que foram concebidos da seguinte forma (Figura 4):

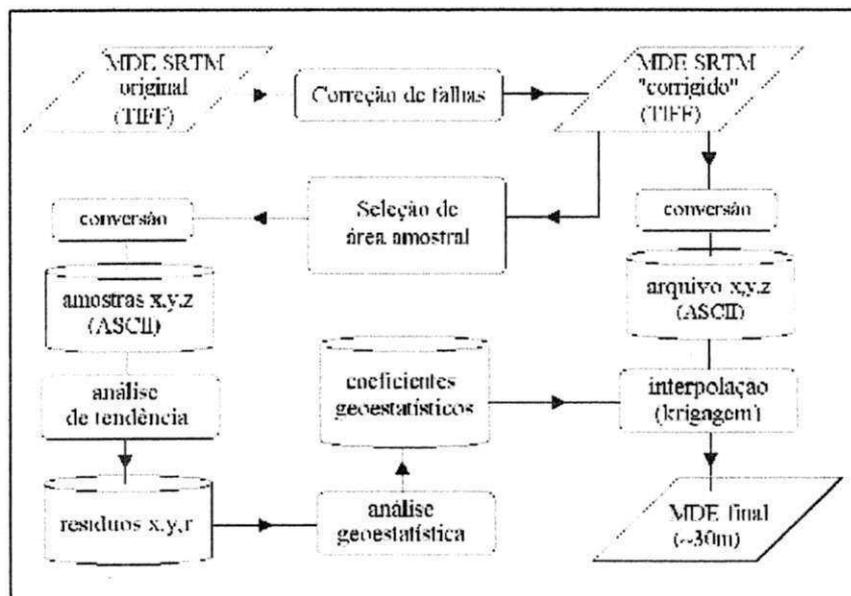


Figura 4 - Fluxo de Tratamento dos Dados SRTM para Elaboração do MDE
Fonte: VALERIANO (2002)

2.4.2 Estereoscopia

A estereoscopia é o nome dado ao fenômeno natural onde uma pessoa observa simultaneamente duas fotos de um objeto, tomadas de dois pontos de vistas diferentes, ou seja, vendo cada foto com um olho você terá a sensação em vê-lo em três dimensões. TEMBA (2000) conceitua que a estereoscopia é a propriedade que estuda métodos e técnicas que permitem a visão em perspectiva com todas as

modificações aparentes ou com os diversos aspectos que sua posição e situação determina com relação à figura a luz.

Existem alguns fatores que alteram a estereoscopia como tonalidade fotográfica uniforme e mudanças de posições de objetos em intervalos de tempo decorrido entre duas tomadas de fotografias SPOHR (2009).

SISCOUTTO *et al* (2004) acrescenta ao conceito de estereoscopia a profundidade, onde a partir do momento que conseguimos visualizar em três dimensões percebemos a profundidade. O princípio de funcionamento da maioria dos dispositivos estereoscópicos é o oferecimento de imagens distintas aos olhos esquerdo e direito do observador, proporcionando sensação de profundidade, tal qual quando se observa um objeto real (Figura 5). A estereoscopia é utilizada mais comumente como o resultado da superposição longitudinal entre duas aerofotos consecutivas. A superposição conhecida como Recobrimento Longitudinal (ou lateral) é o percentual que uma determinada fotografia superpõe em relação a uma fotografia consecutiva em uma faixa de voo SPOHR (2009).

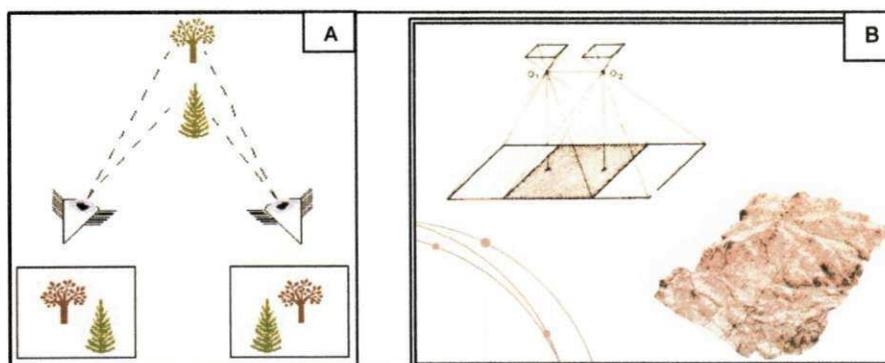


Figura 5 - Exemplo Estereoscopia
Fonte: A- MALARD; B- SPOHR (2009)

2.4.2.1 Aerofotogrametria

A aerofotogrametria é basicamente o processo de fotogrametria com imagens aéreas, onde estas sofrem processo de estereoscopia para extrair informação com precisão métrica. Entre as praticas da aerofotogrametria umas das mais importantes é a cobertura de voo que é aplicada de forma a não perder nenhuma área percorrida, assim é possível observar os detalhes inerentes a superfície terrestre (Figura 6).

2.4.2.2. Estereoscopia por Satélites

A estereoscopia por satélites parte do mesmo princípio da convencional, só que em escalas orbitais. MORI (1992). O sistema de fotogrametria digital descrito por MORI (1992) permitia a extração de feições planimétricas de uma imagem digital gerada pelos satélites SPOT³ e JERS-1⁴ bem como a geração de Modelo Digital do Terreno da região observada.

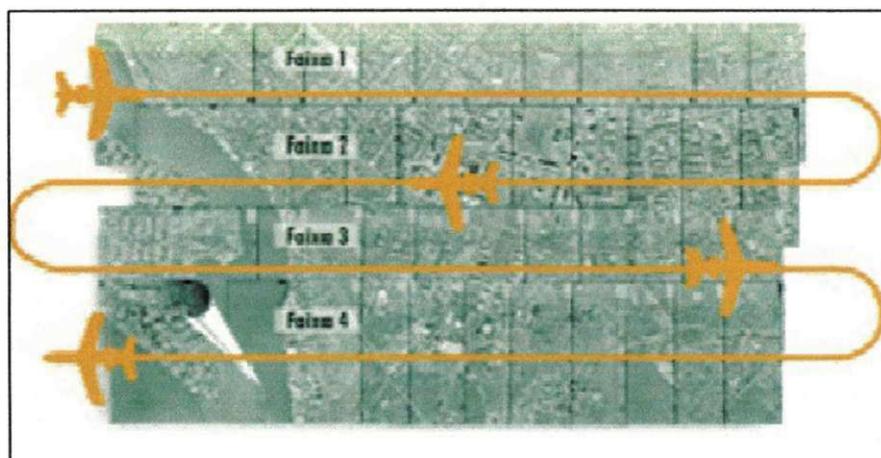


Figura 6 - Cobertura de Voo
Fonte: SPOHR (2009)

Com a junção dos conceitos da estereoscopia convencional de imagens e o avanço da captura orbital de imagens, é possível que pares de satélites sejam capazes de gerar imagens estereoscópicas em órbita. No caso do satélite TERRA e seu sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) lançado em 1999 como parte do programa EOS (*Earth Observing System*) é um esforço cooperativo entre a NASA, e o Ministério da Economia e do Comércio e Indústria do Japão (METI) e do ERSDAC (Centro de Análise de Dados de Sensoriamento Remoto da Terra) que proporciona mapas detalhados de terra com informações de temperatura, reflectância e elevação. Os produtos são disponibilizados pelo USGS (*United States Geological Survey*) em parceria com a NASA. No caso de Modelos Digitais de Elevação tratam-se de cenas de altimetria produzidas a partir das bandas 3 N (Nadir) e 3 B (Back) de uma imagem ASTER Nível-1A, obtida pelo sensor no infravermelho próximo (0.78 a 0.86 micrometros). Este sensor é composto por dois telescópios independentes que permitem a produção dos dados estereoscópicos. Os produtos finais possuem extensão de 60

³ Satellite Pour l'Observation de la Terre

⁴ Japanese Earth Resources Satellite

km e resolução espacial de 1 arc-segundo, resultando em células de aproximadamente 30 m USGS (2010). O GDEM-ASTER foi criado por transformação estéreo correlacionando os 1,3 milhões arquivos de cena de imagens ópticas ASTER cobrindo a superfície da terra entre 83 graus Norte e 83 graus sul latitude, mediante cadastro simplificado e determinação da área de interesse de forma completamente gratuita.

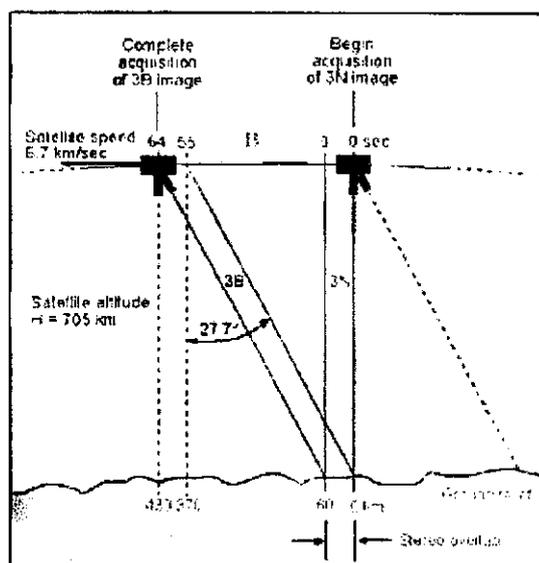


Figura 7 - Estereoscopia ASTER
Fonte: NASA (2010)

Um dos avanços tecnológicos desta área é o satélite SPOT que surgiu em 1970 com cooperação França, Bélgica e Suécia, e já vai à sua quinta edição, nesta última ele proporciona uma visão interessante acerca da estereoscopia, onde aplica a estereoscopia em uma única passagem. A grande novidade do SPOT 5, é o instrumento HRS (*High Resolution Stereoscopic*). Os dois sensores que o compõe tem um ângulo de visada de 20 graus, sendo então que um imageará na frente do satélite e, logo depois, outro imageará atrás do satélite, a 90s de intervalo, adquirindo desta forma um par estereoscópico de maneira sistemática. Os satélites SPOT adquiriam pares estereoscópicos provenientes de aquisições de várias órbitas distintas, e com ângulos variáveis. Entre as duas passagens que formavam as cenas do par estereoscópico, as condições de cobertura da área de interesse imageada e as condições de iluminação, bem como a meteorologia mudavam bastante, o que resultava em dificuldades adicionais para os softwares de produção e extração de altimetria e Modelo Numérico de Terreno. Nestes aspectos, a tecnologia e a metodologia empregada agora no Instrumento HRS do SPOT 5 é um progresso

indiscutível. Os Instrumentos HRS tem capacidade de cobrir diariamente 126 000 km² de área em estereoscopia, o que possibilitará compor uma base de dados de Modelos Numéricos de Terreno a nível mundial e atender os clientes e usuários nos melhores prazos (Figura 8). As resoluções obtidas estão entre 10 e 15 metros, mas para fins comerciais.

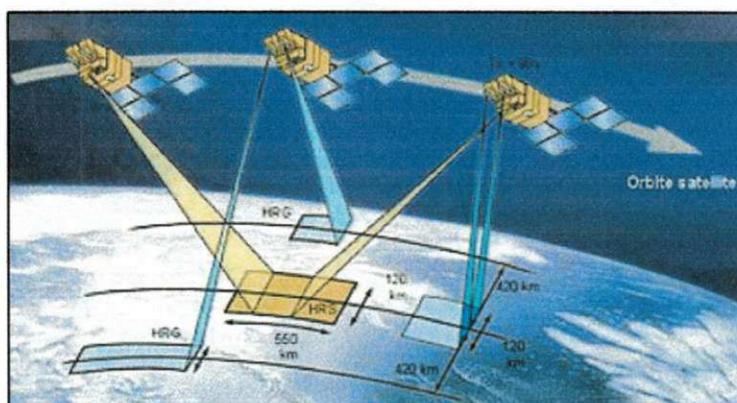


Figura 8 - HRS SPOT 5
Fonte: ENGESAT (2010)

2.4.3. Levantamento de Campo e Interpolação Espacial

A geração de um MNT também pode ser obtida a partir de dados de campo e interpolação espacial. Estes dados são obtidos mediante levantamento topográfico podendo ser levantados através de procedimentos básicos de topografia via aparelhos como teodolito, estação total, GPS (*Global Position System*) e etc. (Figura 9). A topografia é a ciência que busca de descrever o lugar cujo objetivo é representar no papel a configuração de uma porção do terreno BORGES (1977). A partir deste princípio é possível gerar plantas com curvas de nível que representam relevos e depressões.

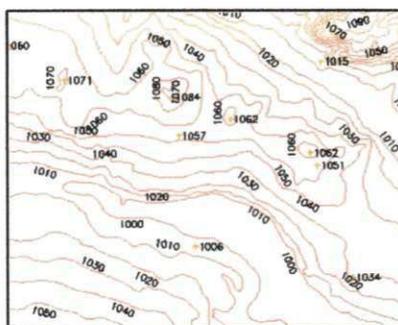


Figura 9 - Pontos Cotados e Curvas de Nível
Fonte: INPE (2010)

A partir de um levantamento topográfico, técnicas de interpolação espacial podem ser utilizadas para a geração de um MNT. A interpolação espacial apresenta vários aspectos a serem considerados, inicialmente considera-se o tipo de dado a ser interpolado e o método de interpolação a utilizar. O tipo de dado pode ser pontos ou curvas, onde estes pontos e estas curvas devem estar distribuídos espacialmente e cartograficamente referenciados. De acordo com SENDRA (1997) a interpolação espacial consiste em um procedimento que permite calcular o valor de uma variável em uma posição do espaço, (pontos não amostrais, com um valor estimado), conhecendo os valores destas variáveis em outras posições do espaço (pontos amostrais com valores cotados em campo).

ASSAD & CARVALHO (2005) apresentam uma análise espacial da precipitação pluviométrica no estado de São Paulo comparando três interpoladores univariados: inverso do quadrado da distância, curvatura mínima e krigagem ordinária usando observações de precipitação pluvial média anual de 1.027 postos pluviométricos abrangendo todo o Estado de São Paulo, representando área de 248.808,8 km² (2,91% do território nacional), no período de 1957 a 1997 (Figura 10).

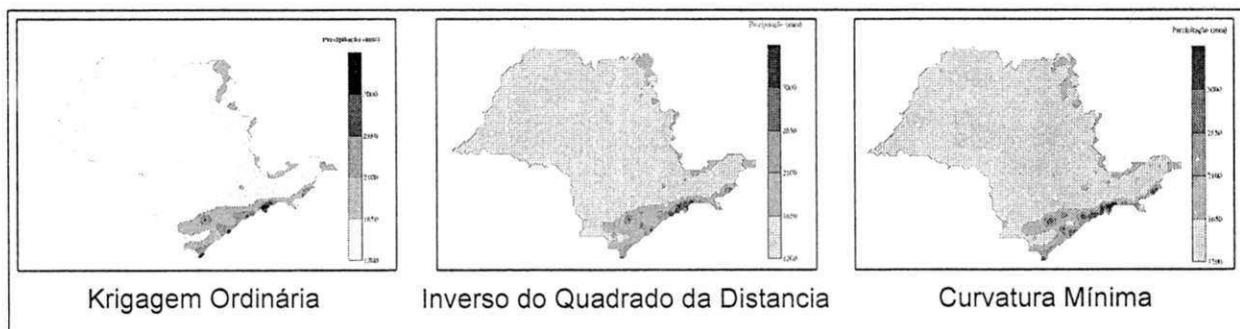


Figura 10 - Distribuição para precipitação média anual do estado de São Paulo
Fonte: ASSAD & CARVALHO (2005)

Diante das análises efetuadas foi possível observar que os postos pluviométricos situados no litoral do estado apresentam distribuição de precipitação pluviométrica diferente dos demais postos. As observações são espacialmente dependentes até um alcance de 48,5 km, em todas as direções, sendo o interpolador de krigagem o mais adequado devido à geração de uma dependência espacial entre observações, usadas neste estudo. Atrás de todo o processo de interpolação existem alguns conceitos a serem observados e estes são os seguintes. Para um melhor entendimento do processo de interpolação espacial faz-se necessária a

apresentação de alguns conceitos *estatísticos geoestatísticos* e os *principais métodos de interpolação*.

2.4.3.1 *Conceitos Estatísticos*

A estatística está interessada nos métodos científicos para coleta, organização, resumo, apresentação e análise de dados bem como na obtenção de conclusões válidas e na tomada de decisões razoáveis baseadas em tais análises (SPIEGEL, 1977, p. 1).

A estatística aplicada a análise de dados geoespaciais é a estatística clássica, a qual descreve precisamente as medidas típicas (média, variância, desvio padrão, etc.) de um conjunto de dados e avalia, por meio do desvio padrão, quão típico é o comportamento desses dados. Porém a estatística clássica falha ao compreender onde os valores mais altos e mais baixos são prováveis. Neste sentido a estatística espacial e sua capacidade de modelar superfícies pode ser mais eficiente MIRANDA (2005). Alguns métodos estatísticos clássicos são utilizados para análises espaciais ANDRIOTTI (2003).

- *Média Aritmética*

A média aritmética simples é compreendida por valores somados e divididos pela quantidade de amostras (Equação 1). A média é uma medida de fácil compreensão e aplicação, ela utiliza todos os valores da amostra, é valor único e fácil de incluir em formulas matemáticas, tendo a desvantagem de ser afetada por valores extremos.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

- *Variância*

Variância dos dados é a medida que é obtida por meio dos seguintes procedimentos:

- a) Calcular a média aritmética dos dados disponíveis.
- b) Subtrair a média de cada observação, obtendo o desvio de cada observação
- c) Elevar ao quadrado todos os desvios obtidos em b).
- d) Somar todos os valores obtidos em c).
- e) Dividir o valor obtido em d) por (n-1), em que n vale o número de observações da amostra; deve-se usar (n-1), devendo usar n apenas no caso de estar utilizando os dados totais (como é o caso deste trabalho).

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)} \quad (2)$$

▪ *Desvio Padrão*

O conceito de distribuição normal da estatística é que quanto maior a amostragem mais uniformemente as ocorrências se distribuem a medida que se afastam da média central. A medida desta uniformidade é o desvio padrão, um valor que quantifica a dispersão dos eventos sob uma distribuição normal, ou seja, a média das diferenças entre o valor de cada evento e a média central, conforme a equação abaixo.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3)$$

σ = Desvio Padrão

X_i = Valor de cada evento individual

\bar{X} = Média Aritmética dos Valores X_i

▪ *Coefficiente de Variação*

O coeficiente de variação (CV) é a razão entre o desvio padrão e a média aritmética, cujo resultado descreve o quão maior (ou menor) o desvio padrão é da média. É uma grandeza útil para comparar distribuições de unidades diferentes, mas que tem pouca utilidade quando a média aritmética se aproxima de zero. O

coeficiente de variação dá uma idéia da regularidade ou homogeneidade das amostras que estão sendo estudadas. Quando há correlação positiva entre as magnitudes da média aritmética e do desvio padrão, isto é, quando eles covariam, o CV é um índice válido. Valores elevados, na prática superiores a cerca de um, representam amostras com grande heterogeneidade, e valores abaixo de 0,4 refletem homogeneidade das amostras.

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (4)$$

Cv = Coeficiente de Variação

σ = Desvio Padrão

\bar{x} = Média

- *Coeficiente de Assimetria*

O coeficiente de assimetria é uma medida que assume o valor zero quando a distribuição de freqüência da amostra é completamente simétrica e assume valores diferentes de zero (positivos ou negativos) quando a distribuição não é simétrica. O coeficiente de assimetria é mais sensível ao efeito causado por valores erráticos do que a variância, pois a diferença em relação à média utilizada na fórmula é cúbica, ao passo que, no cálculo da variância, é quadrática.

$$A_s = \frac{3(\bar{x} - M_d)}{\sigma} \quad (5)$$

A_s = Coeficiente de Assimetria

σ = Desvio Padrão

\bar{x} = Média

M_d = Mediana

- *Mediana*

A mediana é a divisão de um conjunto ordenado de dados em duas partes iguais, de modo que a metade dos dados terá valores inferiores e a outra metade terá

valores superiores à mediana. E ocorrendo número ímpar de dados, a mediana vale exatamente o valor central, caso contrário a mediana será a média dos dois valores centrais.

- *Quartis*

Os quartis dividem os dados ordenados em ordem crescente em quatro partes iguais, sendo que 25% dos dados serão inferiores ao primeiro quartil, 50% inferiores ao segundo quartil, que é a mediana, e 75% dos dados serão inferiores a e 25% superiores ao terceiro quartil. Os quartis são muito utilizados para verificar uma discrepância nos dados, isto é, eles podem ser utilizados como medida de dispersão. A diferença entre o terceiro e o primeiro quartil é referida como uma medida robusta de dispersão, assim como a mediana para a tendência central. Se a média aritmética for muito diferente da mediana e se o desvio padrão for muito diferente da diferença entre o quartil inferior e quartil superior pode se suspeitar estar na presença de dados inconsistentes na amostra.

2.4.3.2. *Conceitos Geoestatísticos*

Dentro da área do geoprocessamento existem estudos que utilizam padrões geoestatísticos para determinar a análise de dados para interpolação espacial. O sul-africano Daniel Krige iniciou na década de 50 a publicação de resultados de estudos por ele desenvolvidos sobre dados relativos a atividades em minas de ouro na África do Sul ANDRIOTTI (2003). BURROUGH (2001) previa que a geoestatística tinha duas opções aplicáveis em ambientes SIG e sistemas de suporte a decisão ambiental: interpolação de dados pontuais e estimativas dos limites de erro, as estimativas de propagação de erros e intervalos de incerteza para a modelagem espacial e temporal, e redução e generalização de dados, então, diante disto a geoestatística trata de variáveis como regionalizadas, podendo mesmo ser considerada uma aplicação prática da teoria das variáveis regionalizadas. ANDRIOTTI (2003) destaca a importância dada às relações espaciais existentes entre as observações que compõem uma amostra. A geoestatística possibilita, também, a quantificação dos erros cometidos nas avaliações. As técnicas de geoestatísticas podem ser usadas para descrever e modelar padrões espaciais

(variografia), para prever valores em locais não amostrados (*krigagem*), para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados (variância de *krigagem*) e para otimizar malhas de amostragem ANDRIOTTI (2003).

2.4.3.3. Principais Métodos de Interpolação

Para a compreensão dos métodos de interpolação têm-se duas bases de estrutura de dados a grade retangular/regular, grade triangular/irregular. As interpolações de grade regular partem do princípio de ser um modelo digital que aproxima superfícies através de um poliedro de faces retangulares, como mostrado na Figura 11. Os vértices desses poliedros podem ser os próprios pontos amostrados, caso estes tenham sido adquiridos nas mesmas localizações xy que definem a grade desejada. CAMARA *et al* (2005).

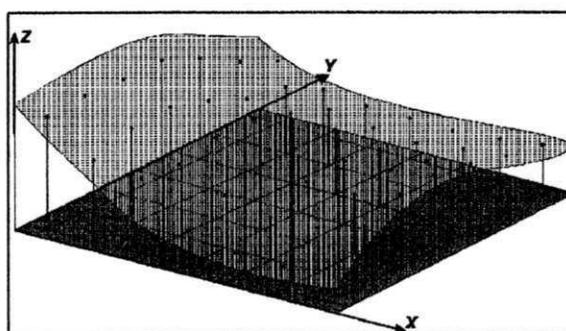


Figura 11 - Exemplo de Grade Regular
Fonte: CAMARA *et al* (2001)

As grades irregulares são estrutura de dados apresentadas através de triângulos equiláteros que são distribuídos de acordo com as amostras pretendidas. Uma malha triangular é conjunto de poliedros cujas faces são triângulos, como ilustrado na Figura 12.

Os vértices do triângulo são geralmente os pontos amostrados da superfície. Esta modelagem, considerando as arestas dos triângulos, permite que as informações morfológicas importantes, como as discontinuidades representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam consideradas durante a geração da grade triangular, possibilitando assim, modelar a superfície do terreno preservando as feições geomórficas da superfície (CAMARA *et al*, 2001, p. 7).

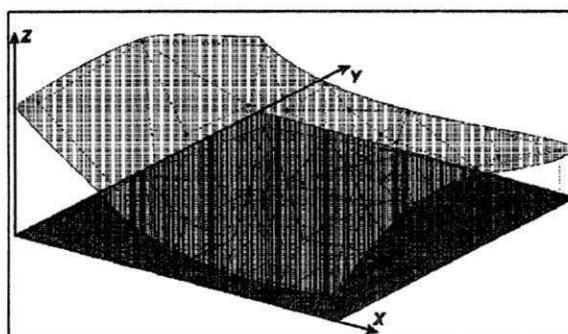


Figura 12 - Exemplo de Grade Irregular
Fonte: CAMARA et al (2001)

De acordo com INPE (2010) os conceitos dos interpoladores de grade retangular são *vizinho mais próximo*, *media simples*, *media ponderada*, *media ponderada por quadrante*, *media ponderada por cota por quadrante*, *spline bilinear ou bicubico* e *spline por tensão mitasova* e de grade triangular de *delaunay*, *menor ângulo* e *com isolinhas*:

- *Vizinho mais próximo*

Para cada ponto xy da grade é atribuída a cota da amostra mais próxima ao ponto. Este interpolador deve ser usado quando se deseja manter os valores de cotas das amostras na grade sem gerar valores intermediários. (Figura 13).

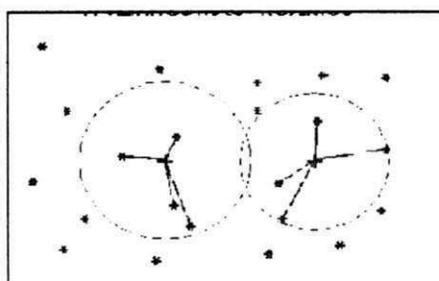


Figura 13 - Vizinho mais Próximo
Fonte: INPE (2010)

- *Media simples*

O valor de cota de cada ponto da grade é estimado a partir da média simples das cotas dos 8 vizinhos mais próximos desse ponto. Utilizado geralmente quando se requer maior rapidez na geração da grade, para avaliar erros grosseiros na digitalização. (Figura 14)

$$f(x,y) = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n z_i \right) \quad (6)$$

n = número de vizinhos

z = valor de cota dos 8 vizinhos

$i=1$

$f(x,y)$ = função interpolante

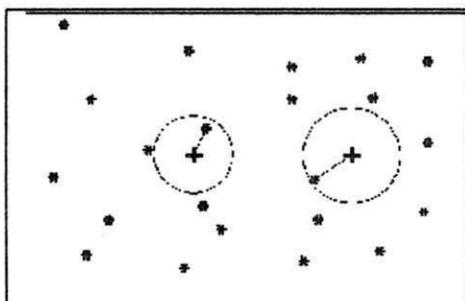


Figura 14 - Média Simples
Fonte: INPE (2010)

- Média ponderada

O valor de cota de cada ponto da grade é calculado a partir da média ponderada das cotas dos 8 vizinhos mais próximos a este ponto, por uma função que considera a distância do ponto cotado ao ponto da grade.

$$d = ((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)^{1/2}$$

d = distância euclidiana do ponto interpolante ao vizinho i

$w(x,y) = (1/d)^u$ $u = 1$ = expoente da função de ponderação

$$f(x,y) = \frac{(\sum_{i=1}^n w(x,y) z_i)}{(\sum_{i=1}^n w(x,y))} \quad (7)$$

$w(x,y)$ - função de ponderação

$f(x,y)$ - função de interpolação

Produz resultados intermediários entre o interpolador de média simples e os outros interpoladores mais sofisticados, num tempo de processamento menor.

- *Média ponderada por quadrante*

Calcula a média ponderada utilizando a função de interpolação anterior. É considerado uma amostra por quadrante (total de 4 amostras) e o número de pontos amostrados é igual para cada um dos quadrantes. Utilizado quando as amostras são todas do tipo ponto. (Figura 15)

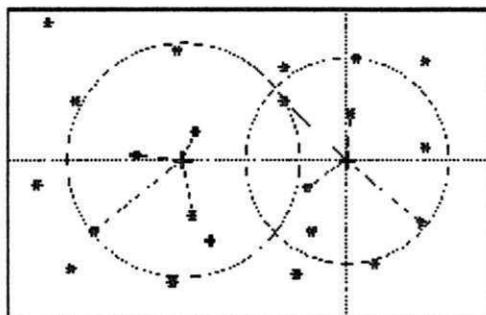


Figura 15 - Média Ponderada por Quadrante
Fonte: INPE (2010)

- *Média ponderada por cota por quadrante*

Este interpolador também realiza a mesma função de interpolação vista anteriormente. Além da restrição de quadrante do método anterior, o número de amostras para cada valor de elevação é limitado. É recomendado quando as amostras são do tipo isolinhas. (Figura 16)

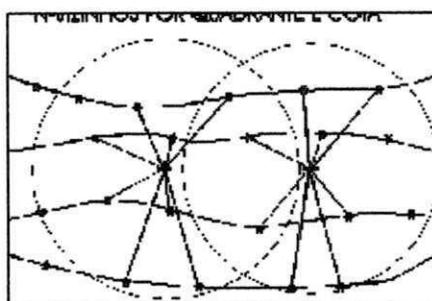


Figura 16 - Média Ponderada por Cota Quadrante
Fonte: INPE (2010)

- *Splines bilineares ou bicúbicas*

Os valores de separação em X e separação em Y definem em quantas partes a grade será dividida para ser calculada, ou seja, a grade será calculada em blocos,

onde cada bloco é uma parte da grade dividida pelos valores de separação. Mínimo de pontos informa a quantidade mínima de pontos necessária para calcular a grade de um bloco. Sobreposição define um fator de abrangência, que será aplicado ao bloco, para que amostras fora do bloco contribuam na geração da grade. A área de busca das amostras é a área do bloco aumentada em k vezes, onde k é o valor da sobreposição.

A Figura 17 é um exemplo de uma grade regular com separação em X igual a 5 e separação em Y igual a 3, ou seja, para cada bloco (área azul claro) o interpolador será executado. Nesse caso teremos 15 execuções do interpolador.

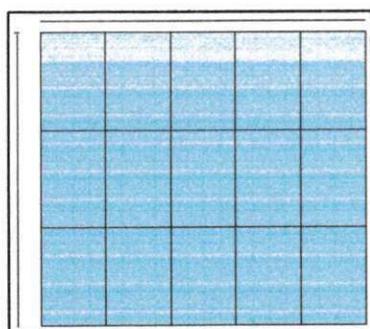


Figura 18 - Grade Retangular
5 x 3 Fonte: INPE (2010)

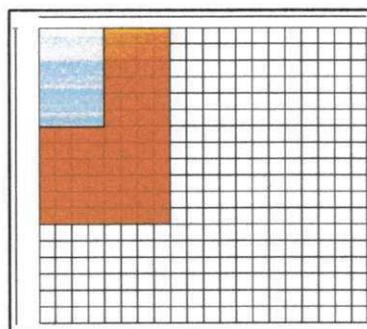


Figura 17 - Sobreposição
Fonte: INPE (2010)

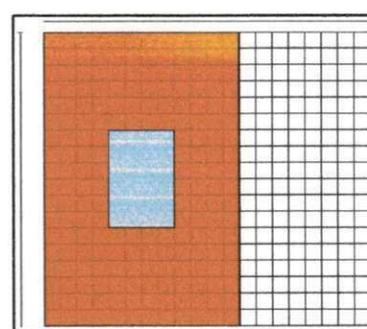


Figura 19 - Sobreposição
centro da grade Fonte: INPE
(2010)

Na Figura 18 tem-se um exemplo da sobreposição em uma grade regular com sobreposição igual a 2, ou seja, para que pontos fora do bloco (área azul claro) contribuam na geração da grade, definimos uma região de sobreposição (área laranja). Na Figura 18 é apresentada uma sobreposição na borda da grade e Figura 19 no centro da grade.

- *Splines de tensão mitasova*

O parâmetro tensão ajusta o resultado da superfície. Altos valores de tensão reduz as ações quando na superfície ocorre uma mudança rápida do gradiente.

O parâmetro suavização ameniza dados com ruídos, a suavização com valor zero significa a não suavização, ou seja, a superfície resultante passa exatamente sobre os pontos da amostra. Mínimo de pontos, informa a quantidade mínima de pontos necessária para calcular a grade.

- *Delaunay*

De acordo com CAMÂRA e MEDEIROS (1998) a triangulação de Delaunay é um tipo de triangulação muito utilizado em Sistemas de Informações Geográficas e consiste na triangulação de pontos utilizando a maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo. Essa maximização procura estabelecer entre os pontos, triângulos que sejam mais próximos o possível de triângulos eqüiláteros.

CAMÂRA e MEDEIROS (1998) enfatizam esta estruturação partindo da premissa que, se um círculo passa pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular este não contém, no seu interior, nenhum ponto do conjunto das amostras além dos vértices do triângulo em questão.

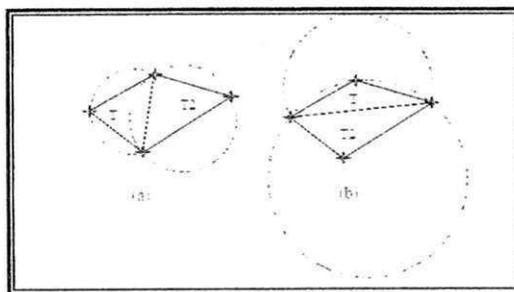


Figura 20- Critério do circuncírculo para geração de triangulações de Delaunay: (a) T1 e T2 são triângulos de Delaunay e (b) T1 e T2 não são triângulos de Delaunay

Fonte: CAMÂRA e MEDEIROS (1998)

- *Menor Ângulo*

As triangulações são obtidas considerando x, y e z , onde se torna mais preciso. Algumas triangulações são obtidas utilizando ou não a informação z , diante disto uma das formas de modificar a triangulação inserindo a cota z é utilizar a restrição de menor ângulo possível INPE (2010b).

A modificação da triangulação é feita em processo semelhante ao da modificação para obedecer ao critério de Delaunay, ou seja, todos os triângulos são testados em relação a seus vizinhos na mesma seqüência em que foram criados e o teste em dado triângulo é efetuado com seus 3 vizinhos (INPE, 2010b).

- *Com Isolinhas*

As isolinhas são linhas de igual valor que podem ser expressos por altitudes ou alguma outra informação, estas linhas devem estar separadas no espaço em uma distancia padrão.

De acordo com INPE (2010b) as isolinhas são analisadas uma a uma, para cada segmento que une as amostras extraídas da isolinha. Se o número de arestas interceptadas para cada segmento é 1 ou 2, a alteração da aresta para conectar os vértices dos triângulos que compartilham esta aresta e que são diferentes dos atuais vértices da aresta pode ser suficiente. Se o número de arestas interceptadas é maior que dois, os pontos de interseção são inseridos na triangulação.

- *Grades Retangulares a partir de uma TIN*

De acordo com o INPE (2010b) a conversão da grade triangular para a grade retangular pode ser necessária quando se deseja uma forma matricial para o modelo numérico de terreno. Deste modo as informações do terreno modeladas por uma grade triangular podem ser analisadas com outras informações do tipo matricial. O processo de conversão utiliza o ajuste de uma superfície a cada triângulo, sendo as superfícies mais usuais as seguintes: *Plano*, *Quíntico considerando linhas de quebra* e *Quíntico sem linhas de quebra*.

A equação do plano:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (8)$$

O plano ajustado a cada retalho triangular da grade determina os valores de z em cada posição xy dentro do triângulo. As superfícies de retalhos diferentes se encontram no lado comum destes triângulos sem continuidades suaves.

O interpolador Quíntico é definido por uma equação polinomial de quinto grau e a diferença existente nas formas de interpolar utilizando mesmo parte da utilização ou não de linhas de quebra.

$$z(x,y) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^{5-i} q_{ij} x^i y^j \quad (9)$$

As linhas de quebra contribuem para auxiliar na definição das ondulações do terreno, um exemplo claro de linha de quebra são as drenagens que apresentam caracterizações de vales e depressões que ajudam a modelar melhor o terreno. A utilização deste interpolador permite gerar uma superfície mais suave quando comparada com outra grade gerada pelo interpolador linear INPE (2010b).

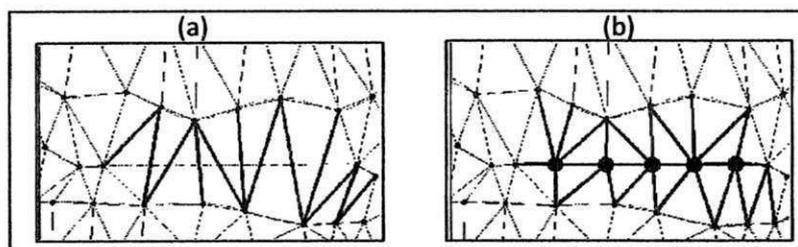


Figura 21 - Grade Triangular sem Linhas de Quebra (a) e com Linhas de Quebra (b)
Fonte: INPE (2010b)

Além dos interpoladores já citados, tem-se os interpoladores estatísticos como é o caso do *Inverso de Quadrado da Distancia* (IQD) e da *Krigagem*.

- *Inverso do Quadrado da Distância*

O interpolador estatístico *Inverso das Distâncias* baseia-se na dependência espacial, isto é, supõe que quanto mais próximo estiver um ponto do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores, portanto, quanto maior peso para as amostras mais próximas do que para as amostras mais distantes do ponto a ser interpolado. Assim o modelo consiste em se multiplicar os valores das amostras pelo inverso das suas respectivas distâncias ao ponto de referência para a interpolação dos valores SENA & VARELLA (2008).

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (10)$$

em que,

- z = valores estimados;
- n = número de amostras;
- z_i = valores conhecidos;
- d_i = distâncias entre os valores conhecidos e estimados (z_i e z).

▪ *Krigagem*

A *Krigagem* é um dos métodos estatístico para fins de interpolação mais conhecidos ele foi concebido pelo pesquisador Daniel Krige que introduziu o uso de medidas móveis para evitar superestimação sistemática de reservas de mineração. A *Krigagem* compreende um conjunto de técnicas de estimação e predição de superfícies baseada na modelagem da estrutura de correlação espacial CÂMARA *et al* (2004).

CHEREM (2009), apresenta a interpolação por krigagem do MDE da alta bacia do Rio das Velhas, centro de Minas Gerais, e sua avaliação morfológica e hidrológica. A avaliação consiste na comparação das características entre o MDE krigado e o MDE original. CHEREM (2009) chega a resultados interessantes acerca do produto SRTM, onde, os valores indicam a manutenção das características morfológicas do modelo, havendo apenas suavização dos picos e vales encaixados e também das características hidrológicas, havendo alteração da morfologia dos canais. A interpolação por krigagem do MDE-SRTM permite ganho de acurácia, embora não seja recomendada a sua utilização em estudos que requeiram escala de mais detalhe que 1:50.000 CHEREM (2009). De acordo com VALERIANO (2004), a interpolação dos dados topográficos é melhor realizada por interpoladores geoestatísticos, os quais consideram a relação topológica e de tendência estatística, a exemplo da krigagem, que gera um MDE com freqüência normal para os valores altimétricos e para as informações derivadas.

Na Figura 22 é apresentado um exemplo da aplicação de três interpoladores (krigagem, linear e inverso do quadrado da distância) e a distribuição no espaço da freqüência dos valores de altitude e declividade.

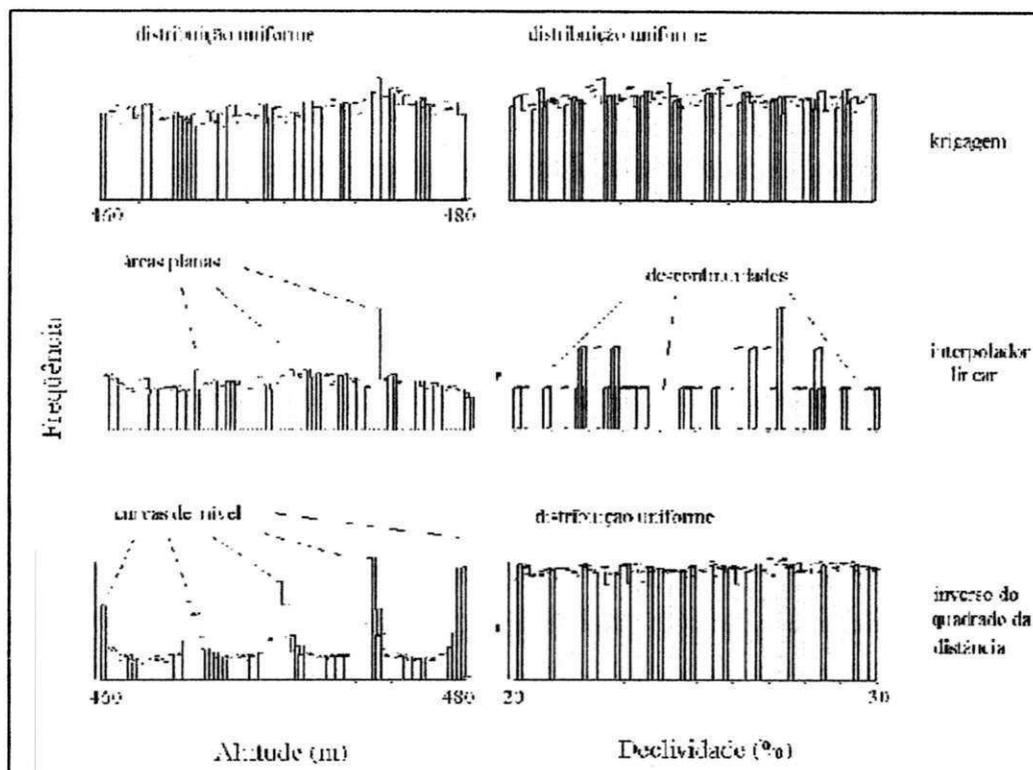


Figura 22 - Histograma de Altitude e Declividade obtido sobre MDE gerado para a mesma área a partir de dados de cartas topográficas e interpolados
Fonte: VALERIANO (2004)

2.5. Produtos Gerados a partir de MNT em Aplicações de Recursos Hídricos.

2.5.1 Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas.

A delimitação automática parte de um conceito extremamente importante que é a *direção de fluxo*. Para determinar um limite de bacia deve-se partir da geração de um MNT, gerar sua *direção de fluxo*, *fluxo acumulado*, *rede de drenagem*, *identificação do exutório e limite*. Para a determinação da direção de fluxo deve ser efetuado antes o que é denominado de preenchimento de "sinks" para evitar erros de delimitação. O aplicativo "Fill" que auxilia no preenchimento de "sinks" significa que algumas vezes o MNT pode possuir valores muito baixos ou muito altos de altitude que se distanciam muito dos seus pixel vizinhos e podem ser confundidos com depressões ou com cristas. Para tanto deve se fazer o preenchimento de "sinks" antes de gerar o mapa de direção de fluxo. O preenchimento de "sinks" ou de depressões como é também conhecido, proporcionou vários tipos de estudos em um destes estudos SANTOS *et al* (2006) apresentam o SIG na modelação hidrológica,

onde eles abordam o preenchimento de depressões como parte significativa na geração de um MDE a ser utilizado em modelos hidrológicos destacando que a criação de linhas de água com recurso ao SIG consiste no preenchimento das células do MNT de forma a evitar que o modelo forme linhas ou pontos sem escoamento (Fill Sinks), isto é, eliminar as depressões do MNT com o aumento da cota dos pontos que constituem essas depressões. Diante disto é possível observar que a correção dessas depressões se torna imprescindível para que seja possível a utilização destes MNT em modelos hidrológicos. De acordo com SRIVASTAVA (2000) a remoção das depressões provoca alterações nos dados geográficos do MNT que podem ter um efeito significativo na modelação dos parâmetros hidrológicos.

A direção de fluxo é representada por uma matriz de números onde cada número representa uma direção JENSON & DOMINGUE (1988). Conforme se observa na Figura 23, pequenas alterações em valores das células podem provocar alterações significativas nas direções de fluxo. Estas alterações podem ocorrer em MDEs produzidos a partir de sensoriamento remoto, principalmente pela interferência da vegetação que localiza-se próxima aos caminhos de drenagem CRUZ & ARAGÃO (2010).

32	64	128
16		1
8	4	2

Figura 23 - Processo de Determinação das Direções de Fluxo
Fonte: JENSON & DOMINGUE (1988)

CRUZ & ARAGÃO (2010), apresentam a delimitação da bacia hidrográfica do rio Japarutuba com 1700 km² no estado de Sergipe, onde foram utilizados os MDEs SRTM e GDEM/ASTER. Observa-se que, ambos os limites estariam próximos ao correto. No entanto, verificou-se, em ambos os produtos finais, a existência de uma sub-bacia que erroneamente, pelas delimitações realizadas, contribuía para fora da bacia do rio Japarutuba, ou seja, suas águas iriam para a bacia do rio São Francisco. A detecção desta distorção deu-se por meio de visitas à região com GPS, consultas aos moradores no local e consultas a cartas do IBGE na escala 1:50000.

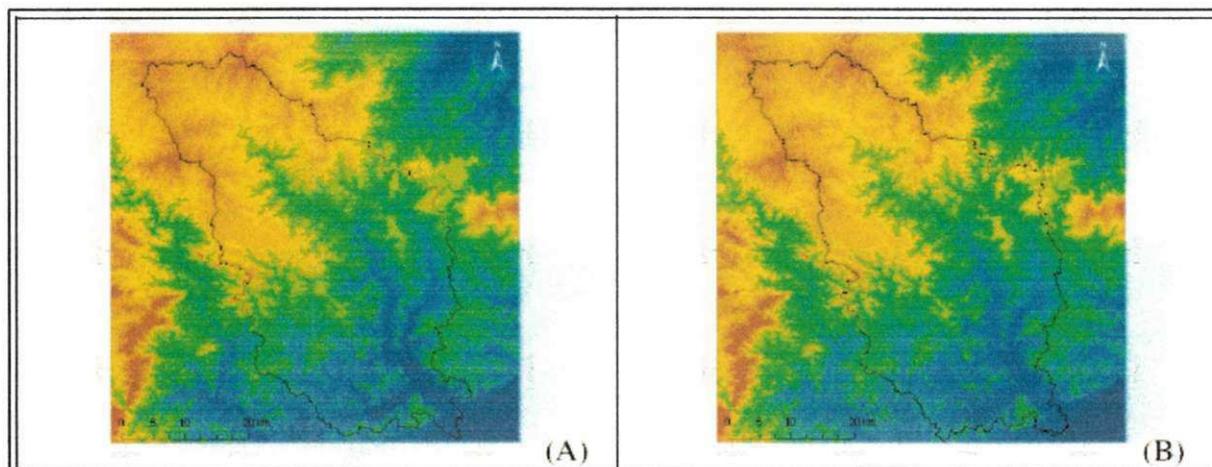


Figura 24 - Delimitação da Bacia do Rio Japarutuba a partir dos MDEs (A) SRTM e (B) GDEM/ASTER "híbrido".

Fonte: CRUZ & ARAGÃO (2010)

A partir deste estudo os autores procederam com um estudo de campo, o qual auxiliou na observação de que a sub-bacia estudada contribui com a drenagem da Bacia do Rio São Francisco e não com a Bacia do Rio Japarutuba.

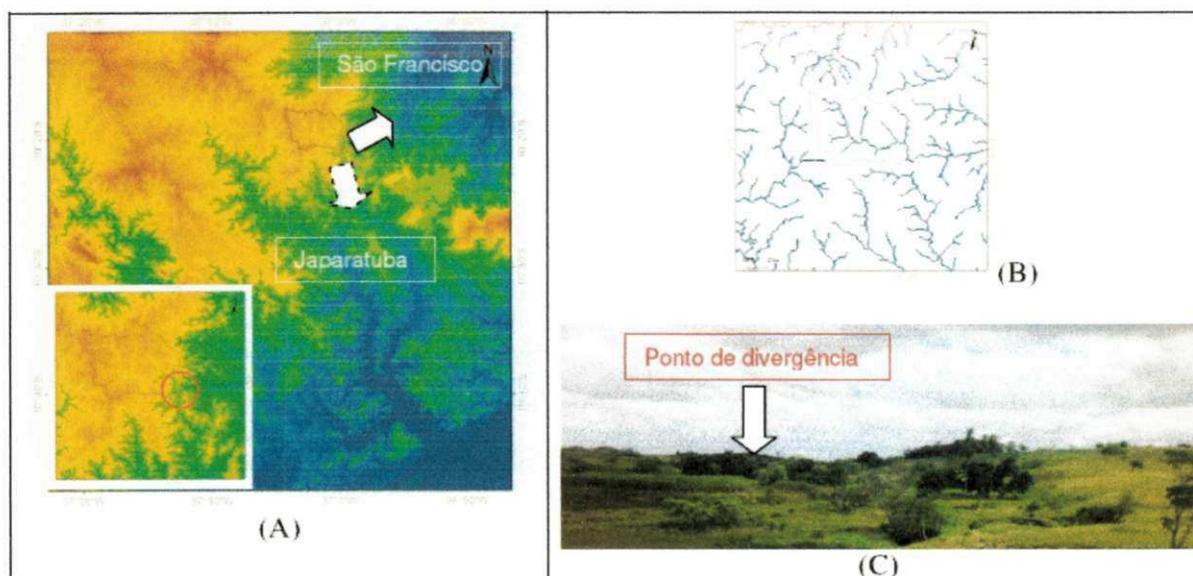


Figura 25 - Falha na Delimitação na Bacia do Rio Japarutuba. (A) Sub-Bacia contribuinte erroneamente a bacia do rio São Francisco; (B) Recorte da Sub-Bacia com indicação do ponto de divergência do fluxo; (C) Fotografia do local obtida em vista a campo

Fonte: CRUZ & ARAGÃO (2010)

Enfim, as áreas contribuintes obtidas por meio de processamento do MDE SRTM e MDE GEDEM/ASTER apresentam uma diferença na ordem de 0,12%, considerada insignificante para a dimensão da bacia, Ambos os MDE foram deficientes para a delimitação correta de uma sub-bacia cujo o exutório se situava

em uma região de cobertura vegetal intensa e há uma necessidade da utilização com cautela de tais produtos, sempre com suporte de outras fontes de informação.

A precisão de geração automática da rede de drenagem e delimitação de bacias hidrográficas depende essencialmente da qualidade dos MDE. A seleção dos mais adequados depende completamente do objetivo dos usuários e sobre a escala de trabalhos. CARDOSO (2008) estudou a modelagem numérica da superfície na geração da planialtimetria segundo dados de quatro equipamentos topográficos, e constatou que através da comparação das quatro representações, todas foram semelhantes, contudo a representação mais próxima foi a planialtimetria obtida com base de dados da estação total, sendo as representações obtidas com base em teodolitos idênticas entre si.

2.5.2. Extração Automática de Parâmetros Morfométricos.

A extração dos parâmetros morfométricos pode ser empregada para caracterizar uma bacia bem como pode ser útil na geração de parâmetros de entrada em modelos hidrológicos. COSTA (2007) compara o uso da SRTM para a delimitação e caracterização fisiográfica de uma micro-bacia hidrográfica, ele afirma que as diferenças obtidas entre os métodos automáticos e manuais, principalmente nos atributos de medidas lineares como perímetro da bacia, extensão média do escoamento superficial e comprimento da rede de drenagem, influencia nos altos valores de densidade de drenagem.

DINIZ (2008) apresenta o desenvolvimento e validação de uma técnica de regionalização de parâmetros de modelos chuva-vazão baseado no uso de algoritmos genéticos e de redes neurais, tendo o modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) no decorrer desta pesquisa ele retira 32 parâmetros físicos.

Os conceitos dos parâmetros físicos estabelecidos por DINIZ (2008) serão utilizados neste trabalho sendo considerados doze parâmetros, dentre estes parâmetros diretos como Perímetro, Área da Bacia, Altitude Maior e Menor, Altitude Média, Ordem dos Rios, Comprimento da Rede de Drenagem, Comprimento do Rio Principal, Largura Média, Linha de Fundo, tem-se os obtidos de forma indireta, como Coeficiente de Compacidade, Densidade de Drenagem, Fator de Forma.

- *Área (A)*

A área também denominada área de drenagem ou área de contribuição é a projeção horizontal da região contida entre seus divisores. A área se constitui na característica mais importante da bacia hidrográfica para efeitos de estudos hidrológicos.

- *Perímetro (P_r)*

O perímetro é o comprimento da linha divisória da bacia hidrográfica. Bacias com valores de perímetros iguais podem possuir área diferentes a depender de sua forma.

- *Altitudes*

É quando sua superfície de referência adotada para medir a altitude é o nível médio dos mares.

- *Altitude Média*

É a soma de todas as altitudes divididas pela sua quantidade total, é uma média aritmética simples.

- *Ordem dos Rios*

Geralmente a análise das características de uma bacia hidrográfica é iniciada com a identificação da ordem dos cursos de água, a qual é feita com base em mapas que contêm todos os seguimentos da rede de drenagem, sejam perenes, efêmeros ou intermitentes, pequenos ou grandes. De acordo com o critério de classificação introduzido por HORTON e depois modificado por STRAHLER CHOW (1959) aos pequenos cursos de água que não possuam tributários é atribuído ordem 1. A partir da confluência de dois cursos de água de ordem 1 se forma um curso de ordem 2; a partir da confluência de dois cursos de água de ordem 2 se forma um curso de ordem 3 e, assim sucessivamente (Figura 26).

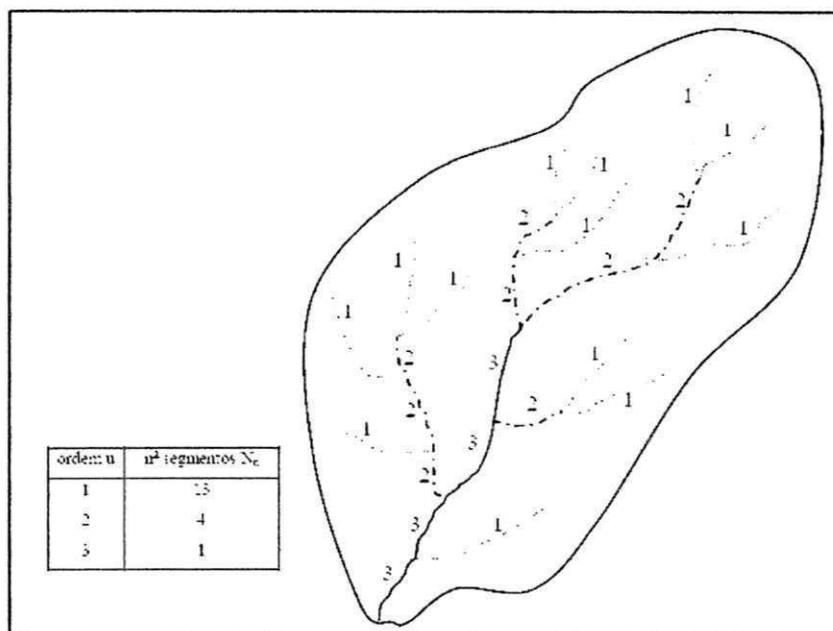


Figura 26 - Ordem dos Cursos de Água de uma Bacia Segundo Strahler
Fonte: CHOW (1959)

- **Comprimento da Rede de Drenagem (L_d)**

É comprimento de todos os talvegues da bacia. A sua magnitude indica se uma bacia é bem ou mal drenada.

- **Comprimento do Rio Principal**

O curso de água principal é geralmente o de maior extensão, corre mais ou menos na região central da bacia e é aquele que conduz os escoamentos para fora da seção de referência.

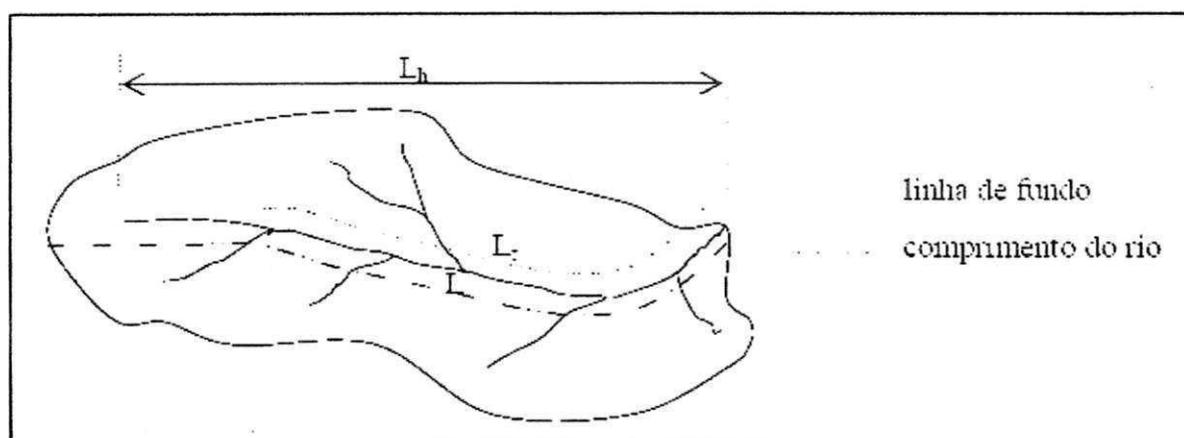


Figura 27 - Comprimentos de uma Bacia Hidrográfica
Fonte: DINIZ (2008)

- *Largura Média (L_m)*

Obtida de forma indireta através da relação entre a área da bacia (A) e a linha de fundo. Quanto mais L_m se aproxima de L, tanto mais a bacia é propícia a ocorrência de cheias instantâneas.

$$L_m = \frac{A}{L} \quad (11)$$

- *Linha de Fundo (L)*

É a distancia medida ao longo do curso de água principal desde a seção de referência até o divisor da bacia, ver Figura 27.

- *Coefficiente de Compacidade (K_c)*

Também conhecido como coeficiente de Gravelius é a relação entre o perímetro da bacia hidrográfica e o perímetro de um circulo de igual área. Para a mesma área o circulo é a figura de menor perímetro e, portanto, em qualquer caso esse coeficiente será maior que a unidade e quanto mais a forma de bacia se aproxima de um circulo mais propícia será a ocorrência de cheias e mais próximo de um será K_c .

$$K_c = \frac{0,28P}{\sqrt{A}} \quad (12)$$

- *Densidade de Drenagem (D_d)*

É o quociente entre o comprimento total da rede drenagem e a área da bacia hidrográfica, serve para auxiliar os índices de declividade e compacidade para entender os escoamentos de superfície. Muitas vezes é considerado um indicador chave da resposta hidrológica de uma bacia, dando a diferença em velocidade e

tempo de permanência da água entre as cabeceiras e rio principal. A densidade de drenagem também tem implicações sobre a extensão de áreas saturadas e a geração de deflúvios. O solo é provavelmente mais saturado dentro da rede de drenagem do que nas áreas localizadas nas cabeceiras da bacia. Um alto valor de densidade de drenagem indica uma densidade de rios relativamente alta e, então, uma resposta rápida de cheias.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (13)$$

Sendo: $\sum L_i$ O somatório comprimentos de todos os talwegues da bacia (km)

A é a Area da Bacia Hidrográfica em km₂

- *Fator de Forma (K_f)*

É a relação entre a largura média (L_m) e a linha de fundo da bacia (L). A exemplo do coeficiente de compacidade, K_f também é indicativo de tendência para enchentes na bacia. Uma bacia com fator de forma baixo ou muito alto é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho, porém com fator de forma próximo a unidade.

$$K_f = \frac{L_m}{L} \quad (14)$$

Os parâmetros morfométricos são características importantes para o funcionamento de uma bacia hidrográfica, neste sentido, ALVES (2010) analisou comparativamente o traçado e as características fisiográficas da bacia hidrográfica do Açude Pereira de Miranda, localizado em Pentecoste-CE - considerando as informações obtidas através dos dados das cartas da SUDENE/IBGE/DSG em formato digital e as informações extraídas do MDT da SRTM e obteve resultados bastantes satisfatórios dos dados SRTM, diferindo muito pouco dos dados obtidos da carta da SUDENE. Com as exceções da declividade e altitude em que as diferenças foram significativas. Isso não significa, necessariamente, que estes dados

estejam incorretos, tendo em vista que as técnicas e tecnologias utilizadas nos dois casos são diferentes. A resolução das cartas da SUDENE (1:100.000, com curvas de nível de 40 em 40 metros) não reproduz o terreno com precisão e dão resultados diferentes.

CHAGAS (2009) avalia os MDE para a aplicação em um mapeamento digital de solos, avaliando diferentes MDE para subsidiar a escolha do modelo apropriado para derivar atributos topográficos utilizados em um mapeamento digital de solos, por redes neurais artificiais. Uma das conclusões expostas por CHAGAS (2009) foi que o MDE, derivado de curvas de nível apresentou qualidade superior aos MDE derivados de sensores remotos (ASTER e SRTM). A análise qualitativa também identificou que o MDE CARTA é superior aos demais, pois estes apresentaram grande quantidade de erros que podem comprometer o estabelecimento das relações entre atributos do terreno e as condições locais de solos.

2.6. Modelos Hidrológicos.

A finalidade em se utilizar modelos hidrológicos, parte do princípio de buscar uma melhor visão do comportamento hidrológico de uma determinada região. Entre estes modelos tem-se O KINEROS 2 (*Kinematic Runoff and Erosion Model*) que baseia-se nos processos físicos que controlam o escoamento superficial e a erosão em uma bacia hidrográfica WOOLHISER (1990). Este modelo é orientado a evento e descreve os processos de interceptação, infiltração, erosão escoamento superficial em pequenas bacias urbanas e rurais.

WOOLHISER (1990) apresenta que para a execução de uma simulação neste modelo matemático a bacia hidrográfica é representada por uma geometria de planos e de canais. A variação espacial da precipitação, da infiltração, do escoamento e dos parâmetros de erosão pode ser considerada.

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo hidrossedimentológico de base física e distribuído, que executa suas simulações considerando a "Unidade de Resposta Hidrológica" na escala diária do tempo.

O modelo SWAT identifica áreas homogêneas do comportamento hidrossedimentológico dentro das sub-bacias, chamadas a Unidade de Resposta Hidrológica (URH) é a área pela qual o SWAT procede com as suas simulações de rotina do ciclo hidrológico. O estabelecimento de uma URH parte da combinação

única entre ocupação e tipo de solo, obedecendo às classes de declividade OLIVERA (2006). Sua base conceitual faz com que o SWAT exija informações precisas quanto à bacia estudada, requerendo vários parâmetros de entrada que estão relacionados com as características físicas da bacia, tais como informações sobre o tempo, propriedade do solo, topografia, vegetação e uso e cobertura do solo – além de dados climáticos. Tais especificidades permitem a simulação em bacias sem dados de vazão, erosão e evaporação NEITSCH (2005) – mesmo que isto impossibilite a validação dos resultados. Tal fato eleva a importância deste modelo perante as condições do nordeste brasileiro, onde não há instrumentação adequada em bacias para tais medições.

Capítulo 3

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização e Caracterização

A Bacia Experimental de São João do Cariri está localizada no município de São João do Cariri no estado da Paraíba, as margens da rodovia federal, BR-412, e pode ser localizada através das coordenadas geográficas de 7°22'45" S e 36°31'47" W.

O Riacho dos Namorados que drena as terras da bacia é afluente do Rio Taperoá, que por sua vez é contribuinte do Rio Paraíba. A altitude local varia entre 400 e 600 m sobre os terrenos com relevo suave ondulado, de rochas predominantemente cristalinas. A bacia apresenta clima seco semiárido, solos rasos, relevo suave e ondulado e vegetação de caatinga, os solos predominantes são os seguintes: *Luvissolo Crômico Vértico*, *Vertissolo* e *Neossolo Lítico*. A precipitação média anual é de 503 mm e o período chuvoso ocorre de janeiro a maio. A temperatura ao longo do ano varia entre 23,5 °C (mínima), mês de junho, e 28 °C (máxima), nos meses de setembro a janeiro, dados da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AES/A).

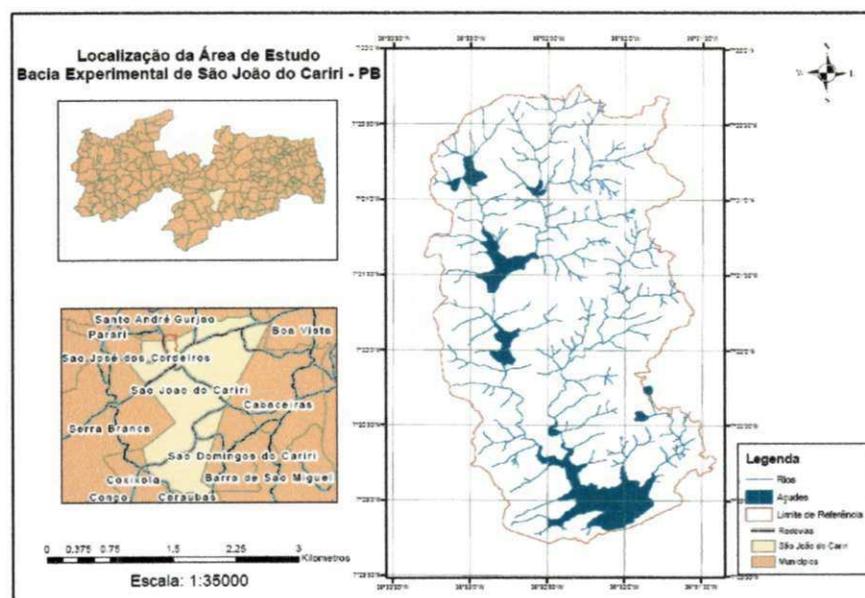


Figura 28 - Área de Estudo

3.2 Breve Histórico

Os estudos em São João do Cariri foram iniciados em 1985, com a implantação de uma bacia escola, através de cooperação técnica com a agência alemã GTZ. Inicialmente duas sub-bacias da ordem de 1 km² têm sido monitoradas de forma mais efetiva, inclusive através de monitoramento meteorológico. A partir do final da década de 1990, microbacias de 1ha e parcelas experimentais de 100 m² foram instaladas. Com a criação do projeto de Implantação de Bacias Experimentais no Semiárido (IBESA/ FINEP/FUNPEC) que tinha como objetivo desenvolver atividades de pesquisa comuns, caracterizando ações de grupos pesquisadores através do engajamento com os propósitos da rede de hidrologia do semiárido (ReHISA). Estas ações incluíam implantar e desenvolver bacias experimentais e representativas na região semiárida do nordeste brasileiro, aplicando-se metodologias unificadas. O projeto IBESA foi iniciado em 2004, pelas equipes das seguintes universidades: UFPB, UFCG, UFPE, UFRPE, UFRN, UFC/FUNCEME. O Projeto proporcionou a instrumentação de mais duas sub-bacias para aquisição de dados ampliados e modernizados. Uma característica importante dos estudos nesta bacia experimental é a ênfase nos processos de erosão e produção de sedimentos e sua modelagem matemático-computacional, uma linha de pesquisa com tradição no grupo de recursos hídricos da UFCG. Atualmente a Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) é administrada pelo Centro de Ciências Agrárias (CCA) da UFPB Campus II e conta com equipamentos da UFPB Campus I e da UFCG Campus I e tem-se realizado um número considerável de trabalhos de mestrado e doutorado, além da formação de dezenas de alunos de graduação, que participam das pesquisas como estagiários ou em atividades de iniciação científica.

3.3 Geomorfologia

A Bacia experimental de São João do Cariri tem relevo suave e ondulado, característico do semiárido. A geomorfologia do semiárido apresenta alguns aspectos a serem considerados tais como, as depressões semiáridas, que singularizam o domínio do local, são baixadas de clima seco, extensas e onduladas às vezes, com inúmeros inselbergues, cristas e maciços residuais JATOBÁ (2008).

Tendo como objetivo geral o estudo da forma de relevo, a geomorfologia do semiárido apresentado na Figura 29 está assim descrita.

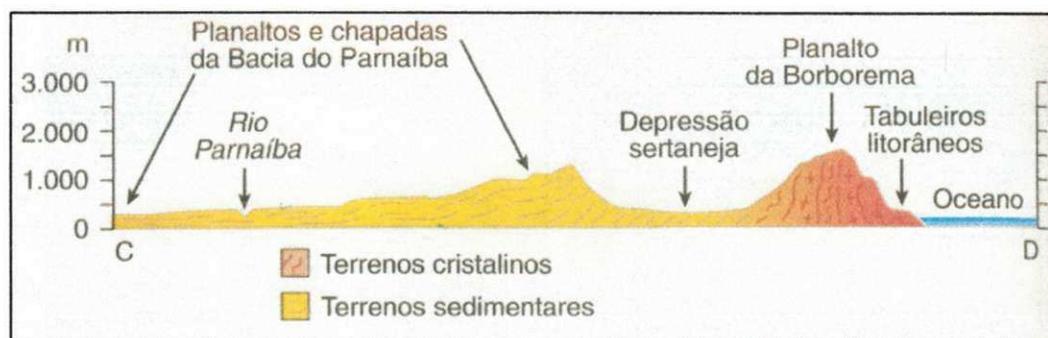


Figura 29 - Perfil Leste Oeste da Parte Norte do Semiárido Brasileiro
Fonte: ALBUQUERQUE (2007)

JATOBÁ (2008) caracteriza a rede de drenagem como um aspecto a não ser desprezado nos estudos de geomorfologia. Segundo este autor, o clima é um grande contribuinte para a alteração dos aspectos referente à drenagem. Nos rios intermitentes, predominantes no semiárido brasileiro, o leito se localiza acima do lençol freático em todas as estações, de sorte que não há alimentação a custa do aquífero, portanto, nos rios efêmeros o aquífero se dispõe acima do leito, na estação chuvosa e abaixo na estação seca.

Nos estudos hidrológicos a caracterização da geomorfologia da bacia hidrográfica pode informar diversos parâmetros físicos que ocorrem na mesma. Neste sentido, no contexto do Projeto IBESA (2004) foram identificados os parâmetros morfométricos tanto para a Bacia de São João do Cariri quanto para as suas sub-bacias.

Tabela 1 - Parâmetros Morfométricos da BESJC

	Área (km ²)	Perímetro (km)	L. Rio (km)	Kc	Kf	Dd	Sin	L Ret. Eqvl. (km)	I Ret. Eqvl. (km)
Sub-bacia 1	0,38	3,0	1,10	1,36	0,31	6,3	1,37	1,15	0,32
Sub-bacia 2	0,45	3,2	1,15	1,34	1,25	3,3	1,33	1,24	0,36
Sub-bacia 3	1,90	6,1	2,65	1,24	0,27	3,5	1,15	2,81	0,87
Sub-bacia 4	0,15	1,7	0,62	1,23	0,39	8,3	1,55	0,60	0,24
Bacia riacho Namorados	13,6	19,7	5,3	1,50	0,48	4,8	1,64	6,60	2,8

Fonte: IBESA (2004)

L. Rio = comprimento do rio; Kc=coeficiente de compacidade; Kf = fator de forma; Dd = densidade de drenagem; Sin = sinuosidade; L. Ret. Eqvl. = Lado maior do retângulo equivalente; I. Ret. Eqvl = Lado menor do retângulo equivalente.

3.4 Estudos na Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC)

Os estudos desenvolvidos na BESJC desde sua instalação apresentaram as mais diversas contribuições ao semiárido nordestino. Um destes trabalhos conduzido pelo Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba realizou diagnóstico de solo e vegetação da bacia experimental CHAVES *et al* (2002), cujos resultados relevantes a esta caracterização são sintetizados a seguir. Os solos predominantes na Bacia são o *Luvissolo Crômico Vértico* – TC (*Bruno Não Cálcico Vértico*), o *Vertissolo Cromado Órtico* – VC (*Vertissol*) e *Neossolo Lítico* – RL (*Solo Litólico*), ocorrendo em 55.6%, 22.4% e 7,9% da área, respectivamente. Ocupando áreas menores e locais específicos da paisagem, ainda ocorrem os *Cambissolo Háptico* – CX (*Cambisol*), *Neossolo Flúvico* – RU (*Solo Aluvial*), *Planossolo Háptico* – SX (*Planosol Solódico*) e Afloramentos de Rocha associados a *Neossolo Lítico*. Esta pesquisa concentrou esforços em algumas sub-bacias específicas, nas quais predominam os *Vertissolos Cromados Órticos*.

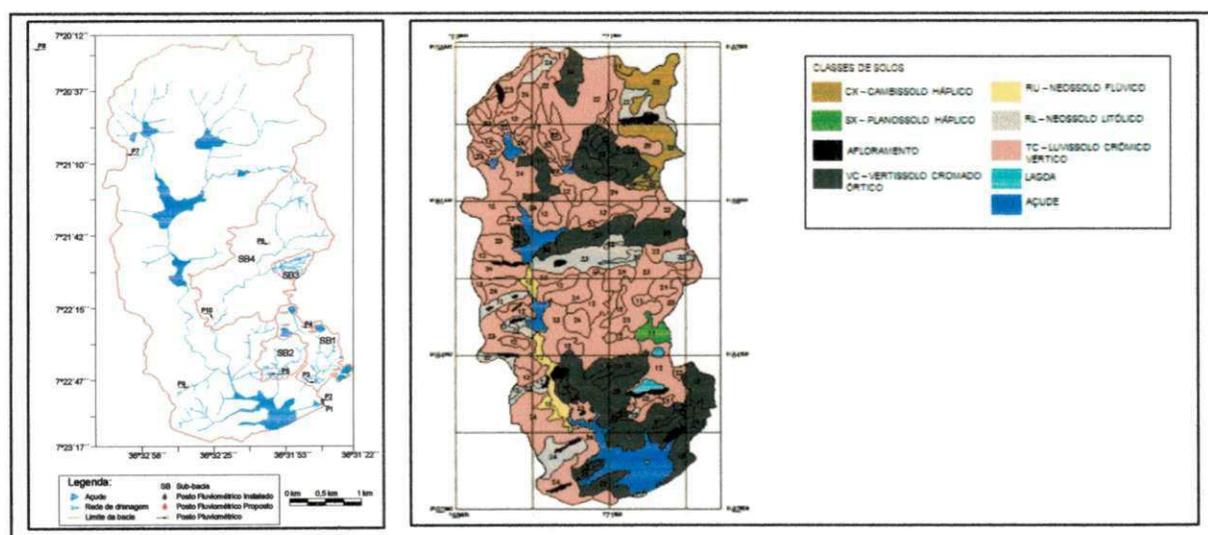


Figura 30 - Área das Sub-bacias e Distribuição dos Solos na Bacia
Fonte: CHAVES *et al* (2002)

Com ênfase nos recursos hídricos a UFCG realizou diversos estudos para compreender o comportamento hidrológico do semiárido em seus diversos aspectos, sejam erosivos através do estudo de sedimentos, impactos antrópicos e etc. Entre estes estudos desenvolvidos pela UFCG tem-se a utilização de modelos hidrológicos. LOPES (2003), efetuou a modelagem dos processos hidrológicos nas sub-bacias 1 e 2 através do modelo KINEROS 2. LOPES (2003) aplicou o modelo KINEROS 2 nas sub-bacias 1 e 2 com o objetivo de simular o escoamento superficial nas mesmas. Os resultados gerados pelo IBESA (2004) consistem em uma primeira tentativa de simular o processo de escoamento superficial nas sub-bacias em estudo. Sendo assim, faz-se necessárias simulações com um maior número de eventos possível para que os parâmetros do modelo sejam melhor caracterizados.

Os estudos relativos à erosão do solo e escoamento superficial sempre foram uma característica do grupo de pesquisadores da UFCG, onde se estuda os mais diversos impactos destes processos no semiárido. CRUZ (2004) estudou os impactos do uso do solo através da modelagem da geração do escoamento superficial e erosão do solo na região do cariri paraibano e dentro de suas conclusões ele verificou que o seu modelo (WEPP) utilizado se mostrou bastante confiável com resultados satisfatórios.

Dentro do contexto de modelos hidrológicos SANTOS (2008) através da modelagem hidrossedimentológica comparando três modelos (KINEROS 2, WESP – *Watershed Erosion Simulation Program*, WEPP – *Water Erosion Prediction Project*) em pequenas sub-bacias na região semiárida paraibana mostra que os três modelos são bons para a previsão de escoamento superficial em todas as sub-bacias estudadas. Em relação à produção de sedimentos este autor verifica que os modelos WESP e KINEROS fornecem boas estimativas de sedimentos em nível de eventos individuais e anuais, enquanto que o WEPP não tem precisão adequada para pequenos valores de produção de sedimentos. Seguindo a mesma linha de pesquisa PAIVA (2008) efetua estudos comparativos com estes mesmos três modelos em escalas menores, em microbacias na mesma região de SANTOS (2008). É possível observar poucas diferenças entre o estudo de SANTOS (2008) e PAIVA (2008). No trabalho de PAIVA (2008), o modelo WEPP representou bem o escoamento e apenas razoavelmente bem a produção de sedimentos nas parcelas, porém nas microbacias enquanto simulou razoavelmente bem o escoamento, a simulação da

produção de sedimentos apresentou grandes discrepâncias, enquanto que nos modelos KINEROS e WESP apresentaram parâmetros estáveis e representativos para a região conforme as simulações em duas bacias bastante distantes entre si, porém na mesma região.

MELO (2010), realizou uma abordagem metodológica da integração entre modelos hidrológicos e SIG, utilizando a BESJC como área de estudo. Este autor utilizou uma interface de integração entre o modelo Kineros e um SIG denominado de AGWA (*Automated Geospatial Watershed Assessment Tool*)⁵. O AGWA consiste em uma ferramenta de análise do sistema hidrológico em geral, provendo condições para a avaliação em bacias hidrográficas, mudanças no uso da terra e cobertura vegetal e condições hidrológicas, sendo de grande importância no processo de tomada de decisão na avaliação dos impactos na bacia em estudo, uma vez que o mesmo permite a análise espacial com a criação de diversos cenários futuros e suas comparações MILLER *et al* (2007). Os resultados obtidos por MELO (2010) são diretamente dependentes do MNT utilizado como dado de entrada para o modelo de simulação utilizado. A Figura 31 mostra um exemplo dos cenários simulados.

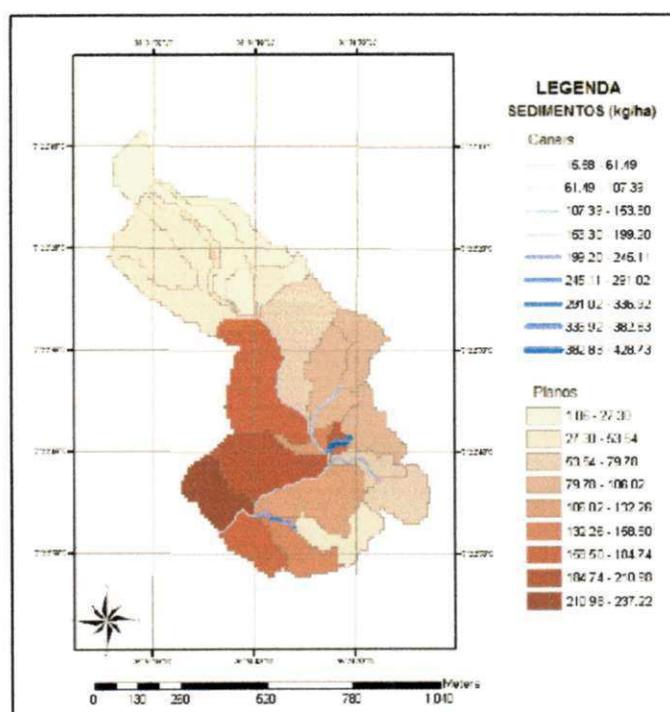


Figura 31 - Produção de Sedimentos – Evento 24/04/2006
Fonte: MELO (2010)

⁵ ESRI – Empresa Norte Americana desenvolvedora do software de SIG ArcGIS

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 Materiais

São apresentados a seguir todos os materiais (programas, dados, equipamentos) utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

4.1.1 Softwares Utilizados

- *Processamento Digital de Imagens e Geoprocessamento: SPRING*

Para o processamento de grande parte das informações foi utilizado o Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING) CÂMARA (1996) em sua versão 5.1.4 desenvolvido pelo INPE. Este *software* é disponibilizado de forma gratuita, porém não pode ser denominado um *software* livre, pois não é disponibilizado seu código fonte para customizações e desenvolvimentos.

- *Geoprocessamento e Extração de Parâmetros Hidrológicos: ArcGis 9.3*

Para a complementação de alguns processamentos foi utilizado o SIG ArcGis 9.3 desenvolvido pela ESRI que possibilitou extrair informações acerca das características físicas da BESJC .

- *Digitalização: AutoCAD*

Para a digitalização de alguns levantamentos utilizando mesa digitalizadora foi utilizado o software de apoio a desenho AutoCAD (AutoDesk)⁶ em sua versão 2007.

⁶ Empresa Norte Americana desenvolvedora do *Software* AutoCad

- *Tratamento Estatístico e Tabulação dos Dados: Excel*

No tratamento estatístico dos dados bem como na tabulação geral das diversas informações geradas lançou-se mão dos recursos disponíveis na planilha eletrônica da Microsoft⁷, o Excel na sua versão 2003.

4.1.2 Hardwares Utilizados

Para estudo de campo foi utilizado câmera fotográfica para a obtenção do acervo de fotos e um receptor GPS para auxiliar na compatibilização de alguns pontos de controle gerados e observados em campo.

4.1.3 Aquisição de Dados

Neste trabalho são utilizados três fontes de dados principais com datas e procedimentos de aquisição diferenciados:

- *Levantamento Topográfico Convencional*

No final da década de 80, foi realizado um levantamento topográfico planialtimétrico da BESJC utilizando os instrumentos topográficos convencionais da época (Teodolito). Este levantamento estava representado em um mapa topográfico em poliéster, o qual foi digitalizado durante o período da pesquisa.

- *Levantamento Topográfico Automatizado*

No final da década de 90, foi realizado um levantamento topográfico planialtimétrico da BESJC utilizando os instrumentos topográficos automatizados (Estação Total). Este levantamento já se encontrava em meio digital através de um arquivo original com os pontos cotados no interior da bacia.

- *Imagens Orbitais*

Nesta pesquisa são utilizadas imagens de radar da missão SRTM, disponibilizadas de forma gratuita e já georreferenciadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) bem com as imagens óticas do satélite

⁷ Empresa Norte Americana desenvolvedora da plataforma Office que está inserido o *software* Microsoft Excel

ASTER/TERRA, as quais também são disponibilizadas gratuitamente pela NASA. Também são utilizadas imagens SRTM pós processadas pelo INPE através do projeto TOPODATA VALERIANO (2004).

▪ *Mapeamentos Complementares*

Outros trabalhos de mapeamento realizados anteriormente foram consultados para complementação das informações ausentes. São estes:

- Cartas Topográficas da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) na escala de 1:100000 AESA (2010).
- Mapeamento de Declividade, Relevo, Drenagem, Curvas de Nível CHAVES *et al* (2002).
- Delimitação de Bacia IBESA (2004).
- Mapas de apoio de campo utilizando a imagem do satélite IKONOS⁸ de resolução espacial de 10 metros (Apêndice A a C).

4.2 Métodos

A metodologia proposta para traçar diretrizes para o uso de MNT em recursos hídricos está fixada nos seguintes procedimentos. Preparação e processamento inicial dos dados que consiste na digitalização, georreferenciamento e seleção de recorte das imagens orbitais. O processamento e geração dos MNT consistiu nos testes de interpolação onde estão divididos em interpolação por grade regular, grade triangular, IQD e Krigagem utilizando os pontos cotados e as curvas de nível dos dois levantamentos, além da extração de pontos por imagens orbitais. Após estabelecer estes processamentos foi possível gerar parâmetros hidrológicos através da direção de fluxo, geração da rede de drenagem e delimitação automática de bacias e alguns aspectos de relevo como declividade, relevo e curvas de nível.

Através do estabelecimento destes pontos a serem seguidos, foi possível delimitar especificamente o passo a ser seguido por cada um deles.

⁸ Imagem adquirida junto a UFCG para utilização em estudos inerentes a BESJC.

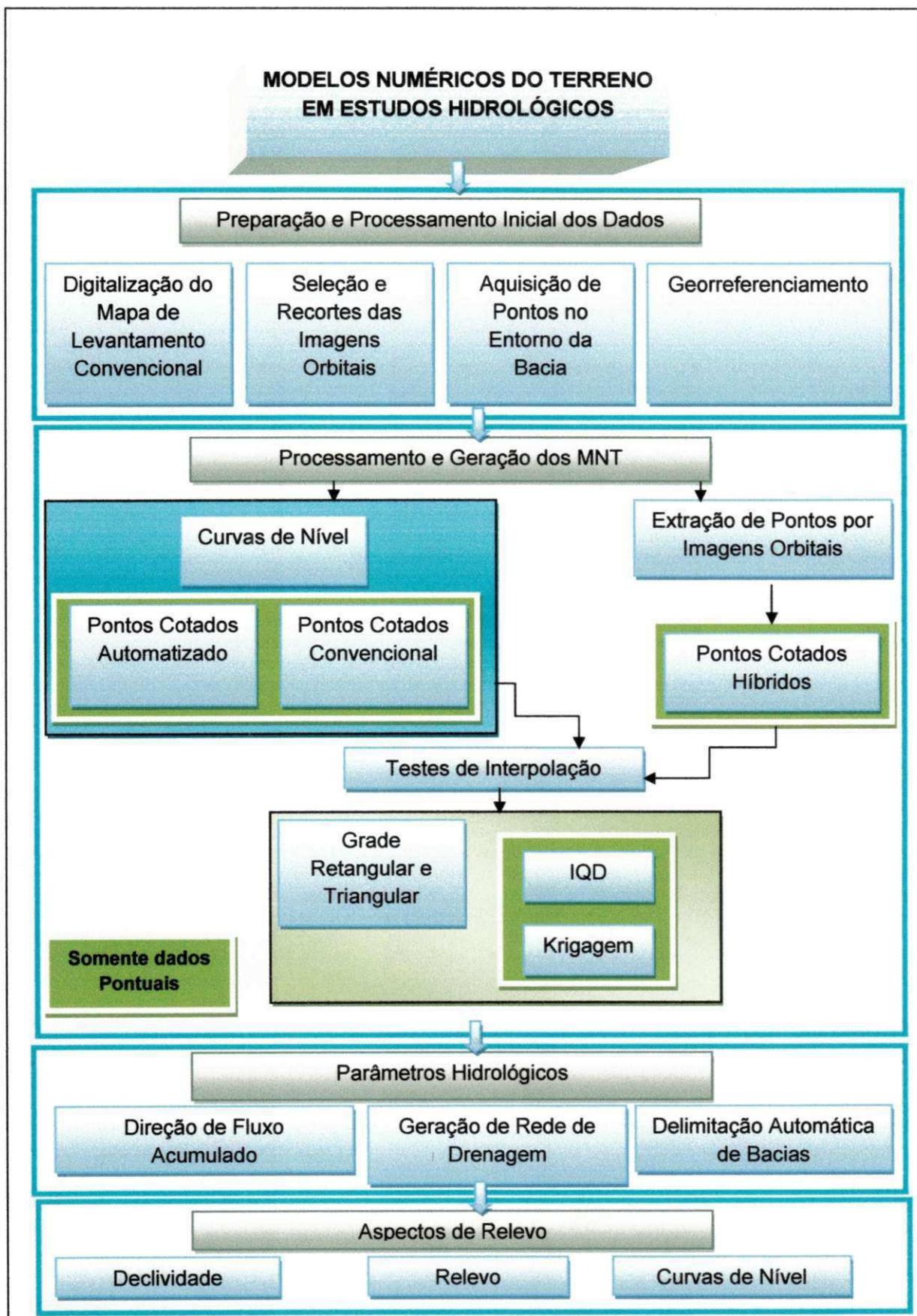


Figura 32 - Fluxograma Metodológico

4.2.1 Preparação e Processamento Inicial dos Dados

- Digitalização do Levantamento Topográfica Convencional.

A carta topográfica foi digitalizada através de mesa digitalizadora com o auxílio do AutoCAD. O levantamento original em poliéster foi completamente digitalizado e os dados já em formato digital foram organizados em camadas de forma a facilitar a seleção dos dados a serem usados na pesquisa ou em trabalhos futuros. O levantamento original estava na escala de 1:10000 apresentando as curvas de nível em intervalos de 5 m além de outras informações de referencia. As curvas de nível foram utilizadas para esta pesquisa além dos pontos cotados.

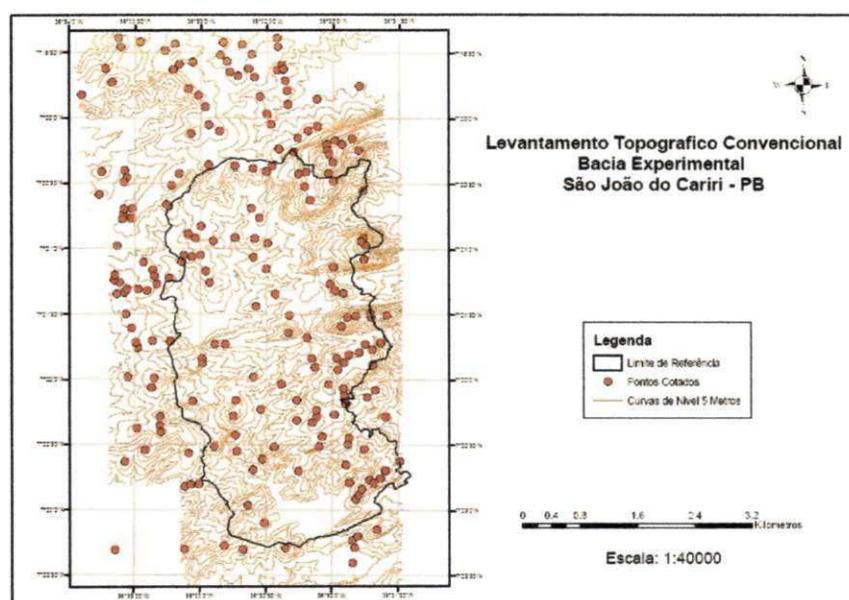


Figura 33 - Mapa Levantamento Topográfico Convencional

- Georreferenciamento

Para todos os dados neste trabalho é adotado o mesmo sistema de projeção de referência. O sistema adotado é a projeção cartográfica cilíndrica conforme UTM (*Universe Transverse Mercator*). O Datum de referência adotado é o SAD69 (*South American Datum 1969*). Na projeção UTM a superfície terrestre é subdividida em zonas de 6° (seis graus) de longitude e no caso da área de estudo a zona considerada é a zona 24.

- Aquisição de Pontos no entorno da bacia

Foram extraídos sete pontos cotados da carta da SUDENE no entorno da bacia, para apoio nas interpolações posterior geração dos MNT

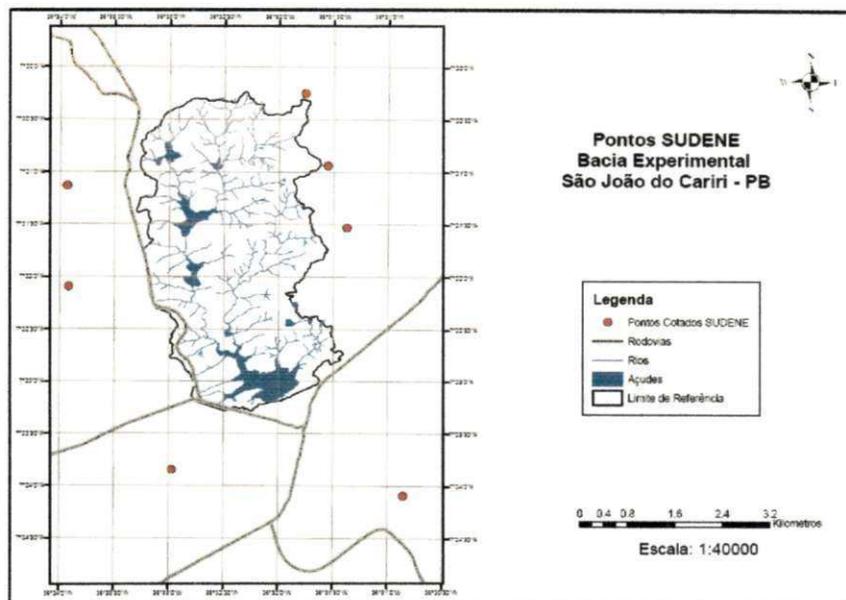


Figura 34 - Pontos Cotados da Carta da SUDENE

- Seleção e Recorte das Imagens Orbitais

As imagens SRTM e ASTER são disponibilizadas em cenas com dimensões muito superiores as dimensões da BESJC. Neste sentido faz-se necessário o recorte destas imagens na forma de um retângulo envolvente à bacia. No caso das imagens SRTM, a resolução espacial é de 90 x 90 metros. As imagens SRTM pós processadas através do projeto TOPODATA são apresentadas na resolução espacial de 30 x 30 metros e as imagens do satélite ASTER referentes ao MDE são obtidas nesta mesma resolução. A Figura 35 apresenta a área de estudo recortada nas três diferentes fontes de dados.

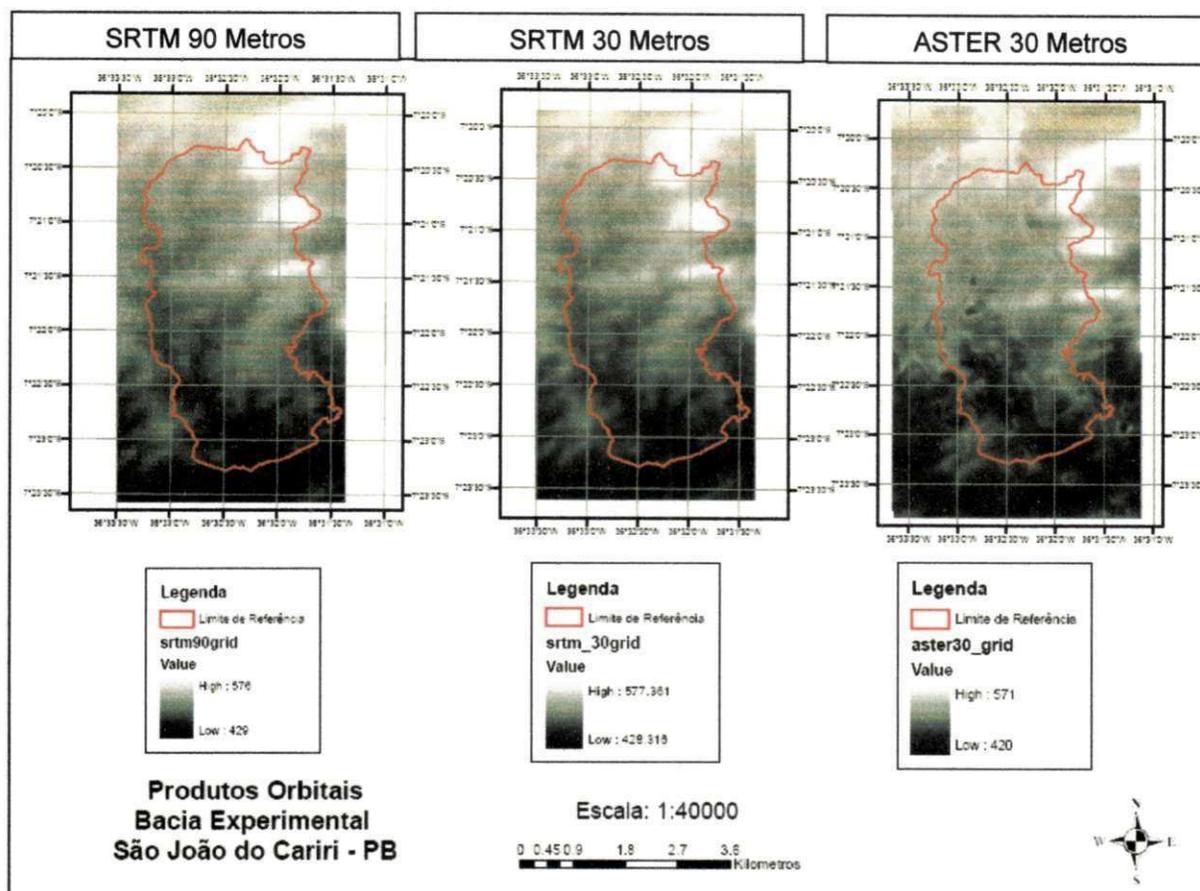


Figura 35 - Imagens Orbitais

4.2.2 Processamento e Geração dos MNT

Para a geração de um MNT é necessário estabelecer o conjunto de amostras a ser interpolado. Neste trabalho além dos pontos no interior da bacia, alguns pontos no entorno também são utilizados. Os dois levantamentos topográficos citados no item 4.1.3 serviram de base para estes MNT gerados.

4.2.2.1 Interpolações por Grade Retangular

As interpolações foram divididas em etapas que consistiam: em (i) tratamento com grades regulares (retangulares) por interpoladores de *média*, por *Vizinho mais Próximo*, *Splines*, (ii) interpolações por grades irregulares (triangulares) e (iii) interpoladores estatísticos *Krigagem* e *IQD*. Foram utilizados como dados de entrada para as interpolações tanto as amostras em formato pontual (pontos cotados) quanto às curvas de nível, para testar o resultado dos algoritmos de interpolação. A Figura 36 apresenta telas do SIG utilizado nesta interpolação e através da mesma pode-se observar que foi usado inicialmente o método de média ponderada (Equação 7)

variando-se o raio de busca para envolver um numero maior ou menor de amostras na interpolação. O programa também calcula baseado na extensão do arquivo e nas distancias entre as amostras, um raio de busca padrão (*default*). Para a área de estudo este raio é de aproximadamente 2.630 m.

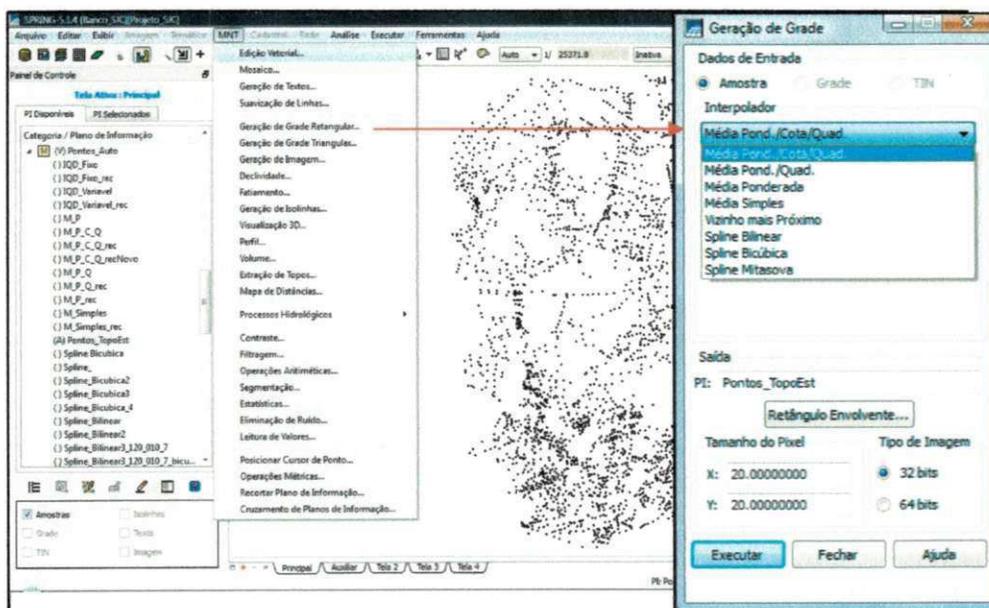


Figura 36 - Processo de Interpolação

Na geração das grades retangulares, além das interpolações por *média e vizinho mais próximo*, os interpoladores *Splines* também foram testados. A Figura 37 apresenta os parâmetros de configuração para a geração de MNT por grades retangulares no programa SPRING (INPE).

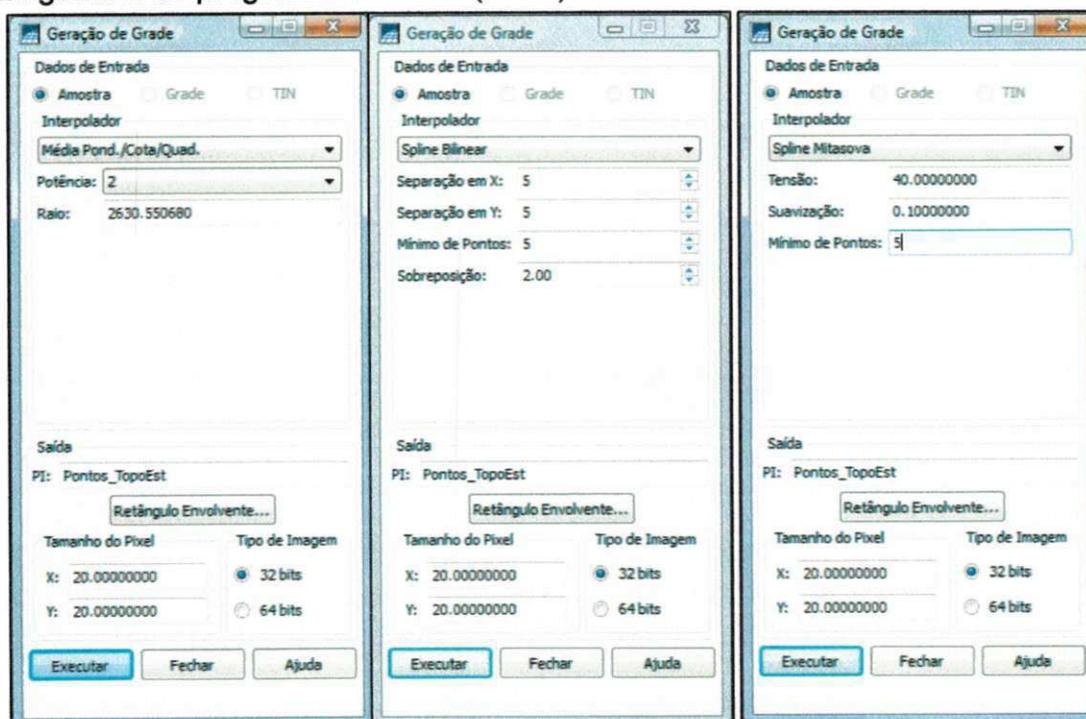


Figura 37 - Interpolações Grade Retangular SPRING

O tempo de processamento demandado para os interpoladores *Splines* foi relativamente maior que o anterior (média). A busca por amostras nestes interpoladores dá-se através de um filtro (uma matriz $m \times n$) que percorre toda a área de estudo. Para o caso estudado utiliza-se uma matriz 5×5 . A sobreposição indicada na Figura 37 é um incremento a grade onde permite-se uma busca além dos limites da grade caso o algoritmo *Spline* ache necessário.

Ao utilizar o interpolador *Spline Mitasova* procurou-se utilizar uma tensão pequena já que tensões maiores são para áreas nas quais, há uma mudança brusca de declividade (o que não é o caso). A suavização baixa ajudou a diluir ruídos. Este é um parâmetro que auxilia a manter o modelo próximo dos valores de amostra fornecidos. Ressalta-se que a suavização apenas um componente de auxílio e um bom resultado dependerá de muitos outros fatores não apenas da suavização.

A partir da efetuação dos procedimentos citados anteriormente foi possível obter MDE onde os mesmos em sua maior parte possuem o seguinte aspecto (Figura 38).



Figura 38 - Exemplo de MDE por Grade Retangular

4.2.2.2 Interpolações por Grades Triangulares

As grades triangulares foram geradas pelos seguintes interpoladores: *Delaunay*, *Com Isolinhas* e *Menor Ângulo*. Usualmente no processamento e geração de grades irregulares triangulares (TIN), pode-se utilizar “linhas de quebra” para auxiliar na definição do relevo de uma região. Neste trabalho as linhas de quebra utilizadas foram os cursos de água da rede de drenagem de referência IBESA (2004). A linha de quebra pode propiciar a geração de um modelo mais realista já que o interpolador é forçado a entender que as áreas próximas as linhas de quebra são de altitude mais baixa, portanto, consegue evitar alguns erros (Figura 39).

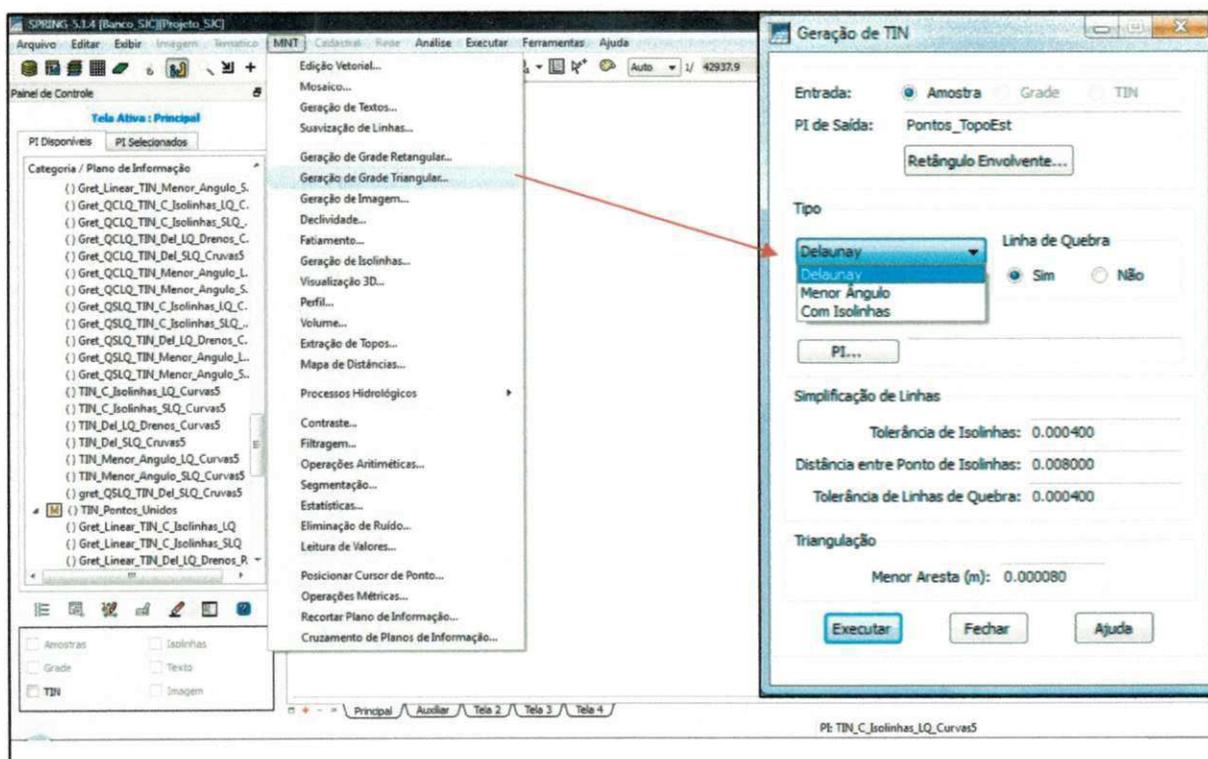


Figura 39 - Geração de Grades Triangulares

É possível observar que a drenagem de referência utilizada como linha de quebra auxiliou a definir melhor a bacia com uma rede de triângulos mais densa (Figura 40).

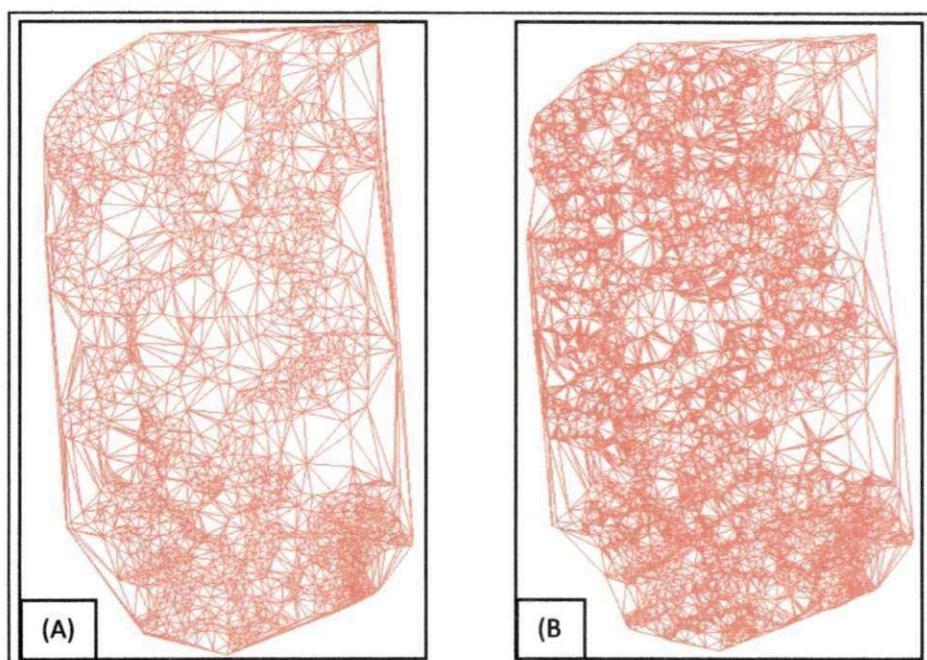


Figura 40 - (A) TIN Delaunay sem Linhas de Quebra; (B) TIN Delaunay com Linhas de Quebra, Pontos de Levantamento Automatizado

Para a obtenção de MNT em formato matricial é necessário transformar todas as grades irregulares geradas em grades retangulares. Neste processo de conversão o SIG utilizado disponibiliza algumas opções diferentes de conversão conforme pode ser observado na Figura 41.

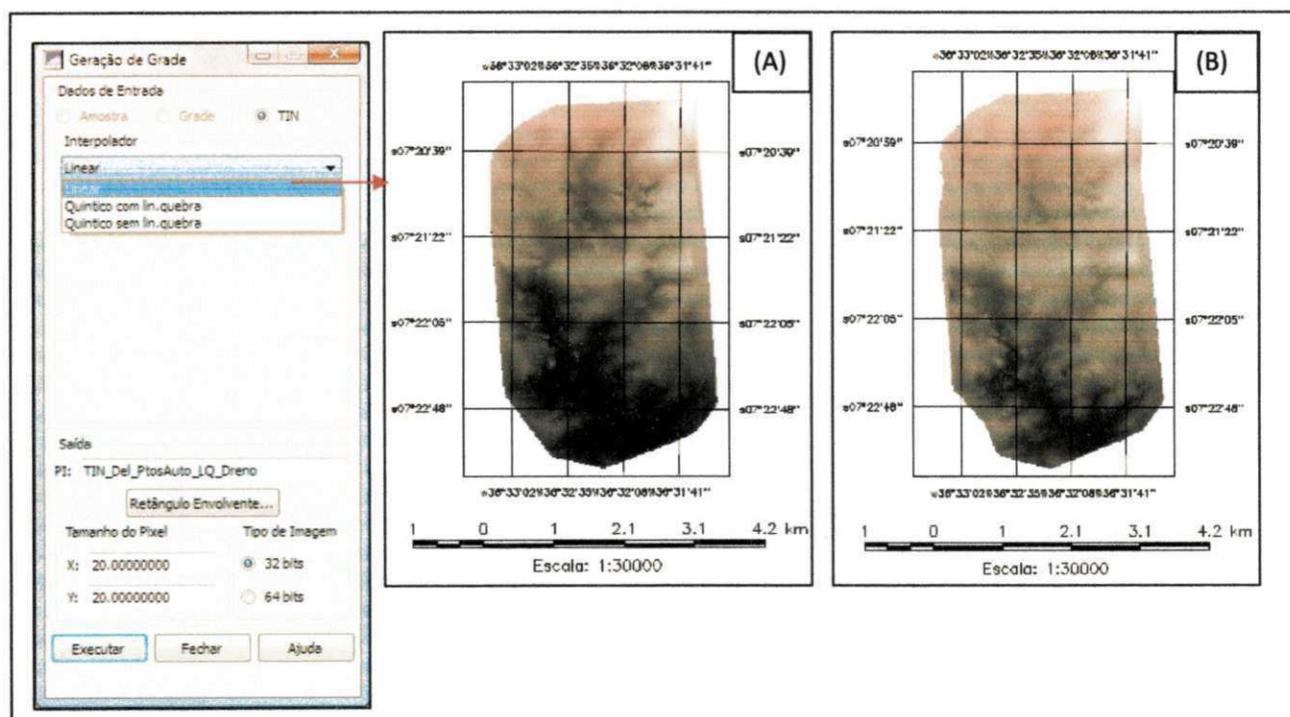


Figura 41 - (A) TIN Delaunay sem Linhas de Quebra; (B) TIN Delaunay com Linhas de Quebra, Pontos de Levantamento Automatizado

Neste trabalho são testadas as seis variações de grades TIN, utilizando os três interpoladores citados acima. Assim, são obtidos dezoito produtos para cada dado

de entrada para a interpolação, ou seja, os dois levantamentos em formato de curvas de nível e os dois levantamentos em formato pontual. O Quadro 1 apresenta os diferentes MNT gerados.

Quadro 1 - Produtos de grades retangulares a partir de uma TIN

Linear TIN Com Isolinhhas e Linha de Quebra
Linear TIN Com Isolinhhas e Sem Linha de Quebra
Linear TIN Delaunay e Linha de Quebra
Linear TIN Delaunay e Sem Linha de Quebra
Linear TIN Menor Ângulo e Linha de Quebra
Linear TIN Menor Ângulo e Sem Linha de Quebra
Quintico Com Linha de Quebra TIN Com Isolinhhas e Linha de Quebra
Quintico Com Linha de Quebra TIN Com Isolinhhas e Sem Linha de Quebra
Quintico Com Linha de Quebra TIN Delaunay e Linha de Quebra
Quintico Com Linha de Quebra TIN Delaunay e Sem Linha de Quebra
Quintico com Linha de Quebra TIN Menor Ângulo e Linha de Quebra
Quintico com Linha de Quebra TIN Menor Ângulo e Sem Linha de Quebra
Quintico Sem Linha de Quebra TIN Co Isolinhhas e Linha de Quebra
Quintico Sem Linha de Quebra TIN Com Isolinhhas e Sem Linha de Quebra
Quintico Sem Linha de Quebra TIN Delaunay e Linha de Quebra
Quintico Sem Linha de Quebra TIN Delaunay e Sem Linha de Quebra
Quintico Sem Linha de Quebra TIN Menor Ângulo e Linha de Quebra
Quintico Sem Linha de Quebra TIN Menor Ângulo e Sem Linha de Quebra

4.2.2.3 Interpolações por Inverso do Quadrado da Distância (IQD)

As interpolações por IQD foram geradas no programa ArcGis (ESRI) através da extensão *Spatial Analyst*. Duas opções são possíveis: IQD variável e IQD fixo. As diferenças entre os dois está na variação da distancia, uma distancia máxima e o números de pontos amostrais a ser considerado. Para o IQD fixo apenas deve ser informado o número de pontos (Figura 42).

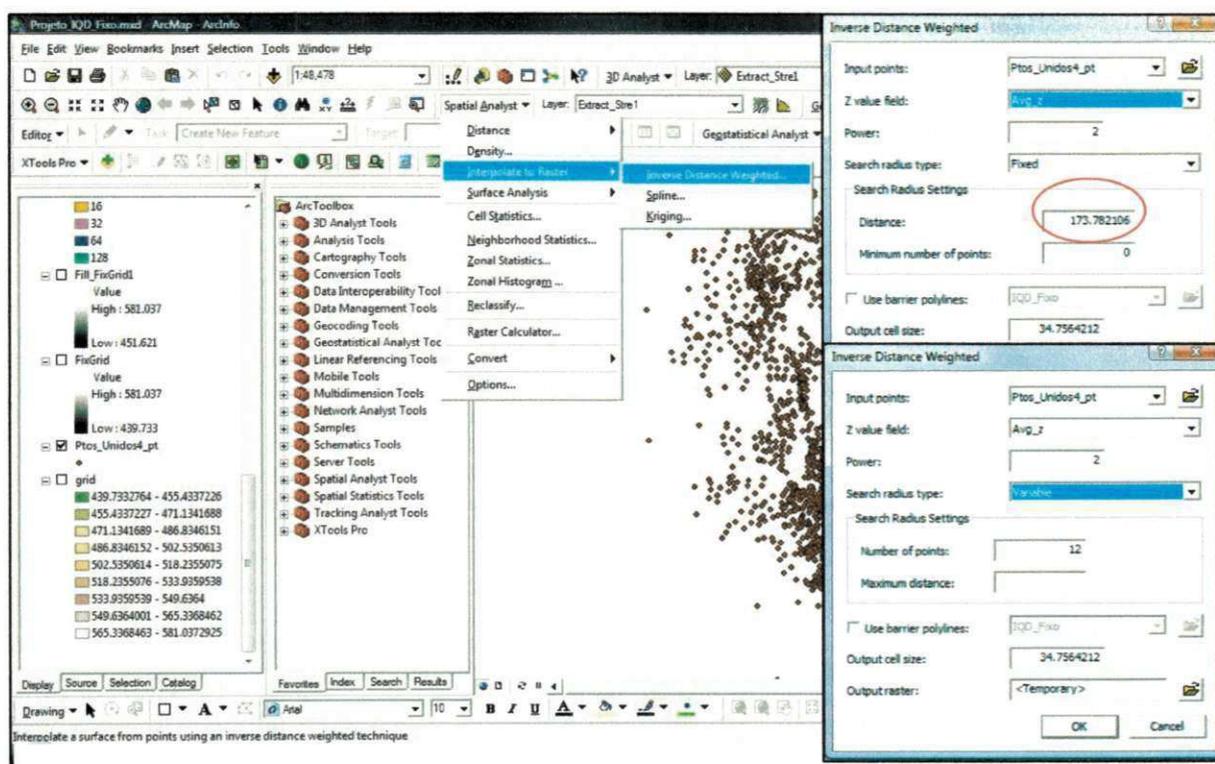


Figura 42 - Inverso do Quadrado da Distância

4.2.2.4 Interpolações por Krigagem

Neste trabalho, as interpolações pelo método estatístico de *krigagem* também são geradas no programa ArcGis para os dois levantamentos (convencional e automatizado). São utilizadas as duas opções disponíveis: *krigagem* ordinal e universal. Na *krigagem* ordinal é utilizado o modelo de semivariograma esférico. No método de *krigagem* universal é utilizado o modelo de semivariograma linear.

A Figura 43 apresenta nas interpolações com os pontos de levantamento automatizado uma perda de informação em algumas porções da bacia. Ou seja, o algoritmo não consegue estimar (interpolar) para toda área com os pontos amostrais de entrada, mesmo alterando a resolução de saída ou outros parâmetros como raio de busca, numero de pontos etc.

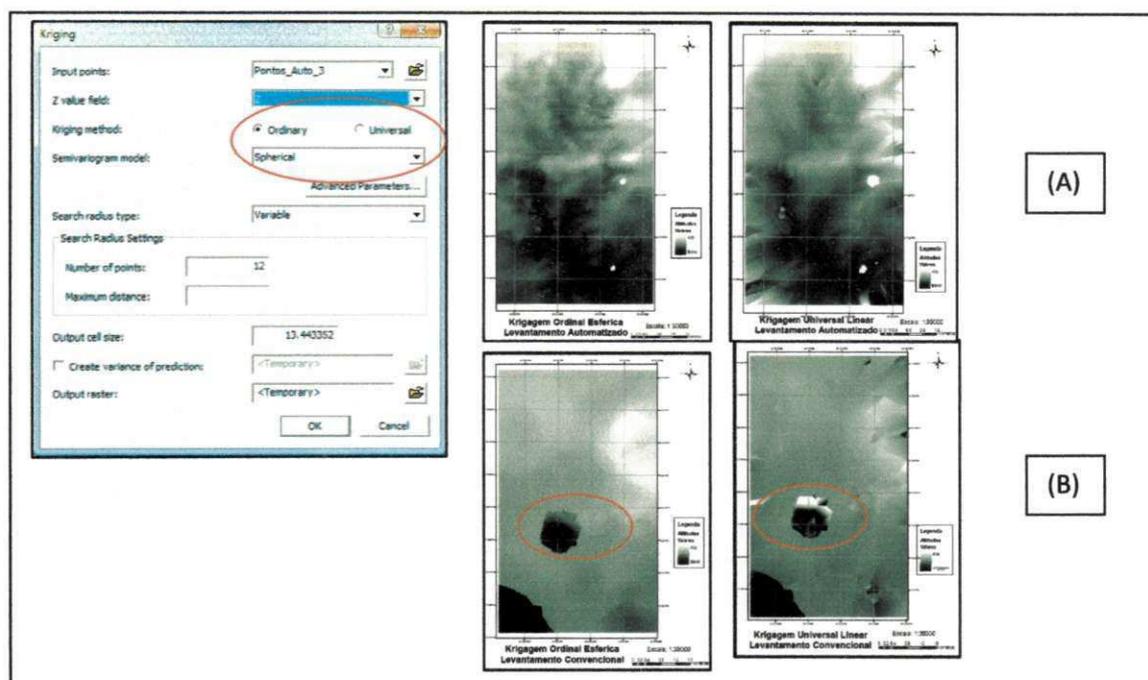


Figura 43 - A) Krigagem Ordinal Esférica e Universal Linear Pontos Automatizado B) Krigagem Ordinal Esférica e Universal Linear Pontos Convencional

Em um dos testes de *krigagem*, diminui-se o valor interpolado para dois que é o mínimo necessário para efetuar o processo de interpolação. Geralmente são usados no mínimo, cinco pontos, o que gera um grau de confiança necessário, ao processamento, entretanto, para auxiliar na identificação dos problemas de distribuição espacial das amostras, pode-se utilizar apenas dois pontos para serem interpolados por *krigagem* (Figura 44).

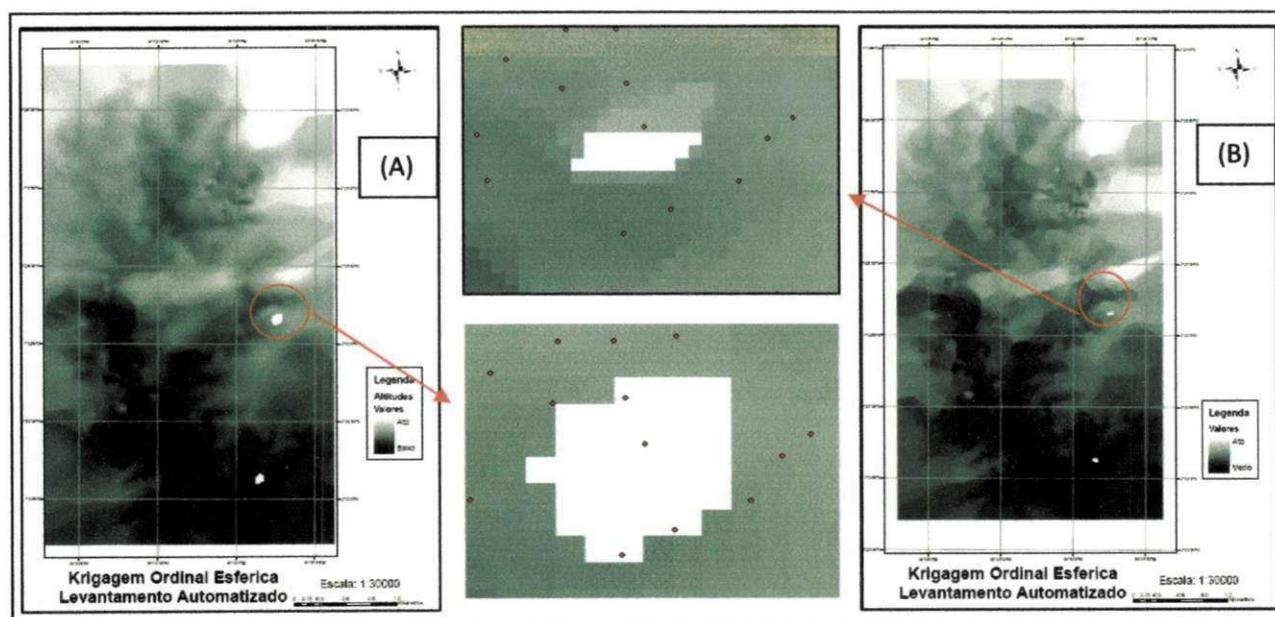


Figura 44 - A) Krigagem utilizando cinco pontos de busca B) Krigagem utilizando dois pontos de busca.

Considerando um pixel de 10 metros ao qual foi interpolado estes produtos de *krigagem*, pode-se afirmar que há ausência de pontos em uma área de aproximadamente 5 km² na porção nordeste da bacia e em uma outra porção mais ao sul ocorre ausência. De posse destas informações pode-se procurar alternativas para a ausência de amostras.

Partindo da premissa que estes pontos devem ser preenchidos, deve-se encontrar possibilidades de obtenção de amostras nas áreas em que a *krigagem* não consegue estimar valores. Para tanto, propõe-se neste trabalho a extração de pontos de outras fontes de dados para adicioná-los aos levantamentos utilizados. Estes dados de entrada poderão configurar, por exemplo, uma informação híbrida com dados de campo e orbitais mixados ou mesmo dados de uma cartografia básica de referência adicionados ao levantamento de campo efetuado. Artíficos como este são usualmente considerado, pois nem sempre é possível voltar ao campo para complementações do levantamento.

4.2.2.5 *Extração de Pontos de Imagens Orbitais*

Como apresentado no início do capítulo, além dos levantamentos de campo, este trabalho utiliza imagens sensoriamento remoto orbital. As imagens orbitais foram divididas em três grupos: (i) SRTM com resolução de 90 metros, (ii) SRTM (Projeto TOPODATA) com 30 metros e (iii) ASTER/TERRA com resolução de 30 metros.

Considerando que a imagem de 90 metros SRTM tem uma resolução muito baixa para a área de estudo, para a obtenção de pontos amostrais adicionais deve se dar preferência ao produto derivado que é a imagem SRTM de 30 metros do projeto TOPODATA (INPE). Este conjunto de dados apresenta uma possibilidade de resultado mais satisfatório já que a mesma já se caracteriza como uma imagem tratada da qual foram minimizado os ruídos e falhas advindas da SRTM de 90 metros.

Por outro lado a imagem do sensor ASTER/TERRA gerada por estereoscopia é uma imagem mais recente que ainda está sendo testada em algumas pesquisas e que, na área de estudo apresenta bastante ruído que pode atrapalhar na geração de um MNT. Além disso, para a extração de pontos em áreas específicas da imagem, um dado importante é o conhecimento do comportamento estatístico para prover inserções que cubram falhas como as apresentadas na *Krigagem*. Estas estatísticas

foram geradas a partir do SPRING da seguinte forma:

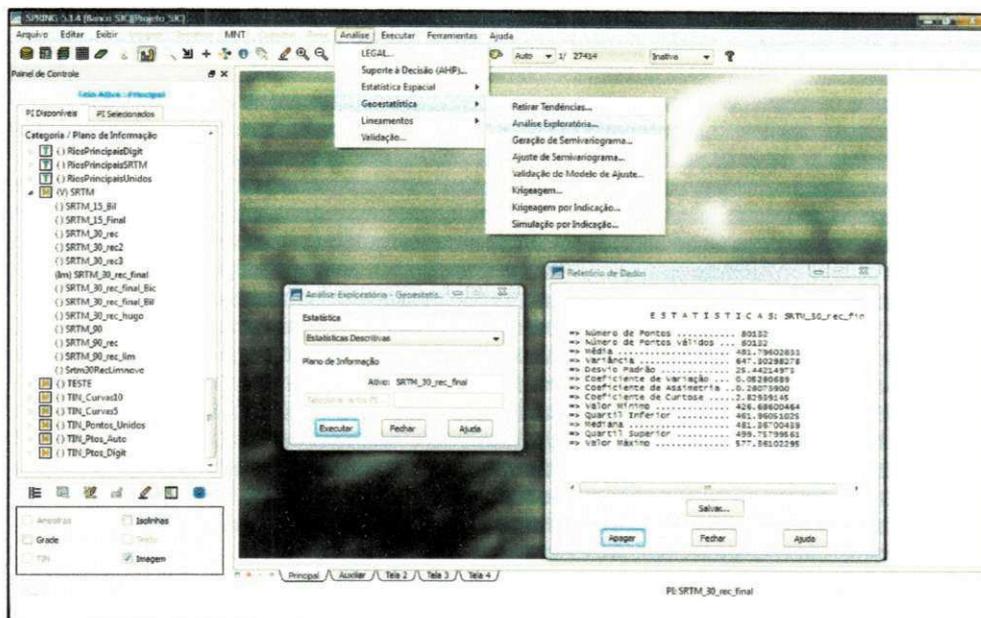


Figura 45 - Análise Exploratória SPRING

A análise exploratória do SPRING dá suporte na extração de parâmetros estatísticos. Esta análise demonstra que a imagem de SRTM 30 metros de resolução é a mais adequada para a extração de pontos adicionais ao levantamento de campo (Tabela 2).

O procedimento relativamente simples consiste em transferir o DN (*digital number*) do pixel escolhido para um ponto no centro do pixel (Figura 46). Um novo arquivo em formato vetorial (*shapefile*) é gerado contendo os pontos com seus respectivos valores de altitudes associados.

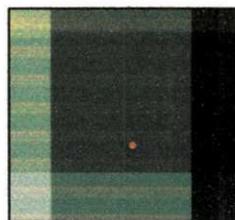


Figura 46 - Pixel com ponto do levantamento automatizado

A extração dos pontos foi processada no ArcGIS (ESRI) através da extensão *Spatial Analyst* e da opção *Extraction Values to Points* (Extração de Valores Pontuais). Ao final do processamento são obtidos arquivos *shapefiles* com a mesma quantidade de pontos e a mesma georreferencia, mas com valores de altitude contido na SRTM de 30 metros (Figura 47).

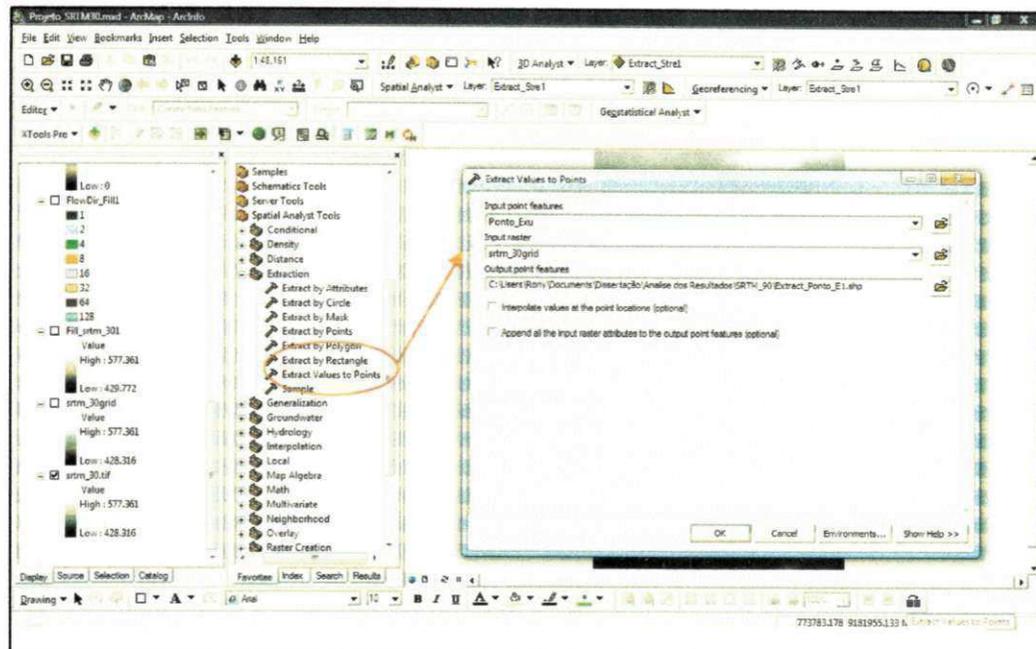


Figura 47 – Tela do Programa ArcGIS que Apresenta a Tela de Extração de Pontos

Tabela 2 - Comparações Estatísticas entre as Imagens Orbitais (Km²)

Estatísticas das Cotas	Levantamento Automatizado (Amostras)	SRTM 90 metros	SRTM 30 metros	ASTER 30 metros
<i>Número de Pontos</i>	3553	3553	3553	3553
<i>Número de Pontos Validos</i>	3553	3553	3553	3553
<i>Média</i>	478.548	475.276	473.672	474
<i>Variância</i>	496.835	578.143	563.225	434.535
<i>Desvio Padrão</i>	22.289	24.044	23.732	20.845
<i>Coefficiente de Variação</i>	0.046	0.050	0.050	0.043
<i>Coefficiente de Assimetria</i>	1.218	1.177	1.109	1.354
<i>Coefficiente de Curtose</i>	4.772	4.126	3.899	5.310
<i>Valor Mínimo</i>	447.529	437.000	435.518	441
<i>Quartil Inferior</i>	461.980	458.000	456.502	459
<i>Mediana</i>	471.980	467.000	465.901	467
<i>Quartil Superior</i>	492.149	490.000	487.842	487
<i>Valor Maximo</i>	578.609	566.000	566.547	569

Apesar da pequena diferença ela é significativa, o desvio padrão é o que mais se aproxima do levantamento automatizado e o coeficiente de variação está entre os padrões aceitáveis, mostrando o caminho para utilizar esta imagem. A imagem ASTER/TERRA se mostra discrepante no desvio padrão e na assimetria, destoando do levantamento automatizado. Com todas estas informações é possível definir a SRTM de 30 metros como mais adequada.

A partir da extração de pontos apresentada anteriormente pode-se obter pontos que completem as amostras e resultem em interpolações mais eficientes. Além disso, pode-se utilizar a mesma metodologia para obter pontos do entorno da bacia, extrapolando os levantamentos topográficos existentes (usualmente os levantamentos topográficos de uma área só apresentam informações do interior da área).

Analisando os MNT gerados percebe-se uma incoerência em alguns pontos limitrofes da bacia baseados no conhecimento de campo existente. Assim considera-se que em qualquer aplicação de MNT que envolva bacias hidrográficas, deve-se adquirir amostras no entorno da área de estudo nas interpolações para que os algoritmos tenham condições de estabelecer uma delimitação automática eficiente e é claro, obter-se uma representação que se aproxime mais da realidade. A Figura 49 apresenta as amostras adicionadas nas áreas em que a krigagem não foi capaz de realizar estimativas. O preenchimento foi efetuado distribuindo os pontos de forma abrangente satisfatoriamente a área.

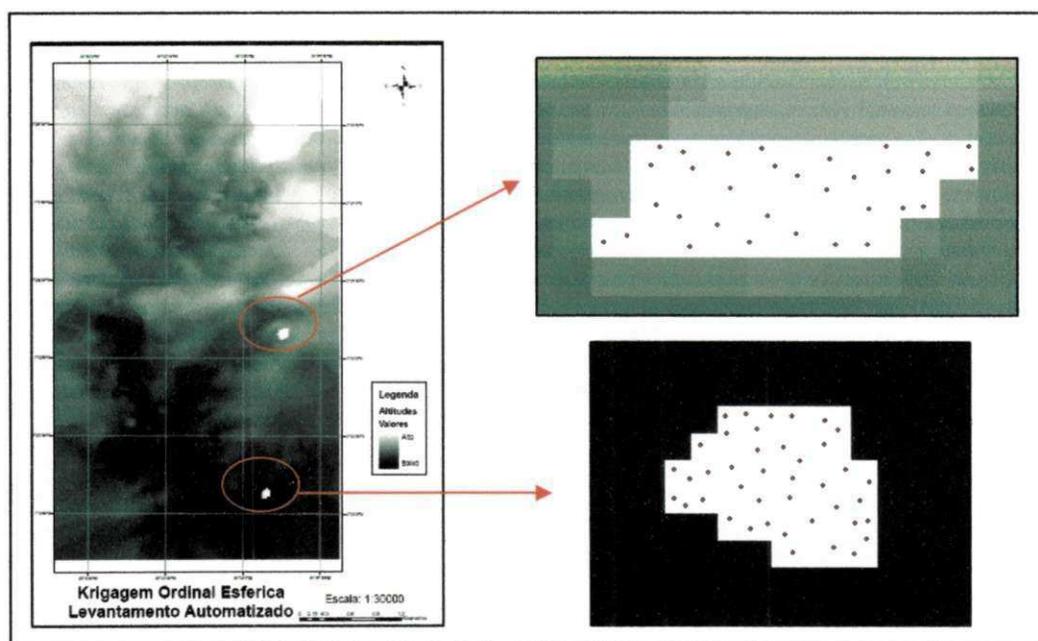


Figura 48 - Distribuição dos Pontos nas duas áreas a serem preenchidas

Os dois levantamentos topográficos existentes tem sido usados por diferentes pesquisadores e há alguns locais próximo ao entorno da bacia que apresentam grandes divergências nestes dois mapeamentos. Sendo assim, a extração de pontos a partir das imagens deve contemplar principalmente estes locais de divergência para que os resultados interpolados possam trazer contribuições significativas. A Figura 49 apresenta o levantamento topográfico convencional (mais antigo) com as indicações destes locais fotografados em campo.

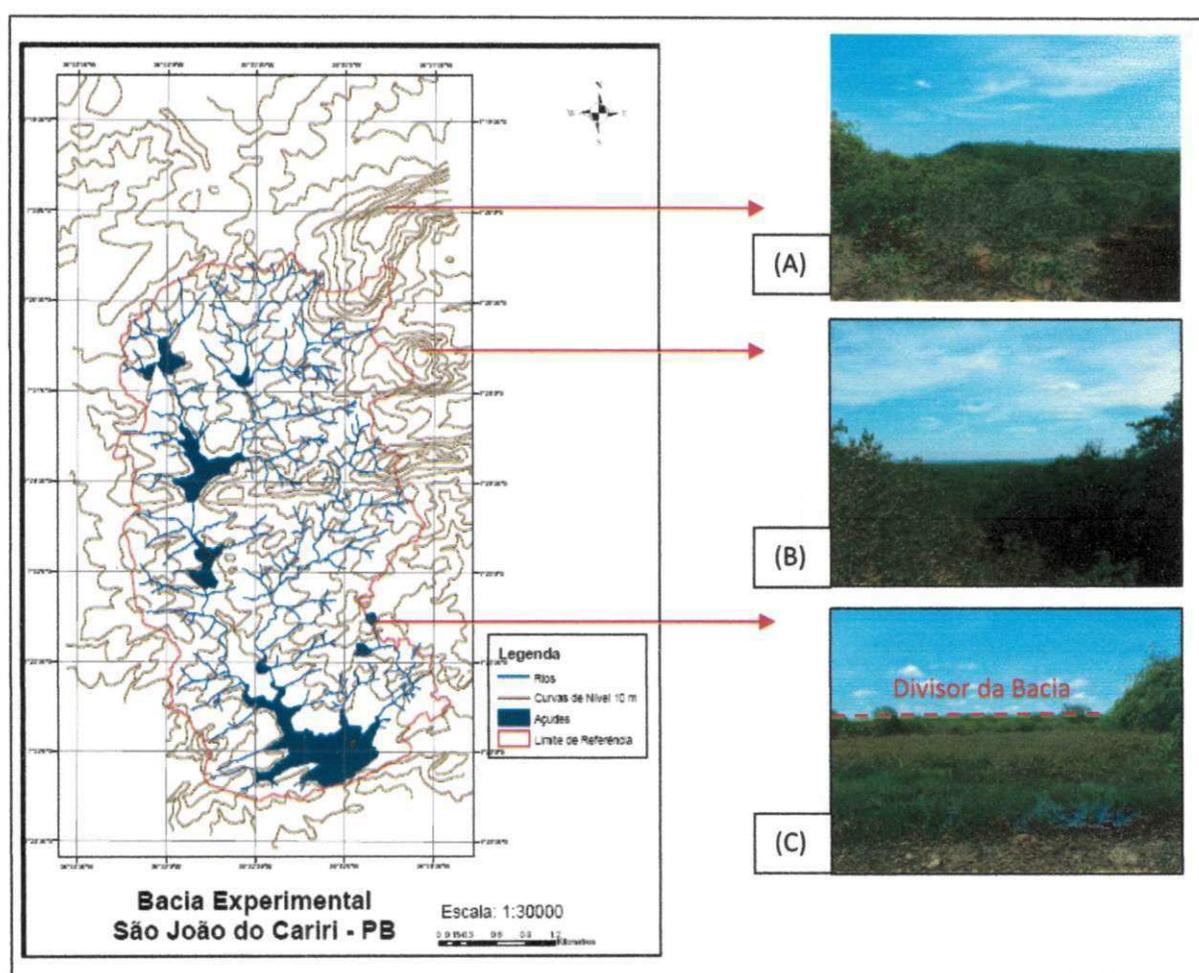


Figura 49 - Análise de Divergências

De acordo com a exploração de campo datada de 26/11/2010, foi possível identificar algumas divergências no que concerne a alguns aspectos. A Foto (A) apresenta o ponto mais alto de uma cadeia de serras que fica atrás da área da bacia, onde identificou-se uma mata muito fechada com dificuldades de acesso para o levantamento topográfico, o mesmo ocorre na Foto (B), onde o acesso é mais difícil devido à falta de estradas para o local e impossibilita a armação do equipamento. A Foto (B) é uma divergência que foi esclarecida no projeto IBESA (2004), onde estas duas lagoas contribuintes do Açude Namorados não tinha sido

identificadas como provável divisor, mas com o estudo de campo é possível notar a linha que norteia a divisão da bacia. Com o preenchimento das falhas identificadas na Krigagem com a união dos pontos cotados dos dois levantamentos a união dos pontos do entorno na bacia (SRTM 30 metros) e os pontos da SUDENE, foi possível gerar um dado híbrido (Figura 50).

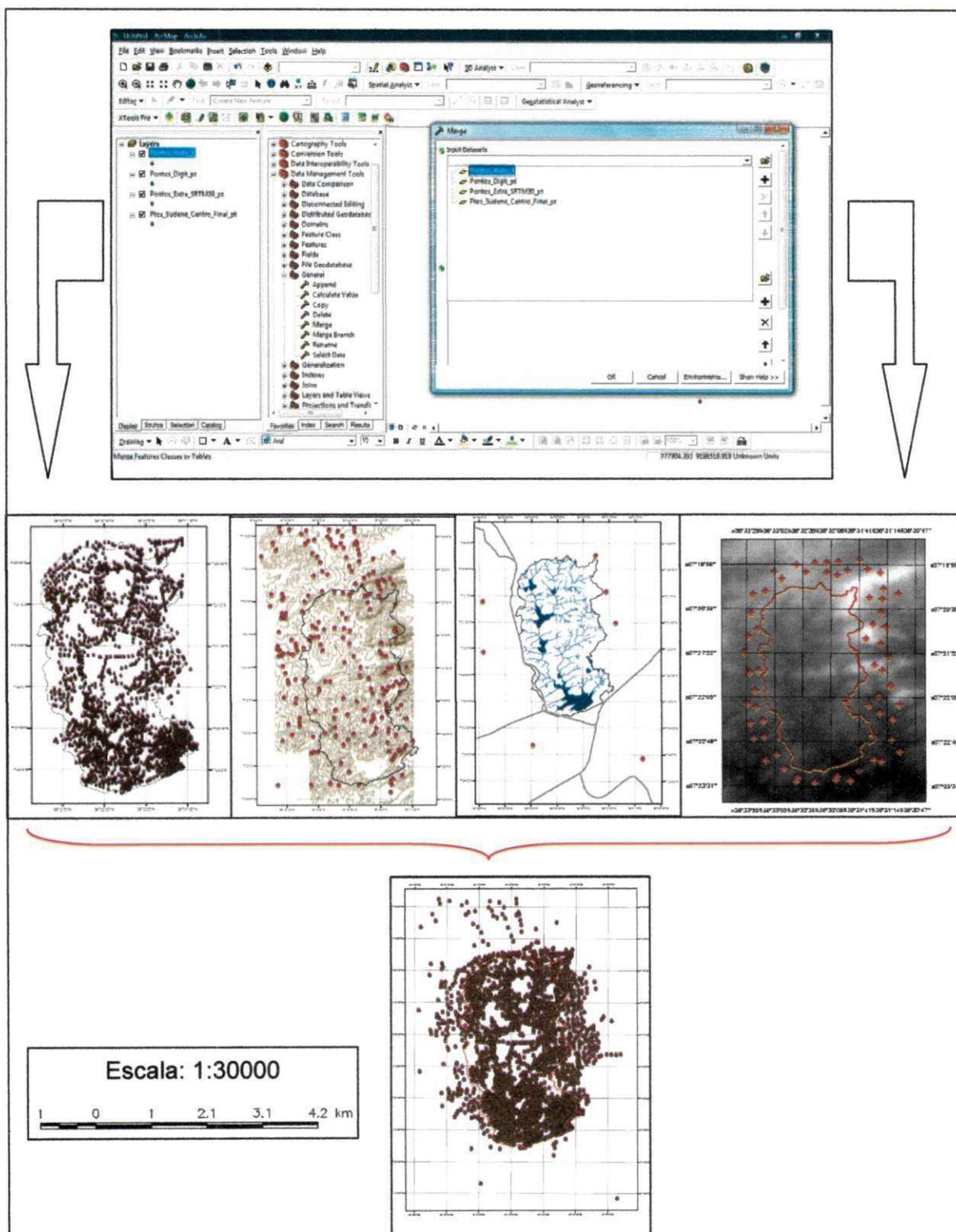


Figura 50 - Dado Híbrido

Completada a edição os dados podem ser utilizados para um novo procedimento de interpolação (por diferentes métodos). Os produtos gerados são considerado os MNT que devem ser comparados para apoiar a decisão.

4.2.3 Parâmetros Hidrológicos

Para todos os MNT gerados deve ser derivados automaticamente informações hidrológicas. Para tanto, o programa ArcGis (ESRI) disponibiliza uma extensão chamada *Hydrology* que permite dentre outras coisas gerar mapas de direção de fluxo, fluxo acumulado, drenagem e limite.

▪ Direção de Fluxo e Fluxo Acumulado

A Figura 51 apresenta os procedimentos para geração de mapa de direção de fluxo e de fluxo acumulado no ArcGis/*Hydrology*. Ressalta-se que anteriormente a este procedimento todos os MNT testados devem passar por um preenchimento do sinks (valores muito baixos ou muito altos que se distanciam de seus pixels vizinhos). Os pixels apresentados na tonalidade mais clara no mapa de fluxo acumulado representam os pixel que acumulariam mais água (na existência de água) estimados a partir da direção que o fluxo seguiria.

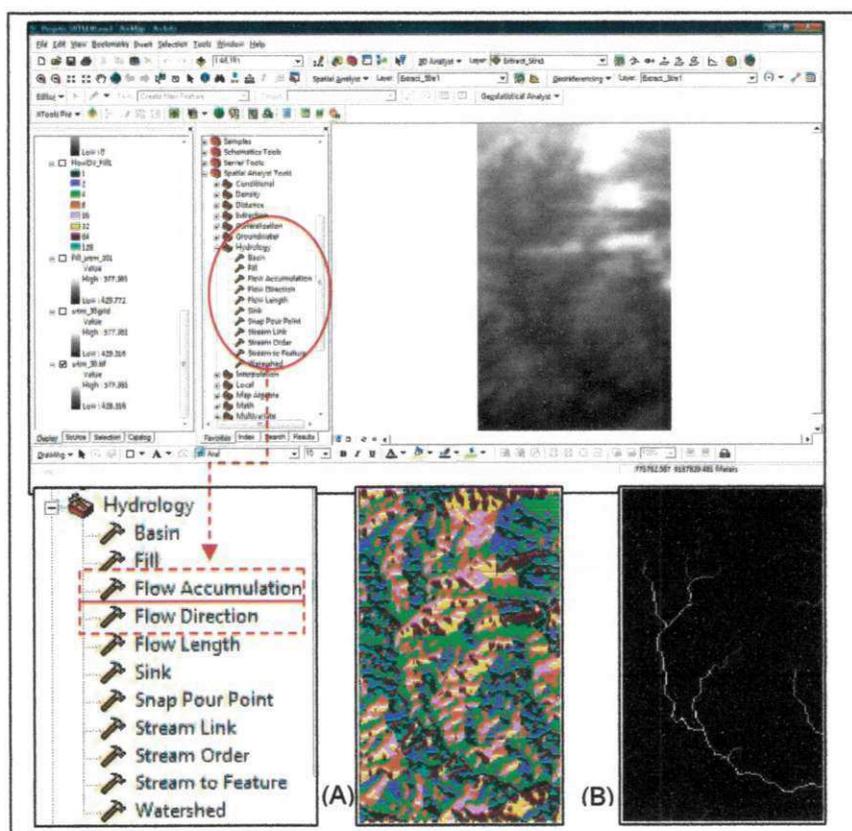


Figura 51 - Geração e Aspectos Direção de Fluxo (A) e Fluxo Acumulado (B).

- *Geração de Rede de Drenagem*

Determinados os pixel com maior acúmulo de água, é necessário estabelecer qual a contribuição dos pixel próximos para este acúmulo. Quanto maior o número de pixel considerados, maior o tamanho da área de contribuição. No AcrGIS este procedimento é realizado através de uma condição imposta ao modelo na qual se estabelece a quantidade de pixel a partir da qual deve ser considerada a contribuição (Figura 52).

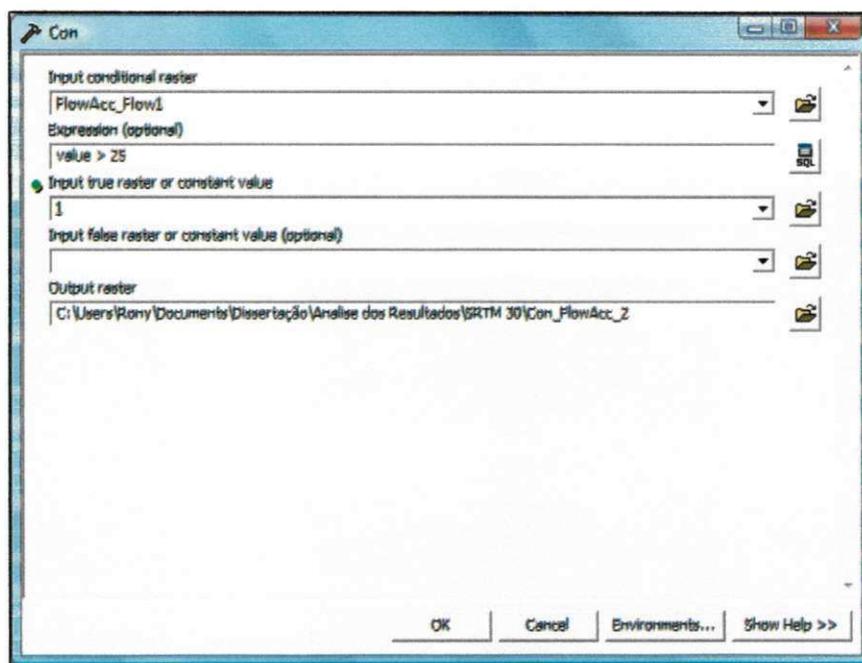


Figura 52 – Tela do SIG Apresentando a Condição para a Geração da Rede Drenagem

Após a geração da rede de drenagem em formato raster (matricial) está pode ser facilmente convertida para o formato vetorial caso se torne necessário (Figura 53).

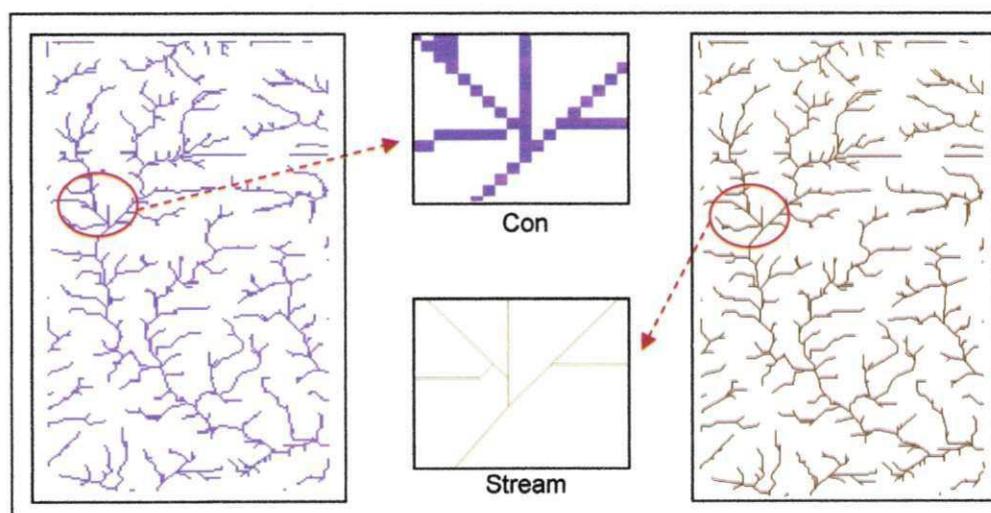


Figura 53 - Aspecto de Drenagem

- *Delimitação Automática*

Por se tratar de uma bacia conhecida, cujo exutório é conhecido, pode-se realizar a delimitação automática a partir deste conforme o apresentado na Figura 54.

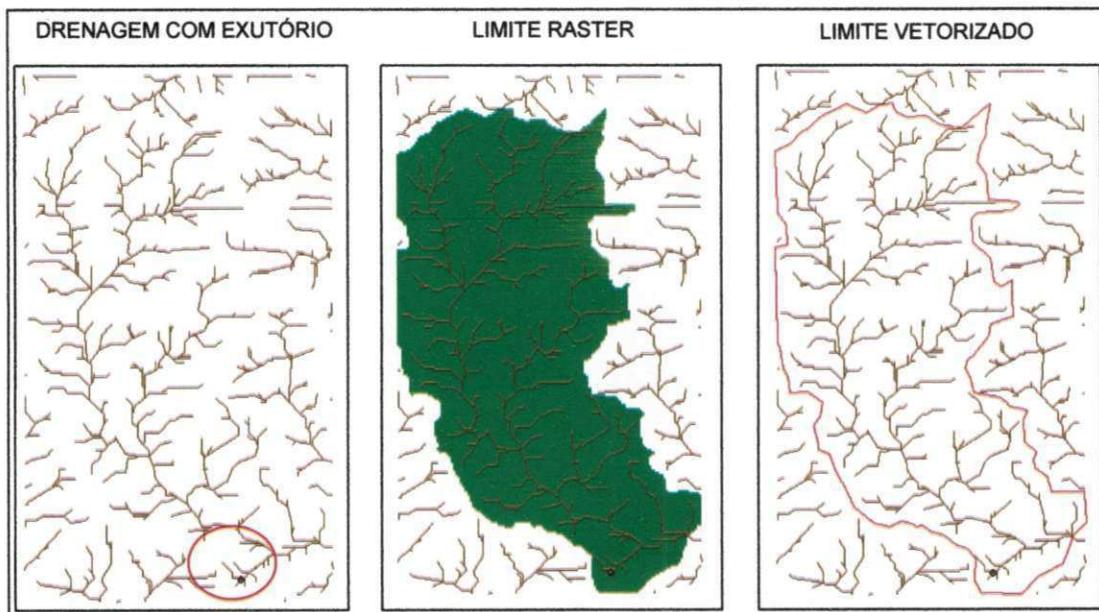


Figura 54 - Procedimento para a Geração da Rede de Drenagem.

4.2.4 Aspectos de Relevo

- *Declividade*

A partir de um modelo de elevação pode-se derivar imediatamente os valores de declividade de cada pixel. Neste trabalho o mapa de declividades gerado no programa SPRING é classificado de acordo com CHAVES *et al* (2002) em cinco classe variando de 3 a 40% (Figuras 55 a 57) . Na região semiárida paraibana dificilmente encontram-se valores superiores de declividade.



Figura 55 – Tela do programa SPRING da Geração de Declividade

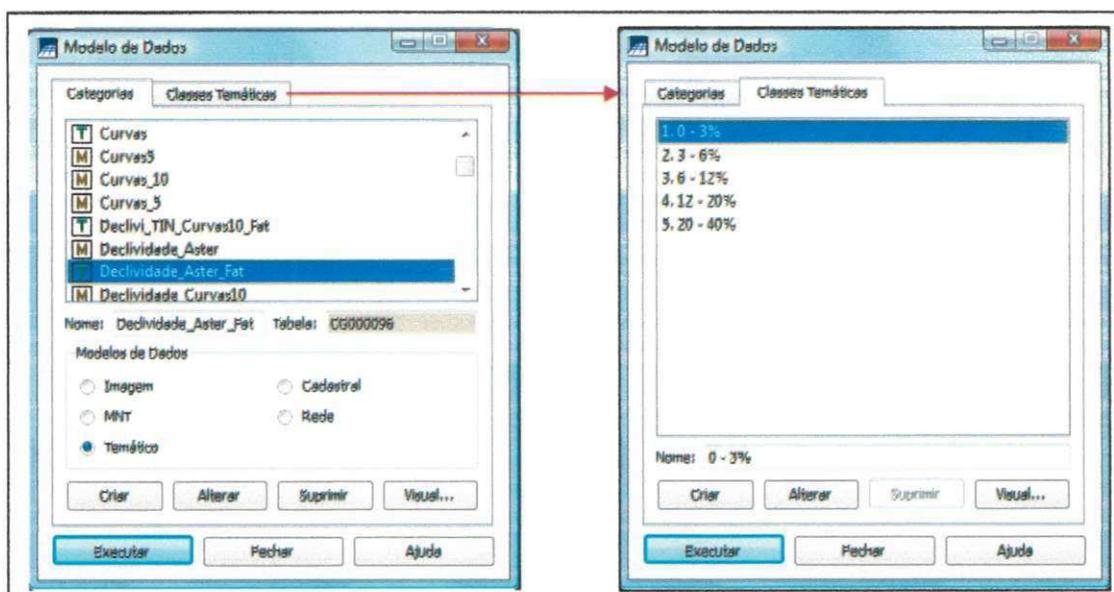


Figura 56 – Telas do Programa SPRING da Criação das Classes de Declive.

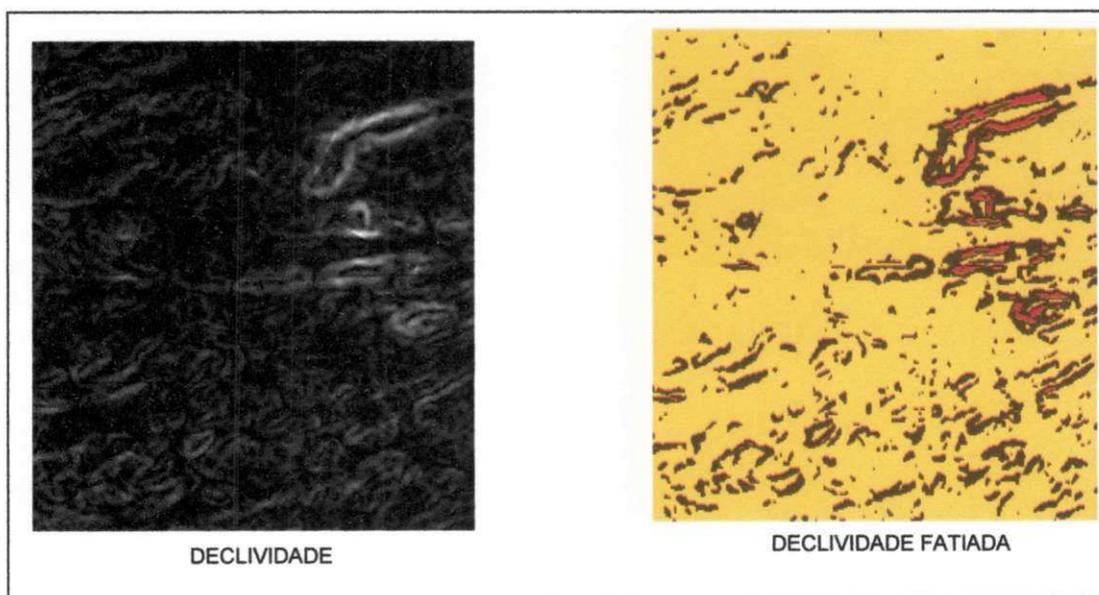


Figura 57 – Etapa do Processo de Geração de Declividade

- **Relevo**

Para o relevo são consideradas sete classes para estabelecer uma comparação de acordo com CHAVES *et al* (2002). As classes de relevo variam de baixo, baixo-moderado, moderado, moderado-alto, alto, alto-muito alto e muito alto.

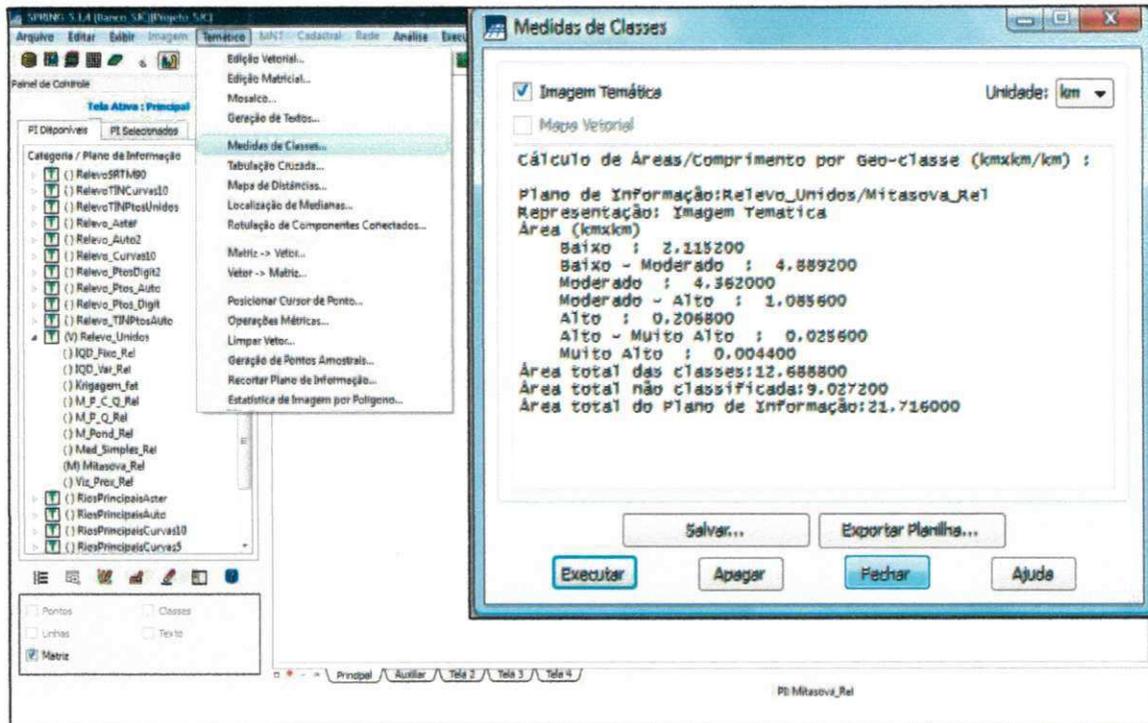


Figura 58 – Tela do SPRING Apresentando o Procedimento de Quantificação das Classes

▪ *Curvas de Nível*

São geradas curvas de todos os produtos interpolados sendo o grau de distanciamento entre ela de 5 e 10 metros para poder estabelecer comparações com as curvas de referência (Figura 59).

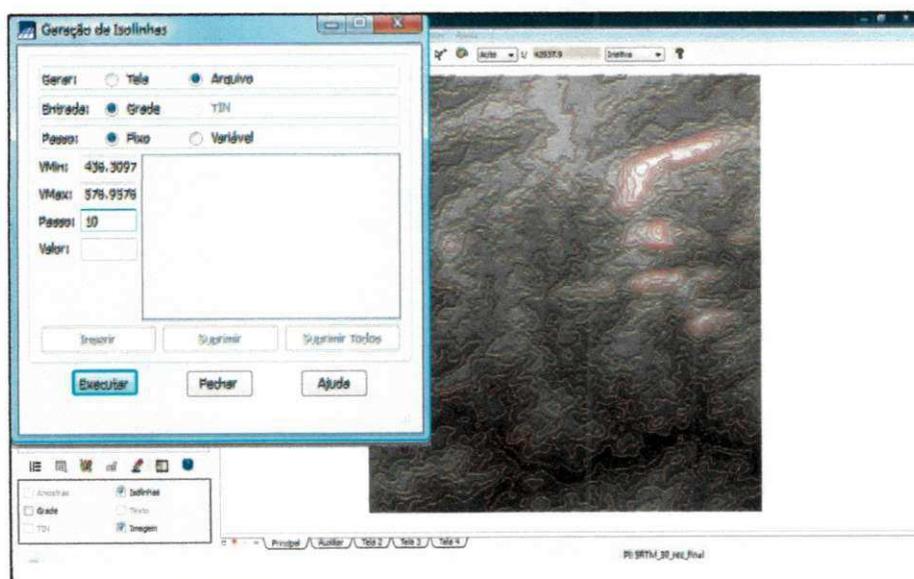


Figura 59 - Geração de Isolinhas no Software SPRING

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente serão analisados os MDE que geraram os produtos primários. Os MDE serão divididos de acordo com os cinco dados utilizados para a geração dos mesmos: (i) curvas de nível de 10 metros do levantamento convencional, (ii) curvas de nível de 5 metros do levantamento convencional, (iii) pontos cotados levantamento convencional, (iv) pontos cotados levantamento automatizado, (v) pontos cotados híbrido. Abaixo estão destacados alguns MDE que apresentam aspectos a serem considerados os demais se encontram nos Apêndices de D a F . Na Figura 60 é possível observar que no MDE interpolado por *média simples* apresentou duas áreas que está carente de informação, enquanto que o MDE *vizinho mais próximo* identificou a maioria das áreas da bacia de acordo com o que pode ser observado em campo.

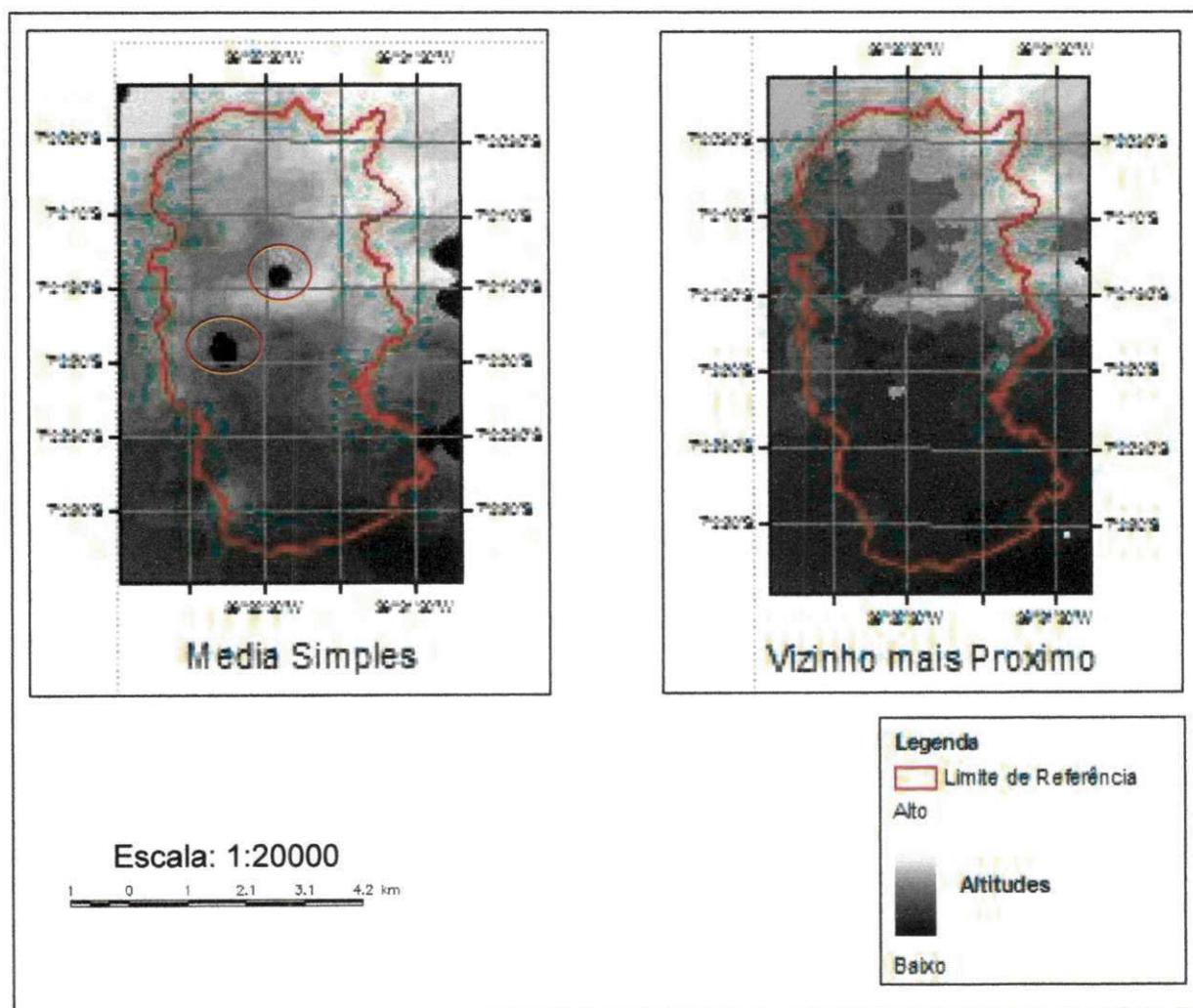


Figura 60 Exemplo de dois MDE por Grade Retangular gerado pelas Curvas de Nível de 10 metros do levantamento convencional

Observando os MDE gerados por curvas de nível de 5 metros ocorre uma falta de informação na área que compreende o açude namorados e quatro pontos destacados na Figura 61, apenas no MDE interpolado por Spline Mitasova não apresentou o ponto superior direito. Entre os MDE apresentados abaixo o que se aproximou do que foi observado em campo foi o *vizinho mais próximo*.

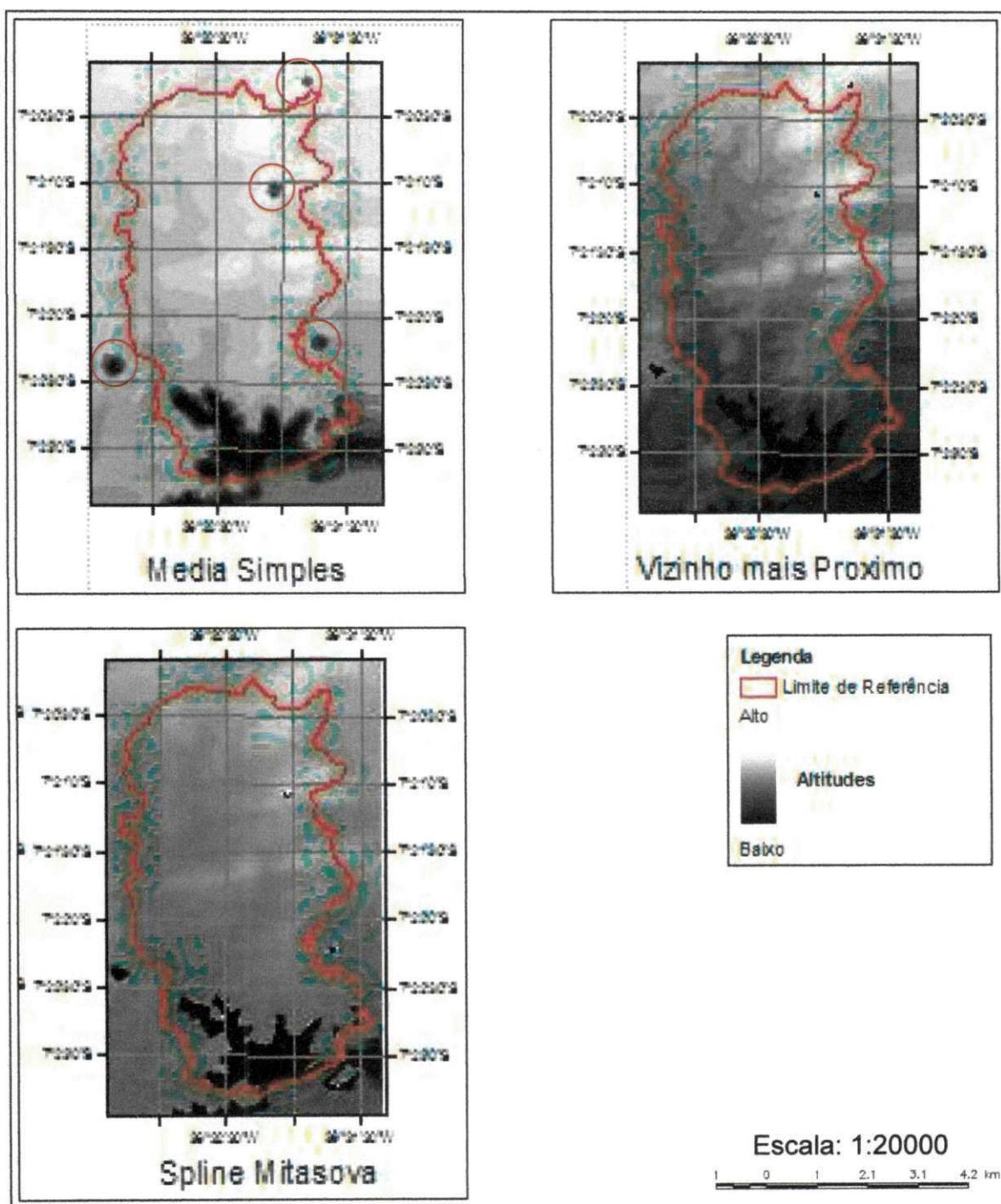


Figura 61 - Exemplo de três MDE por Grade Retangular gerado pelas Curvas de Nível de 5 metros do levantamento convencional

Os MDE gerados tiveram uma resposta não semelhante ao que foi visto em campo (Figura 62).

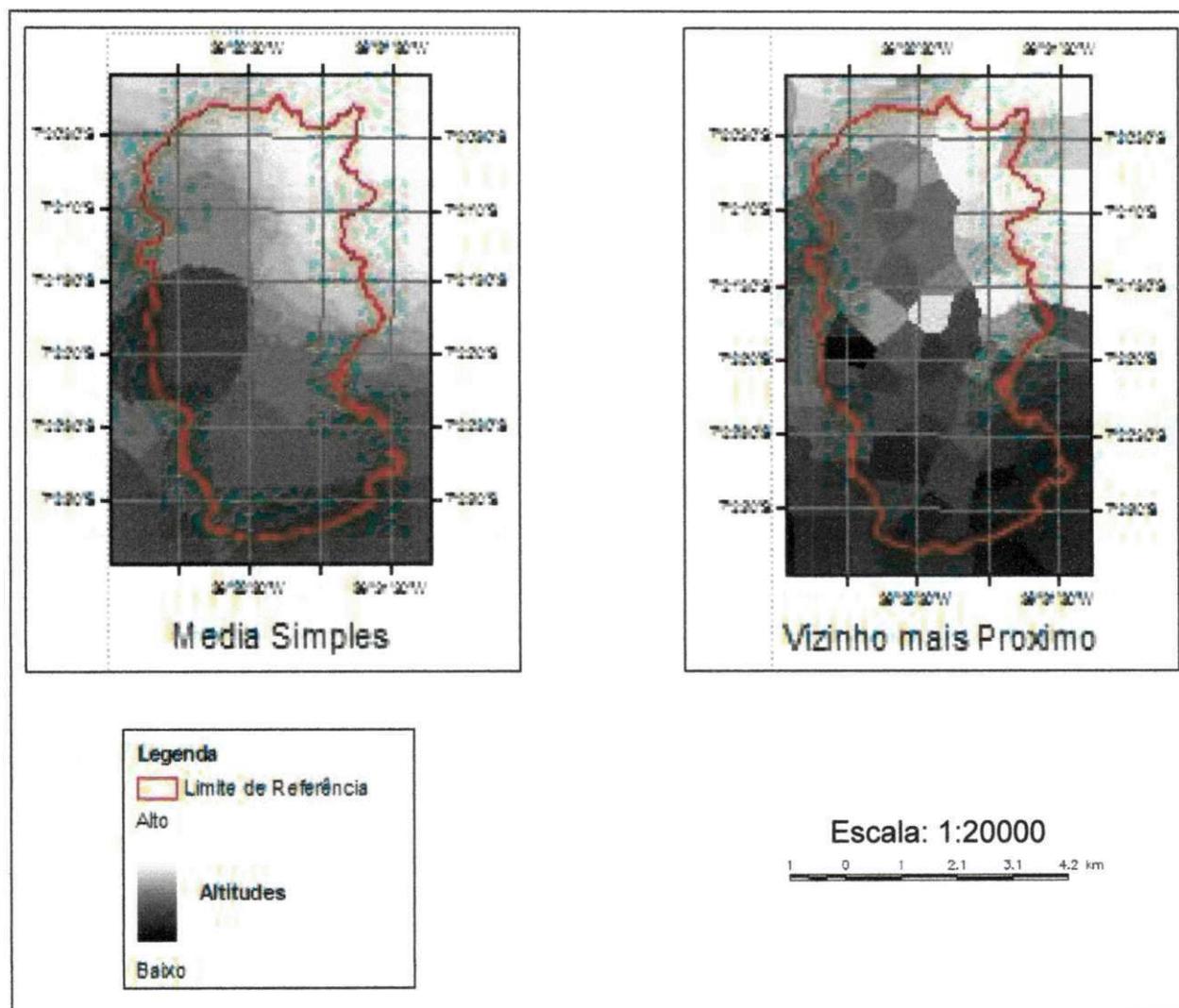


Figura 62 - Exemplo de dois MDE por Grade Retangular gerados pelos Pontos Cotados do levantamento convencional

Algo a ser destacado é que as áreas estão em blocos não havendo um detalhamento da bacia.

Na Figura 63 observa-se uma grande concentração de valores mais baixos na área destacada. Isto pode ser devido ao levantamento convencional ter uma ausência de uma quantidade mais considerável de amostras assim proporcionando um erro.

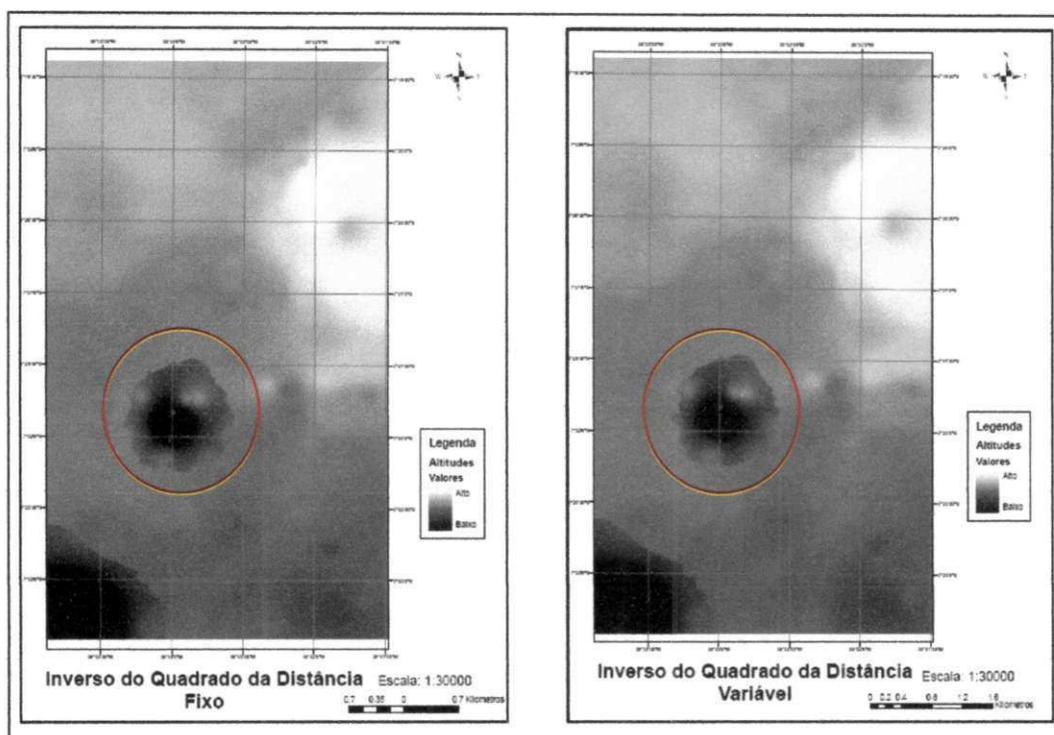


Figura 63 - Comparação entre IQD Fixo e IQD Variável dos Pontos Cotados do Levantamento Convencional

Entre todos os MDE analisados os que mais estão próximo as observações feitas em campo, estão os MDE por pontos cotados do levantamento automatizado, onde é possível ter uma distribuição das áreas de uma forma mais coerente como uma bacia hidrográfica, enfatizando as áreas mais altas na parte superior e as áreas mais baixas na parte inferior, o mesmo ocorrido com dado híbrido (Figuras 64 e 65).

Visualizando os MDE por levantamento automatizado é possível observar um destaque na delimitação do açude namorados e nos MDE interpolado por *média ponderada*, *média ponderada por quadrante*, *média ponderada cota quadrante*, *spline bilinear* e *spline mitasova* representaram a linha de serra ao centro da bacia. Outro fator a ser enfatizado é os MDE por *média simples* e *vizinho mais próximo* que apresentaram-se semelhantes em maior detalhe no *vizinho mais próximo*.

Os MDE interpolado pelos pontos cotados híbridos tem uma melhor representação no seu entorno, claro que devido aos pontos distribuídos auxiliados pela SRTM de 30 metros e os da carta SUDENE

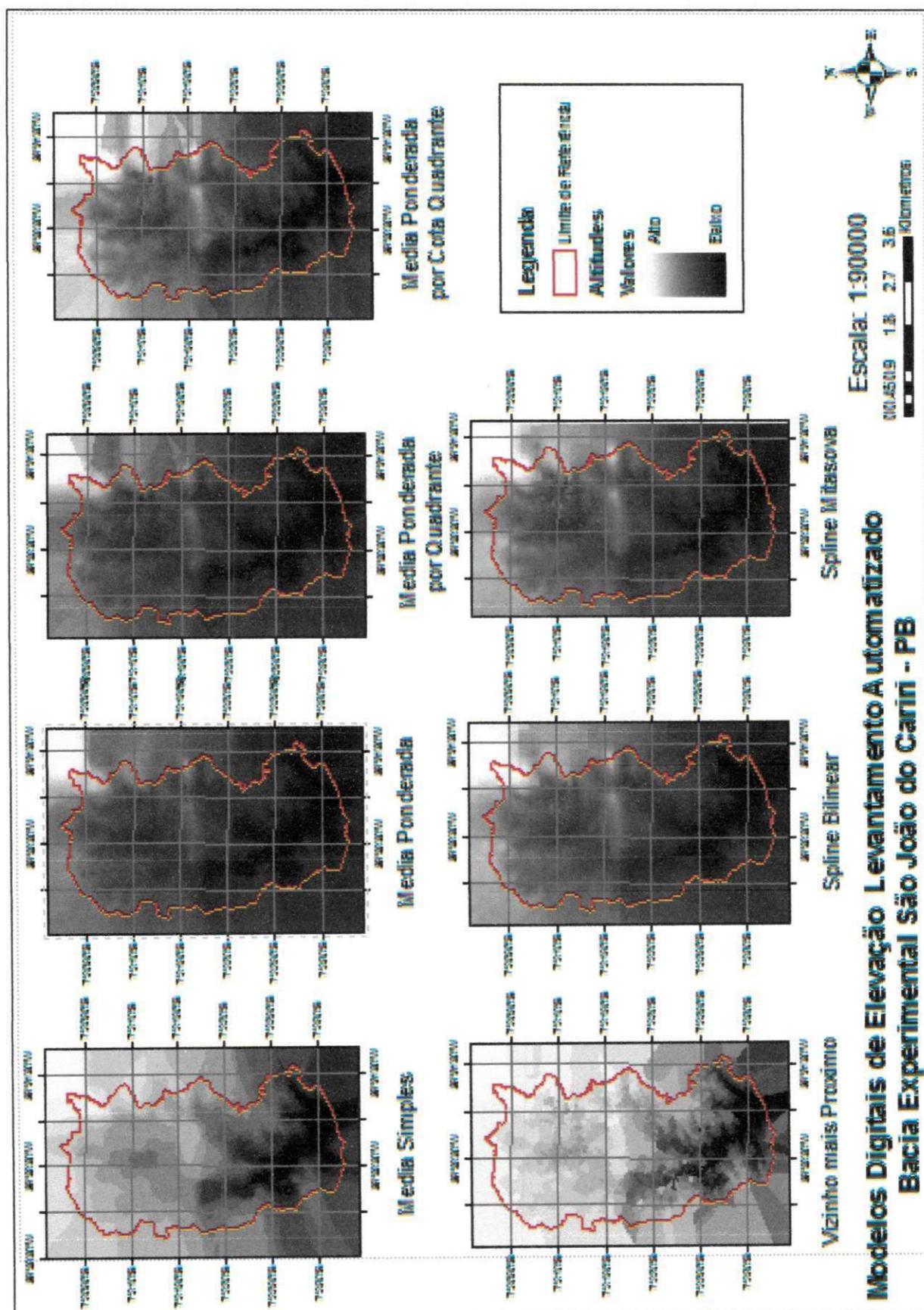
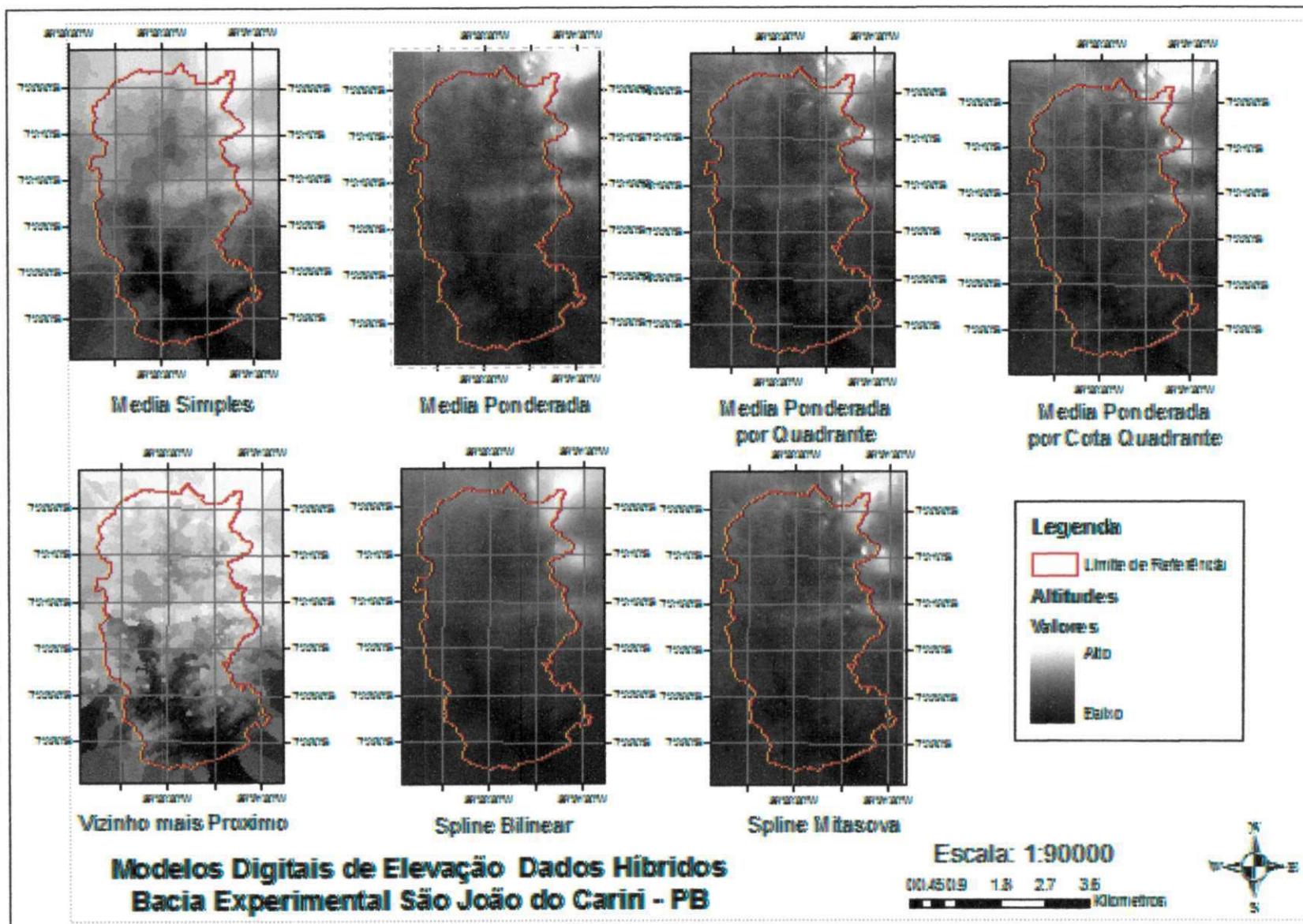


Figura 64 - MDE por Grade Retangular dos Pontos Cotados do Levantamento Automatizado

Figura 65 - MDE por Grade Retangular dos Pontos Cotados Híbrido



Observando os MDE por IQD do levantamento automatizado representou bem a linhas de serra no centro da bacia, em contrapartida na área em destaque tem uma área baixa, algo que não está compreendido em *loco*. Os MDE de IQD por dado híbrido são semelhantes aos do levantamento automatizado, mas com um pouco mais de detalhes.

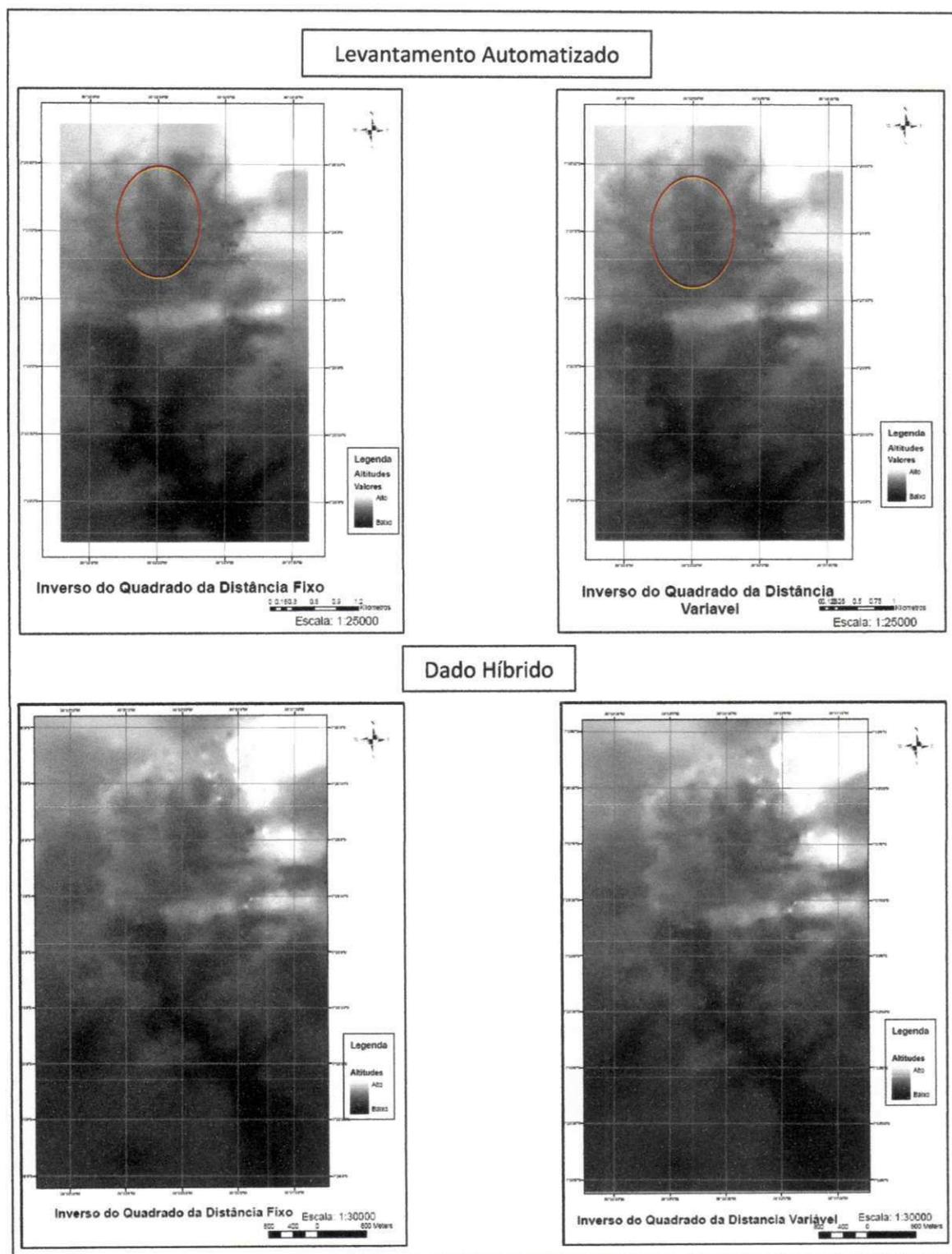


Figura 66 - Comparações entre os MDE por IQD por Pontos Cotados do Levantamento Automatizado e Híbrido

Diante do que foi apresentado na metodologia na formação dos dados híbridos, além de obter os MDE acima tem-se o MDE por Krigagem.

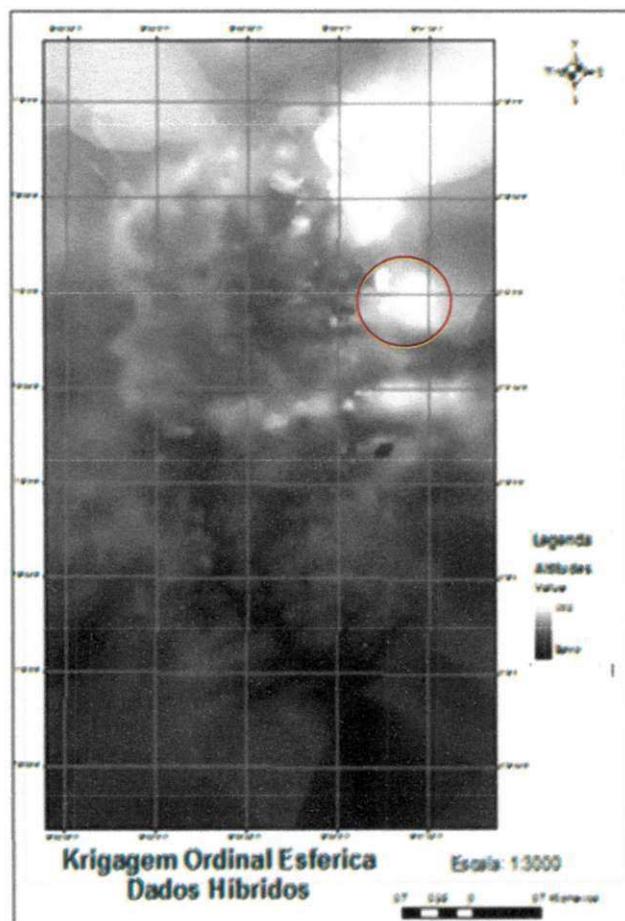


Figura 67 - MDE por Krigagem dos Pontos Cotados Híbrido

Na Figura 67 tem-se algumas áreas a serem destacadas a linha de serra superior direita e outra mais abaixo muito importante para a delimitação da bacia, aspecto que não foi representado pelo MDE IQD do levantamento automatizado.

De acordo com a abordagem metodológica deste trabalho, três métodos de análise comparativa entre Modelos Digitais de Elevação são propostos: (i) comparação entre os produtos primários obtidos via pontos cotados e curvas de nível dos levantamentos topográficos como divisores da bacia, declividade e etc. (ii) comparação estatística a partir da análise exploratória dos modelos e (iii) análise comparativa dos parâmetros morfométricos.

5.1 Comparação Entre os Produtos Primários

Neste trabalho foram gerados para cada MDE, os limites da bacia hidrográfica, a rede de drenagem, declividade, relevo e curvas de nível.

5.1.1 Drenagem

As drenagens geradas foram comparadas com a drenagem de referência IBESA (2004) e o conhecimento adquirido em campo. Através desta comparação foi possível observar alguns aspectos a serem destacados.

Os produtos de drenagem gerados através das curvas de nível de 10 metros do levantamento convencional apresentam um fluxo acumulado na área em destaque (Figura 68) que caracteriza a presença de um açude como pode ser visto na drenagem de referência e confirmado por estudo de campo. Os mapas C e G foram os que representaram o rio principal mais adequadamente. Todas as drenagens abaixo mostraram uma deficiência em representar a área inferior direita da bacia, sendo uma área de muita importância, pois a mesma contribui para a delimitação da bacia. Os mapas B e D que compreendem os *interpoladores vizinho mais próximo* e *spline bilinear* foram os que se apresentaram mais distante da drenagem tomada como referência, mas em contrapartida o *spline mitasova* (mapa F) apresentou um resultado mais satisfatório que representa uma drenagem mais próxima do padrão da drenagem de referência.

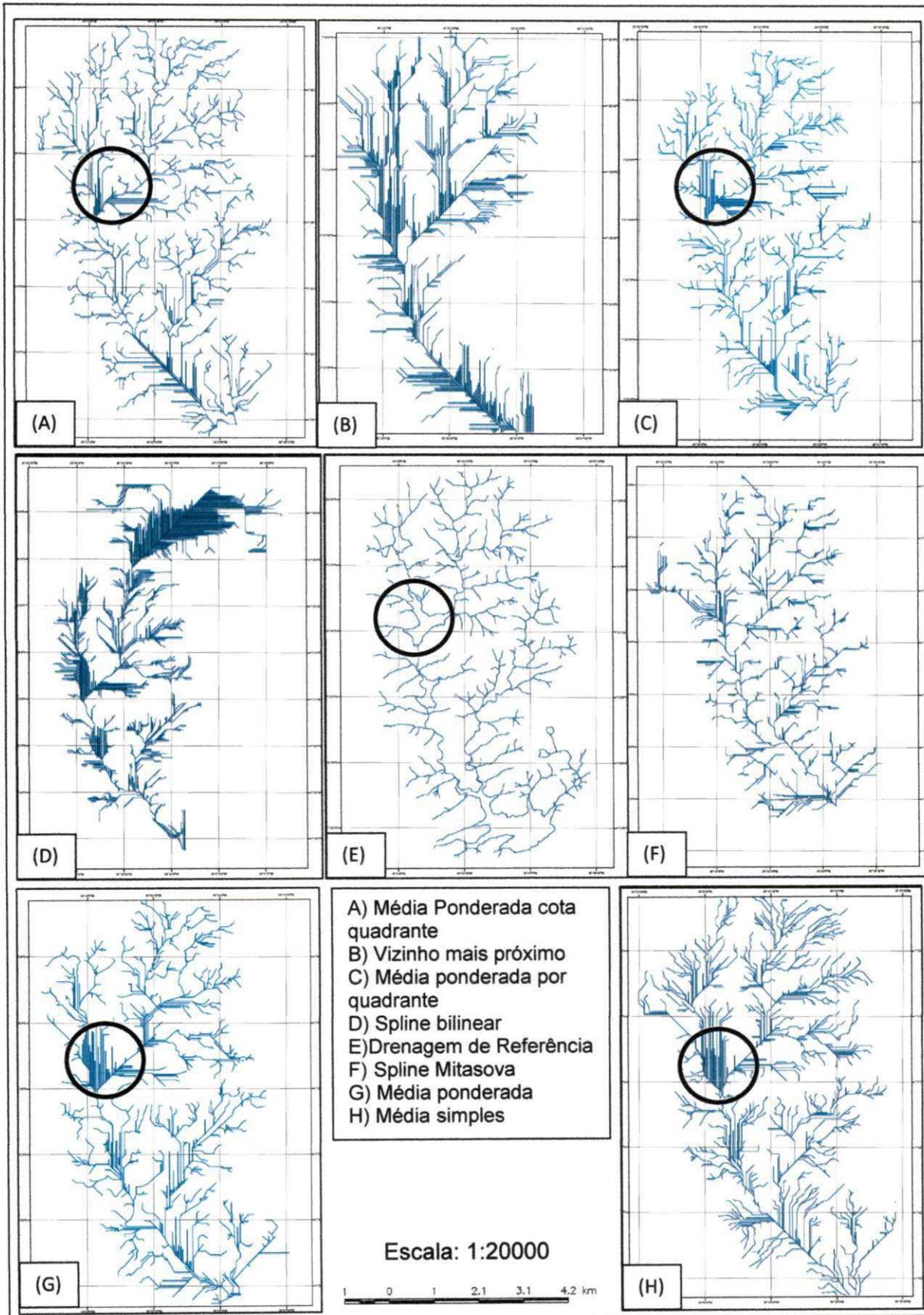


Figura 68 – Comparações entre Drenagens – Curvas de Nível de 10 metros levantamento convencional.

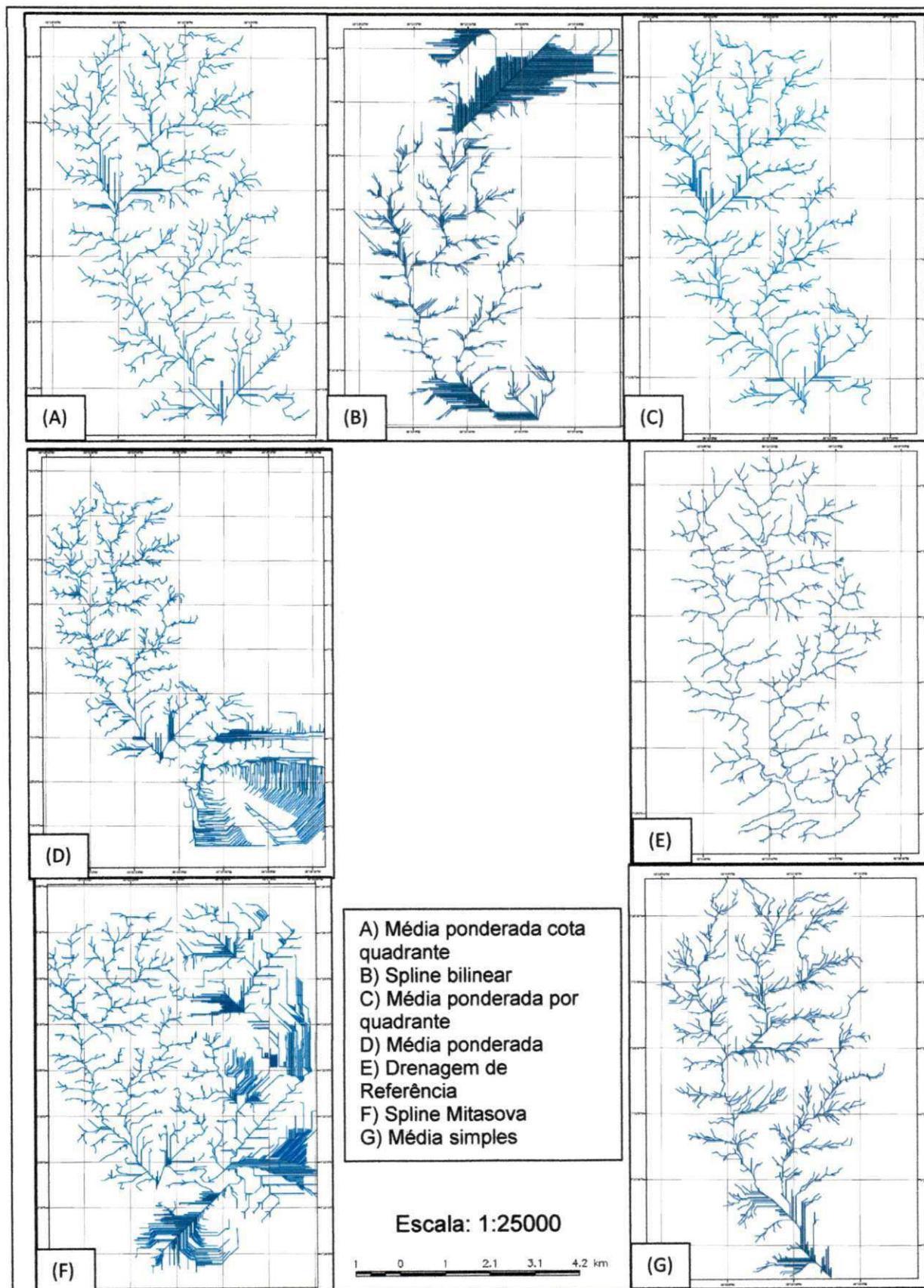


Figura 69 - Comparações entre Drenagens – Curvas de Nível 5 metros levantamento convencional.

Os produtos de drenagem gerados pelos MDE das curvas de nível de 5 metros do levantamento convencional apresentam características a serem destacadas.

De acordo com a Figura 69 os interpoladores *média ponderada cota quadrante e média ponderada por quadrante* (mapas A e C) se aproximaram da drenagem de referência, enquanto que o *média ponderada e média simples* (mapas D e G) distorceram o lado inferior direito, superestimando e subestimando respectivamente. Os interpoladores *splines* (mapas B e F) distorceram o padrão da drenagem de referência apresentando inconsistências. O *vizinho mais próximo* apresentou um fluxo acumulado no lado inferior direito, algo que não corresponde o padrão da drenagem de referência, enquanto que o restante da área se apresentou próxima da drenagem de referência (Figura 70).

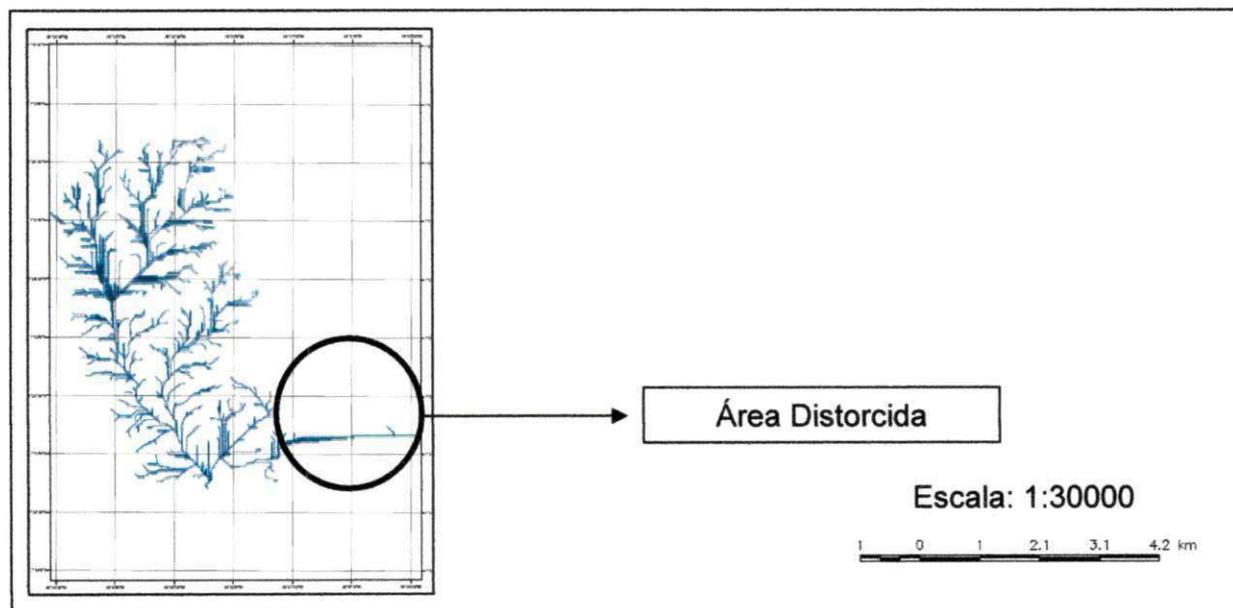


Figura 70 – MDE interpolado por Vizinho mais Próximo – Curvas de Nível 5 metros levantamento convencional

Estas inconsistências expressas anteriormente ocorrem devido aos algoritmos (interpoladores) que geraram os MDE, estes mesmos não conseguiram reproduzir a drenagem adequadamente. As inconsistências no caso das drenagens podem ser observadas na Figura 71. É possível observar que fora da área da bacia temos distorções das direções de fluxo que por sua vez gera um fluxo acumulado fazendo com que se tenham drenagens e limites fora do padrão.

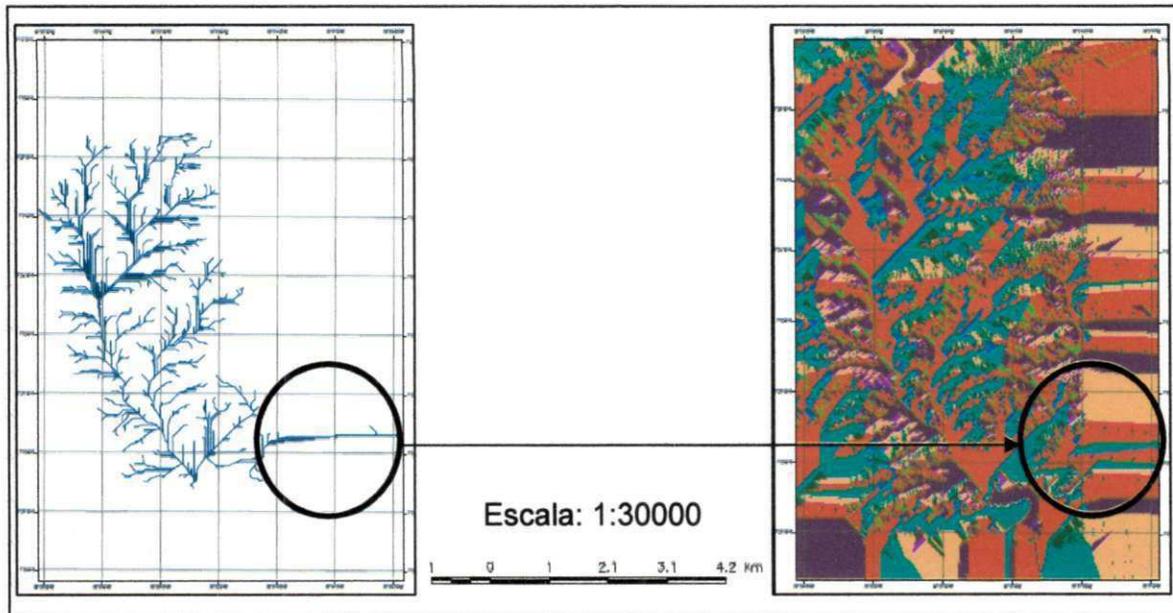


Figura 71 - Direção de Fluxo (MDE interpolado por Vizinho mais Próximo) – Curvas de Nível 5 metros levantamento convencional

Como pode ser observado, alguns algoritmos utilizados para a interpolação superestima algumas áreas. No caso do *vizinho mais próximo*, a área a qual ele superestimou é em sua maior parte plana isto pode ser característico dos interpoladores *vizinho mais próximo* interpolado por curvas de nível.

Outro dado importante proveniente do levantamento convencional são os pontos cotados. Através dos MDE obtidos por ele gerou-se diversas drenagens verificando a capacidade da distribuição dos pontos na área da bacia.

Todas as drenagens advindas dos interpoladores por *média e por IQD* geraram drenagens distorcidas do padrão de referência (Figura 72). As drenagens dos interpoladores por *média ponderada, IQD fixo e IQD variável* (mapas B, F e G) não apresentaram-se semelhantes não compreendendo toda a área da bacia, enquanto que o *média ponderada por quadrante e o média ponderada cota quadrante* (mapas A e E) tem quase a mesma forma, mas totalmente divergente, assim como o de *média simples* (mapa C).

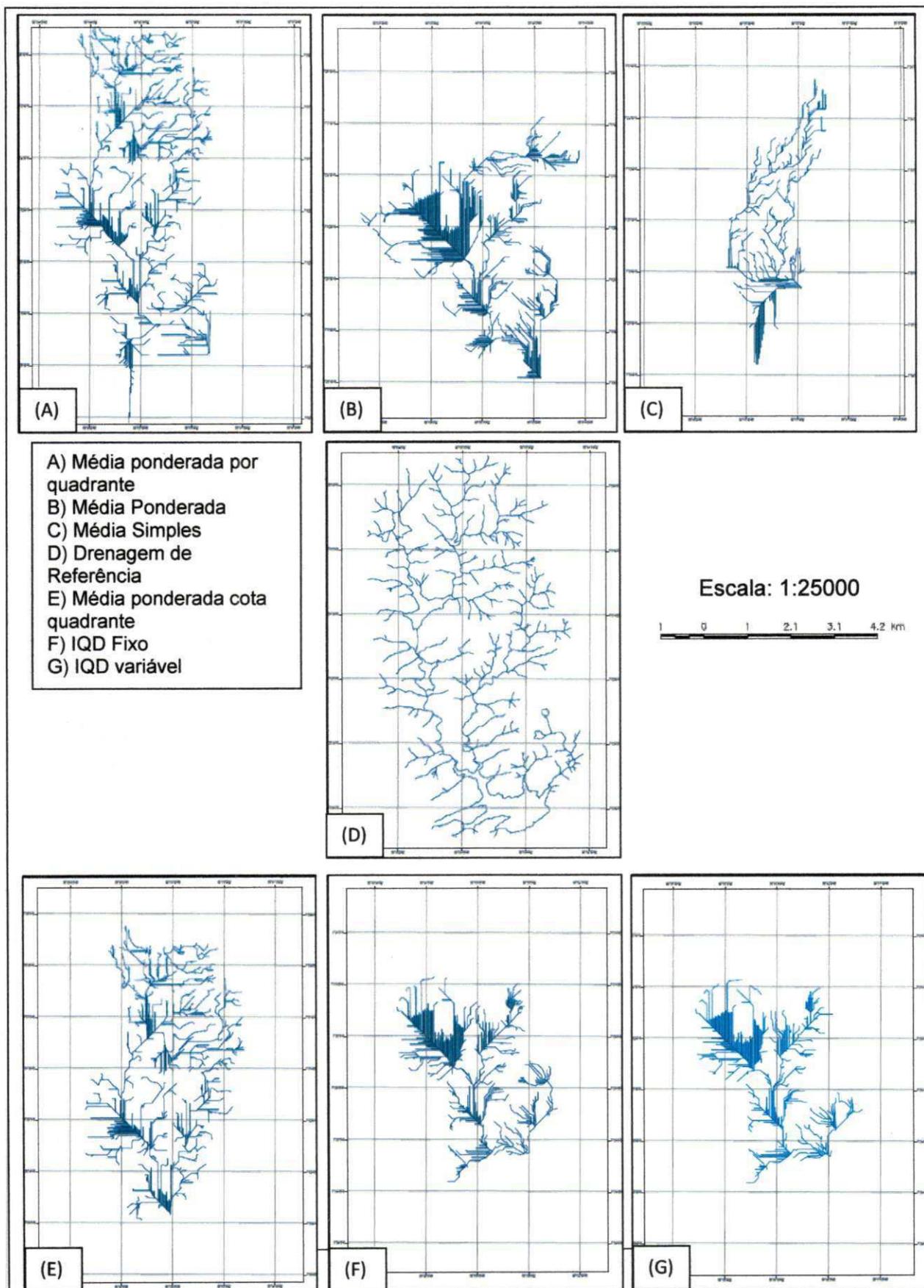


Figura 72 - Comparações entre Drenagens – Pontos Cotados levantamento convencional.

Os produtos de drenagem *splines e vizinho mais próximo* estão fora dos padrões, não sendo possível utilizá-los para a geração dos limites da bacia (Figura 73).

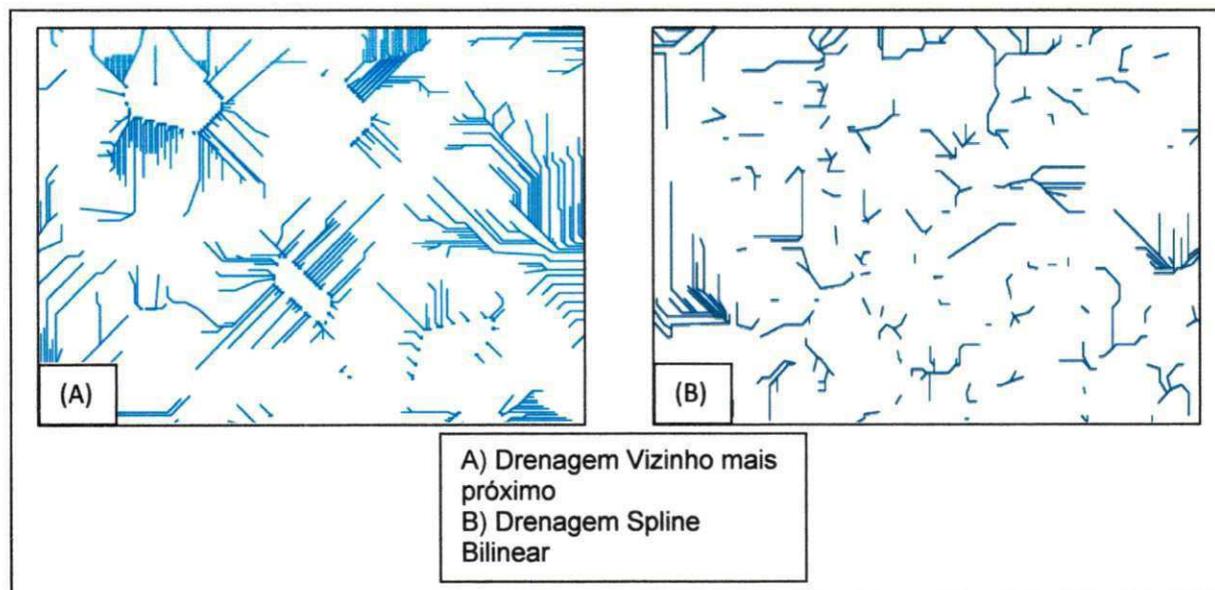


Figura 73 – Caracterização de inconsistência da drenagem – Pontos cotados levantamento convencional.

Observa-se que existe uma dispersão nas linhas de fluxo faltando uma ligação entre os mesmos, assim não sendo possível gerar limites e fazer maiores análises.

As drenagens dos MDE gerados a partir dos pontos cotados de levantamento automatizado apresentaram semelhanças com a drenagem de referência, mas também tiveram o mesmo problema ocorrido com alguns produtos de drenagem provenientes das curvas de nível de 5 metros (Figura 69 – mapa G), onde as áreas mais planas que correspondem à parte inferior direita da bacia não estão bem representadas. As demais áreas estão semelhantes à drenagem de referência, mas com um pouco mais de detalhes, isto pode ser devido a número de pontos expressos no levantamento, pois, estavam melhor distribuídos buscando um detalhe mais coerente com a área.

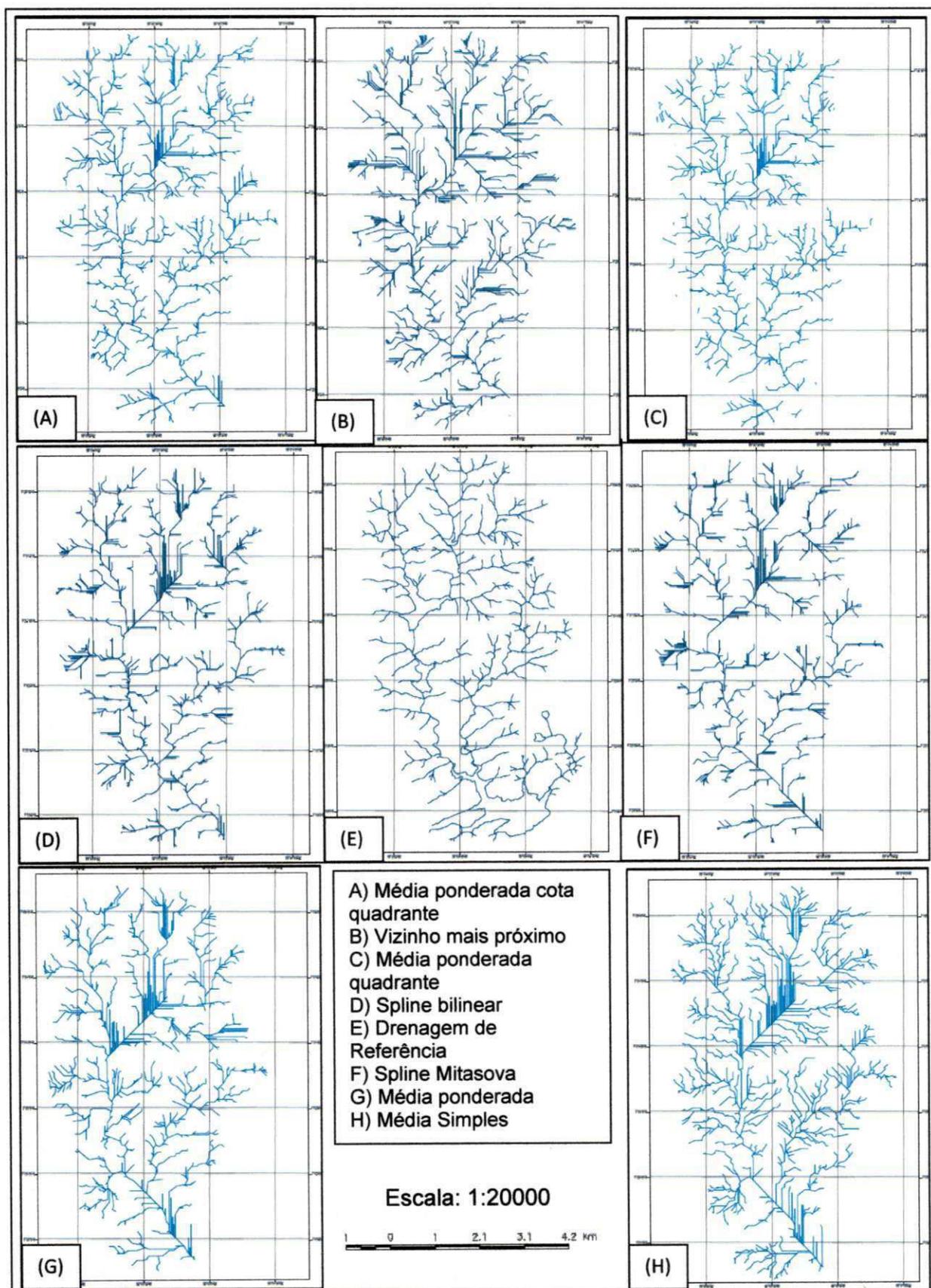


Figura 74 - Comparações entre Drenagens – Pontos cotados levantamento automatizado.

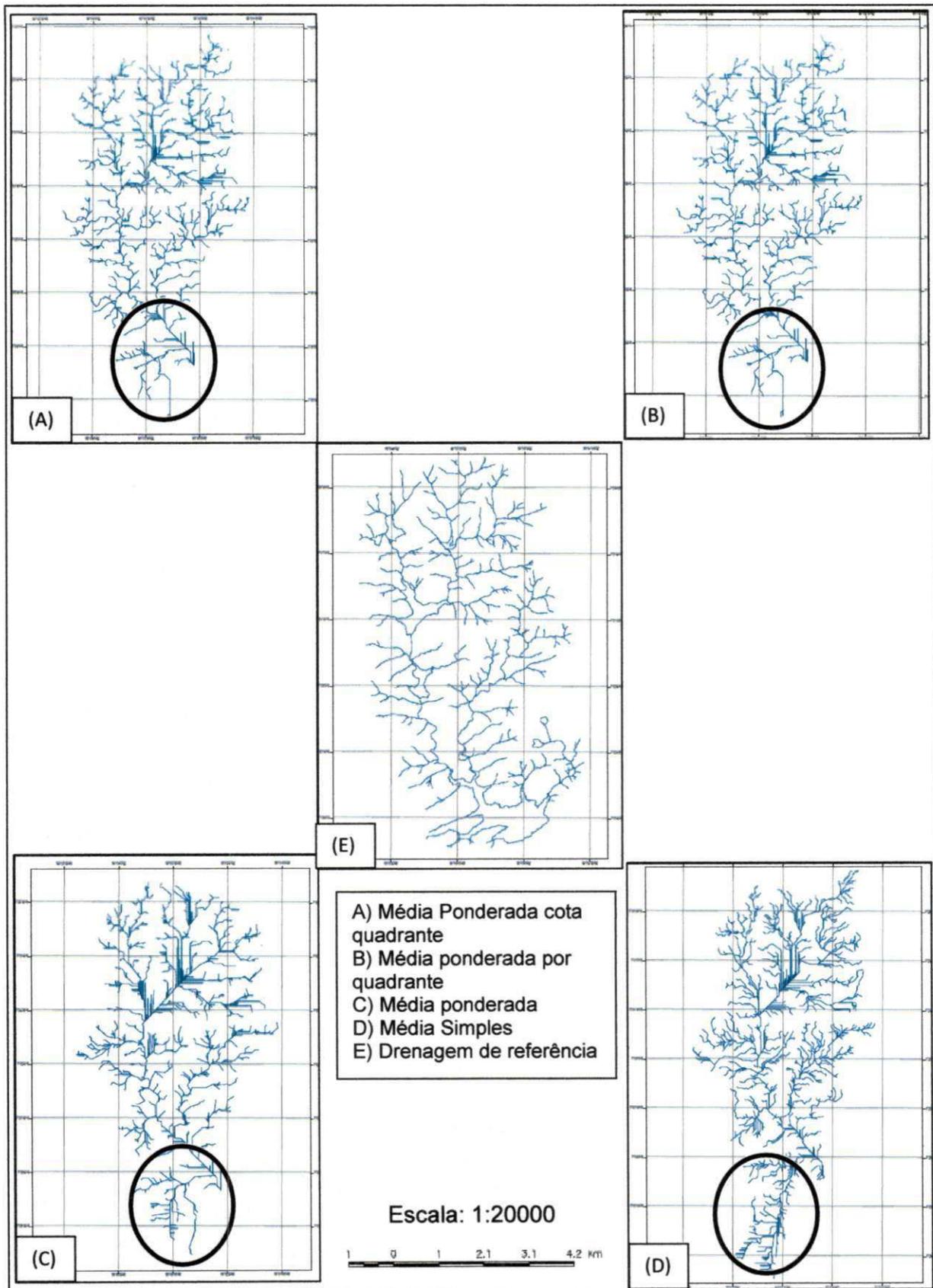


Figura 75 - Comparações entre Drenagens – Dados Híbridos

Os produtos de drenagem obtidos dos MDE dos dados híbridos e interpolados por *média* (Figura 75) esclareceram alguns aspectos. É possível observar um detalhamento maior dos produtos de drenagem proporcionado pelos dados híbridos do que os apresentados anteriormente. Devido a uma maior distribuição dos pontos pela área da bacia todos os interpoladores buscaram identificar mais coerentemente, mas esta busca ocasionou uma superestimação em algumas áreas, como destacado na Figura 75.

Os estimadores estatísticos *IQD* e *Krigagem* apresentaram padrões semelhantes, e apenas se diferenciando na *Krigagem* que detalhou obtendo uma concentração maior de riachos.

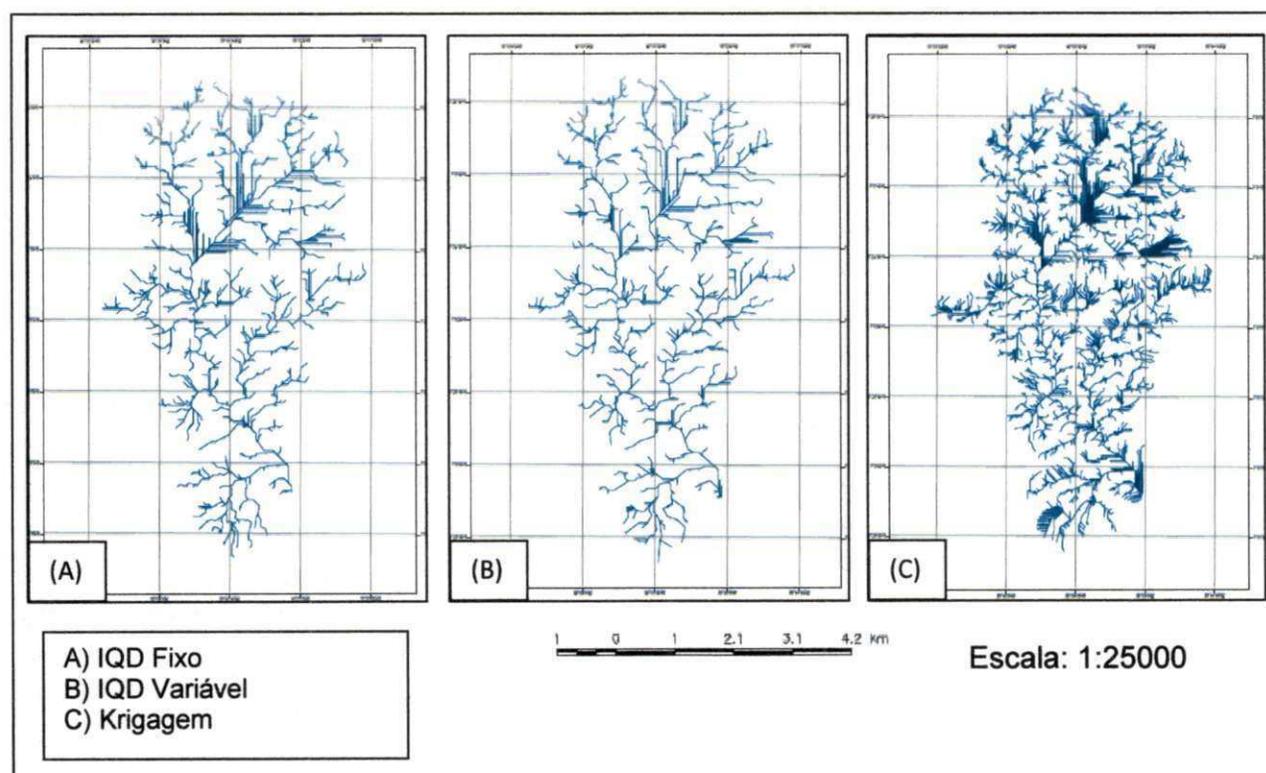


Figura 76 – Comparações entre Drenagens Provenientes dos MDE Interpolados por Interpoladores Estatísticos – Dados Híbridos.

A drenagem gerada através do interpolador *vizinho mais próximo* apresenta o aspecto mais interessante entre todas as drenagens. Ela apresenta um fluxo acumulado no seu lado inferior direito fora do padrão, mas o restante fica semelhante à drenagem de referência (Figura 77).

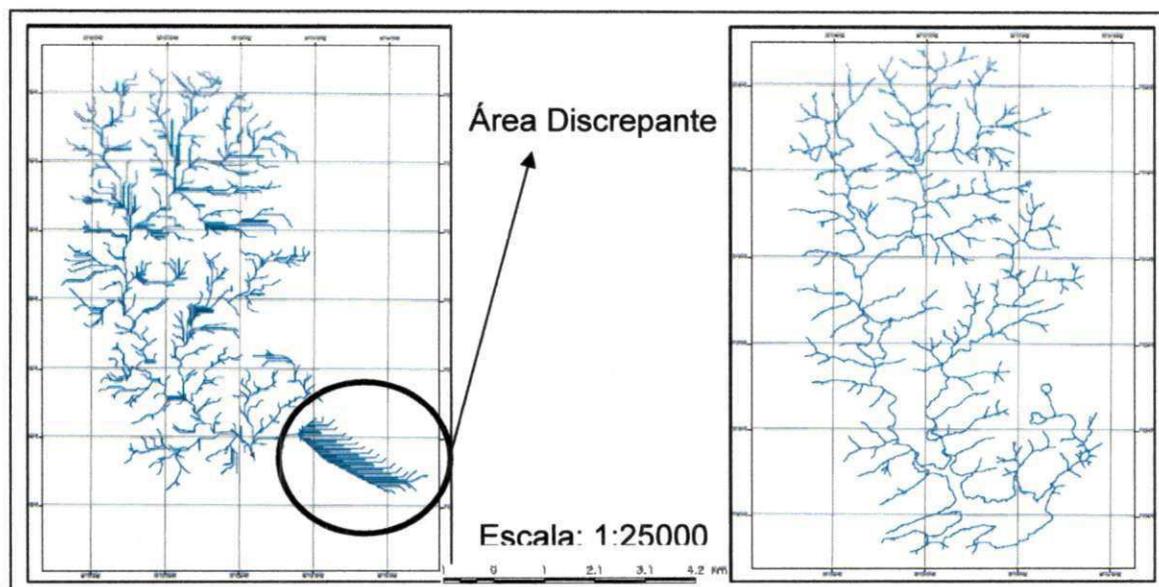


Figura 77 – Drenagem do MDE Interpolado por Vizinho mais Próximo – Dados Híbridos

Os produtos de sensores orbitais apresentam drenagens que se distanciam da drenagem de referência, devido as suas respectivas resoluções. A drenagem proveniente da imagem do ASTER/TERRA tem aspectos semelhantes da drenagem da bacia, mas deixa a desejar no detalhamento de alguns riachos que são imprescindíveis para a geração dos limites da bacia. A SRTM de 30 metros distorceu seu exutório não sendo condescende com o conhecimento de campo. A SRTM de 90 metros perdeu detalhamento e distorceu da mesma forma que a SRTM de 30 metros (Figura 78).

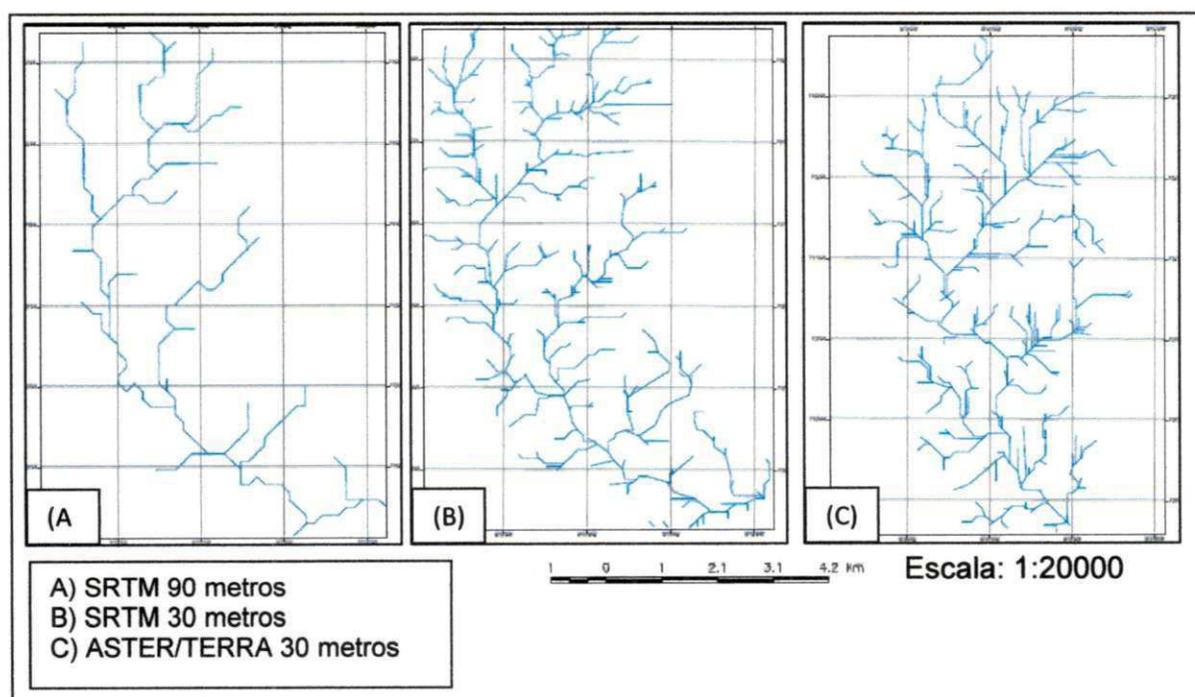


Figura 78 – Comparações entre Drenagens – Produtos Orbitais

5.1.2 Limites

Os limites gerados pelo SIG foram analisados de acordo com o limite de referência, destacando alguns pontos de discordância dos pesquisadores que trabalham com a BESJC. Os limites que se mostram discrepantes foram descartados, mas os que estão próximos do limite de referência foram analisados mais criteriosamente.

Os limites gerados dos MDE proveniente das curvas de nível de 10 metros em sua maioria estão diferentes do limite de referência, mas alguns merecem destaque. O *Spline Mitasova*, *Média Ponderada* e *Média Simples* (Figura 79 - mapa E, C e D) apresentou uma melhor representatividade do limite inferior direito, área já discutida anteriormente, vale salientar que a drenagem proveniente do MDE do *Spline Mitasova* (Curvas de Nível de 10 metros do levantamento convencional) deste interpolador foi a que melhor representou esta área em questão. Uma deficiência dos produtos de limites gerados dos MDE da curvas de nível de 10 metros foi à superestimação da área superior da bacia, uma das áreas mais onduladas da bacia, isto pode caracterizar uma dificuldade de gerar detalhes neste tipo de região.

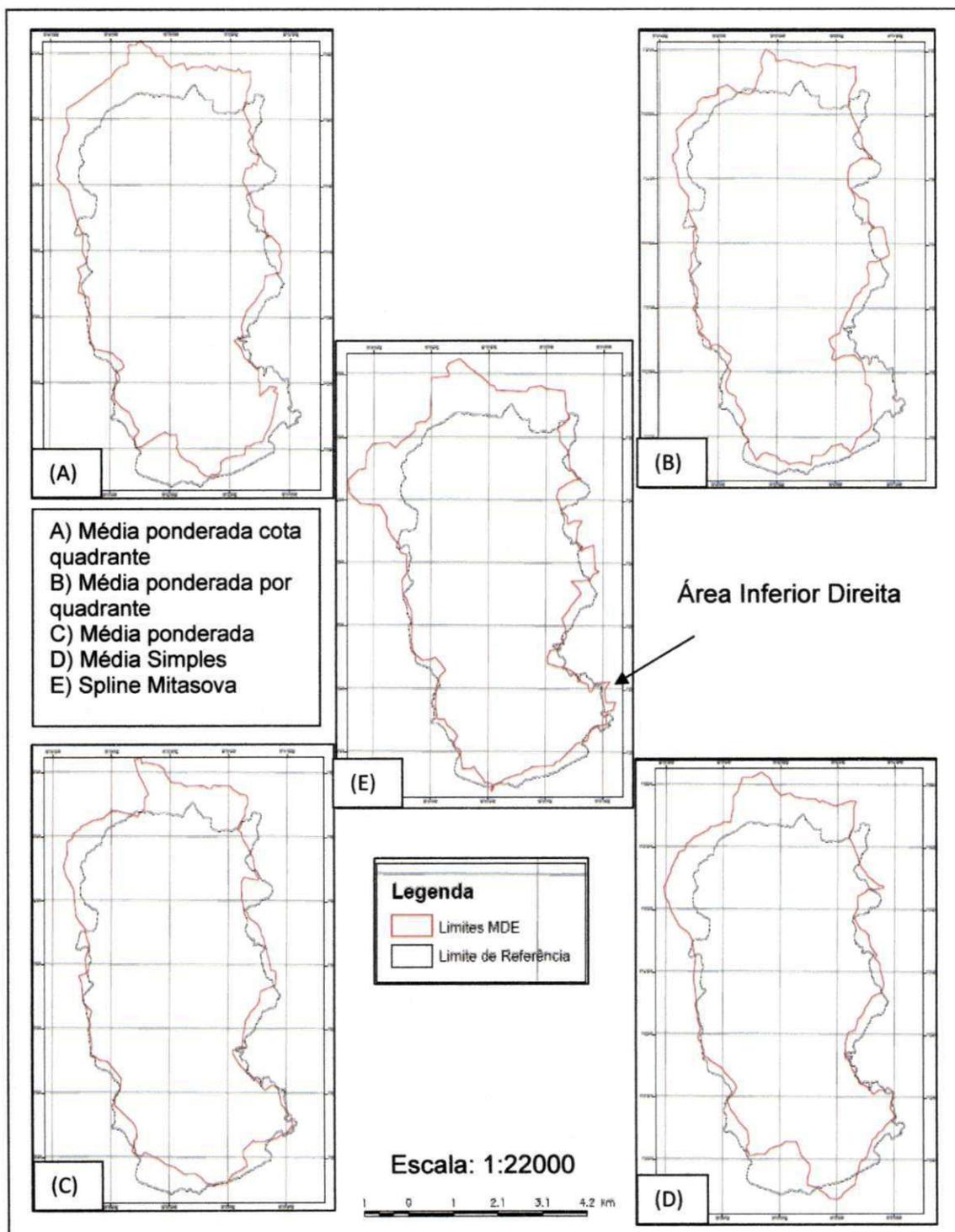


Figura 79 – Comparações ente Limites – Curvas de Nível de 10 metros levantamento convencional

Os produtos de limite mais discrepantes foram os provenientes do interpolador *spline bilinear* e *vizinho mais próximo*. O *spline bilinear* (Figura 80 – mapa A) superestimou a parte superior da bacia enquanto que o *vizinho mais próximo* (Figura 80 – mapa B) subestimou a parte central da bacia.

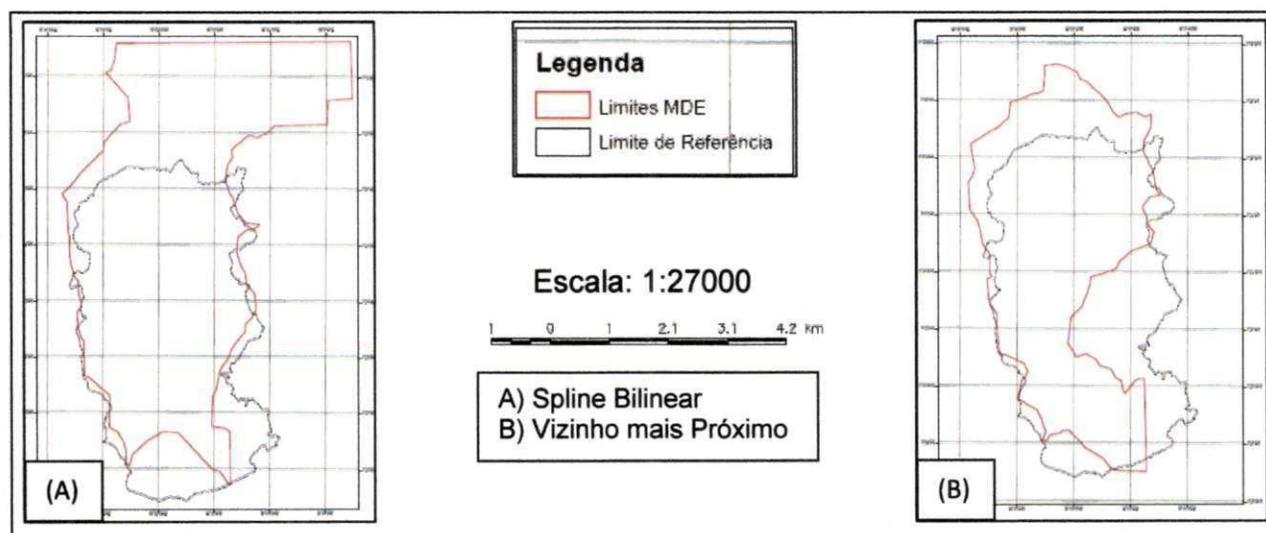


Figura 80 – Comparações entre limites dos MDE por Vizinhaça e Spline – Curvas de Nível de 10 metros levantamento convencional.

Os limites gerados pelos MDE do produto de curvas de nível de 5 metros do levantamento convencional apresentaram-se coerente com o limite de referência interpolados por *média ponderada cota quadrante*, *média simples* e *média ponderada por quadrante* (Figura 81 – mapas A, B e C). Apesar da proximidade, os limites tinham um aspecto interessante a ser abordado. Como podem ser observados na Figura 81 os limites seguiram um padrão semelhante (nestes citados anteriormente) ao da forma da bacia se for comparado com o limite de referência, mas em contrapartida eles estavam deslocados.

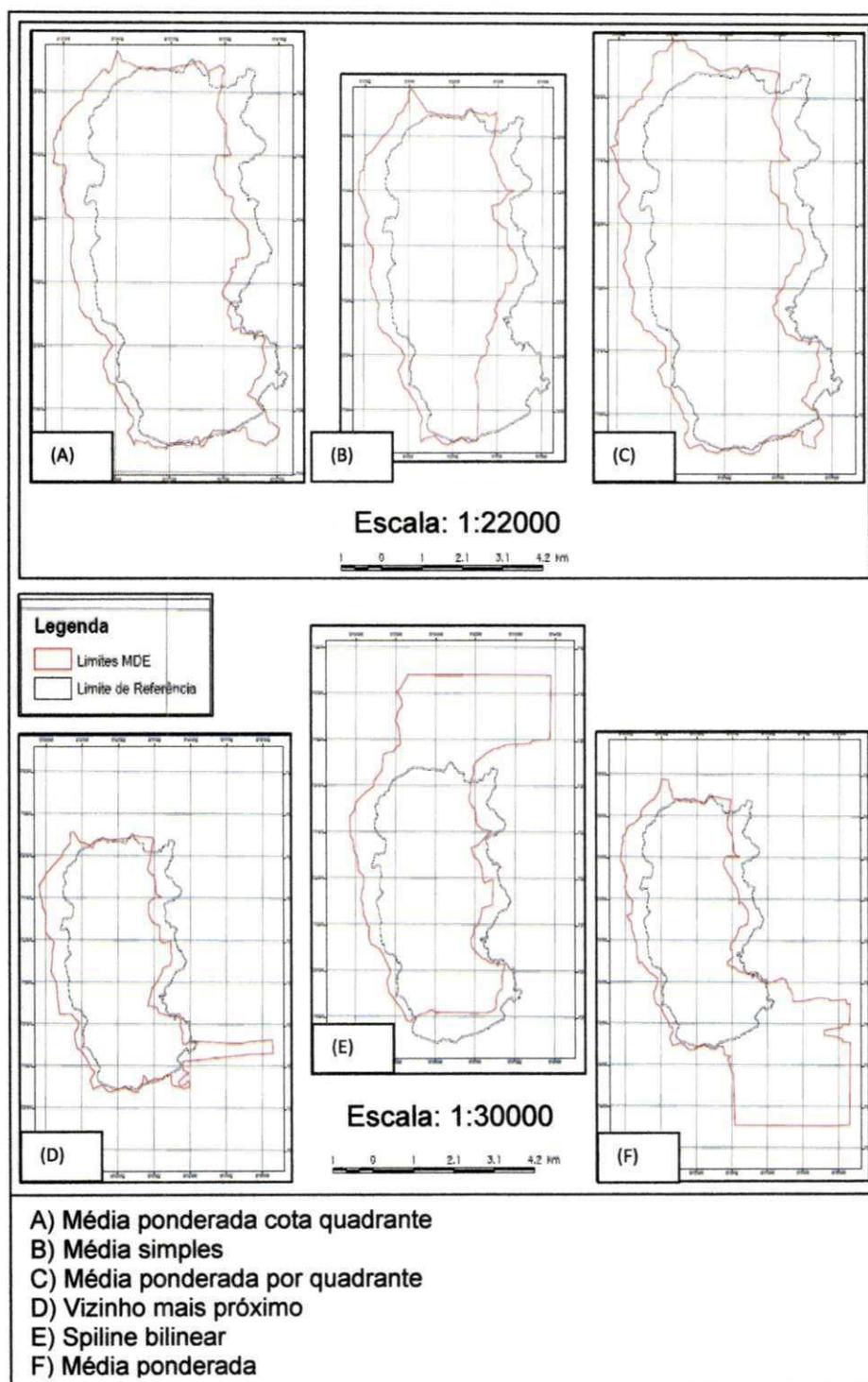


Figura 81 – Comparações entre limites – Curvas de nível de 5 metros levantamento convencional.

Nos mapas D, E e F da Figura 81, houve uma extrapolação dos limites. O *vizinho mais próximo* superestimou a área inferior direita como também o *média ponderada*, já o *spline bilinear* superestimou a área superior da bacia.

Após as verificações de georreferenciamento, analisou-se as drenagens para observar o que teria acontecido com a drenagem, já que é a através de um ponto determinado (exutório) é que o SIG delinea a bacia.

pele SIG (Figura 82).

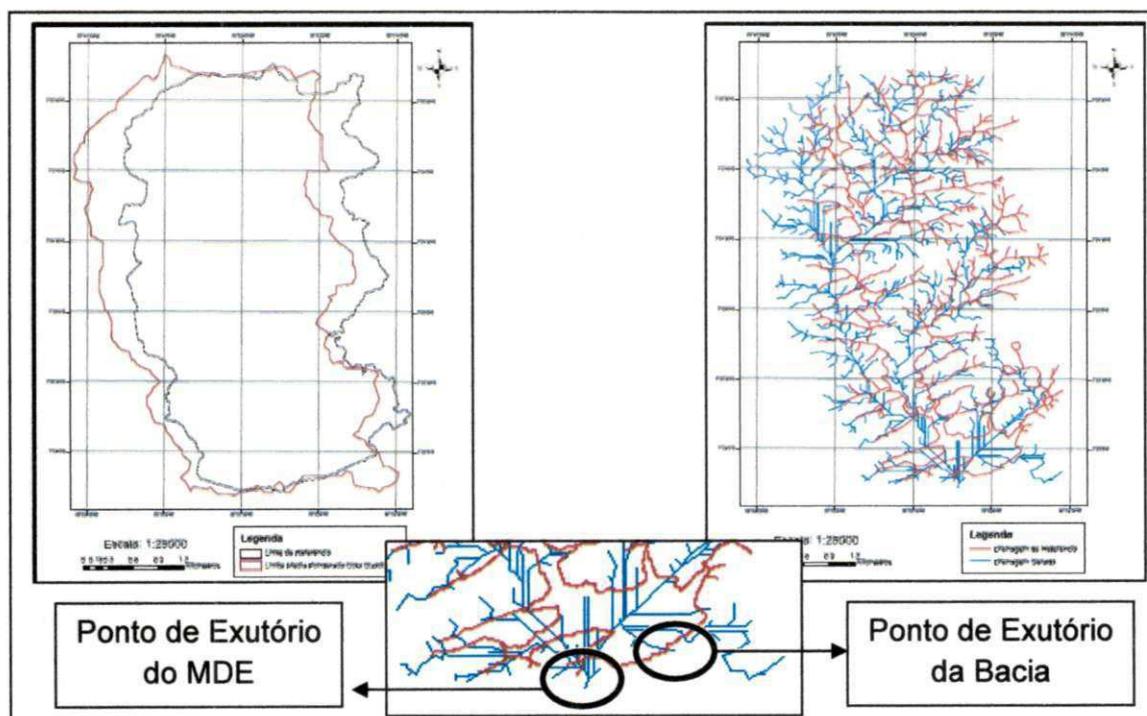


Figura 82 - Verificação do exutório do MDE do interpolador média ponderada cota quadrante do produto de curvas de nível de 5 metros do levantamento convencional.

Com a geração das respectivas drenagens foi possível prever limites distorcidos do padrão que não caracterizam a real forma da bacia dos MDE gerados por pontos cotados do levantamento convencional. Um dos resultados destacados é que o dado de pontos cotados do levantamento convencional é insuficiente para representar os limites da bacia (Figura 83).

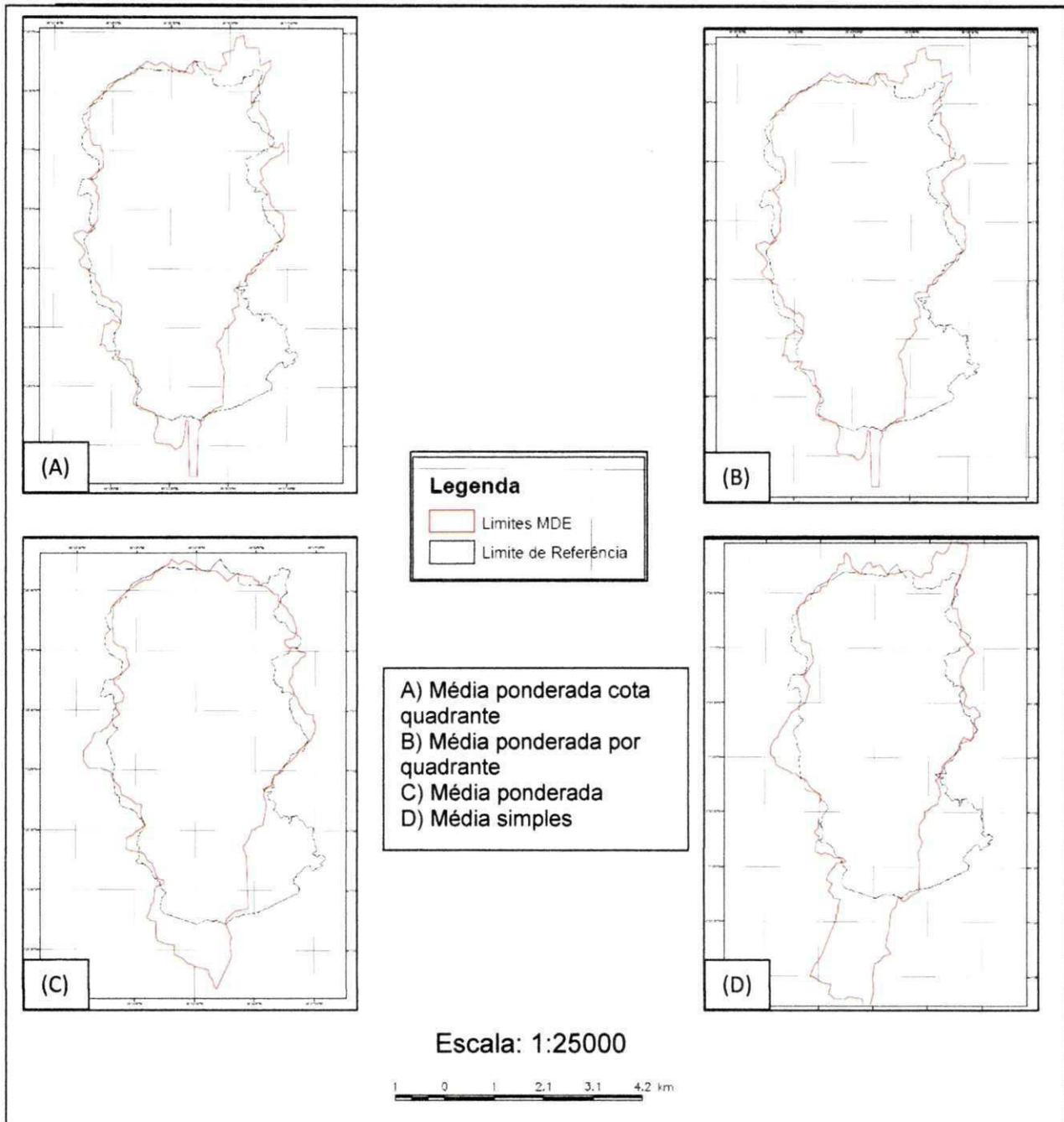


Figura 89 – Comparações entre limites dos MDE interpolados por média – Dados Híbridos.

O único interpolador que buscou representar o limite adequadamente foi o *vizinho mais próximo*. A Figura 90 mostrou deficiência semelhante ao do *vizinho mais próximo* das curvas de nível 5 metros

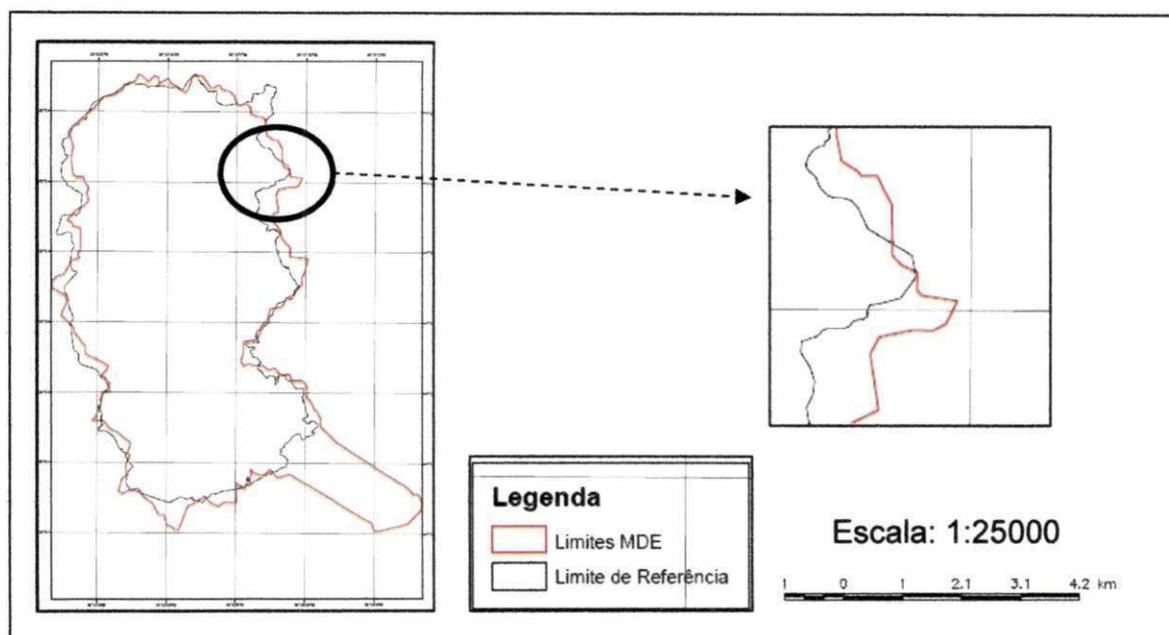


Figura 90 - Vizinho mais próximo – Dados Híbridos

A área em destaque (Figura 90) é um dos pontos divergentes na delimitação da bacia. O limite de referência mostra o limite mais interno do que o limite estabelecido pelo MDE do interpolador *vizinho mais próximo*, diante visita de campo foi possível observar que na área em destaque que o limite d MDE está mais coerente com o com o campo, isto faz com que se busque um estudo mais profundo sobre este MDE para assim fazer com que este MDE possa dar uma resposta ainda mais próxima do campo. Um fato interessante a se destacar, já que nas demais áreas os pontos extrapolados não se apresentaram satisfatórios.

Os limites gerados por *krigagem*, *spline* e *IQD* mostram limites discrepantes do limite de referência. Os *IQD*, o *spline mitasova* e a *krigagem* subestimaram o limite na maioria do limite enquanto que o *spline bilinear* superestimou a área superior da bacia (Figura 91).

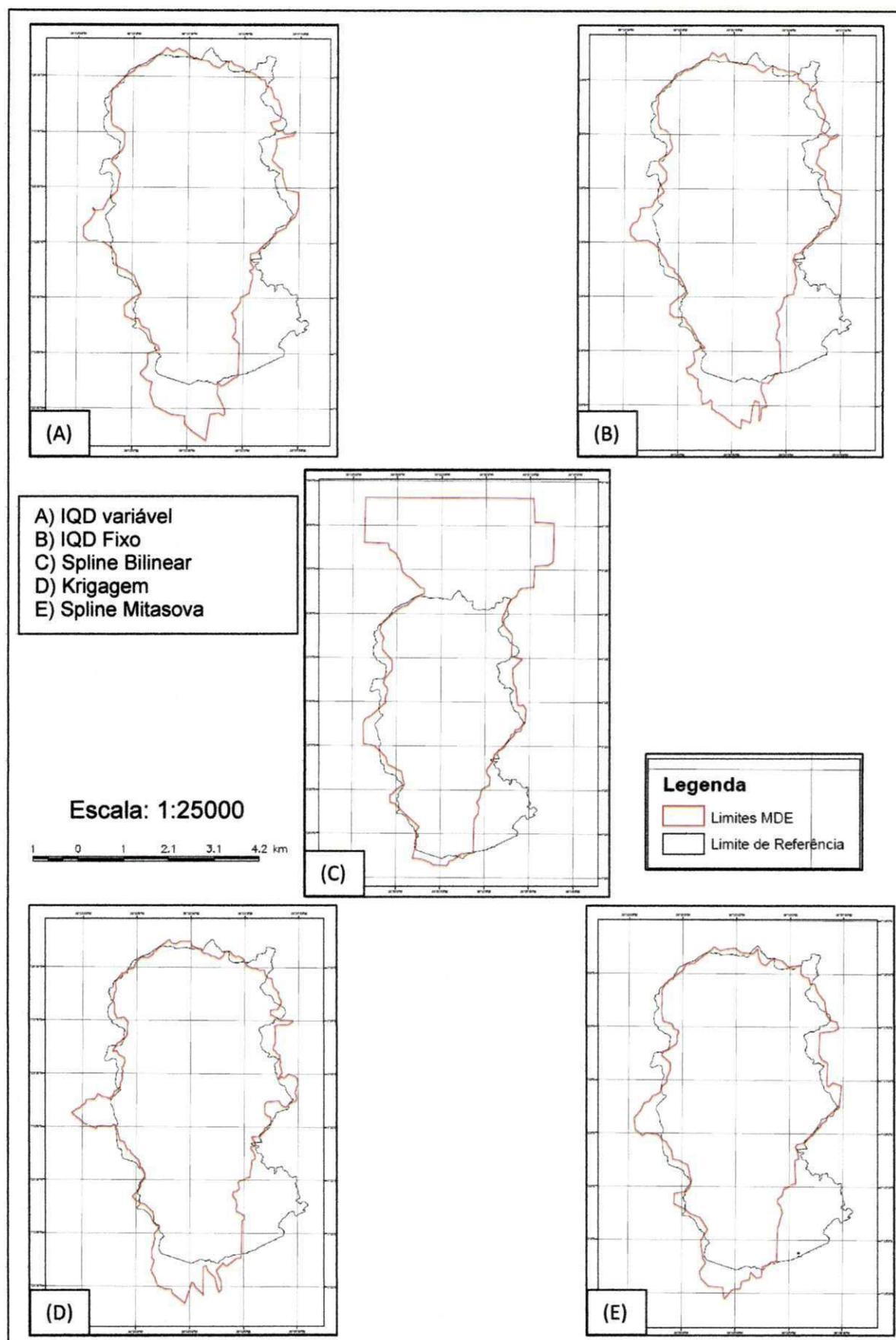


Figura 91 – Comparações entre limites dos MDE por interpoladores estatísticos e Splines – Dados Híbridos

Figura 91 – Comparações entre limites dos MDE por interpoladores estatísticos e Splines – Dados Híbridos
 Os limites gerados por produtos orbitais apresentaram resultados insatisfatórios, onde obteve-se limites com erros em sua forma. O limite obtido através da imagem ASTER/TERRA apresentou uma melhor semelhança, com algumas áreas próximas ao limite de referência (Figura 92).

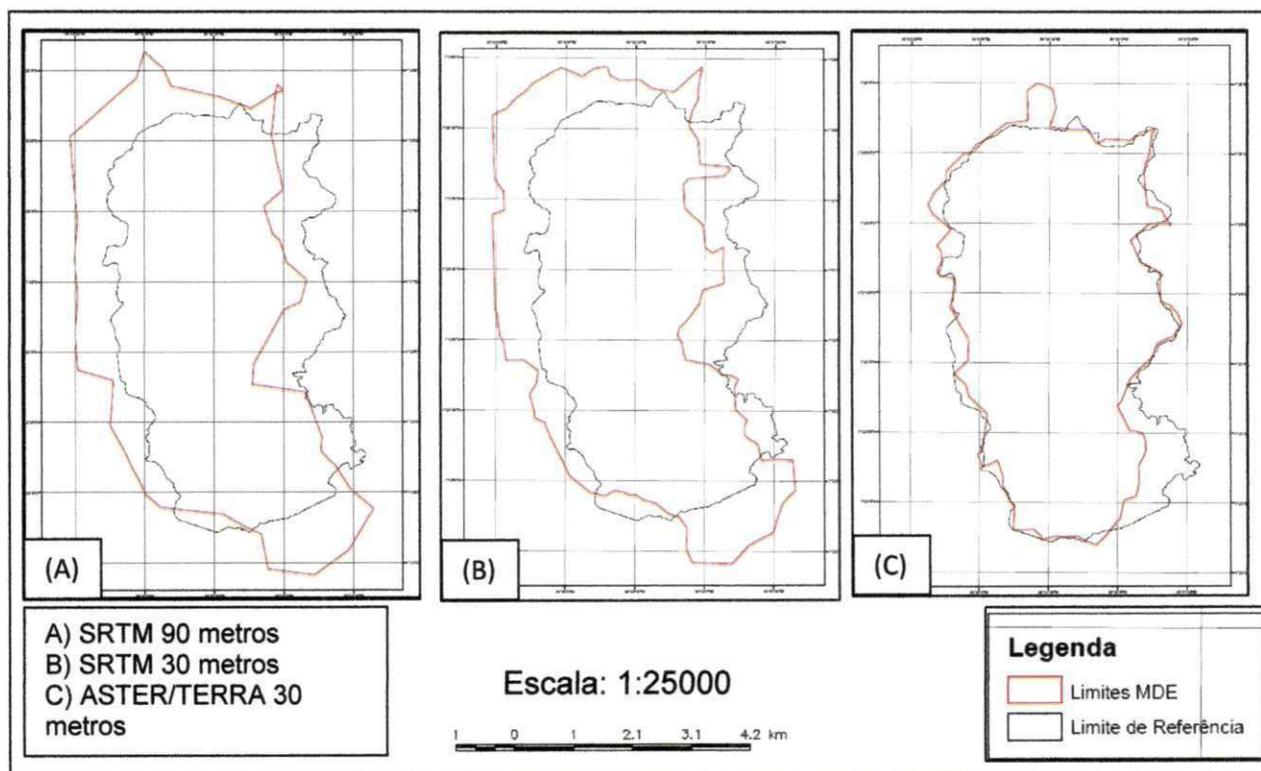


Figura 92 – Comparações entre limites – Produtos Orbitais

5.1.3 Curvas de Nível

A geração das curvas de nível serviu para evidenciar o quanto aquele MDE poderia estar coerente. Foram geradas as curvas dos pontos cotados de levantamento automatizado e levantamento convencional, dados híbrido e produtos orbitais e comparados com as curvas de nível de 10 metros, mas poderiam também se utilizada às curvas de nível 5 metros para comparação já que as mesmas têm verdade de campo. Os produtos que se apresentaram mais próximos e outros que se distanciaram seguem abaixo:

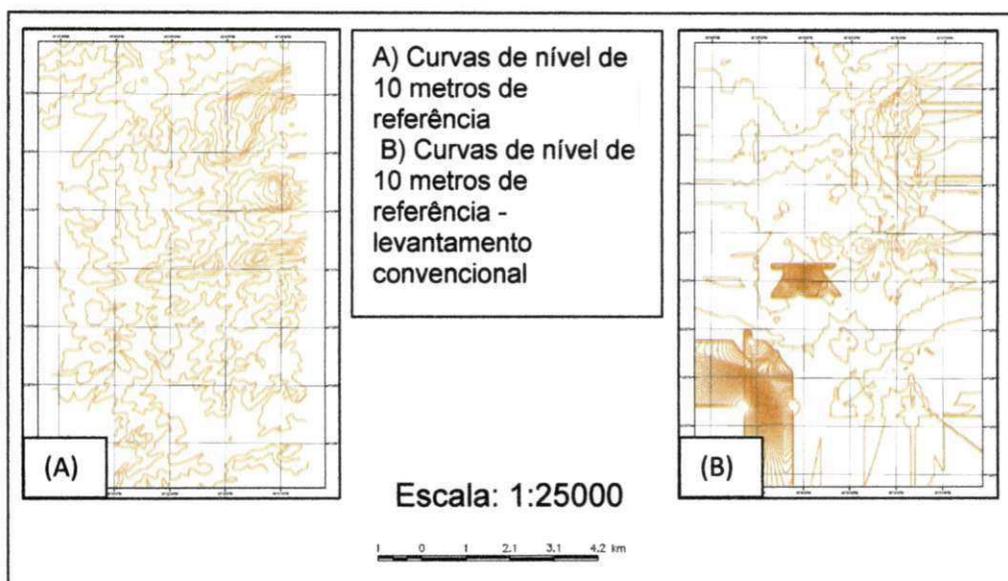


Figura 93 – Comparações entre curvas de nível – MDE pontos cotados levantamento convencional

Após a geração de todas as curvas de nível para todos os MDE dos pontos cotados do levantamento convencional, observou-se o seguinte resultado expresso na Figura 93. É possível observar que ele gerou curvas divergente das utilizadas como referência, onde se descarta qualquer utilização destas curvas.

É possível ver um resultado mais satisfatório nos pontos cotados de levantamento automatizado, principalmente na identificação do auge namorados, na cadeia de serras na faixa central e parte superior direita (Figura 94).

Através destas observações podem ser analisados alguns fatores: Os pontos cotados de levantamento automatizado entre os dados de entrada são os que estão mais bem distribuídos espacialmente, diante disto temos um produto melhor e um dado um pouco mais confiável. O produto apresentado na Figura 94 nos mostra uma melhor representação dos interpoladores descritos em identificar extremos, ou seja, áreas muito altas ou muito baixas.

Na Figura 95 as curvas por dado híbrido apresentaram uma melhor representação das curvas do relevo em áreas altas, destacado pelas linhas de serras.

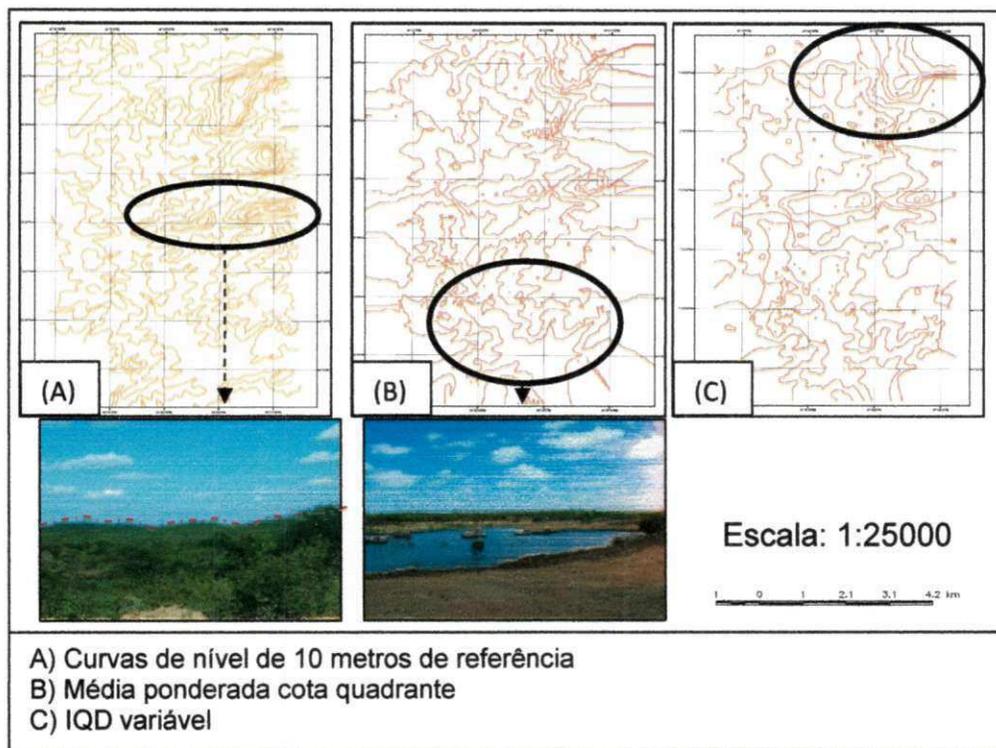


Figura 94 – Comparações entre curvas de nível – Pontos cotados levantamento automatizado

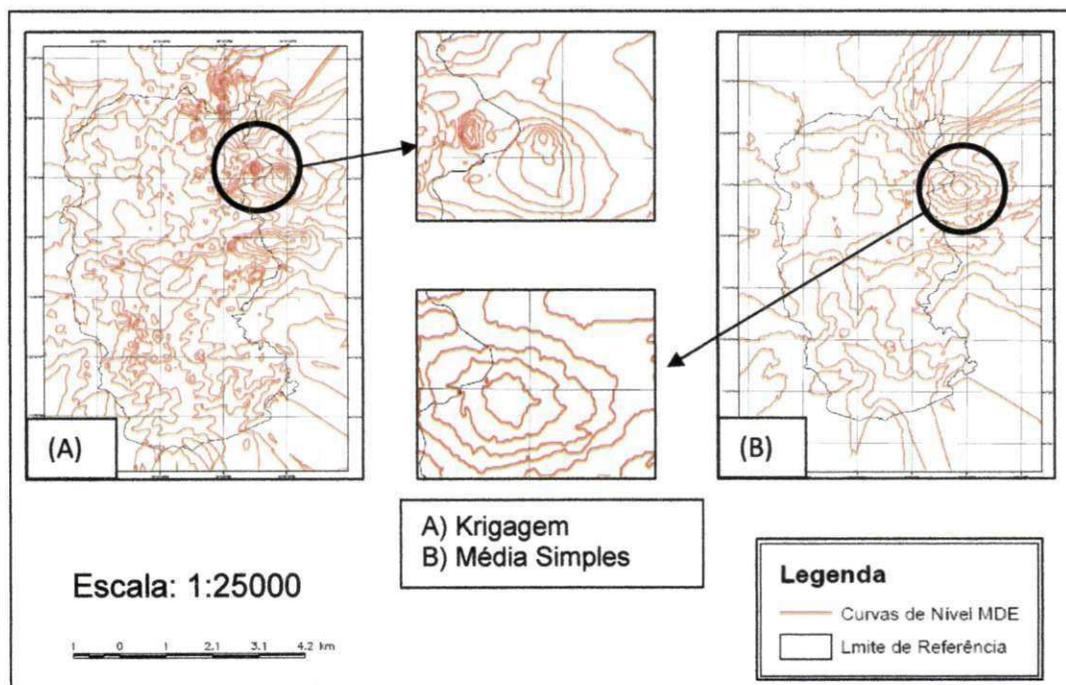


Figura 95 – Comparações entre curvas de nível – Dados Híbridos.

referência, os mesmos identificaram grande parte central e superior da bacia. Desta área que ele deixou melhor representada destaca-se a SRTM de 30 metros e a ASTER/TERRA onde elas conseguiram atestar a cadeia de serras superior direita com o limite de referência. Todos os produtos representaram a serra expressa na figura anterior e também áreas centrais mais altas, porém não obtiveram boas respostas em áreas de baixa altitude.

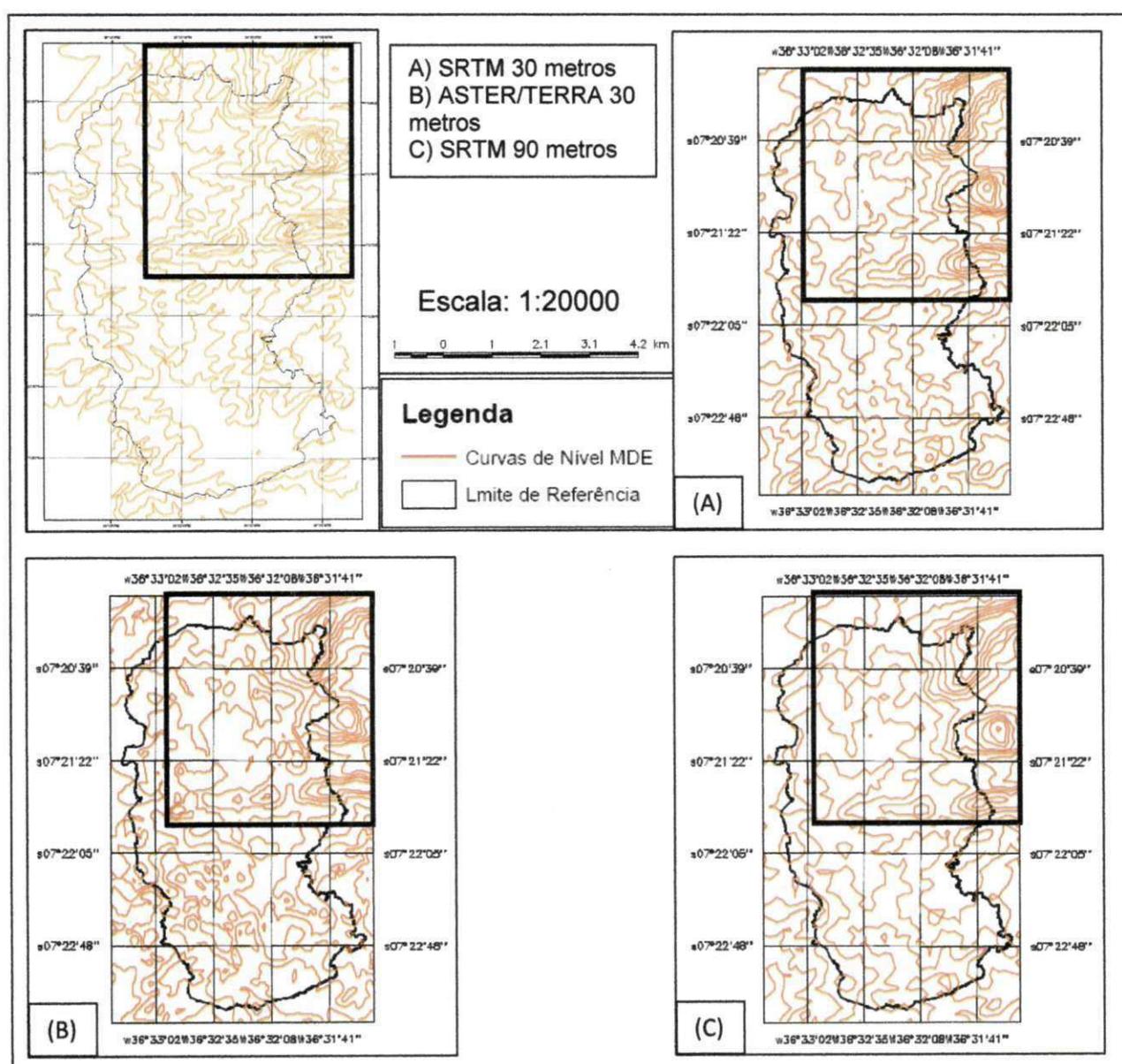


Figura 96 – Comparações entre curvas de nível – Imagens Orbitais.

Os valores relevo apresentados pelos MDE obtidos via curvas de nível de 10 metros do levantamento convencional não representou proximidade com o dado de campo, onde em oito produtos interpolados não se obteve resultado. A única classe que apresentou valor próximo foi à classe moderado do MDE *Média Simples*.

Tabela 10 – Classes de Relevo MDE Curvas de Nível de 5 metros.

Tipos	Interpoladores	MDE a partir das Curvas de Nível 5 Metros (área em km ²)						
		Baixo	Baixo - Moderado	Moderado	Moderado - Alto	Alto	Alto - Muito Alto	Muito Alto
Médias	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	0.551	0.096	0.32	0.258	0.104	9.363	3.576
	<i>Media Ponderada</i>	0.381	0.415	0.298	0.437	1.316	16.3	3.352
	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	0.722	0.141	0.089	0.085	0.144	9.588	3.625
	<i>Media Simples</i>	0.016	0.183	0.269	0.236	0.258	8.194	3.562
Vizinhança	<i>Vizinho mais Próximo</i>	0.944	0	0	0	0	10.922	3.084
Splines	<i>Bilinear</i>	0	0.247	0.173	0.14	0.245	8.927	9.03
Estudo de Campo		2.228	4.811	4.826	1.491	0.254	0.18	0.037

Os produtos de relevo provenientes das interpolações das curvas de 5 metros se apresentaram na maior parte dos MDE subestimando os valores das classes de Baixo a Alto. Os produtos por *Média Simples* e *Spline Bilinear* na classe Moderado – Alto estão próximos do dado de campo. O produto *vizinho mais próximo* não foi capaz de gerar resultados na maior parte das classes. Todos os produtos superestimaram valores das classes Alto – Muito Alto e Muito Alto, onde variam valores de 3 a 10.

Tabela 11 – Classes de Relevância MDE Pontos Cotados Levantamento Convencional.

Tipos		MDE a partir dos Pontos Cotados do Levantamento Convencional (área em km ²)						
		Baixo	Baixo - Moderado	Moderado	Moderado - Alto	Alto	Alto - Muito Alto	Muito Alto
	Interpoladores							
Médias	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	0.004	0.016	0.052	0.124	0.274	6.421	3.5
	<i>Media Ponderada</i>	0.003	0.008	0.019	0.056	0.208	7.676	1.724
	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	0.004	0.016	0.052	0.124	0.274	10.174	3.484
	<i>Media Simples</i>	1.475	1.552	0.717	0.303	0.289	0.08	0.174
Estatísticas	<i>IQD Variável</i>	0.004	0.008	0.0236	0.056	0.164	1.07	5.478
	<i>IQD Fixo</i>	0.004	0.008	0.023	0.056	0.163	1.048	5.773
Estudo de Campo		2.228	4.811	4.826	1.491	0.254	0.18	0.037

Os valores de relevância expressos na Tabela 11 se apresentam divergentes na maioria das classes, sendo apenas semelhantes no que compreende os produtos de *média* na classe Alto.

Tabela 12 – Classes de Relevância MDE Pontos Cotados Levantamento Automatizado.

Tipos		MDE a partir dos Pontos Cotados do Levantamento Automatizado (área em km ²)						
		Baixo	Baixo - Moderado	Moderado	Moderado - Alto	Alto	Alto - Muito Alto	Muito Alto
	Interpoladores							
Médias	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	1.565	3.222	5.022	1.743	0.308	0.127	0.008
	<i>Media Ponderada</i>	1.148	2.318	3.78	3.458	0.985	0.103	0.047
	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	1.357	3.114	4.575	1.634	0.705	0.078	0
	<i>Media Simples</i>	1.453	2.296	3.424	3.554	1.069	0.105	0.097
Vizinhança	<i>Vizinho mais Próximo</i>	1.17	2.631	4.18	2.977	0.734	0.11	0.079
Estatísticas	<i>IQD Variável</i>	1.715	3.739	5.226	2.622	0.926	0.281	0.153
	<i>IQD Fixo</i>	1.796	4.242	5.232	2.695	0.896	0.272	0.124
Splines	<i>Bilinear</i>	1.329	2.314	3.566	3.398	1.018	0.175	0.062
	<i>Mitasova</i>	1.257	2.784	4.642	2.592	0.568	0.126	0.017
Estudo de Campo		2.228	4.811	4.826	1.491	0.254	0.18	0.037

Os MDE dos pontos cotados do levantamento automatizado estiveram mais próximos do das classes do estudo de campo. A classe Baixo esteve mais próximo nos MDE do interpolador *IQD*, o mesmo ocorrendo na classe Baixo – Moderado. Na classe Moderado os MDE de *Média Ponderada por Quadrante* e *Spline Mitasova* também se aproximaram das classes de campo. A classe Moderado – Alto, estão melhor representados nos MDE *Média Ponderada Cota Quadrante* e *Média Ponderada por Quadrante*. A classe Alto está mais próxima no MDE *Média Ponderada Cota Quadrante*. Na classe Alto – Muito Alto destaca-se o *Spline Bilinear*, enquanto que na classe Muito – Alto, o *Média Ponderada* se apresentou mais coerente. Diante desta análise é possível observar que houve uma coerência maior com o dado de campo nestes produtos, atestando que o levantamento automatizado foi melhor executado.

Tabela 13 – Classes de Relevância MDE Dados Híbridos.

Tipos		MDE a partir dos Dados Híbridos (área em km ²)						
		Baixo	Baixo - Moderado	Moderado	Moderado - Alto	Alto	Alto - Muito Alto	Muito Alto
Médias	<i>Interpoladores</i>							
	<i>Média Ponderada Cota Quadrante</i>	1.591	4.046	4.962	1.656	0.504	0.285	0.085
	<i>Média Ponderada</i>	1.429	3.728	4.93	2.338	0.662	0.176	0.008
	<i>Média Ponderada por Quadrante</i>	1.591	4.045	4.949	1.656	0.504	0.285	0.085
	<i>Média Simples</i>	1.865	5.233	5.172	1.891	0.39	0.348	0.098
Vizinhança	<i>Vizinho mais Próximo</i>	2.616	4.764	4.924	2.018	0.564	0.136	0.032
Estatísticas	<i>IQD Variável</i>	1.57	3.949	5.023	2.031	0.555	0.159	0.005
	<i>IQD Fixo</i>	1.602	3.839	5.026	2.014	0.572	0.176	0.004
	<i>Krigagem</i>	1.508	3.851	5.184	1.897	0.45	0.108	0.007
	<i>Mitasova</i>	2.115	4.889	4.362	1.085	0.206	0.025	0.004
Estudo de Campo		2.228	4.811	4.826	1.491	0.254	0.18	0.037

Os MDE por Dado Híbrido, *Média Ponderada Cota Quadrante* e *Média Ponderada Quadrante* representa mais adequadamente a classe de relevo Moderado, tendo dificuldade na representação dos extremos (Alto – Muito Alto e Muito Alto). O MDE por *Média Ponderada* da mesma forma, mas com destaque a aproximação na classe Alta a Muito Alta. A *Média Simples* foi um dos que mais se

destoou das classes de campo onde obteve apenas a aproximação na classe Baixo – Moderado e Moderado. O MDE proveniente do interpolador *Vizinho mais Próximo* teve poucas diferenças onde foram nas classes Moderado - Alto e Muito Alto. Os *IQD* também se distanciaram um pouco, mas se aproximaram quando se tratavam de áreas Altas e Muito Altas. A *Krigagem* se distanciou um pouco perdendo informações em áreas que mais foram encontradas pelos outros interpoladores como as áreas correspondentes as classes Baixa e Moderada. O *Spline Mitasova* foi o mais satisfatório, pois, conseguiu obter valores próximos do de campo.

Tabela 14 – Classes de Relevo MDE Imagens Orbitais.

Tipos	MDE	MDE de Produtos Orbitais (área em km ²)						
		Baixo	Baixo - Moderado	Moderado	Moderado - Alto	Alto	Alto - Muito Alto	Muito Alto
Orbitais	<i>SRTM 90 metros</i>	0.292	1.6	3.029	5.06	3.132	2.36	0.404
	<i>SRTM 30 metros</i>	0.438	1.685	2.975	5.158	3.208	1.9	0.272
	<i>ASTER/TERRA 30 metros</i>	1.304	2.62	4.555	2.16	0.527	0.1	0.031
Estudo de Campo		2.228	4.811	4.826	1.491	0.254	0.18	0.037

Os valores de relevo gerados a partir de produtos orbitais destoaram dos dados de campo, houve uma aproximação do produto ASTER/TERRA nas classes Moderado, Alto – Muito Alto e Muito Alto.

5.2 Comparações Estatísticas

Os parâmetros estatísticos para todos os MDE podem ser gerados através da mesma análise exploratória que foi apresentada no capítulo anterior para produtos orbitais. Um fato importante a ser ressaltado é que os MDE quando são gerados, eles estão em formato raster, ou seja, os valores de cota estão expressos em cada pixel. As análises estatísticas são abordadas diante da grade regular disponibilizada por cada MDE dentro do limite obtido (item 5.1.2). As estatísticas obtidas dos MDE das curvas de nível de 10 metros demonstram alguns aspectos. O número de pontos de uma grade retangular obtido dentro do limite encontrado não se diferenciaram muito, onde a maior diferença está no *Spline Bilinear*. A média obtida dos valores de grade dos MDE se distanciam da média dos valores do levantamento automatizado

que é de **478.548 m**. A variância é um parâmetro que mostra o quão longe os seus valores se encontram do valor esperado (média). O *vizinho mais próximo* foi o que mais se distanciou do valor esperado, o que mais se aproximou foi o *Spline Bilinear*. O desvio padrão que representa o quanto os dados possam estar dispersos, nos MDE por *Média Ponderada*, *Média Ponderada por Quadrante* e *Média Simples* ocorreu uma proximidade em seus valores de desvio o que retrata que estes MDE tendem a seguir o mesmo padrão. Além das análises vista acima o que influenciou para obter um grau de confiança foram os valores de cota que giram em torno de 400 a 575 m, uns se desprendiam do correto e estes foram o *Média Ponderada Cota Quadrante*, *Média Ponderada*, *Vizinho mais Próximo* e *Splines*. A partir da identificação destes erros discrepantes é possível observar que entre os MDE o de *Média Simples* se apresentou em padrões estatísticos mais aceitáveis.

Tabela 15 - Estatísticas dos MDE por Curvas de Nível 10 metros.

Estatísticas das Cotas	INTERPOLADORES						
	Média				Vizinhança	Splines	
	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	<i>Media Ponderada</i>	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	<i>Media Simples</i>	<i>Vizinho mais Próximo</i>	<i>Bilinear</i>	<i>Mitasova</i>
Numero de Pontos	35023	34651	33528	35797	30374	45503	37483
Média	488.199	486.454	487.039	487.378	490.767	498.97	487.783
Variância	581.178	476.683	463.43	473.748	613.015	492.73	494.511
Desvio Padrão	24.107	21.833	21.527	21.765	24.759	22.197	22.237
Coefficiente de Variação	0.049	0.044	0.044	0.044	0.05	0.044	0.045
Coefficiente de Assimetria	-3.205	-0.55	-0.398	0.241	-3.496	-0.055	-0.669
Mediana	489.253	487.019	487.81	487.656	490	500.39	488.866
Altitude Mínima	16.755	74.65	57.802	411.25	0	288.79	-22.845
Altitude Máxima	580.708	569.956	579.296	571.25	582	570.57	587.567
Quartil Inferior	474.061	470.076	470.081	471.674	510	482.34	470.658
Quartil Superior	500	499.844	500	500	510	516.71	499.954

Ao analisar as altitudes mínimas fornecidas pelas estatísticas (Tabela 15) tem-se altitudes que demonstram uma incoerência, algo que não condiz com o campo constatando discrepâncias encontradas no relevo e na declividade. Através desta análise preliminar deve-se descartar a não utilização destes modelos (*Média Ponderada Cota Quadrante, Média Ponderada, Média Ponderada por Quadrante, Vzinho mais Próximo e Splines*), poderá ocasionar erros em qualquer estudo hidrológico a ser feito. Uma pergunta que poder ser feita é porque eles tiveram limites próximos do de referência, mesmo seus valores de altitude não influenciando diretamente na obtenção de limites, umas das hipóteses é que as altitudes mínimas expressas não se encontravam próximas ao perímetro da bacia.

Tabela 16 - Estatísticas dos MDE por Curvas de Nível 5 metros.

Estatísticas das Cotas	INTERPOLADORES					
	Média				Vizinhança	Splines
	<i>Média Ponderada Cota Quadrante</i>	<i>Média Ponderada</i>	<i>Média Ponderada por Quadrante</i>	<i>Média Simples</i>	<i>Vizinho mais Próximo</i>	<i>Bilinear</i>
Numero de Pontos	35679	56254	35992	31805	37553	46909
Média	457.512	447.802	458.338	473.553	456.69	488.154
Variância	11961.9442	7515.296	13128.237	5130.281	14370.336	3374.19
Desvio Padrão	109.37	86.69	114.578	71.625	119.876	58.087
Coefficiente de Variação	0.239	0.193	0.249	0.151	0.262	0.118
Coefficiente de Assimetria	-3.257	-3.015	-3.308	-3.525	-3.437	-4.259
Mediana	485	469.982	485.049	487.5	485	496.183
Altitude Mínima	0	0	0	0	0	88.077
Altitude Máxima	575	574.917	575	573.75	575	572.691
Quartil Inferior	472.363	443.534	472.718	475.781	470	481.153
Quartil Superior	498.07	489.859	498.265	500.625	495	514.237

Entre os MDE gerados por pontos cotados de levantamento convencional o único que apresentou altitudes entre os limites plausíveis foi o de *Média Simples*, que teve o menor de desvio padrão. Devido às incoerências nas altitudes mínimas os demais não se tomaram adequados.

Tabela 17 - Estatísticas dos MDE por Pontos Cotados Levantamento Convencional

Estatísticas das Cotas	INTERPOLADORES					
	Média				Estatísticos	
	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	<i>Media Ponderada</i>	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	<i>Media Simples</i>	<i>IQD Variável</i>	<i>IQD Fixo</i>
Numero de Pontos	25985	24239	35328	11484	17011	17694
Média	494.332	479.99	487.777	483.512	470.217	470.822
Variância	1973.261	1250.725	1585.988	368.167	1506.183	1440
Desvio Padrão	44.421	35.365	39.824	19.187	38.809	37.953
Coefficiente de Variação	0.089	0.073	0.081	0.039	0.082	0.08
Coefficiente de Assimetria	-3.614	-3.296	-3.272	1.078	-4.415	-4.552
Mediana	495.295	480.308	488.017	479.812	476.603	477.29
Altitude Mínima	4.981	5.472	4.981	462.043	9.484	9.484
Altitude Máxima	582.819	572.279	582.819	543.987	540.242	540.232
Quartil Inferior	483.621	470.198	472.51	467.493	468.329	468.812
Quartil Superior	515.18	489.971	506.485	492.087	485.203	485.494

As altitudes dos MDE por pontos cotados do levantamento automatizado apresentaram-se coerentes onde nota-se que todos são possíveis candidatos a ser utilizados. Levando em consideração os valores de variância e desvio padrão do MDE por *média ponderada*, têm-se valores aceitáveis, onde o desvio padrão é menor entre todos os MDE apresentados. Verificando as pequenas diferenças estatísticas observa-se que os pontos cotados do levantamento automatizado estão melhor distribuídos espacialmente e bem mais confiáveis para se utilizar os produtos

5.1.4 Declividade

As classes de declive foram estabelecidas conforme CHAVES *et al* (2002). As tabelas de 3 a 8 apresentam uma quantificação destas classes para cada grupo de MNT gerados. Os MDE ausentes na Tabela 3 apresentaram deficiências em representar áreas maiores que 3%, ou seja, a maior parte destes MDE não é confiável para representar declividade. As declividades foram geradas de acordo com a área obtida.

Tabela 3 – Classes de Declividade MDE Curvas de Nível 10 metros Levantamento Convencional

Tipos		MDE a partir das Curvas de Nível 10 Metros (área em km ²)				
		0 a 3%	3 a 6%	6 a 12 %	12 a 20%	20 a 40%
	Interpoladores					
Médias	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	13.851	0.027	0.003	0.008	0.051
	<i>Media Ponderada</i>	13.617	0.084	0.062	0.026	0.013
	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	13.291	0.013	0.011	0.015	0.027
	<i>Media Simples</i>	14.126	0.018	0.041	0.065	0.0008
Vizinhança	<i>Vizinho mais Próximo</i>	12.007	0.044	0.009	0.001	0.02
Splines	<i>Bilinear</i>	17.889	0.072	0.032	0.016	0
	<i>Mitasova</i>	14.808	0.052	0.03	0.016	0.02
Estudo de Campo		0.657	2.963	7.045	2.028	0.254

Os valores das classes de declividade expressas na Tabela 3 apresentam um distanciamento dos valores de campo, isto reflete que os produtos de declive do MDE proveniente das curvas de nível de 10 metros em sua maioria são menos acentuados visto nas áreas de 0 a 3% é onde foram observados os maiores valores. A partir do momento em que os declives se acentuavam, mais dificuldade existia em definir tais declividades.

Tabela 4 – Classes de Declividade MDE Curvas de Nível 5 metros Levantamento Convencional

Tipos		MDE a partir das Curvas de Nível 5 Metros (área em km ²)				
		0 a 3%	3 a 6%	6 a 12 %	12 a 20%	20 a 40%
Média	Interpoladores					
	<i>Media Simples</i>	11.271	0.127	0.263	0.501	0.255
Splines	<i>Bilinear</i>	17.156	0.419	0.209	0.23	0.315
Estudo de Campo		0.657	2.963	7.045	2.028	0.254

Nos produtos de declividade obtidos pelos MDE das curvas de nível de 5 metros os únicos que se apresentaram com valores para todas as classes foram os descritos na Tabela 4.

Com relação aos produtos *Média Simples* e *Spline Bilinear*, nota-se que são semelhantes aos das curvas de nível de 10 metros, onde apenas a classe de 20 a 40% (*Média Simples*) conseguiu se aproximar do dado de campo, contrapondo-se com o anterior.

Tabela 5 – Classes de Declividade MDE Pontos Cotados Levantamento Convencional.

Tipos		MDE a partir dos Pontos Cotados Levantamento Convencional (área em Km ²)				
		0 a 3%	3 a 6%	6 a 12 %	12 a 20%	20 a 40%
	Interpoladores					
Médias	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	9.63	0.356	0.192	0.104	0.056
	<i>Media Ponderada</i>	9.129	0.357	0.11	0.04	0.011
	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	13.422	0.354	0.196	0.103	0.055
	<i>Media Simples</i>	4.593	0	0	0	0
Estudo de Campo		0.657	2.963	7.045	2.028	0.254

As declividades dos MDE gerados a partir dos pontos cotados de levantamento convencional vem apoiar a idéia de ausência de pontos em algumas áreas que pudessem representar adequadamente as classes declive, isto porque este dado não foi capaz de extrair algum resultado das classes na maioria dos MDE.

A maioria dos MDE geraram declividades divergentes do estudo de campo (Tabela 6), encontrando resultados significativos nas área de 3 a 6%, enquanto que nas demais obteve-se muitos valores abaixo de um. Um fator interessante é praticamente a ausência de resposta em alguns interpoladores na classe de 20 a 40%.

Tabela 6 – Classes de Declividade MDE Pontos Cotados Levantamento Automatizado.

Tipos		MDE a partir dos Pontos Cotados Levantamento Automatizado (área em km ²)				
		0 a 3%	3 a 6%	6 a 12 %	12 a 20%	20 a 40%
	Interpoladores					
Médias	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	10.956	0,968	0,69	0.003	0
	<i>Media Ponderada</i>	10.056	1.358	0.1	0.006	0
	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	10.568	0.843	0.05	0.002	0
	<i>Media Simples</i>	11.281	0.686	0.031	0	0
Vizinhança	<i>Vizinho mais Próximo</i>	10.532	0.521	0.036	0	0
Estatísticos	<i>IQD Variável</i>	13.934	0.989	0.052	0.003	0
	<i>IQD Fixo</i>	13.258	1.092	0.073	0.007	0.001
Splines	<i>Mitasova</i>	10.978	0.884	0.099	0.024	0
Estudo de Campo		0.657	2.963	7.045	2.028	0.254

Na Tabela 7 é possível observar uma semelhança com os anteriores onde tem uma maior concentração nas classes de 0 a 3%. Na classe de 3 a 6% destaca-se os MDE por *Média Simples* e *Vizinho mais Próximo* que apresentaram valores acima de um, em contrapartida as demais classes ficaram distantes dos valores de campo.

Tabela 7 – Classes de Declividade MDE Dados Híbridos.

Tipos		MDE a partir dos Dados Híbridos (área em km ²)				
		0 a 3%	3 a 6%	6 a 12 %	12 a 20%	20 a 40%
	Interpoladores					
Médias	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	11.611	0.931	0.151	0.043	0.003
	<i>Media Ponderada</i>	12.136	0.7	0.074	0.018	0.004
	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	11.594	0.932	0.152	0.043	0.003
	<i>Media Simples</i>	11.969	2.188	0.374	0.047	0.002
Vizinhança	<i>Vizinho mais Próximo</i>	12.658	1.584	0.262	0.115	0.03
Estatísticos	<i>IQD Variável</i>	12.049	0.74	0.076	0.017	0.004
	<i>IQD Fixo</i>	12.121	0.717	0.091	0.014	0
	<i>Krigagem</i>	12.64	0.337	0.028	0.001	0
Splines	<i>Mitasova</i>	11.679	0.556	0.098	0.02	0.006
Estudo de Campo		0.657	2.963	7.045	2.028	0.254

Tabela 8 – Classes de Declividade MDE Imagens Orbitais

Tipos	MDE	MDE de Produtos Orbitais (área em Km ²)				
		0 a 3%	3 a 6%	6 a 12 %	12 a 20%	20 a 40%
Orbitais	<i>SRTM 90 metros</i>	12.934	2.822	0.12	0	0
	<i>SRTM 30 metros</i>	14.041	1.579	0.0145	0	0
	<i>ASTER/TERRA 30 metros</i>	8.625	2.46	0.197	0.016	0.0009
Estudo de Campo		0.657	2.963	7.045	2.028	0.254

Os produtos orbitais expressaram em grande parte diferenças dos valores de campo como no caso das classes de 0 a 3%, mas houve uma proximidade na classe de 3 a 6% nos produtos SRTM de 90 metros e ASTER/TERRA, no restante houve uma deficiência em apresentar valores próximos do de campo.

5.1.5 Relevô

As classes de Relevô foram estabelecidas conforme CHAVES *et al* (2002). As Tabelas de 9 a 13 apresentam uma quantificação destas classes para cada grupo de MNT gerados. Os MDE ausentes apresentaram deficiências em representar áreas, pois tiveram drenagens inconsistentes. O relevô foi gerado de acordo com a área obtida.

Tabela 9 – Classes de Relevô MDE Curvas de Nível de 10 metros.

Tipos		MDE a partir das Curvas de Nível 10 Metros (área em km ²)						
		Baixo	Baixo - Moderado	Moderado	Moderado - Alto	Alto	Alto - Muito Alto	Muito Alto
Médias	<i>Interpoladores</i>							
	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	0.002	0.004	0.012	0.005	0.003	10.865	3.115
	<i>Media Ponderada</i>	0.001	0	0.002	0.007	0.045	10.654	3.149
	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	0	0	0.001	0.011	0.011	11.35	2.035
	<i>Media Simples</i>	0.141	0.414	4.775	5.925	2.479	0.428	0.155
Vizinhança	<i>Vizinho mais Próximo</i>	0.006	0	0	0	0	9.038	3.105
Splines	<i>Bilinear</i>	0	0.003	0.01	0.179	8.377	9.1	0.529
Estudo de Campo		2.228	4.811	4.826	1.491	0.254	0.18	0.037

gerados por eles. Ao analisar dois produtos que tiveram o limite gerado mais próximo do limite de referência, como é o caso do *vizinho mais próximo* e *média simples*, vemos uma assimetria entre os mesmos, expressos pelo coeficiente de assimetria. A utilização de tais MDE em estudos diversos é possível, já que as diferenças são sutis entre eles no que concerne as análises estatísticas.

Tabela 18 - Estatísticas dos MDE por Pontos Cotados Levantamento Automatizado.

Estatísticas das Cotas	INTERPOLADORES								
	Média				Vizinhança	Estatísticos		Splines	
	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	<i>Media Ponderada</i>	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	<i>Media Simples</i>	<i>Vizinho mais Próximo</i>	<i>IQD Variável</i>	<i>IQD Fixo</i>	<i>Bilinear</i>	<i>Mitasova</i>
Numero de Pontos	29994	2906	28662	30000	29710	81151	67825	29874	29967
Média	488.719	488.546	490.112	488.516	489.439	492.797	491.197	488.639	489.072
Variância	361.322	322.429	377.903	330.833	359.284	509.128	488.749	330.459	352.99
Desvio Padrão	19.008	17.956	19.439	18.188	18.954	22.563	22.107	18.178	18.788
Coeficiente de Variação	0.038	0.0036	0.039	0.037	0.038	0.004	0.044	0.037	0.038
Coeficiente de Assimetria	0.245	0.059	0.27	0.102	0.272	0.577	0.579	0.035	0.192
Mediana	489.139	489.131	489.401	489.126	489.04	491.567	490.393	489.481	489.489
Altitude Mínima	447.657	448.754	449.275	450.151	447.529	447.611	447.547	447.761	446.909
Altitude Máxima	570.842	55.152	557.489	552.501	562.67	578.536	578.526	553.781	568.706
Quartil Inferior	475.673	476.139	476.402	475.493	477.109	477.656	476.69	475.777	476.416
Quartil Superior	500.759	500.669	501,920	500.565	501.75	505.509	504.81	500.864	501.15

De acordo com as estatísticas todos os dados híbridos se apresentaram como alternativa para serem utilizados em algum estudo que necessite deste MDE como dado de entrada. Se for restringir ainda mais a busca por um MDE mais adequado dentro dos dados híbridos observe os que apresentam um melhor coeficiente de assimetria que no caso é da *krigagem* e o de *Média Ponderada*. O MDE que teve

maior variação foi Média Simples e os que tiveram uma maior dispersão, foram o *Média Ponderada*, *Krigagem* e *Spline Mitasova*, é possível observar que todos os valores estão próximos. Ressalta-se que as análises estatísticas é uma parte das análises feitas para se obter um MDE aceitável, é possível observar alguns casos de respostas estatísticas positivas, mas em outros casos como drenagem e limite os MDE se adaptam melhor. O principal objetivo é evitar discrepâncias que favoreçam a utilização de um MDE errado, como no caso de altitudes e assimetrias muito fora dos padrões.

Tabela 19 - Estatísticas dos MDE por Dados Híbridos.

Estatísticas das Cotas	INTERPOLADORES								
	Média				Vizinhança	Estatísticos			Splines
	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	<i>Media Ponderada</i>	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	<i>Media Simples</i>	<i>Vizinho mais Próximo</i>	<i>IQD Variável</i>	<i>IQD Fixo</i>	<i>Krigagem</i>	<i>Splines Mitasova</i>
Numero de Pontos	32832	33181	32796	37499	37646	33235	33090	130076	31724
Média	491.679	488.502	491.681	488.797	486.239	489.076	489.337	488.663	489.927
Variância	507.526	368.897	508.168	467.123	425.587	397.414	401.878	365.802	377.374
Desvio Padrão	22.528	19.206	22.542	21.613	20.629	19.935	20.046	19.125	19.426
Coefficiente de Variação	0.045	0.039	0.045	0.044	0.042	0.04	0.04	0.039	0.03
Coefficiente de Assimetria	0.791	0.36	0.79	0.895	0.575	0.407	0.414	0.357	0.44
Mediana	490.027	488.269	490.043	487.213	485	488	488.455	3.234	489.575
Altitude Mínima	447.561	447.597	447.561	448.675	447.529	447.758	447.94	447.595	447.964
Altitude Máxima	581.469	569.656	581.469	574.753	573.9	571.243	571.166	573.592	590.578
Quartil Inferior	475.698	473.354	475.653	471.144	471.14	473.807	473.729	474.376	476.575
Quartil Superior	502.725	500.467	502.738	500.439	499.17	501.137	501.349	500.398	501.294

Apesar dos produtos orbitais apresentarem uma coerência em suas informações estatísticas pode-se observar alguns fatores que exemplifica o produto que deva ser utilizado já que suas diferenças estatísticas são sutis. O coeficiente de assimetria

expressa uma distribuição mais simétrica na SRTM de 30 metros que por sua vez tem um desvio padrão maior e um coeficiente de variação igual ao ASTER/TERRA.

Tabela 20 - Estatísticas dos MDE dos Produtos Orbitais.

Estatísticas das Cotas	Imagens Orbitais		
	SRTM 90 metros	SRTM 30 metros	ASTER/TERRA 30 metros
Numero de Pontos	1845	16405	11819
Média	484.911	482.771	482.262
Variância	377.964	368.647	350.017
Desvio Padrão	19.441	19.2	18.708
Coeficiente de Variação	0.04	0.039	0.038
Coeficiente de Assimetria	-0.048	-0.105	0.224
Mediana	485	483.528	484
Altitude Mínima	432	430.743	439
Altitude Máxima	530	529.299	564
Quartil Inferior	471	470.257	469
Quartil Superior	499	494.933	493

5.3 Análise Comparativa dos Parâmetros Morfométricos

Os parâmetros morfométricos são gerados para caracterizar a forma de uma bacia hidrográfica e quantificar aspectos importantes para estudos hidrológicos. Os dados do IBESA (2004) são utilizados como referência para a análise comparativa.

Os MDE das curvas de nível de 10 metros apresentaram áreas próximas aos do utilizado no IBESA (2004) nos MDE por interpoladores de *Média ponderada cota quadrante*, *Média ponderada*, *Média simples* e *Vizinho mais próximo*. As áreas se aproximaram nos quatro interpoladores de *média*. Se verificarmos os coeficientes de compacidade que é proveniente do fator de forma, temos os dois *Splines* que estão próximos dos valores de referência. Como foi possível observar nos itens 5.1.1 e 5.1.2 o *Spline Mitasova* esteve mais próximo dos limites e drenagem, então temos uma uniformidade entre as informações geradas no SIG e estas de obtidas.

Tabela 21: Parâmetros Morfométricos Curvas de Nível 10 metros

Tipos		Curvas de Nível 10 metros												
		Perímetro (Km)	Área da Bacia (Km ²)	Comp. Rio Principal (Km)	Comp. da Rede (Km)	Ordem dos Rios	Altitude Menor (m)	Altitude Maior (m)	Altitude Média (m)	Coef. de Compacidade	Densidade de Drenagem	Largura Média	Linha de Fundo (km)	Fator de Forma
Médias	<i>Interpoladores</i>													
	<i>Média Ponderada Cota Quadrante</i>	18.168	6	6.825	92.587	1 a 6	447.657	570.842	488.719	1.473	7.750	1.650	6.459	0.266
	<i>Média Ponderada</i>	28.34	8	6.375	95.587	1 a 6	448.754	555.152	488.546	2.343	8.335	1.879	6.102	0.308
	<i>Média Ponderada por Quadrante</i>	30.7	5	6.28	85.895	1 a 6	449.275	557.489	490.112	2.548	7.545	1.905	5.976	0.319
	<i>Média Simples</i>	17.306	5	6.374	133.812	1 a 6	450.151	552.501	488.516	1.402	11.202	1.954	6.114	0.320
Vizinhança	<i>Vizinho mais Próximo</i>	31.54	11.02	7.136	114.437	1 a 6	447.529	562.669	489.439	2.660	10.364	1.722	6.4	0.269
Estatísticos	<i>IQD Fixo</i>	21.154	1	7.145	167.984	1 a 6	447.547	578.526	491.971	1.515	10.893	2.265	6.747	0.336
	<i>IQD Variável</i>	19.794	2	7.04	184.567	1 a 6	447.611	578.536	492.797	1.446	12.562	2.267	6.462	0.350
Spline	<i>Bilinear</i>	17.295	5	6.705	96.078	1 a 6	447.761	553.781	488.639	1.406	8.104	1.893	6.262	0.302
	<i>Mitasova</i>	17.387	2	6.583	93.424	1 a 5	446.909	568.706	489.072	1.409	7.830	1.956	6.1	0.321
<i>Parâmetros Atuais</i>		19.7	13.6	5.3						1.5	4.8			0.48

As análises a serem feitas nos parâmetros morfométricos devem estar baseadas nos resultados apresentados nos produtos de drenagem, limites, declividade, relevo e análises estatística. No caso dos MDE gerados por curvas de nível de 5 metros do levantamento convencional tem-se os MDE por *Média Ponderada Cota Quadrante e Média Ponderada por Quadrante* que representaram drenagens e limites com padrões próximos ao de referência. Diante disto observam-se os seguintes aspectos nos padrões de drenagem expressos nos parâmetros morfométricos (Tabela 22), o comprimento do rio principal se distanciou do de referência, as densidades de drenagem foi as que mais se aproximaram em comparação com os demais MDE dos outros produtos utilizados.

Em relação aos parâmetros físicos, destaca-se além dos dois MDE citados anteriormente, inclui-se o por *Média Simples*, onde seu perímetro é o terceiro mais próximo do de referência precedido pelos MDE por *Média Ponderada Cota Quadrante e Média Ponderada por Quadrante*, em termos de área o que mais se aproximou foi o *Média Ponderada por Quadrante e o Média Ponderada Cota Quadrante*, mas quase todos os MDE se aproximaram do de referência onde apenas os *Spline Bilinear e Média Ponderada* se distanciaram bruscamente do valor de referência.

De acordo com o coeficiente de compacidade têm-se os MDE *Média Ponderada Cota Quadrante e Spline Bilinear* os que mais se aproximaram do valor de referência, mas vale ressaltar que entre estes dois o que mais se aproximou do limite de referência (item 5.1.2) foi o *Média Ponderada Cota Quadrante*. O MDE por *Vizinho mais Próximo* apesar de ter apresentado em área e no comprimento do rio principal valores próximos do de referência ficou devendo no fator de forma e coeficiente de compacidade. O MDE *Spline Bilinear* apresentou um bom resultado de coeficiente de compacidade, mas não teve bons resultados próximos ao IBESA (2004) nos demais parâmetros, algo que pode ser estendido ao *Média Ponderada* já que o mesmo só esteve próximo no valor inerente ao fator de forma.

Diante dos resultados externados acima, entre os MDE analisados, se destaca o *Média Ponderada Cota Quadrante* que esteve próximo dos valores de referência em três parâmetros.

Tabela 22: Parâmetros Morfométricos Curvas de Nível 5 metros

Tipos		Curvas de Nível 5 metros												
		Perímetro (Km)	Área da Bacia (Km ²)	Comp. Rio Principal (Km)	Comp. da Rede (Km)	Ordem dos Rios	Altitude Menor (m)	Altitude Maior (m)	Altitude Média (m)	Coef. De Compacidade	Densidade de Drenagem	Largura Média	Linha de Fundo (km)	Fator de Forma
Médias	Interpoladores													
	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	20.065	14.21	7.729	108.7	1 a 5	0	575	457.51	1.491	7.651	1.866	7.615	0.245
	<i>Media Ponderada</i>	28.405	22.43	7.927	216.31	1 a 6	0	574.917	447.8	1.679	9.645	3.029	7.404	0.409
	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	19.786	14.34	7.612	101.03	1 a 5	0	575	458.34	1.463	7.047	1.929	7.432	0.260
	<i>Media Simples</i>	17.351	12.68	7.17	110.95	1 a 5	0	574.375	470.6	1.364	8.750	1.819	6.97	0.261
Vizinhança	<i>Vizinho mais Próximo</i>	24.844	14.96	6.454	120.16	1 a 5	0	575	456.69	1.799	8.035	2.304	6.492	0.355
Spline	<i>Bilinear</i>	23.502	18.73	9.584	199.95	1 a 5	88.077	572.691	488.15	1.521	10.678	1.962	9.542	0.206
	<i>Parâmetros Atuais</i>	19.7	13.6	5.3						1.5	4.8			0.48

As discussões pertinentes relacionado aos MDE por pontos cotados do levantamento convencional estão em sua distribuição de pontos pela bacia, onde existiam áreas que necessitavam de uma maior atenção por parte do responsável pelo levantamento topográfico. Com a ausência de representação de pontos cotados em determinadas áreas da bacia os MDE ficaram deficitários, assim sendo difícil abordar com mais propriedade os produtos proporcionados por estes MDE.

Mesmo diante do contexto de deficiências apresentadas os parâmetros morfométricos foram analisados. O comprimento do rio principal esteve próximo nos MDE *IQD Fixo*, *IQD Variável* e *Média Ponderada Cota Quadrante*, mas vale salientar que este último MDE tem a drenagem mais densa.

Nos parâmetros físicos os perímetros dos MDE próximos ao de referência é o *Média Ponderada Cota Quadrante* e *Média Ponderada*, mas entre estes dois o que teve uma área próxima foi o *Média Ponderada Cota Quadrante* somente ficando atrás do MDE por *Média Ponderada por Quadrante*. O coeficiente de compacidade está mais próximo do de referência nos MDE por *Média Ponderada Cota Quadrante*, *Média Ponderada* e *IQD Variável*, mas o único que está próximo ao valor de referência do parâmetro fator de forma é o *Média Ponderada Cota Quadrante*.

O MDE de *Média Simples* apesar de estatisticamente estar dentro de uma margem aceitável ele se mostrou impróprio para representar os parâmetros morfométricos.

O MDE dos pontos cotados do levantamento convencional que melhor expressou os parâmetros morfométricos foi o *Média Ponderada Cota Quadrante* que este próximo aos valores de referência em quatro parâmetros.

Tabela 23: Parâmetros Morfométricos Pontos Cotados Levantamento Convencional

Tipos	Pontos Cotados Levantamento Convencional													
		Perímetro (Km)	Área da Bacia (Km ²)	Comp. Rio Principal (Km)	Comp da Rede (Km)	Ordem dos Rios	Altitude Menor (m)	Altitude Maior (m)	Altitude Média (m)	Coef de Compacidade	Densidade de Drenagem	Largura Média	Linha de Fundo (km)	Fator de Forma
Médias	Interpoladores													
	<i>Media Ponderada Cota Quadrante</i>	16 501	10 34	5 934	90 502	1 a 5	4 981	582 819	494 33	1 437	8 752	1 773	5 833	0 304
	<i>Media Ponderada</i>	16 635	9 648	6 767	118 85	1 a 5	5 472	572 279	479 99	1 500	12 318	1 448	6 664	0 217
	<i>Media Ponderada por Quadrante</i>	23 157	14 06	8 882	115 22	1 a 5	4 981	582 819	487 78	1 729	8 197	1 638	8 583	0 191
Estatístico	<i>Media Simples</i>	14 213	4 531	7 755	48 131	1 a 4	462 043	543 987	483 51	1 870	10 623	0 599	7 563	0 079
	<i>IQD Fixo</i>	12 733	7 031	4 988	76 939	1 a 5	9 484	540 232	470 82	1 345	10 943	1 438	4 891	0 294
	<i>IQD Variável</i>	13 352	6 754	4 918	76 079	1 a 5	9 484	540 242	470 22	1 439	11 264	1 389	4 864	0 285
<i>Parâmetros Atuais</i>		19.7	13.6	5.3						1.5	4.8			0.48

Os parâmetros morfométricos advindos dos MDE por pontos cotados do levantamento automatizado apresentam alguns aspectos a se considerar. Apesar das drenagens expressas no item 5.1.1 estarem semelhantes à drenagem de referência os parâmetros de drenagem relatam que estas drenagens precisam ser revistas buscando um menor detalhamento já que houve valores de densidade de drenagem superestimado e um erro nos comprimentos do rio principal em torno de 1 km.

De acordo com os limites (item 5.1.2) encontrados foi possível escolher aqueles que poderiam apresentar parâmetros morfométricos mais próximos do de referência, os produtos selecionados foram *Média Ponderada Cota Quadrante*, *Média Ponderada*, *Média Simples*, *Spline Bilinear* e *Spline Mitasova*. Os valores de perímetro que estão próximos aos do IBESA (2004) são o *Média Ponderada Cota Quadrante*, *IQD Variável*, *Média Simples*, *Spline Bilinear* e *Mitasova*. Entre estes MDE o *IQD Variável* foi descartado, pois apesar de ter o perímetro mais próximo entre eles o limite está muito distante do de referência.

Os coeficientes de compacidade estão próximos do de referência no *IQD Fixo e Variável*, *Média Ponderada Cota Quadrante*, *Spline Mitasova* e *Bilinear*. Os três últimos MDE citados são os mais adequados para serem utilizados já que os mesmo além de apresentarem padrões aceitáveis desde a geração da rede de drenagem e seus limites, eles também apresentam um coeficiente de simetria que corrobora com todas as análises até então.

Com relação os valores de área encontrados todos se apresentaram muito próximos entre eles, mas distantes dos valores do IBESA (2004) com um acréscimo em torno de 2 km².

Os parâmetros morfométricos dos MDE por pontos cotados do levantamento automatizado apresentaram diferenças sutis, mas significativas para a escolha de um MDE com potencial a ser utilizado em estudos hidrológicos.

Tabela 24. Parâmetros Morfométricos Pontos Coteados Levantamento Automatizado

Tipos		Pontos Coteados Levantamento Automatizado												
		Perímetro (Km)	Área da Bacia (Km ²)	Comp Rio Principal (Km)	Comp da Rede (Km)	Ordem dos Rios	Altitude Menor (m)	Altitude Maior (m)	Altitude Média (m)	Coef de Compacidade	Densidade de Drenagem	Largura Média	Linha de Fundo (km)	Fator de Forma
Médias	Interpoladores													
	<i>Média Ponderada Cota Quadrante</i>	18 168	11 95	6 825	92 587	1 a 6	447 657	570 842	488 72	1 473	7 750	1 850	6 459	0 286
	<i>Média Ponderada</i>	28 34	11 47	6 375	95 587	1 a 6	448 754	555 152	488 55	2 343	8 335	1 879	6 102	0 368
	<i>Média Ponderada por Quadrante</i>	30 7	11 39	6 28	85 895	1 a 6	449 275	557 489	490 11	2 548	7 545	1 905	5 976	0 319
	<i>Média Simples</i>	17 308	11 95	6 374	133 81	1 a 6	450 151	552 501	488 52	1 402	11 202	1 954	6 114	0 320
Vizinhança	<i>Vizinha mais Próxima</i>	31 54	11 02	7 136	114 44	1 a 6	447 529	562 669	489 44	2 660	10 384	1 722	6 4	0 289
Estatístico	<i>IQD Fixo</i>	21 154	15 28	7 145	167 98	1 a 6	447 547	576 526	491 97	1 515	10 993	2 265	6 747	0 336
	<i>IQD Variável</i>	19 794	14 69	7 04	184 57	1 a 6	447 611	578 536	492 8	1 446	12 562	2 267	6 482	0 350
Spline	<i>Bilinear</i>	17 295	11 86	6 705	96 078	1 a 6	447 761	553 781	488 64	1 406	8 104	1 893	6 262	0 302
	<i>Mitasova</i>	17 387	11 93	6 583	93 424	1 a 5	448 909	568 706	489 07	1 409	7 830	1 956	6 1	0 321
<i>Parâmetros Atuais</i>		19.7	13.6	5.3						1.5	4.8			0.49

Grande parte dos MDE por dado híbrido gerou parâmetros morfométricos mais próximos dos dados de referência, apesar da superestimação na drenagem (item 5.1.1) e a identificação de apenas o limite (item 5.1.2) *vizinho mais próximo* como melhor produto entre todos os limites.

O perímetro se apresentou próximos do dado de referência nos MDE *Média Ponderada*, *IQD Fixo e Variável* e *Spline Mitasova*. Na área os mais próximos foram os MDE *Média Ponderada Cota Quadrante*, *Média Ponderada*, *Média Ponderada Quadrante*, *IQD Fixo e Variável*, todos em torno de 13 km², já o coeficiente de compacidade está próximo nos MDE *Média Ponderada*, *IQD Fixo e Variável* e *Spline Mitasova*.

Através dos resultados apresentados acima é possível observar que o MDE *Spline Mitasova* se apresentou mais adequado entre todos apresentados, mas existem ressalvas no que concerne aos parâmetros de drenagem, onde como todos os demais ele superestimou a densidade de drenagem e teve um erro por volta de 1 km no comprimento do rio principal.

Um dos produtos que se mostrou distante dos valores dos dados de referência foi o *Vizinho mais Próximo* que superestimou a maioria dos parâmetros morfométricos o mais provável deste fato ocorrer se deve a superestimação do lado inferior direito da bacia. Os resultados dado pelos produtos de média são satisfatórios em destaque o *Média Ponderada* que representou bem três parâmetros, assim como o IQD.

Tabela 25: Parâmetros Morfométricos Dados Híbridos

Tipos		Dados Híbridos												
		Perímetro (Km)	Área da Bacia (Km ²)	Comp Rio Principal (Km)	Comp da Rede (Km)	Ordem dos Rios	Altitude Menor (m)	Altitude Maior (m)	Altitude Média (m)	Coef de Compacidade	Densidade de Drenagem	Largura Média	Linha de Fundo (km)	Fator de Forma
Médias	<i>Interpoladores</i>													
	<i>Média Ponderada Cota Quadrante</i>	22 216	13 067	9 744	94 02	1 a 5	447 561	584 469	491 68	1 721	7 195	1 412	9 251	0 153
	<i>Média Ponderada</i>	19 368	13 207	7 981	95 897	1 a 5	447 597	569 656	488 5	1 492	7 261	1 723	7 666	0 226
	<i>Média Ponderada por Quadrante</i>	22 238	13 053	9 717	93 968	1 a 5	447 561	584 469	491 68	1 723	7 199	1 464	8 917	0 164
	<i>Média Simples</i>	23 793	14 924	7 689	130 18	1 a 5	448 675	574 753	488 8	1 726	8 723	2 034	7 338	0 277
Vizinhaça	<i>Vizinho mais Próximo</i>	23 722	14 981	7 398	127 07	1 a 5	447 529	573 9	486 24	1 716	8 482	2 274	6 588	0 345
Estatístico	<i>IOD Fixo</i>	20 146	13 164	8 182	96 34	1 a 5	447 94	571 166	489 34	1 555	7 318	1 703	7 73	0 220
	<i>IOD Variável</i>	19 953	13 229	8 44	91 507	1 a 5	447 758	571 243	489 08	1 536	6 917	1 696	7 798	0 218
	<i>Krigagem</i>	22 039	12 969	7 055	217 9	1 a 6	447 595	573 592	488 66	1 714	16 802	1 643	7 038	0 262
Spline	<i>Mitacova</i>	18 76	12 622	6 812	85 247	1 a 5	447 964	590 578	489 93	1 478	6 754	1 973	6 396	0 309
	<i>Parâmetros Atuais</i>	19.7	13.6	5.3						1.5	4.8			0.48

As discussões a serem apresentadas a seguir estão na interferência das respectivas resoluções dos produtos orbitais em apresentar resultados satisfatórios acerca dos parâmetros morfométricos.

Analisando a capacidade dos produtos orbitais desde então, observa-se uma dificuldade em representar as informações referentes à BESJC próximos dos dados de referência. Entre os produtos de limite e drenagem o que tentou buscar uma melhor proximidade com os dados de referência foi a ASTER/TERRA que por sua vez subestimou perímetros e área, apesar da proximidade no coeficiente de compacidade, mas se distanciou no fator de forma. Nos aspectos de drenagem ela apresentou uma superestimação do valor do comprimento do rio principal.

A SRTM de 90 metros apresentou uma proximidade com os valores de perímetro e área, mas é o MDE que está mais distante no coeficiente de compacidade e no fator de forma. Um dos fatores que demonstram sua incapacidade devido a sua resolução em uma área de pequeno porte como é o caso da BESJC é as respostas relativas aos parâmetros de drenagem, onde ela superestimou o comprimento do rio principal, mas foi a que mostrou menos detalhes, com valores de comprimento de rede, ordem dos rios e densidade de drenagem muito abaixo dos apresentados em todos os MDE discutidos até então.

A SRTM de 30 metros é o MDE que mais superestimou os valores de perímetro de área, apesar de ter apresentado um valor de coeficiente de compacidade satisfatório já o fator de forma foi idêntico ao da ASTER/TERRA. Os aspectos de drenagem foram superestimados em quase todos, apenas na densidade de drenagem ele se apresentou relativamente próximo.

Tabela 26: Parâmetros Morfométricos Produtos Orbitais

Tipos	Produtos Orbitais													
	Perímetro (Km)	Área da Bacia (Km ²)	Comp. Rio Principal (Km)	Comp. da Rede (Km)	Ordem dos Rios	Altitude Menor (m)	Altitude Maior (m)	Altitude Média (m)	Coef. de Compacidade	Densidade de Drenagem	Largura Média	Linha de Fundo (km)	Fator de Forma	
MDE														
<i>SRTM 90 metros</i>	19.672	15.531	8.763	24.488	1 a 3	432	530	484.911	1.398	1.577	1.736	8.948	0.194	
<i>SRTM 30 metros</i>	21.205	15.532	8.828	59.656	1 a 5	430.743	529.299	482.771	1.507	3.841	1.763	8.812	0.200	
<i>ASTER/TERRA 30 metros</i>	16.932	11.211	7.807	57.104	1 a 5	439	564	482.262	1.416	5.094	1.496	7.492	0.200	
<i>Parâmetros Atuais</i>	19.7	13.6	5.3						1.5	4.8			0.48	

5.4 Análise das Interpolações por Grades Irregulares (TIN)

Um dos objetivos deste trabalho é também testar a capacidade dos MDE de grades triangulares ou irregulares. As TIN se mostram capazes de identificar declividades mais acentuadas, mas é importante saber até onde esta técnica de interpolação pode chegar. Em alguns casos as TIN apresentaram resultados incapazes de representar declividade e gerar direções de fluxo (Figura 97) consistentes, assim não sendo possível a geração de limites e drenagens, neste caso utilizou-se a os limites da drenagem de referência.

A direção de fluxo é predominante para a geração dos demais produtos hidrológicos, elas precisam estar como apresentado no mapa A da Figura 97. Ao processar os MDE gerados por TIN eles se mostram inconsistentes nas direções de fluxo apresentando imperfeições que não proporcionaram gerar limites e drenagens.

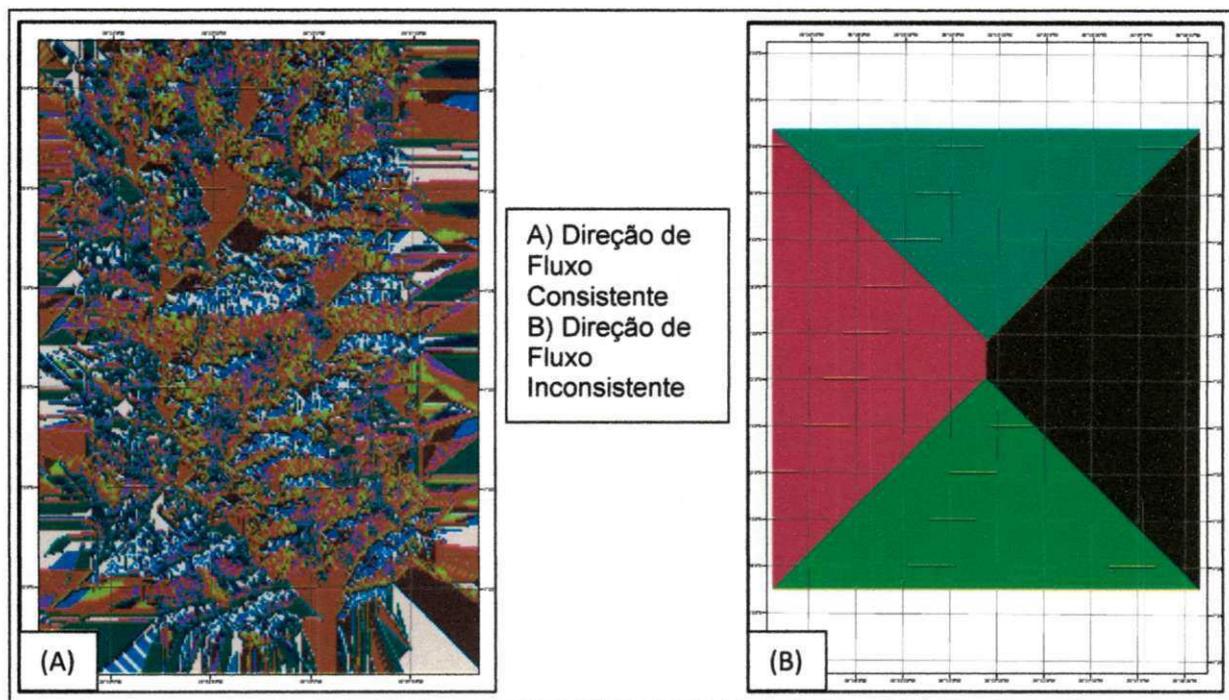


Figura 97 – Comparações entre direções de fluxo.

Foram testados dezoito produtos de grades triangulares provenientes de três tipos de TIN (*Delaunay*, *Menor Ângulo* e *Com Isolinhas*) utilizando a drenagem como linha de quebra. Entre estes vários testes o único aspecto que foi possível representar através das TIN foi o relevo dentro da área do limite de referência, onde apenas a interpolação por grade retangular Linear foi que respondeu

adequadamente. Entre os dados que apresentaram melhor resposta foram os pontos cotados do levantamento automatizado e os dados híbridos.

Tabela 27 – Classes de Relev MDE por TIN – Pontos Cotados Levantamento Automatizado.

Tipos	Interpolações	Classes de Relev - Pontos Cotados Levantamento Automatizado (km ²)						
		Baixo	Baixo - Moderado	Moderado	Moderado - Alto	Alto	Alto - Muito Alto	Muito Alto
TIN	<i>Linear TIN Com Isolinhas e Linha de Quebra</i>	0.343	3.095	5.406	3.664	0.619	0.134	0.014
	<i>Linear TIN Com Isolinhas e Sem Linha de Quebra</i>	0.343	3.095	5.406	3.664	0.619	0.134	0.014
	<i>Linear TIN Delaunay e Linha de Quebra</i>	1.981	3.816	5.193	1.769	0.377	0.127	0.016
	<i>Linear TIN Delaunay e Sem Linha de Quebra</i>	0.003	0.017	3.42	6.745	2.784	0.272	0.035
	<i>Linear TIN Menor Ângulo e Linha de Quebra</i>	1.982	3.798	5.214	1.762	0.382	0.124	0.017
	<i>Linear TIN Menor Ângulo e Sem Linha de Quebra</i>	1.982	3.798	5.214	1.762	0.382	0.124	0.017
Estudo de Campo		2.228	4.811	4.826	1.491	0.254	0.18	0.037

Entre todos os valores de relevo apresentados todos estão próximos dos valores de CHAVES *et al* (2002), mas o MDE por interpolação *Linear TIN Delaunay e com Linha de Quebra* (Drenagem de Referência) foi que teve maior proximidade na maioria das classes. As TIN do interpolador *Menor Ângulo com e sem linha de quebra* também teve resultados positivos.

É importante observar que a TIN identifica muito bem relevos suaves, e neste caso ela foi positiva, isto já é um avanço para os estudos relacionados a grades irregulares. Dentro do que já foi apresentado no relevo das TIN dos pontos cotados por levantamento automatizado tem-se os dados híbridos que ficaram um pouco mais distantes do relevo dos pontos cotados por levantamento automatizado, mas muito próximos nas classes Alto – Muito Alto e Muito Alto. Estas áreas tiveram um aporte de pontos cotados extraídos da SRTM de 30 metros, então pressupõe que isto tem contribuído para uma melhor resposta nestas áreas que corresponde a altitudes com valores em torno 480 a 575 m.

Tabela 28 – Classes de Relev MDE por TIN – Dados Híbridos.

Tipos	Interpolações	Classes de Relev - Pontos Cotados Levantamento Automatizado (km ²)						Alto - Muito Alto	Muito Alto
		Baixo	Baixo - Moderado	Moderado	Moderado - Alto	Alto			
TIN	<i>Linear TIN Com Isolinhas e Linha de Quebra</i>	1.129	3.842	5.683	2.25	0.413	0.168	0.016	
	<i>Linear TIN Com Isolinhas e Sem Linha de Quebra</i>	1.144	3.844	5.64	2.289	0.4	0.167	0.016	
	<i>Linear TIN Delaunay e Linha de Quebra</i>	1.129	3.842	5.683	2.25	0.413	0.168	0.016	
	<i>Linear TIN Delaunay e Sem Linha de Quebra</i>	1.155	3.814	5.67	2.276	0.402	0.169	0.016	
	<i>Linear TIN Menor Ângulo e Linha de Quebra</i>	1.139	3.833	5.706	2.251	0.389	0.168	0.014	
	<i>Linear TIN Menor Ângulo e Sem Linha de Quebra</i>	1.139	3.833	5.706	2.251	0.389	0.168	0.014	
Estudo de Campo		2.228	4.811	4.826	1.491	0.254	0.18	0.037	

5.5 Proposta de Restrição da Direção de Fluxo na BESJC

Diante das análises efetuadas foi possível apresentar uma forma de adquirir limites e parâmetros morfométricos equiparados aos já utilizados por pesquisadores da BESJC. Foram selecionados dez MDE que tiveram melhor resposta nas análises efetuadas até então.

Quadro 2 - Modelos Digitais de Elevação Escolhidos para a Restrição da Direção de Fluxo

MDE	DADOS UTILIZADOS
Vizinho mais Próximo	Dados Híbridos
Média Ponderada Cota Quadrante	Pontos Cotados Levantamento Automatizado
Média Ponderada	Pontos Cotados Levantamento Automatizado
Média Simples	Pontos Cotados Levantamento Automatizado
Vizinho mais Próximo	Pontos Cotados Levantamento Automatizado
Spline Bilinear	Pontos Cotados Levantamento Automatizado
Spline Mitasova	Pontos Cotados Levantamento Automatizado
Spline Mitasova	Curvas de Nível 10 metros
SRTM 30 metros	Orbital
ASTER 30 metros	Orbital

Diante do contexto da importancia da direção de fluxo no processo de delimitação de bacia buscou-se restringir a direção de fluxo para uma área já conhecida, neste caso o limite de referência. Através dos estudos de campo encontrou-se poucas distorções neste limite sendo apenas necessario responder distorções encontradas nos itens 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3.

Utilizando o limite de referência restringiu-se as direções de fluxo dos oito MDE mais concisos, além destes foram escolhidos dois produtos orbitas a fim de saber sobre sua adaptação a metodologia de restrição de direção de fluxo (Quadro 2). Após processar todos os dez MDE obteve-se os seguintes resultados.

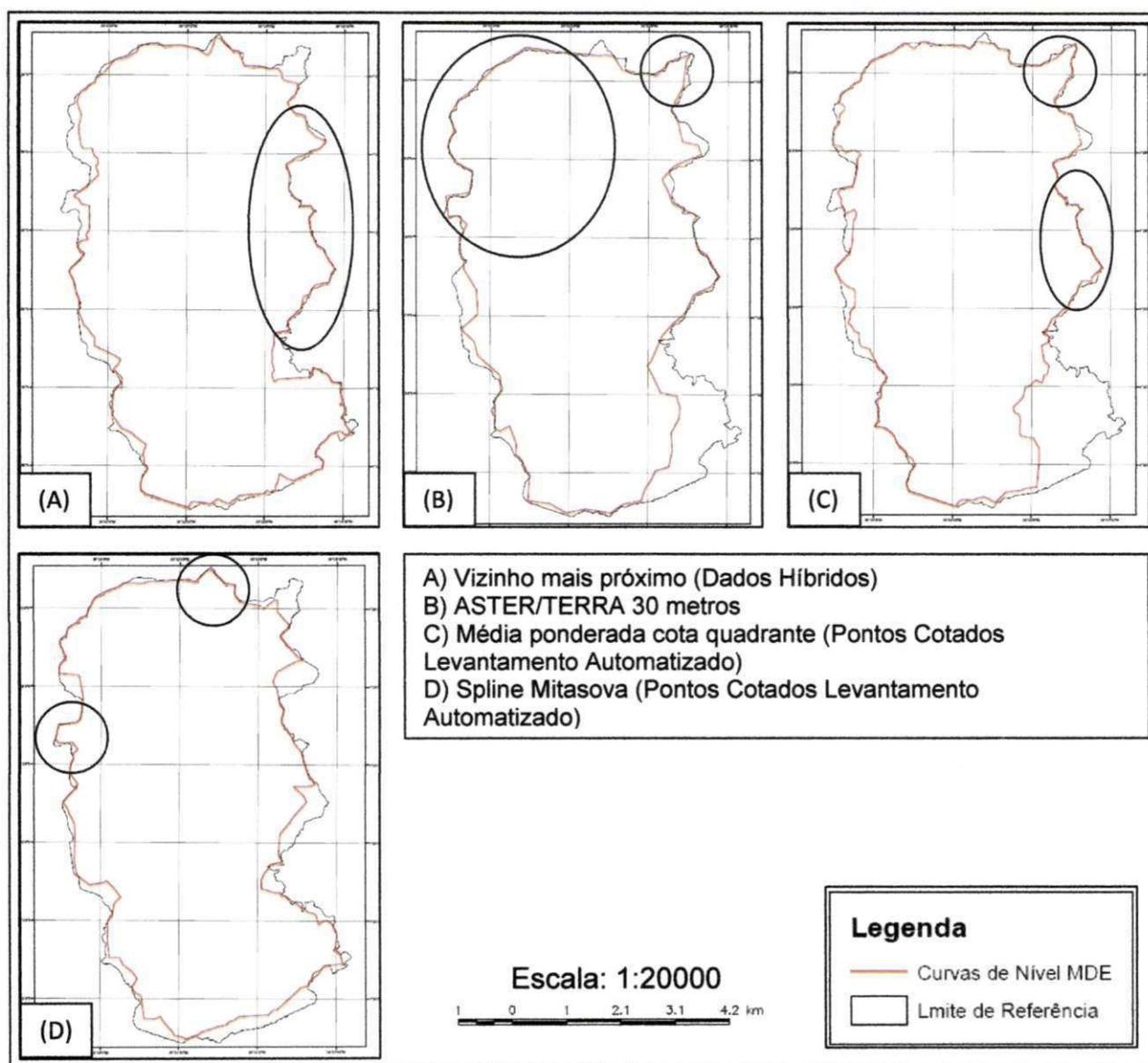


Figura 98 – Comparações entre limites com restrição das direções de fluxo.

Tabela 29: Parâmetros Morfométricos Restrição da Direção de Fluxo

Tipos		Parâmetros Morfométricos												
Produtos	MDE	Perímetro (Km)	Área da Bacia (Km²)	Comp. Rio Principal (Km)	Comp. da Rede (Km)	Ordem dos Rios	Altitude Menor (m)	Altitude Maior (m)	Altitude Média (m)	Coeff. de Compadança	Densidade de Drenagem	Latitude Média	Latitude dos Pontos	Fator de Forma
Dados Híbridos	Voronoi mais Próximo	19.04	12.666	7.073	104.863	1 a 6	447.529	573.9	486.434	1.497	0.666	1.946	8.512	0.299
Pontos Cotados Levantamento Automatizado	Média Ponderada Cota Quadrante	18.084	11.935	8.873	85.123	1 a 4	447.657	553.335	483.247	1.466	0.676	1.835	8.49	0.292
Pontos Cotados Levantamento Automatizado	Média Ponderada	28.34	11.468	6.375	95.537	1 a 6	445.754	555.152	483.546	2.343	0.566	1.678	8.102	0.303
Pontos Cotados Levantamento Automatizado	Média Simples	17.308	11.945	6.374	133.812	1 a 6	450.151	552.501	483.616	1.402	0.534	1.984	8.104	0.321
Pontos Cotados Levantamento Automatizado	Voronoi mais Próximo	31.64	11.02	7.136	114.437	1 a 6	447.529	552.659	489.439	2.690	0.640	1.702	8.4	0.299
Pontos Cotados Levantamento Automatizado	Spine Bilinear	17.295	11.655	6.705	95.078	1 a 6	447.761	553.761	483.639	1.406	0.566	1.690	8.292	0.302
Pontos Cotados Levantamento Automatizado	Spine Mitasova	17.387	11.932	6.683	93.424	1 a 5	445.939	553.705	489.072	1.409	0.562	1.968	8.1	0.321
Curvas de Nível 10 metros	Spine Mitasova	18.15	12.292	6.911	86.741	1 a 5	-22	537.557	482.145	1.450	0.562	1.656	8.679	0.314
Orbital	SRTM 30 metros	INCONSISTENCIA NA DRENAGEM												
Orbital	ASTER/TERRA 30 metros	17.261	12.098	7.095	54.314	1 a 5	439	564	482.083	1.390	0.586	1.738	8.341	0.299
Parâmetros Atuais		19.7	13.6	5.3						1.5	4.8			0.46

Os MDE restringindo sua direção de fluxo para uma área conhecida tiveram resultados que merecem destaque. Os limites obtidos geraram uma melhor representação da bacia, mas tiveram locais de mais deficiência e outros de melhor representação. A deficiência maior está no MDE ASTER/TERRA e no interpolado por *Média Ponderada Cota Quadrante* dos pontos cotados do levantamento automatizado, onde estes não reproduziram o lado inferior direito adequadamente, mas todos apresentaram alguns aspectos positivos como destacados na Figura 95.

O MDE por *Vizinho mais Próximo* do dado híbrido representou bem em quase toda sua totalidade, mas a área central direita é a que está mais próxima do limite de referência. A ASTER/TERRA conseguiu representar adequadamente o lado superior esquerdo e a área a área de serras, ou seja, são área de altitudes elevadas onde teve-se bons resultados com ela. O MDE *Média Ponderada Cota Quadrante* dos pontos cotados do levantamento automatizado apresentou boas respostas nas áreas mais onduladas da bacia como destacado. O MDE por *Spline Mitasova* por pontos cotados do levantamento automatizado apresentou muito próximo do limite de referência nas áreas destacadas, mas por outro lado mostrou uma maior deficiência em áreas de relevo mais moderado.

Os parâmetros morfométricos de acordo com a Tabela 29 tiveram os seguintes resultados. Os valores de perímetro gerados tem uma proximidade com o dado de referência no MDE *Vizinho mais Próximo* (Dados Híbridos) e nos MDE *Média Ponderada Cota Quadrante* e *Spline Mitasova* (Levantamento Automatizado) estão com um erro em torno de 1 km. A área esteve mais próxima da área do limite de referência no MDE *Vizinho mais Próximo*, mas apresenta um erro de 1km^2 . Os valores de comprimento do rio principal estão superestimado em relação ao valor de referência, entre os que apresentaram mais próximos foram o *Média Ponderada* e o *Média Simples*. O coeficiente de compacidade está mais próximo nos MDE *Vizinho mais Próximo* (Dado Híbrido), *Média Ponderada Cota Quadrante* e *Spline Mitasova* (Levantamento Automatizado), entre eles o mais satisfatório foi o *Vizinho mais Próximo*. Os dois parâmetros que apresentaram valores mais deficitários, foram a densidade de drenagem e o fator de forma, todos os dois subestimaram os valores de referência.

5.6 Análise de MNT como Dado de Entrada em um Modelo Hidrossedimentológico

Com todas as análises e a metodologia estabelecida, foi possível testar alguns MDE como parâmetros de entrada no Modelo Hidrossedimentológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Em conjunto com GUIMARÃES *et al* (2010) foi possível estabelecer uma parceria para a publicação de um artigo que discutia os MDE no SWAT.

Analisando os MDE gerados por levantamento automatizado verifica-se que quando se analisa as sub-bacias o *Média Simples* foi mais sensível para encontrar um número maior de drenos para formar as sub-bacias, seguido pelo método de *Vizinho Mais Próximo*. O MDE gerado com dados da SRTM com 30m resultou numa menor quantidade de sub-bacias. Em termos da área da bacia em questão, novamente o procedimento do método da *Média Simples* aproximou mais da área levantada pela topografia, o qual foi seguido por SRTM de 30m. Em suas simulações foi possível observar a capacidade de alguns MDE em identificar Unidades de Resposta Hidrológica (URH) obedecendo as classes de declividade. Em duas simulações processadas foi possível obter o seguinte: No que se refere a identificação das URH, para a simulação 1, foi verificado o maior número das unidades no MDE gerado pelo método de *Vizinho Mais Próximo*, seguida da *Média Ponderada por Quadrante*. A SRTM de 30 metros mostrou-se bastante fraca na identificação das URH, com quase 200 unidades a menos que o *Vizinho Mais Próximo*, e cerca de 100 unidades a menos que do segundo menor. O fator determinante da divisão das URH é a topografia do terreno, atribuída aos diferentes MDEs, obedecendo as classes de declividades escolhidas. Com isto percebeu-se um número ainda menor de URH encontrado para a Simulação 2 devido ao agrupamento numa única classe as áreas que possuem declividades superior a 4%.

O limite inferior foi verificado sempre no caso do MDE gerado pela *Média Simples* e seguido por SRTM de 30 metros. A *Média Ponderada* respondeu sempre pela terceira menor produção de sedimentos. No outro extremo, os demais modelos revezaram-se no limite superior. Foram obtidos os mesmos valores da produção entre a *Média Ponderada Cota por Quadrante* e a *Média Ponderada Por Quadrante*.

Contudo, o ponto chave que diferenciou ambas as simulações foi o aumento da produção de sedimentos na Simulação 1 em relação à 2, em nível mensal e anual para todos os MDE's. Na "Simulação 1" o *Vizinho Mais Próximo* proveu, nos valores anuais, maior produção de sedimentos, enquanto na Simulação 2 a *Média Ponderada* respondeu pela maior produção anual com um aumento em torno de 34% em relação a simulação 1. O MDE pela *Média Simples* resultou num aumento da ordem de 30% entre as duas simulações. Ainda, com a Simulação 2, o método de *Vizinho Mais Próximo* proveu o menor aumento absoluto e percentual, de 2 toneladas por hectare por ano e 2%, respectivamente. No caso de MDE da SRTM de 30 metros observou-se o segundo menor aumento, seja absoluto, ou seja, percentual de 6 toneladas por hectare por ano e 8%, respectivamente. Observou-se a menor produção de escoamento superficial na Simulação 1 para o *Vizinho Mais Próximo* e na Simulação 2 para a *Média Ponderada*.

Foi interessante notar que o total simulado com a SRTM de 30 metros foi igual para ambas simulações (houve reduções em todos os anos com exceção de apenas um, no qual contrabalançou os demais), enquanto que a *Média Simples e Média Ponderada por Quadrante* resultaram em um aumento em torno de 5% da simulação 1 para 2.

Ao final GUIMARÃES (2010) conclui que a seleção dos pontos do levantamento topográfico requer uma maior cautela, tanto na regularidade de espaçamento nas áreas uniformes, quanto a necessidade de incluir todas as irregularidades topográficas no levantamento, haja vista que sua utilização em métodos de interpolação poderá afetar significativamente no MDE gerado e conseqüentemente, os resultados da simulação do modelo SWAT.

A interpolação pelo método de *Média Simples* é, aparentemente, inadequada para fins de simulação, haja vista do resultado bastante discrepante da produção de sedimentos apresentado na Simulação 1.

Por apresentar maiores áreas íngremes que os demais, os métodos *Média Ponderada Cota por Quadrante, Ponderada por Quadrante e Vizinho Mais próximo* produziram mais sedimentos. Mesmo na Simulação 2 os dois primeiros métodos resultaram na produção de sedimentos bem maiores do que nos outros.

Os MDEs gerados a partir dos dados de SRTM com a resolução de 30 metros destacou-se com a maior estabilidade e consistência dos resultados que proporciona uma maior confiança nas aplicações em modelagem hidrossedimentológica.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após todo o desenvolvimento deste trabalho, são apresentadas conclusões e recomendações acerca da BESJC.

6.1 Conclusões

Diante das análises apresentadas de todos os MDE testados é possível obter as seguintes conclusões:

- Os produtos de declividade se mostram divergentes ao apresentado por CHAVES *et al* (2002) principalmente nas áreas de 3 a 6% onde ocorreu uma total predominância nos MDE gerados. Através de idas a campo e a característica conceitual do relevo do semiárido ser suave e ondulado é possível que os MDE estejam próximos da realidade e a metodologia por CHAVES *et al* (2002) precise ser estudada mais profundamente.
- A região que compreende a BESJC apresenta declividade que chegam ao máximo 40%, sendo esta mesma representada em menor proporção, este fato pode levar a crer que os MDE para a área da BESJC tenham dificuldade em representar declividades muito acentuadas, como foi expresso nas curvas de nível geradas e nos dados de relevo obtidos. De acordo com os resultados de limites apresentado pelos interpoladores *Média Ponderada Cota Quadrante e Média Simples* dos pontos cotados do levantamento automatizado, pode-se inferir que é possível que eles sejam eficazes em delinear limites em áreas que tenham valores de altitudes próximas ao daquela região que gira em torno de 520 a 570 metros.
- Os produtos de relevo dos MDE por dados híbridos se tornaram o mais adequado para ser utilizado em possíveis estudos.
- Entre todos os MDE disponibilizados aconselha-se a utilização em estudos hidrológicos do MDE por *Spline Mitasova* gerado por dado híbrido, pois o mesmo foi o que teve melhor desempenho em todos os fatores analisados.
- Analisando os parâmetros morfométricos foi possível verificar que os resultados apresentados auxiliaram na escolha dos MDE mais consistentes.

- De um modo geral as grades irregulares (TIN) não se apresentaram concisas, pois a grande maioria apresentou inconsistência, mas as TIN representaram bem o relevo.
- A proposta de restrição da direção de fluxo é viável desde que se tenha um limite de referência confiável e validado em campo.
- As disparidades encontradas nos valores de relevo dos produtos orbitais podem ser devido às resoluções de suas respectivas imagens e a utilização da mesma em uma área de por volta de 13 km², vale salientar que trabalhos em bacias maiores como CRUZ e ARAGÃO (2010) teve divergências consideráveis nos limites, então deve ser feitas ponderações para a utilização das mesmas onde leve em consideração tamanho da área e finalidade.
- O levantamento convencional apresentou pontos cotados insuficientes para que a interpolação torna-se concisa, isto contribuiu para uma drenagem mais distante da adotada como referência. Deve-se levar em consideração que os pontos cotados levantados em campo são precisos, o que restava para que a interpolação apresenta-se adequada era uma melhor e maior distribuição destes pontos.

Traçando um paralelo com trabalhos da literatura é possível observar uma busca incessante de que as geotecnologias tragam resultados satisfatórios relacionados a recursos hídricos, como é o caso de LOPES & SANTOS (2009), CHEREM (2009), COSTA *et al* (2007). Os resultados obtidos neste trabalho trazem aspectos semelhantes as dos autores citados, como o caso da utilização de produtos orbitais, compatibilidade de drenagens e limites. LOPES & SANTOS (2009) utilizaram a drenagem como linha de quebra, definindo como uma possibilidade de utilização dos MDE gerados através destas linhas. Algo que é pertinente já que uma das formas de utilizar linha de quebra é utilizando TIN a qual foi apresentada no presente trabalho, é uma pesquisa a ser aprofundada, pois ainda a uma dificuldade de utilização de TIN em Modelos Hidrossedimentológicos como é o caso do SWAT. Outro fator a ser destacado nos estudos de MDE em recursos hídricos é metodologia a ser utilizada, já que é de suma importância, pois esta é uma área de grande abrangência com vários caminhos a serem seguidos.

6.2 Recomendações

- Gerar valores de tempo de concentração, já que o mesmo é um dos parâmetros preponderantes para estudos em modelos hidrológicos.
- Dentro das considerações explanadas na pesquisa se faz necessário estudo de campo e através dele identificar a consistência dos relevos das TIN, assim afirmar que a TIN é uma ferramenta possível de representação de relevos no semiárido, isto também deve ser feito com dos MDE gerados pelos dados híbridos.
- Investigar diversas possibilidades da utilização das TIN como parâmetro de entrada em modelos hidrológicos.
- Alterar os valores de pixel utilizando o método de preenchimento de SINKS, para assim concertar discrepâncias como o limite inferior direito da bacia.
- Recomenda-se que esta metodologia deva ser aplicada na bacia representativa, já que a área da BESJC é pequena para estudos aprofundados de MDE, através disto é possível que se alcance resultados mais satisfatórios em escalas maiores.

Portanto, a metodologia utilizada foi muito importante para traçar diretrizes acerca da utilização dos MDE em estudos hidrológicos. Através dos resultados expostos é possível seguir um caminho para que sejam utilizados MDE com mais segurança em modelos hidrológicos, e assim proporcionar uma resposta que contribua para o desenvolvimento do semiárido nordestino.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AESA. Geoportal AESA. Disponível em: <
<http://www.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal>>. Acesso: 12 de Maio 2010.

ALBUQUERQUE, Francisco; SOBRINHO, José. A Geomorfologia do Semiárido Brasileiro nos Livros de Geografia do Ensino Médio: Agentes, Processos Morfogeneticos e Formas de Relevô. **Revista Homem, Tempo e Espaço**, Sobral – CE, 2007.

ALCARAZ, Samantha; SANNIER, Christophe; VITORINO, Antonio; DANIEL, Omar. Comparison of methodologies for automatic generation of limits and drainage networks for hidrographic basins. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n.4, p. 369 – 375, Campina Grande, 2008.

ANDRIOTTI, José. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. São Leopoldo - RS Ed. Unisinos, 2003.

ASSAD, Eduardo; CARVALHO, José. Análise Espacial da Precipitação Pluviométrica no Estado de São Paulo: Comparação de Métodos de Interpolação. **Revista Engenharia Agrícola**, São Paulo, v.25 p. 377-384, 2005.

BORGES, Alberto. **Topografia**. v.1 São Paulo, Ed. Edgard Blucher. 1977.

BURROGH, P. GIS and Geostatistics: Essential Partnes fot Spatial Analysis. **Revista Environmental and Ecological Statistics**, ed. 8, p. 361 – 377, 2001.

CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio. Introdução a Ciência da Geoinformação. In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

CÂMARA, Gilberto; SOUZA, R; Freitas, Um; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensingand GIS by object-oriented data modelling. **Revista Computers & Graphics**, ed. 20, p. 395-403, 1996.

CÂMARA, Gilberto; Medeiros. Geoprocessamento para Projetos Ambientais. In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, ed. 2, São José dos Campos, 1998.

CÂMARA, Gilberto; CARVALHO, Marilia; DRUCK, Suzana; MONTEIRO, Antônio. **Analise Espacial de Dados Geográficos**. São Paulo, Ed. EMBRAPA, 2004.

CHAGAS, Cesar; FILHO, Elpidio; ROCHA, Márcio; CARVALHO, Waldir; SOUZA, Nestor. Avaliação de Modelos Digitais de Elevação em um Mapeamento Digital de Solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.2, p. 218-226, Campina Grande, 2009.

CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; VASCONCELOS, A. C. F.; SILVA, A. P. P. (2002) **Salinidade das Águas Superficiais e suas Relações com a Natureza dos Solos na Bacia Escola do Açude Namorado e Diagnostico do Uso e Degradação das Terras – RELATORIO TÉCNICO**, UFPB, Campina Grande, Vol. 1, 114 p.

CHEREM, Luis; MAGALHÃES, Antônio; DONIZETE, Sérgio. Krigagem do MDE-SRTM para a Bacia do Alto Rio das Velhas: Avaliação Morfológica e Hidrológica do Modelo. In: X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, **Anais... Viçosa – MG, 2009.**

CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics**, Ed. McGraw-Hill, New York, 1959.

COSTA, Carlos; COSTA, Alexandre; Teixeira, Adunias; ALVES, Nilvia; ANDRADE, Eunice; SOUSA, Beatriz; LEÃO, Alípio. Comparação do Uso do SRTM para Delimitação e Caracterização Fisiográfica de uma Micro-Bacia Hidrográfica. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais**. P. 4833-4840, Florianópolis, 2007.

CRUZ, Elton. **Estudo dos Impactos do Uso do Solo Através da Modelagem da Geração do Escoamento Superficial e Erosão do Solo na Região do Cariri Paraibano**. Dissertação (Mestrado de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, 2004, Paraíba.

CRUZ, Marcus; ARAGÃO, Ricardo. Aplicação de Modelos Digitais de Elevação SRTM e GDEM/ASTER para a Delimitação de Bacias Hidrográficas: O Caso da Bacia do Rio Japarutuba em Sergipe. In: X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, **Anais... Fortaleza – CE, 2010.**

DINIZ, Laudizio. **Regionalização de Parâmetros de Modelo Chuva-Vazão Usando Redes Neurais**. Tese (Doutorado Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2008

ENGESAT. SPOT 5 Ficha Técnica Resumida. Disponível em: <<http://www.croce.ggf.br/SR/SR1/SPOT%205.htm>>. Acesso: 1 de Dez 2010.

FLAUZINO, Fabrício; SILVA, Mirna; NISHIYAMA Luiz; ROSA, Roberto., Geotecnologias aplicadas à gestão dos recursos naturais da bacia hidrográfica do Rio Paranaíba do Cerrado Mineiro. **Revista Sociedade e Natureza**, Minas Gerais, ed. 22 p. 75-91, 2010.

FLORENZANO, Teresa. **Imagens de satélite para estudos ambientais**, São Paulo, Ed: oficina de textos, 2002

GUIMARÃES, José; LUNGUINHO, Rony; SRINIVASAN, Vajapeyan; RUFINO, Iana; TAVEIRA, Itamara. A influência dos Métodos da Interpolação na Geração dos Modelos Numérico do Terreno e os Resultados da Simulação pelo Modelo Swat. In: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Brasília – DF. **Anais... 2010**

IBESA – Projeto de Implantação de Bacias Experimentais do Semiárido. **Relatório Técnico**, FINEP FUNPEC, 2004.

INPE. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil** Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso: 15 jan. 2010a.

INPE. **Site Tutorial Interpoladores** Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/modelagem.html>>. Acesso: 18 Nov. 2010b.

JATOBÁ, Lucivania; CALDAS, R. **Introdução à Geomorfologia**. Ed. Bagaço, Recife – PE, 2008.

JEMMA, F. GIS Application to Water Resources Management in the Land Planning Context: A Methodological Proposal . **Revista International Association of Hydrological Sciences (IAHS)**, ed. 211 p. 101 a 106, 1993.

JENSEN, John R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. Ed. Arêntese. São José dos Campos – SP, 2009.

JENSON, S; DOMINGUE, O. Extracting Topographic Structure form Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. **Revista Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, ed.54 p. 1593 a 1600, 1998.

LINDNER, Elfride; GOMIG, Karla; KOBIYAMA, Massato. Sensoriamento Remoto Aplicado à Caracterização Morfométrica e Classificação do Uso do Solo na Bacia Rio do Peixa/SC. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis. **Anais** p. 3405 – 3412, 2007.

LOPES, J; BRAGA, B; CONEJO, J. Simulação Hidrológica: aplicações de um modelo Simplificado. In: IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, **Anais**. 1, p. 42-62, 1981.

LOPES, W. **Efeito de Escala na Modelagem Hidrossedimentológica na Região Semiárida da Paraíba**. Dissertação (Mestrado Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande – PB, 2003.

LOPES, Felipe; SANTOS, Irani. Uma Nova Metodologia Para Elaboração De Modelos Digitais Hidrológicamente Consistentes. In: XIII Simpósio de Geografia Física Aplicada. **Anais...**, 2009.

MALARD, Maria. **Princípios Teóricos da Estereoscopia**. Belo Horizonte – MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. Apostila.

MELO, H. **Integração Entre Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas: Uma Avaliação Metodológica**. Dissertação (Mestrado de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, 2009, Paraíba.

MILLER, S. N.; GODRICH, D.C.; HERNANDEZ, M.; SEMMENS, D. J.; MILLER, R. C.; KEPNER, W. G.; GUERTIN, D. P. The Automated Geospatial Watershed Assessment Tool. **Revista Environmental Modelling & Software**, v.22, n.3, p. 365-377. 2007.

MENDES, Carlos, CIRILO, José. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos Princípios, Integração e Aplicação**. Porto Alegre -RS Ed. ABRH, 2001.

MIRANDA, J. **Fundamento de Sistemas de Informações Geográficas**. Ed. Embrapa, Brasília. 2005.

MORAES, Elisabete C.; Fundamentos de Sensoriamento Remoto. In: Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais. São Paulo, 2000. cap 1.

MORI, N. Development of a PC – based photogrammetric system. In: XII Congress ISPRS, **Anais**. vol. XXIX, p. 127 – 131, 1992.

NASA. **Project Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)** Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso: 15 jan 2010a.

NASA. **Advanced Spacebone Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)** Disponível em: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov>>. Acesso: 15 jan 2010b.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. (2005). Soil and water assessment tool - Theoretical documentation version 2005. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station,.541p.

NOVO, Evelyn. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. ed 2. Ed. Blucher São Paulo, 1995.

OLIVERA, F.; VALENZUELA, M.; SRINIVASAN, R.; CHOI, J.; CHO, H.; KOKA, S., AGRAWAL, A. (2006). ArcGis-Swat: A GeodataModeland GIS Interface for SWAT. **Journal Of American Water Resources Association (JAWRA)** April, pp 295 – 309.

PAIVA, Fernanda. **Estudo Comparativo entre Três Modelos de Base Física na Modelagem Hidrossedimentológica em Microbacias na Região Semiárida Paraibana**. Dissertação (Mestrado de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, 2008, Paraíba.

TEMBA, Plínio. **Fundamentos da Fotogrametria**. Minas Gerais – MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000. Apostila.

ROCHA, Cezar. **Geoprocessamento – Tecnologia Transdisciplinar**. Minas Gerais, Ed. Do Autor, 2000.

SANTOS, S; MONTEIRO, A; MOURATO, S; FERNANDEZ, P. Os Sistemas de Informação Geografica na Modelação Hidrológica. In: XII Congresso Nacional de Tecnologias de la Informacion Geográfica, Granada - Espanha. **Anais** p. 465 – 479, 2006.

SANTOS, Laercio. **Modelagem Hidrossedimentológica e Avaliação Comparativa de Três Modelos em Pequenas Sub-Bacias na Região Semiárida Paraibana.** Dissertação (Mestrado de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, 2008, Paraíba.

SENDRA, Joaquín. **Sistemas de Informação Geográfica.** Madrid-ES, Ed. Rialp, 1997.

SENA, Darly; VARELLA, Carlos. **Estudo do Interpolador IDW para a Utilização em Agricultura de Precisão.** Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008. Apostila.

SILVA, Luiz. **Uso Integrado de Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos na Bacia do Arroio Capané – RS: Uma Proposta de Análise por Geoprocessamento.** Dissertação (Mestrado Programa de Pós Graduação em Geologia) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo - RS, 2005.

SILVA, Aion. **Geoprocessamento Aplicado à Análise e Mapeamento Geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Ribeirão São João – TO;** Monografia (Curso de Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal do Tocantins. 2010, Tocantins.

SISCOUTTO, Robson; SZENBERG, Flávio; TORI, Romero; RAPOSO, Alberto; CELES, Waldemar; GATTASS, Marcelo. **Estereoscopia Conceitos e Tendências,** Ed. Mania de Livro. São Paulo, 2004.

SOUSA, L; NÉRY, F; MATOS, J. Metodologias de Processamento de Dados SRTM para a produção de Modelos Digitais de Direcções de Escoamento. In: 8º Congresso da Água, 2005, Figueira da Foz. Ata. 14 – 17, 2006

SPIEGEL, M. **Estatística: Resumo da Teoria.** São Paulo, Ed. Ver, 1977.

SPOHR, Renato. **Fotogrametria e Fotointerpretação.** Santa Maria - RS: Universidade Federal Rural de Santa Maria, 2009. Apostila.

SRIVASTAVA, A. 2000. **Comparison of Two Algorithms for Removing Depressions and Delineating Flow Networks from Grid Digital Elevation Models.** Master of Science in Biological Systems Engineering, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R. On The Effect Of Digital Elevation Model Accuracy On Hydrology And Geomorphology. **Revista Water Resources Research,** v. 35, n. 7, p. 2259-2268, 1999.

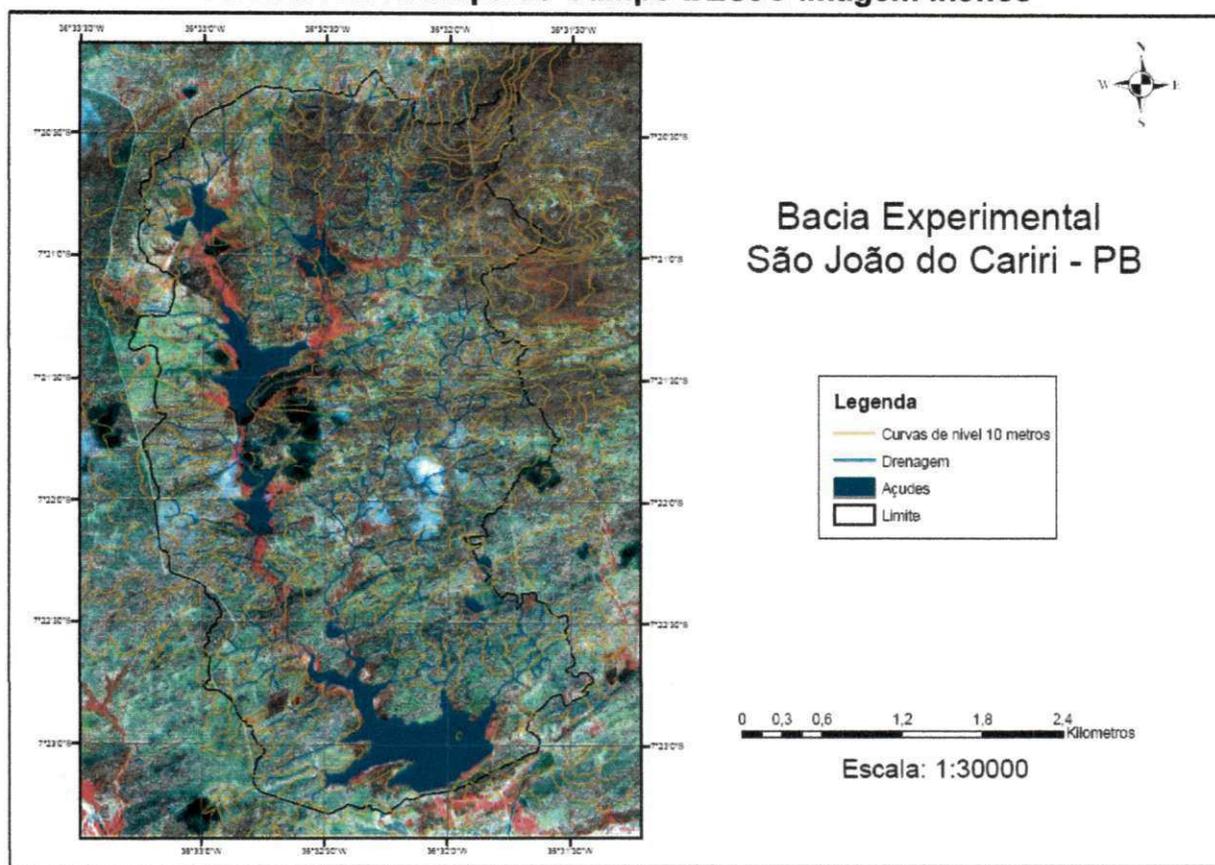
WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D.C. **Kineros. A Kinematic Runoff an Erosion Model: Documentation an USER Manual.** U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130 p.

UMBELINO, Glauco; SATHLER, Douglas; MACEDO, Diego; FELIPPE, Miguel. Aplicação de Técnicas de Geoprocessamento para a Preservação dos Recursos Hídricos e Estudos de Vulnerabilidade Socioambiental. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis. **Anais** p. 5541 – 5549, 2007.

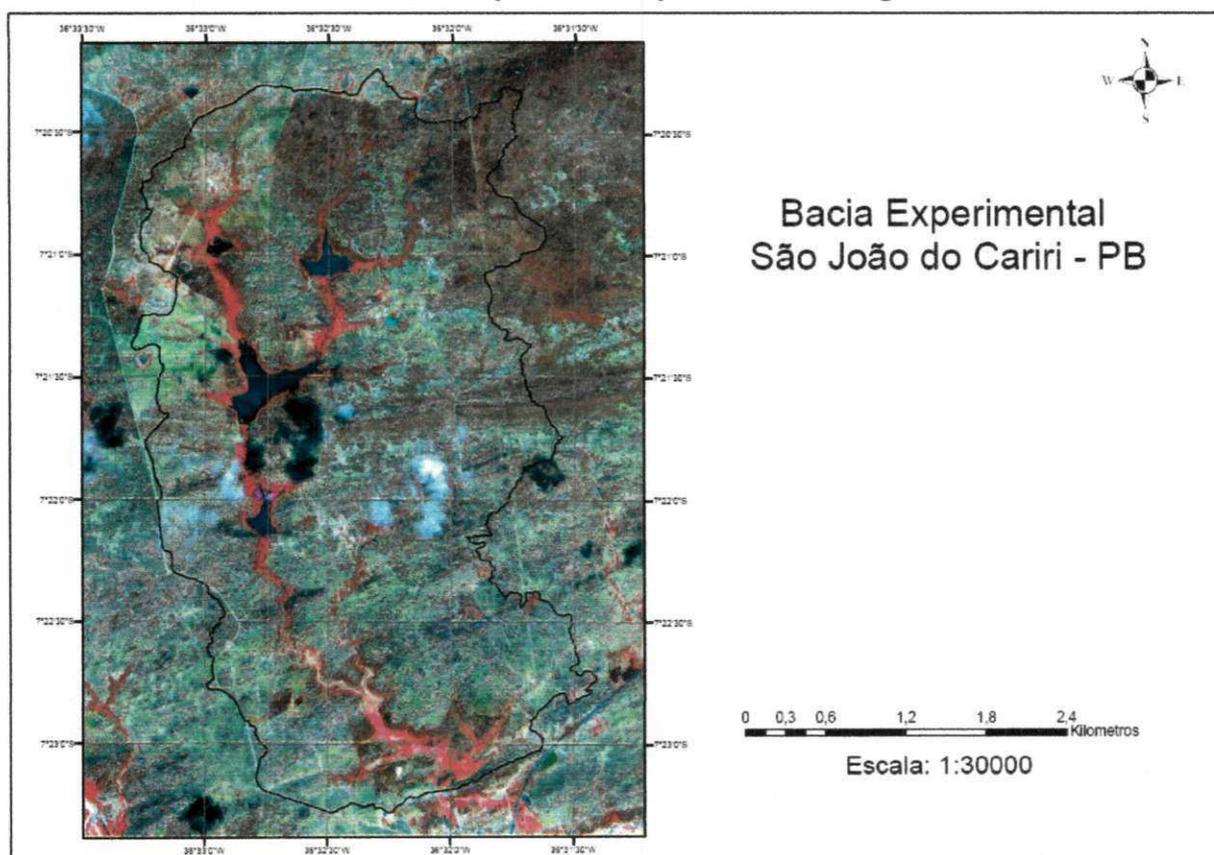
USGS. **Global Digital Elevation Model land processes distributed active archive center**. Disponível em: < <https://lpdaac.usgs.gov>>. Acesso: 10 de jul. 2010.

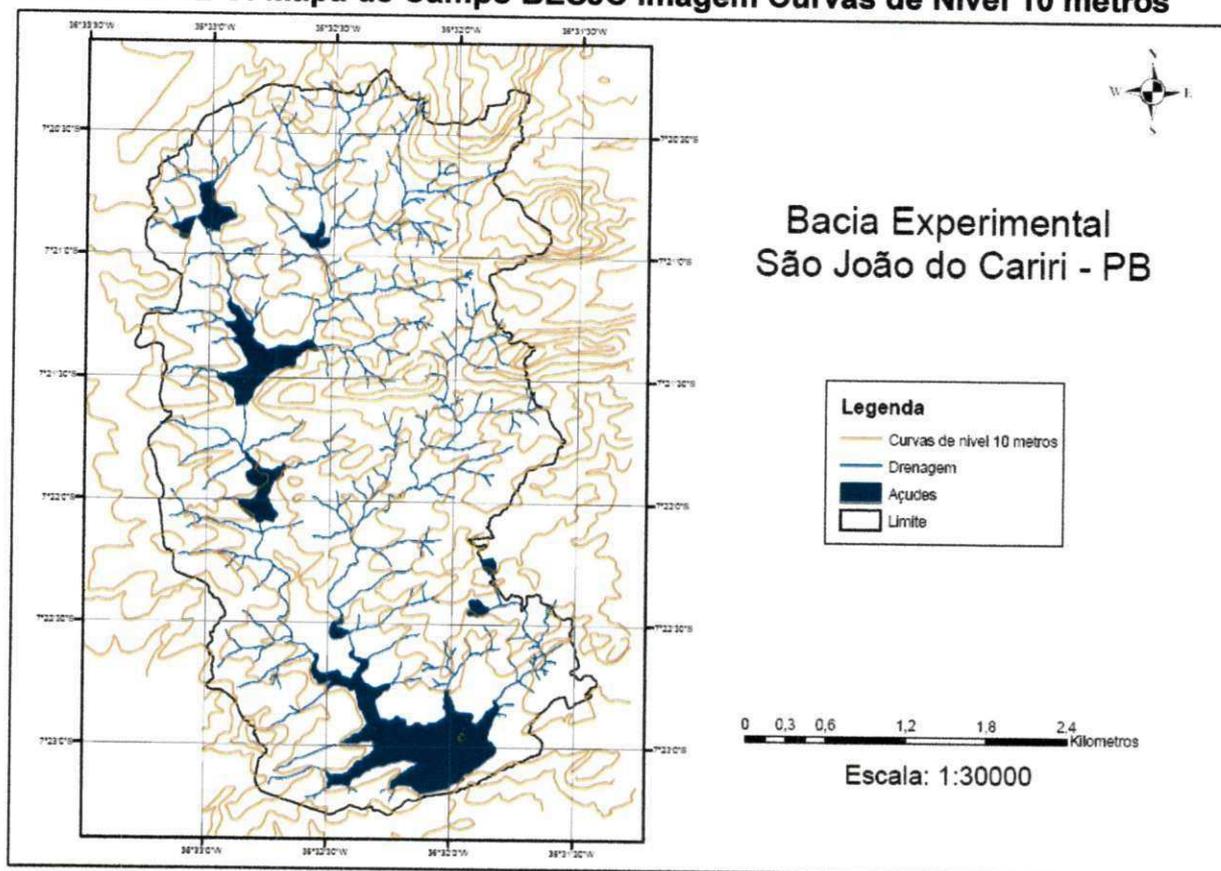
VALERIANO, Márcio. Modelo Digital de Elevação com Dados SRTM Disponíveis para a América do Sul, In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

ÂPENDICE A: Mapa de Campo BESJC Imagem Ikonos

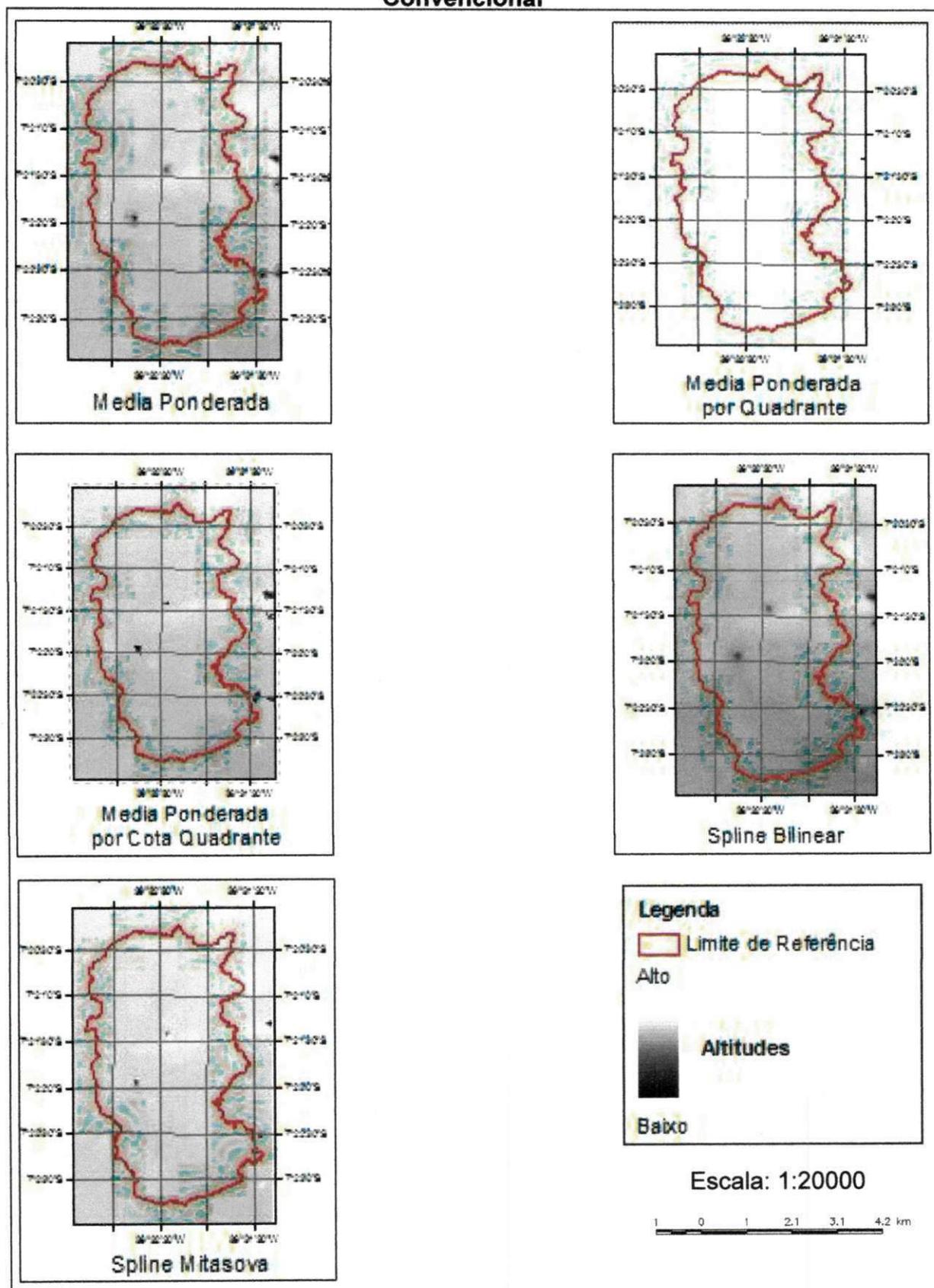


ÂPENDICE B: Mapa de Campo BESJC Imagem Ikonos 2

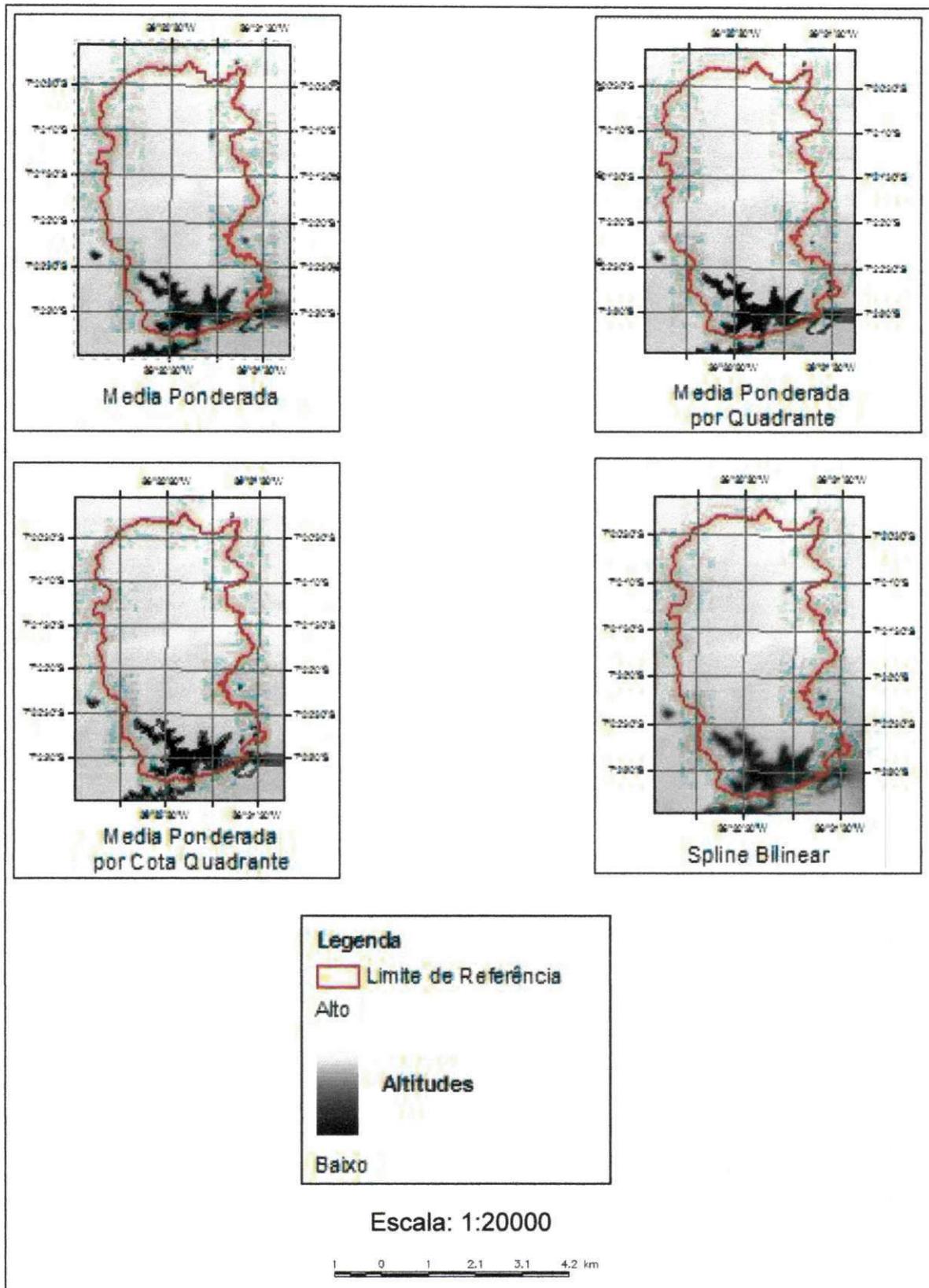


ÂPENDICE C: Mapa de Campo BESJC Imagem Curvas de Nível 10 metros

ÂPENDICE D: MDE Gerado por Curvas de Nível de 10 metros do Levantamento Convencional



ÂPENDICE E: MDE Gerado por Curvas de Nível de 5 metros do Levantamento Convencional



ÂPENDICE F: MDE Gerado por Pontos Cotados do Levantamento Convencional

