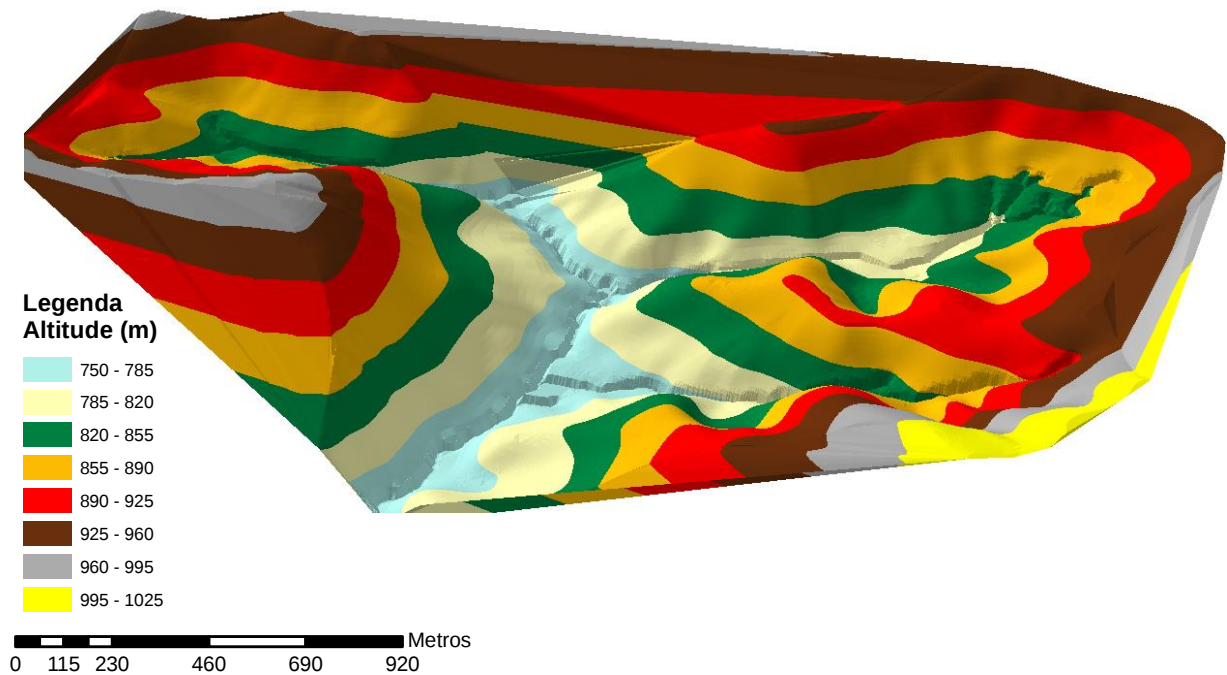




SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO REITOR JOÃO DAVID FERREIRA LIMA - TRINDADE
CEP: 88.040-900 - FLORIANÓPOLIS - SC



Modelagem Digital do Terreno: Estudo Introdutório e Suas Aplicações



Carlos Antonio Oliveira Vieira

Outubro de 2009

FLORIANÓPOLIS - SC

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

Modelagem Digital do Terreno: Estudo Introdutório e Suas Aplicações

**Monografia apresentada como parte das exigências
para o Concurso de Professor Efetivo na área de
Cartografia, Sensoriamento Remoto e Sistema de
Informações Geográficas - Processo:
23080.006571/2009-57 do Departamento de
Geociência/GCN da UFSC.**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vieira, Carlos Antonio Oliveira
Modelagem Digital do Terreno: Estudo Introdutório e Suas
Aplicações, 2009.
208 p.

Relatório de Pós-Doutorado - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas,
Programa de Pós-Graduação em Geologia, Florianópolis, 2009.

Inclui referências.

1. Geologia. 2. Modelagem Digital do Terreno. 3. Modelo
Digital de Elevação. 4. Interpolação. 5. Aplicações de MDT.
I. , . II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Geologia. III. Título.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO A MODELO DIGITAL DO TERRENO	1
1. REPRESENTAÇÃO DE SUPERFÍCIES DIGITAIS DO TERRENO	1
2. MODELOS DIGITAIS DO TERRENO.....	2
3. O PROCESSO DE MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO.....	6
4. MODELANDO A SUPERFÍCIE DIGITAL DO TERRENO	7
4.1 Funções para modelagem da Superfície	8
4.2. Métodos para a modelagem digital da superfície do terreno	8
4.2.1. Modelagem da superfície baseada em pontos	9
4.2.2. Modelagem da superfície baseada em redes de triângulos	11
4.2.3. Modelagem da superfície baseada em malhas quadradas	14
4.2.4. Modelagem da superfície híbrida	16
4.3. Escolhendo a estrutura mais adequada	17
4.4 A continuidade de superfícies do MDT	19
5. GERAÇÃO DE UMA REDE IRREGULAR DE TRIÂNGULOS	20
6. TÉCNICAS DE INTERPOLAÇÃO PARA A MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO	21
6.1 Interpoladores Baseado em Pontos	23
6.2 Interpoladores Baseado em Áreas.....	29
6.2.1 Interpolação Linear Simples.....	29
6.2.2 Interpolação Bi-linear.....	30
6.2.3 Interpolação Spline Bi-cúbicas.....	31
6.2.4 Krigagem (Kriging).....	33
6.2.5 Método de Interpolação Aproximado	37
7. QUALIDADE EM MODELOS DIGITAIS DO TERRENO	39
7.1 Avaliação da Exatidão do MDT	39
7.2 Medidas para a Exatidão do MDT	41
7.3 Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)	42
7.4 Método de Avaliação do PEC através de Testes de Hipóteses.....	43
7.4.1 Teste de Tendência.....	44
7.4.2 Teste de Precisão	44
8. USO E APLICAÇÕES DO MDT.....	46
8.1 Mapeamento e Sensoriamento Remoto	46
8.1.1. Geração automática de curvas de nível.	46

8.1.2. Geração de Ortoimagens.....	47
8.2 Engenharia Civil	47
8.2.1. Obras Viárias.....	47
8.2.2 Projetos de construção de barragens	50
8.3 Recursos Naturais e Meio-Ambiente	50
8.3.1. Mapeamento de florestas.....	50
8.3.2 Apoio ao Turismo.....	51
8.4 Telecomunicações.....	53
8.6 Navegação Marítima.....	54

CAPÍTULO II: GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO HIDROGRAFICAMENTE CONDICIONADO E DETERMINAÇÃO ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE

1. INTRODUÇÃO	55
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	59
2.1. BACIA HIDROGRÁFICA	59
2.2. ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE.....	59
2.3. UTILIZAÇÃO DE GEOPROCESSAMENTO NA DELIMITAÇÃO DE APPS.	61
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	63
3.2 MODELO DE DIGITAL DE ELEVÇÃO UTILIZANDO SIG	64
3.2.1. Procedimento para Elaboração do MDEHC.....	65
3.2.2 Determinação das Áreas de Preservação Permanente.....	69
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1 MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO HIDROGRAFICAMENTE CONDICIONADO.....	70
4.2. ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE.....	75
4.2.1. Ao Longo de Cursos D'água.....	75
4.2.2. Em Áreas de Nascente.....	76
4.2.3. Áreas com Declividade Superior a 45°.....	77
4.2.4. Área de Preservação Permanente Total da Microbacia.....	78
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	80

CAPÍTULO III: AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO PLANIMÉTRICA DE IMAGENS IKONOS ORTORETIFICADAS COM MDEs DE DIFERENTES RESOLUÇÕES

1. INTRODUÇÃO	82
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	83
2.1. MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO	83
2.1.1. MDE Gerado a Partir do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).....	85
2.2. ORTORETIFICAÇÃO.....	86
2.2.1. Modelo Rigoroso da Câmara	87
2.2.2. Modelo Polinomial Racional ou Modelo Específico da Câmara.....	88
2.2.3. Modelos Polinomiais 2D.....	88
2.3. SATÉLITE IKONOS II.....	89
3. METODOLOGIA	91
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	91
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS.....	91
3.3. LEVANTAMENTO DE CAMPO	93
3.4. GERAÇÃO DOS MDE'S.....	94
3.5. ORTORETIFICAÇÃO	96
3.6. AVALIAÇÃO PLANIMÉTRICA.....	97
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	99
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	102

CAPÍTULO IV: USO DE MDE PARA A DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE FRAGMENTAÇÃO E DAS ZONAS PRIORITÁRIAS DE CONSERVAÇÃO DOS SOLOS NAS REGIÕES DA CABECEIRA DOS RIOS NA BACIA DO ALTO PARAGUAI USANDO ANÁLISE MULTICRITÉRIO.

1. INTRODUÇÃO	104
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	105
2.2. ÍNDICE DE FRAGMENTAÇÃO.....	105
2.2.1. <i>Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado</i>	107
2.2.2. <i>Determinação Automática de Áreas de Inundação</i>	109
2.3. ZONAS DE CONSERVAÇÃO	109
2.3.1. <i>Algoritmo Interpolador do Inverso da Potência da Distância</i>	110
2.3.2. <i>Análise Multicritérios</i>	111
2.3.3. <i>Fatores utilizados na análise multicritério</i>	113
3. METODOLOGIA	117
3.2. SOFTWARES EMPREGADOS	117
3.3. ÍNDICE DE FRAGMENTAÇÃO.....	117
3.3.1. <i>Determinação do MDEHC</i>	118
3.3.2. <i>Determinação automática de áreas de inundação</i>	118
3.4. ZONAS DE CONSERVAÇÃO	122
3.4.1. <i>Subprodutos</i>	122
3.4.2. <i>Fatores utilizados</i>	123
3.5. ANÁLISE MULTICRITÉRIOS: COMPOSIÇÃO DE CENÁRIOS.....	125
4. RESULTADOS	130
4.2. ÍNDICE DE FRAGMENTAÇÃO.....	130
4.3. ZONAS DE CONSERVAÇÃO	133
4.3.1. <i>Subprodutos</i>	133
4.3.2. <i>Critérios selecionados</i>	137
4.3.3. <i>Análise multicritério: determinação das zonas prioritárias de conservação</i>	149
5. CONCLUSÕES	155
CONCLUSÃO GERAL.....	156
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	157
APÊNDICE I.....	167
APÊNDICE II.....	172
APÊNDICE III.....	176
APÊNDICE IV.....	189

INTRODUÇÃO GERAL

Desde a antiguidade, as pessoas tentavam representar as formas do terreno de diferentes maneiras, seja por pinturas rupestres ou mesmo em pequenos esboços. Com o passar dos anos desenvolveu-se a cartografia¹, sendo o mapa a forma mais tradicional da representação do terreno.

A representação do terreno ou superfície da Terra é condição essencial para o desenvolvimento de tarefas ligadas a várias especialidades. Engenheiros Civis projetam e constroem obras-de-arte sobre essa superfície física da terra, geólogos estudam sua composição e estrutura, geomorfólogos estão interessados em sua forma e os processos pelos quais a paisagem formou-se, cartógrafos e agrimensores preocupam-se com suas dimensões e descrição de sua superfície, a fim de representá-la de diferentes maneiras, como através de mapas, ortoimagens, vistas em perspectiva, etc. Apesar destas diferenças de ênfase e objetivos, estes especialistas têm um interesse comum, ou seja, que a superfície do terreno possa ser representada da forma mais fidedigna possível (LI *et al.*, 2005).

O conhecimento do terreno é um aspecto de fundamental importância para estudos e análises em diversas disciplinas que lidam com questões relacionadas à organização, planejamento e gestão do espaço geográfico.

Tradicionalmente o relevo da superfície terrestre tem sido representado através de curvas de nível² e pontos cotados em mapas topográficos analógicos, que fazem uso de uma projeção, no espaço bidimensional (2D) para representar um realidade no espaço tridimensional (3D). Dentre outras formas de representação 2D menos freqüentes, têm-se as cores hipsométricas (caracterizam faixas de altitude, ver a capa da monografia), hachuras, relevo sombreado (Figura A) e perfis topográficos (Figura B).

¹ Cartografia é a ciência que trata da concepção, produção, difusão, utilização e estudo dos mapas. O principal problema que envolve a cartografia é a representação de um terreno em sua forma real (3D) através de um mapa em forma plana (2D).

² Curva de nível caracteriza-se como uma linha imaginária que une todos os pontos de igual altitude no terreno, com o objetivo de representar o relevo de uma determinada região.

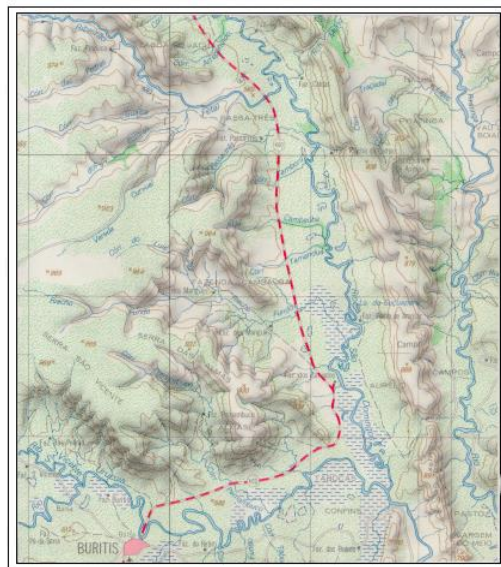


Figura A: Mapa Topográfico com efeito de sombreamento
(Fonte: IBGE, 2009)

Estas formas de representação 2D analógicas, apesar do seu reconhecido valor e da sua tradicional utilização, não permitem fazer análises numéricas (exemplo, cálculo de volumes), simulações (exemplo de área inundáveis) e modelagens de superfície de forma eficientes, que forneçam respostas rápidas e adequadas para fazer face às crescentes demandas provocadas pelo advento de novas tecnologias (UFMG, 2007).

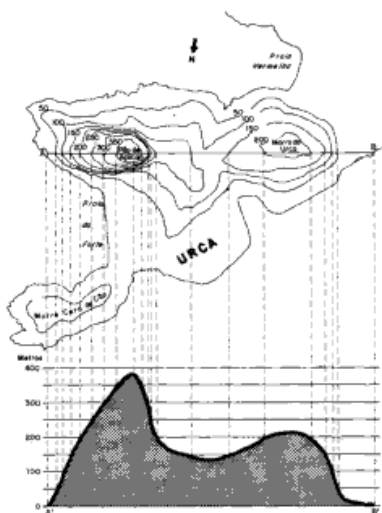


Figura B: Perfil topográfico extraído duma carta topográfica da cidade do Rio de Janeiro.
(Fonte: IBGE, 2009)

Para modelar fidedignamente a superfície terrestre, seria necessário um número infinito de pontos, o que poderia ocasionar a geração de uma quantidade infinita de dados a serem armazenados. Desta forma, a modelagem se tornaria uma tarefa impossível para

qualquer sistema digital. Neste sentido, surgiram as técnicas de modelagem digital de terreno, cujo objetivo é representar superfícies contínuas, de forma discreta, utilizando para isto uma quantidade finita de dados, ou seja, amostras de pontos da superfície física da terra, com coordenadas X, Y, Z conhecidas (COSTA, 2006). A representação ou modelagem digital da superfície está associada a uma estrutura de dados e a funções matemáticas para realização da interpolação entre os pontos amostrais obtidos.

Atualmente o uso de *modelos digitais do terreno* (MDT) está bastante difundido, pois devido a sua fácil manipulação em ambiente SIG³, permite a extração de informações derivadas úteis para as mais variadas aplicações, tendo ainda como grande vantagem, possibilitar a representação das variações de altitudes de forma contínua, diferentemente da representação do relevo através das tradicionais curvas de nível 2D, onde valores de altitude são conhecidos apenas ao longo das isolinhas.

O objetivo dessa monografia é o de apresentar os princípios da modelagem digital do terreno, bem como algumas aplicações nas áreas de Hidrologia, Cartografia e meio ambiente.

O processo de construção de um MDT é chamado de modelagem digital do terreno. De uma forma geral, segundo Li *et al.* (2005), este processo compreende:

- **a aquisição de amostras representativas do terreno (amostragem):** A amostragem representa a aquisição de um conjunto de amostras representativas da superfície da Terra, ou seja, pontos com coordenadas planialtimétricas (X, Y, Z) conhecidas. Essas amostras podem ser derivadas, por exemplo, de curvas de nível digitalizadas, de métodos fotogramétricos e por sensoriamento remoto, bem como através de levantamentos de campo usando topografia convencional e geodésia espacial (GPS). A amostragem, também considerada como fonte de dados para obtenção do MDT;
- **modelagem digital do terreno através desses pontos amostrados: basicamente nessa etapa, define-se a estrutura de armazenamento e manipulação desses dados:** que pode ser baseada em: pontos, redes de triângulos ou malha quadrada;

³ SIG (Sistema de Informações Geográficas) segundo Aronoff (1989) é qualquer conjunto de procedimentos manuais ou baseados em computador, usados para armazenar e manipular dados geograficamente referenciados.

- **reconstrução da superfície do terreno propriamente dito, a partir da aplicação de métodos interpoladores:** Os métodos interpoladores, são modelos matemáticos definidos a partir do conjunto de amostras, com a função de interpolarem os valores de altitude para quaisquer pontos contidos na área considerada;
- **a manipulação ou pós-processamento e a avaliação de sua qualidade final, a partir da qual se desenvolvem produtos para diferentes aplicações:** esta etapa consiste na aplicação de procedimentos que objetivam modificar, calibrar ou refinar o MDT obtido, de modo que ele reflita a realidade de campo de forma mais confiável. Nesta fase são realizadas operações de edição para correção de erros, aplicação de filtros de suavização para reduzir ou remover detalhes do MDT; compressão para redução do volume de dados no modelo, visando economizar espaço em disco e em tempo de processamento; e geração de especializações de modelos, como os modelos digitais de elevação hidrograficamente condicionados (MDEHC). A avaliação da qualidade final do MDT pressupõe a classificação do modelo com base na estimativa dos erros presentes nas coordenadas tridimensionais de cada ponto, medido sobre o mesmo.

Todas estas etapas serão apresentadas em detalhes no CAPÍTULO I, como também algumas aplicações do MDT em diversas áreas, como mapeamentos, sensoriamento remoto, recursos naturais, telecomunicações, etc.

Como o objetivo de ilustrar aplicações práticas nas áreas de Hidrologia, Cartografia e Meio Ambiente, foi adicionado mais três capítulos a essa monografia:

CAPÍTULO II: Geração do modelo digital de elevação Hidrograficamente Condicionado e determinação de áreas de preservação permanente.

CAPÍTULO III: Avaliação da exatidão planimétrica de imagens IKONOS Ortoretificadas com MDEs de diferentes resoluções.

CAPÍTULO IV: Uso de MDE para a determinação de índices de fragmentação e zonas prioritárias de conservação do solo nas regiões da cabeceira dos rios na Bacia do Alto Paraguai usando análise multicritério.

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO A MODELO DIGITAL DO TERRENO

1. REPRESENTAÇÃO DE SUPERFÍCIES DIGITAIS DO TERRENO

Desde a metade do século passado, diversas técnicas para representação de superfícies digitais do terreno têm sido desenvolvidas, acompanhando os avanços da tecnologia da computação, matemática e computação gráfica. Computadores tem se tornado uma ferramenta importante para a representação de superfícies digitais do terreno.

Segundo Li *et al.* (2005) existem basicamente duas formas para a representação de superfícies digitais do terreno: *matemática e gráfica*. Para gerar uma representação matemática torna-se necessário laçar mão de funções ou séries matemáticas que pode considerar a superfície de forma global ou local. Por outro lado uma representação gráfica utiliza malhas de pontos regulares e irregulares, curvas de nível, entre outros, para representar a superfície do terreno (Figura 1).

Na representação matemática global os modelos utilizam funções como polinômios, séries de Fourier, funções *Splines* entre outras. Essas funções utilizam todos os pontos amostrais, com coordenadas X, Y e Z conhecidas, para definir a superfície contínua representativa do relevo. Já os modelos matemáticos locais subdividem a área em blocos, e utilizam funções cujos coeficientes são definidos em relação a esses blocos de pontos amostrais. Porém, a representação mais usual para expressar a superfície de forma digital é a gráfica, expressa por feições do tipo ponto, linha e polígono (OKSANEM, 2006), sendo esta representação compatível com análises realizadas em ambiente SIG. As estruturas gráficas mais comumente utilizadas para representar superfícies tridimensionais são a malha regular quadrada, a rede irregular de triângulos (termo oriundo do inglês, *Triangular Irregular Network* – TIN) e as curvas de nível. Neste trabalho serão vistas a duas primeiras estruturas por serem as mais utilizadas para representar MDTs.

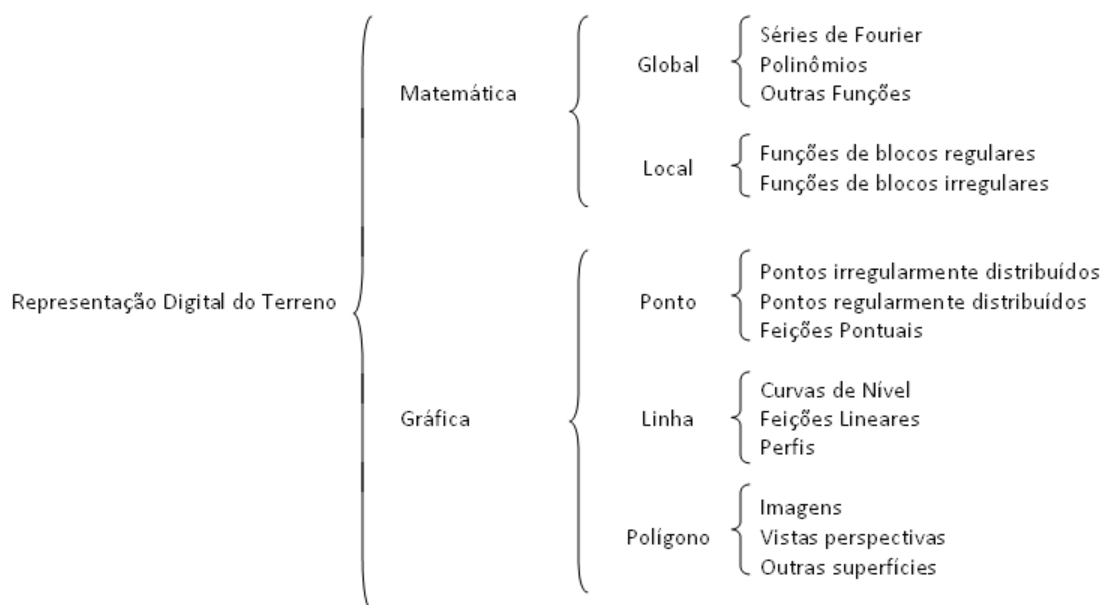


Figura 1: Representações digitais do terreno

(Fonte: Adaptado de LI *et al.*, 2005).

2. MODELOS DIGITAIS DO TERRENO

Na representação da superfície do terreno, o conceito de modelo digital do terreno (MDT) é um dos mais importantes, e para melhor entender, precisa-se partir de uma definição mais ampla de modelos.

Modelos, de forma geral, são abstrações usadas para representar a realidade, de tal forma que possamos compreendê-la (MEYER, 1985). Normalmente a palavra modelo significa representação. Modelos, segundo Saaty e Alexander (1981), permitem abstrações baseadas em formações lógicas usando conveniente linguagem e notações e são ferramentas importantíssimas para entender o mundo real e descobrir leis naturais.

Genericamente existem três tipos de modelos (Li *et al.*, 2005):

- Modelos conceituais
- Modelos físicos, e
- Modelos matemáticos.

Normalmente o *modelo conceitual* existe dentro da mente do analista, sobre uma situação ou objeto, o qual ele tem desenvolvido experiência ou conhecimento. O modelo

conceitual geralmente é uma importante fase da modelagem e precede os modelos físicos e matemáticos. Os *modelos físicos* são usualmente analógicos e normalmente representam o objeto em escala reduzida, como por exemplo, uma maquete de barro ou gesso, que representa parte da superfície do terreno. Por outro lado, um *modelo matemático* representa uma situação, um objeto ou fenômeno em termos matemáticos, ou seja, seus componentes são conceitos matemáticos, tais como: constantes, variáveis, funções, equações, etc.

Segundo Saaty e Alexander (1981) modelos matemáticos podem ser divididos em *modelos quantitativos*, que são baseados em sistemas numéricos ou em *modelos qualitativos* que são baseados num conjunto de teorias.

Como um *problema* pode ser *determinístico* ou estar sujeito a mudanças (*probabilísticos*), os *modelos matemáticos* podem ser também classificados em: *modelos funcionais*, que são direcionados para resolver problemas determinísticos ou então em *modelos estocásticos*, que normalmente são usados para resolver problemas probabilísticos.

Em meados do século vinte foi introduzido o conceito de *modelo digital do terreno* (MDT), no qual formalizavam-se: “*MDT é simplesmente uma representação estatística de uma superfícies contínua do terreno por um número de pontos selecionados com coordenadas X, Y e Z conhecidas*” (MILLER e LAFLAMME, 1958). A partir dessa conceituação, diversas vantagens podem ser listadas desse modelo matemático, em relação aos modelos físicos (analógicos), quando da representação do terreno, tais como: o MDT apresenta uma variedade de formas de representações, desde mapas topográficos até perfis e representações tridimensionais; Não se tem perdas de precisão dos dados ao longo do tempo, com deformação do material (papel, gesso ou barro), pois neste caso o dado é mantido em meio digital; A integração e atualização de dados digitais são mais flexíveis do que na representação analógica; e finalmente, o MDT pode ser apresentado em diferentes resoluções, ou seja, em diferentes escalas.

A partir dessa definição de Miller e Laflamme (1958) e introdução do termo MDT, como uma representação digital (numérica) do terreno, muitos outros termos foram introduzidos em diferentes países. Por exemplo, o termo *Modelo Digital de Elevações* (MDE) foi amplamente usado na América do Norte, o termo *Modelo Digital das Alturas* (MDA) foi muito usado na Alemanha e o termo *Modelo Digital da Superfície do Terreno* (MDST) foi utilizado na Inglaterra.

Na prática, esses diferentes termos (i.e., MDT, MDE, MDA, e MDST) são muitas vezes considerados como sinônimos, porém, normalmente se referem a diferentes produtos, função das particularidades de cada um deles. Convém destacar que apesar do uso continuado

da tecnologia, ainda não há uma padronização quanto à terminologia, que por vezes torna-se até mesmo conflitante.

A exposição a seguir aborda algumas definições de uso mais comum, literalmente transcritas de Correia (2008) por traduzir de forma clara e objetiva as diversas terminologias atualmente utilizadas.

- **Modelo Numérico de Terreno (MNT):** “*é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre*” (FELGUEIRAS e CÂMARA, 1999)”, tal como dados geológicos, geomorfológicos e de relevo, dados meteorológicos e geofísicos, por exemplo;
- **Modelo Digital de Terreno (MDT):** possui vários significados distintos, como em SPOT IMAGE (2004), que o associa à *superfície efetiva do terreno, sem cobertura vegetal ou edificações*, enquanto Felicísimo (1994a) o equipara ao conceito de MNT de Felgueiras e Câmara (1999);
- **Modelo Digital de Elevação (MDE):** termo genérico para dados da superfície topográfica e/ou batimétrica (MAUNE *et al.*, 2001c), sem cobertura vegetal e edificações, que corresponde aos casos particulares das definições de MNT de Felgueiras e Câmara (1999) e de MDT de Felicísimo (1994a) para a componente “altitude”. Aparece, também, como: Modelo Digital Altimétrico (MDA), em Reichel *et al.* (2005); Modelo Numérico de Elevação (MNE), em Tommaselli e Santos (2000); e Modelo Numérico de Elevação do Terreno (MNET), em Machado e Silva (2007); e,
- **Modelo Digital de Superfície (MDS):** com o advento dos sensores remotos de alta resolução espacial, a precisão altimétrica aumentou, razão pela qual surgiu a necessidade de distinção entre superfície efetiva de terreno e a superfície visível com cobertura vegetal, edificações e obras de engenharia, que se denominou *Modelo Digital de Superfície* (AGUILAR *et al.*, 2005; KOCAK *et al.*, 2006; MAUNE *et al.*, 2001; OKSANEN, 2006; TOUTIN, 2006) ou, com menor emprego, Modelo Digital de Objetos (MDO - MÖLLER, 2005). Essa superfície é de especial interesse para o gerenciamento de telecomunicações, gerenciamento florestal, assim como modelagem e visualização 3D (MAUNE *et al.*, 2001).

Para efeito de padronização neste trabalho, será adotada a denominação **MDE** para modelos que representam a superfície do terreno imersa ou emersa (sem cobertura vegetal ou edificações), enquanto que **MDS** será utilizado para descrever as superfícies que consideram as elevações do terreno e de qualquer objeto acima dele, como edificações e cobertura vegetal. (Figura 2).

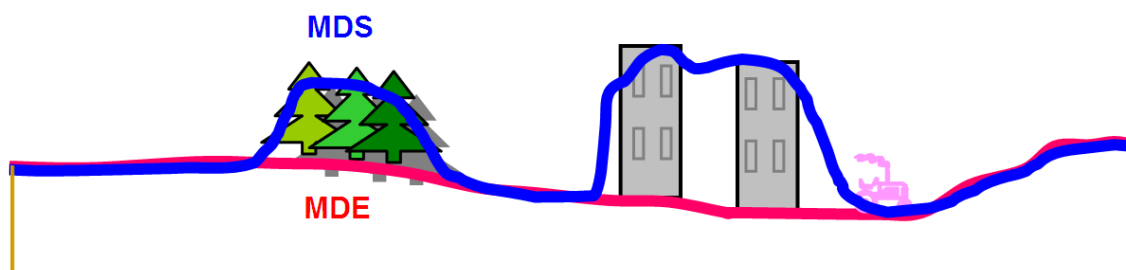


Figura 2: Modelo Digital de Superfície (MDS) em azul e o Modelo Digital de Elevação (MDE) em vermelho

(Fonte: Adaptado de SPOT IMAGE, 2004).

Li (1990) realizou uma análise comparativa entre essas diferenças conceituais, onde é apresentado que MDT tem um sentido mais amplo do que MDE ou DMA, e normalmente tentará incorporar outras feições específicas do terreno, tais como: rios, linhas de quebra, etc. para o modelo.

Na área de Geociências esse termo combina informações topográficas e não topográficas, para construir ao MDT de acordo com especificidades de suas áreas: Geologia, Meteorologia, etc.

Li *et al.* (2005) apresenta a conceituação e formaliza: “Um MDT é um conjunto ordenado de pontos de dados amostrados que representam a distribuição espacial de vários tipos de informação no terreno”. Onde a expressão matemática poderia ser:

$$K_p = f(X_p, Y_p) \quad (1)$$

Onde K_p é um valor do atributo do k -ésimo tipo de feição do terreno na posição P (que pode ser um ponto isolado ou uma área em torno do ponto P). X_p e Y_p é o par de coordenadas bidimensional do ponto P . K varia de 1, 2, 3,..., m total número de informações sobre o terreno e P varia de 1, 2,..., n total números de pontos amostrados no terreno. Assim, MDT é uma representação digital da distribuição espacial de uma ou mais tipos de informação do terreno. Na Equação (1), quando $m = 1$ e a informação do terreno é elevação (i.e., cotas e altitudes),

então o resultado é a matemática expressão do MDE, e obviamente o um subconjunto e componente fundamental do MDT. No escopo desse trabalho, essa diferenciação será adotada: o termo mais genérico MDT será utilizado se o interesse de representação está relacionado a um conjunto de atributos do terreno (topográficos, meteorológicos, etc.), do que simplesmente apenas no atributo elevação, que neste caso será usado o termo específico MDE.

3. O PROCESSO DE MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO

O processo de construção de uma superfície do MDT é conhecido como *modelagem digital do Terreno* e é um processo de modelagem matemática. Nesse processo, pontos são amostrados do terreno para ser modelado com certa precisão, densidade e distribuição. Neste caso a superfície do terreno é representada por um conjunto de pontos amostrados.

Assim, para a modelagem de parte da superfície do terreno, é necessário primeiro adquirir um conjunto de pontos da superfície. E, de fato, a aquisição de dados é o estágio primário (e possivelmente o mais importante) na modelagem digital do terreno.

A aquisição de dados é realizada seguindo duas etapas: amostragem e medição (aquisição). A amostragem refere-se à seleção da posição (X e Y), enquanto que a medição refere-se à determinação da coordenada (Z) dessa locação.

Três pontos importantes relacionados com a aquisição de dados para o MDT são: *densidade de pontos*, *precisão* e *distribuição*. A *precisão* está relacionada a medição e uma *densidade e distribuição ótima de pontos* estão intimamente relacionada com as características da superfície do terreno a ser modelado. Por exemplo, se uma superfície é plana, então três pontos (não colineares) em qualquer posição, serão suficientes para modelar essa superfície. Como as superfícies do terreno normalmente são bastante irregulares, torna-se necessário uma atenção especial em relação a amostragem em campo.

No escopo desse trabalho, parte-se do princípio que as coordenadas X, Y, Z (atributos) foram adquiridas com uma *amostragem suficiente* (densidade e distribuição), considerando um conjunto de *pontos característicos do terreno*, e com instrumentos que propiciaram precisões compatíveis com as normas cartográficas vigentes. Assim, a etapa de amostragem e medição para aquisição de dados foge ao escopo deste trabalho. Li *et al.* (2005, pp.13-64)

apresenta uma revisão detalhada em Descritores do Terreno e Estratégias de Amostragens, como também técnicas para medição(aquisição) de dados para gerar o MDT.

Se for necessário obter atributos em posições diferentes na superfície digital dos pontos amostrados, então um esquema de interpolação necessita ser aplicado, de forma a gerar uma superfície do MDT dos pontos amostrados. Entende-se por atributos valores de elevação, gradiente, temperatura, e outros.

4. MODELANDO A SUPERFÍCIE DIGITAL DO TERRENO

Um *modelo digital do terreno* (MDT) é um *modelo matemático (ou digital) da superfície do terreno*. Para gerar um MDT é necessário uma ou mais *funções matemáticas* para representar a superfície de acordo com um método específico baseado num conjunto de pontos medidos da superfície do terreno. Essas funções são normalmente denominadas como *funções de interpolações*. O processo pelo qual a representação de uma superfície do terreno é conhecido como *reconstrução da superfície ou modelagem da superfície*, e essa superfície uma vez reconstruída é chamada de superfície do MDT. Conseqüentemente, a reconstrução da superfície do terreno pode também ser considerada como a construção da superfície do MDT ou geração da superfície do MDT. Após essa reconstrução, informação de alturas ou qualquer outro atributo para qualquer ponto no modelo pode ser extraído da superfície do MDT.

O conceito de *interpolação em MDT* é um pouco diferente daquele de *reconstrução (modelagem) da superfície*. O *processo de interpolação* inclui a estimativa de valores de um ponto fora dos pontos amostrados, e pode ser usado no processo de reconstrução da superfície, enquanto que a *modelagem da superfície* enfatiza o processo de reconstrução da superfície, que pode não envolver interpolação (LI *et al.*, 2005). Assim, o processo de interpolação tem um escopo mais abrangente, e pode incluir desde a reconstrução da superfície e extração das elevações (e outros atributos) das superfícies reconstruídas; até a geração das curvas de nível tanto a partir de pontos posicionados aleatoriamente ou a partir de pontos regularmente espaçados numa malha quadrada. Em ambos os casos, os valores medidos são avaliados na superfície do MDT resultante, e o processo de interpolação é usado imediatamente após a reconstrução da superfície, tanto para extrair informações para pontos específicos ou construir as curvas de nível. Métodos de interpolação serão discutidos na seção 6.

4.1 Funções para modelagem da Superfície

Para modelar uma área na superfície do terreno é necessário usar uma *função matemática*. Uma expressão matemática geral pode ser definida como:

$$Z = f(x, y) \quad (2)$$

A função mais utilizada para a implementação dessa expressão é a *função polinomial geral* como mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Função polinomial usada para a reconstrução da superfície

(Fonte: adaptado de Petrie e Kennie, 1990)

Termos Individuais	Ordem	Termo Descritivo	Nº. de Termos
$Z = a_0$	Zero	Planar	1
$+a_1X+a_2Y$	Primeira	Linear	2
$+a_3X^2+a_4Y^2+a_5XY$	Secunda	Quadrática	3
$+a_6X^3+a_7Y^3+a_8X^2Y+a_9XY^2$	Terceira	Cúbica	4
$+a_{10}X^4+a_{11}Y^4+a_{12}X^3Y+a_{13}X^2Y^2+a_{14}XY^3$	Quarta	Quartica	5

Para a geração da superfície, não é necessário usar todos os termos inerentes nessa função. Na prática, apenas poucos termos são realmente usados e a seleção destes será feita pelo analista que projetou o sistema.

4.2. Métodos para a modelagem digital da superfície do terreno

O método para a modelagem da superfície pode ser classificado baseado em vários critérios, tais como a unidade geométrica básica usada para modelagem, o tipo de dados usado na modelagem, etc. Considerando a unidade geométrica básica usada na modelagem, quatro métodos podem ser definidos:

- Modelagem da superfície baseada em pontos
- Modelagem da superfície baseada em rede irregular de triângulos
- Modelagem da superfície baseada em malhas regulares
- Modelagem híbrida da superfície

Os métodos de modelagem da superfície baseadas em rede irregular de triângulos e em malha regular quadradas são os mais usados e considerados os métodos básicos para a modelagem da superfície.

Como a *modelagem baseada em pontos* não é nada prática (descontinuidade da superfície) e a *modelagem híbrida* é normalmente convertida para modelagem baseada em redes de triângulos, a *modelagem da superfície baseada em malhas regulares* é normalmente usada para manipular dados cobrindo terrenos mais homogêneos sobre grandes áreas. Porém, não é um modelo eficiente para *terrenos acidentados*, onde o modelo da superfície baseada em *rede irregular de triângulos* apresenta maiores vantagens.

De acordo com o tipo de dado usado, a modelagem da superfície pode ser dividida em duas classes:

- a) Construção direta a partir dos dados medidos
- b) Construção indireta a partir de dados derivados

A superfície do MDT pode ser construída diretamente a partir dos pontos originais, por exemplo, usando uma malha quadrada, pelo uso de triângulos regulares, ou através de triangulações (rede irregular de triângulos), no caso de dados irregularmente espaçados. No caso da construção indireta da superfície do MDT a partir de dados derivados, uma interpolação é aplicada para formar uma malha regular e então a superfície é reconstruída da malha interpolada. Esse processo é também conhecido como interpolação de pontos aleatórios para malha regular. Segundo Cintra (1990) o procedimento segue as etapas:

- (i) A partir dos pontos (X, Y e Z) irregularmente espaçados, gera-se a malha triangular;
- (ii) Daí, estabelece-se um esquema de interpolação;
- (iii) Depois, gera-se uma malha quadrada discreta e sobrepõe a rede triangular, e com isto gera-se o novo modelo digital, formada numa malha regular.

4.2.1. Modelagem da superfície baseada em pontos

Se o termo de ordem (grau) zero é usado para a realização da superfície do MDT, então o resultado é um plano horizontal (em nível), com apresentado na Figura 3. Se uma superfície plana horizontal, construída para cada ponto, é usada para representar uma pequena área em torno ponto (também denominada como região de influencia deste ponto, no contexto de análise geográfica), então toda a superfície do MDT pode ser formada por uma série de superfícies discretas contíguas.

Para cada sub-superfície plana horizontal, a expressão matemática pode ser definida como:

$$Z_i = H_i \quad (3)$$

Onde Z_i é a elevação no nível da superfície plana para uma área em torno do ponto i e H_i é a altura do ponto i . Este método é bastante simples e a única dificuldade é para definir a

fronteira entre áreas adjacentes. Li *et al.* (2005) sugere o uso de diagrama de *Voronoi* para a definição dos limites entre áreas, para essa modelagem da superfície baseada em pontos.

Teoricamente, essa modelagem pode ser usada para qualquer padrão, regular ou irregular, uma vez que trabalha com pontos individuais. Contudo pela dificuldade na determinação dos limites entre áreas de influencia, em termos computacionais será mais simples, se for usado padrões regulares como triângulos equiláteros, malhas quadradas ou hexágonos.

Se for usada uma malha regular quadrada, esta modelagem pode ser vista como uma estrutura matricial, que equivale à representação tal qual uma matriz, organizada segundo linhas e colunas, onde cada elemento da matriz, chamado de pixel⁴, está associado a um único valor numérico de elevação (ROCHA, 2000).

A estrutura matricial corresponde a uma distribuição discreta da superfície, onde cada pixel corresponde a uma área na superfície do terreno. Nesta interpretação, a célula inteira assume um único valor, no caso um único valor de altitude, que muda apenas a partir da borda da célula vizinha. Esta é uma interpretação muito utilizada para visualização de imagens digitais, oriundas de varreduras laser, por exemplo (Figura 3).

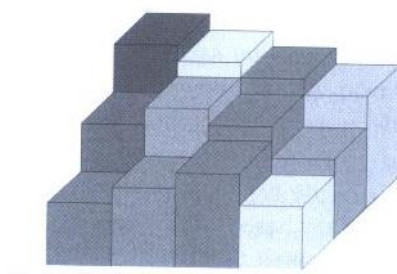


Figura 3: Interpretação da superfície segundo uma distribuição discreta.

(Fonte: MAUNE *et al.*, 2001).

Um exemplo de modelagem digital do terreno estruturado na forma pontos é o SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*). Este modelo digital de elevação mundial, disponibilizado gratuitamente na versão com resolução espacial de 90m, foi desenvolvido através de cooperação entre a NASA e a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), DOD (Departamento de Defesa) dos Estados Unidos e agências espaciais da Alemanha e da Itália.

⁴ O tamanho de um pixel (célula ou elemento de uma matriz) determina a resolução espacial de um modelo.

Embora não seja uma modelagem prática, devido à descontinuidade da superfície, é uma alternativa relativamente eficiente para certas aplicações como cálculo de volumes.

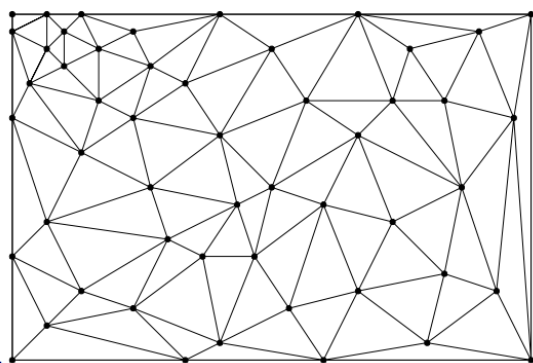
Para o armazenamento dessa estrutura de dados, torna-se necessário apenas armazenar essa imagem, na base de dados, o que poderia ser caro em termos de espaço de memória, mas métodos para compactação de dados poderiam ser usados para contornar essa limitação. Métodos para compactação e compressão de dados no formato matricial são apresentados por Aronoff (1989).

4.2.2. Modelagem da superfície baseada em rede irregular de triângulos

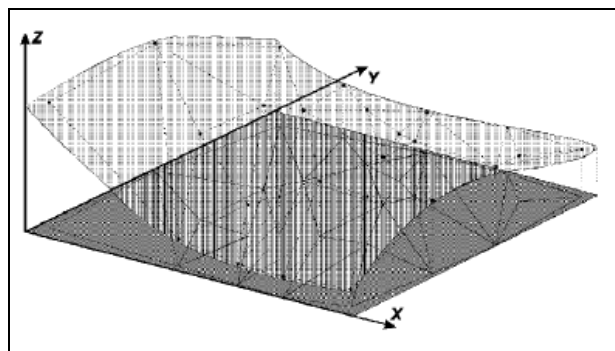
Se mais alguns termos do polinomial (Tabela 1) forem usados, então uma superfície mais complexa pode ser construída. Os três primeiros termos (i.e., os dois termos de primeira ordem juntamente com o de ordem zero) formam uma superfície plana. Para determinar os três coeficientes, deste polinômio particular, são necessários o mínimo de três pontos. Estes três pontos podem formar um triângulo espacial.

Se a superfície determinada por cada triângulo é usada para representar unicamente a área do triângulo, então toda a superfície do MDT pode ser formada por uma série de triângulos contíguos. Essa modelagem é conhecida como modelagem da superfície baseada em redes de triângulos.

Essa rede irregular de triângulos, também chamada de **TIN** (*Triangular Irregular Network*), é uma estrutura de subdivisão planar, em que as arestas são segmentos de reta e os polígonos são sempre triângulos. Na prática, uma estrutura TIN consiste de um modelo topológico de dados vetoriais, no qual pontos com coordenadas planialtimétricas conhecidas são ligados por linhas formando triângulos de tamanho irregular, não sobrepostos (Figura 4). Os seus vértices podem não ter a mesma elevação, o que leva cada triângulo a possuir um determinado declive, dado pelo ângulo de inclinação da face do triângulo, e uma determinada exposição, dada pela normal a essa face. A Figura 5 ilustra a representação das relações topológicas entre os elementos vetoriais que definem a rede triangular.



(a)



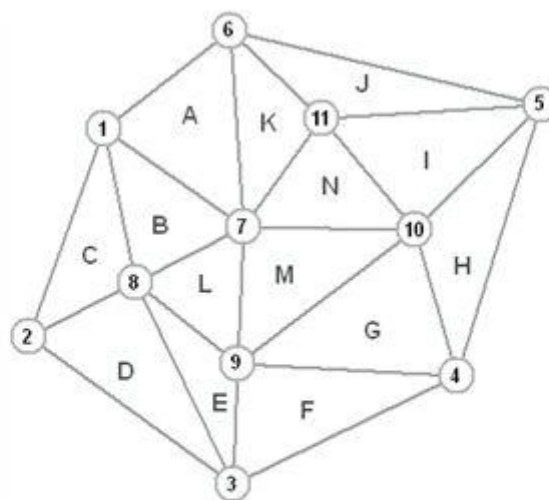
(b)

Figura 4: (a) vista da geometria da estrutura TIN, com pontos amostrais conectados segundo uma rede de triângulos não superpostos (UFMG, 2007); (b) representação de uma superfície através de uma rede triangular irregular (Fonte: NAMIKAWA, 19950).

Nessa representação é gerada uma tabela de coordenadas X-Y, onde para cada vértice dos triângulos (nó) na rede, está relacionada a um par de coordenadas (X, Y). Uma outra tabela de bordas é gerada para definir e armazenar as relações topológicas de adjacências. Neste exemplo específico da Figura 5, o triângulo A tem os triângulos B e K como adjacentes; já o último triângulo N tem os triângulos I, K e M como adjacentes. Uma terceira tabela (NOS) é criada para armazenar os vértices de todos os triângulos de A a N que cobre a superfície modelada. Por exemplo, o triângulo A tem os vértices 1, 6 e 7 e no caso do triângulo N tem os vértices 7, 10 e 11. E, finalmente é criada uma tabela (Coordenadas Z) para armazenar os valores de elevação para todos os vértices, para o exemplo da Figura 5, um total de 11 vértices.

A modelagem topológica **TIN**, devido a sua estrutura vetorial, permite que informações morfológicas importantes, tais como as discontinuidades, representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), denominadas *breaklines*, sejam consideradas durante a geração da malha triangular, possibilitando assim modelar a superfície do terreno a fim de preservar suas características (BENDA, 2009).

Nessa modelagem TIN, as coordenadas X, Y, Z dos pontos amostrados originalmente também são preservadas. Nenhuma transformação ou estrutura intermediária é criada. Toda a análise é realizada a partir do conjunto amostral considerando suas relações de vizinhança, ou seja, a topologia criada, utilizada quando necessário para otimizar certas operações (MAUNE *et al.*, 2001).



COORDENADAS X-Y	
nó#	coordenadas
1	x1,y1
2	x2,y2
3	x3,y3
.	.
.	.
11	x11,y11

COORDENADAS Z	
nó#	valor de z
1	z1
2	z2
3	z3
.	.
.	.
11	z11

BORDAS	
Δ	Δ adjacente
A	B, K
B	A, C, L
C	B, D
D	C, E
E	D, F, L
F	E, G
G	F, H, M
H	G, I
I	H, J, N
J	I, K
K	A, J, N
L	B, E, M
M	G, L, N
N	I, K, M

NOS	
Δ	nó#
A	1, 6, 7
B	1, 7, 8
C	1, 2, 8
D	2, 3, 8
E	3, 8, 9
F	3, 4, 9
G	4, 9, 10
H	4, 5, 10
I	5, 10, 11
J	5, 6, 11
K	6, 7, 11
L	7, 8, 9
M	7, 9, 10
N	7, 10, 11

Figura 5: Representação topológica de um TIN

(Fonte: adaptado de ARONOFF, 1989).

A fidedignidade de uma representação TIN mantém relação direta com o grau de variação do relevo da superfície que será modelada. Uma superfície com maior complexidade do ponto de vista de relevos acidentados requer um rede de triângulos mais densa. Isto significa que um maior número de amostras deverão ser coletas em áreas que contemplem esta complexidade, causando um aumento na quantidade de pontos amostrais necessários à construção do modelo. Para obter o valor de altitude em um determinado ponto no modelo, a interpolação é realizada com base no triângulo onde o ponto de interesse está localizado.

Assim, supondo que uma superfície acidentada esteja representada por uma face de triângulo, cujos vértices (nós) correspondem aos pontos amostrais à interpolação resultará em estimativas de altitudes mais próximas da realidade da superfície.

O triângulo é uma figura plana básica, pois qualquer polígono regular ou irregular pode se decompor em uma série de triângulos. Conseqüentemente, essa modelagem pode ser utilizada em qualquer padrão de amostragem, ou até mesmo com curvas de nível. E como os triângulos têm grande flexibilidade em termos de suas formas e tamanhos, então essa modelagem pode facilmente incorporar linhas de quebra, feições lineares, e outros feições – como mencionada anteriormente. Devido a todas essas vantagens, a modelagem da superfície baseada em triângulos tem recebido bastante atenção, e reconhecida como o principal método para a modelagem digital do terreno.

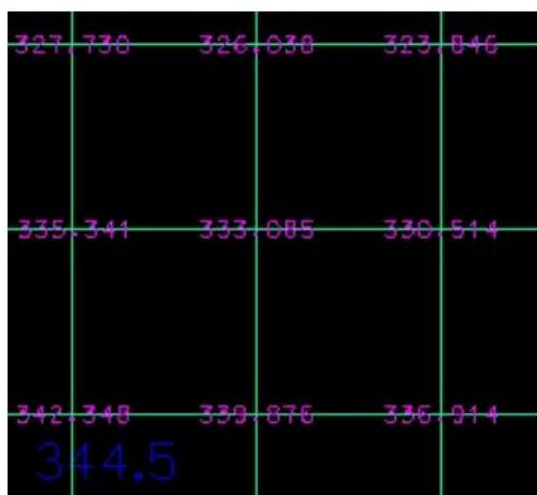
Um polinomial com uma ordem elevada pode também ser usado nessa modelagem, mas neste caso torna-se necessário trabalhar com uma série de triângulos, centradas em um único vértice.

4.2.3. Modelagem da superfície baseada em malhas regulares

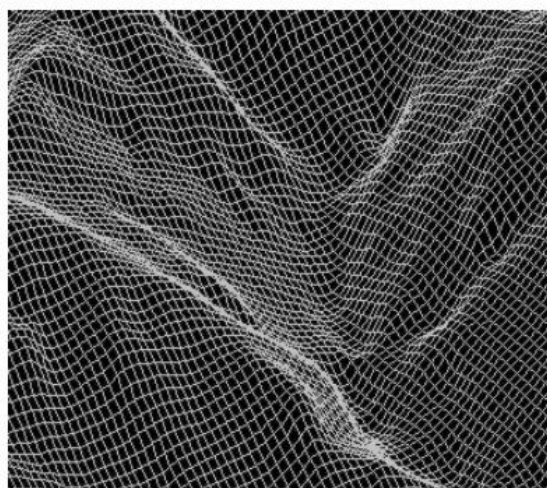
Se os três primeiros termos, juntamente com o termo a_3XY do polinomial geral (Tabela 1) for usado para a construção da superfície, então o mínimo de quatro pontos são necessário para formar a superfície. A superfície resultante é denominada como superfície *bi-linear*. Teoricamente, qualquer quadrilátero (i.e., retângulo, quadriláteros irregulares, etc.) pode ser usado, contudo em termos práticos (i.e., estrutura de dados resultantes e apresentação da superfície), uma **malha quadrada regular** é a melhor alternativa (LI *et al.*, 2005).

A *malha regular quadrada* é uma rede discreta de pontos ordenada, a exemplo de uma matriz, organizada segundo linhas e colunas. Os vértices da rede - que tem o mesmo espaçamento - correspondentes à interseção das linhas e colunas (também chamados de “nós”), estão associados aos valores da altitude do terreno (Figura 6a). Para pontos amostrais obtidos por processo aerofotogramétrico o valor do nó pode ser determinado de forma direta, porém, para pontos amostrais distribuídos irregularmente, esses valores são obtidos por métodos de interpolação (construção indireta a partir de dados derivados, seção 4.2), possibilitando a geração de uma superfície contínua (Figura 6b).

A representação da superfície de forma contínua terá, para cada célula da matriz, o valor correspondente a altitude do terreno no centróide da célula. A porção de área existente entre os centróides assumirá um valor entre os valores de altitude dos centróides das células adjacentes (MAUNE *et al.*, 2001).



a)



b)

Figura 6: Malha regular quadrada: (a) detalhe da estrutura da malha regular quadrada com um dos pontos amostrais – 344.5 (b) representação contínua de uma superfície através de rede regular quadrada.
(Fonte: UFMG, 2007).

A resolução espacial de uma rede quadrada - definida pelo espaçamento entre pontos na direção X e Y - determina a fidedignidade da representação da rede em relação a superfície física. A resolução da rede depende tanto do nível de detalhe requerido pelas análises quanto da qualidade e representatividade dos dados amostrais que serão utilizados como fonte. Por exemplo, se existe o interesse de avaliar o comportamento de algum componente da superfície, como cursos d'água, cuja largura seja de 10 metros, não se deve utilizar uma grade com espaçamento de 30 metros, por exemplo. Segundo Maune *et al.*(2001), o desejável é que a resolução da rede tenha, no mínimo, metade do tamanho da menor feição de interesse. Assim, para feições cuja menor dimensão seja de 10m, deve-se construir uma rede com espaçamento entre os vértices igual ou menor a 5m. Deve-se ter em mente que quanto menor o espaçamento de uma rede, maior deverá ser a quantidade das amostras e evidentemente que melhora a fidedignidade de representação do terreno.

Os MDTs que utilizam redes quadradas vetoriais são bastante populares em face de sua ampla utilização em SIGs e facilidade de geração e manipulação dos dados, com espaçamento fixo entre pontos, por utilizar uma matriz como estrutura de armazenamento. Esta estrutura permite a obtenção de perfis e seções transversais a partir dos valores de altitude associados aos nós da rede, assim como cálculos de áreas e volumes podem ser obtidos a partir dos valores das altitudes associados às células da rede.

Esse tipo de rede (ou malha) regular quadrada é bastante adequado quando utilizada para a representação de superfícies suaves e de variação contínua. Quando a superfície de análise possui descontinuidades ou grandes variações essas redes apresentam certa deficiência em termos de representação do terreno (NAMIKAWA, 1994, citados por FERNANDES e MENEZES, 2005).

A Figura 7 ilustra outro exemplo de uma superfície contínua representada segundo uma malha regular quadrada.

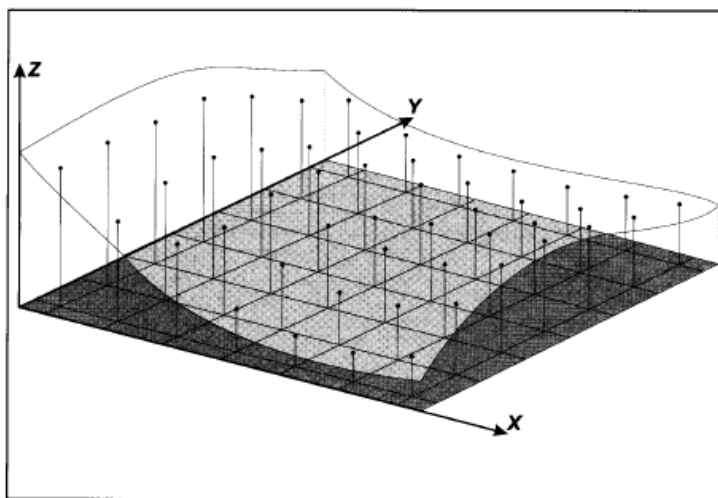


Figura 7: Representação de uma superfície contínua segundo uma malha regular quadrada (Fonte: NAMIKAWA, 1995).

Realmente, o dado em formato de malha quadrada regular tem muitas vantagens em termos de manuseio dos dados. Por esta razão, alguns softwares de MDT aceitam apenas os dados nessa modelagem, e neste caso torna-se necessário uma operação preliminar de pré-processamento de dados (i.e., interpolação de pontos aleatório para a malha quadrada regular).

4.2.4. Modelagem da superfície híbrida

A estrutura de dados atuais implementadas usando um padrão geométrico particular para a modelagem de superfícies normalmente é denominada como uma rede. Uma superfície do MDT normalmente é construída de um dos dois principais tipos de redes – quadrada ou triangular. Porém, é também possível construir a superfície do MDT utilizando uma modelagem híbrida. Por exemplo, uma malha quadrada pode ser decomposto em triângulos para determinadas áreas. Como também uma rede de quadrada pode também ser formada pela interpolação dentro de uma rede irregular de triângulos. Por exemplo, se uma linha de quebra precisa ser incluída na malha regular quadrada, então esse quadrilátero é decomposto em triângulos, pela facilidade de inclusão dessas feições nesses modelos de redes triangulares.

4.3. Escolhendo a estrutura mais adequada

As fontes de aquisição de dados (amostras) relativas à superfície física da Terra normalmente advêm de pontos irregularmente espaçados (pontos cotados obtidos por levantamentos planialtimétricos com topografia ou GPS, por exemplo), curvas de nível e *breaklines* que capturam descontinuidades do terreno e outras importantes feições geográficas. Isoladamente, estas fontes de dados não constituem uma representação adequada da continuidade da superfície quando tratadas em ambiente digital (El-Sheimy *et al.* , 2005 *apud* PENG *et al.*,1996), por isso não são utilizadas diretamente para visualização e análises da superfície em ambiente SIG. Porém, os próprios SIGs são capazes de, a partir do conjunto amostral de pontos, construir MDTs, armazená-los, realizar análises e manipulações diretamente sobre os modelos, desconsiderando nesta fase os dados usados como fonte para sua criação. Vale ressaltar que normalmente os MDTs podem alcançar volumes de dados que chegam a ordem dos *gigabytes* ou até mesmo *terabytes*. Assim, como a maioria dos programas computacionais de SIG, aliada à robustez dos equipamentos, é capaz de armazenar e manipular grandes volumes de dados espaciais, a questão que surge é: *qual a estrutura ou modelo mais adequado para representar a superfície física da Terra?* se a grade regular ou a rede triangular? (El-Sheimy *et al.*, 2005).

Bem, não há uma resposta definitiva para essa questão. Nenhuma das estruturas representa de forma ótima todas as características inerentes a 100% da superfície, uma vez que se tratam de modelos, uma aproximação da realidade. Ambos apresentam vantagens e desvantagens entre eles e entre outros modelos mais complexos. A maioria dos dados-fonte pode ser utilizada para gerar MDTs em ambas as estruturas, bem como, é também possível fazer a conversão entre elas. Normalmente, a escolha de uma estrutura está baseada em inúmeros fatores, como conjunto amostral disponível, tipo de análise desejada, na capacidade de armazenamento e na experiência do analista. A Tabela 2 apresenta uma comparação das principais características dos dois modelos.

Tabela 2: Comparação entre Modelos de Malha Regular Quadrada e Rede Irregular de Triângulos (TIN).

	<i>Malha Regular Quadrada</i>	<i>TIN</i>
Estrutura	Manipulação simples e armazenamento eficiente em computadores. Os nós da rede vetorial são estimados a partir das amostras. Relações topológicas são explícitas, não sendo necessário armazená-la, já que a conectividade entre os pontos é estabelecida segundo uma distância e direção fixas.	Manipulação e armazenamento mais complexos, variando de um software para outro. Os nós da rede (vértices dos triângulos) pertencem ao conjunto amostral. É necessário criar e armazenar as relações topológicas entre os nós, linhas e triângulos, uma vez que a conectividade entre os pontos da rede é estabelecida segundo distâncias e direções diferentes.
Referência Geométrica	Implícita na estrutura da rede, quando matricial, e nas coordenadas dos nós, quando vetorial.	Implícita nas coordenadas dos vértices dos triângulos
Requisitos de armazenamento	Alto, quando se trata da representação matricial (representação discreta da superfície)	Mais compacto, especialmente para representar objetos discretos
Aplicações em Projetos	Projetos envolvendo dados com alta variabilidade espacial.	Projetos que requeiram maior grau de precisão, pois o modelo é gerado diretamente do conjunto amostral.
Apresentação	Devido a sua discretização regular representa melhor a visualização das superfícies tridimensionais através de blocos-diagramas e perspectivas.	Inadequada para a visualização 3D da superfície.
Vantagens	As funções de análise espacial são de execução mais simples e rápida. Eficiente para cálculos de informações geométricas (declividade, volume e perfil). Facilidade para integração com dados de sensoriamento remoto, como imagens de satélite.	Feições características do terreno, como linhas de crista e talvegues, são mais bem representadas. Requer menos pontos para representação satisfatória da paisagem (vales, cumeadas, picos, e pontos de mudanças de declive). Melhor representação de relevos complexos.
Desvantagens	Apresenta problemas na representação de relevo com variações locais muito acentuadas. Feições características do terreno não são bem representadas. Necessários muitos pontos amostrais para caracterizar satisfatoriamente a superfície. Haverá redundância de dados em terrenos de variação uniforme acarretando ineficiência computacional	Inadequada para a extração de informações geométricas (declividade, volume, perfil). Análises espaciais são mais complexas.

De forma geral, segundo El-Sheimy *et al.* (2005), muitas organizações, como a USGS, optam por estruturar seus dados segundo a rede regular quadrada, devido a sua simplicidade e por requer pouco espaço para seu armazenamento, quando comparado as redes triangulares (TIN). Devido a sua sofisticada estrutura topológica e necessidade de maior espaço para seu armazenamento e manipulação (a fim de preservar todas as relações de topologia), a estrutura TIN raramente é utilizada para representar extensas áreas da superfície.

4.4 A continuidade de superfícies do MDT

Após a aplicação de um desses modelos, a superfície digital pode se construída. Esta superfície do MDT pode ser classificada, de acordo com a continuidade em:

- **Superfície descontinua:** a superfície do MDT descontinua refere-se a uma superfície que tem descontinuidade entre as superfícies locais, as quais juntas representam toda a área. Esta superfície é gerada a partir da modelagem baseada em pontos (seção 4.2.1). Neste caso, a grande dificuldade em se estabelecer os limites das áreas de influencia da cada ponto, pode ser reduzida se for usado uma amostragem de dados regulares. Mas mesmo usando dados irregulares, estes limites podem ser determinados usando *polígonos de Thiessen*, também conhecido como *diagrama de Voronoi*.

- **Superfície contínua:** a superfície do MDT contínua é aquela que apresenta uma serie de superfícies locais, conectadas para cobrir toda a área do terreno sendo modelada. Esta idéia é baseada na pressuposição de que cada ponto, representa uma amostra de uma superfície contínua de valor individual. O limite entre duas superfícies locais adjacentes pode não ser suave, que não é contínua na primeira derivada e nem nas derivadas de ordem maiores. Contudo, superfícies contínuas aqui, refere-se àquelas superfícies que são descontínuas na primeira derivadas e aquelas contínuas na primeira derivadas são denominadas de *superfícies suavizadas*.

- **Superfície suavizada:** a superfície do MDT suavizada apresenta continuidade na primeira e demais derivadas. Normalmente estes procedimentos são implementados local ou globalmente. Este procedimento também pressupõe que a superfície não precisa necessariamente passar pelos pontos de controle. Para essa condição ser atingida, é necessário certa redundância e o método dos mínimos quadrados pode ser usado, usando polinomial (*splines*), multi-termos, para modelar a superfície. O problema da utilização de um polinomial de alta ordem, está na grande oscilação de interpolação entre os pontos de controle, no custo computacional no processo e principalmente na fidelidade de representação da superfície.

Para transpor essas dificuldades, pode-se dividir a área em blocos menores, onde podem ser usados polinomiais de graus menores para modelar a superfície.

5. GERAÇÃO DE UMA REDE IRREGULAR DE TRIÂNGULOS

Na seção anterior foram apresentados os métodos para a modelagem digital do terreno. Dentre os quatro métodos apresentados os métodos baseados em rede irregular de triângulos e em malha regular quadrada são os mais amplamente usados na modelagem. Para a modelagem usando uma malha regular quadrada, se a amostragem originalmente não foi feita neste formato, torna-se necessário fazer uma transformação de pontos aleatórios e irregularmente espaçados, interpolados para uma malha discreta regular. Por outro lado, se uma modelagem usando uma rede de triângulos onde os pontos amostrados não estão regularmente espaçados, então será necessário estabelecer uma metodologia para gerar essa rede irregular de triângulos a partir desse conjunto de pontos irregularmente espaçados.

Há várias formas para se gerar rede irregular de triângulos, com base nos pontos amostrais aleatoriamente espaçados, e uma delas é conhecida como a *triangulação de Delaunay*. O critério utilizado na triangulação de *Delaunay* é o de maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo. Isto é equivalente a dizer que a rede final deve conter triângulos o mais próximo de equiláteros possível, evitando-se a criação de triângulos com ângulos internos muito agudos (FELGUEIRAS e CÂMARA, 2001).

A triangulação de Delaunay usa o seguinte critério: “*Um certo triângulo τ faz parte da triangulação de Delaunay somente se o círculo formado pelos vértices do triângulo não contém nenhum outro vértice de τ em seu interior.*” Segundo Guedes (1994), este critério pode apresentar inconsistências, pois podem existir 4 vértices co-circulares: a , b , c e d , sendo que não existam outros pontos no interior do círculo, o que faria com que os 4 triângulos (abc , abd , bcd , acd) satisfizessem o critério, mas somente 2 deles poderiam fazer parte da triangulação. Isso faz com que a triangulação de *Delaunay* não seja única.

Outra situação em que qualquer triangulação não pode ser efetuada, é quando o conjunto de pontos são colineares.

Se assumirmos que o conjunto de pontos não contém as situações acima, pode-se garantir que a triangulação é única. A Figura 8 ilustra o critério de *Delaunay*, a Figura 8(a) apresenta um critério em que não é possível atender a triangulação de *Delaunay* para os quatro pontos em questão. A Figura 8(b) apresenta o critério correto para os quatro pontos, já a Figura 8(c) ilustra a triangulação de *Delaunay* aplicada a um conjunto de dados.

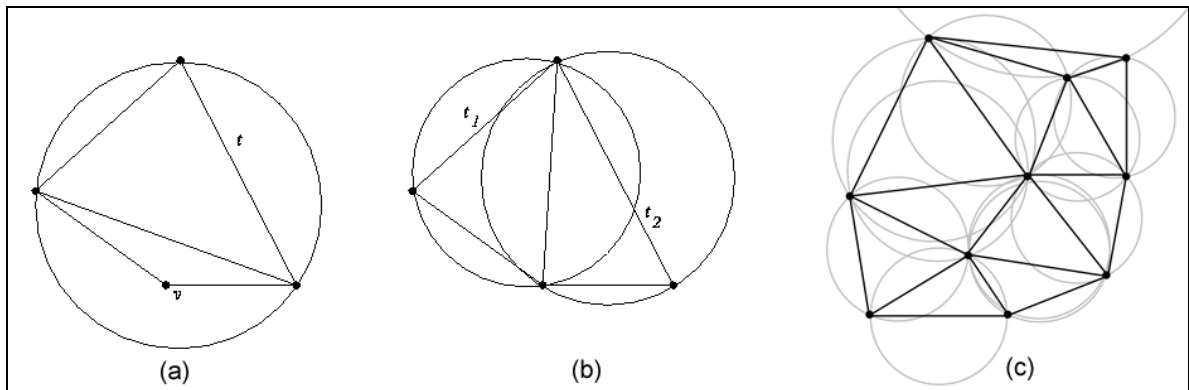


Figura 8: Critérios da triangulação de *Delaunay*.

A partir da triangulação de *Delaunay* podem-se interpolar linearmente os lados dos triângulos a fim de gerar a representação digital da superfície propriamente dita. O método de interpolação será abordado na próxima seção 6.

6. TÉCNICAS DE INTERPOLAÇÃO PARA A MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO

Conforme visto nas seções anteriores, a superfície física da terra pode ser considerada como uma superfície contínua, mas com particularidades que dificultam sua modelagem matemática. Assim, não importa quão pequena seja uma determinada área, para representá-la adequadamente, seria necessário considerar uma quantidade infinita de pontos, o que torna a tarefa impossível. Na prática, recorre-se a amostragem de pontos coletados sobre a superfície topográfica para representá-la de forma discreta. Neste contexto, a interpolação em modelo digital do terreno é usada para determinar o valor da altitude de um ponto, usando as altitudes conhecidas dos pontos amostrais vizinhos.

A interpolação é uma questão de *aproximação*, segundo a perspectiva puramente matemática, e uma questão de *estimativa* quando se trata de estatística. Segundo Li *et al.* (2005) há duas suposições implícitas nas técnicas de interpolação: (a) a superfície do terreno é contínua e suave e (b) há uma alta correlação entre os valores de altitudes em pontos vizinhos. Quanto à modelagem matemática, os interpoladores de grandezas geoespaciais classificam-se em *determinísticos* e *geoestatísticos*. Os interpoladores determinísticos utilizam apenas formulações matemáticas para o cálculo dos valores interpolados em função dos pontos vizinhos. Os geoestatísticos fazem uso de formulação matemática e estatística para a predição de valores desconhecidos. Quanto à abrangência de atuação, subdividem-se em *interpoladores baseado em pontos*, que consideram a alta correlação entre os valores de altitudes dos pontos vizinhos, ou *interpoladores baseado em área*, que usam todos os pontos de referência conhecidos dentro da área para construir a superfície. Para esses interpoladores baseados em área podem-se usar essa superfície construída para determinar o valor *Z* de qualquer ponto a ser interpolado dentro da área; e podem ainda ser subdivididos em: *globais*, com predição de cada novo valor a partir de todo o conjunto de valores conhecidos, como é o caso de muitos interpoladores utilizados nos modelos polinomiais; e *locais*, que só levam em consideração pontos (ou até blocos de pontos) próximos aos pontos a interpolar. Os interpoladores são, ainda, agrupados em *ajustados*, quando fornecem os mesmos valores nos pontos conhecidos amostrados, ou seja, quando passam por esses pontos de referência amostrados; e *aproximados*, quando não necessariamente passam pelos pontos amostrados – normalmente indicam as tendências das superfícies (CORREIA, 2008 *apud* BURROUGH e McDONNELL, 1998; ESRI, 2006; PERALVO, 2007).

Existe uma vasta literatura sobre métodos de interpolação para geração de MDT. Alguns desses métodos serão vistos na seção 6.1. Porém, antes de entrar na descrição de tais métodos, vale ressaltar as seguintes características e peculiaridades relativas à interpolação para geração de MDTs:

- (i) Não existe um método de interpolação que seja o melhor ou claramente superior a outro e que seja apropriado para todas as aplicações;
- (ii) Um modelo digital utilizado para representar uma superfície física da terra requer uma amostragem de pontos, tal que seja compatível, em número, distribuição e qualidade das coordenadas planialtimétricas, com a superfície do terreno que será modelada, a fim de permitir que a elevação em qualquer ponto do modelo seja

interpolada com a acurácia requerida para uma dada aplicação (MAUNE *et al.*, 2001 *apud* AYENI,1992). Segundo Ayeni (1982), as maiores dificuldades encontradas na interpolação são causadas devido a amostragem que não representam adequadamente a superfície terrestre ou por erros de observação;

(iii) O critério mais importante para escolha do método de interpolação é sua capacidade de levar em consideração feições características da superfície (i.e., linhas de quebra, linhas de topo de morro, por exemplo) e sua capacidade de adaptação às variações do terreno (EL-SHEMY *et al.*, 2005).

Nesta seção serão abordados os métodos de interpolação mais usuais e apropriados para obtenção de modelos digitais do terreno, visando representação da superfície física da terra (MDT). Deve-se ressaltar que foge ao escopo desta seção o aprofundamento nas fundamentações matemáticas dos métodos apresentados. Para tanto, deve-se recorrer à bibliografia específica, como: Watson (1999), El-Sheimy *et al.* (2005), Li *et al.* (2005) e Hutchinson (1989).

6.1 Interpoladores Baseado em Pontos

Nesta seção serão apresentados alguns interpoladores baseados em pontos, que são mais usados no processo de interpolação de MDTs.

6.1.1 Método de Interpolação das médias móveis baseada em pontos

O método de interpolação baseado em pontos é o das médias móveis, que normalmente é tido como um método de suavização. Este método é usado para interpolar um ponto através do uso de um número de pontos nas proximidades desse, a ser interpolado. A expressão matemática pode ser formalizada como segue:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (4)$$

onde n é o número total de pontos de referências usados para a operação da média e z_i ($i \in 1, n$) é a cota (ou altitude) do i -ésimo ponto de referência amostrado. Esta expressão representa o cálculo da média simples, e não importa o quão distante os pontos de referência estão do ponto a ser interpolado, o peso deles no processo de interpolação é o mesmo dos outros.

Assim, esse método parece não muito razoável, principalmente para os pontos de referência que estão mais próximos do ponto a ser interpolado. Esta limitação nos induz ao método da média móvel ponderada, que usa a seguinte equação:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (5)$$

onde w_i é o peso (ponderação) para o i -ésimo ponto de referência.

A partir dessa definição, duas questões surgem:

- Como atribuir pesos w_i para cada ponto de referência? e,
- Quantos pontos deveriam ser usados como pontos de referência?

Essas questões serão respondidas nas duas próximas subseções.

6.1.1.1 O Interpolador do Inverso da Distância

A idéia básica para atribuir peso para os pontos de referência seria considerar a influência desse ponto de referência. A função de distância é normalmente usada, ou seja, tanto menor a distância do ponto de referência ao ponto a ser interpolado, maior o peso atribuído. Este método que é conhecido como *Interpolador do Inverso da Distância*, nada mais é do que a interpolação de um ponto da superfície construída utilizando uma média ponderada. Os dados altimétricos são ponderados de tal forma que a influência de um ponto de referência, em relação ao outro a ser interpolado, é inversamente proporcional a distância entre estes pontos. E muitos dos casos a ponderação é atribuída aos dados através da utilização de uma potência, que controla como os fatores de ponderação decrescerão enquanto aumenta-se a distância entre o ponto interpolado e o de referência. Quanto maior a potência de ponderação, os pontos de referência mais longe terão uma menor influência, durante o processo de interpolação.

No processo de interpolação, os pesos atribuídos aos pontos de referências são frações, e a soma de todos os pesos é igual a um (1,0). Quando um ponto de referência é coincidente com o ponto a ser interpolado, a distância entre eles será igual a zero, e a esse ponto de referência é atribuído o peso igual a um (1,0), enquanto todas as outras observações (pontos

de referências) são atribuídos pesos iguais a zero. Assim, ao ponto interpolado é atribuído o valor da observação coincidente (ou ponto de referência). Alguns softwares incorporam no interpolador um parâmetro de suavização (*Smoothing*), que é um mecanismo que minimiza esse comportamento (Figura 9). Uma vez utilizando um valor diferente de zero no parâmetro de suavização, a nenhum ponto de referência é dado um peso igual a um (1,0). O parâmetro de suavização permite incorporar um fator de incerteza associado com seus dados de entrada. Quanto maior for este parâmetro, menor a influência de uma observação discrepante na interpolação (SURFER, 2002).

A potência utilizada no inverso da distância, determina a rapidez com que os pesos diminuem com o aumento no valor da distância. Ao aproximar-se a potência ao valor zero, a superfície gerada se aproxima de uma superfície plana horizontal através da média de todas as observações dos dados (Figura 9). À medida que aumenta o valor da potência, a superfície gerada comporta-se como um "*interpolador de polígonos de Thiessen*" (MATOS, 2001). Alguns analistas recomendam utilizar o valor da potência entre 1 e 3 (SURFER, 2002).

O método do Interpolador do Inverso da Distância pode ser formalizado pelas seguintes equações:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^{\beta}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^{\beta}}} \quad (6)$$

$$h_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + \delta^2} \quad (7)$$

Onde:

h_{ij} : é a distância euclidiana efetiva entre o ponto a ser interpolado "j" e os pontos de referência "i";

$\hat{Z}_j$: é o valor interpolado para o ponto interpolado "j";

Z_i : é o valor de altitude do i -ésimo ponto de referência;

d_{ij} : é a distância entre o nó de grade "j" e os ponto altimétricos "i";

β : é o valor da potência; e,

δ : é o parâmetro de suavização (*Smoothing*).

Uma das vantagens do Interpolador do Inverso da Distância é a rapidez de processamento para a geração de um MDE. Um efeito indesejado deste interpolador é a geração de anomalias em torno dos pontos de referências amostrados (Figura 10 (d) e (g)).

Esta anomalia é mais evidente quando se utiliza uma potência maior, ou seja, os pontos a serem interpolados, próximos ao ponto de referência, se ajusta perfeitamente a ele. Já os pontos afastados dos pontos de referências tendem a ter valores gerais. Isto faz com que o MDE apresente picos ou depressões abruptos, causando assim este efeito anômalo. Este efeito pode ser minimizado utilizando-se o parâmetro de suavização.

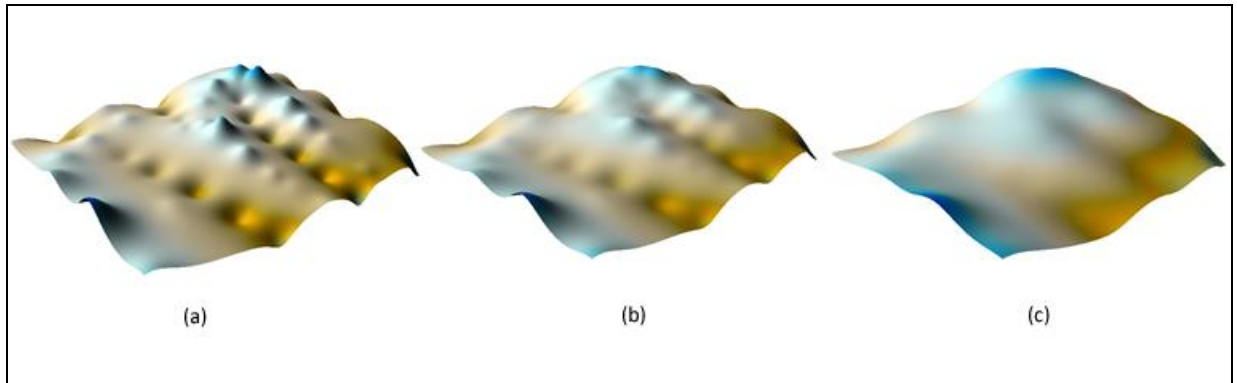


Figura 9: Efeito de suavização do interpolador do inverso da distância. Comparação com o MDE original (a), com suavização de 0.4 (b) e com suavização igual a 1 (c).

6.1.1.2 Vizinho mais Próximo ou Vizinho Natural (Polígono de Thiessen ou Voronoi)

Pontos amostrados devem estar próximos dos pontos a serem interpolados. Usando a distância como critério, um círculo ou um retângulo pode ser traçado ao redor do ponto a ser interpolado, e evidentemente todos os pontos dentro dessa área, serão selecionados como pontos de referência para proceder a interpolação.

Este método de interpolação se baseia no *vizinho mais próximo* ou *vizinho natural*, ou seja, o valor interpolado para um determinado ponto é o valor dado pelo ponto ou conjunto de pontos amostrais de referência, mais próximos.

O polígono de *Thiessen*, também chamado de Diagrama de *Voronoi*, é realizado por cima de uma triangulação entre os pontos amostrais, após são criadas retas perpendiculares na metade de todos os lados da triangulação, os polígonos criados através do encontro destas retas recebem o valor altimétrico do ponto planialtimétrico que está contido no polígono (Figura 11).

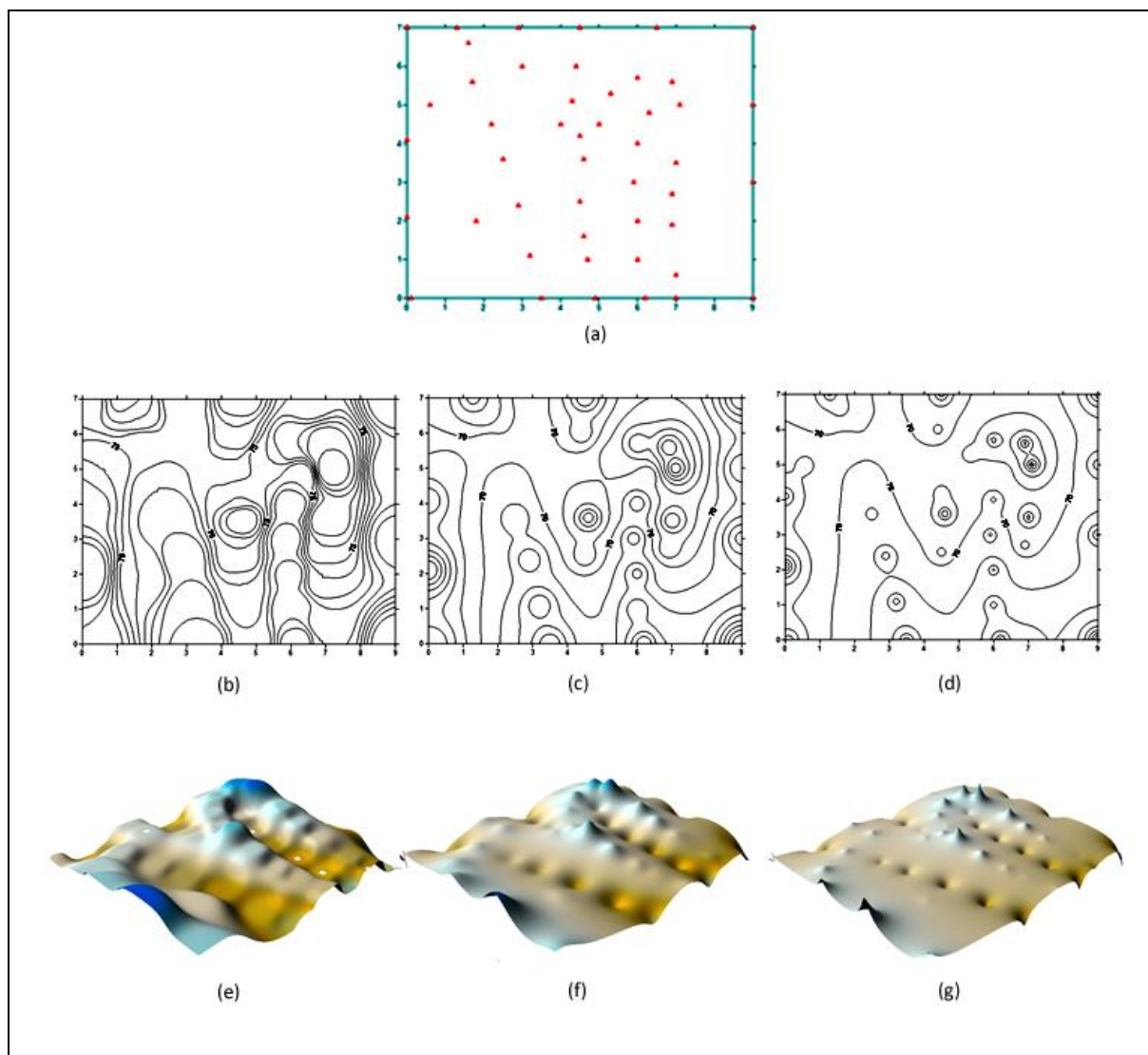


Figura 10: Efeito do valor da potência utilizada no interpolador do Inverso da Distância. Comparação das curvas de nível e MDE gerados com potência igual a 1 (b) (e), com potência igual a 2 (c) (f) e com potência igual a 3 (d) (g) a partir dos pontos planialtimétricos (a).

Logo, os passos para a geração dos polígonos de *Thiessen* são:

- (i) Geração da triangulação de *Delaunay*, com base nos pontos de referência (como descrito na seção 5);
- (ii) Criação das retas perpendiculares dividindo todos os lados da triangulação na metade (Mediatriz);
- (iii) Definição dos polígonos;
- (iv) Polígono recebe o valor altimétrico do ponto que nele está contido.

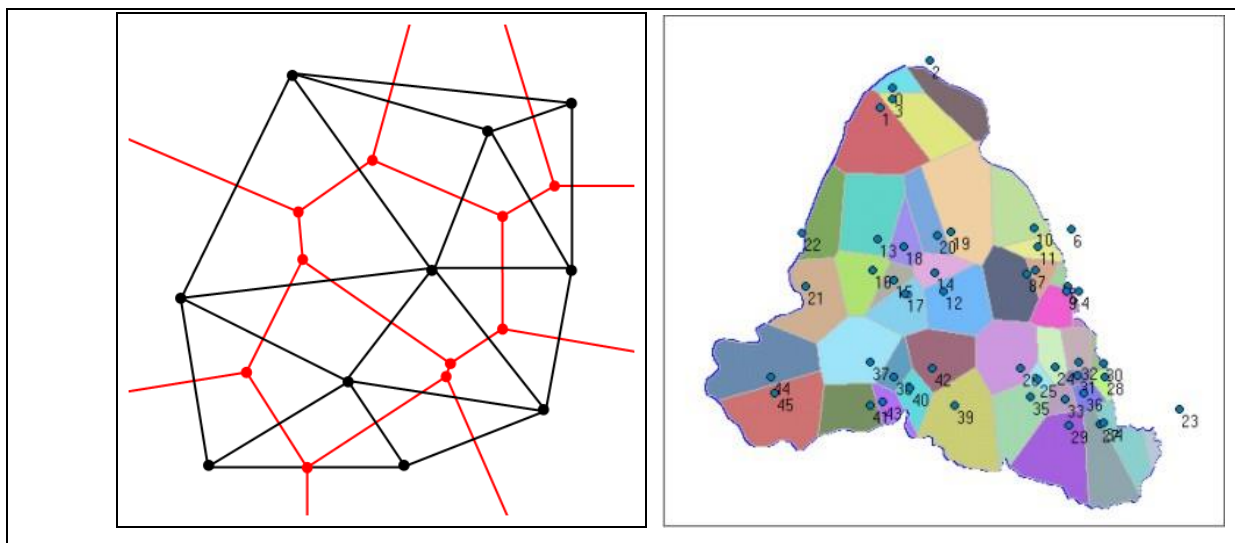


Figura 11: Polígonos de Thiessen.

Fonte: <http://www.hidrotec.ufv.br>

Polígonos de *Thiessen* são muito usados em SIG e análises geográficas, como um método de relacionar dados pontuais para dados que abrangem certa área. Uma aplicação muito usual desta interpolação é em dados meteorológicos, por exemplo, dados pluviométricos, em que se assume que em algum dado local a precipitação é equivalente à estação meteorológica mais próxima (BURROUGH e McDONNELL, 2004).

O polígono de *Thiessen* não é um interpolador muito utilizado para a geração de MDE, mesmo porque a interpolação poderia ser realizada diretamente na rede triangular gerada pelos polígonos de *Thiessen*. E, mesmo quando se utiliza esse método deve restringi-lo a áreas menores, onde se tenha abundância de pontos planialtimétricos. Alguns algoritmos de polígonos de *Thiessen* utilizam a média ponderada das distâncias entre os polígonos vizinhos. A Figura 12 apresenta um exemplo de MDE gerado pela interpolação do polígono de *Thiessen*, utilizando o software SURFER 8.

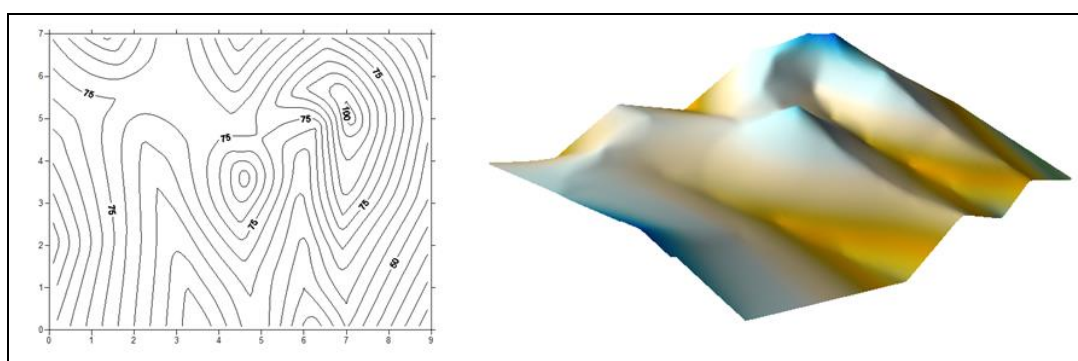


Figura 12: MDE gerado utilizando a interpolação de polígonos de *Thiessen*.

6.2 Interpoladores Baseado em Áreas

Nas subseções anteriores, foram apresentados métodos interpoladores baseado em pontos. Nessa seção serão apresentados métodos de interpolação baseado em áreas, que podem ser tanto métodos *ajustados* quanto *aproximados*.

6.2.1 Interpolação Linear Simples

O método de interpolação linear simples se ajusta muito bem a modelagem digital do terreno baseada em redes de triângulos (subseção 4.2.2). A triangulação com o método de interpolação linear simples utiliza como base a triangulação de *Delaunay*, como descrito na seção 5, e se caracteriza como um método ajustado, quando a superfície gerada passa por todos os pontos de referência amostrados.

A função matemática de um plano definido pelos três pontos de referência é dada pela equação:

$$Z = a_0 + a_1x + a_2y \quad (8)$$

onde a_0 , a_1 e a_2 são os coeficientes e (x, y, z) são conjuntos de coordenadas de pontos na superfície. Para calcular esses coeficientes são necessários, pelo menos, três pontos de referências com coordenadas conhecidas, para definir as equações lineares:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Uma vez que os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 , forem determinados, então a altura z_i de qualquer ponto i , com as coordenadas (x_i, y_i) pode ser determinada substituindo essas coordenadas na Equação (8).

A triangulação com interpolação linear funciona melhor quando os seus dados estão uniformemente distribuídos sobre a área da rede. Quando não se tem dados bem distribuídos, o MDE apresenta efeitos de triângulos inclinados conforme mostrado na Figura 13.

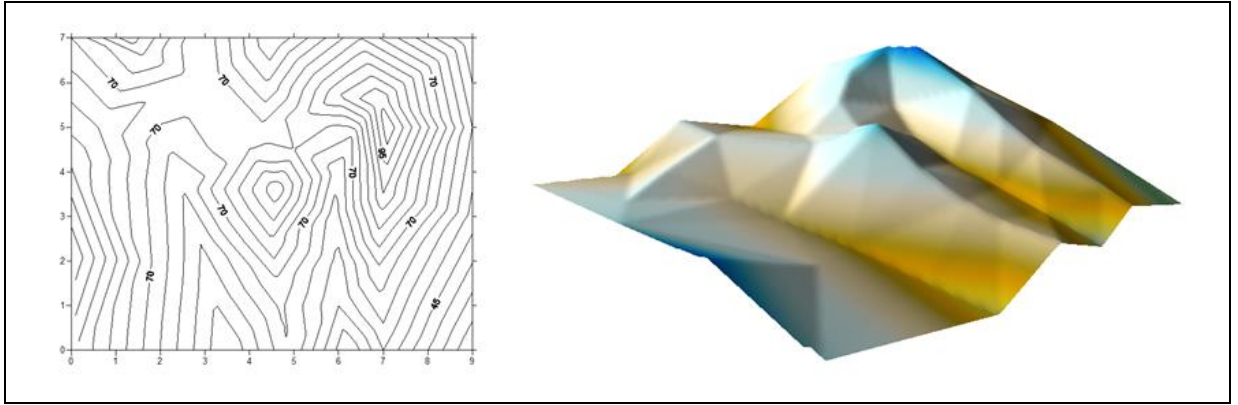


Figura 13: Efeito dos triângulos inclinados no MDE.

6.2.2 Interpolação Bi-linear

O método de interpolação bi-linear, por outro lado, se ajusta muito bem a modelagem digital do terreno baseada em malha quadrada discreta (subseção 4.2.3). A interpolação bi-linear também se caracteriza como um método ajustado, e pode ser realizada em quaisquer conjuntos de, pelo menos, quatro pontos (não colineares). A formulação matemática de um plano definido pelos quatro pontos de referência é dada pela equação:

$$Z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \quad (10)$$

onde a_0, a_1, a_2, a_3 representam também o conjunto de coeficientes a determinar. Para calcular esses coeficientes são necessários, pelo menos, quatro pontos de referências, com coordenadas conhecidas, para definir as equações lineares:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4y_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Uma vez que todos os coeficientes são determinados, então a altura z_i de qualquer ponto i , com as coordenadas (x_i, y_i) pode ser determinada substituindo essas coordenadas na Equação (10).

A interpolação bi-linear tem sido usada na maioria das interpolações do MDT, principalmente porque é simples, intuitiva e confiável (LI *et al.*, 2005). Porém, como discutido na subseção 4.4, as superfícies geradas não são suavizadas. Para a superfície ficar

mais suavizada, torna-se necessário ajustar um polinomial para um conjunto de superfícies lineares contíguas.

6.2.3 Interpolação Spline Bi-cúbicas

Conceitualmente, o *Spline* condiciona a passagem da superfície de interpolação pelos valores observados por minimização da curvatura dessa superfície, de modo similar ao ajuste de curva francesa, por meio do ajuste sucessivo entre três pontos consecutivos. Resulta em uma superfície bem suavizada, mas muito afetada pelas variações locais, razão pela qual requer a remoção prévia de erros grosseiros (CORREIA, 2008).

Existem basicamente três tipos de interpolação por *Spline*: a linear, a quadrática e a cúbica. A *spline* cúbica, $S^3(x)$, mais utilizada nos softwares de geoprocessamento, é uma função polinomial por partes, contínua, onde cada parte é um polinômio de grau 3. $S^3(x)$ tem a primeira e segunda derivada contínua, o que faz com que a curva $S^3(x)$ não tenha picos e nem troque abruptamente de curvatura nos pontos de referências.

Para resolver os problemas de continuidades da superfície, apresentados por métodos de interpolação lineares, uma função *Spline* bi-cúbica pode ser usada para construir a superfície do MDT suavizada. Funções *Splines* bi-cúbicas usam formulação matemática para criar superfícies que suavizem ou minimizem, de uma forma geral, as curvaturas da superfície (DE SAWAL, 2009; HENGL *et al.*, 2003; LI *et al.*, 2005; e MAUNE *et al.*, 2001).

O emprego dessa técnica para modelar superfícies com variações altimétricas significativas, requer uma amostra considerável de pontos que a caracterizem, sob pena de criação de uma superfície que não corresponda à realidade do terreno.

Segundo Maune *et al.*(2001), devido a suas propriedades de suavização do relevo, as superfícies geradas através do método *Spline* de interpolação são normalmente utilizadas quando se deseja representar o relevo através de curvas de nível.

A Figura 14 apresenta um exemplo de superfície gerada por interpolação *Spline*.

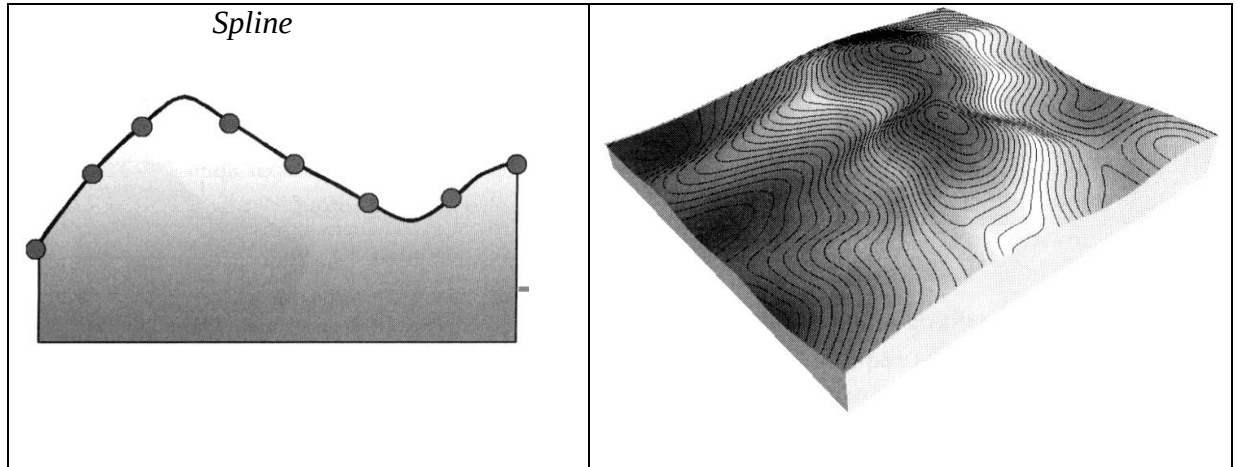


Figura 14: Seção transversal e visão 3D

(Fonte: Maune *et al.*, 2001)

Segundo Li *et al.*(2005) em situações em que a superfície tem grandes quantidades de picos ou variações abruptas, recomenda-se o uso de uma função *Spline* bi-cúbica. Esta função é aplicada em blocos, que consiste de quatro nós da malha regular, por exemplo: os pontos A, B, C e D na Figura 15. A função *Spline* bi-cúbica é a seguinte:

$$\begin{aligned}
 z = f(x, y) &= \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 a_{i,j} x^i y^j \\
 &= a_{00} + a_{10}x + a_{20}x^2 + a_{30}x^3 \\
 &\quad + a_{01}y + a_{11}xy + a_{21}x^2y + a_{31}x^3y \\
 &\quad + a_{02}y^2 + a_{12}xy^2 + a_{22}x^2y^2 + a_{32}x^3y^2 \\
 &\quad + a_{03}y^3 + a_{13}xy^3 + a_{23}x^2y^3 + a_{33}x^3y^3
 \end{aligned} \tag{12}$$

Onde $a_{00}, a_{01}, a_{10}, \dots, a_{33}$ são 16 coeficientes a serem determinados. Logo pelo menos 16 equações são necessárias para resolver estes parâmetros. Com os quatros pontos da malha regular quadrada têm-se quatro equações. São necessários mais 12 pontos, que virão das condições de conexão entre os blocos, ou seja:

1. A *declividade (Slope)* de cada nó (articulação entre quatro blocos adjacentes) deve ser continua no sentido XY ;
2. O *torque* dos blocos adjacentes também deverá ser contínuo.

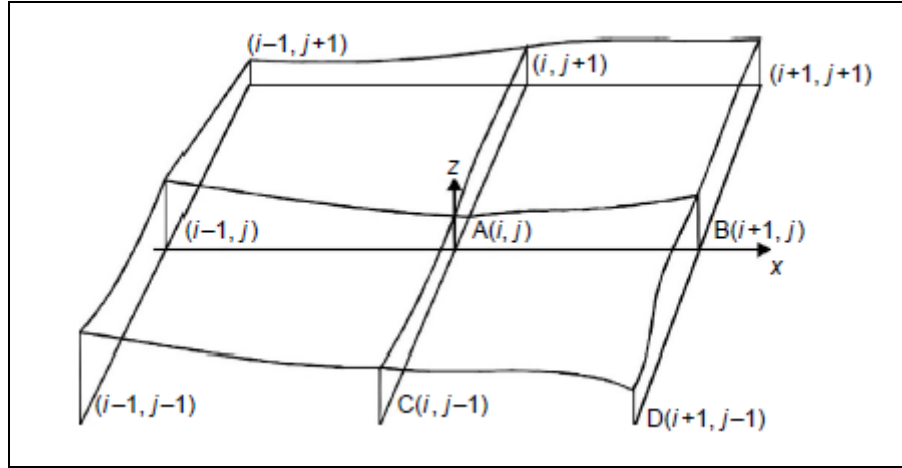


Figura 15: Suavização *Spline*

(Fonte: LI *et al.*, 2005)

O torque T e a declividade R , no sentido X , e S , no sentido Y , pode ser descrita por:

$$R = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad S = \frac{\partial z}{\partial y}, \quad T = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \quad (13)$$

Como o bloco tem quatro nós, estes valores são:

$$\begin{aligned} R_{i,j} &= \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{2} \\ S_{i,j} &= \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2} \\ T_{i,j} &= \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{(z_{i-1,j-1} + z_{i+1,j+1}) - (z_{i+1,j-1} - z_{i-1,j+1})}{4} \end{aligned} \quad (14)$$

De posse destas três equações, para quatro pontos no terreno teremos 12 equações. Logo teremos as equações necessárias para determinar os coeficientes. Assim, para cada ponto P (x_p, y_p) a altitude pode ser determinada pela Equação (12).

6.2.4 Krigagem (Kriging)

Interpolador geoestatístico que vem sendo bastante utilizado em Geociências, a *krigagem* leva em consideração as características espaciais de auto-correlação entre observações e as pondera em função da distância do ponto a interpolar a cada ponto de referência conhecido (JONES, 1998). A interpolação por método geoestatístico envolve uma

técnica mais complexa que os métodos determinísticos, entretanto permite maior intervenção do operador para melhor aproximar o modelo da realidade.

A técnica de *krigagem* é impressionante por realizar um análise preliminar no conjunto de dados para determinar a correlação entre os pontos amostrados.

É assumido que o valor $Z(x, y)$ de uma variável na posição (x, y) pode ser expresso como uma soma de dois componentes que são: as *tendências globais*, ou “*drift*” $m(x, y)$ dos dados e um termo espacial variável localmente $e'(x, y)$, que é dependente dos valores de dados da vizinhança. Assim:

$$z(x, y) = m(x, y) + e'(x, y) + e'' \quad (15)$$

Na *krigagem* universal o termo de tendência universal é tipicamente modelado por um polinomial de menor ordem (grau), ou linear ou quadrático. Numa *krigagem* simples, na qual nenhuma tendência é assumida, este termo $m(x, y)$ é constante e equivalente a média dos dados. No caso do termo $e'(x, y)$ é um resíduo do valor local da tendência. Segundo Maune *et al.* (2001) um tipo específico de *krigagem* chamado “*krigagem ordinária*”, é mais apropriado para interpolação de dados referentes à superfície física do terreno. Neste caso a *krigagem* ordinária considera a média local da região dos pontos próximos aqueles que serão interpolados. Conseqüentemente, tem-se um resultado mais preciso do que a *krigagem simples*, que utiliza a média global de todo o conjunto de pontos.

Em muitos casos, a *krigagem* é usada como um interpolador ajustado, na medida em que a superfície a ser criada passa exatamente pelos pontos amostrais. Entretanto, nos casos onde há uma qualidade diferenciada da amostra, como por exemplo, um determinado ponto com erro de observação, a *krigagem* tende a priorizar uma tendência local da superfície em detrimento do valor isolado do ponto.

Um produto das análises preliminares dos dados é um gráfico chamado de semi-variograma, que expressa a metade das médias do quadrado das diferenças entre amostras, em função da distância entre elas, isto é, a semi-variância (medida do grau de dependência espacial). Para obtenção desses semi-variogramas, parte-se do princípio que elementos, ou objetos, próximos apresentam características semelhantes, e que essa semelhança tende a diminuir quando comparados com outros objetos mais afastados, do ponto de vista da distância e direção. Para um conjunto de amostras x_i , a semi-variância pode ser estimada por:

$$\gamma(h) = \frac{n \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i + h)]^2}{2} \quad (16)$$

onde $z(x_i)$ é o valor da cota (altitude) no ponto x_i e h é a distância entre os dois pontos. $\gamma(h)$ pode ser avaliado para diferentes direções. A Figura 16 ilustra um exemplo de semi-variograma. Assumindo-se que uma amostragem foi realizada sobre uma longa e suficiente distância h , é normal para $\gamma(h)$ crescer, a partir de um valor próximo a zero, antes dessa curva se tornar constante, que é chamado de *still*. O valor de h no momento em que a função fica constante é chamado de *range*, e corresponde a máxima distância para a qual um valor de dados tem influência sobre outro. Uma vez traçado o semi-variograma, uma função analítica pode então ser ajustada aos dados (gráfico).

Uma vez ajustada uma curva analítica, o semi-variograma pode ser usado para calcular os pesos, os quais estarão relacionados aos pontos amostrados de referência, que serão utilizados para estimar (interpolat) o valor de cotas (altitudes), numa dada posição.

Os pesos são calculados de forma a minimizar a variância dos valores estimados, considerando todas as amostras usadas em cada estimativa individual. Este procedimento é realizado usando o método de *Multiplicadores de Lagrange*, e é computacionalmente caro. Davis (1986) faz uma revisão introdutória sobre esse procedimento.

Uma vez definido os pesos para cada ponto de referência, a estimativa é feita pela média móvel ponderada usando a Equação (5).

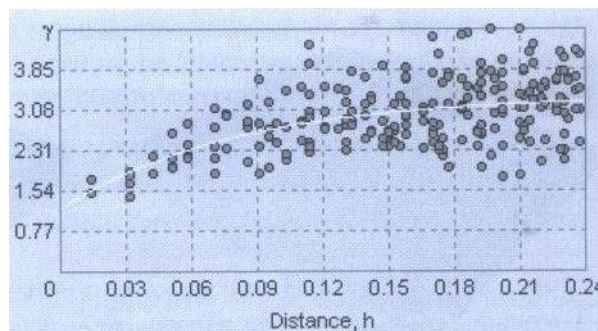


Figura 16: Modelo de Semi-variograma. Cada ponto disposto no gráfico representa um par de pontos amostrais, cuja localização está baseada em suas diferenças de altitude, na distância entre eles e na direção de ambos. A linha estabelece o modelo de auto-correlação.

(Fonte: MAUNE *et al.*, 2001).

A Figura 17 apresenta uma seção transversal de uma superfície interpolada por *krigagem*. A Figura 18 apresenta uma superfície semelhante contendo um ponto cujo valor foi propositalmente alterado. Percebe-se que a superfície mantém sua forma geral mesmo com a introdução do ponto com um valor diferente daquele usado na Figura 17 (MAUNE *et al.*, 2001). A Figura 19 apresenta um exemplo de superfície gerada por *Krigagem*

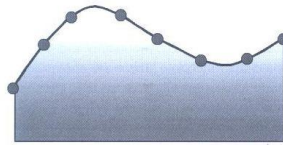


Figura 17: Seção transversal de uma superfície obtida por Krigagem.

(Fonte: MAUNE *et al.*, 2001).

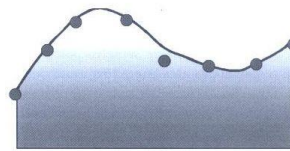


Figura 18: Seção transversal da mesma superfície com um ponto cujo valor foi alterado, ilustrando que o modelo pode criar uma superfície não exatamente coincidente com os pontos amostrais.

(Fonte: MAUNE *et al.*, 2001).

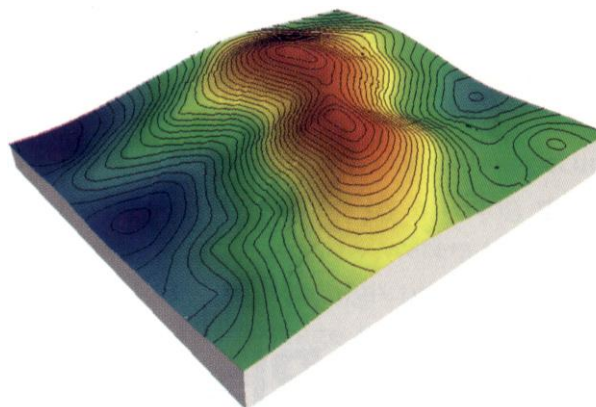


Figura 19: Exemplo de superfície gerada por *Krigagem*

(Fonte: MAUNE *et al.*, 2001).

Maiores esclarecimentos sobre a fundamentação matemática da *Krigagem* podem ser obtidos em El-Sheimy *et al.*(2005) e Jones (1998).

6.2.5 Método de Interpolação Aproximado

Torna-se evidente que se o relevo do terreno for bastante acidentado, dificilmente uma função matemática poderá descrevê-lo completa e fidedignamente. Dada essa limitação, pode-se pensar em usar uma função de interpolação para aproximar a superfície do terreno.

Segundo Li *et al.* (2005) uma superfície que passa por todos os pontos de referência não representa necessariamente uma melhor aproximação para a superfície do terreno. Por exemplo, se uma área é muito extensa e existem diversos pontos de referência amostrados, será necessário utilizar um polinômio de grau elevado para o ajustamento da superfície. Na verdade, este procedimento pode causar grandes oscilações, muitas vezes irreais, na superfície interpolada devido ao alto grau do polinômio. Possivelmente a superfície vai passar exatamente nos pontos de referência, mas haverá grandes oscilações na interpolação entre pontos de controle. Conseqüentemente, nesta seção será descritos métodos de interpolação aproximados.

A teoria por trás dos *métodos de interpolação aproximados* é que pequenas variações na superfície do terreno são tão complexas que elas podem ser tratadas como um processo estocástico.

6.2.5.1 Ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados de Elementos Finitos

Os processos de geração dos MDTs baseiam-se na interpolação espacial de dados esparsos, geralmente obtidos da digitalização de curvas de nível e a partir de pontos planialtimétricos. A maioria dos interpoladores ajustados disponíveis para geração de MDT, foram desenvolvidos, especificamente, para a representação de variáveis com distribuição contínua tais como: temperatura, concentração de nutrientes, umidade, etc. Entretanto, o relevo, apesar de apresentar uma distribuição contínua, também é composto por divisores de água e vertentes, que caracterizam linhas de descontinuidade da superfície. A água é o principal agente erosivo, responsável primário pela forma geral do relevo. A utilização de interpoladores ajustados para a representação do relevo introduz distorções – suavização das cristas e depressões espúrias nos vales – que limitam sobremaneira a utilização dos MDE's resultantes nos estudos de mapeamento automático de sub-bacias, por descaracterizarem a rede de drenagem e, conseqüentemente, o escoamento superficial (SISCOM, 2009).

Objetivando contornar dificuldades dos interpoladores ajustados, Hutchinson (1989) desenvolveu o algoritmo computacional denominado ANUDEM (*Australian National University's Digital Elevation Model*). O método utiliza uma técnica de interpolação baseada em diferenças finitas iterativas para gerar uma grade regular a partir de curvas de nível, possibilitando ainda a imposição de linhas características tais como divisores de água e rede de drenagem. O resultado é um MDE dito Hidrograficamente Condicionado – MDEHC – por haver uma coincidência acentuada entre a drenagem derivada numericamente e a drenagem real (ESRI, 2008).

Elementos finitos é um método grandemente usado em mecânica. Este método divide grandes pedaços de materiais em pequenas unidades (células) para tratá-las. No caso de modelagem digital do terreno, uma superfície sobre uma área extensa pode também ser dividida em unidades de áreas menores, tais como células quadradas ou triangulares (LI *et al.*, 2005). Então, uma função matemática simples é usada para aproximar a superfície sobre cada célula. Em outras palavras, a superfície extensa consiste num numero finito de unidade de áreas pequenas (Ebner *et al.*, 1980).

De fato, interpolação bilinear e bi-cúbica aplicam o conceito de análise de elementos finitos e principalmente no caso de interpolação *spline* bi-cúbica, só que neste caso os “nós” da rede, não são conhecidos e tem de ser interpolados. Por exemplo, a altura Z_P do um ponto P nas proximidades de uma malha quadrada poderia ser determinada pelas alturas dos quatro pontos mais próximos de P , usando a Equação (17):

$$Z_P(x, y) = z_{i,j} \left(1 - \frac{\Delta x}{d}\right) \left(1 - \frac{\Delta y}{d}\right) + z_{i+1,j} \left(1 - \frac{\Delta y}{d}\right) \left(\frac{\Delta x}{d}\right) + z_{i+1,j+1} \left(\frac{\Delta x}{d}\right) \left(\frac{\Delta y}{d}\right) + z_{i,j+1} \left(1 - \frac{\Delta x}{d}\right) \left(\frac{\Delta y}{d}\right) \quad (17)$$

onde d é o espaçamento na malha quadrada, Δx e Δy a diferença de coordenadas na direção x e y , respectivamente, do ponto P e do ponto de referência na posição (i, j) .

O modelo TOPOGRID/Topo to Raster fundamenta-se no ANUDEM, e é considerado um dos melhores interpoladores topográfico de dados provenientes de curvas de nível, mesmo quando não se inclui as linhas de drenagem no modelo (CORREIA, 2008 *apud* PERALVO, 2007). Porém, como este é um aplicativo TOPOGRID do sistema ArcINFO, que passou a se chamar “Topo to Raster” no ambiente ArcGIS (ESRI, 2008), é um software proprietário, e não disponibiliza o código implementado – acredita-se que o procedimento utiliza uma função

matemática simples, como a Equação (17), para aproximar a superfície sobre cada célula. Desta função pode ser derivada uma equação que estima a posição de P (observação), e conseqüentemente pode-se derivar uma equação de resíduos a serem minimizados, usando o método dos mínimos quadrados.

O procedimento de Interpolação ANUDEM tem sido utilizado com sucesso para a geração de MDE Hidrograficamente Condicionados (MDEHC), fonte de dados para derivar diversos índices hidrológicos, mapeamentos pedológicos e diversas aplicações ambientais. Um exemplo deste procedimento é apresentado no Capítulo II, para a geração do modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado e determinação áreas de preservação permanente.

7. QUALIDADE EM MODELOS DIGITAIS DO TERRENO

A exatidão de MDTs é uma preocupação de usuários e geradores dessa geotecnologia. Para um projeto de MDT, os três principais fatores a serem considerados são: *exatidão*, *eficiência* e *economia* (LI *et al.*, 2005). Porém, exatidão é um dos fatores mais preocupantes, porque se o MDT não atende as especificações de acurácia, então todo o projeto precisa ser revisto e re-avaliado, e neste caso, eficiência e economia também serão afetadas.

7.1 Avaliação da Exatidão do MDT

A superfície do MDT é uma representação tridimensional da superfície do terreno. E, inevitavelmente alguns erros podem estar presentes em cada uma das três coordenadas espaciais (X, Y e Z) dos pontos na superfície do MDT. Duas dessas coordenadas (X e Y) são combinadas para possibilitar a avaliação do erro planimétrico (ou horizontal), enquanto que a terceira, está na direção vertical (Z), e permite a avaliação do erro altimétrico (ou vertical) do modelo.

A avaliação da exatidão do MDT pode ser realizada, pelo menos, segundo dois modelos diferentes (LI *et al.*, 2005):

- (i) Exatidão planimétrica e exatidão altimétrica avaliadas separadamente;
- (ii) Ambas as exatidões verificadas simultaneamente.

No primeiro modelo, os resultados da exatidão planimétrica podem ser obtidos separadamente dos resultados na direção vertical (exatidão altimétrica). Contudo, para o segundo modelo uma medida (índice) de exatidão para ambos os componentes (horizontal e vertical) é necessário definir.

Existem pelo menos quatro métodos possíveis para avaliar a precisão altimétrica do MDT (LEY, 1986), a saber:

- **Predição por produção (procedimento):** neste caso verificam-se as possíveis fontes de erros introduzidos nos estágios de produção, junto com a avaliação da exatidão altimétrica das fontes dos dados;
- **Predição por área:** este método é baseado no fato de que a exatidão altimétrica das curvas de nível no mapa topográfico está altamente correlacionada com a inclinação média da área;
- **Avaliação por teste experimental:** este método é uma avaliação experimental, onde normalmente o modelo completo é testado ao invés de alguns pontos.
- **Avaliação por pontos de controle:** uma amostragem de alturas (cotas ou altitudes) é adquirido da superfície MDT no momento da aquisição dos dados e este conjunto de pontos independentes é utilizado para avaliar o modelo. Este procedimento pode ser conduzido em qualquer estágio (intermediário ou até mesmo final) do projeto.

Segundo Ley (1986) existem pelo menos três métodos para avaliar a exatidão planimétrica do MDT:

- **Sem erros:** neste, caso é assumido que o MDT gera um conjunto de alturas (Z) com posição planimétrica, que são inerentemente precisas;
- **Preditivo:** este método é bastante semelhante ao método de predição por área para a verificação da exatidão vertical;
- **Através das alturas:** fixando as alturas dos pontos de referência, através da comparação de uma série de pontos.

Contudo como é bastante difícil usar esses métodos de avaliação na prática, possivelmente justifica-se o fato da avaliação da exatidão planimétrica em MDT raramente ser mencionada na literatura.

Uma alternativa seria avaliar simultaneamente a exatidão horizontal e vertical. Neste caso, torna-se necessário a definição de um índice capaz de caracterizar a exatidão em três dimensões.

Ley (1986) ainda sugere usar medidas comparativas da média da declividade dos relevos entre a superfície do MDT e a superfície original do terreno. Outros autores (e.g., LI *et al.*, 2005) tem sugerido o uso de outros parâmetros geomorfométricos, como também feições do terreno (pontos e linhas). Contudo, não existe ainda um consenso. Muitos analistas usam na prática avaliar a exatidão das curvas de nível, que nada mais é do que a verificação da exatidão planimétrica isoladamente.

7.2 Medidas para a Exatidão do MDT

Normalmente é assumido que o erro em dados espaciais tem uma distribuição normal, o que, segundo Li *et al.* (2005), nem sempre é verdadeiro para os erros nos MDTs.

Considere que $f(x,y)$ é a superfície original do terreno e $f'(x,y)$ como sendo a superfície do MDT construída, então a diferença $e(x,y)$, ou seja, o erro da superfície do MDT pode ser definida como:

$$e(x,y) = f'(x,y) - f(x,y) \quad (18)$$

Seguindo o tratamento de Tempkli (1980), o erro médio quadrático (MSE, do inglês *mean square error*) pode ser usado como medida para a exatidão do MDT, onde:

$$mse = \iint e^2(x,y) dx dy \quad (19)$$

sendo $e(x,y)$ é uma variável aleatória em termos estatísticos (LI *et al.*, 2005) e a magnitude e dispersão são as duas características de uma variável aleatória. Para medir a magnitude alguns parâmetros podem ser usados, tais como: valores extremos (e_{min} e e_{max}), a moda (valores mais prováveis), mediana (centro da distribuição de frequências), e a média ponderada (valor matemático esperado). Para medir a dispersão, alguns parâmetros, tais como o *range* ($e_{max} - e_{min}$), valor do desvio absoluto esperado, o valor do desvio padrão, podem ser usados.

Resumindo, juntamente com o *mse*, normalmente usado, outros parâmetros podem ser usados para medir a exatidão do MDT:

$$\text{Range: } R = e_{max} - e_{min} \quad (20)$$

$$\text{Média: } \mu = \frac{\sum e}{N} \quad (21)$$

$$\text{Desvio Padrão: } \sigma = \sqrt{\frac{\sum (e - \mu)^2}{N}} \quad (22)$$

A combinação da média e desvio padrão é normalmente aceito para a especificação da exatidão do MDT, apesar da distribuição do erro não ser necessariamente normal. Isto porque a maioria das distribuições de probabilidade é assumida como a distância de 4σ da média (μ), de acordo com o teorema de *Chebyshev* (BURINGTON e MAY, 1970). Este teorema afirma que a probabilidade deve ser no mínimo tão grande quanto $1 - \frac{1}{k^2}$, que uma observação da variável aleatória (e) estará dentro do limite de $\mu - k \times \sigma$ até $\mu + k \times \sigma$, ou seja:

$$P(|e - \mu| < k \times \sigma) < \frac{1}{k^2} \quad (23)$$

Onde k é uma constante maior ou igual a 1. Se a distribuição normal é usada para aproximar a distribuição de $e(x, y)$, então o desvio padrão da Equação (22) tem um sentido especial, que nos é familiar.

7.3 Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)

No Brasil a avaliação da exatidão planimétrica e altimétrica é realizada do Padrão de Exatidão Cartográfica. Essa avaliação da exatidão posicional tem como base a análise dos resíduos entre as coordenadas de pontos retirados de algum produto cartográfico e seus homólogos observados em campo (GALO e CAMARGO, 1994).

Uma das formas de analisar a exatidão planimétrica e altimétrica é através do Decreto-Lei nº. 89.817, publicado pelo Diário Oficial da União em 20 de junho de 1984, que estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional

No Capítulo II do Decreto-Lei nº. 89.817, os artigos 8º e 9º, dispõem sobre o Padrão de Exatidão Cartográfica e a classificação de uma carta quanto à sua exatidão posicional (qualidade geométrica).

Em síntese, os padrões do PEC são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores do PEC e do EP de acordo com as classes.

Classe	Planimetria		Altimetria	
	PEC	EP	PEC	EP
A	0.5 mm x escala	0.3 mm x escala	1/2 da eqüidistância	1/3 da eqüidistância
B	0.8 mm x escala	0.5 mm x escala	3/5 da eqüidistância	2/5 da eqüidistância
C	1.0 mm x escala	0.6 mm x escala	3/4 da eqüidistância	1/2 da eqüidistância

Na literatura existem vários métodos que foram empregados para avaliar o PEC, pois o Decreto-Lei nº. 89.817/1984 não define uma metodologia específica para a avaliação de qualidade posicional em produtos cartográficos. Estes métodos se baseiam na análise dos resíduos das coordenadas dos pontos de controle definidos no produto cartográfico e de seus homólogos coletados em campo ou em algum produto que seja mais preciso (VIEIRA *et al.*, 2002).

Segundo Vieira *et al.* (2002) este método é um dos mais completos existentes na literatura, pois além de avaliar o PEC, ele também analisa se existe no produto cartográfico alguma tendência nas componentes da coordenadas.

7.4 Método de Avaliação do PEC através de Testes de Hipóteses

Este método se dá através de procedimentos descritos por Merchant (1982), que se baseiam em testes estatísticos, onde não se avaliam erros isolados e sim, o desvio padrão da amostra (SANTOS, 2008).

Segundo Galo e Camargo (1994), a análise estatística da qualidade geométrica de um produto cartográfico é obtida por meio da *análise de precisão* e *análise de tendência*, esta última usada para verificar erros sistemáticos. Estas análises são realizadas através de testes de hipóteses sobre a *média* e o *desvio padrão amostral dos resíduos*, obtidos pela diferença entre as coordenadas de campo (E_c, N_c) e da imagem ou do mapa (E_i, N_i), conforme a Equação (24):

$$(\Delta E_j, \Delta N_j, \Delta H_j) = (E_c - E_i, N_c - N_i, H_c - H_i) \quad (24)$$

Obtêm-se, então, a média e o desvio padrão (S) para cada uma das componentes, como mostram as Equações (25) e (26):

$$\Delta \bar{E} = \frac{\sum \Delta E_j}{n} \quad (25)$$

$$S = \frac{\sum (\Delta E_j - \Delta \bar{E})^2}{n - 1} \quad (26)$$

Onde n é o número de elementos da amostra.

Com estas estatísticas amostrais, realizam-se testes específicos para a avaliação de tendência e precisão.

7.4.1 Teste de Tendência

Para o teste de tendência, utiliza-se o teste t de *Student*, observando um nível de confiança $(1 - \alpha)$ igual a 90% ($\alpha = 0,10$). A partir do número de pontos coletados, chega-se um valor limite $t_{n-1, \alpha/2}$ que pode ser obtido por meio de tabelas. Dessa forma, se o valor absoluto do teste t calculado for menor que o teste t tabelado, Equação (4), para as duas componentes (Norte e Este), ou somente o componente altimétrico e/ou a resultante planimétrica, o mapa ou a imagem estará livre de erros sistemáticos nas suas coordenadas.

$$|t \text{ calculado}| < t_{n-1, \alpha/2} \quad (27)$$

O teste t de *Student* é calculado obedecendo às seguintes hipóteses e fórmulas:

Para a coordenada E :

H_0 : se $\Delta E=0$, então E não é tendencioso;

H_1 : se $\Delta E \neq 0$, então E é tendencioso;

$$t_{calc_E} = \frac{\overline{\Delta E} \cdot \sqrt{n}}{S_E} \quad (28)$$

Para a coordenada N :

H_0 : se $\Delta N=0$, então N não é tendencioso;

H_1 : se $\Delta N \neq 0$, então N é tendencioso;

$$t_{calc_N} = \frac{\overline{\Delta N} \cdot \sqrt{n}}{S_N} \quad (29)$$

Para a coordenada H :

H_0 : se $\Delta H=0$, então H não é tendencioso;

H_1 : se $\Delta H \neq 0$, então H é tendencioso;

$$t_{calc_H} = \frac{\overline{\Delta H} \cdot \sqrt{n}}{S_H} \quad (30)$$

7.4.2 Teste de Precisão

Para aplicar o teste de precisão, utiliza-se o teste Qui-quadrado, que obedece aos valores do Erro Padrão (EP) estabelecido no Decreto-Lei 87.817, de 20 junho de 1984, para cada classe (Tabela 3).

Para calcular o erro padrão (σ) de cada componente utilizam-se as Equações (31) e (32).

$$\sigma_N = \sigma_E = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (31)$$

$$\sigma_{\text{Planimétrico}} = \sigma_{\text{Altimétrico}} = EP \quad (32)$$

O mapa ou a imagem analisada atenderá à precisão (classe A, B ou C) se o valor do teste Qui-quadrado calculado (χ^2_N , χ^2_E e χ^2_H) for menor que o teste Qui-Quadrado tabelado ($\chi^2_{n-1, \alpha}$), Equação (33), para as duas componentes (Norte e Este) ou somente o componente altimétrico e/ou a resultante planimétrica.

$$\chi^2_{\text{calculado}} < \chi^2_{(n-1, \alpha) \text{ tabelado}} \quad (33)$$

As hipóteses para o teste do Qui-Quadrado testam se a variância dos resíduos (amostra) é igual à variância estabelecida pelo Decreto-Lei nº. 89.817/84 (σ^2_0). As hipóteses e fórmulas para o teste Qui-quadrado são as seguintes:

Para a coordenada E :

H_0 : se $\sigma^2 E = \sigma^2_0$;

H_1 : se $\sigma^2 E > \sigma^2_0$;

$$\chi^2_E = \frac{(n-1) \cdot S_E^2}{\sigma_E^2} \quad (34)$$

Para a coordenada N :

H_0 : se $\sigma^2 N = \sigma^2_0$;

H_1 : se $\sigma^2 N > \sigma^2_0$;

$$\chi^2_N = \frac{(n-1) \cdot S_N^2}{\sigma_N^2} \quad (35)$$

Para a coordenada H :

H_0 : se $\sigma^2 H = \sigma^2_0$;

H_1 : se $\sigma^2 H > \sigma^2_0$;

$$\chi^2_H = \frac{(n-1) \cdot S_H^2}{\sigma_H^2} \quad (36)$$

Portanto, para uma determinada escala, o mapa ou a imagem será classificada com a classe A, B ou C em função dos resultados obtidos nos testes de precisão.

No Capítulo III será apresentada uma avaliação da exatidão planimétrica de imagens IKONOS ortoretificadas com MDEs de diferentes resoluções.

8. USO E APLICAÇÕES DO MDT

Desde sua concepção na década de 1950, MDTs vêm sendo utilizados para aplicações em diversas áreas de conhecimento, tal como na engenharia civil, mapeamento, engenharia militar, geologia, geomorfologia, recursos naturais e meio-ambiente, navegação marítima e telecomunicação (LI *et al.*, 2005).

As aplicações são procedimentos de análise executados sobre os modelos digitais do terreno. As aplicações podem ser qualitativas, tais como a visualização do modelo usando-se projeções geométricas planares ou quantitativas tais como cálculos de volumes e geração de mapas de declividades, entre outros (FELGUEIRAS e CÂMARA, 1999).

Nesta seção serão destacadas as principais aplicações de MDEs e MDSs.

8.1 Mapeamento e Sensoriamento Remoto

8.1.1. Geração automática de curvas de nível.

Através do uso de técnicas de interpolação, as curvas de nível podem ser obtidas a partir de MDEs nas estruturas grade regular e malha triangular (Figura 20).

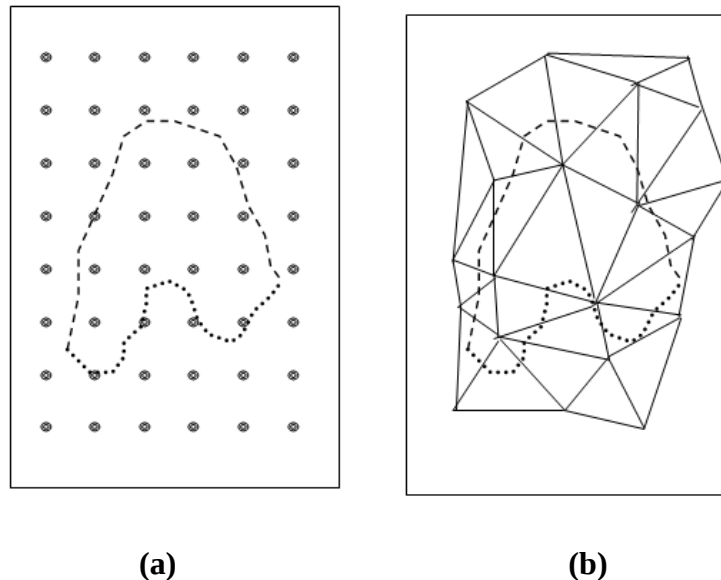


Figura 20: Curvas de nível obtidas a partir de uma grade regular (a) e por malha triangular irregular (b).

(Fonte: Adaptado de SPRING, 2009)

8.1.2. Geração de Ortoimagens.

A ortorretificação de imagens ou fotografias aéreas pressupõe correção geométrica rigorosa com o uso de pontos de controle e MDE, com precisões compatíveis com a sua representação final segundo sistema geodésico, um sistema de projeção, e uma determinada escala.

A Figura 21(a) apresenta a distorção causada pelo relevo. O ponto **A** sobre a superfície topográfica tem uma determinada altitude que gera um deslocamento aa' na imagem. No processo de ortorretificação, se a altitude de cada pixel na imagem, por exemplo, no ponto “a” pode ser obtida a partir do MDE, a correção do relevo poderá ser aplicada. (LI *et al.*, 2005). A determinação da altitude é feita por processo iterativo (LI *et al.*, 2005 *apud* Albertz *et al.*, 1999), conforme Figura 21(b).

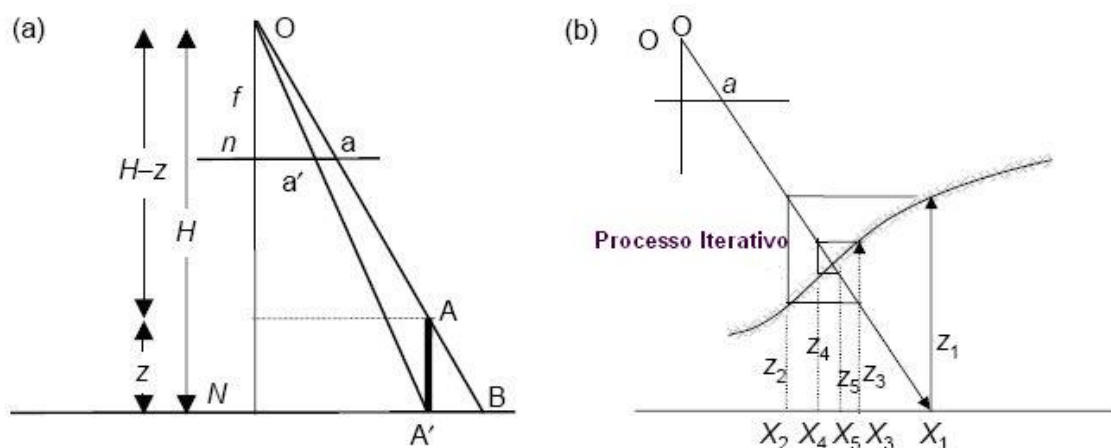


Figura 21: Distorção de imagem devido ao relevo (a) e sua correção (b).

(Fonte: Adaptado de LI *et al.*, 2005).

No Capítulo III é realizada uma avaliação da exatidão planimétrica de imagens IKONOS ortoretificadas com MDEs usando diferentes resoluções.

8.2 Engenharia Civil

8.2.1. Obras Viárias

O desenvolvimento de uma rede de transporte é um processo complexo, que leva em consideração estudos de viabilidade, planejamento e concepção, definição de rotas e traçados, cálculos de terraplenagem, tipo de pavimentação, desenho de pontes e viadutos, entre outros.

Neste contexto, MDEs constituem poderosa ferramenta para auxiliar a execução de obras viárias.

Devido a variações existentes no terreno, é bastante improvável que uma rodovia ou ferrovia seja construída sem qualquer terraplenagem. Em alguns casos o grau de dificuldade aumenta devido à necessidade da construção de túneis, pontes e/ou viadutos, causando a modificação de áreas planas e movimentadas (Figura 22).

Segundo Li *et al.*(2005), os estudos para construção de uma rodovia ou ferrovia consideram além de condições geológicas adequadas, que o traçado deve ser caracterizado por declives suaves e poucas curvas, a fim de minimizar esforços com a terraplenagem. Tradicionalmente, todo esse trabalho era desenvolvido a partir do mapeamento de curvas de nível, e atualmente os MDEs têm sido amplamente utilizados para elaboração perfis (ao longo da linha diretriz projetada), e seções transversais, para calcular o volume de terraplenagem, para a geração de vistas em perspectiva, e mesmo para a produção de animação 3-D. Como é possível estabelecer várias rotas para um mesmo projeto, pode-se obter a rota ideal de forma mais otimizada (LI *et al.* , 2005).

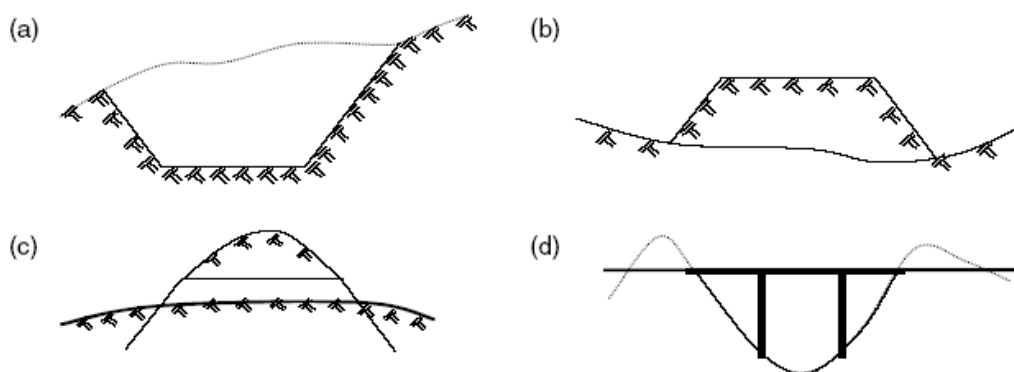


Figura 22: Casos envolvendo projetos de estradas e ferrovias: **a)** seção transversal de corte na forma de escavação; **b)** seção transversal de aterro; **c)** perfil para escavação de túnel; **d)** perfil para construção de pontes e viadutos.

(Fonte: adaptado de Li *et al.*, 2005.)

A simulação do traçado da rodovia e sua interação com a paisagem pode ser visualizada através da representação do MDE na estrutura TIN, dada sua capacidade de permitir inserção ou eliminação de pontos da rede triangular. (LI *et al.* ,2005). A Figura 23 apresenta uma superfície triangular onde os valores de elevação das margens da futura estrada

foram incluídos no modelo original do terreno, assim como os valores de elevação original de alguns pontos nessa região foram modificados. A Figura 24 apresenta uma visão 3-D deste modelo, que pode então ser utilizado para estudos de viabilidade da rota proposta. Por fim, a Figura 25 mostra uma o desenho da estrada segundo a representação TIN, com efeito de sombreamento.

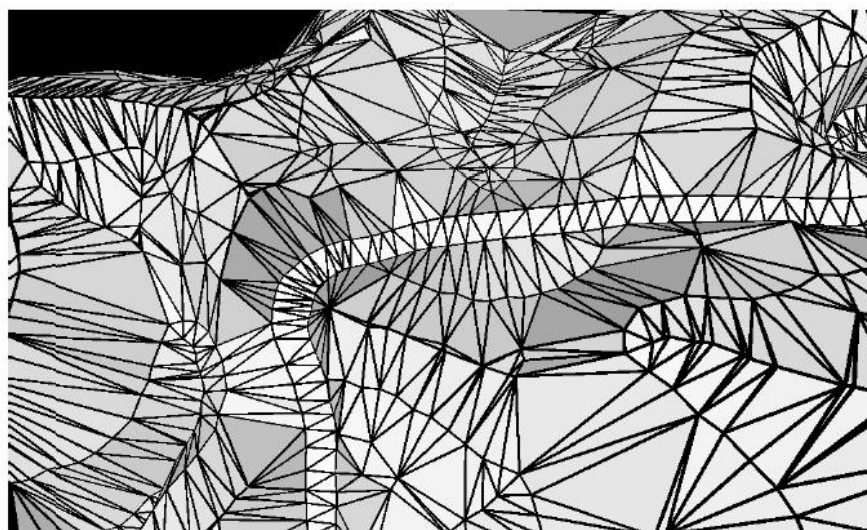


Figura 23: Representação triangular da superfície com inclusão da rodovia projetada
(Fonte: adaptado de Li *et al.*, 2005.).

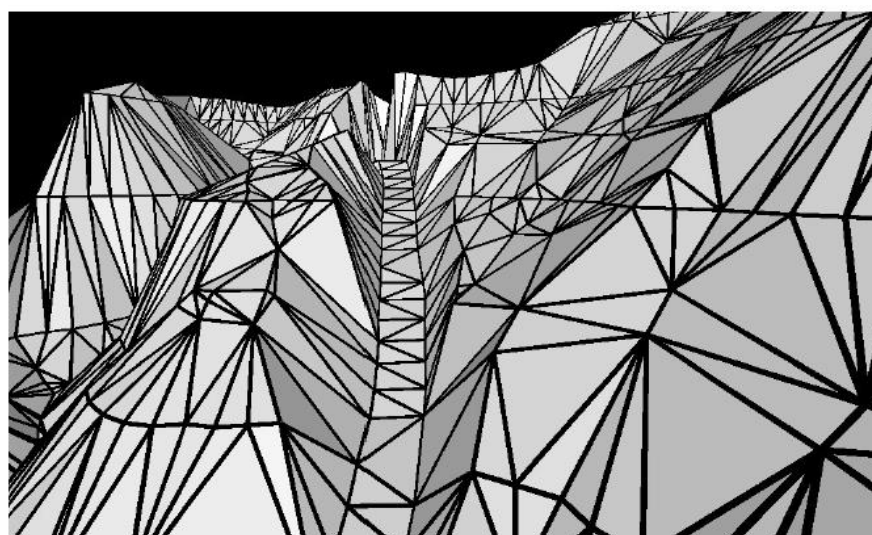


Figura 24: Vista 3-D da representação triangular apresentada na Figura 08
(Fonte: adaptado de Li *et al.*, 2005.).



Figura 25: Rodovia projetada e visualizada a partir de MDE na estrutura TIN, com efeito de sombreamento.

(Fonte: adaptado de LI *et al.*, 2005.)

8.2.2 Projetos de construção de barragens

MDEs podem ser usados em complemento às tradicionais curvas de nível para ajudar na escolha do local de construção, bem como possibilita estimar o volume de água do reservatório. Maiores detalhes sobre os cálculos de volume para essa aplicação específica podem ser obtidos em Li *et al.* (2005).

8.3 Recursos Naturais e Meio-Ambiente

Nesta seção serão apresentados algumas aplicações da Modelagem Digital do Terreno aplicados a recursos naturais e meio ambiente. No Capítulo IV será apresentado um exemplo detalhado do uso de MDEs para a determinação de Índice de Fragmentação e a Zonas Prioritárias de Conservação dos solos nas regiões das cabeceiras dos rios na Bacia do Alto Paraguai usando análise multicritério.

8.3.1. Mapeamento de florestas

Através do uso de MDSs obtidos pela tecnologia de perfilamento a laser é possível mapear simultaneamente tanto a superfície do terreno (solo) quanto a superfície definida pela copa das árvores, condições essenciais para determinação de volume e altura de vegetação, estimativa de biomassa, além de remoção virtual de cobertura vegetal (MAUNE *et al.*, 2001), conforme ilustra a Figura 26.

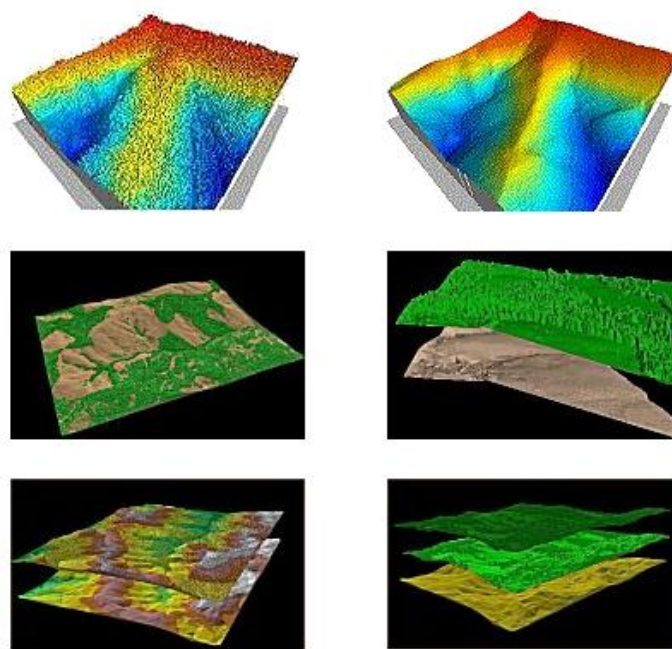


Figura 26: Superfície topográfica e superfície definida pela copa das árvores, obtidas pela tecnologia Lidar
(Fonte: Lidar, 2009).

8.3.2 Apoio ao Turismo

Uma outra aplicação que tem ganhando visibilidade é a utilização de mapas de aspecto e declividade voltados para o turismo ecológico, especialmente aquele que envolva caminhadas em trilhas. Os mapas de declividade indicam os trechos mais adequados para atividade em função do esforço da subida, e os mapas de aspecto orientam quanto ao melhores horários devido à incidência da luz solar.

Um estudo interessante foi desenvolvido por Oliveira *et al.* (2009), que objetivou a geração de mapas temáticos de declividade e aspecto como suporte às atividades de definir rotas em duas trilhas ecológicas na região da Chapada Diamantina/BA, chamadas “Rampa do Caim” e “Maria Du Zó”.

Através do mapa de declividade (Figura 27) foi possível observar que a trilha da Rampa do Cain apresenta uma declividade que varia de 5° a 47°, ou seja, possui superfície bastante íngreme, principalmente no seu final (região mais escura do mapa). Já na trilha na Maria Du Zó a declividade varia de 0° a 13°, apresentando relevo com ondulações suaves (OLIVEIRA *et al.*2009)

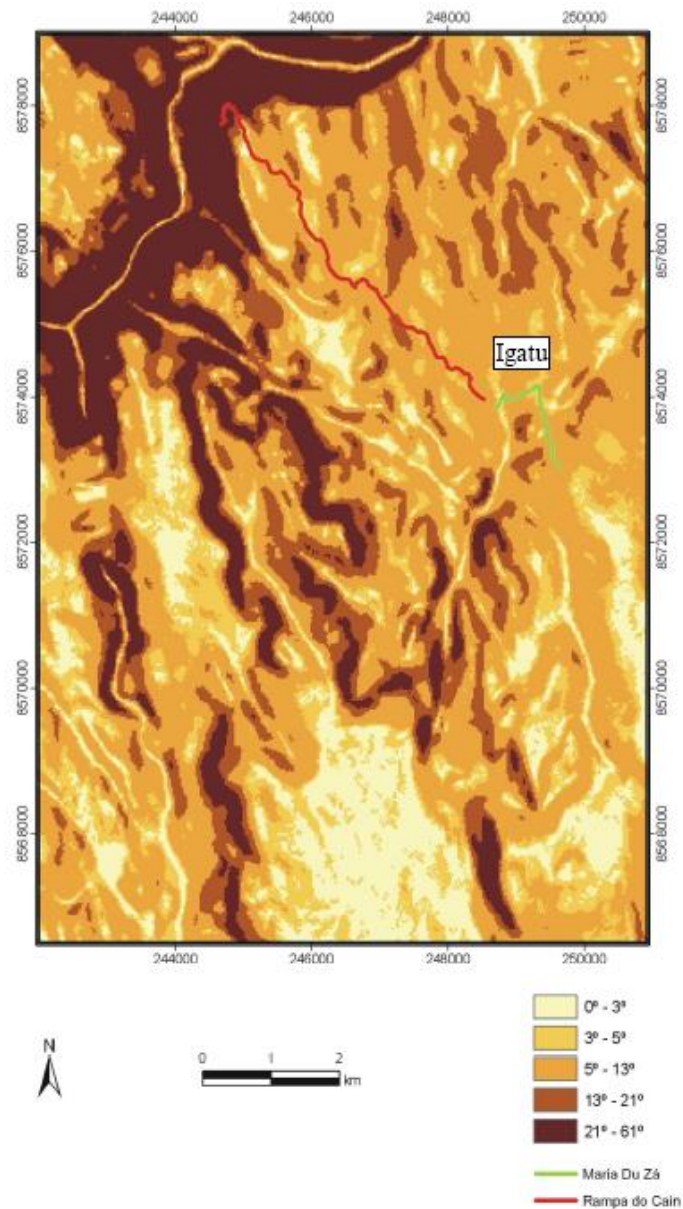


Figura 27: Mapa de Declividade

(Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 2009)

Através do mapa de aspecto (Figura 28) foi possível definir o melhor horário para realizar as trilhas. Segundo Oliveira *et al.* (2005), como a trilha Rampa do Caim tem parte de suas encostas voltadas para nordeste, recebe mais incidência de luz solar na parte da manhã, enquanto que a segunda trilha, com boa parte do trecho voltado para sudoeste, está mais exposta ao sol na parte da tarde.

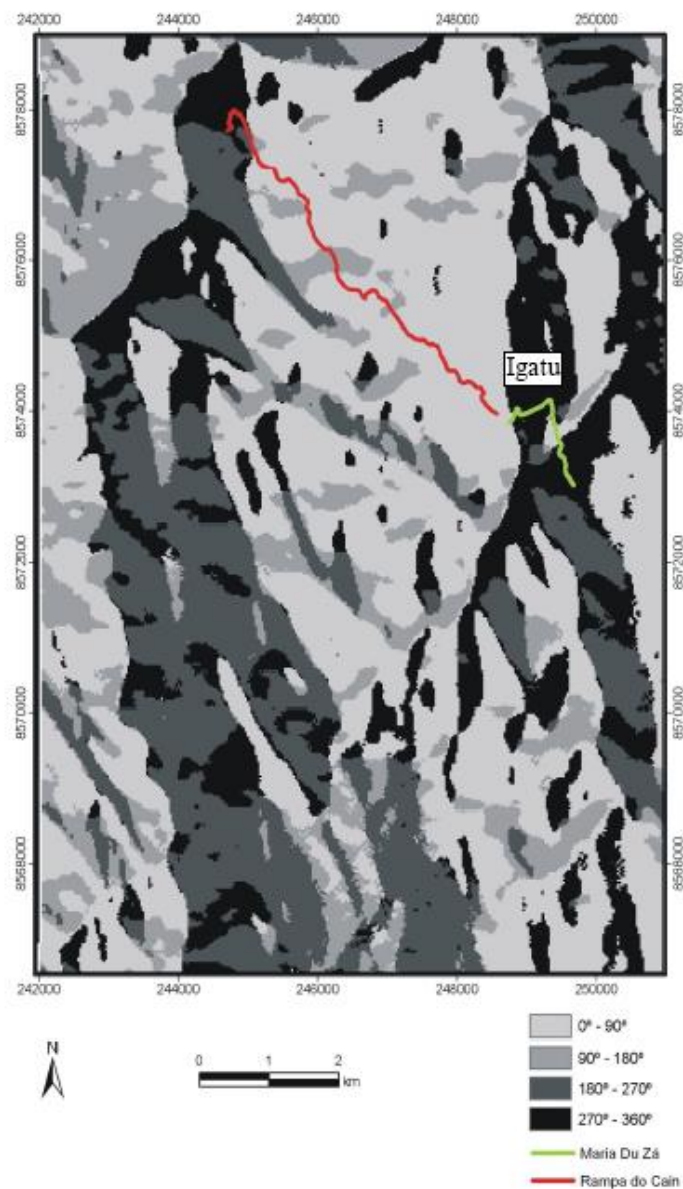


Figura 28: Mapa de Aspecto
(Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 2009)

8.4 Telecomunicações

A tecnologia de perfilamento a laser, *Lidar*, tem sido utilizada para obtenção de MDS que permitem estudos de propagação de ondas e posicionamento de antenas receptoras e transmissoras, na medida em que consideram não só as elevações da superfície topográfica, como de todos os objetos acima dela - edificações e cobertura vegetal (Figura 29).

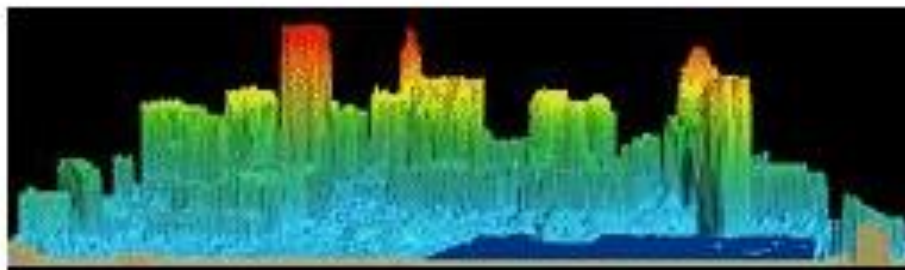


Figura 29: MDS obtido com Lidar
(Fonte: LIDAR, 2009)

8.6 Navegação Marítima

A navegação segura e eficiente depende da existência de cartas náuticas e dados hidrográficos confiáveis e consistentes (MAUNE *et al.*, 2001). Nesse sentido, o uso combinado de cartas náuticas com modelos digitais de elevação que representam a superfície batimétrica proporciona uma poderosa opção à navegação segura. A Figura 30 apresenta um exemplo de visualização em perspectiva 3D de uma embarcação no canal de *East Lamma* (China).

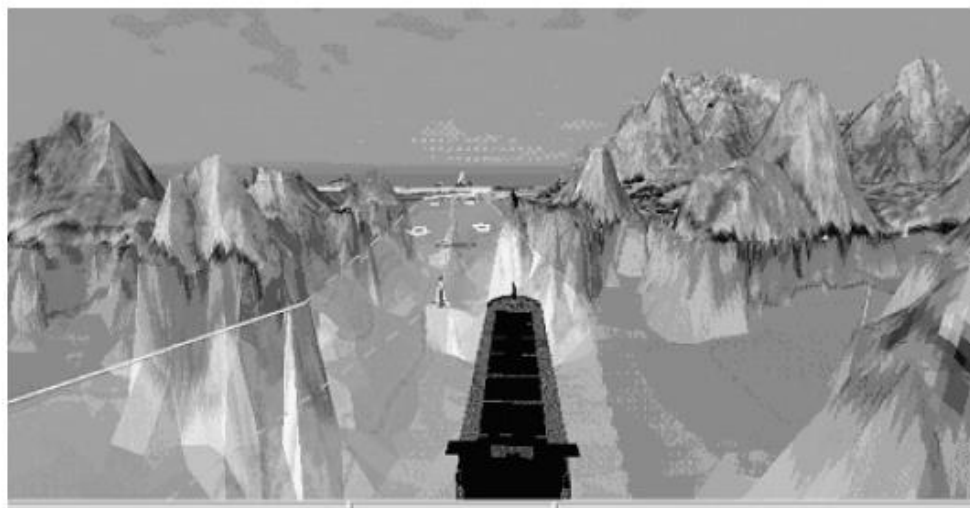


Figura 30: Canal *East Lamma*
(Fonte: LI *et al.*, 2005)

CAPÍTULO II: GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO HIDROGRAFICAMENTE CONDICIONADO E DETERMINAÇÃO ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE

1. INTRODUÇÃO

As *áreas de preservação permanente* (APPs) são definidas na Lei 4.771 de 1965 (BRASIL, 1965), com a finalidade de evitar a degradação de ecossistemas, conservar o meio ambiente e manter a qualidade de vida. Na maioria das vezes, as áreas de APP não são respeitadas, quanto à sua declividade, topos de morros, margens de rios e nascentes dos mananciais, o que vêm provocando, em muitos casos, o uso inadequado dos recursos naturais. Nestas áreas não se pode fazer a retirada da cobertura vegetal original, afim de que possa exercer, em plenitude, suas funções ambientais (MOREIRA, 1999).

No Brasil, os dispositivos legais ligados à preservação ambiental surgiram de forma sistemática na década de 30. Foram criadas medidas de conservação e preservação do patrimônio natural, criação de parques nacionais e declaração de áreas como florestas protetoras nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste; além do estabelecimento de normas de proteção dos animais; promulgação dos Códigos Florestal, de Águas e de Minas (COELHO e BORGES, 1984).

Mais recentemente, tendo em vista os compromissos assumidos pelo Brasil perante a Declaração do Rio de Janeiro de 1992 e a necessidade de se regulamentar a Lei 4.771/65, entrou em vigor, dia 13 de maio de 2002, a Resolução nº 303, no Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Essa resolução estabelece parâmetros, definições e limites referentes às APPs e adota, ainda que implicitamente, a bacia hidrográfica como unidade de sua aplicação.

Embora a legislação ambiental brasileira seja considerada bastante ampla, alguns fatores têm contribuído para torná-la pouco ágil, dentre esses, destaca-se principalmente a ineficiência para se apurar com rigor as agressões ao meio ambiente, ligadas às bacias hidrográficas (NASCIMENTO *et al.*, 2005).

Para proteger o meio ambiente na sua forma natural das agressões humanas (atividades antrópicas), foram criadas áreas de preservação permanente, com o objetivo de delimitar áreas impróprias para o uso da terra, a fim de se manter a cobertura vegetal original nestes locais (SILVA, 1996).

Para Moreira *et al.* (2003) a delimitação das áreas de preservação permanente, em ambiente computacional, tem sido realizada a partir do uso de aplicativos de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), como por exemplo, o *ArcINFO/ArcGIS*, *IDRISI*, *SPRING*, etc.

Mas segundo Hott *et al.* (2005) a utilização de técnicas de geoprocessamento poderia contribuir na determinação automática dessas áreas de preservação permanente em topos de morros e montanhas, caso um procedimento metodológico fosse desenvolvido para tal objetivo.

Diante desse contexto, as metodologias possíveis de serem implementadas por meio do geoprocessamento, tornam-se alternativas viáveis para reduzir de maneira significativa às deficiências relativas ao cumprimento das leis pertencentes às Áreas de Proteção Ambiental (NASCIMENTO *et al.*, 2005).

Para o monitoramento das áreas de preservação permanente existe um grande desafio sob o aspecto técnico e econômico, pois os critérios de delimitação com base na topografia exigem o envolvimento de pessoal especializado e de informações detalhadas da unidade espacial em análise. Entretanto, com o desenvolvimento de sofisticados algoritmos (ou procedimentos) e a sua incorporação ao conjunto de funções do SIG, tem proporcionado praticidade e agilidade no processamento de dados necessários para caracterização das variáveis morfométricas do terreno, essenciais para análise das intervenções antrópicas em bacias hidrográficas (OLIVEIRA, 2002).

A funcionalidade e eficácia desses procedimentos, integrada as informações produzidas pelas ferramentas do geoprocessamento (i.e., Sensoriamento Remoto), podem produzir diagnósticos e fornecer subsídios capazes de identificar e mensurar áreas de preservação permanente e reserva legal. Como também fortalecer as ações ambientais de monitoramento como suporte para os instrumentos jurídicos de controle e fiscalização desses ambientes.

Dentre as vantagens de se adotarem abordagens automatizadas para tais processos, destacam-se a confiabilidade e a replicabilidade dos resultados, que podem então ser organizados e facilmente acessados sob a forma de bases de dados digitais (SAUNDERS, 1999).

Como visto no capítulo anterior (Capítulo I), o modelo digital de elevação (MDE) é um caso particular do modelo digital do terreno (MDT), onde um único atributo do terreno é utilizado (i.e., as elevações ou cotas/altitudes), podem ser

modelados em malhas de pontos regulares ou irregulares (LI *et al.*, 2005). As malhas de pontos regulares modelam matematicamente a superfície do terreno através de polígonos regulares como quadrados e retângulos (SANTOS *et al.*, 2000). Os modelos baseados em malhas irregulares ou de Rede Irregular de Triangulação (*Triangulated Irregular Network* - *TIN*) utilizam triângulos de *Delaunay*¹ em sua implementação. Esses triângulos são constituídos por pontos irregularmente distribuídos no terreno com atributos X, Y e Z, que equivalem, respectivamente, à longitude, latitude e altitude. Nesse modelo, são empregados polinômios de graus diferentes, onde a precisão do *TIN* está associada à densidade de pontos na área e ao grau do polinômio usado (ARCKERMANN, 1996; SANTOS *et al.*, 2000).

Os processos de geração dos MDE's baseiam-se na interpolação espacial de dados esparsos, geralmente obtidos da digitalização de curvas de nível e de pontos cotados de mapas planialtimétricos. Diante desse contexto, a utilização de interpoladores para a representação do relevo introduz distorções - suavização e depressões espúrias, que limitam excessivamente a utilização dos MDE's resultantes dos estudos de erosão, por descaracterizarem a rede de drenagem e, conseqüentemente, o escoamento superficial (HUTCHINSON, 1996).

Objetivando contornar os problemas gerados por esses interpoladores, HUTCHINSON (1989) desenvolveu o *ANUDEM* (*Australian National University Digital Elevation Model*) que foi incorporado ao módulo *TOPOGRID* do programa *ArcINFO*, a partir da versão 7.0. O *TOPOGRID* foi desenvolvido para apresentar, ao mesmo tempo, a eficiência computacional dos métodos de interpolação local e a continuidade da superfície proporcionada pelos interpoladores globais.

O método utiliza uma técnica de interpolação baseada em diferenças finitas iterativas para gerar um grid, a partir de pontos e curvas de nível, possibilitando ainda a imposição de linhas de ruptura, tais como divisores de água e rede de drenagem em que o resultado é um MDE dito Hidrograficamente Condicionado (MDEHC) por haver uma coincidência acentuada entre a drenagem derivada numericamente e a hidrografia real (ESRI, 1997).

¹ Mais conhecida como *triangulação de Delaunay*. O critério utilizado na triangulação de *Delaunay* é o de *maximização dos ângulos mínimos (agudos)* de cada triângulo. Isto é equivalente a dizer que, a malha final, deve conter triângulos o mais próximo de equiláteros possível, evitando-se a criação de triângulos com ângulos internos muito agudos (Ver Capítulo I, Seção 5).

Esse desenvolvimento do MDEHC aliado ao aperfeiçoamento de técnicas mais precisas na extração de drenagem numérica e delimitação de bacias hidrográficas, proporciona o uso de Sistemas de Informações Geográficas para obtenção automática das características físicas das bacias de drenagem. Conseqüentemente, garantindo vantagens na automação, em relação aos procedimentos manuais, maior eficiência dos processos e obtenção de resultados e a possibilidade de armazenamento e compartilhamento dos dados digitais (BAENA, 2002).

Diante do exposto, o presente capítulo tem como objetivo comparar os Modelos Digitais Elevação Hidrograficamente Condicionado gerados por diferentes métodos de interpolação e delimitar as áreas de preservação permanente situadas nas encostas com declividade superior a 45 graus, nas áreas de nascentes e nas margens dos cursos d'água da microbacia utilizando técnicas de geoprocessamento.

No tocante à delimitação de topos de morros e linhas de cumeadas, suas implementações tem sido consideradas bastantes complexas e, portanto, foge ao escopo desse capítulo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica é uma área definida topograficamente, e drenada por um curso d'água ou um sistema conectado de cursos d'água, de tal forma que, toda a vazão efluente seja descarregada através de uma simples saída (VILLELLA e MATTOS, 1975).

Um dos desafios da análise hidrológica são o delineamento e a caracterização da rede de drenagem das bacias hidrográficas.

Uma bacia hidrográfica evidencia a hierarquização dos rios, ou seja, a organização natural por ordem de menor volume para os mais caudalosos, que vai das partes mais altas para as mais baixas (BARROSO, 2006)

Ainda segundo Barroso (2006), a partir da definição da bacia hidrográfica como unidade espacial de trabalho, evidencia-se a redução e incertezas em torno do processo de tomadas de decisões, relacionadas às análises ambientais.

Para Nascimento (2005), as consequências das agressões ambientais sobre os recursos hídricos têm repercutido em grande escala na qualidade de vida das populações, afetando o equilíbrio ambiental das áreas drenadas pelas bacias hidrográficas. Apesar disso, à medida que aumenta a demanda para o uso dos recursos hídricos, as ações direcionadas à promover mudanças na forma predatória de sua utilização, continuam sendo implementadas de maneira consideravelmente tímida.

A delimitação automática da bacia hidrográfica a partir de um MDE é obtida rápida e eficientemente, e de forma menos subjetiva, e oferece ainda uma maior quantidade de informações, quando comparadas às técnicas tradicionais aplicadas aos mapas analógicos (TRIBE, 1992).

2.2. Áreas de Preservação Permanente

No tocante à conjuntura Brasileira, as discussões a acerca da preservação e conservação da vegetação nativa, seja ela situada ao longo dos rios ou de cursos d'água, topos de morros e nascentes, tem ocupado lugares de destaque no âmbito das pesquisas que preconizam a importância da proteção dos recursos hídricos.

As áreas de preservação permanente (APPs), de acordo com o disposto no art. 2º do Código Florestal Brasileiro (Lei nº 4.771/65) prevê a *“proteção da cobertura vegetal ou não das áreas de preservação permanente, com função ambiental de preservar a biodiversidade, o fluxo gênico da fauna e flora, os recursos hídricos, proteger o solo além de assegurar o bem estar da população humana”* (BRASIL, 1965). A normalização deste artigo ocorreu em maio de 2002, quando entrou em vigor a Resolução nº 303 do CONAMA. Essa resolução estabelece parâmetros, definições e limites referentes às áreas de preservação permanente, como por exemplo:

- *“ao longo dos rios ou de qualquer curso d’água desde o seu nível mais alto em faixa marginal”*.

- *“morro – elevação de terreno com cota do topo em relação à base entre 50 m e 300 m e encostas com declividade superior a 30% na linha de maior declividade”*.

- *“montanha – elevação de terreno com cota do topo em relação à base superior a 300 m”*.

- *“base de morro ou montanha – plano horizontal definido por planície ou superfície de lençol d’água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota da depressão mais baixa ao seu redor”*.

- *“linha de cumeada – linha que une os pontos mais altos de uma seqüência de morros ou de montanhas, constituindo-se no divisor de águas”*.

Identificando todas as nascentes da rede hidrográfica, demarcar um raio de 50 m em torno de cada uma delas. De acordo com a Resolução nº. 303 do CONAMA (*“Constitui Área de Preservação Permanente a área situada... ao redor de nascente ou olho d’água, ainda que intermitente, com raio mínimo de cinquenta metros de tal forma que proteja, em cada caso, a bacia hidrográfica contribuinte”*), além de delimitar a bacia de contribuição de cada nascente.

Mesmo assim, a preservação das APPs não tem sido respeitada, apesar de constituir-se crime a retirada de vegetação nessas áreas. A legislação atual não prevê a observância da degradação associada ao uso inadequado da terra, muitas vezes estes usos indevidos ocorrem devido ao descaso com que os órgãos públicos têm tratado esta degradação, seja pela limitação operacional ou pela ausência de fiscalização e monitoramento (BARROSO, 2006).

Segundo Oliveira (2005) a dificuldade operacional para realizar o controle, por meio da demarcação oficial das APPs, está ligada principalmente a dois aspectos:

primeiro, a complexidade do processo de demarcação das APPs que, pela abordagem tradicional manual, requer mapas altimétricos e de hidrografia detalhados (grandes escalas), o que esbarra na precariedade do mapeamento sistemático brasileiro. Segundo, a escassez tanto de profissionais experimentados no manuseio dessas informações, quanto de contingente de pessoal, para a fiscalização ambiental.

Para agilizar o processo de fiscalização ambiental, muitas pesquisas já foram desenvolvidas para o mapeamento das áreas de APPs em microbacias (RIBEIRO *et al.*, 2002; MOREIRA *et al.*, 2003; SCHIMITH *et al.*, 2004) e outros em menores escalas (exemplo, HOTT *et al.*, 2005). Acredita-se que os avanços nas áreas de Sistemas de Informação Geográficas (SIG) e Sensoriamento Remoto possibilitam mensurar e delimitar as APPs de forma sistemática, com agilidade, e economia de tempo e mão de obra.

2.3. Utilização de Geoprocessamento na Delimitação de APPs.

O Geoprocessamento pode ser definido como sendo o conjunto de técnicas destinadas à coleta e tratamento de informações espaciais, abrangendo os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e o Sensoriamento Remoto (SR), entre outras tecnologias. O SIG utiliza a representação computacional da informação do espaço geográfico para armazenar, gerenciar, manipulação de dados espaciais, o qual pode ser diretamente usado no processo de tomada de decisão (GOODCHILD, 1986). Segundo Aronoff (1989) a utilização de um SIG pode permitir recuperar, manipular e combinar diversos dados, nas mais complexas tarefas, em diversos formatos (estruturas) de dados.

Os principais sistemas de informações geográficas, comercialmente disponíveis, já contam com diversos recursos, para uma modelagem digital do terreno (TRIBE, 1992). Os relevos, em formato de Modelos Digitais de Elevação Hidrograficamente Condicionados (MDEHC), viabilizam a delimitação automática das áreas de preservação permanente (RIBEIRO, 2005).

Muitos trabalhos têm sido conduzidos, envolvendo a delimitação de bacias hidrográficas, voltando-se para áreas de preservação permanente. Dentre os trabalhos realizados, pode-se citar o de Costa *et al.* (1996), que realizaram um estudo com o objetivo de delimitar e caracterizar áreas de preservação permanente de uma região localizada no município de Viçosa-MG. Costa *et al.* (1996) identificaram quatro

categorias de APPs e elaboraram um diagnóstico quantitativo do uso da terra. Os resultados indicaram que 72,59% das áreas de preservação permanente encontravam-se sob uso indevido.

Ribeiro *et al.* (2002), realizaram um trabalho para delimitação automática de áreas de preservação permanente em topos de morro e ao longo das linhas de cumeada da bacia do Córrego do Paraíso, situada no município de Viçosa-MG. A base de dados utilizada (curvas de nível com equidistância vertical de 10 m e rede hidrográfica) foi produzida por restituição analógica de fotografias aéreas na escala de 1:10.000, posteriormente convertida para o formato digital. Os resultados indicaram que o terço superior das encostas, desconsiderando as definições de morro, montanha e linha de cumeada - constantes da Resolução nº 303 do CONAMA, apontaram para aproximadamente 35% da área da bacia. Atendendo às especificações técnicas da legislação, as áreas de preservação permanente situada ao longo das linhas de cumeada e, portanto, associadas ao terço superior das encostas reduziram-se para cerca de 26% da superfície da bacia.

Segundo Soares *et al.* (2002), analisando a mesma microbacia de Ribeiro *et al.* (2002), com a utilização de SIG e empregando a Resolução 303/2002 do CONAMA, encontrou um resultado mais expressivo, onde 58% da microbacia deveríamos ser ocupadas com APP. A diferença de resultados entre a pesquisa atribui-se ao fato de considerar a área de contribuição das nascentes no cálculo das APP.

De acordo com Hott *et al.* (2005) a delimitação dessas áreas através de métodos analógicos, incluindo a interpretação visual, é subjetiva, eminentemente bidimensional, condicionada à experiência do analista, e sendo sempre passível de contestação. Com a utilização de técnicas quantitativas do geoprocessamento na determinação automática das áreas de preservação permanente em topos de morros e montanhas no Estado de São Paulo, encontrou-se resultados em termos de APP potenciais, representando cerca de 7,7% da área do estado. Observou-se ainda um crescimento das áreas mapeadas com o aumento da escala ou da resolução do modelo digital do terreno, isto devido ao maior detalhamento do relevo apresentado pelo modelo na escala 1:50.000.

De acordo com Barroso (2006), que adotando a metodologia automatizada, apresentada por Ribeiro (2002) na delimitação de áreas de APPs da Bacia hidrográfica do Rio Turvo Sujo, região de Viçosa-MG, concluiu que 45,06% da área total da bacia

seria destinada as áreas de APPs, produzindo de forma eficiente as informações sobre as dimensões e representação espacial dessas APPs.

Para Oliveira *et al.* (2007), que em seu estudo avaliou a delimitação de áreas de APPs para o município de São Leopoldo, com a utilização de imagem de satélite de alta resolução associada a um sistema de informação geográfica, mostrou que cerca de 56,82% da área do seu território é composto por APPs. Este estudo conclui ser eficiente a utilização de imagem de satélite *Quickbird* (associada a uma rede de pontos GPS) no aspecto de localização e quantificação mais precisa das APPs.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais, equipamentos e métodos utilizados para o desenvolvimento dos experimentos serão apresentados a seguir.

3.1 Caracterização da Área de estudo

A área de estudo corresponde à região produtora de café de montanha, localizada na Zona da Mata de Minas Gerais. A região é caracterizada por uma topografia relativamente acidentada e intercalada por áreas planas.

A microbacia está localizada no município de Araponga, MG, denominada Fazenda Braúna, tem coordenadas geográficas da sede da fazenda sendo 20°43' de Latitude Sul e 42°33' de Longitude Oeste.

A microbacia possui aproximadamente 308 ha, onde 86 ha são cultivados com café da espécie *Coffea Arábica L.* Sendo o relevo predominantemente montanhoso, com altitude média de 900 m. Foi realizado um levantamento topográfico da área em estudo, onde se coletou 21.832 pontos, utilizando-se dois pares de receptores GPS diferencial modelo ProXRS da *Trimble* (CAMPOS, 2005).

No processamento do levantamento topográfico, aplicou-se o modo pós-processado dos dados, usando o programa *Pathfinder Office 2.9*. Diante disso, realizou-se o processamento dos dados, visando à obtenção do modelo digital de elevação. Na Figura 1 é apresentada uma foto aérea da área em estudo.

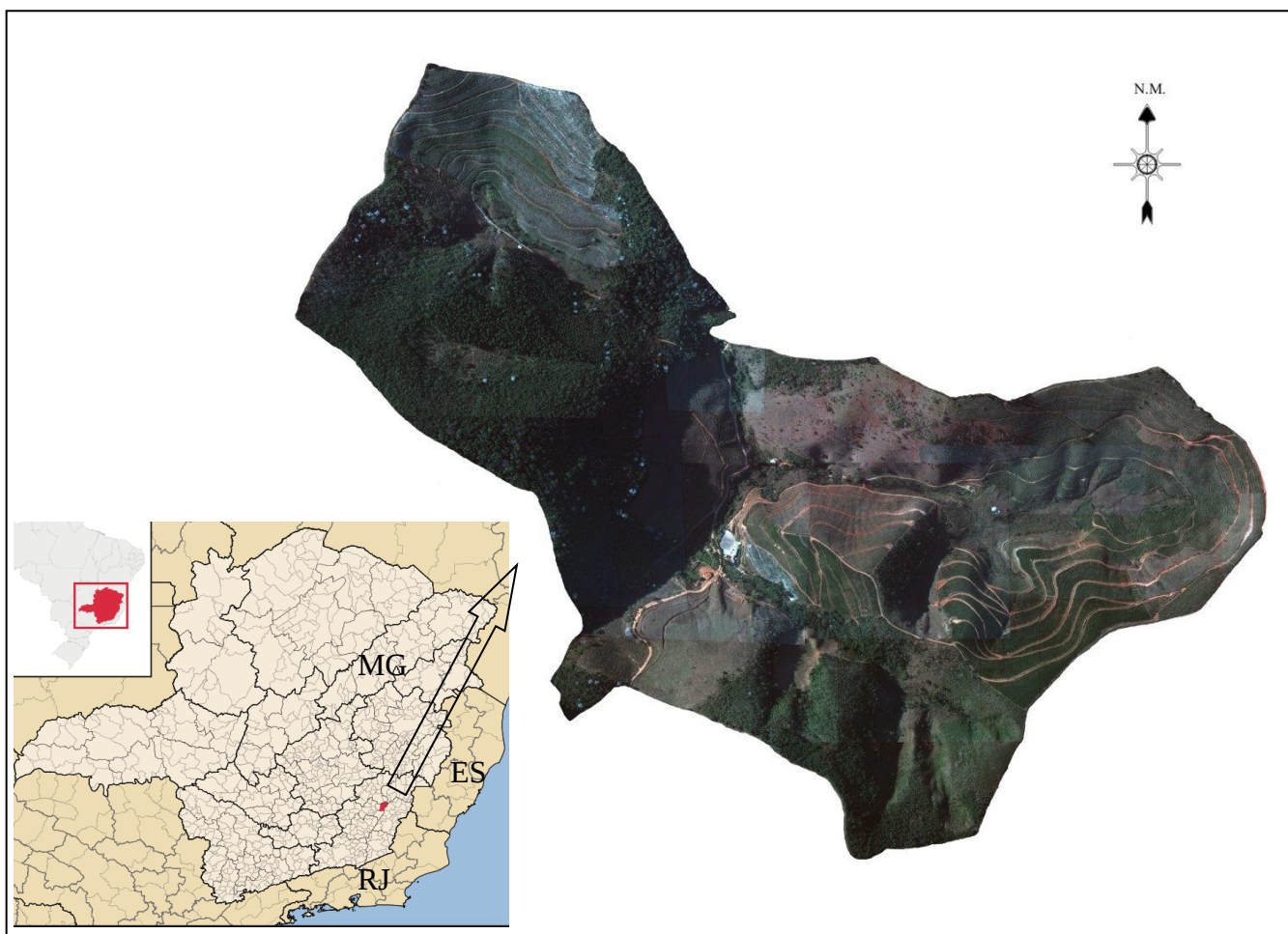


Figura 1: Foto aérea da Fazenda Braúna, localizada no município de Araponga na Zona da Mata de Minas Gerais, adquirida em 09 de setembro de 2003.

3.2 MODELO DE DIGITAL DE ELEVAÇÃO UTILIZANDO SIG

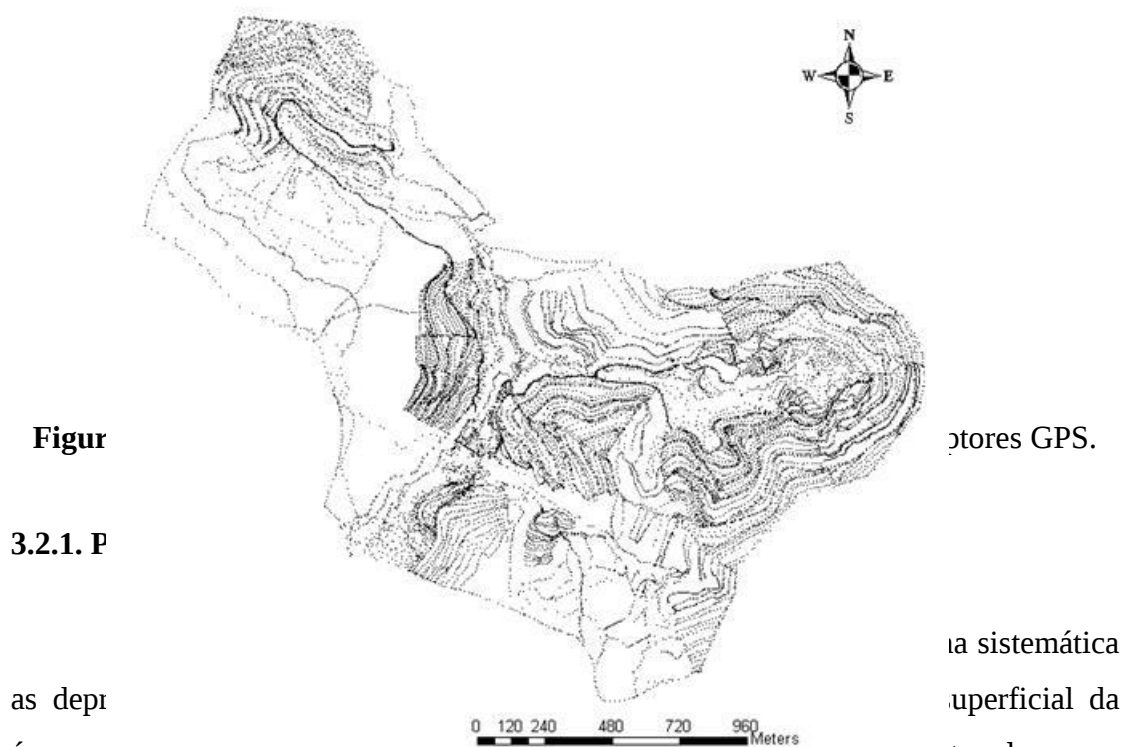
O processo de criação de um Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC) busca, sempre que não haja violação das condições de altimetria, respeitar o traçado da hidrografia mapeada, que atua como linhas de ruptura no processo de interpolação dos dados de elevação. No presente trabalho utilizou-se o módulo *Spatial Analyst* e *3D Analyst* do programa ArcGIS/ArcMap versão 9.2 e o TOPOGRID (ArcINFO, 2001), para geração do MDEHC.

Com os pontos coletados pelos receptores GPS (Figura 2), iniciou-se o tratamento dos dados no ArcGIS.

Em razão dos dados terem sido exportados do Pathfinder Office 2.9 para o AutoCAD, utilizou-se o aplicativo ArcToolbox, do programa ArcGIS, para converter do DWG para *Geodatabase*.

Com os dados de curva de nível geradas de 5 em 5 metros, mais hidrografia e com o limite da microbacia, na *Geodatabase*, procedeu-se a elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE) no ArcGIS através da Rede Irregular de Triângulos (TIN) por interpolação de triângulos, convertendo o mesmo em um GRID.

A partir da elaboração do MDE, foram realizadas operações de processamento e refinamento no MDE com a orientação dos arcos da rede hidrográfica no sentido do escoamento, bem como o ajuste da altimetria à hidrografia para a geração do MDEHC.



as depri

ia sistemática

uperficial da

água, bem como as imperfeições no modelo (Figura 3.2.1. P), cujo escoamento deve ser

direcionado à jusante da bacia de contribuição. A calha representando a hidrografia

foi modelada de modo a aumentar a precisão dos dados representativos do

escoamento, referente aos cursos d'água.

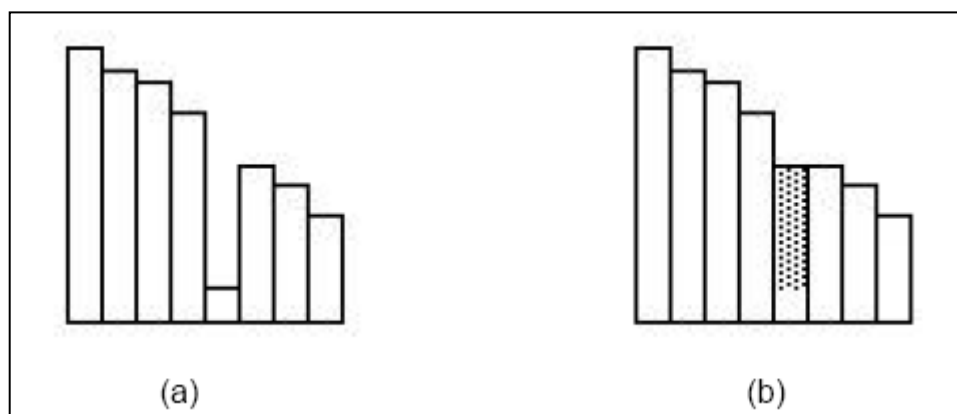


Figura 3: Remoção de pontos de depressão. (a) Caracterização de uma depressão, (b) elevação de valores de altitude subestimados.
(Fonte: Chaves, 2002)

De acordo com Tribe (1992), a ocorrência dessas imperfeições é freqüente nos modelos digitais de elevação, principalmente devido a erros nos parâmetros de entrada ou produzidos durante o processo de interpolação. Portanto, para se obter um MDE hidrograficamente condicionados, as depressões devem ser removidas. Para identificar e remover as imperfeições aplica-se o processamento de consistência hidrológica com o algoritmo *Fill Sinks*, presente no módulo *Spatial Analyst - Hydrology* do ArcGIS – ArcToolbox ou digitando os comandos na calculadora matricial do módulo ArcGIS seguindo o fluxograma (Figura 4). Tais procedimentos podem ser visto em detalhes no **APÊNDICE I**.

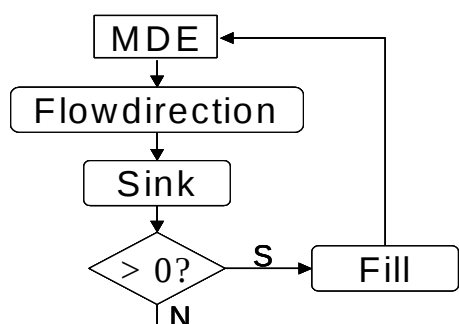


Figura 4 – Fluxograma para eliminação das depressões espúrias

Ao fim do procedimento depois de realizado a Equação (6), deve-se testar se todas as depressões foram preenchidas, procedendo conforme o fluxograma (Figura 4), caso encontrado mais depressões os procedimentos a seguir devem ser repetidos até que não haja mais depressões.

(i) Cálculo da direção de escoamento

A direção do escoamento, por meio comando *FLOWDIRECTION* Equação (1), descreve e espacializa o sentido do fluxo entre cada célula do MDE e de suas oito células vizinhas. O escoamento será dado na direção do maior declive (gradiente), recebendo um dos possíveis valores conforme apresentado na Figura 5.

$$d1 = \text{flowdirection} ([MDE]) \quad (1)$$

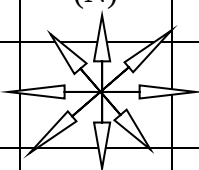
32 (NO)	64 (N)	128 (NE)
16 (O)		1 (E)
8 (SO)	4 (S)	2 (SE)

Figura 5: Processo de extração da direção de escoamento

(ii) Identificações das depressões espúrias

Depressões espúrias são células cercadas por células com maiores valores de elevação. Sua presença em um modelo digital de elevação produz a descontinuidade do escoamento superficial descendente para uma célula vizinha, comprometendo assim a identificação da rede numérica de drenagem. Para solucionar o problema das depressões espúrias, utilizou-se a Equação (2) para encontrar as depressões através do comando *SINK*:

$$s1 = \text{sink} ([d1]) \quad (2)$$

(iii) Delimitando a área de drenagem de cada depressão e identificando a menor altitude na borda das depressões

Para eliminação das depressões espúrias é necessária a delimitação da área de drenagem de cada depressão. Isto é possível através do comando *WATERSHED*, como apresentado na Equação (3), utilizando as direções de escoamento e as depressões espúrias identificadas anteriormente.

$$a1 = \text{watershed} ([d1], [s1]) \quad (3)$$

Todas as células da área de drenagem de cada depressão receberão o valor da menor altitude da borda da respectiva área de drenagem conforme a Equação (4), utilizando o comando *ZONALFILL*.

$$f1 = \text{zonalfill} ([a1], [MDE]) \quad (4)$$

(iv) Preenchendo as depressões

O comando *CON* Equação (5), faz com que as células com altitudes inferiores à menor altitude da borda da área de drenagem de uma depressão terão seus valores substituídos por esse valor. Deste modo as depressões espúrias são eliminadas.

$$p1 = \text{con} ([\text{MDE}] > [f1], [\text{MDE}], [f1]) \quad (5)$$

O próximo passo é substituir no relevo do modelo inicial, o relevo corrigido das depressões. A associação do comando *CON* com o comando *ISNULL* permite essa substituição de acordo com a Equação (6).

$$mf = \text{con} (\text{isnull} ([a1]), [\text{MDE}], [p1]) \quad (6)$$

No procedimento para a geração do MDEHC utilizando o TOPOGRID necessitou de um pré-processamento nos dados para garantir o correto sentido de escoamento da malha hidrográfica e o adequado posicionamento das curvas de nível em relação à calha da rede de drenagem.

Garantida a correção da hidrografia e das curvas de nível, utilizou-se a ferramenta TOPOGRID para realizar a interpolação, estes procedimentos podem ser realizados conforme apresentado no **APÊNDICE II**. Segundo Baena e Silva (2004), o algoritmo do TOPOGRID propõe a incorporação da rede de drenagem digital real durante o processo de geração do MDE. Sempre que há violação das condições de altimetria favoráveis ao escoamento, o traçado da hidrografia mapeada é respeitado. Dessa forma é garantida a coincidência espacial da drenagem mapeada com as células de menor altitude do modelo, configurando-se assim, a criação de um MDEHC.

Após a geração do MDE foram eliminadas as depressões espúrias para resolver possíveis problemas de descontinuidade da rede de drenagem ou segmentação da área de contribuição, procedendo conforme o fluxograma supracitado (Figura 4).

Contudo, foi realizada uma comparação entre os MDEs gerados, com intuito de se obter alguma significância entre os métodos de interpolação conforme a Equação (7). Para esta comparação utilizou-se o módulo *Spatial Analyst* → *Raster Calculator* subtraindo-se os *Grids* gerados.

$$[\text{dif}] = [\text{MDE_topogrid}] - [\text{MDE_arcgis}] \quad (7)$$

onde:

[MDE_arcgis] = grid de MDE gerado no a partir do ArcGIS.

[MDE_topogrid] = grid de MDE gerado no a partir do Topogrid.

A partir daí, foi realizado então uma segunda comparação agora utilizando o MDEHC (Figura 6) gerado no ArcGIS e o MDEHC gerado no TOPOGRID. Procedendo da seguinte forma Equação (8).

$$[dif2] = [MDEHC_topogrid] - [MDEHC_arcgis] \quad (8)$$

onde:

$[MDEHC_m]$ = grid de MDEHC gerado no ArcGIS com TIN e aprofundamento da calha.

$[MDEHC_topogrid]$ = grid de MDEHC gerado a partir do Topogrid.

3.2.2 Determinação das Áreas de Preservação Permanente

O processo de delimitação das APPs ao longo dos rios ou qualquer curso d'água e nascentes, foi baseado de acordo com os itens 2º e 3º da Resolução nº 303, do CONAMA. Assim, descrevemos as suas respectivas formas de delimitação.

Definiu-se uma largura máxima de 3,0 metros para a rede hidrográfica, durante a cheia sazonal. Desta forma, a delimitação das APPs ao longo dos cursos d'água (APP_rios) foi realizado criando-se margens fixas de 30 metros ao longo dos cursos d'água, utilizando-se como base do processo o *grid* que representa a hidrografia mapeada, através do comando *Create Buffer*.

“...Para nas nascentes, ainda que intermitentes, e nos chamados olhos d'água, qualquer que seja a sua situação topográfica, devemos preservar um raio mínimo de 50 m e ainda a sua respectiva área de drenagem...”

A mesma metodologia para obtenção das APPrios foi utilizada para delimitar as APPs ao redor das nascentes (APPnasc), desta vez utilizando o grid contendo as nascentes como base do processo.

Para obter as APPs da área de drenagem de cada nascente (APPareadre), calculou-se o *grid* com base na Equação (9),

$$APPareadre = watershed([diresc_bacia], [nascentes]) \quad (9)$$

em que:

$[diresc_bacia]$ = *grid* de direção de escoamento da bacia;

$[nascentes]$ = *grid* com pontos representando as nascentes da microbacia.

As áreas de preservação permanente em locais com declividade $\geq$ a 45º (APPdecl) foram delimitadas com base na declividade das células do respectivo MDE

através do comando *slope* do ArcGIS, ou ainda, empregando a Equação (10) no módulo *Spatial Analyst* → *Raster Calculator* para delimitação da área,

$$APPdecl = \text{select}([decl_bacia], 'value > 45') \quad (10)$$

em que:

[decl_bacia] = grid com os valores de declividade da microbacia.

O mapa da Área de Preservação Permanente parcialmente até aqui (APptotal) foi obtido através da superposição dos mapas APPrios, APPnasc, APPareadre e APPdecl, levando em consideração que as APP de topo de morro e linha de cumeada não foram determinados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados nesta seção os resultados encontrados e a discussão acerca da comparação dos MDEs gerados por diferentes interpoladores para determinação das APPs.

4.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO HIDROGRAFICAMENTE CONDICIONADO

A Figura 6 representa as células do *grid* do MDEHC gerado a partir da Rede Irregular de Triângulos (TIN), com valores de elevação, expressos em metros. A maior altitude encontrada no local foi de 1.030,00 m e a mínima foi de 755,00 m. Entretanto, posterior a Figura 6 temos a Figura 7 onde a altitude máxima encontrada foi de 1.029,79 m e a mínima de 745,58 m, demonstrando o aprofundamento do relevo ao longo da hidrografia mapeada realizado de acordo com os procedimentos do **APÊNDICE I**.

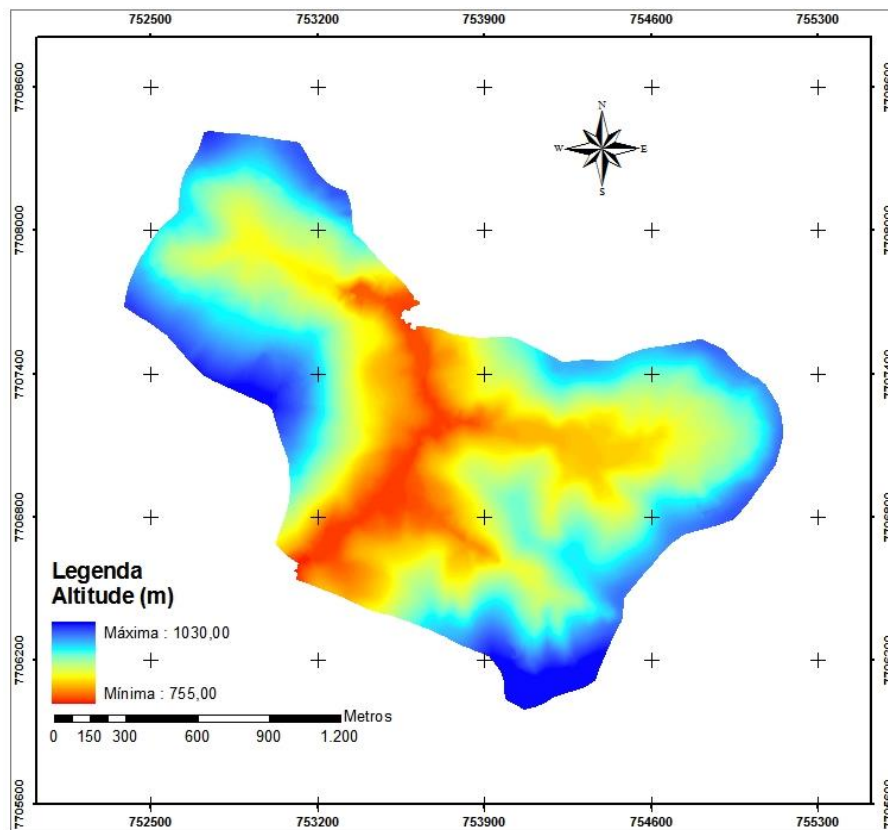


Figura 6: Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado gerado no ArcGIS

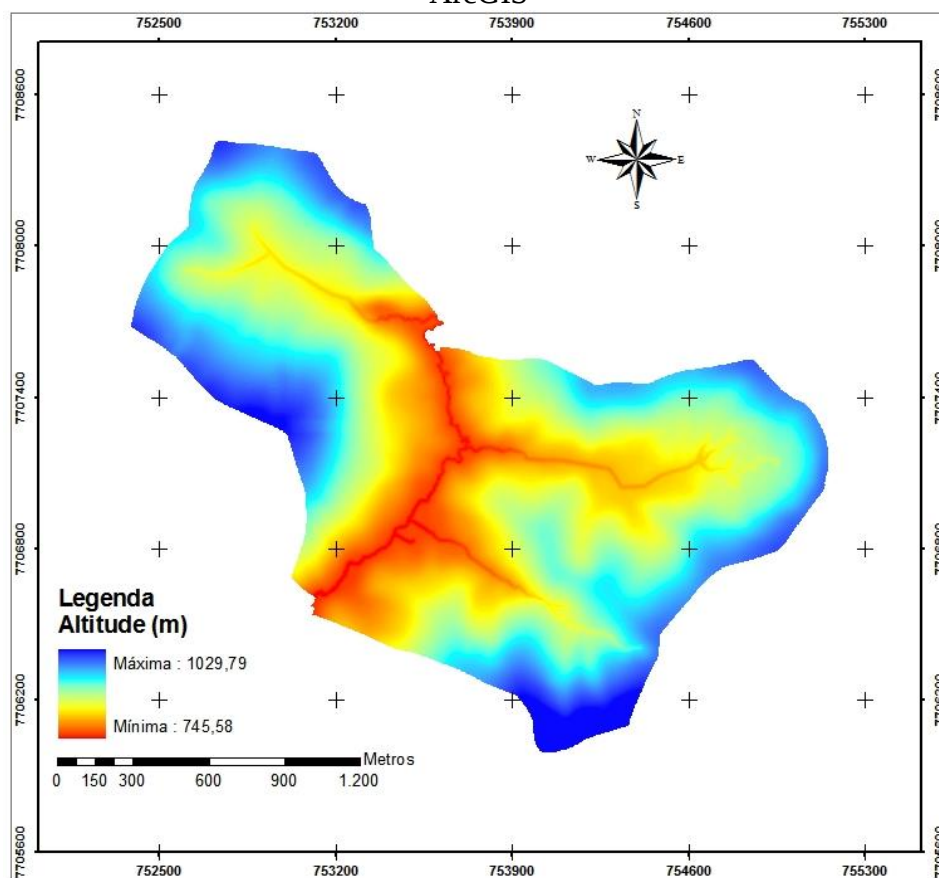


Figura 7: Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado com aprofundamento da calha.

Depois de executado o processo de aprofundamento da hidrografia no ArcGIS, o MDEHC foi exportado para o ARCGIS – ArcScene aplicando-o um exagero vertical Figura 8, produzido assim uma visualização tridimensional da microbacia.

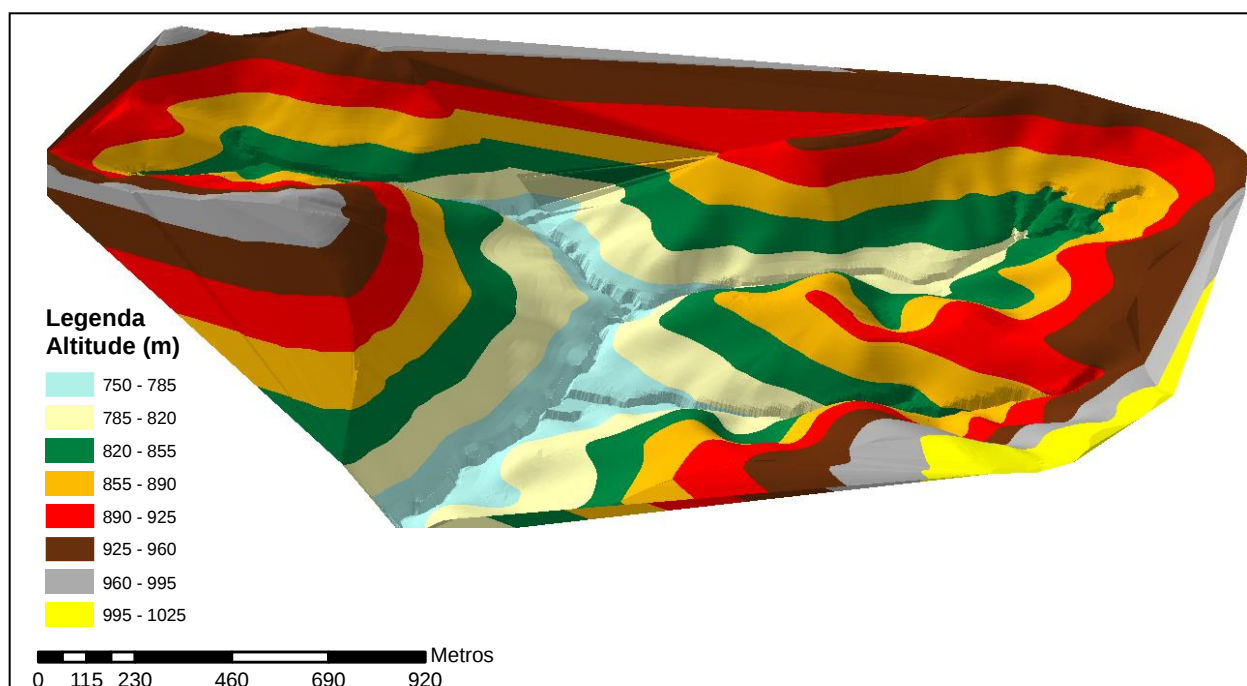


Figura 8: Representação Tridimensional do Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado.

A eliminação das depressões espúrias ao longo da superfície e rede hidrográfica garantiu que o escoamento superficial, do ponto de cada nascente até a foz da microbacia, fosse ininterrupto e coincidente com a drenagem mapeada.

A seguir obteve-se o *grid* do MDEHC (Figura 9) gerado a partir do *TOPOGRID* ArcInfo, com valores de elevação expressos em metros. A maior altitude encontrada no local foi de 1.030,97 m e a mínima foi de 759,08 m.

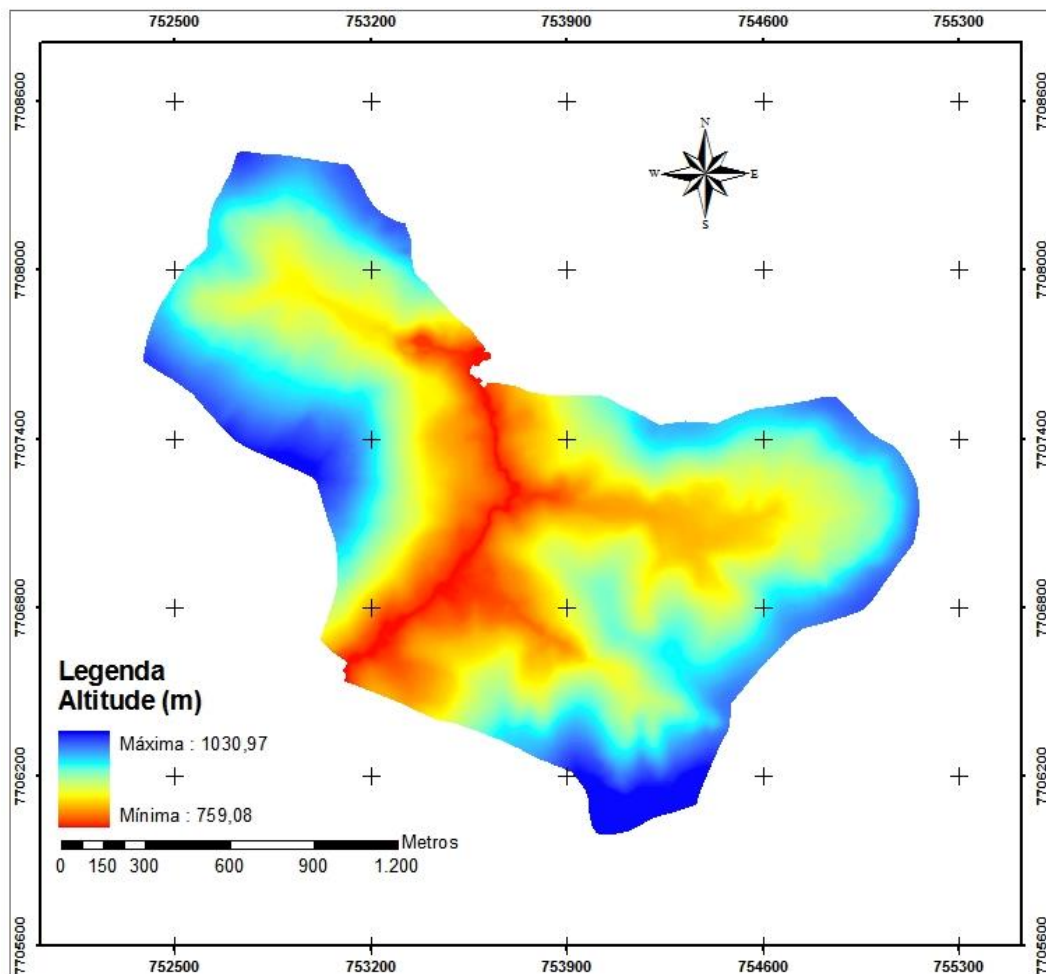


Figura 9: Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado gerado com o *TOPOGRID*.

Qualquer superfície criada com o *TOPOGRID* deve ser avaliada para garantir que os dados e parâmetros fornecidos pelo programa possam representar a realidade do espaço geográfico de forma precisa (*ArcINFO*, 2001). Um dos métodos utilizados para avaliar a qualidade de um MDE é o método visual, o qual faz-se uma comparação entre a rede de drenagem mapeada e a numérica, assim a rede de drenagem numérica é produzida traçando-se o fluxo de escoamento de cada nascente.

É importante destacar que o modelo teve seus valores alterados (depressões preenchidas) apenas em localidades que não compreende calhas dos canais de drenagem, mantendo assim a consistência de fluxo de escoamento.

A Figura 10 demonstra a diferença ocorrida entre os MDEHC gerados por diferentes interpoladores Figura 6 *TIN* (*ArcGIS*) e Figura 9 (*TOPOGRID*), constatando uma diferença de aproximadamente de 7 metros nas partes sul e sudoeste da microbacia, e por volta de 12 metros na hidrografia mapeada uma vez que o *TIN*

constrói grandes platôs em altos de morros, impossibilitando a formação da superfície real pelos interpoladores.

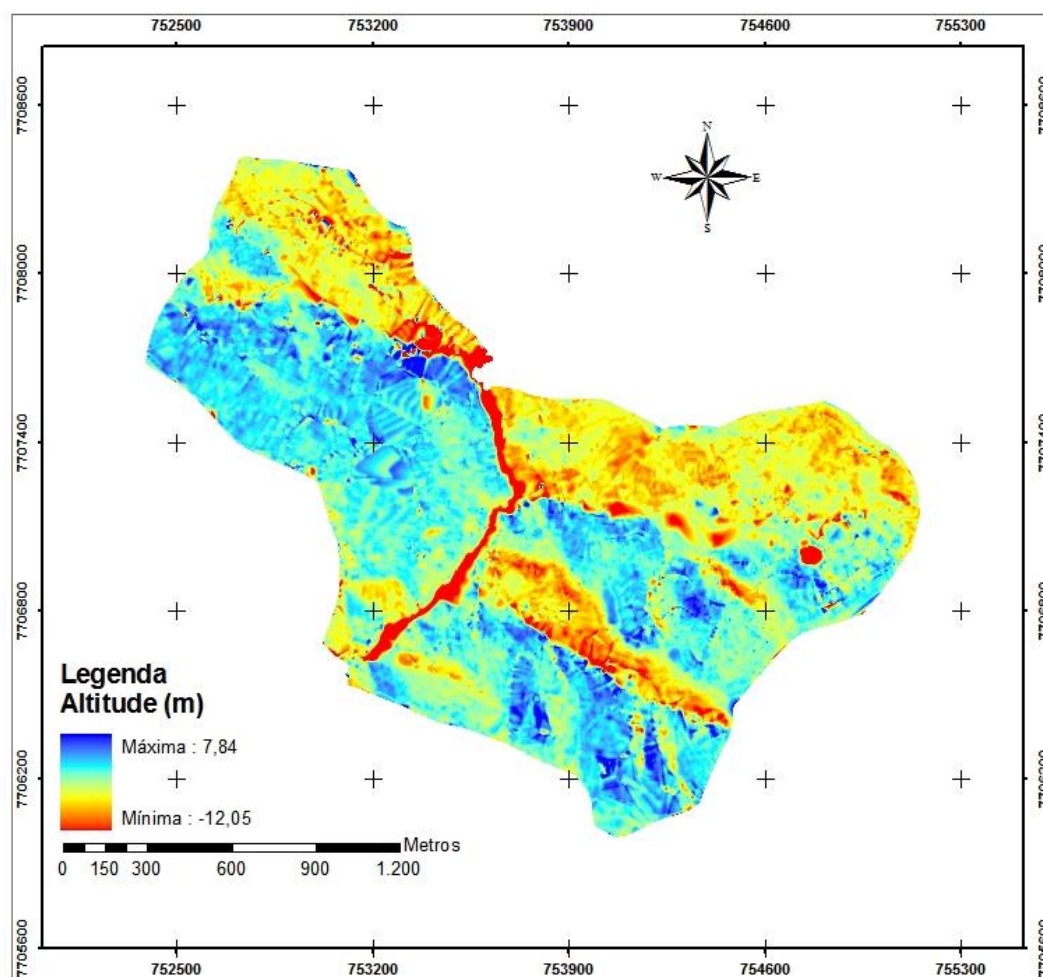


Figura 10: Mapa representativo da diferença entre os MDEHC.

A Figura 11 demonstra a diferença entre os grid de MDEHC, agora utilizando o grid de MDEHC com aprofundamento da hidrografia mapeada gerado pelo ArcGIS (Figura 7) e o MDEHC gerado no *TOPOGRID* (Figura 9), destacando a calha do rio com 23 m de diferença, atribuindo esta diferença ao rebaixamento da calha do rio de acordo com o passo XVIII do **APÊNDICE I** em 10 metros.

Foi detectada também uma diferença de 23 metros em alguns pontos isolados a sudoeste da microbacia entre os dois grid.

Contudo, diante dos dois resultados encontrados pelas superposições dos *grids*, a Figura 11 é a que apresenta maiores proporções de igualdade quanto às comparações entre os diferentes interpoladores, atribuindo a esta melhora aos tratamentos que o MDEHC (Figura 9) recebe em seu processo de construção.

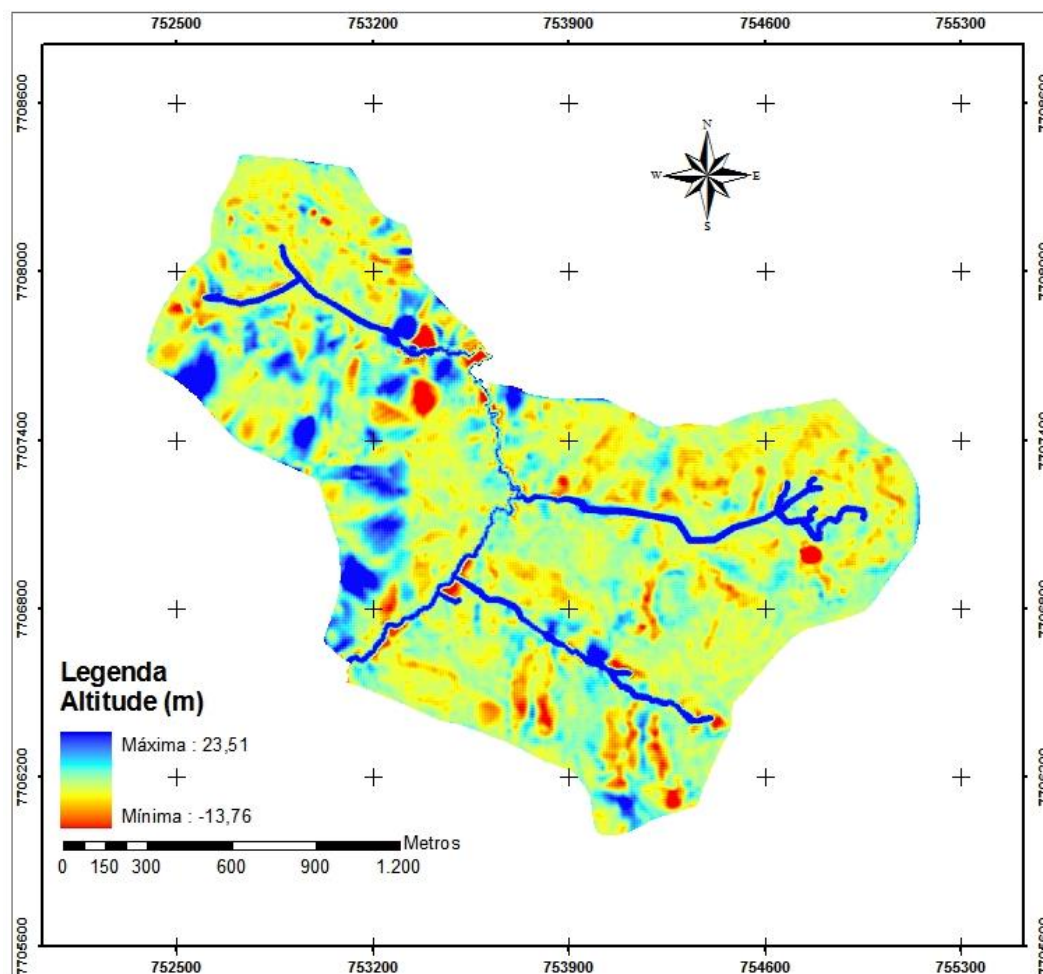


Figura 11: Mapa representativo da diferença entre os MDEs utilizando o MDEHC com aprofundamento da hidrografia.

4.2. ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE

As áreas de preservação permanente (Tabela 1) foram delimitadas de forma individual, de modo que fossem superpostas após a identificação de todas elas. Os itens seguintes exibem as respectivas áreas de preservação de acordo com sua localização na microbacia de estudo. As áreas de APP foram calculadas utilizando a tabela de atributos das Classes de interesse com a criação de um campo (Área) e efetuando assim os cálculos em *hectares (ha)*.

4.2.1. Ao Longo de Cursos D'água

O grid APPrios (Figura 12) contém as áreas de preservação ao longo da hidrografia, gerado com base no *grid* que representa a hidrografia mapeada, através do comando *Create Buffe* do ArcINFO.

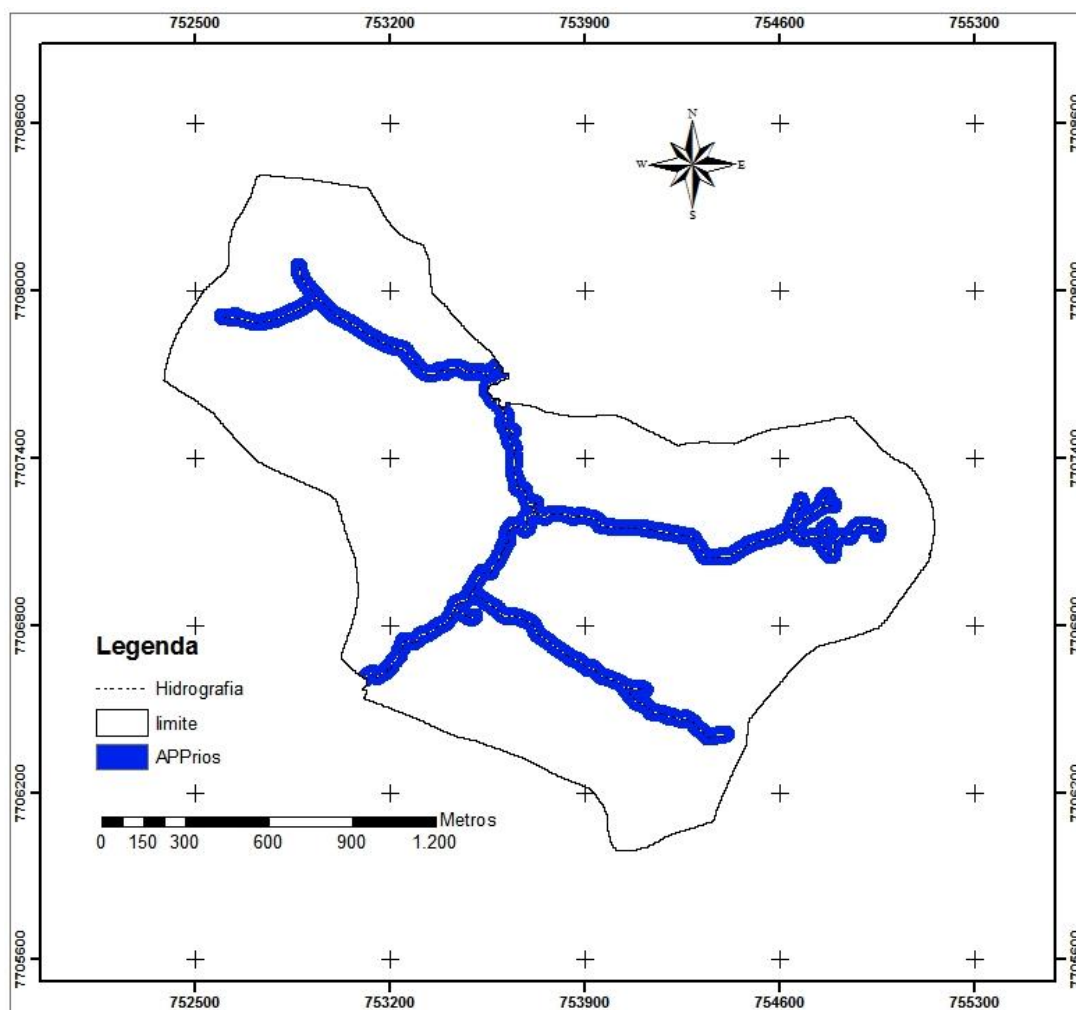


Figura 12: Áreas de Preservação Permanente ao longo dos cursos d'água

4.2.2. Em Áreas de Nascente

As áreas de preservação, correspondentes aos *grids* APPnasc e APPareadre (Figura 13), foram calculadas separadamente, devido às suas características distintas.

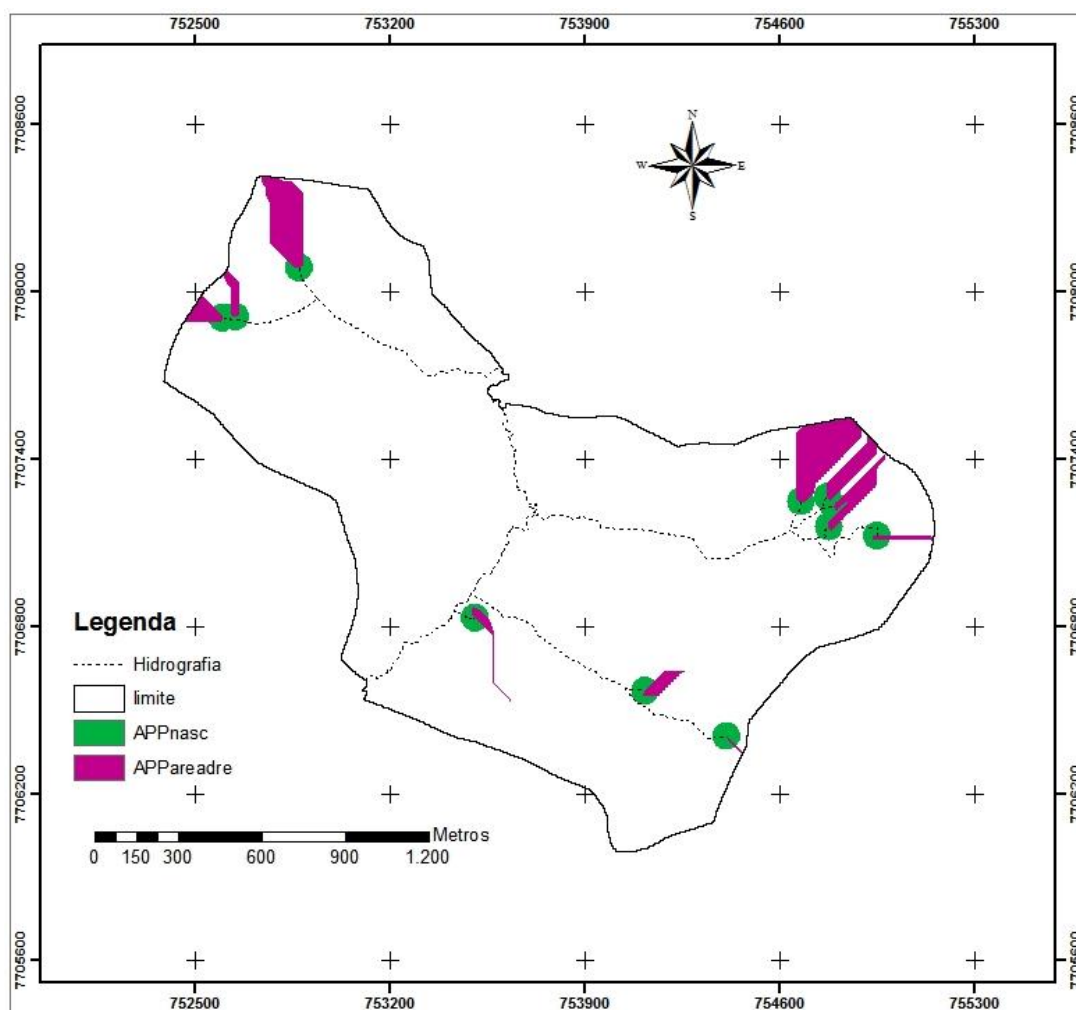


Figura 13: Áreas de Preservação Permanente ao redor de nascentes e em suas respectivas áreas de drenagem.

Alguns locais foram delimitados nos dois *grids*, gerando uma superestimação das áreas de preservação. Os dois *grids* foram sobrepostos e dele foi originado o cálculo das áreas. A área total para a APPnasc e APPreadre, descontando as áreas sobrepostas, foi de 18,6785 *ha* (Tabela 1), correspondendo a 6,06 % da área total da microbacia.

4.2.3. Áreas com Declividade Superior a 45°

A Figura 14 mostra a localização da única área onde foi encontrada uma declividade igual e superior a 45°.

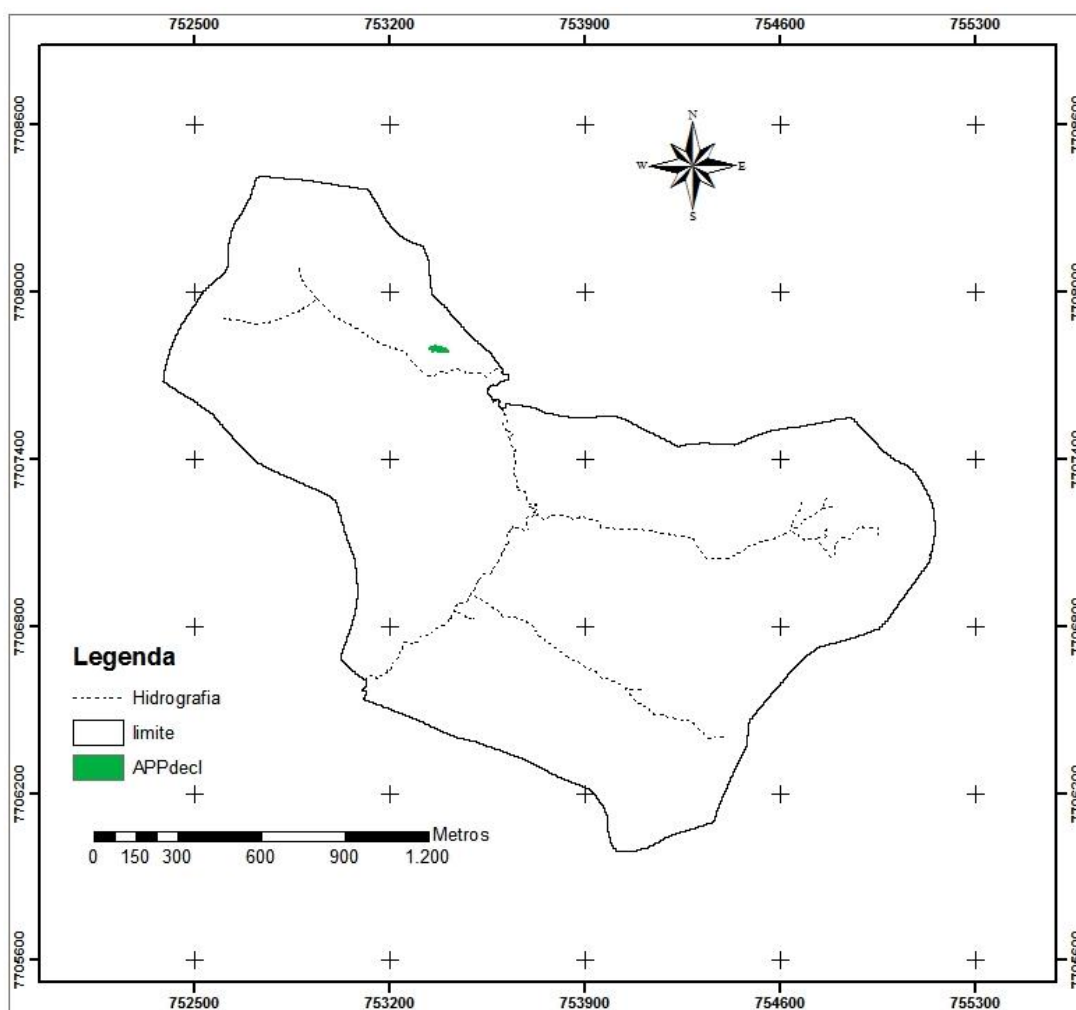


Figura 14: Áreas de Preservação Permanente em áreas com declividade superior a 100 %

A Área de Preservação Permanente correspondente à APPdecl foi de 0,8552 ha (Tabela 1), o que corresponde a 0,28 % da área total da microbacia.

4.2.4. Área de Preservação Permanente Total da Microbacia

O total de Área de Preservação Permanente encontrada (Figura 15) foi de 48,5611 ha, o que corresponde a 15,76 % da área total da Fazenda delimitada pela microbacia, destacando que não foram determinadas as áreas de topo de morros e linha de cumeadas, como determina a Resolução do CONAMA.

A Tabela 1 resume as áreas e percentuais de Áreas de Preservação Permanente presente na Área da Microbacia. Nota-se que as APP em torno de rios é a predominante na microbacia, enquanto que a APP em declividades superiores a 45°, cobre muito menos do que 1% da bacia. Torna-se oportuno mencionar que essas

grandezas numéricas não invalidam a metodologia automatizada para delimitação das APP's.

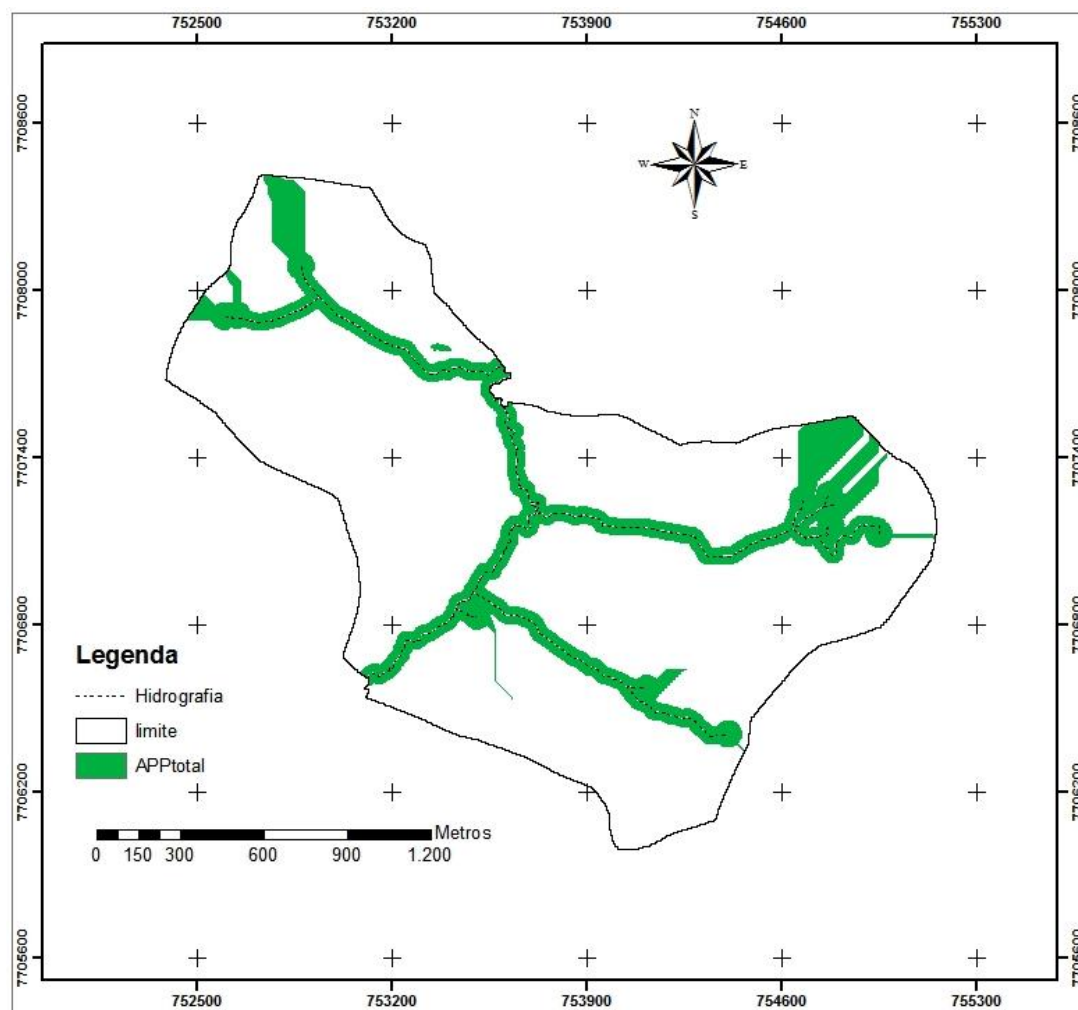


Figura 15: Áreas de Preservação Permanente da Fazenda Braúna.

Tabela 1: Áreas de Preservação Permanente presente na Área da Microbacia.

Classes de APP's	Área da APP (ha)	Classes Sobrepostas (APP)	Área sobreposta (ha)	Área APP corrigida (ha)	APP em relação à área total (%)
APPrios	35,0466	2, 3	6,0192	29,0274	9,42
APPnasc	7,6740	-	-	7,6740	6,06
APPreadre	12,8956	2	1,8911	11,0045	
APPdecl	0,8552	-	-	0,8552	0,28
TOTAL	56,4714		7,9103	48,5611	15,76

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O uso de técnicas de geoprocessamento automatiza o processo de geração do MDEHC, mas não garante que o MDE será consistente ao longo de toda bacia, pois de acordo com seu conceito, quando o escoamento superficial for todo direcionado para a respectiva foz, tornando os cálculos derivados do modelo menos subjetivos, diminui o erro atribuído às habilidades e experiências do analista.

Foram observadas diferenças significativas em relação aos tipos de métodos empregados na geração dos MDEHC, considerando que os mapas (*grids*) gerados possuem a mesma base de dado, foi encontrando discrepância de até 21 metros entre os modelos empregados.

A melhor representação da diferença entre os MDEHC quantitativamente para a microbacia foi de 12 metros, levando em conta que foram gerados a partir de curvas de nível de 5 em 5 metros, fica claro que os métodos de interpolação empregado nesta metodologia se diferem, seja para delimitação de APPs ou para outras finalidades.

A tomada de decisão acerca do melhor MDEHC a ser empregado, destaque para o MDEHC gerado pelo *TOPOGRID*, pois tem a capacidade de modelar com maior rigor o relevo.

A Área de Preservação Permanente total gerada na microbacia foi da ordem de 48,5611 *ha*, o que corresponde a 15,76 % da área total analisada, não levando em conta as áreas de morros e linha de cumeada.

A Área de Preservação Permanente em declividades superiores a 45° é a menos expressiva, totalizando 0,28 % da área total da microbacia.

Um ponto crítico do processo é a necessidade de se trabalhar com computadores mais potentes para o processamento dos dados, o que às vezes pode ser um diferencial muito importante no tempo de processamento e análise dos resultados.

Trabalhos de pesquisa em andamento estão sendo desenvolvidos para validar quantitativamente essa metodologia, como também avaliando os resultados obtidos por diferentes métodos de interpolação através do cálculo do erro médio quadrático (EMQ) do MDEHC com base nos condicionantes das Normas Técnicas de Cartografia Nacional (PEC).

Outras pesquisas em andamento estão desenvolvendo metodologias para a determinação das áreas de preservação permanente de topos de morros e linha de

cumeada para a microbacia com base nos condicionantes da Resolução nº 303 do CONAMA.

CAPÍTULO III: AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO PLANIMÉTRICA DE IMAGENS IKONOS ORTORETIFICADAS COM MDEs DE DIFERENTES RESOLUÇÕES

1. INTRODUÇÃO

A crescente oferta comercial de imagens de sensores orbitais de alta resolução espacial, com capacidade comprovada para o mapeamento tridimensional (TOUTIN *et al.*, 2002), tem revolucionado a linha de produção cartográfica, desde o seu advento em 1999. Bases cartográficas em escalas maiores que 1:250.000 eram só confeccionadas pelo processo fotogramétrico. Com esses novos sensores, já se pode obter bases cartográficas plenas em escalas menores ou iguais a 1:25.000 (MACHADO e SILVA *et al.*, 2003).

As imagens orbitais contêm diversos tipos de distorções geométricas, relacionadas tanto ao ponto de vista (sistema de aquisição), como ao objeto observado (Terra). Em relação ao primeiro – plataforma do satélite destacam-se, dentre outros, a sincronização de relógio, a orientação interior da câmara do sensor e a sua orientação exterior, que é comandada pela variação de posição da plataforma do satélite. Referente a Terra, encontram-se os deslocamentos devido à curvatura, rotação e relevo, assim como as distorções devidas às reduções das imagens geradas ao elipsóide de referência e transformação via um sistema de projeção cartográfica (TOUTIN, 2004).

A principal questão da correção geométrica de imagens reside na busca de formulação matemática que modele todas as distorções contidas nas imagens adquiridas no formato plano matricial, correspondentes à realidade tridimensional do relevo, assim como a projeção para o elipsóide e a transformação para o plano de projeção cartográfica (CORREIA, 2008). Nesse contexto, os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) têm sido cada vez mais empregados para correção das distorções do relevo no processo de ortorectificação.

Com o advento das imagens de alta resolução espacial, como o *IKONOS II* e *QUICKBIRD*, os modelos matemáticos baseados nas transformações polinomiais racionais, com uso de RPCs (*Rational Polynomial Coeficients*), vêm sendo grandemente utilizados na correção geométrica das imagens. Isto ocorre tanto devido ao fato destes modelos se apresentarem como um método simples e genérico de relacionamento preciso entre as coordenadas do espaço objeto e do espaço imagem (DIAL e GRODECKI, 2004), quanto pelo fato dos parâmetros rigorosos da órbita e do sensor (modelo físico) muitas vezes não estarem disponíveis aos usuários. Como os coeficientes dos polinômios são determinados e fornecidos pelo provedor de imagens, pode-se efetuar a correção das imagens sem uso de pontos de controle.

Considerando a grande demanda por imagens dessa natureza de alta resolução para diversas aplicações, inclusive para atualizações cartográficas, e facilidades que um produto como esse pode oferecer, aliado à disponibilidade de diferentes MDEs que podem ser utilizados para ortorectificação, torna-se imprescindível sua validação para garantir a adequada utilização desses produtos. Este tipo de validação constitui-se o tema desse capítulo.

Este capítulo tem por objetivo geral apresentar os resultados obtidos na avaliação da exatidão planimétrica de imagens *IKONOS II* ortorectificadas com uso de MDEs obtidos por diferentes fontes e com diferentes resoluções, associados ao método das transformações polinomiais racionais, e sem uso de pontos de controle. Também foram avaliados os resultados alcançados com a correção geométrica da imagem sem uso de qualquer MDE, para mensurar os impactos da não ortorectificação de áreas com relevo acidentado.

Como objetivos específicos deste capítulo figuram:

- ✓ A Avaliação Planimétrica das imagens ortorectificadas com uso de MDEs de diferentes resoluções, quais sejam:
 - MDE do SRTM, com grade de 90m;
 - MDEs obtidos a partir das curvas de nível de folhas topográficas do IBGE na escala 1:50.000, com resoluções de 90, 20m , 10m e 5m.
- ✓ Avaliação Planimétrica da imagem corrigida geometricamente, sem uso de qualquer MDE, ou seja, não ortorectificada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo envolve áreas do conhecimento tais como: Geodésia, Cartografia, Sensoriamento Remoto e Estatística. Especificamente essa revisão bibliográfica se limitará a alguns aspectos mais importantes relacionados ao estudo proposto.

2.1. Modelo Digital De Elevação

Um Modelo Digital do Terreno (MDT) é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre (FELGUEIRAS e CÂMARA, 1999). Dados de relevo, informação geológicas, levantamentos de profundidades do mar ou de um rio, informação meteorológicas, dados geofísicos e geoquímicos são exemplos típicos de fenômenos representados por um MDT. Neste capítulo, para efeito de padronização, será adotada a denominação “Modelo Digital de Elevação” ou **MDE**, para caracterizar o MDT, definido unicamente pelo parâmetro altitude do terreno.

Para a representação de uma superfície real no computador é indispensável a elaboração e criação de um modelo digital, como apresentado no Capítulo I. Existem diferentes métodos de geração de MDEs, que podem ser construídos, basicamente, através de estruturas de grades regulares retangulares ou Redes Irregulares de Triângulos (RIT ou TIN, do inglês Triangular Irregular Network), com a utilização de diferentes algoritmos de interpolação (ver seção 6 no Capítulo I).

A representação por Redes Irregulares de Triângulos (TIN) é feita segundo uma estrutura vetorial com topologia do tipo arco-nó e representa uma superfície através de um conjunto de faces triangulares interligadas. O método mais usual para geração desses triângulos usa os critérios da Triangulação de *Delaunay* (ver seção 5 no Capítulo I).

Na representação Matricial ou Grade Regular cada elemento da matriz está associado a um valor numérico, no caso desse estudo, a altitude ou elevação. Esses valores podem ser obtidos por interpoladores como Vizinho mais Próximo, Média Simples, Média Ponderada por Quadrante, entre outros (ver seção 6 no Capítulo I).

As fontes mais comuns de dados amostrais para a geração do MDEs são: arquivos digitais importados de outros sistemas (bases cartográficas) com isolinhas (curvas de nível) e pontos característicos de máximos e mínimos no relevo, levantamentos em campo utilizando topografia tradicionais, levantamentos GPS, fotogrametria, interferometria (RADAR), *Laser Scan* e pares estéreos de imagens de sensoriamento remoto.

No caso de amostragem por isolinhas, um dos dados utilizados neste estudo, tem-se que isolinhas nada mais são do que a representação de uma superfície por meio de curvas de nível. O exemplo mais comum são as isolinhas altimétricas ou curvas de nível, existentes em cartas topográficas.

Os MDEs têm sido amplamente utilizados para ortoreificação de imagens de Sensoriamento Remoto, além de permitirem realização de:

- Análise a fim de visualizar os modelos em projeção geométrica planar;
- Gerar imagens de nível de cinza, imagens sombreadas e imagens temáticas;
- Calcular volumes de aterro e corte;
- Realizar análises de perfis sobre trajetórias predeterminadas; e,
- Gerar mapeamentos derivados tais como mapas de declividade, mapas de drenagem, mapas de curvas de nível e mapas de visibilidade.

2.1.1. MDE Gerado a Partir do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)

A missão SRTM foi um esforço conjunto do *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, do *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)* e da *Agenzia Spaziale Italiana (ASI)*. A nave espacial *Endeavour* decolou no dia 11 e retornou no dia 22 de fevereiro de 2000 e uma das suas missões foi a cartografia, por interferometria, de grande parte da superfície terrestre. Observou aproximadamente 80% da superfície terrestre, o que representa 95% da área ocupada do globo. Os dados coletados pelo radar compreenderam a região entre os paralelos 60° N e 56° S. Ao se iniciar missão, esperava-se alcançar 16m de acurácia absoluta para a altimetria e 20m de acurácia horizontal circular absoluta (DUREN *et al.*, 1998; BARROS, 2004).

Para a coleta de dados foram instalados dois pares de antenas de radar SAR (*Synthetic Aperture RADAR*) para a captura dos dados referentes às bandas C e X. Duas antenas acopladas no corpo da nave e as outras duas na extremidade de um mastro de 60 metros estendido perpendicularmente para o exterior da nave (Figura 1). A técnica utilizada foi a de interferometria por radar, onde a antena principal, a bordo da espaçonave, emitia ondas de radar em direção a superfície da Terra e as duas outras antenas coletavam as ondas refletidas. O resultado foi a obtenção das altitudes através da interferometria das ondas refletidas. O sistema geodésico de referência utilizado para as coordenadas foi o WGS84.

O resultado foi um modelo digital de elevação em formato de grade regular com espaçamento de 3 segundos, de arco entre os pontos, valor que pode ser considerado como a resolução do modelo que, em termos lineares, situa-se na casa dos 90m.

O MDE do SRTM, atualmente em sua Versão 4, está disponível gratuitamente para *download* a partir do site <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp> (acesso em 25/06/2009).

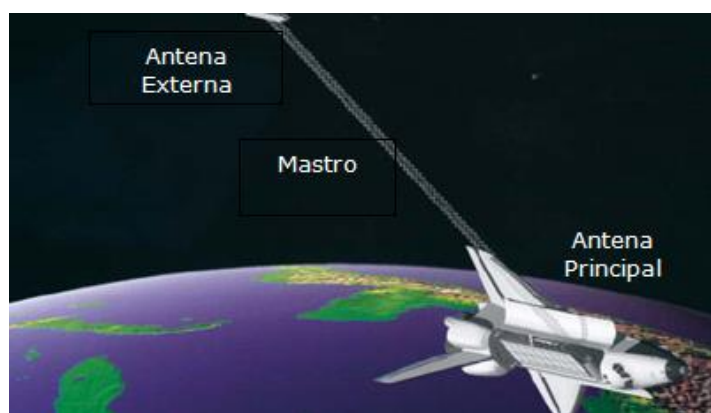


Figura 1: Esquema da aquisição de dados do SRTM – detalhe para o mastro que permitiu a interferometria na mesma órbita (BARROS, 2004).

2.2. Ortorectificação

A correção geométrica de imagens abrange desde um simples georreferenciamento à aplicação de um modelo rigoroso que leve em consideração a posição no espaço e orientação interior e exterior do sensor.

A ortorectificação pressupõe correção geométrica rigorosa com o uso de pontos de controle e MDE, destinado à correção de relevo, com precisões compatíveis com a sua representação final, segundo sistema geodésico, um sistema de projeção, e uma determinada escala. Imagens não possuem escala associada, mas avalia-se a precisão planimétrica final de acordo com as classes de qualidade dos documentos cartográficos, vinculadas na razão direta da escala cartográfica (CORREIA, 2008)

A ortorectificação é um procedimento fundamental de correção, especialmente quando as imagens representam superfícies com grande variação de altitude e com declividades acentuadas (Figura 2).

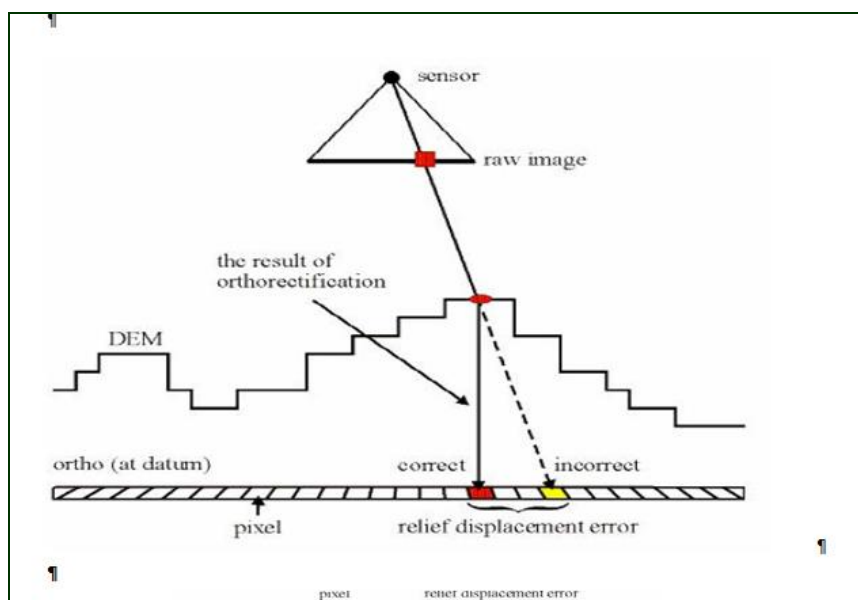


Figura 2: Geometria das distorções causadas pelo relevo na imagem
(Fonte: PCI GEOMATICS, 2003).

Diversas técnicas podem ser usadas para gerar o MDE, dependendo da disponibilidade de dados, ferramentas ou da tecnologia: digitalização e interpolação de mapas, estéreo correlação de imagens ópticas, interferometria, *laser scan*, etc., (Ouverney *et al.*, 2007).

Durante o processo de ortorectificação, a imagem é projetada numa superfície de projeção cartográfica, usando uma superfície de representação para a Terra e um sistema de coordenadas,

com o objetivo de gerar a maior correspondência possível entre o posicionamento de pontos na imagem e o de pontos homólogos na superfície terrestre imageada, como é apresentada a Figura 3.

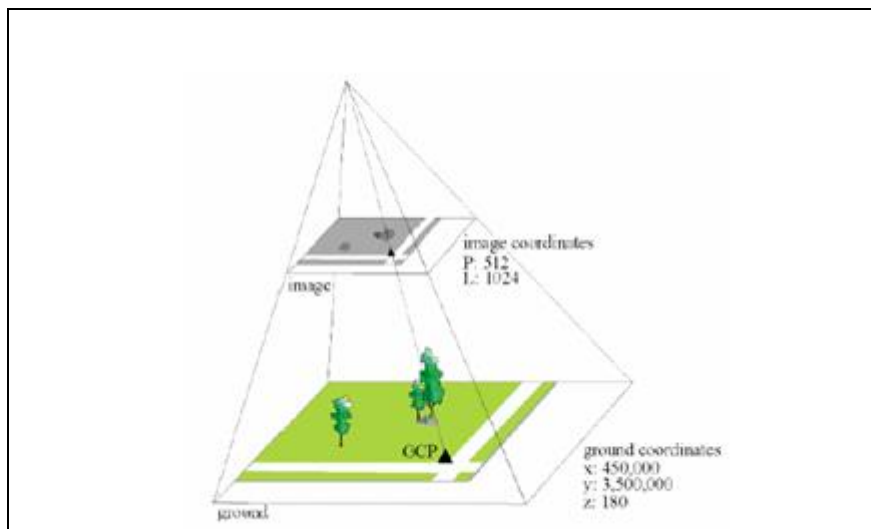


Figura 3: Relação entre sistema de coordenadas de campo e o sistema de coordenadas imagem (Fonte: PCI GEOMATICA, 2003).

Nas seções seguintes, será apresentado um breve resumo das características dos modelos matemáticos mais utilizados para realização da correção geométrica de imagens de Sensoriamento Remoto.

2.2.1. Modelo Rigoroso da Câmara

O modelo físico 3D leva em consideração: a orientação interior e exterior da câmara nos instantes de aquisição das imagens, determinadas a partir dos dados de orientação interior do sensor, dados de atitude e de efemérides da plataforma do satélite; e associa, pelo princípio da colinearidade, pontos de controle (PCs) bem identificáveis nas imagens e seus pontos homólogos no terreno, com coordenadas e altitudes conhecidas e referidas a um elipsóide. Devido ao seu rigor matemático, alguns autores o designam por “modelo fotogramétrico” (TOUTIN, 1995a), face à sua similaridade conceitual.

Os parâmetros, calculados por ajustamento segundo o *Método dos Mínimos Quadrados*, permitem a geração direta da ortoimagem. A ortoretificação da imagem se faz com o auxílio de um Modelo Digital de Elevação. Em seguida, submete-se a imagem, com pixels distorcidos quanto à forma e tamanho, a um procedimento de reamostragem que garanta a reestruturação do arquivo de imagem de acordo com o padrão de formato matricial, com pixels de mesmo tamanho (CORREIA, 2008).

2.2.2. Modelo Polinomial Racional ou Modelo Específico da Câmara

Os modelos de geometria de imagem – *Image Geometry Model* – são modelos específicos de cada sensor, fornecidos pelos fornecedores de imagens, quando não desejam repassar os parâmetros da câmara e atitude do sensor aos usuários, o que permitiria aos usuários a possibilidade de realizarem a ortorectificação. Contudo, esses provedores de imagens só credenciam certos programas computacionais para realizarem a correção rigorosa das imagens (CORREIA, 2008).

Um exemplo é o modelo de câmara de coeficientes de polinômios racionais – *Rational Polynomial Coefficient* (RPC) Camera Model, formulado pelos provedores das imagens *IKONOS* e *QUICKBIRD*. O motivo apresentado pelos provedores para a adoção desta solução é a complexidade do modelo físico do sensor que, por adquirir, na formação da imagem, uma linha a cada instante, apresenta parâmetros de orientação exterior (coordenadas do centro perspectivo e ângulos de atitude) diferentes para cada linha, o que torna difícil a implementação de soluções para o modelo por parte do usuário final (GRODECKI, 2001). Assim, para permitir a ortorectificação desse tipo de imagens, são disponibilizados arquivos contendo Coeficientes Polinomiais Racionais (RPC – *Rational Polynomial Coeffycient*), calculados a partir do modelo físico, sendo capazes de resgatar a geometria da imagem no instante de sua captura, através do Modelo Polinomial Racional.

Compreende a divisão de dois polinômios de terceiro grau em 3D, que associa coordenadas tridimensionais do espaço objeto (X, Y, Z) às coordenadas bidimensionais do espaço imagem (linha e coluna) ou vice-versa, assim como o modelo físico do sensor (XU *et al.*, 2004). Esse tipo de modelo permite, de modo similar ao modelo físico da câmara, a extração tridimensional de feições e o ajuste em bloco (DIAL e GRODECKI, 2005; GRODECKI *et al.*, 2004).

Esses modelos oferecem duas opções de correção de imagens: com e sem pontos de controle. Como os coeficientes dos polinômios são determinados e fornecidos pelo provedor de imagens, pode-se efetuar a correção das imagens sem uso de pontos de controle.

Embora com formulação mais simples, os modelos específicos de câmara aproximam-se muito bem das precisões planimétricas e altimétricas alcançadas pelo Modelo rigoroso da câmara, como certificam: Lutes (2004), Grodecki e Dial (2001) e Fraser *et al.* (2006). Esses modelos são considerados rigorosos por alguns autores, como Dial e Grodecki (2005), que encontram diferenças inferiores a 0,1 pixel no confronto entre esses dois modelos com imagens *IKONOS* (CORREIA, 2008).

2.2.3. Modelos Polinomiais 2D

O modelo polinomial 2D não leva em consideração a altitude, logo se restringe a correções de partes de imagem que correspondam a áreas do terreno com pequena variação altimétrica. É a

solução mais simples de correção de imagens, modelo esse presente na maioria dos programas computacionais para tratamento e/ou visualização de imagens, porém não consegue resolver as diversas distorções associadas a essas imagens.

O polinômio de primeira ordem, também denominado de “transformação afim”, requer o mínimo de 3 pontos de controle e efetua translação nos dois eixos “X” e “Y”, uma rotação, escala em ambos os eixos e obliquidade. O de segunda ordem implica na necessidade de 6 pontos de controle e corrige torção e convexidade em ambos os eixos, além das distorções anteriores (CORREIA, 2008).

2.3. Satélite *IKONOS II*

O satélite *IKONOS II* foi lançado pelo foguete Athena II no dia 24 de Setembro de 1999, na *Vanderberg Air Force Base*, Califórnia, e está operacional desde janeiro de 2000. É operado pela empresa americana *Space Imaging*, que detém os direitos de comercialização das imagens a nível mundial. As imagens geradas pelo *IKONOS II* possuem uma resolução espacial de 1 m no modo pancromático e 4 m no multiespectral. A resolução radiométrica é de 11 bits, isto é, 2048 níveis de cinza, aumentando o poder de contraste e de discriminação dos alvos.

As principais características técnicas do satélite *IKONOS II* estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1: Principais Características Técnicas do Satélite *IKONOS II*
(fonte: ENGESAT, 2009).

Altitude	680 km
Inclinação	98,1°
Velocidade	7km / s
Sentido da Órbita	descendente
Duração da Órbita	98 minutos
Tipo de Órbita	Sol-síncrona
Resolução Espacial	Pancromática: 1m / Multiespectral: 4m
Bandas espectrais	Pan 0.45 - 0.90 μ Azul 0.45 - 0.52 μ Verde 0.52 - 0.60 μ Vermelho 0.63 - 0.69 μ Infra vermelho próximo 0.76 - 0.90 μ
Imageamento	13km na vertical (cenas de 13km x 13km)
Capacidade de Aquisição de imagens	Faixas de 11km x 100km até 11km x 1000km Mosaicos de até 12.000km ² 20.000km ² de área imageada numa passagem
Frequência de Revisita	2.9 dias a 1m de resolução <i>Esses valores valem para latitude de +/- 40°. A frequência de revisita para latitudes maiores</i>

A empresa *Space Imaging* fornece imagens *IKONOS* corrigidas geometricamente em diferentes níveis de processamento, como vem exposto na Tabela 2, onde são apresentados também alguns indicadores de exatidão para cada nível de produto, tais como: o erro circular ao nível de confiança 90% (CE90), indicando que 90% dos pontos da imagem têm erro abaixo de determinado

valor; o erro médio quadrático (EMQ) e o indicador *National Mapping Accuracy Standard* (NMAS, usado nos Estados Unidos). Dentre os produtos apresentados na Tabela 2, somente o Geo Ortho Kit não é ortoretificado, mas corrigido geometricamente a partir das efemérides do satélite.

Tabela 2: Produtos Ikonos
(fonte: adaptado de GeoEye, 2006)

Produto	Acurácia Planimétrica			Orto- correção	Ângulo de elevação do satélite	Mosaic o	Estéreo
	CE90	EMQ	NMAS*				
Geo Ortho Kit	15,0 m**	-	-		60 - 90°		
Standard Ortho	50,0 m***	25,0 m	1:100.000	X	60 - 90°		
Reference	25,4 m	11,8 m	1:50.000	X	60 - 90°	X	X
Pro	10,2 m	4,8 m	1:12.000	X	66 - 90°	X	
Precision	4,1 m	1,9 m	1:4.800	X	72 - 90°	X	X
Precision Plus	2,0 m	0,9 m	1:2.400	X	75 - 90°	X	

* - padrão cartográfico norte-americano de 1947

** - para áreas planas

*** - pode chegar a 75 m em terrenos muito íngremes.

(Fonte: CORREIA, 2008).

O produto Geo Ortho Kit, de custo mais baixo dentre os produtos disponíveis, compreende uma imagem de qualquer uma das bandas ou de combinações entre as mesmas, e um arquivo que contém *Rational Polynomial Coefficients* (Coeficientes Polinomiais Racionais) ou RPCs determinados a partir do modelo físico do sensor, que permitem restaurar o modelo geométrico da câmera obtido no momento da coleta da imagem.

3. METODOLOGIA

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área utilizada para os experimentos compreende a Bacia Hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, localizada no município de Viçosa/MG (Figura 4).

A bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu integra a Bacia do Rio Doce, na Zona da Mata mineira; possui área de 55 km², apresentando relevo moderado, com variação aproximada de 600 a 900 metros. Os efeitos do deslocamento devido ao relevo são mais acentuados em áreas montanhosas, o que não é o caso da região estudo, que apresenta relevo moderado. A escolha da área se deve basicamente à disponibilidade das imagens para fins acadêmicos, o que não inviabiliza a pesquisa no assunto.

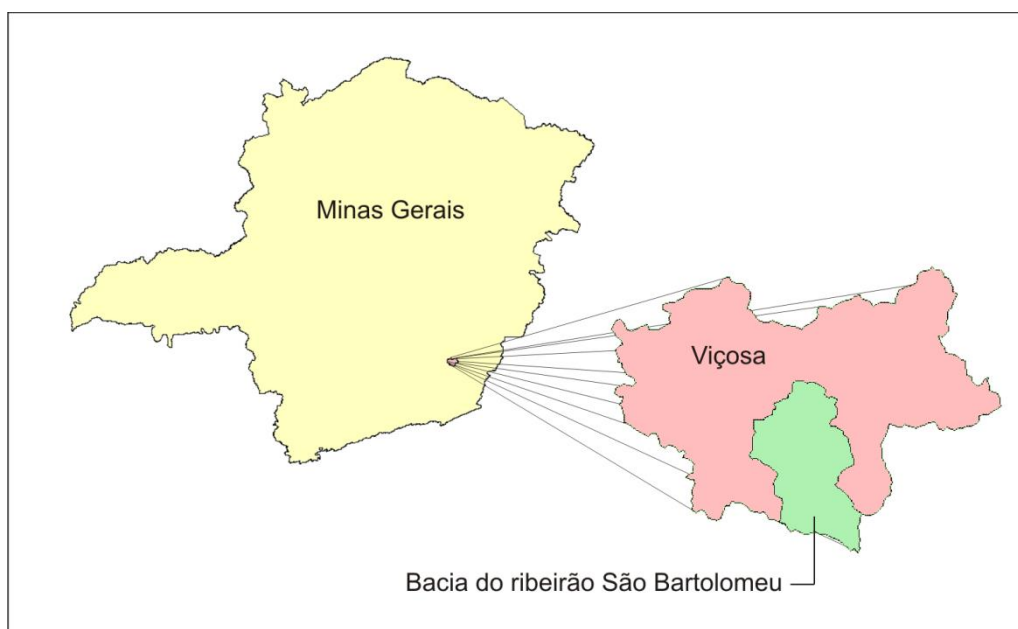


Figura 4: Localização do município de Viçosa no estado de Minas Gerais (SANTOS, 2008).

3.2. Materiais Utilizados

O estudo foi realizado com a composição RGB das bandas multiespectrais das imagens brutas *IKONOS II*, com resolução espacial de 4m.

Estas imagens foram adquiridas pela Universidade Federal de Viçosa para utilização no Projeto Piloto denominado Plano de Segurança da Água (PSA), realizado em 2008 no município de Viçosa.

A Tabela 3 apresenta as características da cena.

Tabela 3: Identificação da cena

Identificador	2007102913163790000011627045
Data de aquisição	29/10/2007
Largura da Faixa (nominal)	11 km
Nível de processamento	Geo Ortho Kit (<i>Standard Geometrically Corrected</i>)
Latitude do centro (imagem nadir)	-20,783°
Longitude do centro (imagem nadir)	-42,870°
Ângulo de Elevação (Nominal)	64.12° degrees

A determinação dos pontos de controle no terreno foi realizada com uso de 04 receptores GPS, *Promark 2* da *Ashtech*, com uma frequência, com pós-processamento realizado no software de *Ashtec Solutions*, juntamente com os dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC).

As curvas de nível foram obtidas diretamente no site do IBGE (<http://www.ibge.gov.br/home/>) na forma de arquivos vetoriais **DGN**, correspondentes às folhas topográficas 1:50.000 denominadas Viçosa (SF.23-X-B-V-3) e Teixeiras (SF.23-X-B-V-1) integrantes do Mapeamento Sistemático Brasileiro. As folhas foram editadas pelo IBGE em 1979, na projeção UTM, *datum* SAD-69, sendo a equidistância das curvas de nível igual a 20m. A conversão de *datum* dos arquivos foi realizada através do aplicativo *PROGRID*, disponibilizado gratuitamente no site do IBGE. O **APÊNDICE IV** apresenta todos os procedimentos para geração de MDT a partir das cartas do IBGE no formato **DGN**.

A edição das curvas de nível, geração e manipulação dos MDEs, bem como operações para subsidiar o cálculo das discrepâncias observadas nas imagens ortoretificadas foram realizadas no ambiente *ArcGIS 9.3*.

O recorte do SRTM utilizado foi a versão 4 disponibilizado pelo *Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI), transferido de <http://srtm.csi.cgiar.org/>.

As operações de ortoretificação se desenvolveram no software *ERDAS 9.2 Imagine*.

As análises estatísticas para interpretação dos resultados da avaliação foram realizadas com o aplicativo *GEOPEC 1.01*, desenvolvido por Santos (2008).

3.3. Levantamento De Campo

O levantamento de campo foi realizado visando à determinação de pontos de controle para verificação das imagens ortoretificadas por empresa terceirizada, vinculada ao Projeto Plano de Segurança da Água (PSA). Estes mesmos pontos foram agora utilizados como pontos de referência para validação das imagens geradas no contexto deste experimento.

A partir da imagem *IKONOS* original, foram identificados aproximadamente 40 pontos, distribuídos por toda a área da bacia, para sua determinação em campo. Este número total de pontos considera uma quantidade adicional à necessária em virtude de normalmente serem encontrados impedimentos para determinação das coordenadas de alguns pontos em campo. Priorizou-se pontos localizados em cruzamentos perpendiculares entre estradas ou caminhos, considerando-se as condições de acessibilidade, bem como pontos em cantos de quadras, cantos de praças, cantos de campos de futebol, esquinas de ruas, entre outros. Buscou-se, ainda, medir o máximo possível de pontos em áreas com maiores valores de altitudes. Entretanto, deve ser destacado que nas áreas de maior altitude os poucos cruzamentos acessíveis existentes não se apresentavam claramente identificáveis, devido à densa cobertura vegetal. Em algumas situações em áreas urbanas percebeu-se uma dificuldade na escolha de pontos por conta da alta reflectância de alguns alvos, prejudicando a perfeita identificação das interseções. Do total de pontos escolhidos, 33 foram efetivamente medidos, como mostra a Figura 5.

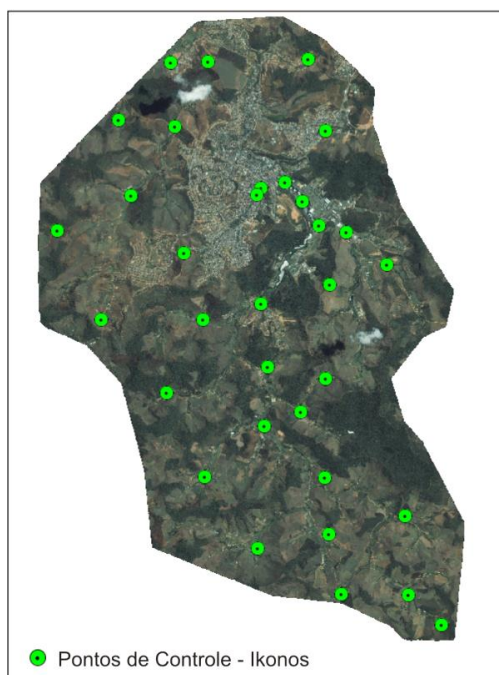


Figura 5: Pontos de validação levantados com GPS.

Para a determinação dos pontos foi adotado o método de posicionamento relativo estático com uso de receptores de uma frequência, com coordenadas obtidas por irradiações, a partir de uma estação base. Para isso foi utilizado o ponto VICO, integrante da RBMC, localizado na Universidade Federal de Viçosa, contido na cena objeto do estudo.

As determinações GPS consideraram:

- Taxa de rastreio: 5s
- Tempo médio de rastreio em cada estação remota: 40 min
- PDOP máximo: 4
- Mínimo de satélites: 5
- Máscara de elevação: 10°
- Datum planimétrico: WGS-84
- Distância máxima das estações remotas à estação base: 10 km

3.4. Geração dos MDE'S

Inicialmente, os arquivos *DGN* das curvas de nível com equidistância de 20m, foram convertidos para o formato *shape*, a fim de atribuir às mesmas os valores de altitudes (ver **APÊNDICE IV**). Na sequência, foi realizada a junção dos dois arquivos a fim de permitir a conexão geométrica entre as curvas, para posterior atribuição das altitudes. Finalmente, no ambiente *ArcGIS*, o arquivo editado foi convertido para o *datum* SIRGAS2000 a partir dos parâmetros disponibilizados no PROGRID, e posteriormente para o *datum* WGS84, compatível com os pontos de controle.

A partir do arquivo de curvas de nível editado, foi gerado o MDE pelo método de interpolação de grade regular, através do interpolador *TOPOGRID* do *ArcGIS*, gerando MDEs com as resoluções (ou grades) de 90m, 20m, 10m e 5m. O módulo *TOPOGRID* utiliza um método de interpolação especificamente projetado para criar MDE hidrograficamente condicionado (Capítulo II e **APÊNDICES I e II**). Este módulo é baseado no programa *ANUDEM* desenvolvido por Hutchinson (1989 apud. KOZCIAK *et al.*, 1999). Esse programa estima um grid regular de uma superfície lisa, discretizada através de um grande número de dados de elevação irregularmente espaçados, dados de linhas de contorno e dados de linha de fluxo.

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam o MDE do SRTM, o MDE gerado com 90m de resolução e o MDE gerado com 5m de resolução, respectivamente.

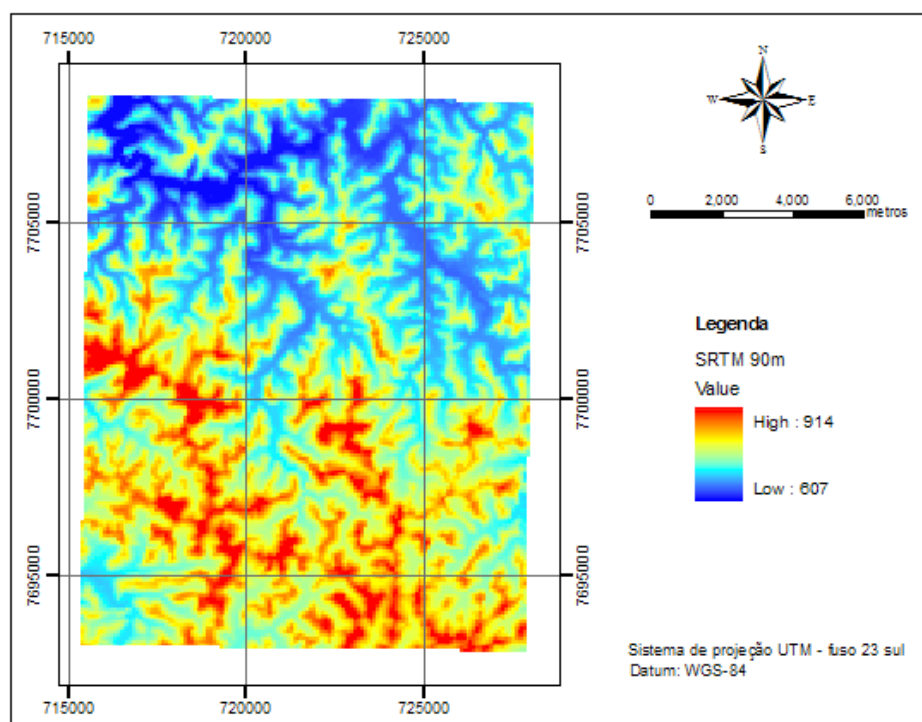


Figura 6: MDE do SRTM com resolução de 90 metros.

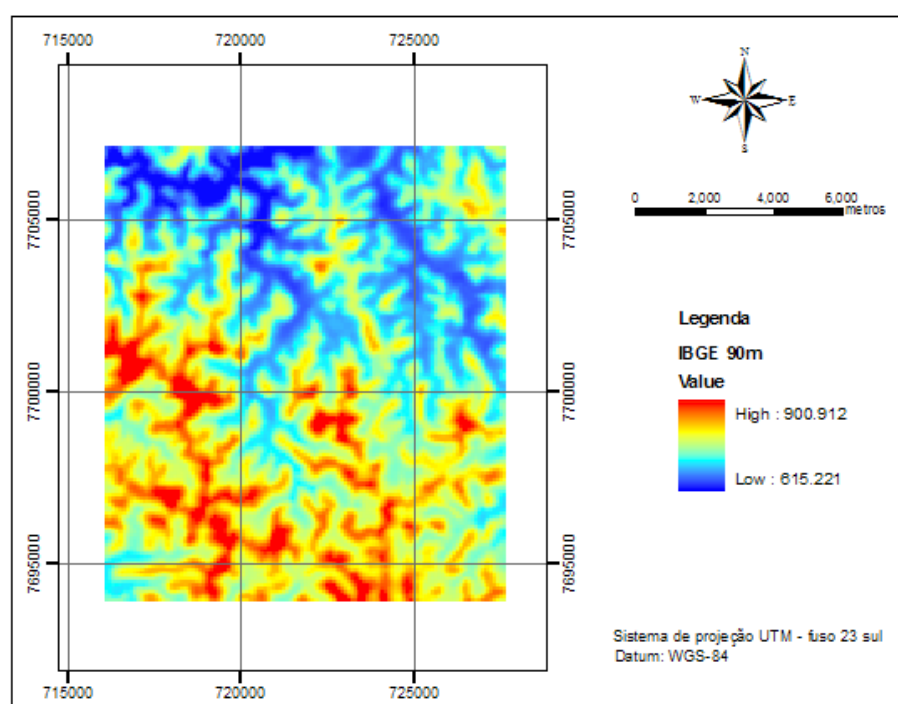


Figura 7: MDE gerado a partir das curvas de nível do IBGE, com resolução de 90 metros.

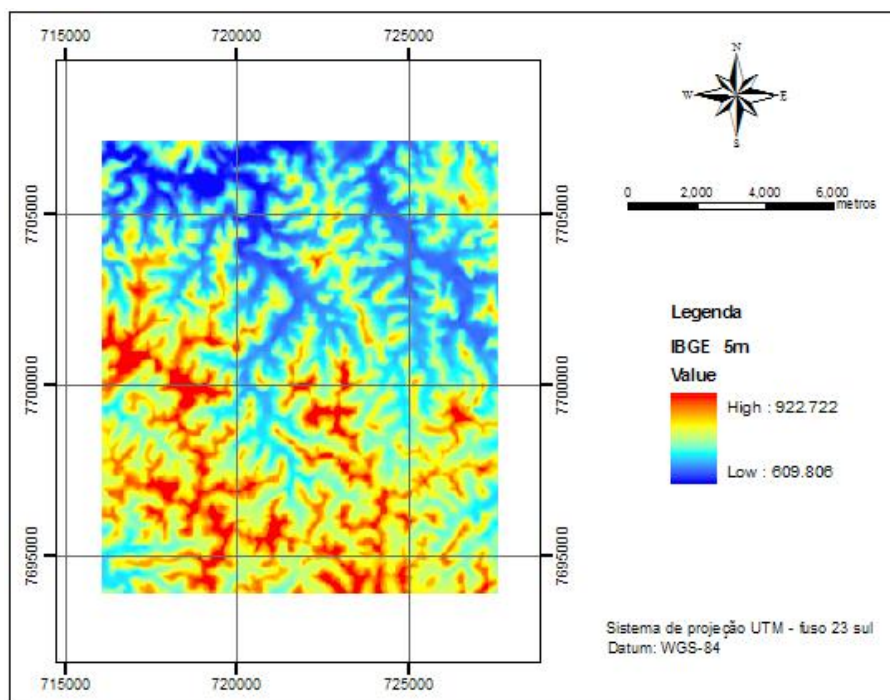


Figura 8: MDE gerado a partir das curvas de nível do IBGE, com resolução de 5 metros.

3.5. Ortoretificação

A correção geométrica da imagem foi realizada segundo o Modelo Polinomial Racional, com uso dos Coeficientes Polinomiais Racionais (RPCs) fornecidos pelo provedor da imagem *IKONOS II*. Não foram utilizados pontos de controle para refinar o modelo.

O processo de ortorectificação exige que o analista forneça um modelo digital de elevação da área para que as deformações devido ao relevo sejam corrigidas. Foram utilizados os MDEs gerados com grades de 90m, 20m, 10m e 5m.

Entretanto, considerando que apenas parte do território nacional dispõe de mapeamento topográfico 1:50.000 que permita a geração de MDEs como nesse trabalho, optou-se por testar também o processo de ortorectificação utilizando o MDE *SRTM*, que apresenta grade de 90m, por estar este disponível para qualquer região do país. Para eliminar depressões espúrias e as áreas de falha no *SRTM* foi aplicado o comando *Fill* do *ArcGIS*.

Nos testes executados foram utilizados os cinco MDEs a fim de avaliar o impacto da diferença de qualidade geométrica dos mesmos sobre a imagem ortorretificada resultante.

O software utilizado para ortorretificar a imagem nesta avaliação foi o *ERDAS 9.2 Imagine*, módulo *LPS*.

Nesta fase também foi testada a correção geométrica simples da imagem, através do modelo polinomial de 1ª ordem, com apenas 4 pontos de controle, para fins de avaliação dos efeitos do deslocamento do relevo em imagens não ortoretificadas.

3.6. Avaliação Planimétrica

A avaliação consistiu na identificação e medição das distâncias entre os pontos determinados em campo e seus homólogos em todas as imagens ortoretificadas com os diferentes MDEs.

Para a avaliação da exatidão de cada ortoimagem gerada foram utilizados 16 pontos de verificação, cujas coordenadas foram determinadas no terreno, por GPS, por posicionamento relativo estático, garantindo-se exatidão centimétrica. Os pontos de verificação escolhidos são bem identificáveis na imagem e apresentam-se homogeneamente distribuídos pela área de cobertura da ortoimagem. Deu-se especial atenção para que os pontos coletados em áreas mais elevadas figurassem entre os 16 pontos selecionados, conforme apresentado pela Figura 9.

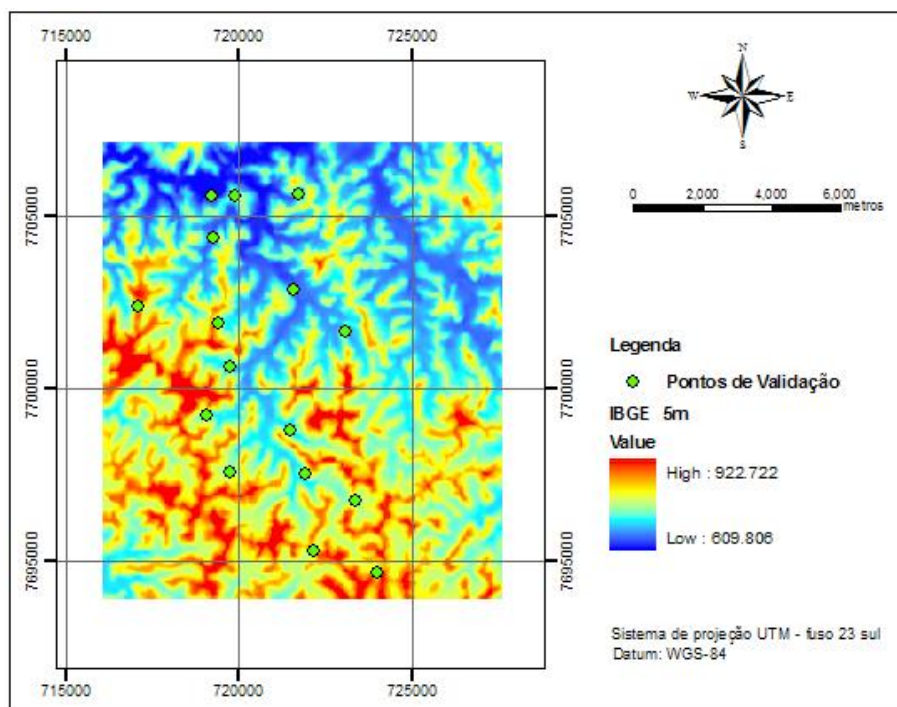


Figura 9: Pontos de validação utilizados.

O cálculo das distâncias (deslocamentos) entre os pontos foi feito segundo a Equação (24) (Capítulo I, Seção 7.4).

Para a identificação dos pontos de validação foi utilizado o ArcGIS. Também foi utilizada a estratégia de traçar sobre as imagens parte dos eixos das vias para facilitar a localização dos pontos medidos em cruzamentos de estradas e vias.

As coordenadas UTM dos pontos medidos no terreno e de seus homólogos medidos sobre a imagem foram exportados para um arquivo, visando processamento do PEC no software GEOPEC, com vistas a realização das análises estatísticas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultados têm-se a obtenção das cinco imagens ortoretificadas e uma imagem corrigida geometricamente, sem a correção do relevo. Para a avaliação do padrão de exatidão cartográfica nas imagens geradas, utilizou-se 16 pontos de validação coletados em campo via GPS e seus homólogos nas imagens. A Tabela 4 ilustra as discrepâncias verificadas entre as coordenadas de campo e das imagens.

A Figura 10 apresenta um comparativo dos erros nas diferentes imagens ortoretificadas utilizando RPCs e MDEs. Já a Figura 11, ilustra a diferença entre a imagem ortoretificada com MDE de 20m, e uma imagem corrigida geometricamente, sem considerar a influência do relevo.

Tabela 4: Discrepâncias Calculadas

PTS	Discrepância entre as coord. da imagem e de campo (m)					
	SRTM	IBGE90	IBGE20	IBGE10	IBGE05	POL1
1	2.91	2.96	4.71	4.40	4.49	43.08
3	2.62	1.01	1.69	3.01	2.76	42.84
5	5.91	0.37	2.20	2.41	2.48	6.31
6	4.41	4.65	2.96	3.53	2.92	9.18
9	7.35	10.46	8.83	8.74	8.84	9.53
10	6.73	5.34	4.91	4.75	4.97	14.35
16	3.64	2.62	1.63	1.70	1.63	58.31
19	1.32	1.03	4.75	4.52	4.61	39.10
20	2.70	3.79	6.85	6.17	5.93	14.11
22	1.41	8.70	4.93	4.83	5.15	59.99
24	1.97	2.53	6.81	6.81	6.93	38.54
25	2.66	2.66	1.70	2.65	1.65	82.68
29	4.77	12.16	5.49	5.47	6.21	72.12
31	3.98	0.30	0.38	0.44	0.30	3.25
32	3.06	3.28	1.23	1.40	1.48	17.69
33	5.41	10.30	5.64	8.51	6.75	30.98
MEDIA	3.80	4.51	4.04	4.33	4.19	33.88
DESV	1.83	3.83	2.43	2.42	2.40	24.87

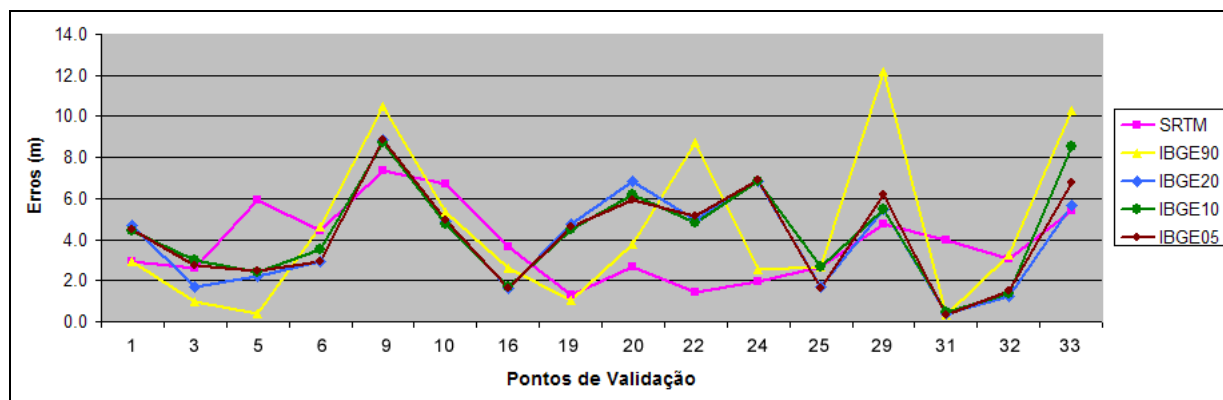


Figura 10: Gráfico comparativo dos erros nas imagens ortoretificadas.

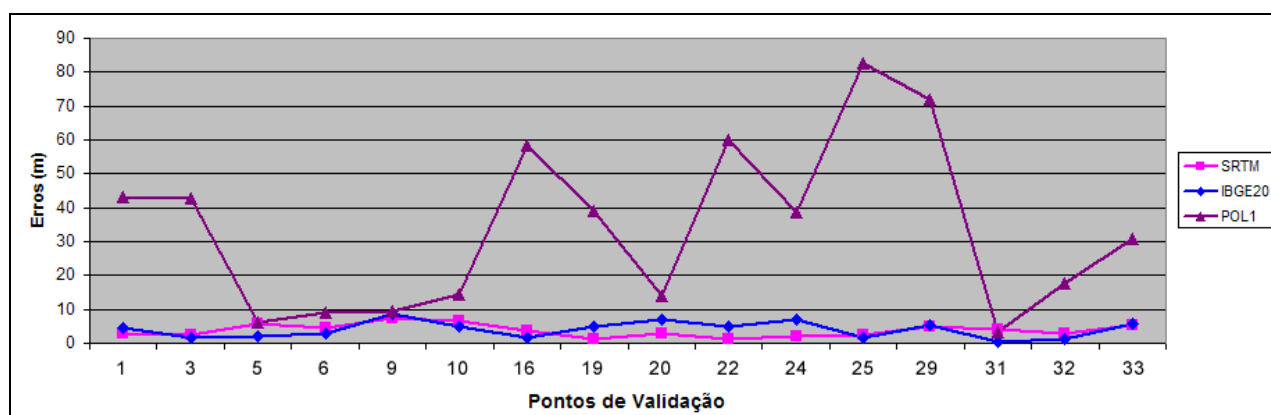


Figura 11: Gráfico comparativo dos erros: imagem ortorretificada x imagem com correção geométrica sem considerar a altitude.

Utilizando as discrepâncias entre coordenadas de imagem e de campo, aplicou-se a avaliação do Padrão de Exatidão Cartográfica, descrito no decreto-lei nº 89.817 de 20 de julho de 1984. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos na avaliação do PEC, por meio do software GeoPEC. Mais detalhes sobre os valores obtidos no teste de tendência (teste *t* de *Student*) e no teste de precisão (teste do Qui-Quadrado) são apresentados no **APÊNDICE III**.

Tabela 5: Classificação segundo o PEC

IMAGEM	ERROS (m)		TENDÊNCIA Existe?	PEC	
	Média	Desv. Pad		1/10.000	1/100.000
ORTO (RPC+SRTM)	3.80	1.83	SIM	A	
ORTO (RPC+IBGE90)	4.51	3.83	SIM	C	
ORTO (RPC+IBGE20)	4.04	2.43	NÃO	B	
ORTO (RPC+IBGE10)	4.33	2.42	NÃO	B	
ORTO (RPC+IBGE05)	4.19	2.40	NÃO	B	
POLINOMIAL 1º GRAU	33.88	24.87	SIM		B

As análises focaram o desempenho das correções para a escala 1:10.000, mais próxima daquela prevista para o produto *PRO*, ortoretificado pelo provedor da imagem (Tabela 3).

Importante destacar que essa avaliação restringiu-se apenas a exatidão planimétrica.

Analizando os resultados, observou-se que o desempenho do processo de ortoretificação com uso do SRTM gerou uma imagem curiosamente compatível com o mapeamento Classe A para a escala 1:10.000, desempenho esse superior a todos os demais. Entretanto, os pontos de validação mostraram uma tendência da imagem corrigida com uso do SRTM, sugerindo a existência de erros sistemáticos. Assim, esse resultado requer um estudo mais rigoroso, não sendo ainda conclusivo. O processo de geração do ortoimagem com o uso do SRTM para essa escala deve ser melhor investigado.

A ortoretificação com uso do MDE- IBGE com o mesmo valor de grade do SRTM (90m) teve o pior desempenho, chegando a Classe C para a escala 1:10.000. Esse MDE, quando visualizado em tela, apresentou um aspecto de “borramento” e suavização, bastante semelhante a uma imagem filtrada, o que pode ter contribuído para o mau desempenho quando comparado com o SRTM. Da mesma forma, pontos de validação mostraram uma tendência da imagem corrigida.

A ortorectificação com uso dos MDE's com grade de 20m, 10m e 5m mostraram desempenho bastante semelhante, não havendo ganho significativo entre eles, todos classificados como Classe B para a escala 1:10.000, apresentando distribuição aleatória dos erros.

Todas as imagens ortorectificadas apresentaram exatidão planimétrica compatível com a escala 1:25.000, Classe A.

Como esperado, a correção geométrica sem considerar a altitude, portanto não ortorectificada, apresentou exatidão planimétrica compatível apenas com a escala 1:100.000, Classe B, confirmando os impactos causados pela não correção do relevo.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Inicialmente, deve-se ressaltar que todas as conclusões apresentadas neste relatório foram baseadas no estudo de caso de uma única cena *IKONOS II*, adquirida sobre a região de Viçosa, no modo de processamento *Geo Ortho Kit*.

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que a metodologia e os materiais utilizados permitiram gerar imagens ortorectificadas e avaliar sua exatidão planimétrica, através do Padrão de Exatidão Cartográfica, definidos no Decreto-Lei nº. 89.817/1984. Pôde-se também avaliar os impactos de uma correção onde não se considera o deslocamento do relevo, principalmente em imagens de alta resolução em região de relevo moderado.

Como resultados obtidos da avaliação, para a escala de 1/10.000, das imagens ortorectificadas, têm-se: com o uso do MDE SRTM (90m) obteve-se uma imagem com classificação Classe A, porém com tendência, de forma que este resultado requer um estudo mais rigoroso e não deve ser considerado definitivo; as imagens ortorectificadas com o uso dos MDEs gerados a partir das cartas do IBGE, com resoluções de 20, 10 e 5 metros, foram classificadas como Classe B e sem tendência; já a imagem ortorectificada com MDE gerado com resolução de 90m foi classificada como Classe C e com tendência.

Cabe destacar que surgiram algumas dificuldades ao longo do desenvolvimento do trabalho, sendo necessário rever os objetivos inicialmente pretendidos. A falta de domínio no uso do software disponível para a ortorectificação das imagens, aliado ao pouco tempo disponível para compreender seu funcionamento foi o principal problema encontrado. As tentativas de geração do MDE a partir do par estéreo *IKONOS* não lograram êxito. Outro fato de relativa importância que limitou a utilização de outros dados produzidos para o Projeto Plano de Segurança da Água (PSA), foi a não localização do relatório Final do Projeto.

De forma geral, os estudos desenvolvidos nesse capítulo motivam a realização de futuros trabalhos de pesquisa, como forma de dar continuidade às diversas análises que o tema permite, considerando imagens de diferentes sensores para tratamento em outros softwares.

Algumas possibilidades vislumbradas incluem a geração do MDE a partir do par estéreo do *IKONOS II* (ou de outro sensor), para sua utilização no processo de ortoretificação com uso do modelo RPC refinado com pontos de controle. Existe ainda a opção de gerar ortoimagens com o MDE *TOPODATA* com resolução de 30m, produzido pelo INPE a partir dos dados do *SRTM*, além do recém lançado MDE *ASTER*, com grade de 30m.

CAPÍTULO IV: USO DE MDE PARA A DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE FRAGMENTAÇÃO E DAS ZONAS PRIORITÁRIAS DE CONSERVAÇÃO DOS SOLOS NAS REGIÕES DAS CABECEIRAS DOS RIOS NA BACIA DO ALTO PARAGUAI USANDO ANÁLISE MULTICRITÉRIO.

1. INTRODUÇÃO

O Pantanal é uma das maiores extensões de terras úmidas do planeta, com uma área de aproximadamente ¹365.900 Km², localizado no centro da América do Sul. A região é uma planície aluvial influenciada por rios que drenam a Bacia do Alto Paraguai (BAP) (EMBRAPA, 2009). Sob a perspectiva dos recursos hídricos trata-se de uma região de intensa disponibilidade hídrica. Apresenta elevada biodiversidade, por ser uma região influenciada pelos biomas da Amazônia, do Cerrado, da Mata Atlântica e do Chaco (de ocorrência na Bolívia, norte da Argentina e Paraguai), contudo, em comparação com outras bacias brasileiras, apresenta poucas regiões propícias à geração de energia devido à característica do relevo predominante, neste caso, planície.

A partir da década de 70, a intensa atuação antrópica na BAP oriunda de atividades de mineração, agropecuária e agroindústria, tem provocado alterações impactantes expressivas nas condições naturais, causando assoreamento de alguns rios, uso inadequado do solo e, conseqüentemente aumentando aporte de sólidos em suspensão e nutrientes para o Pantanal (MARMORA *et al.*, 2005). Diante desse contexto, faz-se imprescindível o contínuo monitoramento da situação de evolução da ocupação na região, bem como a investigação das conseqüências na BAP, oriundas dessas atividades antrópicas. As características naturais do lugar e as ordens de grandeza em extensão associadas a BAP, nos induz a pensar que uma análise do local deve ser conduzida em ambiente computacional. A ferramenta de análise para tal propósito é um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

A bacia hidrográfica é o elemento fundamental de análise no ciclo hidrológico, principalmente na sua fase terrestre, que engloba a infiltração e o escoamento superficial. Uma das suas muitas definições a trata como uma porção de área limitada por um divisor de águas, que a separa das bacias adjacentes e que serve de captação natural da água proveniente de chuvas através de superfícies das vertentes (BORSATO e MARTONI, 2004). A bacia hidrográfica se diferencia de uma região hidrográfica por possuir apenas uma foz.

¹ Área determinada segundo o sistema de coordenadas projetadas WGS 1984, sistema de projeção UTM, Zona 21 Sul.

Onde o relevo do terreno não é fator limitante, o potencial hídrico do Brasil é favorável à implantação de reservatórios. Diversos usos são associados aos reservatórios, os mais comuns têm por finalidade suprir as necessidades de abastecimento d'água, irrigação e fornecimento de energia elétrica, dentre outras. A área do reservatório representa a superfície do terreno inundada pelo represamento da água de um rio, na cota correspondente ao nível máximo de operação. Os reservatórios se caracterizam pela superfície inundada e sua capacidade depende do volume ativo de água, que é definido pelos níveis máximos e mínimos operativos (MÜLLER, 1996).

Uma das principais vantagens da utilização dos SIG reside na possibilidade de realização de análises espaciais. Através de análises espaciais é possível estabelecer cenários ideais para tratar problemas do mundo real, em ambiente computacional, como também gerar simulações voltadas ao diagnóstico ou previsões, entre outras aplicações. Essas análises são possíveis graças a um vasto conjunto de funções, implementadas conforme o modelo de dados adotado (ARONOFF, 1989). A maior ou menor eficiência de uma análise espacial está associada, entre outros fatores, à qualidade e a confiabilidade das informações contidas no banco de dados disponível. Logo, o sucesso na análise espacial tem intrínseca a questão da manutenção do banco de dados espaciais, que normalmente envolve um complexo e oneroso esquema, pois tanto os dados tabulares, quanto das feições espaciais, estão em constante alteração - uma vez que se referem a sistemas dinâmicos, seja por ações naturais ou provocadas pela intervenção do homem.

Assim, os dois objetivos desse capítulo são:

- Determinar o mapa do índice de fragmentação nas regiões de cabeceiras da Bacia Hidrográfica do Alto Paraguai;
- Gerar o mapa com a identificação de zonas prioritárias para a conservação considerando os recursos hídricos na região da Bacia Hidrográfica do Alto Paraguai.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.2. Índice de Fragmentação

Considerando-se a utilização dos reservatórios de acumulação, com a finalidade de atender seus múltiplos usos, o conhecimento da demanda de água necessária e da capacidade de acumulação do reservatório são informações importantes, tanto para o gerenciamento dos recursos hídricos, quanto para elaboração de projetos de reservatórios (ALBUQUERQUE *et*

al., 2004). São obras que se caracterizam por regularizar vazões, reduzindo as vazões máximas de enchente e elevando as vazões mínimas em períodos de estiagem.

De acordo com a Deliberação Normativa do COPAM nº 87 de 17 de junho de 2005, o volume do reservatório é o volume total do material, líquido e/ou sólido, depositado após a construção da barragem, nele incluindo o material de assoreamento, vinculado ou não às atividades do empreendimento. Para isto, sempre se deve tomar como base a topografia da fundação do reservatório (COPAM, 2005)

Na elaboração de projetos de localização e implantação de reservatórios destinados a necessidades básicas, o uso de SIG (Sistemas de Informação Geográfica) torna-se uma ferramenta imprescindível para obtenção de informações com maior agilidade. Os SIGs utilizam a representação computacional da informação para armazenar e gerenciar dados espaciais, o qual pode ser diretamente usado no processo de tomada de decisão (GOODCHILD, 1986). Segundo Aronoff (1989), o gerenciamento de dados por parte do SIG permite recuperar, manipular e combinar diversos dados nas mais complexas tarefas seja em formatos de mapas, imagens de satélite ou até mesmo na modelagem de um problema.

Em geral, os reservatórios são formados por barragens implantadas nos cursos d'água. Suas características físicas, em especial a capacidade de armazenamento, dependem das características topográficas do vale no qual está situado e da disponibilidade hídrica da região. Tal fato aumenta a complexidade da definição dos parâmetros de alagamento (área e volume), importantes variáveis no gerenciamento global dos reservatórios, sejam eles hidrelétricos ou não (SOUSA JUNIOR, 1998).

Espera-se que os reservatórios de maior impacto sejam aqueles de maior área de espelho d'água, associados, quase sempre, à Usinas Hidrelétricas (UHE), onde o volume inundado é, geralmente, expressivo. Há ainda as represas oriundas das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), cuja área do espelho d'água é menos representativa, uma vez que apresentam menor capacidade de geração de energia e, conseqüentemente, armazenamento de volumes menores de água. O impacto dos reservatórios em sistemas de drenagem pode ser avaliado através do Índice de Fragmentação. Em situações em que não há informação disponível, pode-se empregar os SIGs para estimar áreas inundadas a partir de Modelo Digital de Elevação (MDE), gerado a partir da interpolação de cotas e/ou curvas de nível e empregados para representar a variação contínua de altitudes na superfície do terreno.

Índice de Fragmentação é uma ferramenta empregada para identificar riscos ecológicos diretamente associados ao uso dos recursos hídricos, aplicado aos grandes sistemas de rios. Foi amplamente divulgado por Nilssen *et al.* (2005) nos seus estudos em escala

global. Apesar de sua determinação ser feita no âmbito do canal da rede hidrográfica, reflete as condições de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica como um todo.

Pode ser obtido pela relação entre o comprimento do canal inundado e o comprimento do canal principal do rio, expresso em porcentagem. A Equação (1) é empregada para estimar o Índice de Fragmentação (IF%):

$$IF = \left(\frac{L_i}{L} \right) * 100 \quad (1)$$

onde L_i representa o comprimento do canal inundado e L o comprimento do canal principal, expressos nas mesmas unidades.

Sugere-se a seguinte classificação dos valores de IF: 0 = 100%; 1 = 75% a 99%; 2 = 50% a 74%; 3 = 25% a 49%; e 4 = 0% a < 24%

2.2.1. Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado

Como apresentado no Capítulo II, nas aplicações hidrológicas em SIG, os dados de relevo são comumente representados por Modelos Digitais de Elevação Hidrograficamente Condicionados (MDEHC). Esses modelos permitem que as delimitações das bacias sejam realizadas com maior precisão, pois consideram os dados altimétricos do terreno em suas etapas de processamento (RIBEIRO, 2005). Eles também apresentam uma coincidência acentuada entre a drenagem derivada numericamente e a hidrografia real, estando isentos de sumidouros (depressões espúrias) que bloqueiem o trajeto do escoamento de água superficial (HUTCHINSON, 1989).

O MDEHC é obtido a partir do MDE, os quais podem ser representados em malhas regulares ou irregulares. As malhas regulares modelam matematicamente a superfície do terreno através de polígonos como quadrados e retângulos (SANTOS *et al.*, 2000). Os modelos baseados em malhas irregulares ou de Rede Irregular de Triângulos (*Triangulated Irregular Network - TIN*) utilizam triangulação de *Delaunay*² em sua obtenção. Esses triângulos são constituídos por pontos irregularmente distribuídos no terreno, com atributos X, Y e Z conhecidos, que equivalem, respectivamente, à longitude, latitude e altitude. Nesse modelo, são empregados polinômios de graus diferentes, onde a precisão do *TIN* está associada à densidade de pontos na área e ao grau do polinômio usado (ARCKERMANN, 1996; SANTOS *et al.*, 2000).

² Mais conhecida como *triangulação de Delaunay*. O critério utilizado na triangulação de *Delaunay* é o de *maximização dos ângulos mínimos* de cada triângulo. Isto é equivalente a dizer que, a malha final, deve conter triângulos o mais próximo de equiláteros possível evitando-se a criação de triângulos com ângulos internos muito agudos (ver mais detalhes no Capítulo I, Seção 5).

Os processos de geração dos MDE's baseiam-se na interpolação espacial de dados esparsos, geralmente obtidos a partir da digitalização de curvas de nível e de pontos cotados de mapas planialtimétricos. Diante disso, a utilização de algoritmos interpoladores para a representação do relevo introduz distorções - suavização e depressões espúrias, que limitam excessivamente a utilização dos MDE's resultantes dos estudos de erosão, por descaracterizarem a rede de drenagem e, conseqüentemente, o escoamento superficial (HUTCHINSON, 1996).

Com o objetivo de contornar os problemas gerados por esses interpoladores, Hutchinson (1989) desenvolveu o *ANUDEM* (*Australian National University Digital Elevation Model*) que foi incorporado ao módulo *TOPOGRID* do programa de SIG ArcInfo, a partir da versão 7.0. O *TOPOGRID* foi desenvolvido para apresentar, ao mesmo tempo, a eficiência computacional dos métodos de interpolação local e a continuidade da superfície proporcionada pelos algoritmos interpoladores globais.

O método utiliza uma técnica de interpolação baseada em diferenças finitas iterativas para gerar um *grid*³, a partir de pontos cotados e curvas de nível, possibilitando ainda a imposição de linhas de ruptura tais como divisores de água e rede de drenagem em que o resultado é um MDE dito Hidrograficamente Condicionado (MDEHC), por haver uma coincidência acentuada entre a drenagem derivada numericamente e a hidrografia real (ESRI, 1997). O procedimento conjuga o esforço de manter as características hidrográficas, a remoção de dados espúrios relativos a pontos de depressões ou de elevações e uma técnica de interpolação por diferenças finitas (HUTCHINSON, 1989). Ele requer o limite da área, dados de hidrografia simplificada e orientada na direção do escoamento, altimetria com curvas de nível ou pontos cotados.

O desenvolvimento do MDEHC aliado ao aperfeiçoamento de técnicas mais precisas na extração de drenagem numérica e delimitação de bacias hidrográficas proporciona o uso de SIG para obtenção automática das características físicas das bacias de drenagem. Como também garanti vantagens na automação, em relação aos procedimentos manuais, maior eficiência dos processos e obtenção de resultados e a possibilidade de armazenamento e compartilhamento dos dados digitais (BAENA, 2002).

O processo de criação de um MDEHC busca, sempre que não haja violação das condições de altimetria, respeitar o traçado da hidrografia mapeada, que atua como linhas de ruptura no processo de interpolação dos dados de elevação.

³ Malhar regular

Os procedimentos para a geração do MDEHC eliminam de forma sistemática as depressões espúrias. Tais depressões interrompem o escoamento superficial da água, geram imperfeições no modelo, cujo escoamento deve ser direcionado à jusante da bacia de contribuição. Detalhes da geração do MDEHC foram amplamente discutidos no Capítulo III.

2.2.2. *Determinação Automática de Áreas de Inundação*

A determinação de área/volume de água do reservatório pode ser feita a partir do MDE de maneira automática, desde que se tenha verificado sua consistência e, caso necessário, corrigido suas discrepâncias. De acordo com Tribe (1992), a ocorrência de imperfeições é freqüente nos MDE devido a erros nos parâmetros de entrada, ou erros produzidos durante o processo de interpolação.

A partir da posição da soleira do reservatório e da hidrografia (natural ou numérica) pode-se empregar o MDEHC para determinação automática de uma área/volume de inundação.

2.3. *Zonas de Conservação*

Fenômenos distribuídos no espaço geográfico relacionados a uma bacia hidrográfica podem ser metodicamente modelados com as técnicas do geoprocessamento, como a representação dos solos, vegetação, declividade do terreno, espacialização da precipitação, etc.

Solo e água são intrinsecamente relacionados à conservação. Em termos práticos, não se consegue conservar um sem cuidar do outro. O material transportado pelo escoamento superficial, proveniente da superfície do solo após uma precipitação de maior intensidade é conduzido até o leito dos cursos d'água e, portanto, prejudica sua qualidade. Por outro lado, a má qualidade da água pode afetar severamente o ecossistema, prejudicando fauna e flora próximas às margens. A precipitação é fator determinante nesse processo. Seu volume infiltrado provoca a recarga do aquífero, garantindo abastecimento. Seu volume não interceptado pela cobertura vegetal ou infiltrado, na região da bacia, proporciona o escoamento superficial para o canal principal e seus tributários (córregos, riachos e ribeirões), onde a vazão é dada em função do volume de água que passa por uma seção transversal na unidade de tempo. Esse escoamento superficial pode transportar partículas de solo e outros componentes aos cursos d'água, causando assoreamento e degradando a qualidade do meio ambiente.

O escoamento das bacias hidrográficas é contextualizado no estudo espaço/temporal através das precipitações locais. Deste modo, as oscilações de maior ou menor precipitação, influenciam diretamente nas alterações do escoamento das bacias.

O regime pluviométrico da BAP é do tipo tropical com duas estações, a chuvosa que vai de outubro a março, e a seca, de abril a setembro. Os meses de dezembro, janeiro e fevereiro são os mais chuvosos, e, junho, julho e agosto, considerados os mais secos.

As chuvas se concentram mais nas porções norte, sul e nos planaltos, onde são registrados índices médios anuais superiores a 1.900 mm. A estiagem (seca) nas regiões centrais e a oeste da BAP apresenta índices médios com valores de um pouco mais de 1.000 mm anuais.

2.3.1. Algoritmo Interpolador do Inverso da Potência da Distância

Nos estudos que envolvem dados pluviométricos é comum a utilização dos métodos de SIGs para a espacialização destas informações. Um dos métodos mais conhecidos é a interpolação ou estimativa pontual. A interpolação consiste na utilização de valores pontuais (observados em campo), distribuídos regular ou irregularmente no espaço geográfico, com a finalidade de gerar uma superfície contínua.

Os métodos de interpolação podem ser classificados em funções globais, onde todos os valores pontuais são considerados na interpolação dos pontos não amostrados. A alteração destes pontos (adição ou remoção) afeta toda a área interpolada. Ou funções locais, que utilizam apenas os valores mais próximos do ponto a ser interpolado. A alteração de um valor, afeta somente os pontos mais próximos.

O método do Inverso da Potência da Distância (IPD – *Inverse Distance Weight - IDW*), algoritmo interpolador classificado como de função local, considera que os pontos mais próximos entre si, possuem valores mais similares que pontos mais distantes. A variação entre os valores é modelada geralmente, segundo um valor de potência da distância entre os pontos que, enfatize ou reduza a influência de sua proximidade.

De acordo com Isaaks e Srivastava (1989), o peso atribuído a um ponto amostrado é inversamente proporcional à distância entre este e o ponto não-amostrado. Sendo assim, quanto mais distante, menor o valor do peso. Uma ilustração da ação do interpolador IPD está representada na Figura 1.

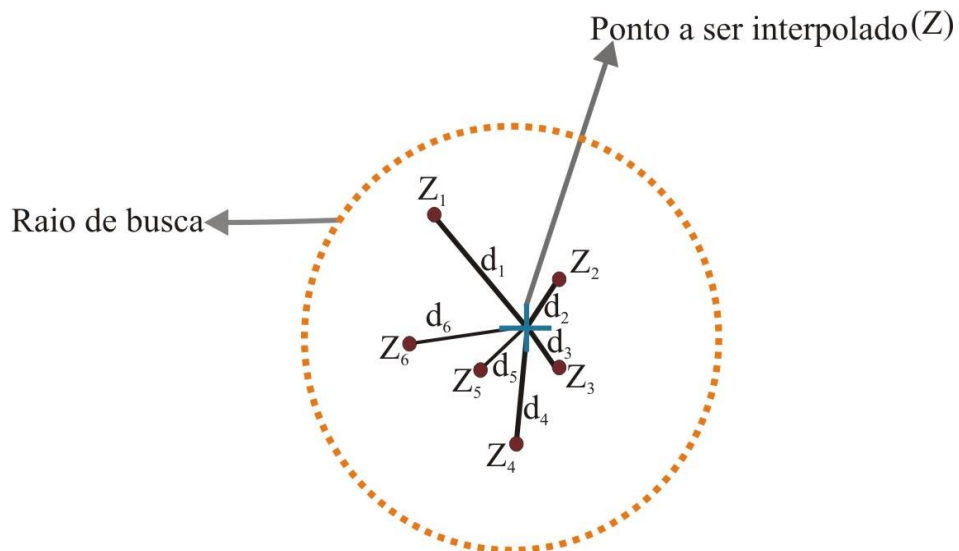


Figura 1: Interpolação IDW.

Fonte: Adaptado (GROHMANN, 2008).

A estimativa é obtida de acordo com a Equação (2):

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

onde:

$$\begin{array}{ll} Z & \Rightarrow \text{Ponto não amostrado.} \\ z_i & \Rightarrow \text{Ponto amostrado.} \\ w_i = \frac{1}{d_i^p} & \left. \begin{array}{l} \Rightarrow \\ \} \end{array} \right\} \begin{array}{l} w_i = \text{Peso do ponto.} \\ d_i = \text{Distância entre os pontos amostrados e os não} \\ \text{amostrados.} \\ p = \text{Potência.} \end{array} \end{array}$$

Esse e outros métodos de interpolações foram apresentados no Capítulo I (seção 6).

2.3.2. *Análise Multicritérios*

Uma das técnicas disponíveis no SIG, usuais no envolvimento de problemas de caráter espacial, para a abordagem de diversos temas (meio ambiente, planejamentos urbanos e regionais entre outros) consiste na análise multicritério.

Para Almeida e Costa (2003), a definição para “análise multicritério” incorpora um conjunto de técnicas e métodos aplicados para auxiliar ou apoiar o processo de tomada de decisão, dada uma multiplicidade de critérios, estabelecendo relação de preferências entre as alternativas pré-avaliadas. No ambiente SIG, os critérios podem ser considerados temas dotados de atributos e informações espaciais que representam situações do mundo real.

O processo decisório é fundamentalmente governado por escolhas entre alternativas. As alternativas representam diferentes hipóteses, ações ou características, entre indivíduos considerados no processo de tomada de decisão.

Critérios caracterizam-se como elementos informacionais que podem ser medidos e avaliados, para encontrar melhores alternativas num processo decisório. Geralmente os critérios podem ser considerados como fatores ou restrições. Fatores são critérios de caráter contínuo, empregados para aumentar ou reduzir a adequabilidade considerada. Enquanto que as restrições são critérios considerados como limite/barreira absoluta às alternativas. No entanto, os critérios são atributos, indicadores que permitem comparar alternativas de acordo com um eixo particularmente significativo ou de um ponto de vista.

A análise multicritério é uma metodologia de análise com grande potencial, pois fornece subsídios ao processo de tomada de decisão, através da comparação entre temas de grandezas variáveis que, de outra maneira não seria possível. Porém, para proceder à análise multicritério entre temas diversificados, suas escalas de valores naturais devem ser padronizadas para uma mesma escala. Uma maneira de padronizar critérios fatores consiste no processo de transformação dos valores dos dados originais em graus de pertinência, notadamente através de funções *fuzzy*, que variam conforme os níveis de adequabilidade em um intervalo contínuo, comumente representado entre 0 a 1.

Uma vez que os critérios foram compatibilizados para comparação, a estratégia seguinte é estabelecer o grau de importância relativa de cada um na análise. Para isso, a técnica de comparação pelo Processo Analítico Hierárquico (*Analytical Hierarchy Process - AHP*) permite estabelecer pesos a cada fator segundo sua relevância.

2.3.2.1. Média Ponderada Ordenada e Combinação Linear Ponderada

Podem-se adotar diferentes técnicas para avaliar e combinar os critérios padronizados. Dentre elas, as mais comuns são a Combinação Linear Ponderada (*Weight Linear Combination - WLC*), a Média Ponderada Ordenada (*Ordered Weighted Average - OWA*) ou ainda o Método de Interseção Booleana. A técnica WLC proporciona a compensação total dos fatores envolvidos, uma vez que é assumida uma equidistribuição de pesos para cada fator. Em uma análise WLC, este se refere ao risco médio, posicionado entre os riscos mínimo e

máximo na área estratégica de decisão. Na análise OWA a compensação dos pesos é distribuída ordenadamente, possibilitando maior controle no nível de compensação entre os fatores, ou seja, a alteração relativa ocorre em direção ao risco mínimo ou máximo através da ordem dos pesos que controla o nível de risco. O método Booleano consiste na geração de imagens de restrição/aptidão, onde áreas aptas recebem valor 1 e as não aptas 0. Considerada conservadora em termos de risco, pois o resultado adequado é obtido satisfazendo a todos os critérios.

2.3.2.2. *Risco e compensação da análise*

Por se tratar de uma metodologia que permite subjetivismo na calibração de parâmetros, a análise multicritério deve valer-se do cálculo do risco associado para verificar sua coerência na área estratégica de decisão. Uma análise dita coerente deve considerar um risco baixo e uma maior compensação entre os fatores. Dessa forma, o Risco e a Compensação podem ser calculados através das Equações (3) e (4), respectivamente:

$$Risco = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (n-i)O_i \quad (3)$$

$$Compensação = 1 - \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n \left(O_i - \frac{1}{n}\right)^2}{n-1}} \quad (4)$$

onde i é a ordem do peso e O_i o peso ordenado, n é o número de fatores.

2.3.3. *Fatores utilizados na análise multicritério*

2.3.3.1. *Solos*

As alterações não-planejadas no uso e ocupação do solo refletem em degradação ambiental, perda da camada fértil, estabelecimento de erosão, entre outros fatores relacionados. Estas alterações, responsáveis pelos processos erosivos, assoreamento, contaminação dos cursos d'água, entre outros, estão quase sempre associadas às interferências naturais ou humanas, em diferentes níveis de intensidade conforme os tipos de solos.

2.3.3.2. *Vegetação*

Em relação à vegetação, o desmatamento *a priori* interfere, entre outros fatores, na maior exposição do solo às condições climáticas, deixando-o sujeito a intempéries que podem provocar erosões e, conseqüentemente, a perda da camada fértil do solo. Por outro lado, uma superfície com cobertura vegetal preservada garante a conservação da qualidade do solo e água, pois, influencia no aumento da rugosidade da superfície e na elevação da evapotranspiração, por diminuir a umidade de solo e, conseqüentemente contribui para a infiltração no solo também.

2.3.3.3. *Morfologia do terreno*

O índice topográfico é considerado um parâmetro hidrogeomorfológico distribuído. O conceito de similaridade hidrológica, neste caso é estabelecido pelo índice topográfico local, ou seja, locais que apresentam o mesmo índice possuem comportamento hidrológico semelhante. Trata-se de um índice classificatório da superfície topográfica que permite identificar os tipos de relevos quanto à sua forma, tais como côncavo, convexo e plano, entre outros. Superfícies de terreno classificadas como convexas são mais susceptíveis a uma maior velocidade de escoamento superficial do que superfícies côncavas. Situação essa que, aliada ao tipo de solo, declividade da área e cobertura vegetal, pode favorecer a perda de solos e, conseqüentemente, à ocorrência de erosão e a formação de voçorocas.

2.3.3.4. *Declividades*

Vários processos hidrológicos estão relacionados com a declividade da bacia hidrográfica, como a umidade do solo, a infiltração, o escoamento superficial, etc. A declividade é considerada um dos principais fatores que regulam o tempo de duração do escoamento superficial e da concentração de precipitação nos leitos dos cursos d'água.

A maior ou menor taxa de infiltração, suscetibilidade à erosão dos solos, o valor da enchente máxima, são fatores que dependem da velocidade de escoamento sobre os terrenos da bacia. Por isto, declividades com altas percentagens são susceptíveis a impactos negativos ao meio ambiente.

O valor de declividade de um pixel⁴ (central) é calculado como resultante do vetor de inclinação determinado a partir do valor dos pixels vizinhos imediatos: superior, inferior, da esquerda e da direita (EASTMAN, 2006). Seu valor representa a tangente do ângulo com maior inclinação de declividade, ou seja, o grau de inclinação do terreno. É comumente expresso em graus ou porcentagem ($m/m \cdot 100$), geralmente abrange uma faixa de valores entre de 0 a 45° ou 0 e 100% de declividades

2.3.3.5. *Distância do sistema viário*

O processo relacionado ao desequilíbrio ambiental, causado principalmente pela ação antrópica, tem como resultados grandes catástrofes (secas, enchentes, etc.). Neste sentido, como forma de “preservação ambiental”, determinadas áreas são normalmente protegidas por leis.

A lei nº 8.830, de 21 de janeiro de 2008, estabelece a Política Estadual de Gestão e Proteção da Bacia do Alto Paraguai no Estado de Mato Grosso, definindo seus princípios e

⁴ Ou Picture X Element. Significa a menor unidade de informação em uma imagem. Análogo à célula de uma matriz.

atribuições do poder público para manutenção da sustentabilidade ambiental, econômica e social (FEMA-MT, 2008).

A exposição de bacias hidrográficas adjacentes às rodovias, constitui risco de degradação ambiental, por estarem expostas a situações como o transporte de sedimentos, assoreamento dos rios em decorrência de vias na região mais baixa do relevo, correspondente à zona de maior acúmulo do escoamento superficial, potencializando a ação das enxurradas na remoção e transporte de material em direção aos cursos d'água.

O risco analisado para o sistema viário tem como indicativo a distância. Quanto mais longe das áreas das bacias hidrográficas, menor a influência oferecida, caso contrário, estas áreas tornam-se mais vulneráveis, em razão da transformação do meio.

2.3.3.6. *Distância das sedes municipais*

A análise das distâncias das sedes municipais tem a mesma abordagem dirigida ao sistema viário. Desta forma, fica estabelecido o indicativo que quanto mais longe as sedes municipais da área da bacia hidrográfica, menor o risco oferecido. Como a cidade é um sistema dinâmico em constante expansão, suas proximidades são zonas potencialmente susceptíveis à intervenção humana, seja para fins de crescimento territorial, seja para exploração econômica da terra.

2.3.3.7. *Fluxo acumulado*

O fluxo superficial de uma bacia hidrográfica consiste na distribuição de água das áreas mais elevadas (montante) para as áreas mais baixas (jusante).

O fluxo acumulado relaciona-se aos dados referentes do fluxo superficial da água a montante de um determinado ponto no terreno. De acordo com Mendes e Cirilo (2001), a partir da direção de fluxo, o fluxo acumulado é adquirido somando a área das células (quantidade de células) na direção do fluxo (ou escoamento).

A direção do fluxo de uma célula central é escolhida de oito direções distintas. Desta maneira, o fluxo estabelece a direção através de valores numéricos. Se a direção do fluxo é para o oeste, ela será codificada como 16, para o norte, 64, para o sudeste, 2, e assim por diante (Ver Figura 5, Capítulo II). A direção é definida pela célula de menor altitude, em relação à célula central e no caso de vários vizinhos apresentem os mesmos valores, o algoritmo define a melhor direção.

2.3.3.8. Altitudes (MDEHC)

A altitude média de uma bacia hidrográfica é tida como o elemento que interage à temperatura e a precipitação. As altitudes na BAP variam de 1.000 m a valores inferiores a 100 m. Na parte alta da bacia são encontradas altitudes acima de 200 m e nos locais mais baixos, inferiores a 80 m. Locais com maiores altitudes proporcionam menores temperaturas e maior volume de chuva.

2.3.3.9. Face norte-sul

A face do terreno está diretamente relacionada à incidência de radiação solar recebida pela superfície durante o dia e por isso, esta relacionada ao desenvolvimento vegetativo. Tipicamente no Hemisfério Sul, as faces voltadas para o Norte recebem maior nível de radiação solar incidente do que as faces voltadas para o Sul.

2.3.3.10. NDVI

O NDVI (*Normallized Difference Vegetation Index*) ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada é utilizado com sucesso para classificar a distribuição global de vegetação (LIU, 2006). De acordo com Liu (2006), o NDVI insere-se em um intervalo de -1 a +1, onde valores negativos representam nuvens, e valores próximos de zero, solo nu (sem vegetação) e valores mais altos representam vegetação.

Segundo Moreira (2005), os dados de reflectância dos alvos podem ser transformados em índices de vegetação, gerados com o intuito de destacar o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos da superfície terrestre. O NDVI é um dos índices mais utilizados. Pode ser obtido por operação aritmética de razão entre diferença e adição das bandas do infravermelho próximo e vermelho, pela Equação (5):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (5)$$

em que NIR (*Near Infra-Red*) é a REM (Radiação Eletromagnética) na banda da região espectral do infravermelho próximo e R (*Red*) a REM na banda da região do vermelho. O NDVI oferece boa distinção entre materiais como vegetação, solo e água.

Em estudos temporais faz-se necessário submeter as imagens a operações de pré-processamento, com intuito de corrigir-las das interferências atmosféricas e das imperfeições geométricas geradas no instante da aquisição. Para se evitar esta etapa, pode-se optar por empregar as imagens do satélite MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Todas as bandas das imagens MODIS são pré-processadas com o intuito de atenuar as interferências atmosféricas através de um algoritmo que usa informações de aerossóis e vapor d'água coletadas pelo sensor. O algoritmo corrige as imagens de efeitos de nuvens *cirrus*,

aerossóis e gases atmosféricos (NASA, 2007). Suas imagens são disponibilizadas na projeção Goode Homolosine (Land) no *datum* WGS84, no formato *Geotiff*.

3. METODOLOGIA

3.2. Softwares empregados

Foi utilizado o software *ArcGIS* como ferramenta SIG para preparação da base de dados para análise multicritérios, determinação do índice de fragmentação e produção de molduras ilustrativas dos resultados, as carta-imagem dos temas mais relevantes. Todos os temas foram importados para uma Geobase gerada no aplicativo *ArcCatalog*, onde foram geradas ainda duas coleções de classes de feições com mesmos padrões de referência espacial (sistema de coordenadas geográficas WGS 84, projeção UTM, fuso 21 – Hemisfério Sul): uma coleção para abrigar os temas originais e a outra para armazenar os resultados. O SIG *Idrisi* foi empregado apenas para realizar as análises multicritérios efetivamente. Seus resultados foram compatibilizados com o *ArcMap* para produção das molduras finais.

3.3. Índice de Fragmentação

Para se obter o Índice de Fragmentação (IF) foram utilizadas as áreas dos lagos de barragens das Usinas Hidrelétricas (UHE) disponibilizadas pelo SIGEL/ANEEL (Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico/Agência Nacional de Energia Elétrica), e também uma metodologia desenvolvida especificamente para determinação automática de área e volume de barragens. A partir dos parâmetros de entrada MDEHC e posição da soleira da barragem, essa metodologia foi executada determinando-se as áreas de inundação aproximadas das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), no intuito de se obter maior semelhança com a realidade local. O desenvolvimento de aplicativo incorporado ao SIG possibilita integração entre a análise e a gestão da bacia hidrográfica, bem como simulação apropriada à elaboração de projetos e obtenção de informação.

O IF foi determinado considerando-se a área de espelho d'água das UHEs e das PCHs segundo os critérios: (i) para rios de margem dupla, optou-se por fazer a média dos comprimentos de suas margens como forma de representação da extensão de sua calha principal; (ii) cada rio principal foi individualizado considerando sua extensão até a confluência com outro de maior porte (outro principal); (iii) para os rios sem nome foi considerado que sua extensão terminava ao encontrar um rio com nome; (iv) para as barragens que abrangem mais de uma confluência, as extensões alagadas em outros rios não sendo o principal foram contabilizadas no comprimento inundado (substituição de SL_i por L_i na Equação 1), ao passo que, o comprimento do rio principal foi considerado apenas o

comprimento efetivo do referido rio (situação mais evidenciada na Represa de Manso, localizada no Rio Manso).

3.3.1. Determinação do MDEHC

Para identificar picos e remover as imperfeições do MDE aplica-se o processamento de consistência hidrológica com o algoritmo *Fill Sinks* (i.e., superestimativas e subestimativas, respectivamente), presente no módulo *Spatial Analyst - Hydrology* do ArcGIS – *ArcToolbox* ou digitando os comandos de um algoritmo iterativo na calculadora matricial (*Raster Calculator*) do módulo *ArcGIS*. No presente capítulo, o MDEHC foi obtido segundo um algoritmo iterativo que convergiu quando o modelo digital de direções do escoamento apresentou apenas 8 direções. Na sequência são apresentadas as etapas empregadas na sua execução.

Estimou-se a direção de fluxo (i). Identificou-se as depressões espúrias (ii). Delimitou-se a área de drenagem de cada depressão (iii). Atribuiu-se o menor valor da área de drenagem da depressão para as demais células da área de inundação da depressão (iv). Preencheu-se as depressões (v) fazendo com que as células com altitudes inferiores à menor altitude da borda da área de drenagem de uma depressão tivessem seus valores substituídos por esse valor. Com as depressões eliminadas, substituiu-se o modelo original pelo modelo corrigido (vi).

Etapas para se obter o MDEHC a partir do MDE, podem ser revisto no Capítulo III e nos APÊNDICES I e II, passo a passo.

3.3.2. Determinação automática de áreas de inundação

Como a determinação automática de áreas de inundação é realizada fundamentalmente a partir de operações no MDE, faz-se necessário que seja consistente. Além do MDE, é necessário um *shapefile* da soleira da barragem perpendicular a hidrografia, e a hidrografia mapeada. O *shapefile* da soleira (denominado barragem) é uma feição do tipo linha criado utilizando a ferramenta *Create Feature Class* da função *Feature Class* em *Data Management Tools* no *ArcToolbox*.

Antes do processamento fez-se a introdução do arquivo da barragem por meio da seção de edição. Traçou-se uma reta perpendicular a hidrografia colocando-se as coordenadas UTM nas extremidades esquerda e direita da barragem. O processo de edição é encerrado salvando-se o *shapefile* da barragem recém criado.

A posição da soleira é fundamental para se obter resultados mais aproximados e confiáveis. Contudo, a informação disponível foi apenas pontual, localizando aproximadamente a posição da PCH. Foram, portanto, respeitados alguns critérios gerais e restrições na escolha dos eixos do barramento, por exemplo, a conformidade topográfica do terreno favorável a implantação da barragem. Este critério foi adotado devido à posição

pontual da PCH não oferecer coincidência perfeita em sobreposição à rede hidrográfica. Geralmente, o local mais propício ao barramento é o ponto de maior estreitamento entre as curvas de nível, pois pode-se obter menor custo na construção da barragem, maior capacidade de acumulação de água, menor extensão de barragem e área alagada.

Desta forma, o arquivo *shapefile* é então convertido ao formato *raster* (*shape_raster: soleira no formato raster*) e incorporado aos processos.

De posse de todos os elementos necessários, a sequência lógica dos passos para se obter a determinação automática de área de inundação é dada por:

- (i) Aumento da precisão convertendo-se os valores de altitude de metros para milímetros

$$\text{mde_mm} = \text{Times} [\text{mde}] * 1000$$

- (ii) Remoção das depressões espúrias do MDE⁵ feita pelo comando *Fill*.

$$\text{Fill_mde_mm} = \text{fill}[\text{mde_mm}]$$

- (iii) Garantia de que as extremidades da barragem estejam em uma mesma cota e apoiadas, introduziu-se ao modulo uma análise de consistência. Ele assegura a correta localização e apoio da soleira, evitando que fique suspensa. A ilustração da Figura 2 apresenta a locação do barramento representada pela linha pontilhada. A hipótese da análise de consistência é que as extremidades da barragem estejam posicionadas na mesma cota, na horizontal. Na análise de consistência multiplicou-se a soleira no formato *raster* pelo MDE para retirar o valor da cota das extremidades. Atribuiu-se o valor da cota mínima a toda extensão da soleira. Para constatar se a posição da soleira era correta, realizou-se uma verificação junto ao perfil.

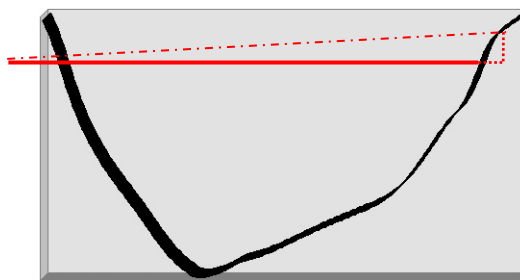


Figura 2: Visualização da análise de consistência.

- (iv) Obteve-se a direção de escoamento

$$\text{Flowdir} = \text{flowdirection} ([\text{fill_mde_mm}])$$

- (v) Determinou-se a área de contribuição da bacia à montante da soleira

$$\text{acb} = \text{watershed} ([\text{Flowdir}], [\text{shape_raster}])$$

⁵ Supondo que o modelo não tenha sido consistido.

(vi) Calculou-se o espelho d'água com o comando *conditional evaluation* (con). O cálculo foi realizado em um conjunto de células pertencentes à área de contribuição que possuem a altitude menor ou igual à altitude da soleira da barragem (maior valor possível da soleira). Ou seja, o espelho d'água formado pela barragem, quando esta está com 100% da sua capacidade de armazenamento.

espelho = con (float ([acb]) * [fill_mde_mm] <= zonalmax ([acb], float([shape_raster]) * [fill_mde_mm]), 1)

(vii) Calculou-se a área represada através da função *Zonal Geometry*

area_inundada = zonalarea ([espelho])

(viii) Estimou-se a profundidade de cada célula do reservatório pelo comando *zonalmax*

prof_lago = zonalmax ([espelho], [fill_mde_mm]) - [fill_mde_mm]

(ix) Converteu-se a profundidade do reservatório para metros

prof_lago_m = divide float ([prof_lago]) / 1000

(x) Calculou-se o volume de cada célula inundada

vol_cel = [prof_lago_m] * zonalarea([espelho]) / zonalsum ([espelho], [espelho])

(xi) Determinou-se o volume total do reservatório pela função *Zonal Statistics*

volume = zonalsum ([espelho], [vol_cel])

Ao final do processamento, tem-se então a área e o volume do reservatório. Os procedimentos estão sintetizados no fluxograma apresentado na Figura 3, cuja sequência apresentada é:

- 1 – Entrada de dados;
- 2 – MDE convertido para milímetros;
- 3 – Eliminação das depressões espúrias;
- 4 – Conversão do *shapefile* da soleira para *raster*;
- 5 – Execução da análise de consistência, para a soleira;
- 6 – Direção do escoamento;
- 7 – Determinação da área de contribuição a partir da soleira;
- 8 – Determinação do espelho d'água;
- 9 – Determinação da profundidade do lago;
- 10 – Saída: Área alagada pelo barramento;

11 – Saída: Volume do reservatório;

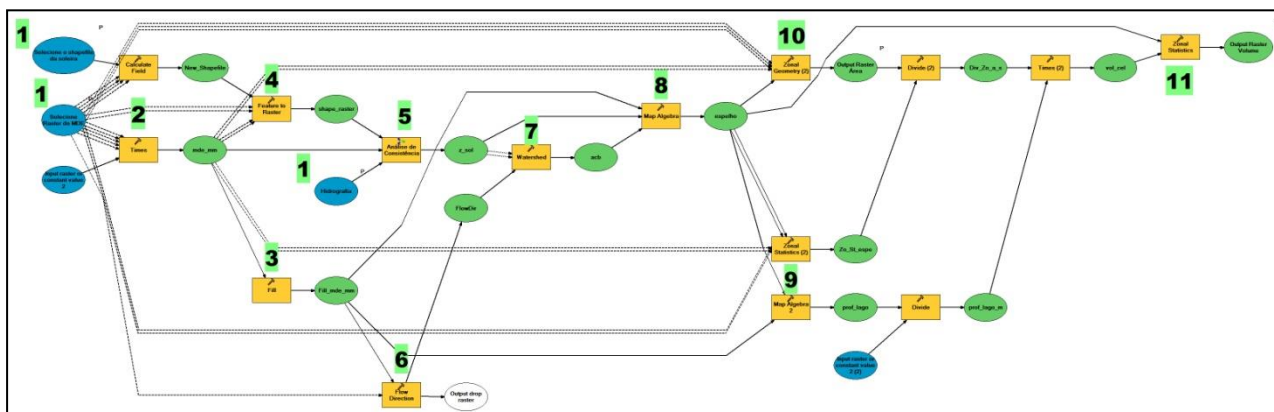


Figura 3: Modelagem dos processos empregados para obtenção de área e volume

As rotinas específicas foram desenvolvidas com o aplicativo *ModelBuilder*, disponibilizado junto ao *ArcToolbox*, do ArcMap 9.3 da ESRI, conforme ilustra a

Figura 4.

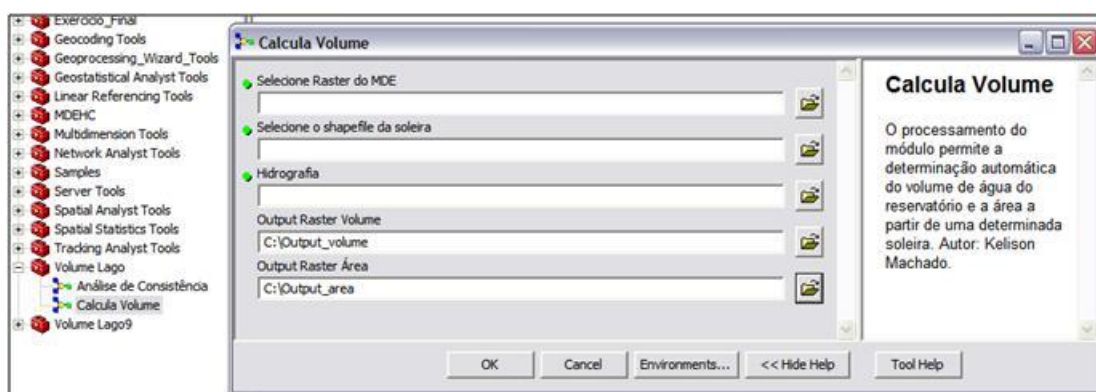


Figura 4: Interface do modelo para cálculo do volume do reservatório.

A partir dos pontos de localização das PCHs que continham na tabela de atributos informações sobre área inundada, foi determinada a área de inundação automática dessas barragens conforme a metodologia exposta.

A determinação de áreas foi realizada interativamente, através do processamento dos dados, seguida de uma análise dos resultados. Caso o valor de área encontrado pelo processamento apresentasse discrepância muito expressiva em relação ao dado oficial constante nas tabelas de atributos das PCHs, o processo foi repetido, reposicionando e/ou redimensionando a soleira com cautela.

3.4. Zonas de Conservação

A parte fundamental do processamento para obtenção do mapa com a identificação de zonas prioritárias de conservação foi elaborada com emprego do SIG Idrisi (CLARK LABS, 2006) através da ferramenta de análise multicritérios MCE (*Multi-Criteria Evaluation*).

Para composição do mapa identificando zonas prioritárias de conservação foram produzidos alguns cenários representativos das condições da área, com o intuito de simular situações mais aproximadas da condição real.

3.4.1. Subprodutos

Apesar de não terem sido empregados diretamente nas análises multicritérios, alguns subprodutos foram obtidos no decorrer da modelagem. Sejam como parte intermediária empregada na obtenção dos fatores efetivamente utilizados, sejam como de interesse para melhor conhecer as características da bacia. Tais produtos foram:

- i. Modelo digital do azimuth do ângulo de maior inclinação;
- ii. Modelo de direção do escoamento;
- iii. Hidrografia numérica;
- iv. Hidrografia numérica ordenada segundo Strahler (1957).

O **modelo digital do azimuth do ângulo de maior inclinação** apresenta uma característica de representação circular. Para ter significado, foi empregado para determinação do modelo digital de faces norte-sul do terreno após aplicação da operação trigonométrica do cosseno no subproduto (i).

O **modelo digital de direções do escoamento** foi empregado para obtenção do **modelo digital de fluxo acumulado**. Este modelo (subproduto (ii)) foi utilizado como critério de parada no algoritmo iterativo de determinação do MDEHC a partir do MDE.

A **hidrografia numérica** (subproduto (iii)), utilizada para geração automática das áreas de inundação, foi obtida a partir do **modelo digital de fluxo acumulado**, num processo

experimental iterativo, seguido da avaliação dos resultados. Primeiramente definiu-se uma imagem da rede de drenagem associada a uma determinada área de contribuição, especificada pelo usuário e determinada a partir do Modelo Digital de Fluxo Acumulado. Em seguida converteu-se tal imagem para vetor e verificou-se o resultado por inspeção visual do analista. O resultado foi considerado satisfatório quando a situação modelada apresentou, salvo exceções, situação próxima da realidade (comparação com a hidrografia natural). Devido às características topográficas da região, com superfície extremamente plana na sua maior parte, os melhores resultados foram verificados quando a hidrografia gerada foi associada a uma maior área de contribuição, especificamente 5 mil quilômetros quadrados de área.

Uma vez obtida a **hidrografia numérica ordenada** (subproduto (iv)), processou-se a ordenação dos cursos d'água conforme a metodologia proposta por Strahler (1957). Optou-se por Strahler (1957) no lugar de Horton (1945) devido ao fato de ter apresentado maior consistência na análise, uma vez que no modelo proposto por Horton (1945), faz-se necessária a identificação da nascente. No ordenamento proposto por Strahler (1957), os canais que não tem tributários são classificados como de 1ª ordem, os canais de 2ª ordem são formados pela confluência de dois canais de 1ª ordem, mas podem receber também tributários de 1ª ordem. Os canais de ordem u são formados por dois canais de ordem $u-1$, mas podem receber afluentes de qualquer ordem.

3.4.2. Fatores utilizados

3.4.2.1. Produtos derivados do MDEHC

O **modelo digital da morfologia do terreno** foi obtido pelo módulo *Toposhape* disponível no submenu de extração de características (*Feature Extraction*) do menu temático de análise da superfície (*Surface Analysis*) que faz parte do menu principal de análises SIG (*GIS Analysis*) do SIG *Idrisi* (CLARK LABS, 2006). A partir do MDEHC o algoritmo processa e classifica as feições características da topografia do terreno, dentre as quais, as de maior interesse ao trabalho foram as formas: côncavo, convexo e plano.

Derivado do MDEHC, o **modelo digital de declividades** gerado para este capítulo foi calculado em porcentagem, através do módulo *Slope* disponível nas opções da extensão Analista Espacial (*Spatial Analyst*) do *ArcMap*.

O **modelo digital de faces norte-sul** foi derivado pela aplicação da operação trigonométrica de cosseno ao Modelo Digital de Azimute da Maior Declividade através da calculadora de imagens (*Raster Calculator*) disponível na extensão Analista Espacial (*Spatial Analyst*). Valores próximos a 1 representam faces mais voltadas para o norte, enquanto valores próximos a -1 representam faces voltadas ao sul.

O **modelo digital de fluxo acumulado** foi gerado pelo módulo de determinação do fluxo acumulado (*Flowaccumulation*) do menu de análises hidrológicas (*Hydrology*) disponível na extensão analista espacial (*Spatial Analyst*) da caixa de ferramentas (*Toolbox*) do ArcMap. Nesse processo foi empregado o MDEHC como superfície de ponderação.

3.4.2.2. *Mapas de distâncias*

Foram gerados os mapas de distâncias euclidianas a partir das sedes municipais e a partir do eixo do sistema viário (estradas, rodovias e ferrovias) através do módulo distância Euclidiana (*Euclidean Distance*) disponível no menu de distancias (*Distance*) da extensão analista espacial (*Spatial Analyst*). O módulo determina as distâncias de cada pixel até o pixel que representa a característica de origem das medições. Os valores calculados são expressos nas mesmas unidades de referência do mapa. No caso do presente estudo, os mapas foram expressos em metros.

3.4.2.3. *Composição NDVI*

Para realizar a composição *NDVI*, utilizou-se imagens nas bandas do vermelho (620-270 nm) e infravermelho próximo (841-876 nm) da Coleção 3 (*Collection 3*) do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) à bordo do satélite Terra. A Coleção 3 refere-se a composições de 32 dias. Estas composições têm a vantagem de eliminar a maior parte da cobertura de nuvens que são encontradas nas imagens diárias (NASA, 2007).

As imagens disponíveis encontradas foram referentes ao período de 2001 a 2005. Para todas as imagens das bandas 1 e 2, referentes às regiões do vermelho e do infravermelho próximo, respectivamente, foram realizadas a sequência de etapas: (i) definição da projeção Goode Homolosine Land; (ii) cálculo do *NDVI* pela Equação (5); (iii) recorte da área da BAP; (iv) determinação da composição *NDVI* referente ao período de dados (2001 - 2005) pela Equação (6); (v) processamento de transformação de sistemas, da projeção Goode para projeção UTM, sistema de referência WGS 84 fuso 21 S.

$$NDVI_{2000}^{2005} = MAX(\sum_{i=1}^n NDVI_i) \quad (6)$$

em que n é o número de imagens.

O item (i) foi obtido pelo módulo de definição de projeção (*Define Projection*) do submenu projeções e transformações (*Projections and Transformations*) disponível no menu de ferramentas de gerenciamento de dados (*Data Management*) da caixa de ferramentas (*Toolbox*) do ArcMap. Para os itens (ii), (iii) e (iv) foi empregada a calculadora de imagens (*Raster Calculator*) disponível na extensão analista espacial (*Spatial Analyst*). O item (iii) foi obtido por operação de multiplicação de uma imagem-máscara da área da BAP por cada

imagem NDVI (**imagem_NDVI_recortada** = **[imagem_BAP] * [imagem_NDVI]**) e o item (iv), por uma operação estatística de máximo (**composição_NDVI** = **max([imagem_NDVI1], [imagem_NDVI2], ..., [imagem_NDVI_n])**). Ao final, procedeu-se a operação do item (v) pelo módulo de projeção de imagens (*Project Raster*) disponível no submenu imagens (*Raster*) de projeções e transformações (*Projections and Tranformations*) do menu de gerenciamento de dados (*Data Management*).

3.4.2.4. *Precipitação*

O **mapa de precipitação** foi obtido a partir da interpolação do valor médio dos totais anuais precipitados no intervalo de 10 anos (1997 - 2006). Foram utilizadas as séries históricas de 70 estações sem falhas de dados entre 1997 e 2006. A série de apenas 10 anos foi assim estabelecida, pois ao se elevar o número de anos para a série, verificou-se uma drástica redução na quantidade de estações e 2006 foi o último ano com dados consistidos na base consultada.

A escolha do algoritmo interpolador foi feita com base em simulações seguidas de análise dos resultados, aliada a experiências dos especialistas. Verificou-se que o interpolador do inverso da distância elevada à quinta potência ofereceu melhor ajuste aos dados.

3.4.2.5. *Mapas de tipologias de solos e vegetação*

Os mapas de solos e vegetação utilizados foram baseados em dezessete e nove tipologias, respectivamente. Tais tipologias foram classificadas de acordo com as características intrínsecas do solo e vegetação, como potencial de fertilidade, impermeabilidade, susceptibilidades à erosão, entre outras características, com vistas à conservação. De acordo com o tipo de análise realizada, as classes de solo foram selecionadas a receber pesos diferenciados na análise multicritério.

As **cartas digitais de tipologias de solos e vegetação** foram convertidas ao modelo de dados matricial, atribuindo-se um identificador numérico para cada classe de atributo. A especificação das tipologias de solos e vegetação consta nos dados da Tabela 1.

3.5. **Análise multicritérios: composição de cenários**

A análise multicritérios para identificação das zonas prioritárias de conservação considerou inicialmente uma combinação de diferentes cenários para composição do mapa final, onde as áreas identificadas estão associadas com as possibilidades consideradas na modelagem. Para isso, elaborou-se cenários com vistas a:

- Atividade Antrópica (AA);
- Recursos Hídricos (RH);
- Conservação Natural dos Solos (CS).

O resultado da combinação dos cenários foi então empregado para a determinação efetiva das zonas que atenderam a todos os critérios e cenários inclusos na modelagem.

Para cada cenário foram considerados fatores distintos como condicionantes à identificação de áreas de conservação. Atividade Antrópica foi um cenário definido com fundamento em cinco fatores, a saber: distâncias das sedes municipais; distâncias do sistema viário; declividade do terreno; tipos de solos; e tipos de vegetação.

No processo de modelagem do cenário de atividade antrópica esses fatores foram determinados considerando a viabilidade econômica para exploração da terra. Isto é, maiores valores de adequabilidade foram atribuídos: aos melhores solos agricultáveis, à vegetação desmatada, às menores declividades do terreno e às menores distâncias das sedes municipais e sistema viário.

O cenário de conservação do solo com vistas aos Recursos Hídricos considerou como fatores os seguintes temas: valores médios de precipitação total anual (período de 1997 a 2006) interpolados; composição *NDVI* (período de 2000 a 2005); modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado; tipos de solos; classes de vegetação; e modelo digital de fluxo acumulado. Valores de maior importância nesse cenário foram atribuídos aos maiores índices pluviométricos no fator precipitação, às maiores altitudes do tema altitude, e maiores áreas de fluxo acumulado. Neste cenário, devido à mudança de contexto, os valores de adequabilidade dos temas solos e vegetação foram invertidos, ou seja, os melhores solos sob a perspectiva de exploração agrícola foram classificados como menor adequabilidade assim com os demais tipos. Relativo às classes de vegetação, atribuiu-se maiores adequabilidades às classes pertinentes aos sistemas mais sensíveis e de maior importância à manutenção dos ecossistemas locais. Uma ressalva, contudo, deve ser feita em relação ao tema *NDVI*, que análogo ao raciocínio adotado para o tema vegetação, teve maior adequabilidade associada aos seus menores valores. Tal medida foi devido à influência da precipitação na conservação do solo, em regiões onde a cobertura da superfície não se encontra preservada. Como a imagem *NDVI* representa a situação de um período (5 anos) e a análise é direcionada à conservação dos solos com vistas aos recursos hídricos, optou-se por atribuir maior importância às áreas desprovidas de vegetação pois são mais sensíveis às maiores intensidades de precipitação.

Para a modelagem do cenário de Conservação Natural do Solo foram empregados temas mais relacionados às características fisiográficas do terreno, tais como: classificação morfológica da superfície; modelo digital de faces norte-sul do terreno; modelo digital de declividades do terreno; tipos de solos; categorias de vegetação; imagem *NDVI*; e precipitação

total anual. Sob a perspectiva da análise considerou-se que as condições fisiográficas do terreno que contribuem para uma maior velocidade do escoamento superficial deviam receber maior adequabilidade, como classificação morfológica tipo superfície côncava, declividades acentuadas. Assim, como os maiores índices pluviométricos, as classes de cobertura vegetal mais sensíveis e os tipos de solo mais vulneráveis. Ao contrário da perspectiva dos Recursos Naturais, no contexto da Conservação Natural do Solo, maior importância foi atribuída aos maiores valores *NDVI*. As faces do terreno voltadas para o sul foram priorizadas em relação às voltadas para o norte.

3.5.1. Padronização dos temas

No ambiente do SIG Idrisi foi feito uso de funções de transformação *fuzzy* para padronização de dados com distribuição contínua e reclassificação de valores para dados categóricos, numa escala de adequabilidade crescente variável de 0 a 255, conforme apresentado na Tabela 1.

A Tabela 1 ilustra os valores dos parâmetros de transformação de cada tema em fator. Cabe mencionar que o fator *NDVI* monotonicamente crescente foi utilizado para o cenário de Conservação Natural do Solo e o mesmo fator monotonicamente decrescente foi empregado no cenário de Recursos Hídricos.

Tabela 1: Valores empregados na padronização dos temas.

Composição de Cenários			
Fatores Contínuos	Valores das funções <i>fuzzy</i> por Cenários		
	AA	RH/CS	
		b	
Declividades (%)	0	3	0
Faces Norte-Sul			1
Fluxo Acumulado (células)		7	
MDEHC (m)		17	.34E9
<i>NDVI</i>		00	50
Precipitação (mm)		55	2
Distancias Rodovias (m)		00	960
Distancias Sedes (m)	0000		0000
	0000		0000

Fatores Categóricos	Cenários	
	AA	RH/CS
Vegetação	-	-
Ecótono	150	255
Floresta Est. Semidecidual	80	230
Floresta Est. Decidual	80	230
Savana (Cerrado)	230	160
Savana Estépica (Chaco)	220	160
Formações Pioneiras	100	200
Encrave	110	180
Áreas Desmatadas	255	30
Solo	-	-
Areias Quartzosas	30	240
Brunizém	210	60
Cambissolo	150	120
Glei Húmico	165	105
Latossolo	180	90
Planossolo	75	195
Plintossolo	60	210
Podzol Hidromórfico	135	135
Podzólico	195	75
Regossolo	120	150
Rendzina	105	165
Solonetz Solodizado	90	180
Solos Aluviais	225	45
Solo Concrecion. Distróficos	15	255
Solos Litólicos	45	225
Terra Roxa Estruturada	255	15
Vertissolo	240	30
Forma do terreno	-	-
Escarpa		200
Ondulado		100
Plano		10
Canal natural		230
Superfície convexa		150
Superfície suave ondulado		80
Superfície com declive		5
Superfície côncava		255
Superfície de inflexão		130

Legenda:  funções monotonicamente crescentes;  monotonicamente decrescentes. As funções *fuzzy* utilizadas foram no formato sigmoidal.

3.5.2. Especificação dos cenários

Com todos os elementos necessários à análise disponíveis, procedeu-se ao cálculo do risco da análise e da compensação dos fatores para duas posturas distintas referentes a cada um dos três cenários. Uma postura mais ousada e outra conservadora. Desse modo, seis

configurações foram estabelecidas pela metodologia de análise multicritérios do tipo média ponderada ordenada (OWA). Com o emprego das Equações (3) e (4) estimou-se então o Risco e a Compensação, respectivamente, para cada cenário (Atividade Antrópica, Recursos Hídricos e Conservação Natural dos Solos). Os valores são exibidos na Tabela 2.

Uma análise que busque consistência deve considerar um menor valor do risco associado e uma maior compensação entre os fatores. Pelos valores apresentados na Tabela 2 pode-se verificar que independentemente do risco, buscou-se uma boa compensação. Isto foi devido à interpretação associada a baixos valores de compensação, que implica na provável desconsideração de fatores com pesos muito pequenos. Apesar da possibilidade de se trabalhar com uma análise mais ousada, optou-se por considerar efetivamente para geração dos resultados o perfil conservador, pois as áreas identificadas nesse contexto são as mais críticas sob o ponto de vista da conservação.

Tabela 2: Risco e Compensação referentes aos cenários sob as posturas conservadora e ousada

Cenários	Risco		Compensação	
	Conservador	Ousado	Conservador	Ousado
Recursos Hídricos	0,38	0,62	0,83	0,83
Conservação do Solo	0,34	0,65	0,80	0,80
Ação Antrópica	0,37	0,63	0,82	0,82

4. RESULTADOS

4.2. Índice de Fragmentação

Os valores do Índice de Fragmentação encontrados nas análises indicam situação favorável na região investigada. Em geral, os cursos d'água da Bacia do Alto Paraguai apresentaram IF = 4 em sua grande maioria. Este valor de IF significa dizer que, das barragens instaladas em um determinado curso d'água, o comprimento da superfície inundada do canal natural representa menos de 24% de sua extensão total. Apenas o Rio Manso apresentou classificação de IF = 3, o que representa possibilidade de que seu canal natural esteja inundando em até 49% do seu comprimento total. Este fato ocorreu notadamente na represa de Manso, que apresenta uma área inundada de aproximadamente 427 Km². Na ilustração da Figura 5 são apresentados os IF determinados para as condições da BAP.

Verificou-se que a inclusão das áreas inundadas das PCHs não representou diferença perceptível nos resultados de IF. A metodologia de determinação automática de áreas inundadas a partir do MDE apresentou-se capaz de estimar áreas inundadas com boa precisão. Contudo, necessita de ajustes, pois o processo é iterativo e exaustivo, uma vez que faz necessária a supervisão do operador para conferir os valores calculados e repetir o procedimento com o reposicionamento/redimensionamento da soleira sem, com isso garantir sucesso na nova operação.

Das PCHs em operação, apenas seis delas apresentaram área inundada maior que zero na sua tabela de atributos. Isto provavelmente se deve ao fato de que a quantidade de energia gerada pelas PCHs é muito pequena, logo dispensam a instalação de barragens, ou seja, a grande maioria delas opera a fio d'água. Ao considerar as seis PCHs que possuíam áreas inundadas, verificou-se que apenas na metade, ou seja, em três delas foi possível de se determinar automaticamente as áreas de espelho d'água de modo coincidente com o valor oficial (disponível na tabela de atributos do tema disponibilizado pela ANEEL). Os motivos mais prováveis para a não determinação da área inundada das outras PCHs podem ser: o posicionamento incorreto da PCH e, conseqüentemente da soleira; o mau condicionamento do MDEHC causando discrepância em relação à realidade natural.

Ressalta-se que a estimativa da área inundada das PCHs trata-se apenas de uma aproximação para se ter idéia de ordem de grandeza de valores, aplicável apenas para o caso em que não se tem o valor observado. Sob nenhuma hipótese substitui qualquer metodologia de levantamento em campo. As variações no valor determinado são consideráveis em alguns casos e, portanto, a metodologia deve ser empregada com cautela. Nas situações em que foram considerados como sucesso, os valores das áreas determinadas automaticamente, não implica dizer que os limites do polígono encontrado coincida com o desenho da condição de alagamento natural observada em campo. Na Tabela 3 pode-se observar os valores de área inundada estimados e oficiais.

Tabela 3: Valores de área de inundação das PCHs que foram consideradas na análise.

PCH	Valor estimado (Km ²)	Valor oficial (Km ²)	Diferença (%)
Ribeirão Caeté	0,44	0,47	-6
Jauru	0,24	0,27	-11
Porto	4,78	5,34	-10

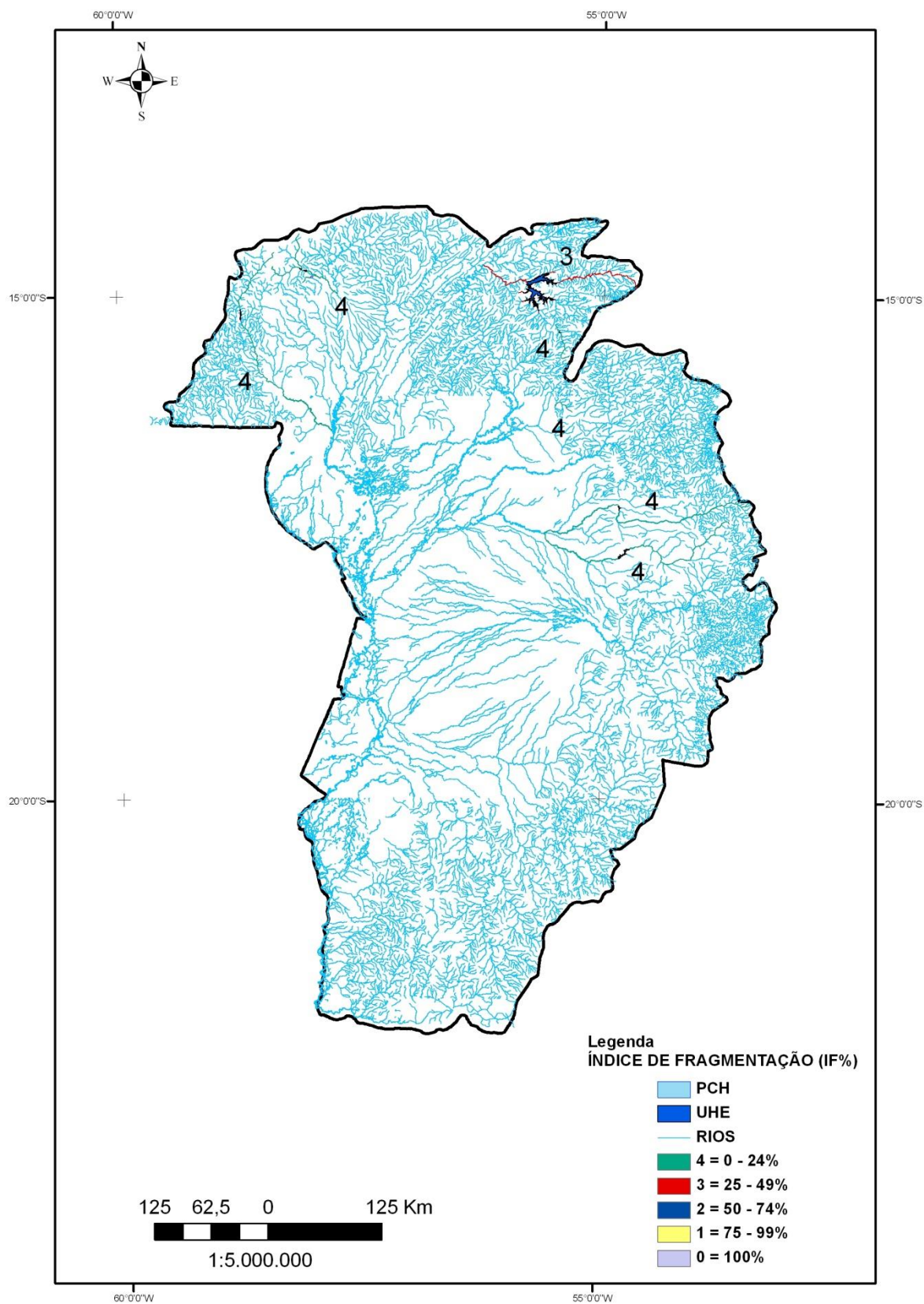


Figura 5: Mapa de Índice de Fragmentação dos rios das cabeceiras da BAP.

4.3. Zonas de Conservação

4.3.1. Subprodutos

Não utilizados diretamente na modelagem multicritério, alguns modelos foram gerados em etapas intermediárias ou ainda para enriquecer a discussão, permitindo maior conhecimento sobre a área. Os subprodutos modelo digital do azimuth do ângulo de maior inclinação, modelo de direção do escoamento e hidrografia numérica ordenada segundo Strahler (1957) estão apresentados nas ilustrações da Figura 6, Figura 7 e Figura 8, respectivamente.

Apesar de semelhantes, são evidentes as diferenças entre os modelos de azimuth da maior inclinação (Figura 6) e direção do escoamento (Figura 7). Apesar de ambos derivarem do MDEHC, o primeiro considera a direção da maior declividade que, não necessariamente deve coincidir com a direção do escoamento.

A ilustração da Figura 8 permite visualizar a hierarquia dos cursos d'água da bacia. Pode-se verificar nesse modelo que as regiões planas não apresentaram uma boa configuração se comparadas à condição natural, como o surgimento de mudanças bruscas de direção (90°), feições extremamente retilíneas e por grandes extensões, semelhantes a canais de obras hidráulicas, entre outras. Entretanto, nas regiões das cabeceiras dos rios, na parte alta da BAP, pode-se observar um melhor condicionamento do talvegue das bacias. O que permite considerar um bom ajuste em relação à situação natural. A hidrografia numérica é um dos elementos visuais para se avaliar os MDEs.

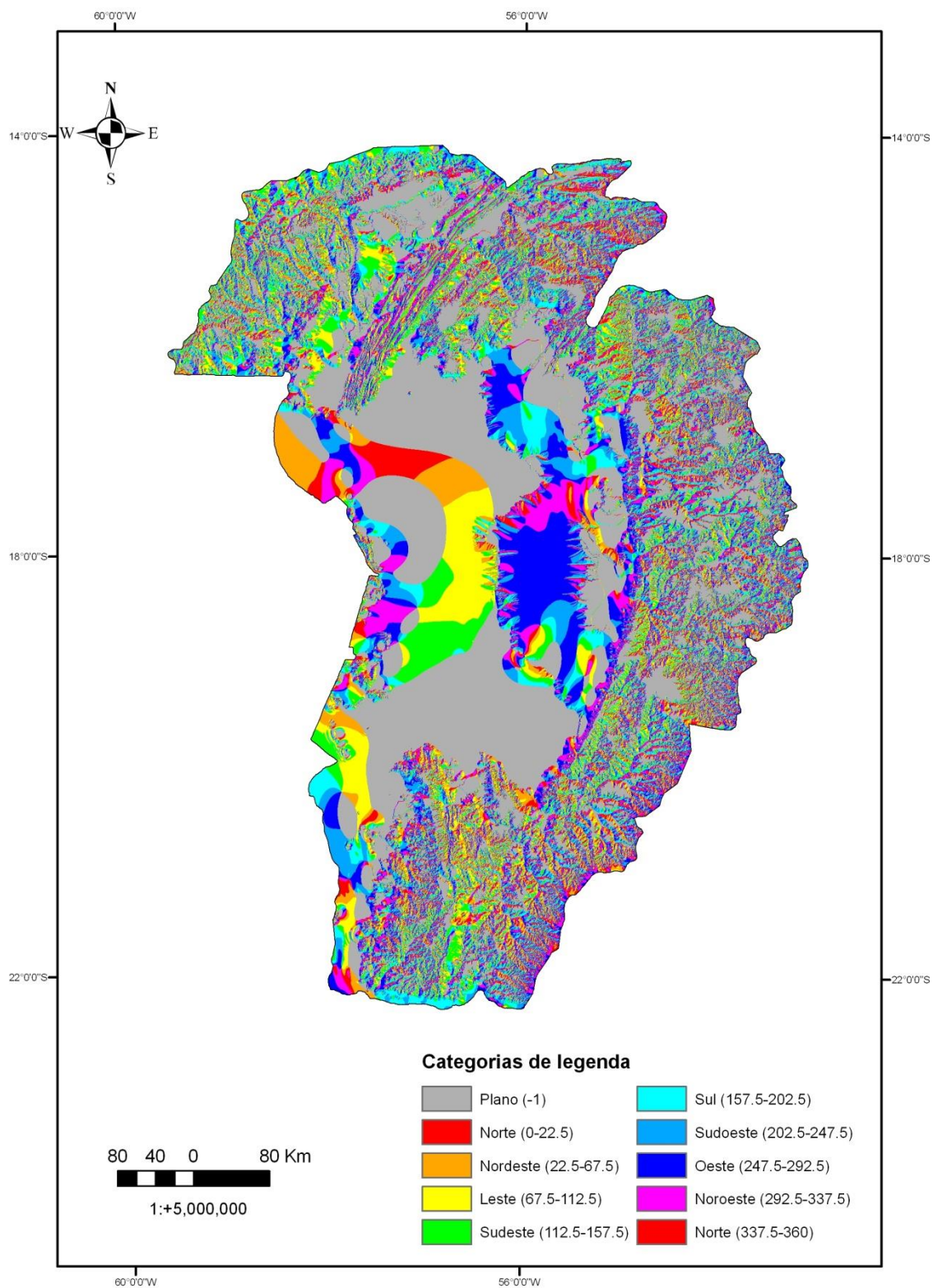


Figura 6: Modelo digital do azimuth da face de maior inclinação.

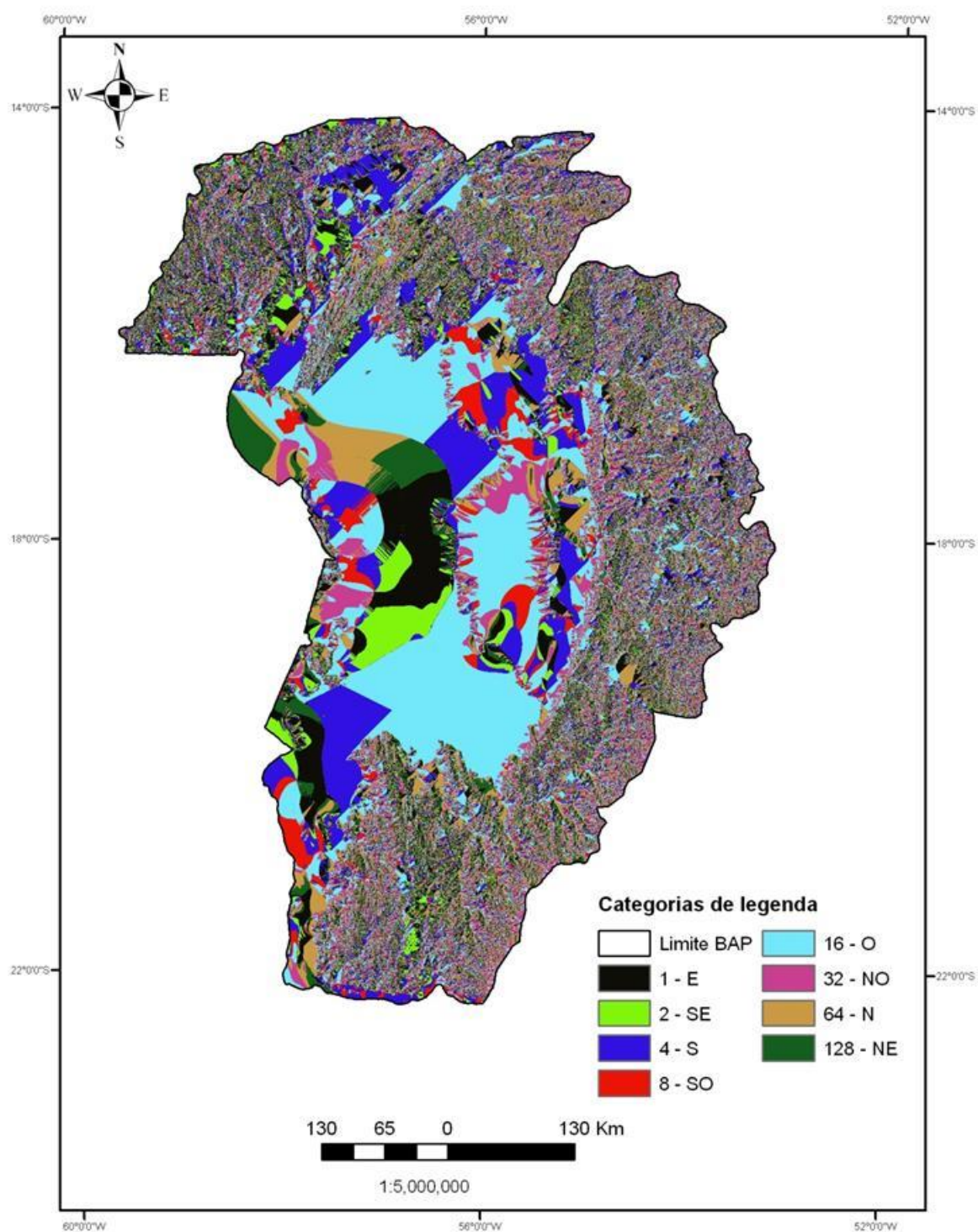


Figura 7: Mapa de direção de fluxo do terreno.

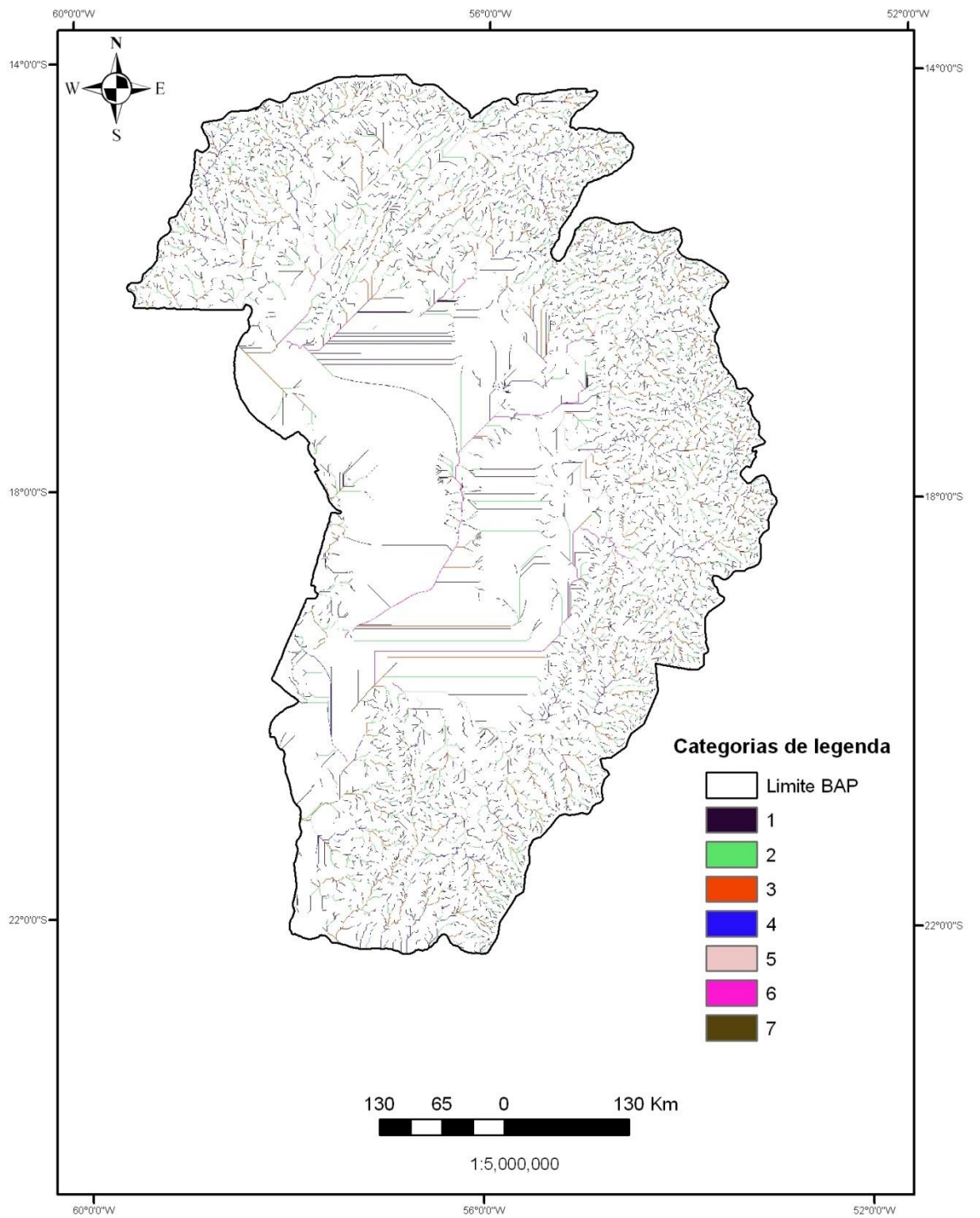


Figura 8: Hidrografia numérica ordenada segundo Strahler (1957).

4.3.2. Critérios selecionados

A Figura 9 foi obtida após análise dos dados tabulares de precipitação para 184 estações distribuídas ao longo da BAP, das quais apenas 70 apresentaram série completa de dados para o período de 10 anos (1997-2006). O MDEHC observado ilustração da Figura 10 foi gerado por interpolação pelo algoritmo *TOPOGRID* (APÊNDICE II, pag. 171), após onerosa edição das curvas de nível com equidistância vertical de 20 metros da bacia. Os modelos digitais ilustrados nas Figuras 11 e 13, referentes respectivamente às declividades e à morfologia do terreno, foram derivados diretamente do MDEHC. A ilustração apresentada na Figura 12 representa o modelo digital de faces norte-sul, determinado a partir da aplicação do operador trigonométrico cosseno no modelo digital de azimuth da face de maior inclinação. O mapa de fluxo acumulado (Figura 14) foi produzido a partir do mapa de direção do fluxo e do MDEHC. Os mapas de tipologias solos e tipologias de vegetação, ilustrados nas Figura 15 e Figura 16 respectivamente, foram produzidos a partir de conversão de seus temas vetoriais ao formato matricial (ou *raster*). Nas ilustrações da Figura 17 e da Figura 18 são apresentadas as cartas de distâncias euclidianas a partir das sedes dos municípios e do sistema viário, respectivamente, até os limites da área em estudo. Na Figura 19 é ilustrado o mapa da composição *NDVI* para o período de 2000 a 2005. A composição *NDVI* foi gerada a partir da operação entre as bandas 1 e 2 do satélite MODIS com aplicação da Equação (5). Pode-se notar ao observar a Figura 19 que há uma concentração de baixos valores *NDVI* distribuídos por toda a região das cabeceiras da BAP.

Todos os critérios ilustrados entre a Figura 9 e a Figura 19 foram selecionados para composição dos cenários de conservação do solo. Em seguida foram padronizados em uma mesma escala de adequabilidade através das funções de transformação *fuzzy* e operações de reclassificação categórica conforme valores exibidos na Tabela 1. Dessa forma, as grandezas variáveis distintas como distâncias, altitudes, *mm* precipitados, *NDVI*, entre outros, foram padronizadas numa mesma escala, com valores limitados 0 e 255 que representam graus de adequabilidade, crescente ou decrescente conforme o objetivo de emprego do tema em relação ao critério usado.

O passo seguinte foi efetivamente processar as análises multicritério para cada cenário modelado.

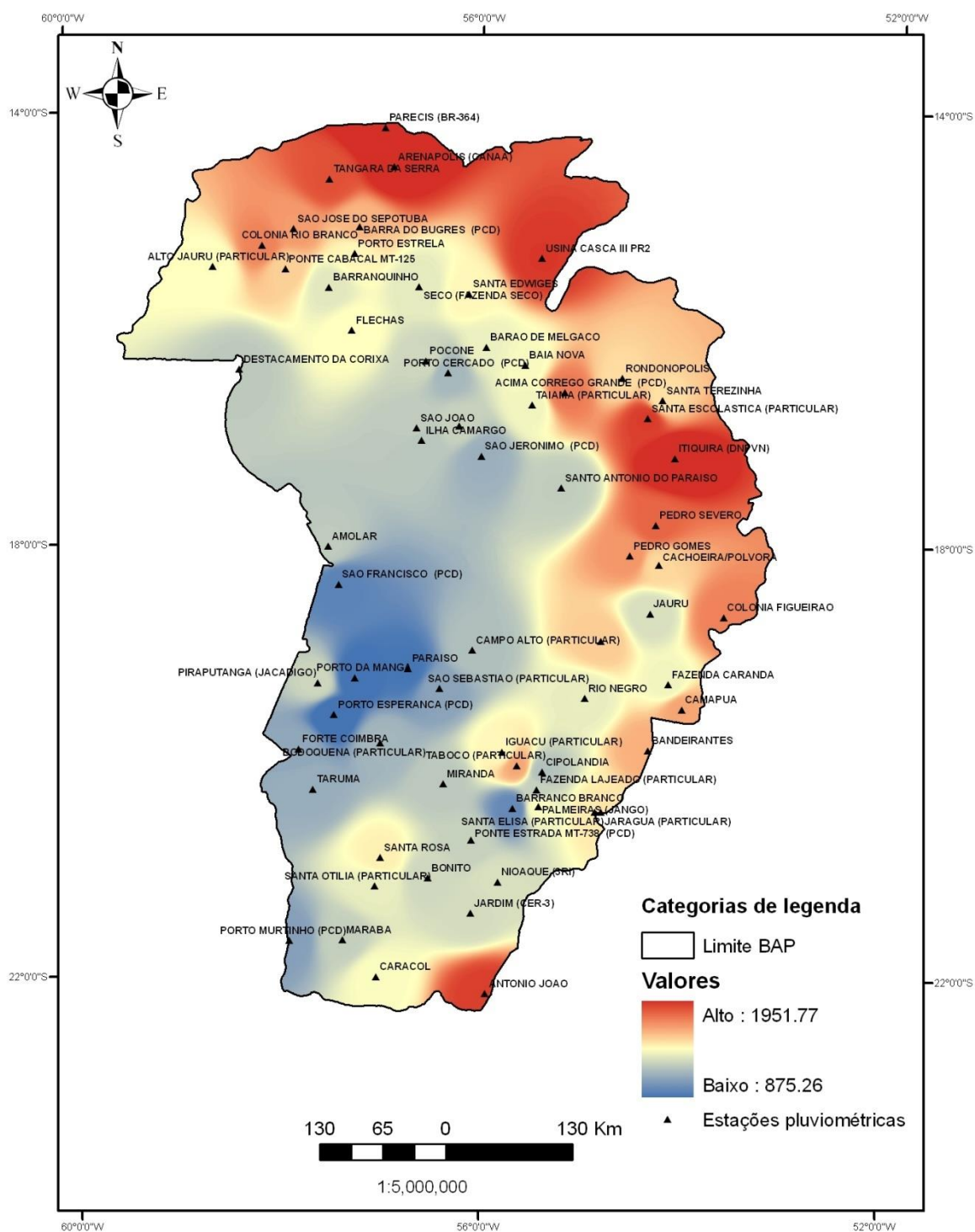


Figura 9: Média da série de precipitações totais anuais interpoladas (1997-2006).

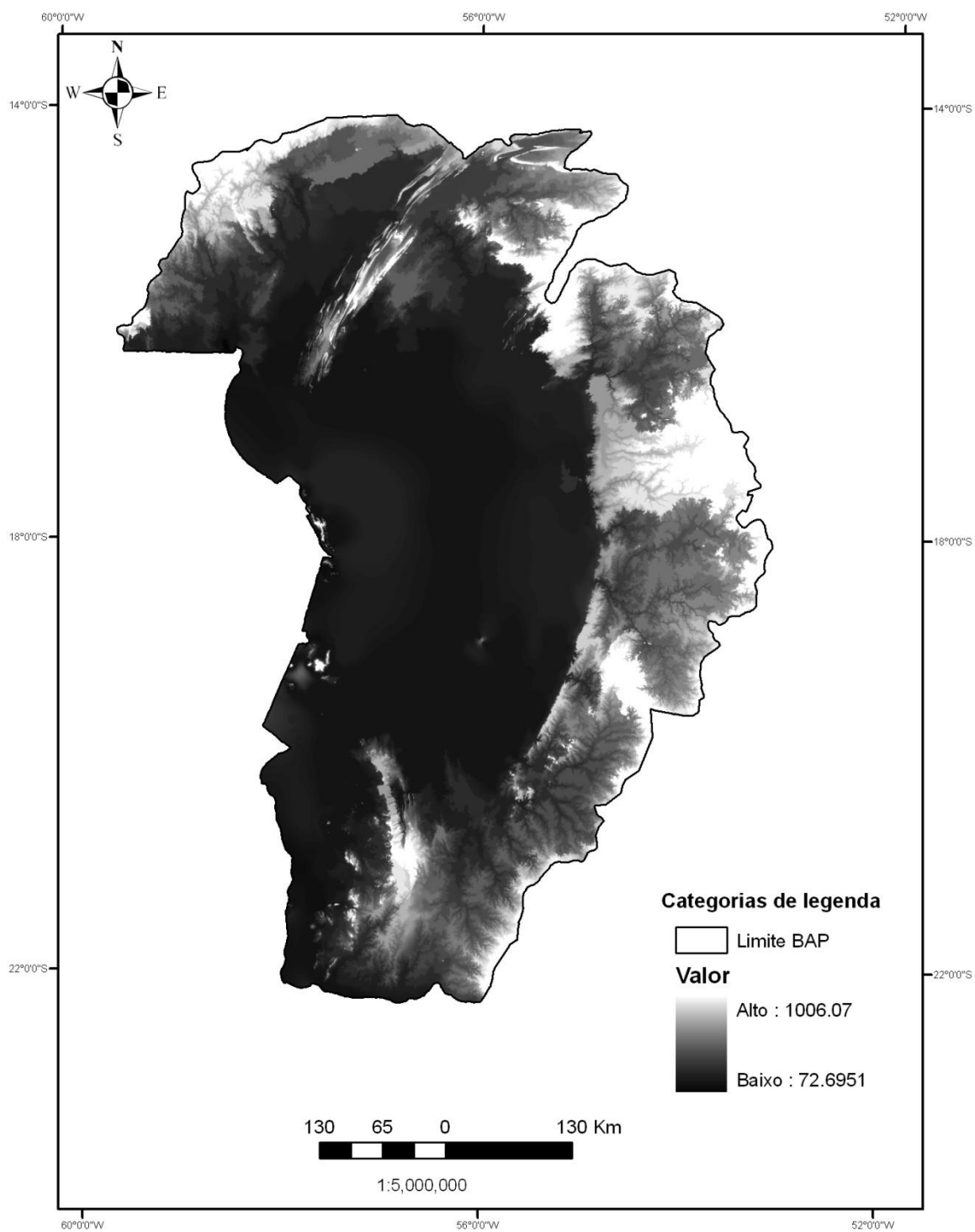


Figura 10: Modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado (MDEHC).

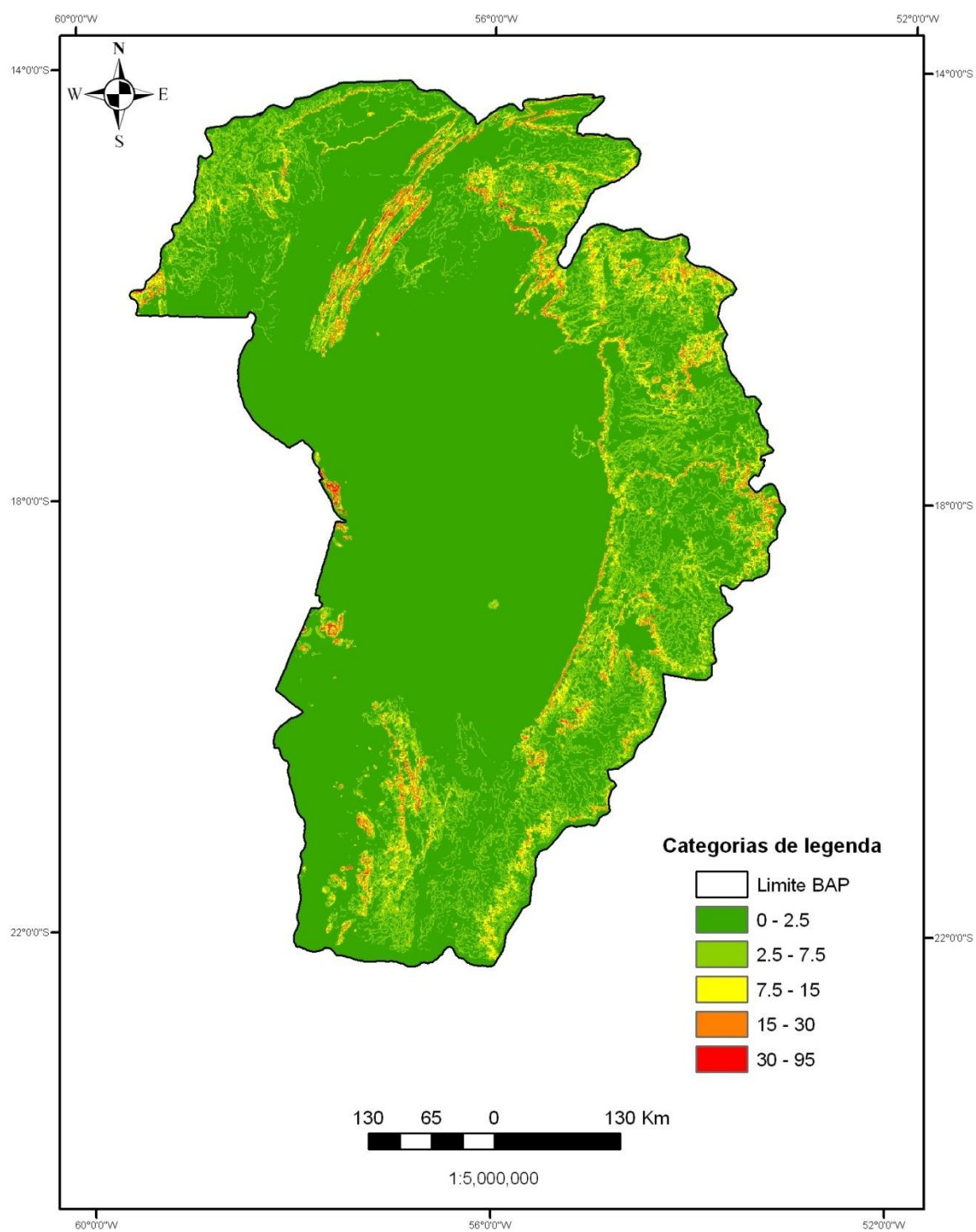


Figura 11: Modelo digital de declividades expresso em porcentagem.

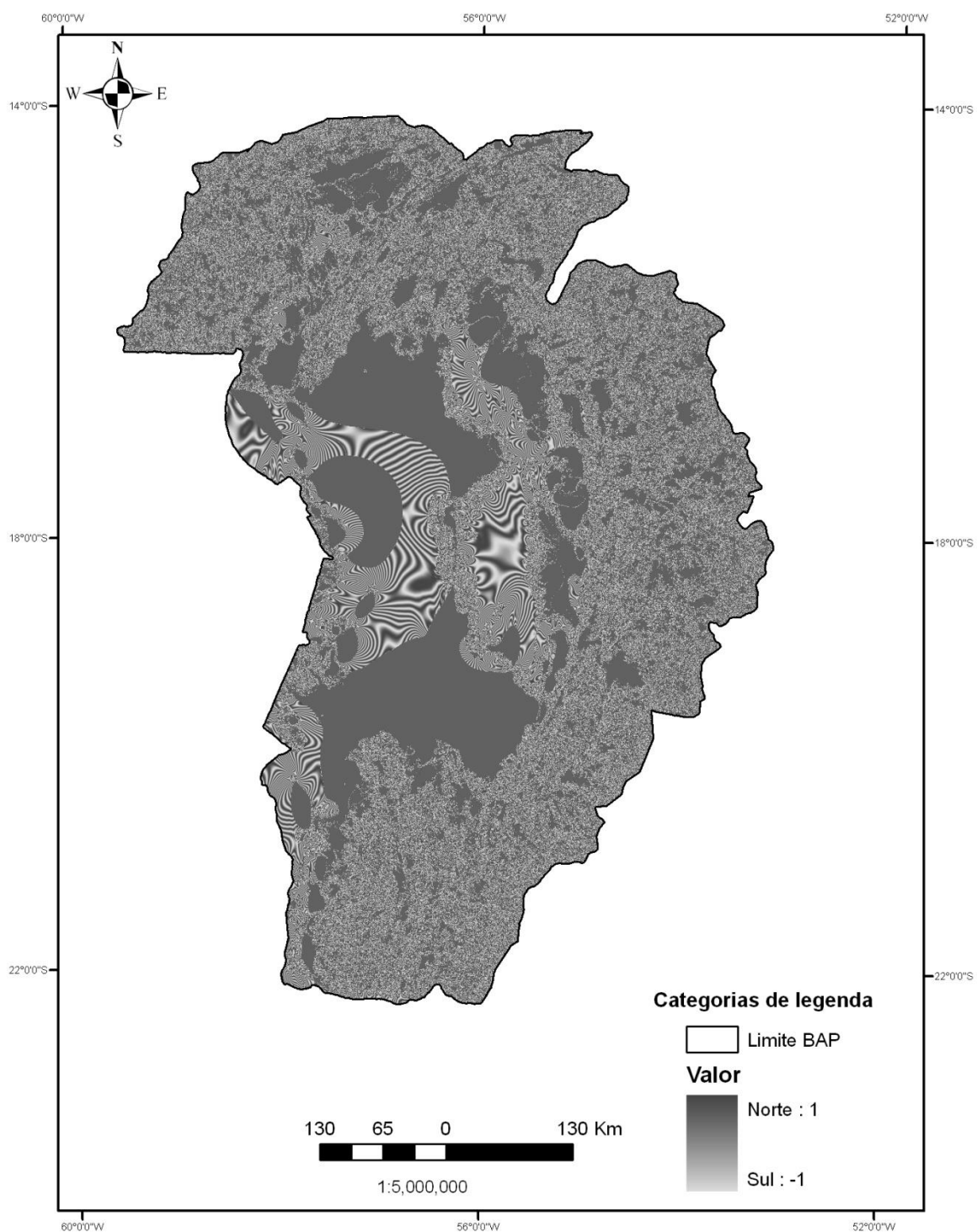


Figura 12: Modelo digital de faces norte-sul.

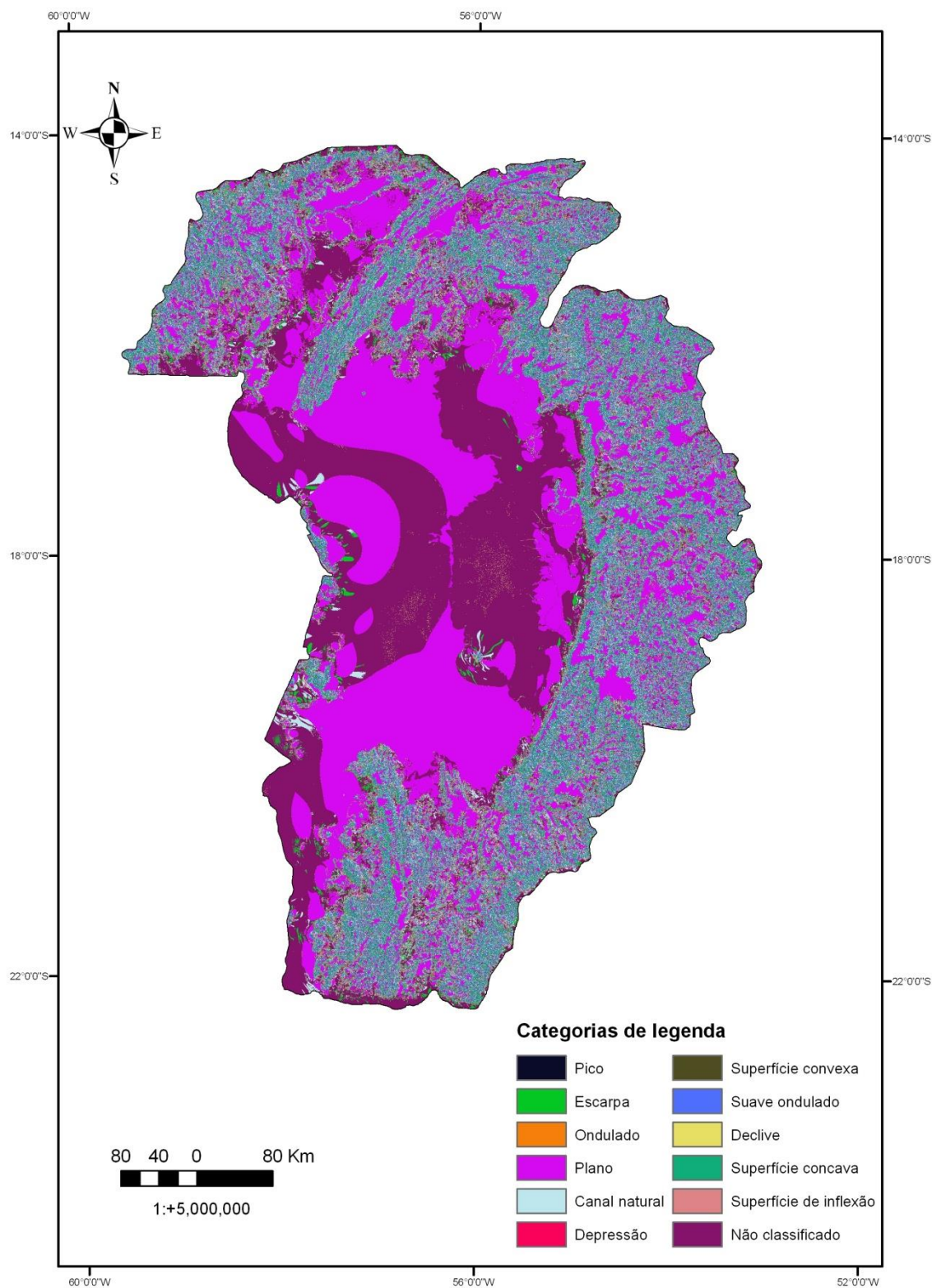


Figura 13: Modelo digital morfológico.

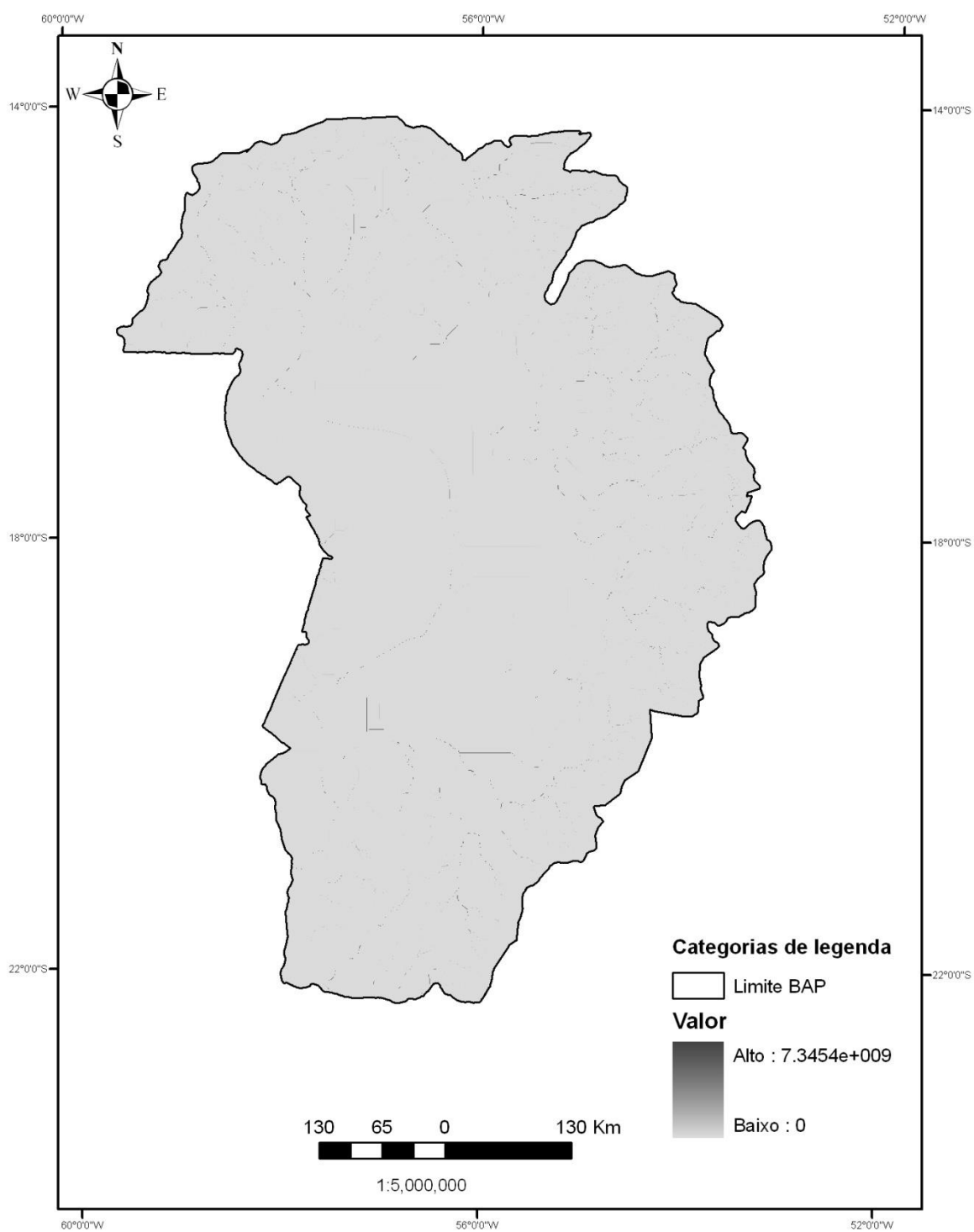


Figura 14: Mapa de fluxo acumulado.

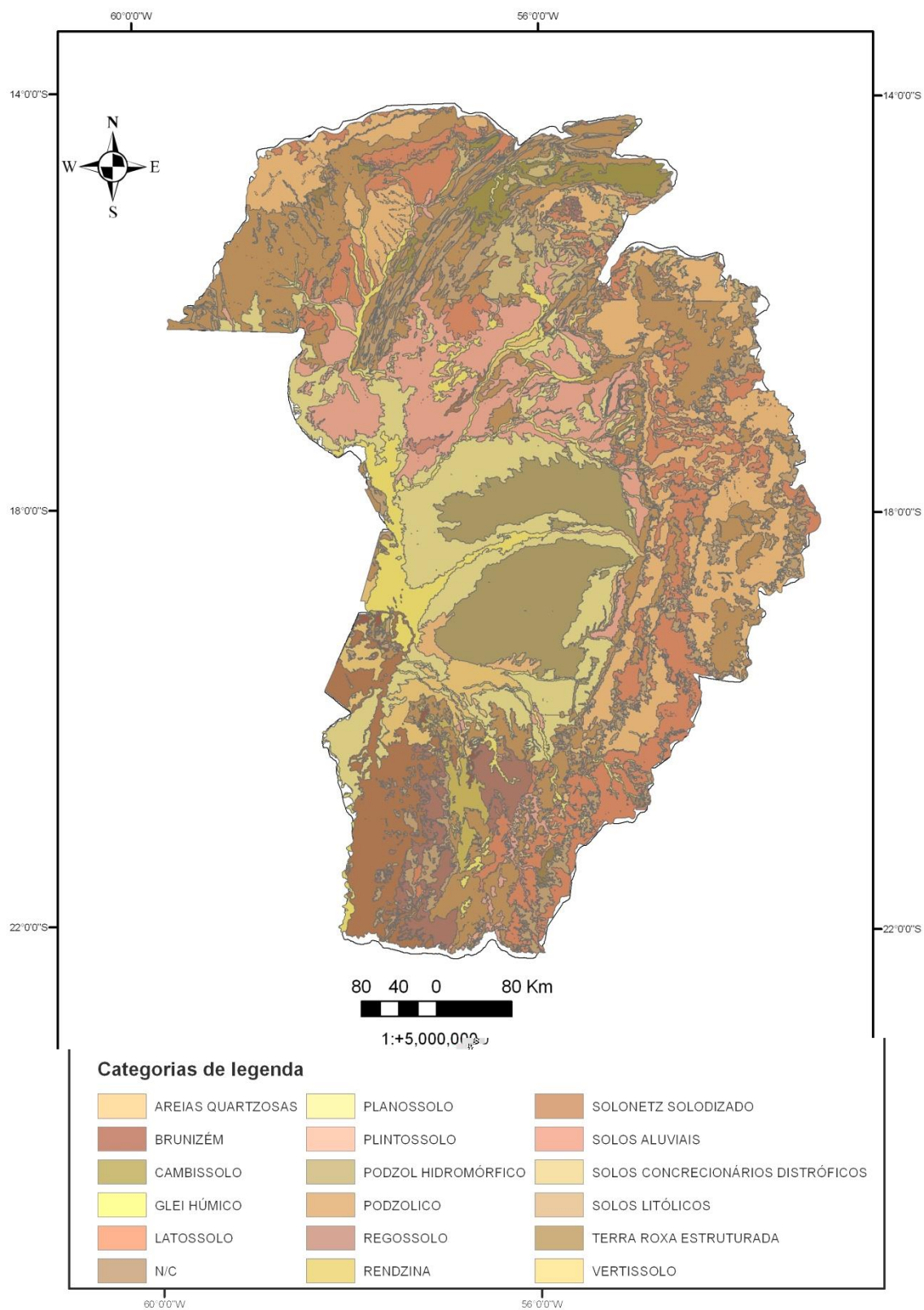


Figura 15: Carta de solos.

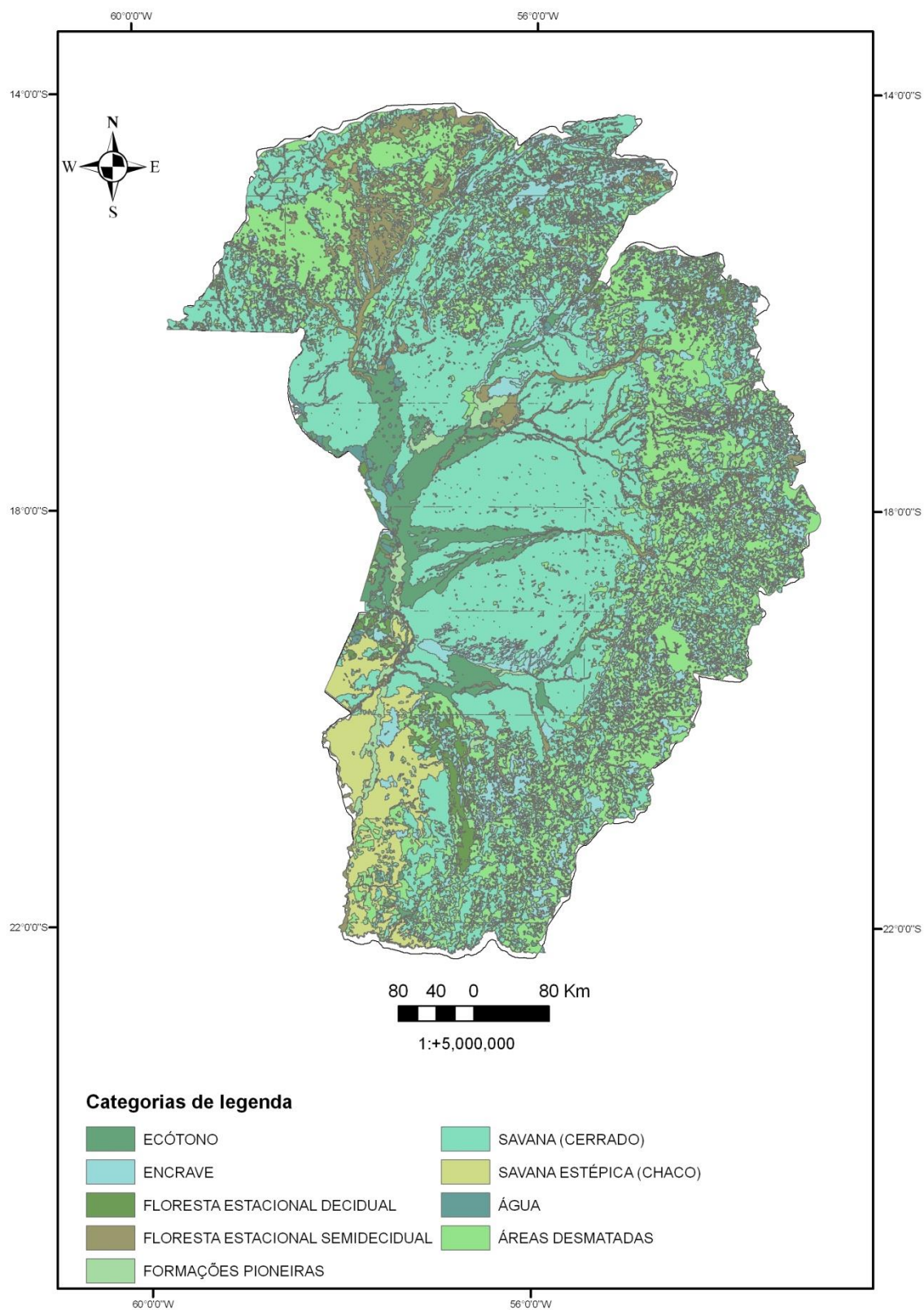


Figura 16: Carta de cobertura vegetal e uso do solo.

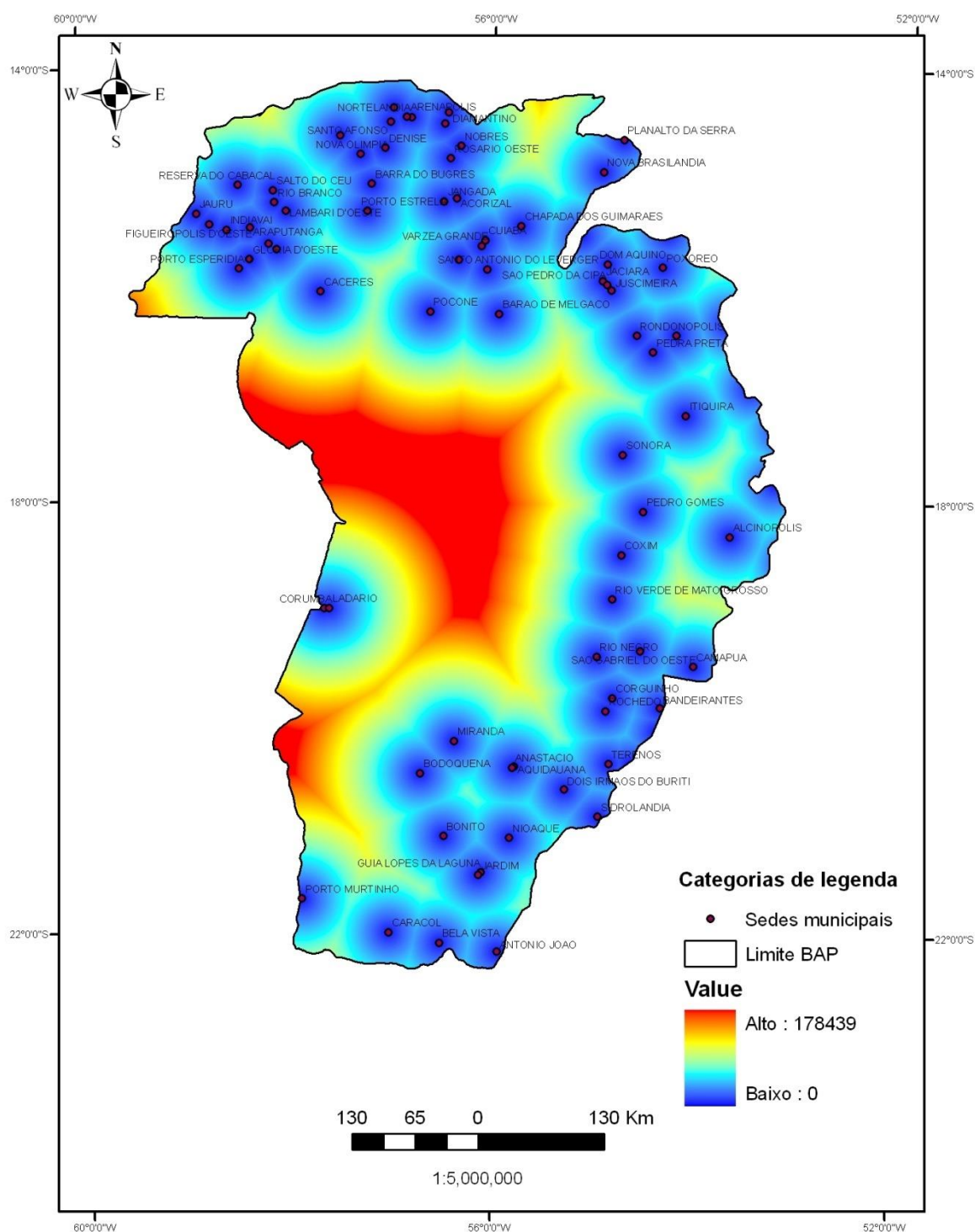


Figura17: Distância euclidiana a partir das sedes municipais.

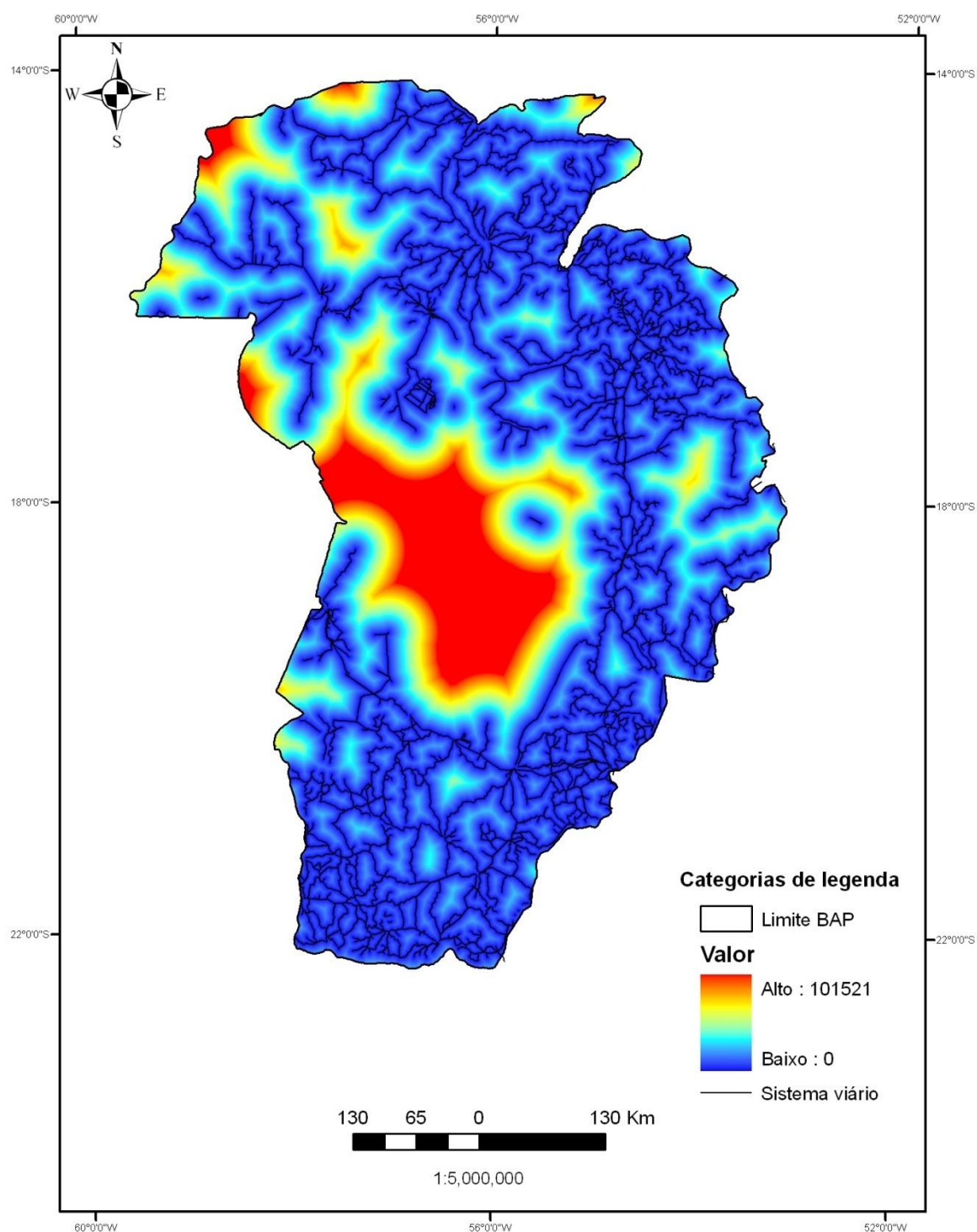


Figura 18: Distância euclidiana a partir do sistema viário.

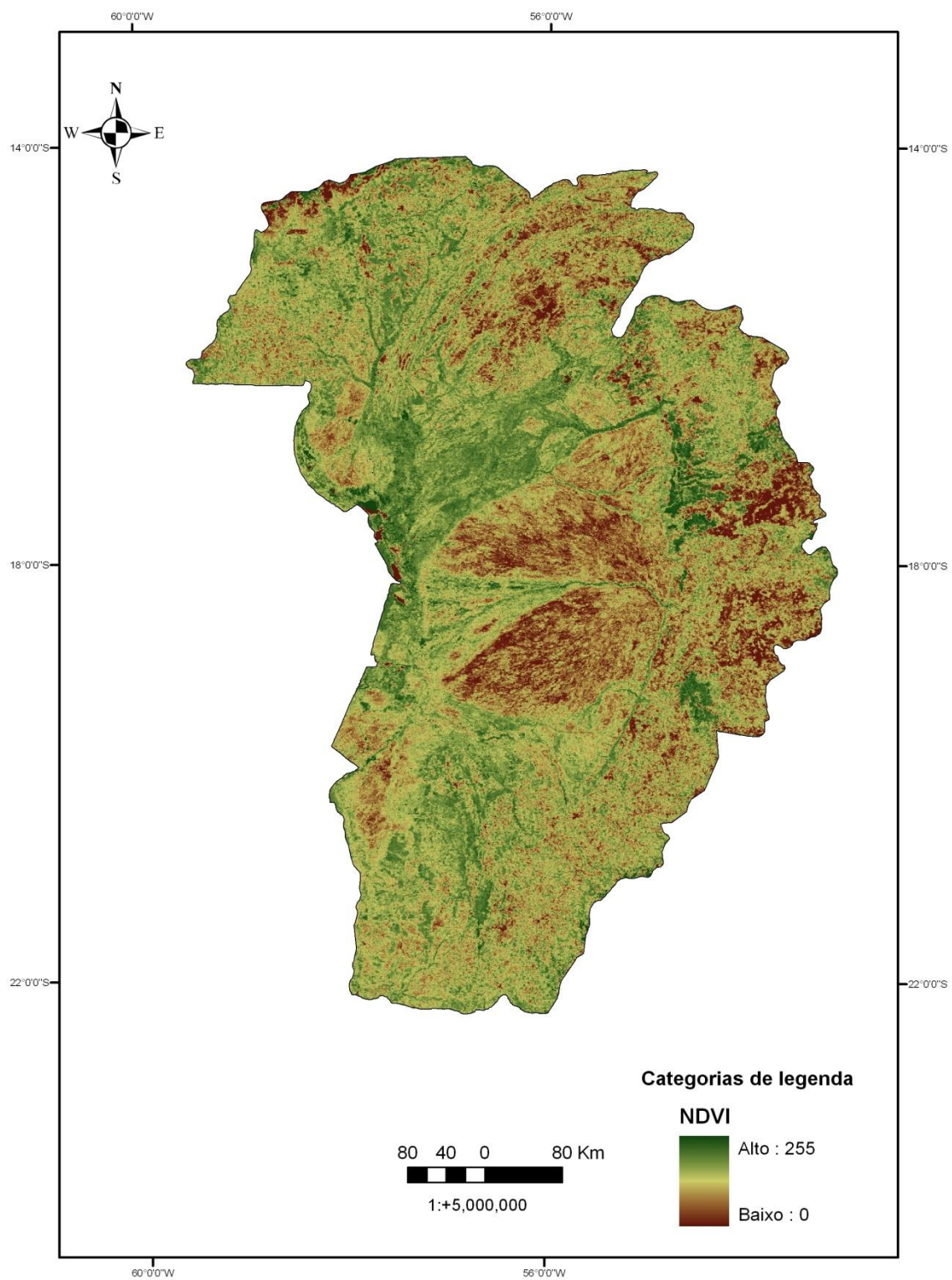


Figura 19: Composição *NDVI* referente ao período 2001 a 2005

4.3.3. Análise multicritério: determinação das zonas prioritárias de conservação

Na Figura 20 é ilustrado o cenário de zonas prioritárias de conservação modelado com vistas à atividade antrópica na bacia. Pode-se verificar que as zonas de maior prioridade (adequabilidade) se encontram em regiões de cabeceiras, notadamente próximas às cidades.

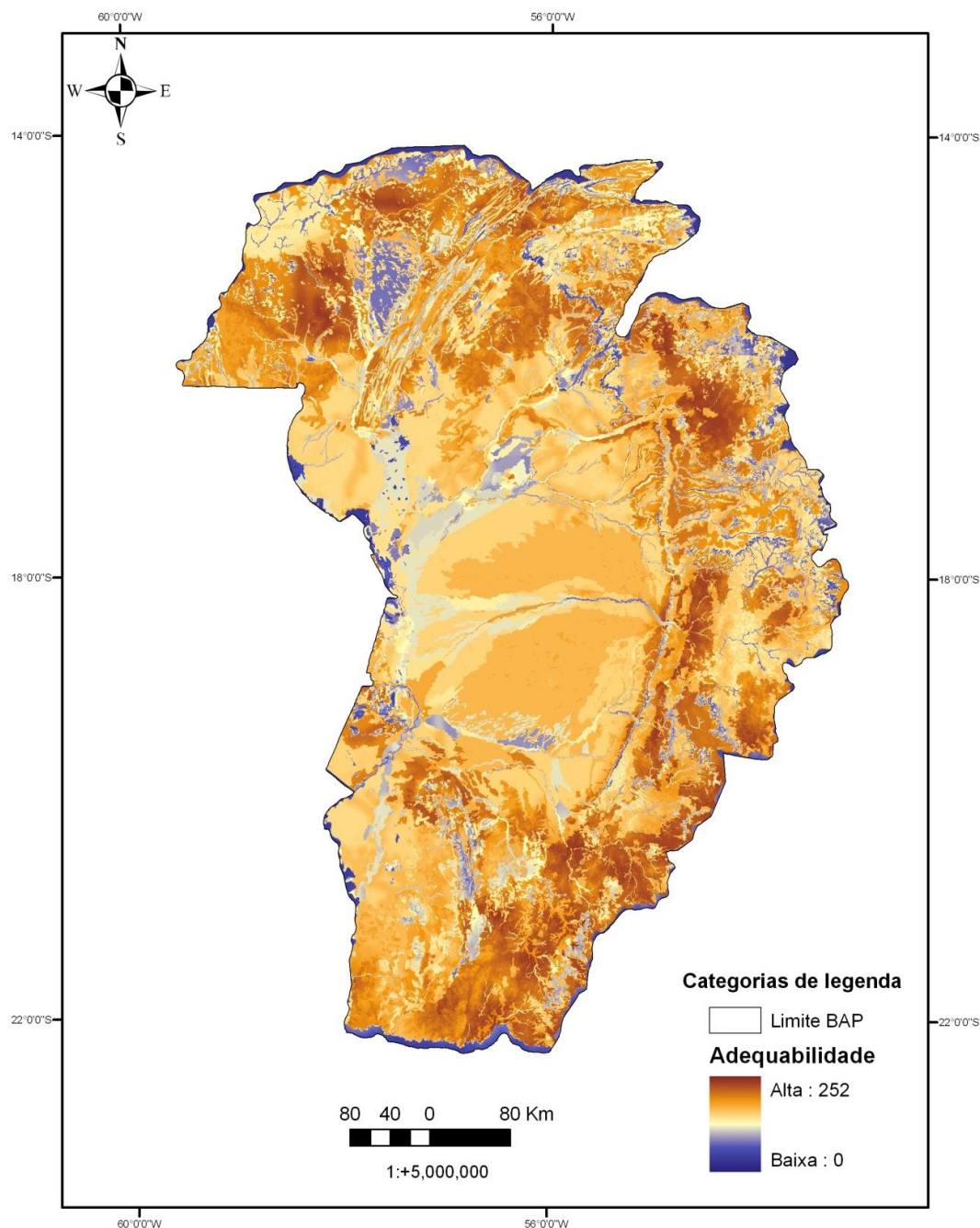


Figura 20: Zonas prioritárias de conservação do solo com vistas às atividades antrópicas.

O cenário exibido na ilustração da Figura 21 permite verificar que as zonas prioritárias de conservação se concentram nas regiões de cabeceira da bacia em que ocorrem os maiores volumes precipitados. Provavelmente tal configuração foi devida ao fato de que o critério fator precipitação governou a análise.

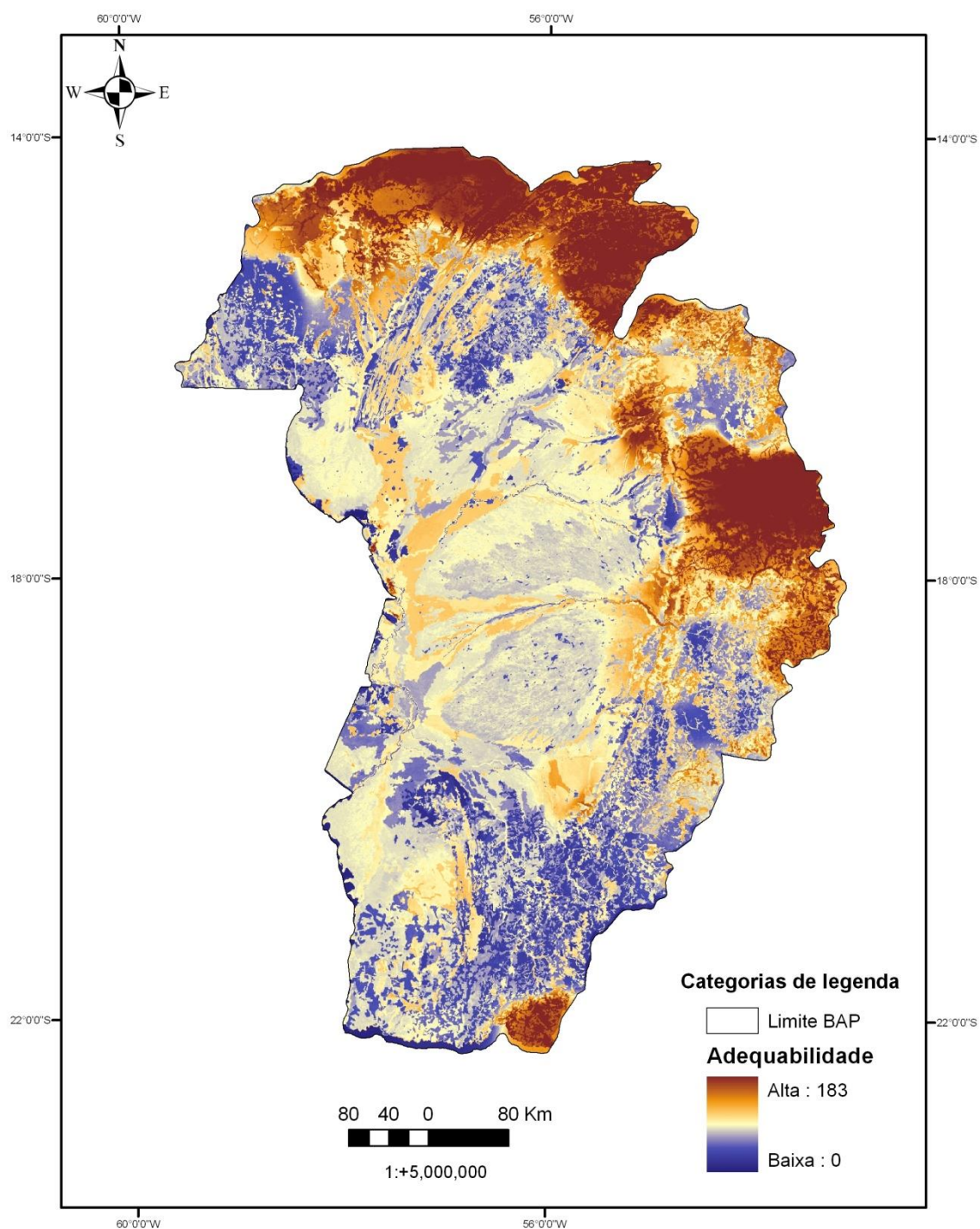


Figura 21: Zonas prioritárias de conservação do solo com vistas aos recursos hídricos.

No cenário de conservação natural do solo ilustrado na Figura 22, os maiores valores que indicam as zonas prioritárias de conservação foram observados em regiões topográficas de terreno desfavoráveis, onde as características fisiográficas determinaram as condições.

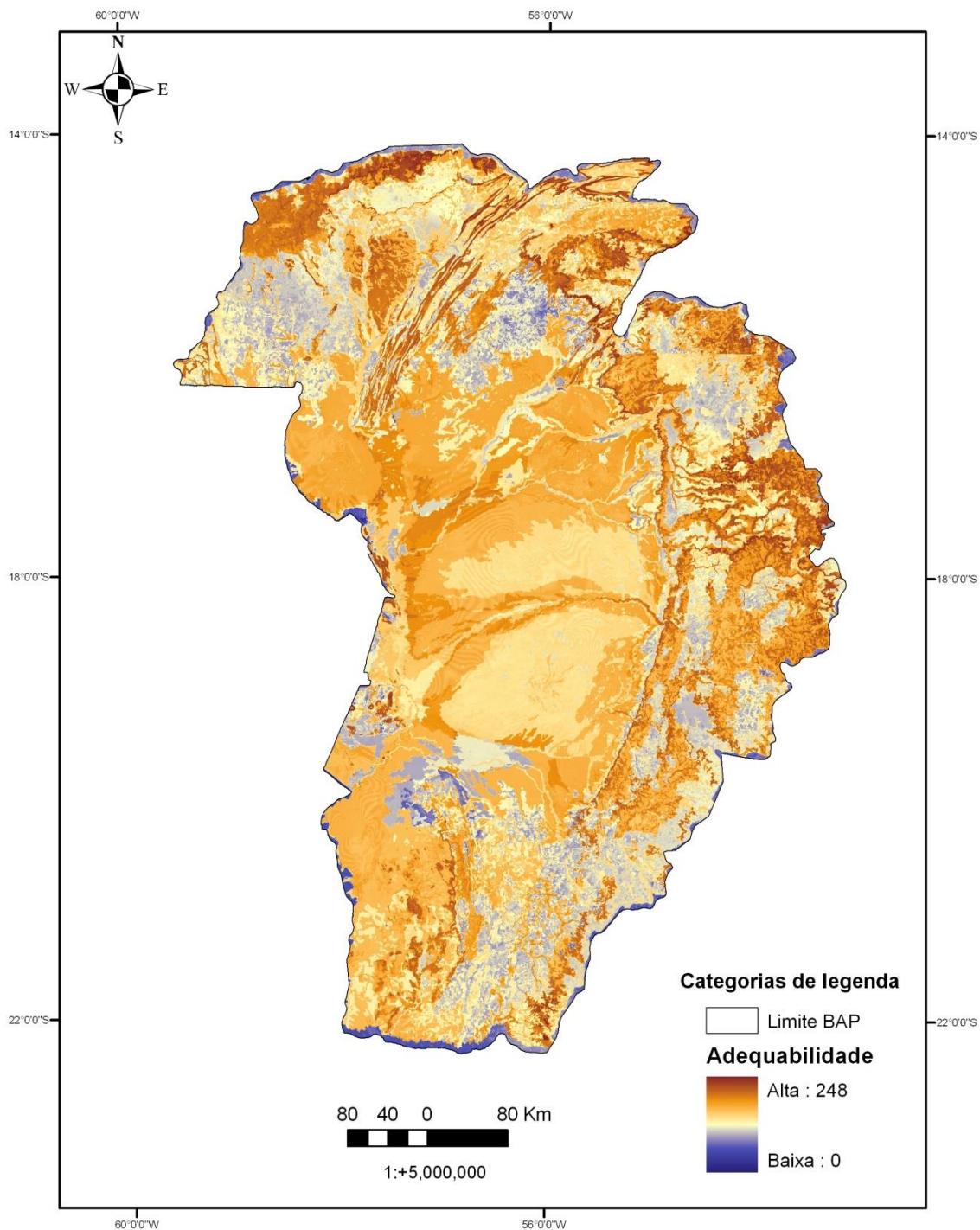


Figura 22: Zonas prioritárias de conservação natural do solo.

A composição apresentada na ilustração da Figura 23 exibe equilíbrio na distribuição dos valores de adequabilidade que identificam as zonas prioritárias de conservação, quando comparada com a distribuição espacial verificada nos demais cenários.

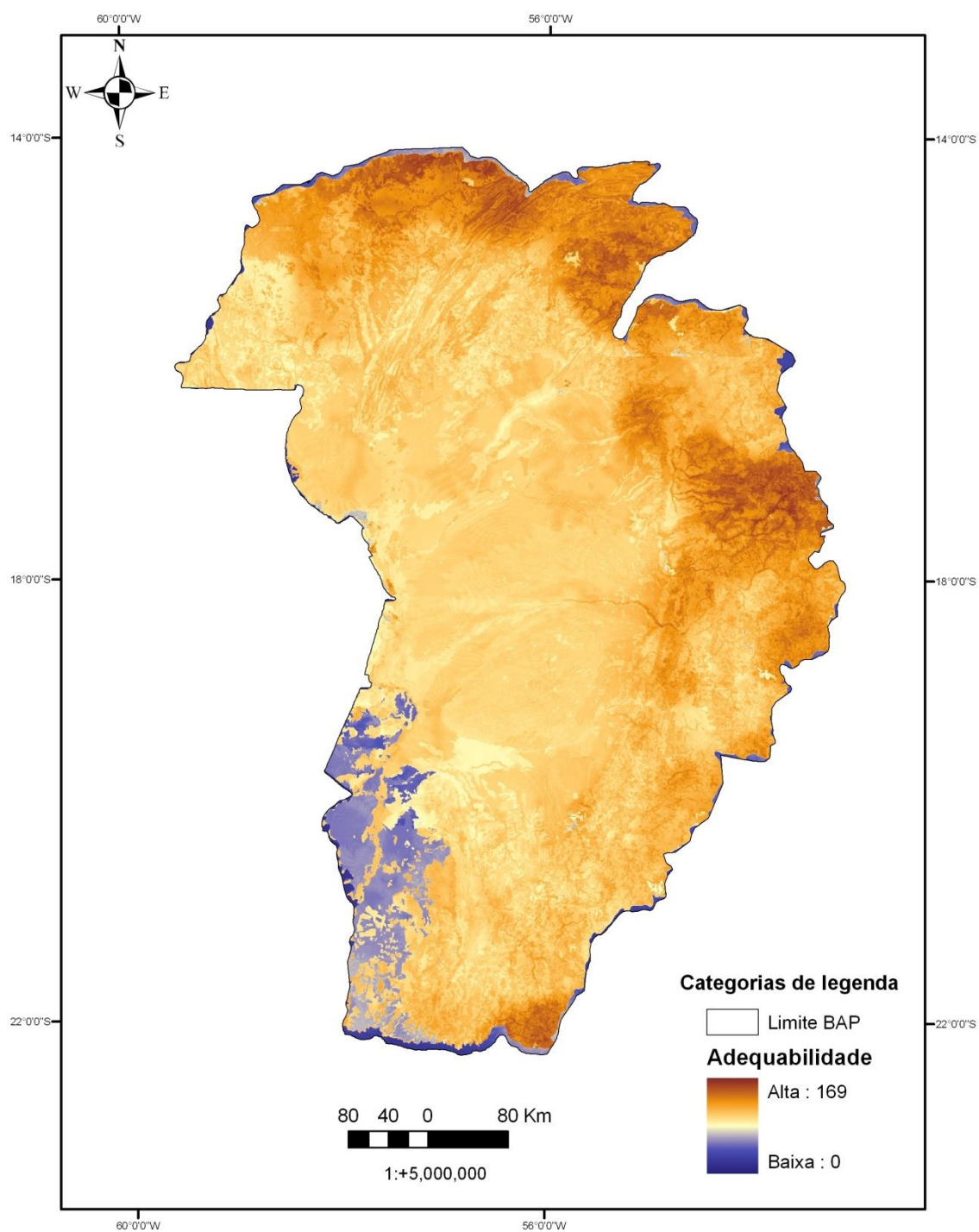


Figura 23: Zonas prioritárias de conservação obtidas pela combinação dos cenários.

A mesma informação contida na composição exibida na Figura 23 foi apresentada na ilustração da Figura 24, na qual se buscou realizar uma reclassificação dos valores para facilitar a exposição. Houve, portanto, uma redução de 169 para 5 classes. O resultado final teve suas zonas de conservação agrupadas nas categorias Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta em termos de prioridade de conservação. Para estabelecer as faixas de cada categoria distribuiu-se os valores de adequabilidade em intervalos de valores iguais, ou seja, o valor máximo da Figura 23 dividido pelo número de categorias ($169/5$). Dessa forma, a categoria Muito Baixa recebeu o valor definido no intervalo entre 1 e 33,8, a categoria Baixa recebeu o valor entre 33,8 e 67,6, e assim por diante.

A composição apresentada na Figura 24 indica que as zonas de cabeceiras onde se encontram as nascentes são as de maior prioridade de conservação, pois foram identificadas empregando-se diferentes concepções e abordagens do uso do solo em uma análise com perfil conservador, ou seja, numa perspectiva otimista, correndo menor risco na tomada de decisão.

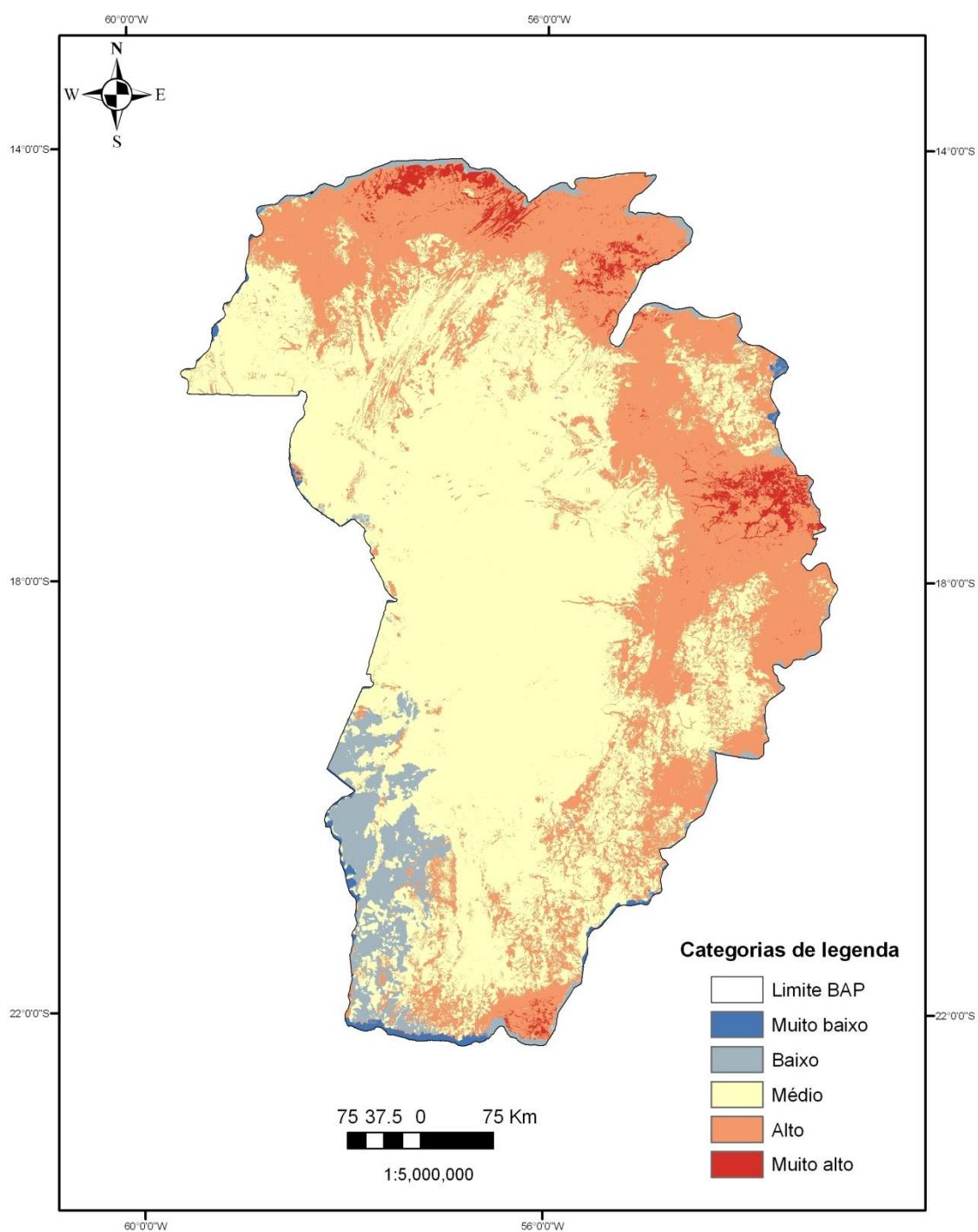


Figura 24: Mapa identificando as zonas prioritárias de conservação do solo na BAP.

5. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados constata-se que o intuito principal do presente estudo de caso foi alcançado, pois foram determinados os mapas identificando o Índice de Fragmentação e a Zonas Prioritárias de Conservação dos solos nas regiões das cabeceiras dos rios na Bacia do Alto Paraguai. Os dois mapas objetivo do estudo não são passíveis de combinação *a priori*, mas são complementares em uma análise da situação de ocupação do solo que se configura na BAP no período estudado.

Em relação ao Índice de Fragmentação foi verificada situação mais crítica no rio Manso, sendo classificado com valor 3, o que implica em dizer que até 49% de sua extensão se encontra inundada. Os demais rios foram classificados com Índice de Fragmentação igual a 4, o que representa que menos de 24% de sua extensão total foi inundada.

As Zonas Prioritárias de Conservação dos Solos categorizadas como Muito Alto refletem as regiões em situação mais crítica de ocupação na BAP, onde medidas mitigadoras devem ser aplicadas a curto prazo, pois foram determinadas considerando um perfil conservador na análise.

Os mapas finais produzidos podem ser considerados ferramentas de gestão para auxiliar o processo de tomada de decisão, pois fornecem subsídios técnicos que refletem a situação de ocupação da área da BAP. Recomenda-se especial atenção às zonas classificadas como de prioridade Alta e Muito Alta, no sentido de planejar o uso do solo de maneira racional e equilibrada, pois essas zonas foram identificadas considerando sua sensibilidade às condições de conservação natural, sob a perspectiva dos recursos hídricos e da atividade humana.

CONCLUSÕES GERAIS

Ao término desta monografia, acredita-se que o objetivo, originalmente proposto de apresentar os princípios da modelagem digital do terreno, bem como algumas aplicações nas áreas de Hidrologia, Cartografia e meio ambiente; foi plenamente alcançado.

Apesar de não haver a pretensão de esgotar o assunto de modelagem digital do terreno, no primeiro capítulo foi apresentado um panorama geral dessa tecnologia associadas ao Geoprocessamento. Foram também introduzidos os princípios da modelagem digital do terreno segundo um modelo que estrutura conceitos e métodos; bem como, discutiu-se seu uso em áreas de aplicação que incluem algumas aplicações do MDT em diversas áreas, como: mapeamentos, sensoriamento remoto, recursos naturais, telecomunicações, turismo, etc.

Como o objetivo de ilustrar aplicações práticas nas áreas de Hidrologia, Cartografia e Meio Ambiente, foi adicionado mais três capítulos a essa monografia:

- Geração do modelo digital de elevação Hidrograficamente Condicionado e determinação de áreas de preservação permanente.
- Avaliação da exatidão planimétrica de imagens IKONOS Ortoretificadas com MDEs de diferentes resoluções.
- Uso de MDE para a determinação de índices de fragmentação e zonas prioritárias de conservação do solo nas regiões da cabeceira dos rios na Bacia do Alto Paraguai usando análise multicritério.

No final da monografia foram acrescentados **APÊNDICES**, que complementam a os capítulos, apresentando procedimentos específicos e necessários, para o uso adequando dessa geotecnologia, tais como:

- Determinação do Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado;
- Elaboração do MDE Hidrograficamente Condicionado usando o *TOPOGRID*.
- Geração de MDT a partir das Cartas do IBGE no formato DGN.

Considerando a escassez de material em nosso idioma, a escolha desse tema torna-se bastante pertinente e apropriado para o leitor que deseje adquirir conhecimentos introdutórios na área de Modelagem Digital do Terreno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERMANN, F. Techniques and Strategies for DEM Generation. In: Digital Photogrammetry An Addendum to the Manual of Photogrammetry. ASPRS - American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Ed. Cliff Greve, Chapter 6, pp. 135 – 149, 1996.
- ALBUQUERQUE, A. S. O.; LACERDA JÚNIOR, H. B.; AZEVEDO, J. R. G.; CAVALCANTI, G. L.; PEREIRA, T. S.; SILVA, F. H. C.. Desenvolvimento e aplicação de um software para cálculo das relações cota x área x volume de reservatórios. VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luiz, MA, 2004.
- ALMEIDA, A. T., COSTA, A. P. C. S. Aplicações com métodos multicritério de apoio à decisão. Recife: Universitária da UFPE, 2003. Disponível em: <<http://www.pg.cefetpr.br/ppgep/revista/revista2007/vol1/artigo/V3N1B11.pdf>>. Acesso em junho. 2009.
- ARONOFF, S. Geographic information systems: a management perspective. WDL Publications: Ottawa. 294 p. 1989.
- ARRUDA JUNIOR, Elias Ribeiro et al. - Aplicação de Geotecnologias no gerenciamento do Uso Atual e Cobertura Vegetal da Sub-bacia Leste da Baía de Guanabara, RJ. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 3471-3478.
- BAENA, L. G. N. Regionalização de vazões para a bacia do rio Paraíba do Sul, a montante de Volta Redonda, a partir de modelo digital de elevação Hidrologicamente Consistente. Viçosa: UFV, 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- BAENA, L. G. N., SILVA, D. D. Regionalização hidrológica - Determinação das características físicas. Caderno Didático, Viçosa, MG: UFV, 2004.
- BARROS, R.S. Avaliação da Altimetria de Modelos Digitais de Elevação Obtidos a Partir de Sensores Orbitais. Rio de Janeiro. 195 p. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, IGEO/UFRJ, 2006.
- BARROS, R.S., Avaliação da Altimetria de Modelos Digitais de Elevação Obtidos a Partir de Sensores Orbitais. Rio de Janeiro. 195 p. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, IGEO/UFRJ, 2006.
- BARROS, R.S; CRUZ, C.B.M. Avaliação da Altimetria do modelo digital de elevação do SRTM. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, 2007.

- BARROSO, W. R., Delimitação das Áreas de Preservação Permanente da bacia hidrográfica do rio Turvo Sujo na Região de Viçosa, MG. Departamento de Engenharia Civil – UFV, Viçosa – MG, 2006.
- BENDA, F.; CORREA, F. P.; ALVES, M. G., Modelo digital de terreno aplicada à elaboração de mapas temáticos. Anais do II Workshop de Computação Científica da UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil. 2006.
- BORSATO H. F., MARTONI M. A. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná. Disponível em: <http://www.periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciHumanSocSci/article/viewPDFInterstitial/1391/907>. Acesso em 09 jul. 2009.
- BRASIL. Lei nº 4.771, de 15 de Setembro de 1965, que institui o novo Código Florestal. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/CCIVIL/LEIS/L4771compilado.htm>, 2006.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 303, de 20 de Março de 2002, dispõe sobre as áreas de preservação permanente. Disponível em <http://www.ibamapr.hpg.ig.com.br/30302RC.htm>, 2002.
- BURINGTON, R. e MAY, D. Handbook of probability and statistics with tables, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970.
- BURROGH, P. A., McDONNELL, R. A. Principles of geographical information system. Oxford, 2004.
- CAMPOS, D.S. Variabilidade espacial da produtividade na cafeicultura de montanha com uso de técnicas de sensoriamento remoto. Viçosa, MG: UFV, 2005. 60p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa.
- CARROLL, M.L., C.M. DiMICELI, R.A. SOHLBERG, and J.R.G. Townshend (2004), 250m MODIS Normalized Difference Vegetation Index, 250ndvi28920033435, Collection 4, University of Maryland, College Park, Maryland, Day 289, 2003.
- CARTOGRAFIA, <http://www.cartografia.eng.br/artigos/ntematica08.asp>. Acesso em 31/18/2009, 2009.
- CHAVES, M. A. Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistente para a Bacia Amazônica. 115 p.Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. Disponível em <ftp://ftp.bbt.ufv.br/teses/ciencia%20florestal/2002/173599f.pdf>, 2002.
- CHAVES, M. A. Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Bacia Amazônica. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa. Orientador: Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro, 2002.
- CINTRA, J. P. Modelos Digitais do Terreno. Geoprocessamento. Sao Paulo: Escola Politécnica da USP, 1990.

- CLARK LABS. Idrisi Andes edition. Worchester, 2006. Clark University. Programa de computador:1 CD-ROM.
- CNM - Confederação Nacional de Municípios - www.cnm.org.br - Em cache – acessado em 14/06/2009, às 15:35 hs. 2009.
- COELHO, M.C.N.; BORGES, O.R.; Política ambiental no contexto da legislação e das políticas nacionais de desenvolvimento econômico, científico e tecnológico. 2005.
- CORREIA, J. D. , Mapeamento de Feições Depositionais Quaternárias por Imagens Orbitais de Alta Resolução Espacial – Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. Rio de Janeiro. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2008.
- CORREIA, J.D., Metodologia para mapeamento semi-automático de feições deposicionais quaternárias por imagens orbitais de alta resolução espacial – Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. Rio de Janeiro. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Programa de Pós-graduação em Geologia, 2008.
- COSTA, E.R., Geração automática de Modelos Digitais de Terreno a partir de imagens de câmaras digitais. Presidente Prudente. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP, 2006.
- COSTA, T. C. C.; SOUZA, M. G.; BRITES, R. S. Delimitação e caracterização de áreas de preservação permanente, por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1996, Salvador, Bahia, Anais Eletrônicos. São José dos campos: INPE. p. 121-127. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/01.27.16.17/doc/T48.pdf>
- DAVIS, J. C., Statistics and data analysis in Geology. New York: Wiley, 1986.
- DE SAWAL, R., Digital Elevation Data and GIS Projects. U.S. Geological Survey, 2009.
- DIAL, G. e GRODECKI, J., RPC Replacement Camera Models. Proceedings... of ASPRS 2005 Conference, Baltimore, Maryland, 2005.
- DIAL, G. e GRODECKI, J., Satellite Image Block Adjustment Simulations with Physical and RPC Camera Models. In: Proceedings... of ASPRS 2004 Conference, Denver, Colorado, 2004.
- DUREN, R.; WWONG, E.; BRECKENRIDGE,B.; SHAFFER,S.; DUNCAN,C.; TUBBS,E.; SALOMON,P., Metrology, attitude and orbit determination for spaceborne interferometric syntetic aperture radar. AeroSense Conference on Acquisition, Tracking anf Pointing. XII, 1998.
- EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. Digital Terrain Modelling - Acquisition, Manipulation and Applications. Artech House. Boston/London, 2005.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. O Pantanal. Disponível em: <<http://www.cpap.embrapa.br/skel.php?end=paginasec/pantanal.html>>. Acesso em: 31 mar. 2009.

ENGESAT.
http://www.engesat.com.br/index.php?system=news&news_id=494&action=read. Acesso em 25/06/2009.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, Inc – ESRI., ArcInfo version 7.0.4 On-line documentation. Redlands, Ca., 1996.

ESRI - ArcGIS 9.3 –Tutorial - ArcGIS Desktop Help, 2006.

ESRI - Environmental Systems Research Institute, Inc. ArcInfo version 7.1.2 on-line documentation. Redlands, CA. 1997.

FELGUEIRAS, C. A. e CÂMARA, G., Modelagem Numérica do Terreno. In: Introdução à Ciência da Geoinformação, Cap. 7, Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/livros.php>. Acesso em: 04/06/2009, 1999.

FELGUEIRAS, C. A., CÂMARA, G., Modelagem Numérica do Terreno. Capítulo 7 – Livro Introdução à ciência da geoinformação. Acessado em 30 de agosto de 2009 em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/intod/cap7-mnt.pdf>, 2001.

FELGUEIRAS, C. A., ERTHAL, G.J., Aplicações de Modelos Numéricos de Elevação e Integração com Imagens Digitais. Acessado em 10 de outubro de 2009.2009.

FERNANDES, M. C., MENEZES, P. M. L., Comparação entre os métodos para geração de MDE para obtenção de observações em superfície real no maciço da Tijuca-RJ. In: Revista Brasileira de Cartografia – RBC, nº 57/02, 2005.

FERNANDES, M.C., MENEZES, P.M.L., Avaliação de métodos de geração de MDE para a obtenção de observações em superfície real: um estudo de caso no maciço da Tijuca-RJ. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2985-2992.

FRASER, C.S.; DIAL, G. e GRODECKI, J., Sensor orientation via RPCs. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2006

GALO, M. e CAMARGO, P.O., Utilização do GPS no Controle de Qualidade de Cartas. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO – COBRAC, Anais... Florianópolis, 1994.

GEOEYE. 2006. IKONOS Imagery Products Guide. Versão 1.5. Disponível em: <http://www.geoeye.com/products/imagery/ikonos/default.htm>. Acesso em: 12/11/2007.

GOODCHILD, M.F., Spatial Autocorrelation, Catmog 47, Geo Books, Norwich, 1986. Acessado em <http://www.geog.ucsb.edu/~good/>

- GRODECKI, J. e DIAL, G., IKONOS Geometric Accuracy. In: Proceedings... of Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/2, I/5 and IV/7 on High Resolution Mapping from Space. University of Hanover, Germany, 2001.
- GRODECKI, J., IKONOS Stereo Feature Extraction – RPC Approach. Proceedings... of ASPRS Conference, St. Louis, 2001.
- GRODECKI, J.; DIAL, G. e LUTES, J., Mathematical Model for 3D Feature Extraction from Multiple Satellite Images described by RPCs. ASPRS Annual Conference Proceedings..., Denver, Colorado, 2004.
- GUEDES, A. L. P., Introdução à geometria computacional. Departamento de Informática. Universidade Federal do Paraná. Acessado em 30 de agosto de 2009, em: <http://www.inf.ufpr.br/andre/geom/node8.html#SECTION00440000000000000000>, 1994.
- GUIMARÃES, M. Cartografia Ambiental da Região de Vitória da Conquista – BA. São Paulo: USP-IB-DEG, 1999, 200p. il. Dissertação (Mestrado em Ecologia).
- HENGL, T., GRUBER S., SHRESTHA, D.P., Digital Terrain Analysis in ILWIS. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands, 2003.
- HOTT, M.C.; GUIMARAÃES, M.; MIRANDA, E.E. Um método para determinação automática de áreas de preservação permanente em topos de morros para o Estado de São Paulo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. Anais Eletrônicos.. São José dos campos: INPE, 2005 p. 3061-3068. Disponível em <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.13.47.22/doc/3061.pdf>
- HUTCHINSON, M. F. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. In: Third International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling. Santa Fé, NM. Proceedings: CD-ROM. 1996.
- HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hydrology, 106:211-232. 1989.
- HUTCHINSON, M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hydrology 106: 211-232, 1989.
- IBGE – www.ibge.gov.br acessado em 12/06/2009, às 16:40 hs.
- IBGE – Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - <http://www.ibge.gov.br/home/>. Acesso em: 25/06/2009.
- IBGE – Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoas/elementos_representacao.html. Acesso em: 31/08/2009, 2009.

INSTRUÇÕES REGULADORAS DAS NORMAS TÉCNICAS DA CARTOGRAFIA NACIONAL, disponível em : http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm. Acesso em 25/06/2009.

JONES, C. B., Geographical Information Systems and Computer Cartography. Editora Longman, pp. 197 a 213, 1998.

LEY, R. Accuracy assessment of digital terrain models. Auto-Carto London, 1:455-464, 1986.

LI, Z. L. Sampling strategy and accuracy assessment for digital terrain modeling. PhD Thesis, The University of Glasgow. 1990.

LI, Z.; ZHU, Q. e GOLD, C., Digital Terrain Modeling, Principles and Methodology. Boca Raton: CRC Press. 526–dc22, 2005.

LIDAR-Perfilamento a laser. Disponível em <http://www.lidar.com.br/>. Acesso em 31/08/2009, 2009.

LUTES, Accuracy Analysis of Rational Polynomial Coefficients for IKONOS Imagery. Proceedings... of ASPRS Conference, Denver, Colorado, 2004.

MACHADO e SILVA, A.J.F.; SILVA, M.V.D. e SANTINI, D., Mapeamento Topográfico Usando Imagens IKONOS. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Belo Horizonte. Anais... São José dos Campos: INPE, 2003

MÁRMORA, M. M.; BARRETO, R. R; SILVA, F. A. V.; OLIVEIRA, M. D.; CALHEIROS, D. F. Aporte para o Pantanal de nutrientes e sólidos suspensos provenientes dos rios Cuiabá e São Lourenço, Mato Grosso, Brasil. In: VII Congresso de Ecologia do Brasil (VII CEB), 2005, Caxambu-MG. Anais do VII Congresso de Ecologia do Brasil, 2005.

MATOS A.C.O.C, BLITZKOW,D., AVALIAÇÃO DO SRTM NO BRASIL COM ÊNFASE PARA A AMAZÔNIA. IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas - IV CBCG Curitiba, 2005.

MATOS, J. L. Fundamentos da Informação Geográfica. 4ª edição, Editora Libel. Lisboa – Portugal, 2001.

MAUNE, D.F.; HUFF, L. C. e GUENTHER, G. C. DEM User Applications. In: MAUNE, D.F. (Ed.). Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual. Bethesda: The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, pp. 367-394, 2001.

Merchant, D. C., 1982, “Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps”. In Proceedings of the *Technical Congress on Surveying and Mapping*, 1, pp. 222-231.

- MERCHANT, D. C., Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. In Proceedings of the Technical Congress on Surveying and Mapping, 1, pp. 222-231, 1982.
- MEYER, W. Concepts of Mathematical Modeling. McGraw-Hill Book Company, New York, 1985.
- MILLER, C. e LAFLAMME, R. J. The digital terrain model – Theory and applications, Photogrammetric Engineering, 24:433-442, 1958.
- MOREIRA, A. de A.; SOARES, V. P.; RIBEIRO, J. C.; SILVA, E.; RIBEIRO, C. A. A. S. Determinação de áreas de preservação permanente em uma microbacia hidrográfica a partir de fotografias aéreas de pequeno formato. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. Anais Eletrônicos.. São José dos campos: INPE, 2003. p. 1381-1389. Disponível em http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.12.11.06/doc/12_079.pdf
- MÜLLER, A.C. Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento. São Paulo: Makron Books, 1996.
- NAMIKAWA, L. M., Um método de ajuste de superfície para grades triangulares considerando linhas características. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – SP. Dissertação de mestrado, 1995.
- NAMIKAWA, L.M., A method for triangular grid surface fitting using breaklines. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 30(4): 362-368, 1994.
- NASA (2007), MODIS 16-day Composite MOD44C, latlon.na.2004289b3, Collection 4, The Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland, Day 289, 2004.
- NASCIMENTO, M. C.; SOARES, V.P.; RIBEIRO, C.A.A.S.; SILVA, E. Delimitação automática de áreas de preservação permanente (APP) e identificação de conflito de uso da terra na bacia hidrográfica do rio alegre. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia - GO. Anais Eletrônicos.. São José dos Campos: INPE, 2005. Disponível em <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.18.18.26/doc/2289.pdf>
- OKSANEN, J. Digital Elevation Model Error in Terrain Analysis. Helsinki. 51p. Dissertação Acadêmica em Geografia, Faculdade de Ciência, Universidade de Helsinki, 2006.
- OLIVEIRA, C.F. e SILVA, A.B., A utilização do sensoriamento remoto como ferramenta de apoio a atividade turística do distrito de Igatu - BA. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, 2009.
- OLIVEIRA, M. J., Proposta Metodológica para Delimitação Automática de Áreas de Preservação Permanente em Topos de Morro e em Linha de Cumeada. Viçosa: UFV, 2002. 53p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa.

- OLIVEIRA, M.Z.; VERONEZ, M. R.; THUM, A. B.; REINHARDT, A. O.; BARETTA, L.; *et al.* Delimitação de Áreas de Preservação Permanente: Um estudo de caso através de imagem de satélite de alta resolução associada a um sistema de informação geográfica (SIG). In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis – SC. Anais Eletrônicos, São José dos Campos: INPE, p. 4119-4128. Disponível em <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.21.53/doc/4119-4128.pdf>
- OUVERNEY, M.L.M. ANTUNES, M.A.H., BARBOSA, L. G., SEDANO, R.A. , Avaliação da Ortorectificação de Imagens do Sensor Quickbird II usando Modelo de Orientação Via Rpcs. Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 Abril 2007, Inpe, P. 611-619.
- PCI GEOMATICS, OrthoEngine User guide version 9.
- PETRIE, G. e KENNIE, T. (Eds), Terrain Modelling in surveying and civil engineering. Whittles Publishing, Caithness, England, 1990.
- RIBEIRO, C. A. A. S.; OLIVEIRA, M. J.; SOARES, V. P.; PINTO, F. de A. de C. Delimitação automática de áreas de preservação permanente em topos de morro e em linhas de cumeada: metodologia e estudo de caso. In: Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal, 5., 2002, Curitiba. Anais... Curitiba: FUPEF, 2002.
- RIBEIRO, C. A. A. S.; SOARES, V.P.; OLIVEIRA, A. M. S.; GLERIANI, J. M. O Desafio da delimitação de áreas de preservação permanente. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.29, n.2, p.203-212, 2005. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/rarv/v29n2/a04v29n2.pdf>
- ROCHA, C. H. B., Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar. Juiz de Fora – MG. Ed. do Autor, 2000.
- SAATY, T. e ALEXANDER, J. Thinking with Models. Pergamon Press, Oxford, 1981.
- SANTOS, A. P., Avaliação Do Padrão de Exatidão Cartográfica em Imagens Ikonos e CBERS-2b Na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, em Viçosa-Mg. Monografia. Universidade Federal de Viçosa. 2008.
- SANTOS, A. R. ArcGis 9.1 – Aplicação para Dados Espaciais. Vitória, ES: Fundagres, 2007.
- SANTOS, C. J. B. dos; SILVA, J. F. C. da; MELLO, M. P. de. Avaliação da qualidade de Modelos Digitais do Terreno construídos a partir de diferentes fontes de aquisição de dados. In: Congresso de Cartografia. Anais. Porto Alegre. Seção Pôster, Fotogrametria. [CD ROM]. 2001.

- SAUNDERS, W. Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis. In: ESRI International User Conference. Proceedings... San Diego: 1999. CD-ROM.
- SCHIMITH, R. F.; VIEIRA, E. M.; XAVIER, F. V.; OLIVEIRA, J. C. de; FILHO, ELPÍDIO INÁCIO FERNANDES. Identificação de áreas de preservação permanente e monitoramento utilizando imagens Aster. In: Congresso Brasileiro de Geógrafos, 6., 2004, Goiânia. Anais... Goiânia: UFG, 2004.
- SILVA, E. Código Florestal Brasileiro: função e áreas de preservação permanente.
- SILVA, W.B., VERGARA, O.R., Avaliação da qualidade geométrica de imagens IKONOS ortorretificadas utilizando-se a transformação polinomial racional. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2581-2588.
- SIMÃO, A. J. V., CARVALHO, M. M. R., Aplicação de modelos digitais de terreno ao estudo físico do território. Coimbra, Portugal. Faculdade de Ciências Tecnológicas da Universidade de Coimbra, 2000.
- SISCOM, Sistema Compartilhado de Informações Ambientais. http://siscom.ibama.gov.br/licenciamento_ambiental/Belo%20Monte/Atendimento%20ao%20Parecer%2029_2009/Anexos/Anexo%2010.1%20-%20APP's/Texto/PDF/APP%20-%20ADA.pdf. Acesso em 18/09/2009, 2009.
- SOARES, V.P. et al. Avaliação das áreas de uso indevido da terra em uma microbacia no município de Viçosa – MG, através de fotografias aéreas e sistemas de informação geográfica. Revista Árvore, v.26, n.2, p.243-251, 2002.
- SPOT IMAGE. SPOT-5 and HRS: Reference3D and SPOT DEMs, 2004.
- SPRING 5.0.5: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues> acessado em 15/06 , as 20:25 hs.
- SPRING, Tutorial de Geoprocessamento: Modelagem Digital de Terreno. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/modelagem.html>. Acesso em 31/08/2009. 2009.
- SURFERUser's Guide. Versão 8. Golden Software Inc, 2002.
- TIAGO FILHO, G. L.; NUNES, C. F.; ALVES, L. H. F.. Uso de Ferramenta SIG em Estudos de Inventário de Rios para Aproveitamento Hidroenergéticos de Pequeno Porte. PCH Notícias SHP News , v. 9, n. 38, p. 24-27, 2008.
- TOUTIN, T., Multisource data integration: comparison of geometric and radiometric methods. International Journal of Remote Sensing, 1995.
- TOUTIN, T., Review article: Geometric processing of Remote Sensing images: models, algorithms and methods. International Journal of Remote Sensing, 2004.

- TOUTIN, T.; CHÉNIER, R.; CARBONNEAU, Y. e ALCAÏDE, N. 3D Mapping with High-resolution Images, 2002.
- TRIBE, A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. *Journal of Hydrology*, v.139, p.263-293, 1992.
- UFMG, Apostila do Curso De Geoprocessamento, , Departamento de Cartografia – UFMG, 2007.
- VALERIANO, M.M., Modelo Digital de Variáveis Morfométricas com Dados SRTM para o Território Nacional: O Projeto TOPODATA. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia. Anais... São José dos Campos: Inpe. 2005.
- VIEIRA, C. A. O., MATHER, P. M. e BORGES, P. A. F., Assessing the positional accuracy of remotely sensed products, In *Proceeding of ACCURAY 2002*, Melbourne, Austrália, de 12 a 14 July 2002, pp.1-8, 2002.
- VILLELA, S. M; MATTOS, A. Hidrologia aplicada. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 245 p., 1975.
- WATSON, D. F. Contouring: a guide to the analysis and display of spatial data. 4th edition. Exeter: Pergamon, 1999.
- XU, Z. The Rational Function Model in Photogrammetric Mapping: Methods and Accuracies [Master Thesis], Department of Earth Science, York University, 2004.
- YAMACIRO, Raony Moreira Gomes et al. Utilização de um Modelo Digital de Terreno como subsídio para o gerenciamento do Parque Estadual das Várzeas do Rio Ivinhema – MS -, Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3227-3234.

APÊNDICE I

Metodologia proposta por Ribeiro (2003), para determinação do Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado, apresentada na apostila UFV de curso ENF 613 – Tópicos Avançados em Sistema de Informação Geográfica.

- i. Aprofundando o relevo ao longo da hidrografia mapeada

Rasterizando a hidrografia mapeada (vetorial)

Spatial Analyst → Convert → Features to Raster:

Output raster: h-r

- ii. Impondo a largura máxima de 1.5 células à hidrografia rasterizada

Spatial Analyst → Raster Calculator

$h-r1 = \text{setnull}(\text{thin}([hr], \#, \#, \#, 1.5 * 5) == 0, 1)$

Obs: as células pertencentes à hidrografia rasterizada receberão valor 1.

- iii. Obtendo o perfil altimétrico ao longo da hidrografia rasterizada

Spatial Analyst → Raster Calculator

$[zhr1] = [mf] * \text{Float}([h-r1])$

- iv. Aprofundando o relevo ao longo da hidrografia

Spatial Analyst → Raster Calculator

$[m1] = \text{con}(\text{IsNull}([zhr1]), [mf], [zhr1], -10000.0)$

- v. Eliminando as depressões espúrias ao longo da hidrografia mapeada

Spatial Analyst → Raster Calculator

Recalculando a direção do escoamento

$[d1] = \text{flowdirection}([m1])$

Identificações das depressões ao longo da hidrografia mapeada

$s1 = \text{sink}([d1])$

Delimitando a área de drenagem de cada depressão

$a1 = \text{watershed}([d1], [s1])$

- vi. Identificando a menor altitude da borda de cada depressão

$f1 = \text{zonalfill}([a1], [m1])$

- vii. Preenchendo as depressões
 $p1 = \text{con}([m1] > [f1], [m1], [f1])$
- viii. Substituindo, no relevo m1, o relevo corrigido das depressões
 $[m2] = \text{con}(\text{isnull}([a1]), [m1], [p1])$
 Renomear o grid m2 como m1
- ix. Calculando o valor máximo que deverá ser acrescido à altitude das células da hidrografia rasterizada para trazê-las de volta à superfície
 $[dif] = \text{zonalmin}([h\ r1], [zhr1] [m1])$
- x. Trazendo a hidrografia rasterizada “quase” de volta à superfície (-10m), convertendo os valores do grid de elevação para milímetros e então em inteiros
 $[ms\ mm] = \text{int}(\text{con}(\text{IsNull}([h\ r1]), [m1], [m1] + 10.0) * 1000.0)$
 Obs: o objetivo de se manter as células da hidrografia 10m abaixo da superfície é para poder refinar o relevo ao longo das margens, criando-se taludes
- xi. Obtendo o novo perfil altimétrico ao longo da hidrografia mapeada
 $[zh\ mm] = [h\ r1] * [ms\ mm]$
- xii. Reconstruindo o relevo ao longo da calha da hidrografia mapeada
 Calculando a distância euclideana e assinalando a origem mais próxima
 $\text{DIST EUC} = \text{EUCDISTANCE}(\text{ORIGENS}, \#, \text{ALOC})$
- xiii. Calculando a distância horizontal euclidiana de cada célula da superfície à hidrografia mapeada
 Spatial Analyst → Distance → Straight Line...
 Distance to: zh-mm
 Output cell size: 5
☒ Create allocation: z-hidro
 Output raster: dist-hidro
 * cada célula do grid z-hidro conterá a elevação (mm) da célula da hidrografia mais próxima;
 * para se criar o grid de alocação, o grid zh-mm deverá, necessariamente, possuir valores inteiros;

* alternativamente, esses resultados poderão ser obtidos usando o seguinte comando:

`dist-hidro = eucdistance([zh-mm],#,z-hidro)`

- xiv. Criando margens ao longo da hidrografia, com 5 células de largura de cada lado

Spatial Analyst → Raster Calculator

`[mrg-hidro] = setnull([dist-hidro] <= 1.5 * 5 * 5.0, [ms-mm])`

Obs: as células dentro das margens contêm NODATA, as demais contêm os valores de elevação em mm.

- xv. Calculando a distância horizontal euclideana de cada célula dentro das margens à borda mais próxima e assinalando a cada célula dentro das margens a altitude da borda mais próxima

Spatial Analyst → Raster Calculator

`[dist-mrg] = eucdistance([mrg-hidro],#,z-mrg)`

* o valor de todas as células do grid dist-mrg além das margens será zero;

* dentro das margens, cada célula do grid z-mrg conterá a elevação (mm) da célula da borda mais próxima;

* além das margens, as células do grid z-mrg conterão os valores de elevação em mm.

* Adicionar o grid z-mrg ao mapa corrente, pois o ArcGIS não o adiciona automaticamente.

- xvi. Refinando o relevo para criar uma calha entre as margens e a hidrografia

Spatial Analyst → Raster Calculator

`[mde-mrg] = con(IsNull([mrg-hidro]), [dist-hidro] * ([z-mrg] - [z-hidro]) / ([dist-mrg] + [dist-hidro]) + [z-hidro], mrg-hidro)`

* a operação $([z-mrg] - [z-hidro]) / ([dist-mrg] + [dist-hidro])$ calcula o coeficiente angular de cada rampa formada entre uma célula da margem e a célula da hidrografia mais próxima;

* dentro das margens, as células do grid mde-mrg formam um plano inclinado entre as bordas e a hidrografia;

* além das margens, as células do grid mde-mrg contêm os valores originais de elevação (mm);

xvii. Obtendo o novo perfil altimétrico da hidrografia rasterizada

Spatial Analyst → Raster Calculator

$[zh] = [mde-mrg] * [h-r1]$

Aprofundamento final do relevo ao longo da hidrografia mapeada

xviii. Aprofundando novamente o relevo ao longo da hidrografia em 10.000.000 mm

Remova o grid [m1] da lista de conteúdo do mapa corrente.

Spatial Analyst → Raster Calculator

$[m1] = \text{con}(\text{IsNull}([zh]), [mde-mrg], [zh], -10.000.000)$

xix. Eliminando as depressões espúrias ao longo da hidrografia mapeada

Spatial Analyst → Raster Calculator

Recalculando a direção do escoamento

$[d1] = \text{flowdirection}([m1])$

Identificações das depressões ao longo da hidrografia mapeada

$s1 = \text{sink}([d1])$

Delimitando a área de drenagem de cada depressão

$a1 = \text{watershed}([d1], [s1])$

xx. Identificando a menor altitude da borda de cada depressão

$f1 = \text{zonalfill}([a1], [m1])$

xxi. Preenchendo as depressões

$p1 = \text{con}([m1] > [f1], [m1], [f1])$

xxii. Substituindo, no relevo m1, o relevo corrigido das depressões

$[m2] = \text{con}(\text{isnull}([a1]), [m1], [p1])$

Renomear o grid m2 como m1

Repetir os procedimentos 23..26 até que o grid s1 não contenha qualquer depressão.

xxiii. Calculando o valor máximo que deverá ser acrescido à altitude das células da hidrografia para trazê-las de volta à superfície

$[difx] = \text{zonalmin}([h-r1], [zh] - [m1])$

xxiv. Trazendo a hidrografia rasterizada “quase” de volta à superfície (- 2000 mm)

$mdehc-mm = \text{con}(\text{IsNull}([h-r1]), [m1], [m1] + [difx] - 2000)$

xxv. De posse da hidrografia rasterizada, retornar o mde-mm à superfície em metros

$mdehc-m = ([mdehc-mm] / 1000)$

xxvi. Derivando o grid de direção de escoamento final

$dirhc = \text{flowdirection}([mdehc-mm])$

Remover todos os outros grids auxiliares

ELABORAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO HIDROGRAFICAMENTE CONDICIONADO NO TOPOGRID

De posse dos dados processados na *Geodatabase* (parte 3.2) da monografia onde são levantados os temas hidrografia, limite e altimetria (pontos e curva de nível), podemos realizar a geração do Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado – MDEHC.

1. ETAPA

Procedimentos ARCGIS:

GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO HIDROGRAFICAMENTE CONDICIONADO

Para a geração do MDE será utilizado o interpolador TOPOGRID existente no ArcInfo.

Iniciando o ArcInfo

- inicie o ArcInfo no seu computador. Isto pode ser feito na janela do gerenciador de programas (Start – Programs – ArcInfo – ArcInfo WorkStation – ArcTools).

- quando o ArcInfo é iniciado, abre-se uma janela chamada ArcTools. Nessa janela o usuário tem a opção de iniciar diversas ferramentas (ferramenta de mapas, de edição, de operações com grids, de comandos,...). Selecione a ferramenta de comandos (Command Tools) e clique OK.

Convertendo arquivos do formato Shape (ArcView/ Geodatabase) para **ARC** (ArcInfo)

- Existe dois procedimentos para a conversão do formato Shape para o ARC:

- **A primeira seria utilizando o ARCGIS – ARCTOobox – COVERSION TOOLS – TO COVERAGE**

Lembrando de não esquecer de colocar o Type como ARC para as curvas de nível e hidrografia.

Mas para o limite o Type deverá ser POLYGON

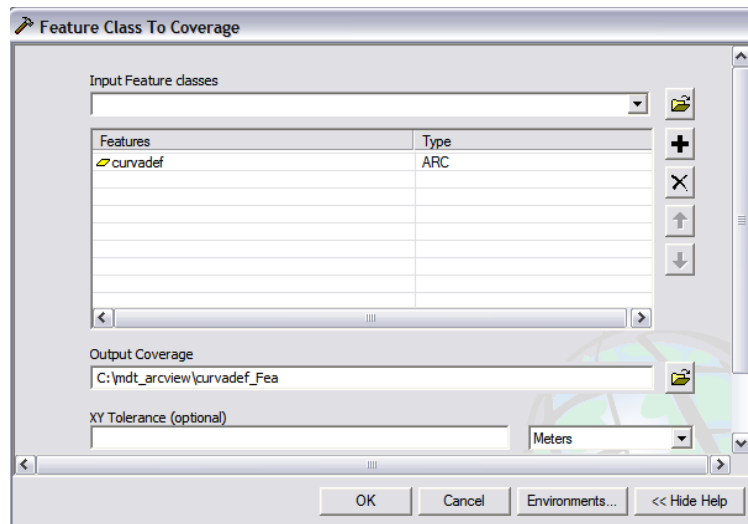


Figura 1: Menu: Feature Class to Coverage

- A segunda maneira seria utilizando o próprio topogrid de acordo com os procedimentos abaixo:

- para se converter os arquivos do formato Shape para Arc selecione a opção **“To Arc”**, no menu **“Conversion”**, e, em seguida, **“Shape to Arc”**.

- na opção **“input ArcView Shape”**, clique com o botão direito do mouse na janela em branco.

- utilizando o botão  e a janela **“Subdirectories”** para navegar até o diretório desejado e selecionar o tema de hidrografia.shp, na janela **“Coverages”**. Em seguida clique em **“OK”**.

- na janela **“Output Coverage”** digite o nome do arquivo de saída e clique em **“OK”**.

- repita o procedimento para os diversos outros temas necessários (curvas, lagos, contorno...).

Verificando o sentido da hidrografia:

- na janela **“Arctools”** escolha a opção **“Edit Tools”**.

- no módulo de edição (**Edit Tools**), em **“File”** → **“Open”** abra a *coverage* da hidrografia.

- serão abertas três janelas: uma com os arcos da hidrografia (**“Arcedit”**), outras duas de ferramentas: **“Edit Arcs & Nodes”** e **“Feature Selection”**.

- na barra ferramentas **“Edit Tools”**, no menu **“Display”**, selecione **“Pan Zoom”**, abrirá uma nova barra de ferramentas para auxiliar com o *zoom*.

- na barra de ferramentas “**Edit Tools**” → “**Display**” → “**Draw Env: General**” selecione em “**Features**”: arc, em “**Drawing Options**”: arrows e em “**Current env**”: on. Isto irá mostrar os arcos da hidrografia com o seu sentido.

- verifique se os sentidos estão corretos: no sentido da nascente para a foz.

- caso algum arco esteja errado, selecione-o (utilizando a barra de ferramentas



“**Feature Selection**”, escolha a “setinha”, selecione o arco que deseja alterar.

- na barra de ferramentas “**Edit Arcs & Nodes**” selecione o comando “**Flip**”, este comando altera a direção do escoamento.

- salve as alterações em “**File**” → “**Save**”.

Obs: caso precise desfazer alguma alteração, existe o comando “**Oops**” na barra de ferramentas “**Edit Arcs & Nodes**”.

2. GERANDO O MDE

Inicie o ArcInfo na janela do Gerenciador de Programas: Start – Programs – ArcInfo – ArcInfo Workstation – Arctools

- **GRID TOOLS**
- **STATISTICS – SURFACE – SURFACE ANALYSIS – TOGRIDTOOLS INTERPOLATION**

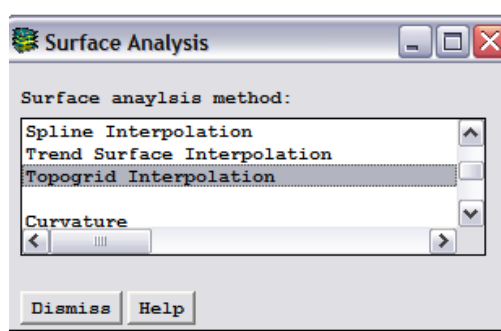


Figura 2: Menu Surface Analysis

Os passos a serem digitados na tela que se abre são os seguintes:

Output: nome de saída

Cell: 5 metros

Uma tela se abrirá:

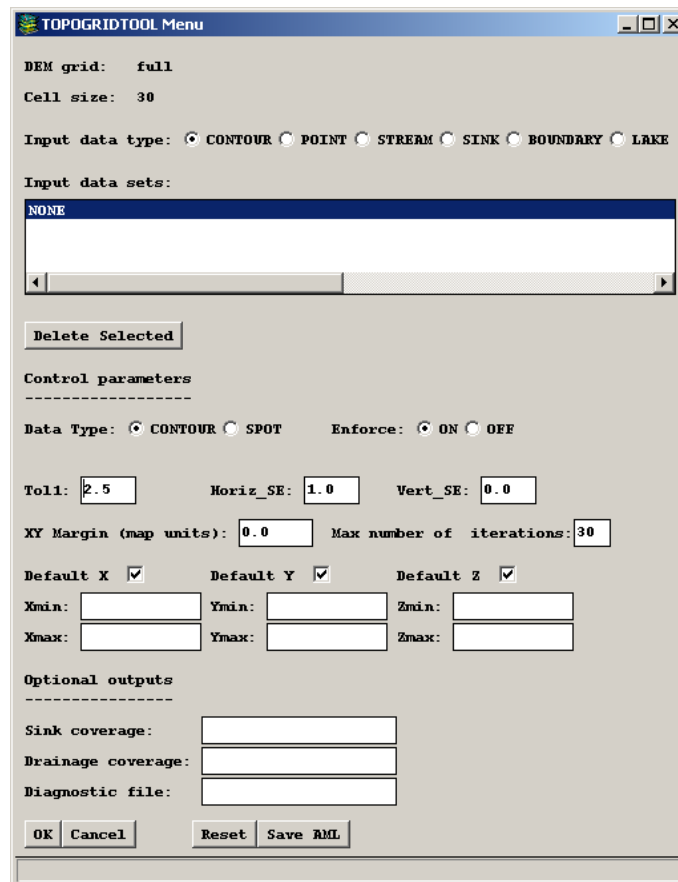


Figura 3: Menu TOPOGRIDTOOL

- clique em **CONTOUR** e informe a *coverage* das curvas de nível, indicando também o campo que contém as cotas.
- **POINT**: caso tenha pontos cotados.
- **STREAM**: entre com a *coverage* de hidrografia.
- **BOUNDARY**: entre com a *coverage* do limite da área.
- aceite o restante como *default* e clique em “**OK**”, a operação de interpolação é iniciada.

APÊNDICE III

Neste apêndice estão apresentados todos os relatórios gerados pelo software GeoPEC na avaliação da precisão posicional das imagens ortoretificadas, de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica.

GeoPEC
Padrão de Exatidão Cartográfica
RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO

DADOS DO PRODUTO CARTOGRÁFICO

Produto Analisado: Ikonos_RPC_SRTM
Local: Viçosa
Data: 30/06/2009
Responsável Técnico: Afonso

INFORMAÇÕES ESPECÍFICAS DO PROCESSAMENTO

Escala de Referência: 1/10000
Eqüidistância das curvas de nível: 0
Nível de Significância (Planimétrico): 90% ($\alpha=0,100$)
Nível de Significância (Altimétrico): ----
Nº Total Pontos de Controle: (Planimétrico)= 16 (Altimétrico)= 0
Nº Pontos Processados: (Planimétrico)= 16 (Altimétrico): 0

Coordenada Este (m):

Média: 0.9716

Desvio Padrão: 1.942

RMS: 2.1165

Teste de Tendência:

t calculado: 2.0012

t tabelado: 1.753

Situação: Existe Tendência nesta direção

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=12.5715 Classe B=4.5257 Classe C=3.1429

Qui-quadrado tabelado: 22.3

Coordenada Norte (m):

Média: -2.6248

Desvio Padrão: 2.5789

RMS: 0.9316

Teste de Tendência:

t calculado: -4.0712

t tabelado: 1.753

Situação: Existe Tendência nesta direção

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=22.1695 Classe B=7.981 Classe C=5.5424

Qui-quadrado tabelado: 22.3

RESULTADOS GERAIS

Resultante Planimétrica (m):

Média: 3.8043

Desvio Padrão: 1.8278

RMS: 4.1958

Teste de Tendência:

Situação: Existe Tendência

Teste de Precisão:

Situação: Classe A

Resultante Altimétrica (m):

Média: 0

Desvio Padrão: 0

RMS: 0

Teste de Tendência:

t calculado: 0

t tabelado: 0

Situação: Tendência NÃO CALCULADA

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=0 Classe B=0 Classe C=0

Qui-quadrado tabelado: 0

Situação: Classe NÃO CALCULADA

CLASSIFICACAO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO

O produto: "Ikonos", de acordo com o decreto-lei nº. 89.817 de 20 de junho de 1984, que regulamenta as normas cartográficas brasileiras, encontra-se classificado com Padrão de Exatidão Cartográfica **Classe A** para uso planimétrico e **Classe NÃO CALCULADA** para uso altimétrico.

Quanto à análise de tendência nas componentes posicionais do produto, temos:

Existe Tendência para o uso planimétrico e, **Tendência NÃO CALCULADA** para o uso altimétrico.

GeoPEC
Padrão de Exatidão Cartográfica
RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO

DADOS DO PRODUTO CARTOGRÁFICO

Produto Analisado: Ikonos_RPC_IBGE90
Local: viçosa
Data: 30/06/2009
Responsável Técnico: Afonso

INFORMAÇÕES ESPECÍFICAS DO PROCESSAMENTO

Escala de Referência: 1/10000
Eqüidistância das curvas de nível: 0
Nível de Significância (Planimétrico): 90% ($\alpha=0,100$)
Nível de Significância (Altimétrico): ----
Nº Total Pontos de Controle: (Planimétrico)= 16 (Altimétrico)= 0
Nº Pontos Processados: (Planimétrico)= 16 (Altimétrico): 0

Coordenada Este (m):

Média: 0.8753

Desvio Padrão: 2.3402

RMS: 2.4291

Teste de Tendência:

t calculado: 1.4961

t tabelado: 1.753

Situação: Sem Tendência

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=18.2555 Classe B=6.572 Classe C=4.5639

Qui-quadrado tabelado: 22.3

Coordenada Norte (m):

Média: -2.9941

Desvio Padrão: 4.5317

RMS: 1.5038

Teste de Tendência:

t calculado: -2.6428

t tabelado: 1.753

Situação: Existe Tendência nesta direção

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=68.4557 Classe B=24.644 Classe C=17.1139

Qui-quadrado tabelado: 22.3

RESULTADOS GERAIS

Resultante Planimétrica (m):

Média: 4.5094

Desvio Padrão: 3.8343

RMS: 5.8411

Teste de Tendência:

Situação: Existe Tendência

Teste de Precisão:

Situação: Classe C

Resultante Altimétrica (m):

Média: 0

Desvio Padrão: 0

RMS: 0

Teste de Tendência:

t calculado: 0

t tabelado: 0

Situação: Tendência NÃO CALCULADA

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=0 Classe B=0 Classe C=0

Qui-quadrado tabelado: 0

Situação: Classe NÃO CALCULADA

CLASSIFICACAO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO

O produto: "ikonos", de acordo com o decreto-lei nº. 89.817 de 20 de junho de 1984, que regulamenta as normas cartográficas brasileiras, encontra-se classificado com Padrão de Exatidão Cartográfica **Classe C** para uso planimétrico e **Classe NÃO CALCULADA** para uso altimétrico.

Quanto à análise de tendência nas componentes posicionais do produto, temos:

Existe Tendência para o uso planimétrico e, **Tendência NÃO CALCULADA** para o uso altimétrico.

GeoPEC
Padrão de Exatidão Cartográfica
RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO

DADOS DO PRODUTO CARTOGRÁFICO

Produto Analisado: Ikonos_RPC_IBGE20
Local: viçosa
Data: 30/06/2009
Responsável Técnico: Afonso

INFORMAÇÕES ESPECÍFICAS DO PROCESSAMENTO

Escala de Referência: 1/10000
Eqüidistância das curvas de nível: 0
Nível de Significância (Planimétrico): 90% ($\alpha=0,100$)
Nível de Significância (Altimétrico): ----
Nº Total Pontos de Controle: (Planimétrico)= 16 (Altimétrico)= 0
Nº Pontos Processados: (Planimétrico)= 16 (Altimétrico): 0

Coordenada Este (m):

Média: 0.7361

Desvio Padrão: 2.2992

RMS: 2.3447

Teste de Tendência:

t calculado: 1.2806

t tabelado: 1.753

Situação: Sem Tendência

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=17.6214 Classe B=6.3437 Classe C=4.4054

Qui-quadrado tabelado: 22.3

Coordenada Norte (m):

Média: -1.6677

Desvio Padrão: 3.8091

RMS: 1.2849

Teste de Tendência:

t calculado: -1.7513

t tabelado: 1.753

Situação: Sem Tendência

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=48.3651 Classe B=17.4114 Classe C=12.0913

Qui-quadrado tabelado: 22.3

RESULTADOS GERAIS

Resultante Planimétrica (m):

Média: 4.0443

Desvio Padrão: 2.4276

RMS: 4.6777

Teste de Tendência:

Situação: Sem Tendência

Teste de Precisão:

Situação: Classe B

Resultante Altimétrica (m):

Média: 0

Desvio Padrão: 0

RMS: 0

Teste de Tendência:

t calculado: 0

t tabelado: 0

Situação: Tendência NÃO CALCULADA

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=0 Classe B=0 Classe C=0

Qui-quadrado tabelado: 0

Situação: Classe NÃO CALCULADA

CLASSIFICACAO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO

O produto: "Ikonos_mde20", de acordo com o decreto-lei nº. 89.817 de 20 de junho de 1984, que regulamenta as normas cartográficas brasileiras, encontra-se classificado com Padrão de Exatidão Cartográfica **Classe B** para uso planimétrico e **Classe NÃO CALCULADA** para uso altimétrico.

Quanto à análise de tendência nas componentes posicionais do produto, temos:

Sem Tendência para o uso planimétrico e, **Tendência NÃO CALCULADA** para o uso altimétrico.

GeoPEC
Padrão de Exatidão Cartográfica

RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO

DADOS DO PRODUTO CARTOGRÁFICO

Produto Analisado: Ikonos_RPC_IBGE20

Local: viçosa

Data: 30/06/2009

Responsável Técnico: Afonso

INFORMAÇÕES ESPECÍFICAS DO PROCESSAMENTO

Escala de Referência: 1/10000

Eqüidistância das curvas de nível: 0

Nível de Significância (Planimétrico): 90% ($\alpha=0,100$)

Nível de Significância (Altimétrico): ----

Nº Total Pontos de Controle: (Planimétrico)= 16 (Altimétrico)= 0

Nº Pontos Processados: (Planimétrico)= 16 (Altimétrico): 0

Coordenada Este (m):

Média: 0.7361

Desvio Padrão: 2.2992

RMS: 2.3447

Teste de Tendência:

t calculado: 1.2806

t tabelado: 1.753

Situação: Sem Tendência

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=17.6214 Classe B=6.3437 Classe C=4.4054

Qui-quadrado tabelado: 22.3

Coordenada Norte (m):

Média: -1.6677

Desvio Padrão: 3.8091

RMS: 1.2849

Teste de Tendência:

t calculado: -1.7513

t tabelado: 1.753

Situação: Sem Tendência

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=48.3651 Classe B=17.4114 Classe C=12.0913

Qui-quadrado tabelado: 22.3-----

RESULTADOS GERAIS

Resultante Planimétrica (m):

Média: 4.0443

Desvio Padrão: 2.4276

RMS: 4.6777

Teste de Tendência:

Situação: Sem Tendência

Teste de Precisão:

Situação: Classe B

Resultante Altimétrica (m):

Média: 0

Desvio Padrão: 0

RMS: 0

Teste de Tendência:

t calculado: 0

t tabelado: 0

Situação: Tendência NÃO CALCULADA

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=0 Classe B=0 Classe C=0

Qui-quadrado tabelado: 0

Situação: Classe NÃO CALCULADA

CLASSIFICACAO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO

O produto: "Ikonos_mde20", de acordo com o decreto-lei nº. 89.817 de 20 de junho de 1984, que regulamenta as normas cartográficas brasileiras, encontra-se classificado com Padrão de Exatidão Cartográfica **Classe B** para uso planimétrico e **Classe NÃO CALCULADA** para uso altimétrico.

Quanto à análise de tendência nas componentes posicionais do produto, temos:

Sem Tendência para o uso planimétrico e, **Tendência NÃO CALCULADA** para o uso altimétrico.

GeoPEC
Padrão de Exatidão Cartográfica
RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO

DADOS DO PRODUTO CARTOGRÁFICO

Produto Analisado: Ikonos_RPC_IBGE05
Local: Viçosa
Data: 230/06/2009
Responsável Técnico: Afonso

INFORMAÇÕES ESPECÍFICAS DO PROCESSAMENTO

Escala de Referência: 1/10000
Eqüidistância das curvas de nível: 0
Nível de Significância (Planimétrico): 90% ($\alpha=0,100$)
Nível de Significância (Altimétrico): ----
Nº Total Pontos de Controle: (Planimétrico)= 16 (Altimétrico)= 0
Nº Pontos Processados: (Planimétrico)= 16 (Altimétrico): 0

Coordenada Este (m):

Média: 0.7856

Desvio Padrão: 2.3765

RMS: 2.4315

Teste de Tendência:

t calculado: 1.3223

t tabelado: 1.753

Situação: Sem Tendência

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=18.8262 Classe B=6.7774 Classe C=4.7066

Qui-quadrado tabelado: 22.3

Coordenada Norte (m):

Média: -1.6942

Desvio Padrão: 3.8959

RMS: 1.2667

Teste de Tendência:

t calculado: -1.7395

t tabelado: 1.753

Situação: Sem Tendência

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=50.5944 Classe B=18.214 Classe C=12.6486

Qui-quadrado tabelado: 22.3

RESULTADOS GERAIS

Resultante Planimétrica (m):

Média: 4.1944

Desvio Padrão: 2.4042

RMS: 4.7971

Teste de Tendência:

Situação: Sem Tendência

Teste de Precisão:

Situação: Classe B

Resultante Altimétrica (m):

Média: 0

Desvio Padrão: 0

RMS: 0

Teste de Tendência:

t calculado: 0

t tabelado: 0

Situação: Tendência NÃO CALCULADA

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=0 Classe B=0 Classe C=0

Qui-quadrado tabelado: 0

Situação: Classe NÃO CALCULADA

CLASSIFICACAO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO

O produto: "Ikonos_mde05", de acordo com o decreto-lei nº. 89.817 de 20 de junho de 1984, que regulamenta as normas cartográficas brasileiras, encontra-se classificado com Padrão de Exatidão Cartográfica **Classe B** para uso planimétrico e **Classe NÃO CALCULADA** para uso altimétrico.

Quanto à análise de tendência nas componentes posicionais do produto, temos:

Sem Tendência para o uso planimétrico e, **Tendência NÃO CALCULADA** para o uso altimétrico.

GeoPEC
Padrão de Exatidão Cartográfica

RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO

DADOS DO PRODUTO CARTOGRÁFICO

Produto Analisado: Ikonos_corrigido_geometricamente_POL1
Local: Viçosa
Data: 30/06/2009
Responsável Técnico: Afonso

INFORMAÇÕES ESPECÍFICAS DO PROCESSAMENTO

Escala de Referência: 1/100000
Eqüidistância das curvas de nível: 0
Nível de Significância (Planimétrico): 90% ($\alpha=0,100$)
Nível de Significância (Altimétrico): ----
Nº Total Pontos de Controle: (Planimétrico)= 16 (Altimétrico)= 0
Nº Pontos Processados: (Planimétrico)= 16 (Altimétrico): 0

Coordenada Este (m):

Média: 3.7458

Desvio Padrão: 6.0522

RMS: 6.9549

Teste de Tendência:

t calculado: 2.4757

t tabelado: 1.753

Situação: Existe Tendência nesta direção

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=1.221 Classe B=0.4396 Classe C=0.3052

Qui-quadrado tabelado: 22.3

Coordenada Norte (m):

Média: -16.8

Desvio Padrão: 38.6028

RMS: 3.6617

Teste de Tendência:

t calculado: -1.7408

t tabelado: 1.753

Situação: Sem Tendência

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=49.6726 Classe B=17.8822 Classe C=12.4181

Qui-quadrado tabelado: 22.3

RESULTADOS GERAIS

Resultante Planimétrica (m):

Média: 33.8777

Desvio Padrão: 24.8719

RMS: 41.565

Teste de Tendência:

Situação: Existe Tendência

Teste de Precisão:

Situação: Classe B

Resultante Altimétrica (m):

Média: 0

Desvio Padrão: 0

RMS: 0

Teste de Tendência:

t calculado: 0

t tabelado: 0

Situação: Tendência NÃO CALCULADA

Teste de Precisão:

Qui-quadrado calculado: Classe A=0 Classe B=0 Classe C=0

Qui-quadrado tabelado: 0

Situacao: Classe NÃO CALCULADA

CLASSIFICACAO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO

O produto: "Ikonos_corrigido_geometricamente", de acordo com o decreto-lei nº. 89.817 de 20 de junho de 1984, que regulamenta as normas cartográficas brasileiras, encontra-se classificado com Padrão de Exatidão Cartográfica **Classe B** para uso planimétrico e **Classe NÃO CALCULADA** para uso altimétrico.

Quanto à análise de tendência nas componentes posicionais do produto, temos:

Existe Tendência para o uso planimétrico e, **Tendência NÃO CALCULADA** para o uso altimétrico.

APÊNDICE IV

GERAÇÃO DE MDT A PARTIR DAS CARTAS DO IBGE NO FORMATO DGN

INTRODUÇÃO

A Constituição Brasileira prevê a implantação de Plano Diretor para os municípios com população acima de 20.000 habitantes. O Planejamento urbano é parte de um plano diretor e como a população em geral tem se aglomerado em torno das cidades (sedes dos municípios), com uma média em torno de 85%, faz-se necessário estabelecer planos de desenvolvimento de forma a permitir o crescimento equilibrado do município, sem se descuidar da qualidade de vida dos munícipes. Aspectos relacionados á: ocupação do solo; meio-ambiente; mobilidade das pessoas e de mercadorias; logística necessária para a circulação; exigem suporte no processo de tomada de decisão de forma a permitir a simulação de cenários futuros, compatíveis com o que se deseja para o desenvolvimento em tais municípios.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e demais tecnologias do Geoprocessamento, se constituem em ferramentas técnico-científicas indispensáveis á elaboração de planos estratégicos. Um SIG exige informações espaciais georreferenciadas capazes de permitir os planejamentos desejados para uma administração municipal. O modelo digital do terreno é uma informação espacial básica, e em muitas aplicações, necessárias na utilização dos SIGs.

No presente apêndice será apresentada uma metodologia de geração de modelo digital de terreno (MDT) acessível e aplicável às municipalidades e capaz de subsidiá-los no processo de planejamento da ocupação e uso territorial. Conseqüentemente, essa metodologia foi desenvolvida de tal forma que e este material possa servir de consulta e roteiro para as pessoas que trabalham nos órgãos municipais gerarem os MDTs necessários aos planejamentos de uso e ocupação do solo em suas municipalidades.

Na geração do MDT, inicialmente, aplica-se um SIG comercialmente difundido e aceito em vários países, mesmo tendo um custo considerado alto para pequenos municípios e com baixa arrecadação. Trata-se do ArcGIS 9.3, desenvolvido pelo *Enviromental Systems Research Institute* – ESRI.

Posteriormente, aplicou-se o Sistema de Processamento de Informações Geográficas – SPRING – versão 5.0.5, de acesso gratuito e público, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE.

O MDT, por ser indispensável como base para as áreas de planejamento físico territorial, contribuirá para uma administração pública ágil, dinâmica e atualizada, técnica e cientificamente fundamentada.

Diante desse contexto, o objetivo deste apêndice pode ser definido através de três objetivos específicos:

- Apresentar uma metodologia para a geração do modelo digital de terreno (MDT), tendo como base dados secundários, gratuitos e vindos de fontes oficiais, no caso, cartas do IBGE em formato DGN.
- Aplicar um SIG comercialmente difundido no mercado internacional e brasileiro, explorando suas funções para a geração de MDT, a partir de dados secundários.
- Aplicar um SIG gratuito na geração do MDT, a partir de dados secundários.

1. MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizaram-se cartas digitais em formato **DGN**, disponíveis gratuitamente no site do IBGE. Para a execução dos procedimentos de geração do MDT utilizou-se computador devidamente preparado com o aplicativo comercial **ArcGis 9.3** e os aplicativos gratuitos **Kosmos 1.2.1** e **SPRING 5.0.5**.

2.1 Área de Estudo

O município Senador Firmino (latitude -20,91° e longitude -43,09°) situado na mesorregião da Zona da Mata, na Microrregião geográfica de Ubá, com 166,2 km², limita-se com os municípios de Brás Pires, Divinésia, Dolores do Turvo, Paula Cândido, Presidente Bernardes e Ubá (Figura 1).

A sua escolha se deu pelo fato do município possuir baixa arrecadação e baixa população, dificultando aos gestores municipais implantar algum procedimento de auxílio no processo de melhoria das condições da mobilidade urbana, da acessibilidade das pessoas, do planejamento urbano e do desenvolvimento social e econômico, urbano e regional. Procedimento este que inclui uma realocação de verbas municipais para obtenção de bancos de dados que facilite esse processo de tomada de decisão, baseado em geotecnologias.

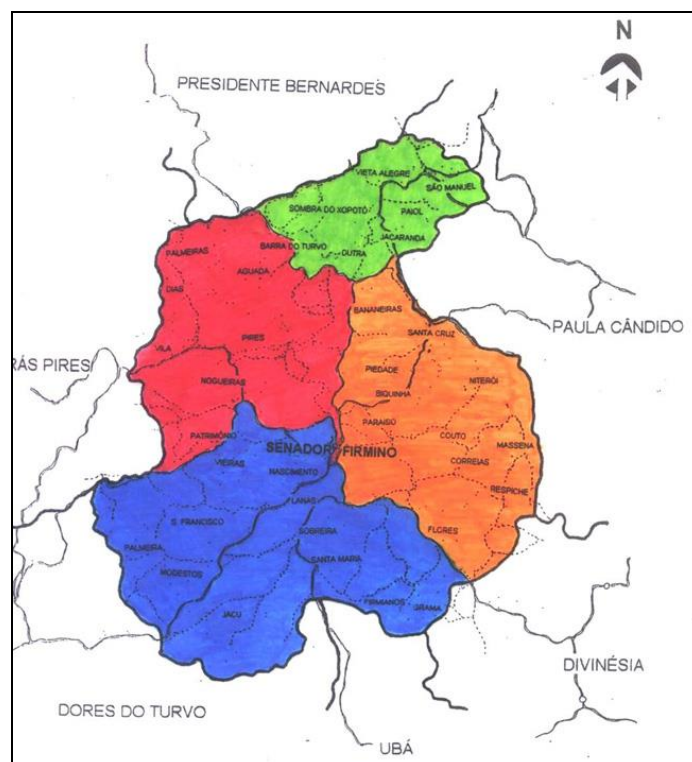


Figura 1: Localização da área de estudo: Município Senador Firmino

Fonte: <http://www.senadorfirmino.mg.gov.br/mapadesenador.htm>

2.2 Aquisição dos Dados Secundários

O IBGE disponibiliza no seu site cartas topográficas em diferentes escalas para diversas regiões brasileiras. Escolheu-se a carta topográfica que contém o município de Senador Firmino, na escala 1/50.000. A escolha dessa escala se deu por ela ser a maior e melhor disponível para esse município.

Os dados secundários utilizados para geração do MDT foram os arquivos de formato DGN, disponíveis gratuitamente para download no site do IBGE, como apresentado na Figura 2.

Conteúdo do diretório ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas/topograficos/topo50/vetor/Senador_Firmino26104/vetor/

Um diretório acima

Nome	Tamanho	Modificado
0426104hd.dgn	715 KB	9/1/2004 12:00:00 AM
0426104hp.dgn	2319 KB	9/1/2004 12:00:00 AM
0426104lc.dgn	43 KB	9/1/2004 12:00:00 AM
0426104lm.dgn	49 KB	9/1/2004 12:00:00 AM
0426104o1.dgn	23 KB	9/1/2004 12:00:00 AM
0426104o2.dgn	28 KB	9/1/2004 12:00:00 AM
0426104o3.dgn	409 KB	9/1/2004 12:00:00 AM
0426104pr.dgn	21 KB	9/1/2004 12:00:00 AM
0426104st.dgn	467 KB	9/1/2004 12:00:00 AM
0426104vg.dgn	21 KB	9/1/2004 12:00:00 AM
26104rd.dgn	34 KB	9/1/2004 12:00:00 AM

Figura 2: Arquivos DGN da região de Senador Firmino, disponíveis no site do IBGE.

Dentre os arquivos disponíveis existe um arquivo que contém as curvas de nível, no caso o arquivo **0426104hp.DGN** como mostra a Figura 2.

Esse arquivo é um bloco composto pelos seguintes arquivos:

- Arquivo de anotações, que contém as cotas das curvas de nível;
- Arquivo de pontos, que contém pontos cotados que facilitam a interpolação;
- Arquivo de *polylinhas*, que contém as linhas que formam as curvas de nível;
- Arquivo de polígonos, que contém polígonos que representam as curvas de nível fechadas;
- Arquivo de *multipatch*.

2.3 GERAÇÃO DO MDT UTILIZANDO SOFTWARE COMERCIAL:

ARCGIS – 9.3

2.3.1 Preparação dos Dados Secundários

A preparação dos dados se deu em duas etapas. Na primeira etapa prepararam-se os dados referentes ao limite do município. A segunda etapa consistiu no preparo das curvas de nível.

2.3.1.1 Preparação do Limite Municipal

No módulo do ArcMap (ArcGis), pode-se inserir o bloco completo de arquivos clicando uma única vez no nome do bloco. Ainda clicando duas vezes sobre o bloco é possível selecionar apenas um dos arquivos contidos no mesmo. Ao inserir o bloco completo no ArcMap todas as informações estarão disponíveis (Figura 3).

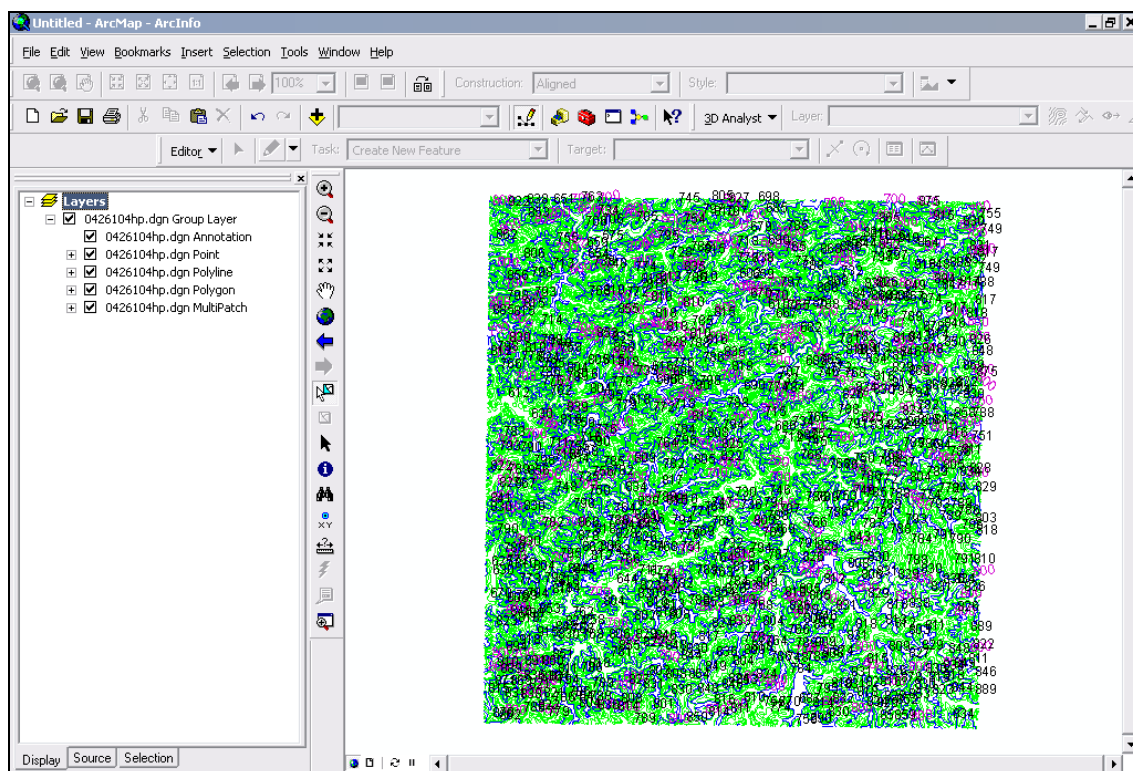


Figura 3: Visualização das informações disponíveis no bloco de arquivos
0426104hp.DGN.

Para essa aplicação, adicionaram-se o arquivo **0426104lm.DGN Polyline**, que se encontra no bloco de arquivos **0426104lm.DGN**.

Antes de se iniciar o processo de delimitação do município em foco, foi necessário exportar o arquivo que contém as linhas limítrofes para um arquivo de formato ShapeFile. O arquivo exportado foi o arquivo **0426104lm.DGN Polyline** que é o arquivo que contém as limítrofes.

Como o arquivo adicionado apresenta linhas além do limite municipal desejado, selecionaram-se os fragmentos referentes ao limite do município em foco tornando-os contínuos (Figura 4). Os fragmentos que não fazem parte do limite do município foram excluídos.

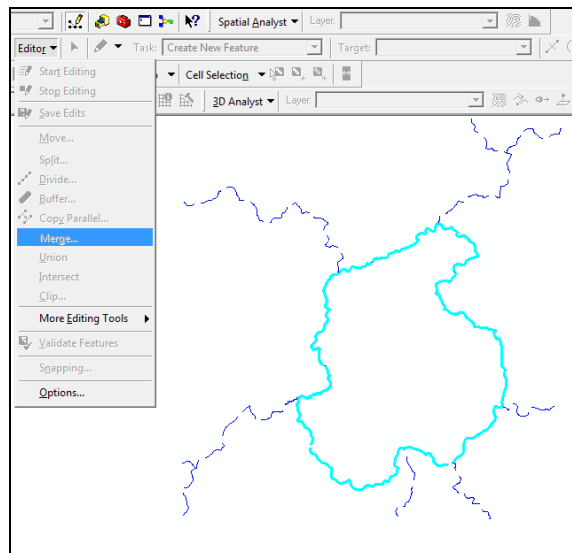


Figura 4: Visualização dos limites do arquivo 0426104lm.DGN.

Após a edição, o limite foi transformado em polígono, usando ferramentas do próprio aplicativo ArcGIS (Figura 5).

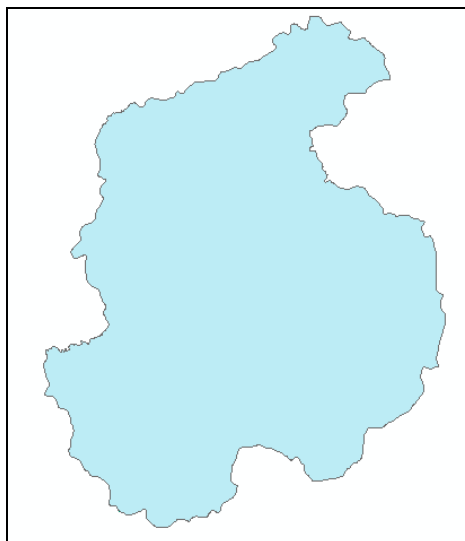


Figura 5: Visualização do polígono que representa o limite do município Senador Firmino.

2.3.1.2 - Preparação das Curvas de Nível

Para a preparação das curvas de nível, adicionaram-se os arquivos **0426104hp.DGN Polyline** e **0426104hp.DGN Annotation**, contidos no bloco de arquivos **0426104hp.DGN**.

Uma vez que o arquivo que contém as *polylinhas* não trás consigo as cotas das curvas de nível como um atributo, o que se torna um problema, já que para geração do TIN bem como do MDT é essencial que a cota seja um atributo das curvas de nível, foi necessário cotar essas curvas.

Antes de iniciar o processo de inserção das cotas, das respectivas curvas de nível, converteu-se o arquivo DGN para o formato *ShapeFile*.

Ao abrir a tabela de atributos do *ShapeFile* gerado, percebe-se que existem colunas desnecessárias. A exclusão dessas colunas, ou seja, uma limpeza nos dados facilitará tarefas futuras.

Além das colunas criadas pelo Software, a única coluna necessária para a geração do TIN será a coluna que receberá o valor das cotas. Recomenda-se nomeá-la com o codinome **cotas**.

Ao selecionar uma curva notou-se que, assim como no limite, as linhas não são contínuas, ela está dividida em vários fragmentos. Isso dificultará o processo de inserção das cotas das respectivas curvas de nível. Foi necessário unir todos os fragmentos que formam a mesma curva de nível, antes de iniciar o processo de inserção das cotas.

Para tanto, com o *ShapeFile* em edição, seleciona-se todos os fragmentos de uma mesma curva, certificando-se que todos pertençam a mesma curva de nível. Uniram-se os segmentos usando o comando **Editor/Merge**, como apresentado na Figura 6.

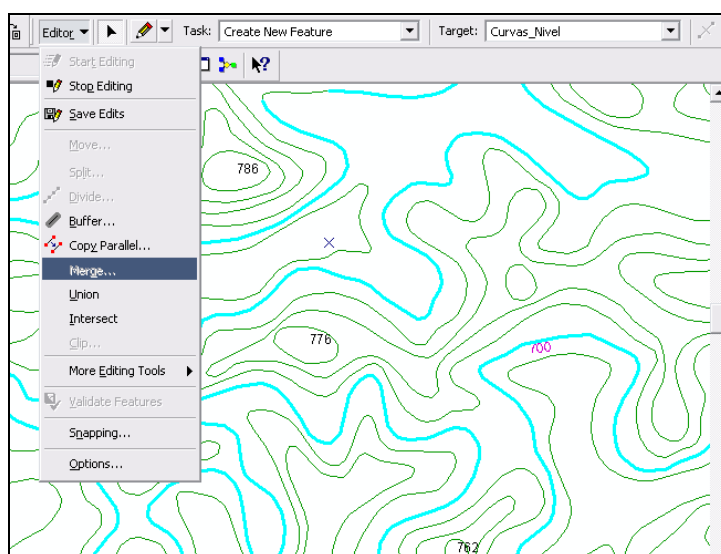


Figura 6: Edição das curvas de nível.

Esse procedimento se repetiu até que todas as curvas estivessem desfragmentadas, se apresentando de forma contínua como uma única linha.

Posteriormente exibiu-se a tabela de atributos do *ShapeFile* para que as cotas fossem inseridas (Figura 7).

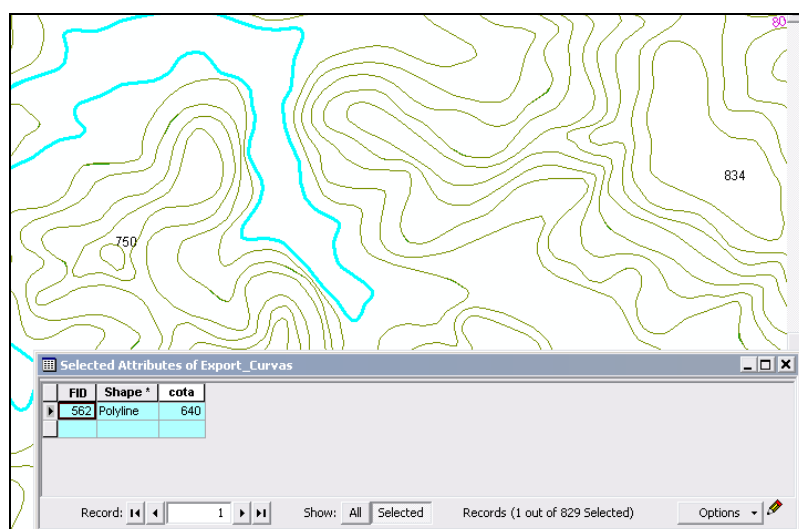


Figura 7: Inserindo de cotas nas curvas de nível.

Esse procedimento deverá ser repetido até que todas as curvas estejam cotadas.

2.3.2 Gerando o TIN

No módulo ArcMap do ArcGIS adicionou-se o tema que contém as curvas de nível devidamente preparadas, clicando no ícone **Add Data**. No menu **Tool/Extensions** deve-se selecionar as opções **3D Analyst** e **Spatial Analyst**, também deve-se habilitar as barras de ferramentas referentes a essas extensões, para habilitá-las clicou-se com o botão direito do mouse sobre a barra de ferramentas selecionando as opções **3D Analyst** e **Spatial Analyst**, (Figura 8) segundo os passos descritos a seguir:

- No menu **Spatial Analyst**, clicou-se sobre a opção **Options**;
- Na caixa de diálogos **Options**, clicou-se sobre a guia **General**;
- Na caixa de entrada **Working directory**, clicou-se na pasta amarela e indicou-se o diretório de trabalho;
- No dropdown da opção **Analysis mask**, selecionaram o shapfile que contém o limite do município em formato polígono. Para que os processamentos realizados a partir de agora sejam cortados em relação ao limite do município Senador Firmino;

- Clicou-se sobre a guia **Extent**, selecionaram o ShapeFile que contém as curvas de nível;
- Clicou-se sobre a guia **Cell Size**. Inseriu-se o valor 10.

Após a interpolação dos dados espaciais, as imagens matriciais resultantes foram representadas por células com resolução espacial de 10 metros. É importante ressaltar que a resolução espacial das células depende da escala cartográfica de trabalho, pois quanto menor o valor da resolução espacial, menor será o erro médio quadrado e maior será o tempo de processamento computacional, necessitando de um computador de melhor qualidade, pois as imagens resultantes irão ocupar mais espaço em disco, além de necessitar de um bom processador e de mais memória RAM.

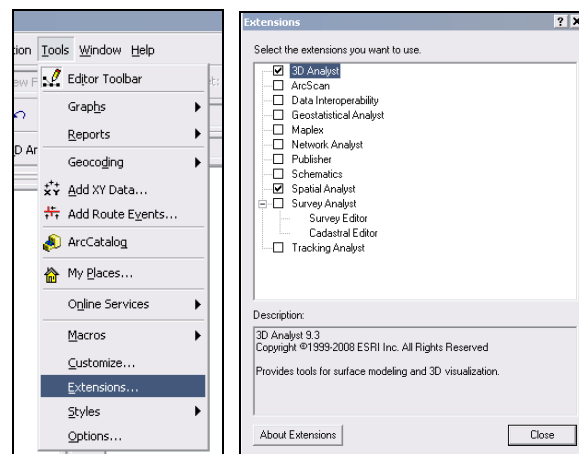


Figura 8: Habilitando extensões.

Após configurar as opções do **Spatial Analyst**, pode-se então iniciar a análise topográfica do município Senador Firmino.

O próximo passo foi a interpolação das curvas de nível (com equidistância vertical de 20 em 20 metros) com o intuito de gerar uma estrutura de rede irregular de triângulos ou TIN.

No menu **3D Analyst**, apontou-se para **Create/Modify TIN** e clicou-se sobre a opção **Create TIN From Features**, seguindo os passos a seguir:

- Na janela **Create TIN From Features**, marcaram o ShapeFile que contém as curvas;
- No dropdown da opção **Height Source**, escolheram o campo que contém os valores das cotas;
- No dropdown da opção **Triangulate as**, escolheram o campo **hard clip**;

- Na janela **Create TIN From Features**, marcaram o *ShapeFile* que contém o polígono limite do município;
- No *dropdown* da opção **Triangulate as**, escolheram o campo **soft clip**;
- Na caixa de entrada **Output TIN**, digitaram o nome desejado para o TIN dentro do diretório de trabalho.

Para desabilitar a opção de visualização das curvas sobre o TIN abre-se a opção propriedades da grade triangular TIN, na caixa de diálogos **Layer Properties**, na guia **Symbolology**, no painel **Show**, desmarca-se a opção **Edge type**.

2.3.3 Gerando o MDT

Para gerar o MDT a partir do TIN clicou-se sobre o menu **3D Analyst**, apontou-se para **Convert** e clicou-se sobre a opção **TIN to Raster**.

Na caixa de diálogos **Convert TIN to Raster**, selecionou-se TIN no *dropdown* **Input TIN**.

No *dropdown* da opção **Atributte**, selecionou-se **Elevation**.

Na caixa de entrada **Output raster**, digitou-se o nome desejado, MDT no caso. Informaram o diretório de trabalho, **Ok**.

2.4 Geração do MDT Utilizando Softwares Gratuitos

O SPRING é um SIG (Sistema de Informações Geográficas), ou seja, é um aplicativo com técnicas matemáticas e computacionais, que permite a manipulação e processamento de dados geográficos e imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais. Esse software foi desenvolvido para aplicações em:

- Agricultura,
- Floresta,
- Gestão Ambiental,
- Geografia,
- Geologia,
- Planejamento Urbano e Regional.

Porém os formatos de arquivos aceitos por ele é bastante limitado, e o DGN é mais um dos formatos de arquivos não manipuláveis por esse software. Levando-se em conta o objetivo principal desse trabalho, procurou-se outro aplicativo capaz de realizar essa conversão, de DGN para *ShapeFile*, deparou-se com o software *Kosmos*.

2.4.1 Conversão dos Dados Utilizando o KOSMOS 1.2.1

De posse dos dados secundários, utilizou-se o aplicativo *Kosmos*, que possibilita além da conversão de arquivo DGN para *ShapeFile*, também a edição das curvas de nível. O procedimento usado foi o seguinte:

- a) Importação dos dados secundários para o *Kosmos*;
- b) Habilitação da extensão editar;
- c) Acrescentou-se um campo de atributo com o nome de cotas, na tabela de atributos do arquivo *polyline*, da cidade em questão;
- d) Após editado as curvas de nível e cotado cada uma delas, fez-se a conversão do arquivo DGN para o formato *ShapeFile*;
- e) Criou-se a partir do arquivo limite do município, um polígono do limite municipal e converteram-se também esses arquivos para a extensão *ShapeFile*.
- f) Recortou-se as curvas de níveis cotadas, através do arquivo limite existente nos dados secundários (Figura 9).

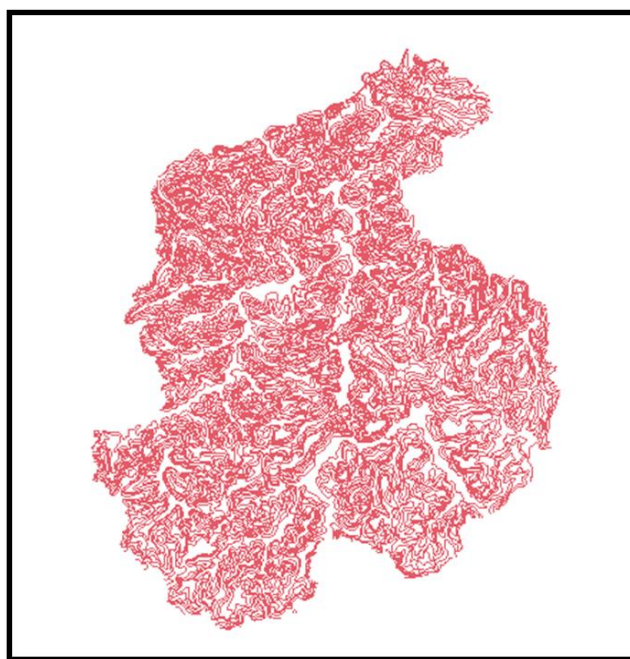


Figura 9: Curvas de nível a importar para o SRING.

2.4.2 Processo de geração do MDT no SPRING 5.0.5

Após convertidos os arquivos no aplicativo *Kosmos*, pode-se importá-los para o software SPRING, sendo necessário primeiramente a criação de um Banco de Dado e o projeto, onde é definido o retângulo envolvente (Tabela 1), e posteriormente a definição de alguns “Modelos de Dados” (Figura 10). Foram criados modelos de dados do tipo:

- MNT, que abrigaram as curvas de nível e os polígonos;
- Temáticos, para abrigar os polígonos e limites do município;
- Imagem, para abrigar a imagem gerada a partir do TIN;

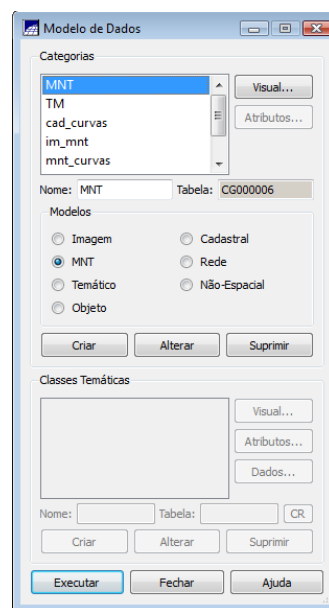


Figura 10: Criando modelos de dados

Tabela 1: Limites inferior e superior do retângulo envolvente

	Limite inferior	Limite superior
X	689.000,000	705.000,000
Y	7.678.000,000	7.698.000,000

Importou-se os dados definindo a escala do arquivo, o sistema de projeção, tipos de modelos de dado, a unidade e o nome do plano de informação onde esse arquivo será visualizado.

O próximo passo foi geração da grade retangular a partir das amostras de MNT (curva de nível) com as seguintes características, tamanho de pixel 20 por 20 metros com 32 bits, e o método de interpolação media ponderada/cota/quad. Para o

restante dos parametros foi deixado o default (Figura 11). O aplicativo cria além da grade retangular uma imagem que trás os valores dos níveis de cinza de cada pixel.

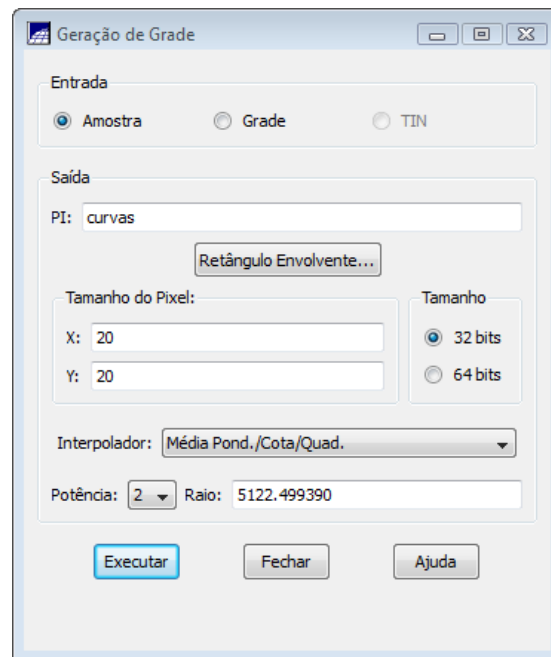


Figura 11: Geração da grade retangular

Uma vez que a imagem gerada envolve toda a grade retangular e não somente a área de interesse (limite do município), foi necessário fazer um recorte usando o limite do município. Para isso aplicou-se os seguintes passo:

1º passo: importar o arquivo limite definindo-o como modelo de dado temático, na escala de 1/50.000, unidade km, projeção UTM – *datum* SAD69 e o plano de informação denominado limite;

2º passo: ir ao modelo de dados e criar uma classe que será usado para o recorte;

3º passo: habilitar a edição vetorial e associar a classe, criando um polígono (Figura 12);

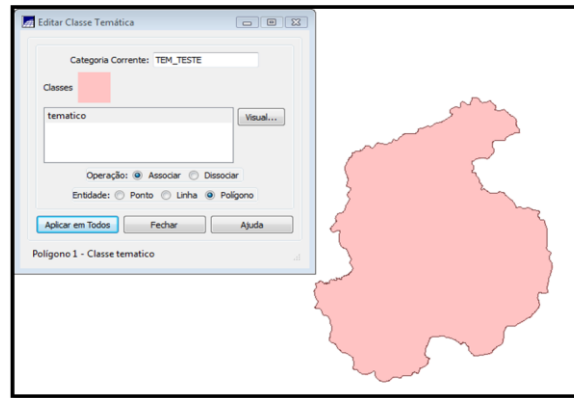


Figura 12: Associando a classe criada com o limite importado

4º passo: converter o polígono que é vetorial para o formato matricial (Figura 13 e 14).

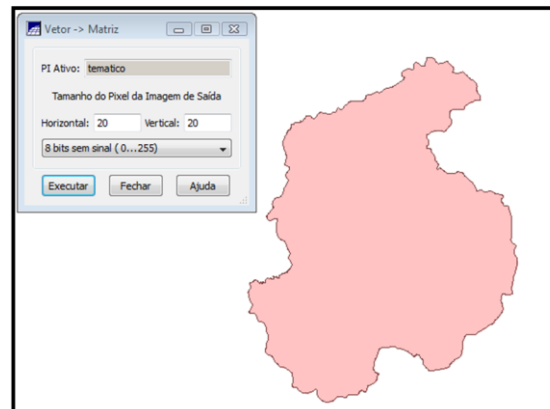


Figura 13: Convertendo a estrutura vetorial para matricial.

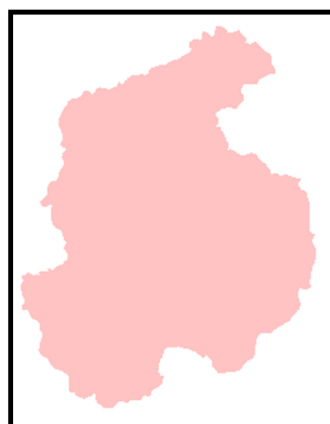


Figura 14: Estrutura matricial.

5º passo: recorte da imagem gerada pela grade retangular a partir do plano de informação que contém o polígono. Ir ao menu ferramentas, habilitar **recortar plano de informação** (Figura 15).

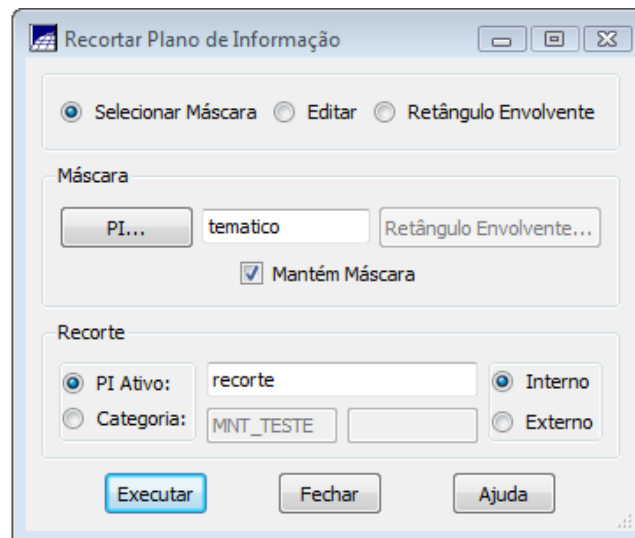


Figura15: Parâmetros definidos para o recorte.

Para geração de uma imagem MNT em níveis de cinza foram usados os parâmetros de acordo com a Figura 16.

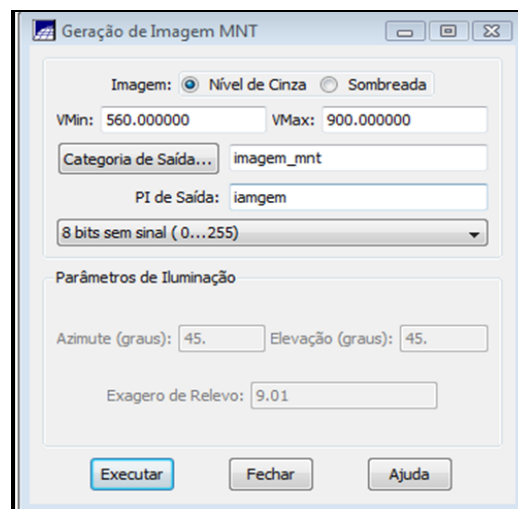


Figura16: Definição dos parâmetros.

3 RESULTADOS

A apresentação dos resultados será dividida em duas partes. A primeira apresentará os resultados obtidos pelo aplicativo comercial ArcGIS 9.3.

A segunda parte apresentará os resultados obtidos pelo aplicativo gratuito SPRING 5.0.5.

3.1 Resultados Do Aplicativo ArcGIS 9.3

A Figura 17 apresenta a rede irregular de triângulos (TIN) gerada utilizando o software proprietário ArcGIS 9.3. A Figura 18 apresenta o MDT gerado utilizando também o software ArcGIS 9.3.

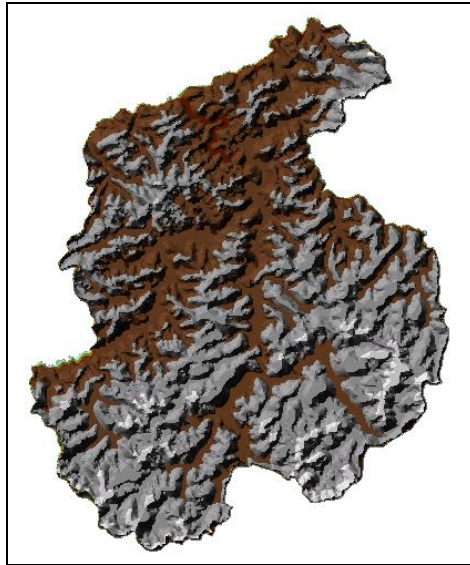


Figura 17: TIN.

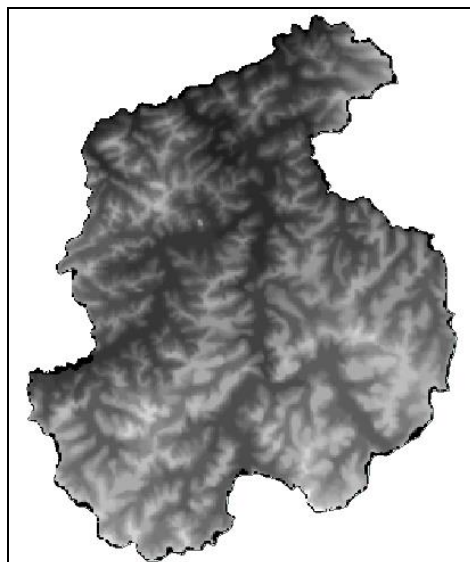


Figura 18: MDT.

3.2 Resultados do Aplicativo Spring 5.0.5

A Figura 19 apresenta a grade regular gerada com as amostras de curvas de nível utilizando o software livre Spring 5.0.5. As Figuras 20, 21 e 22 apresentam os produtos intermediários gerados até chegar ao MDT, utilizando também o software Spring 5.0.5.

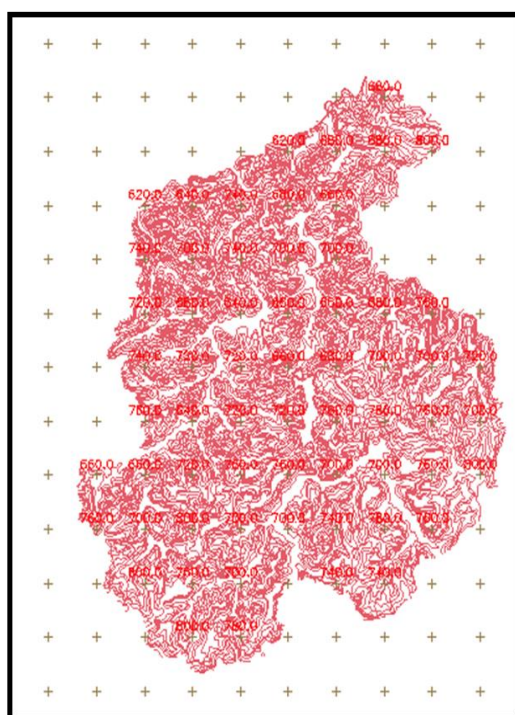


Figura 19: Grade regular gerada, com as amostras de curvas de nível.

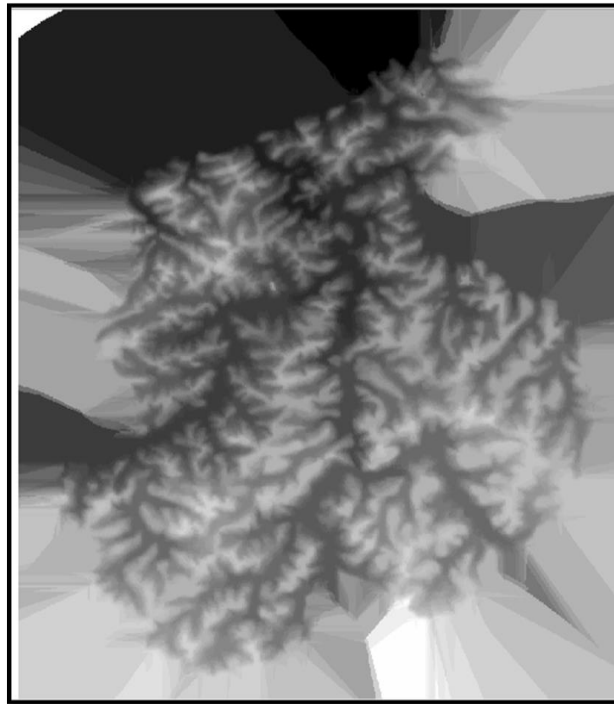


Figura 20: Imagem gerada através das curvas de nível

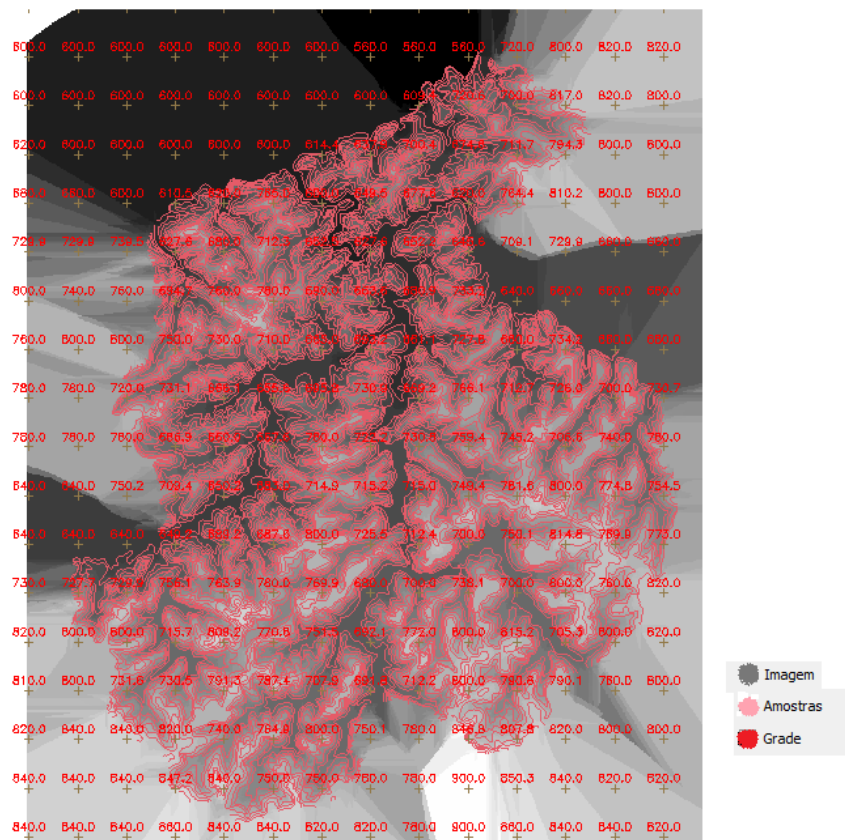


Figura 21: Grade regular criada com a sobreposição da curva de nível (amostras) e imagem TIN criada no processo.

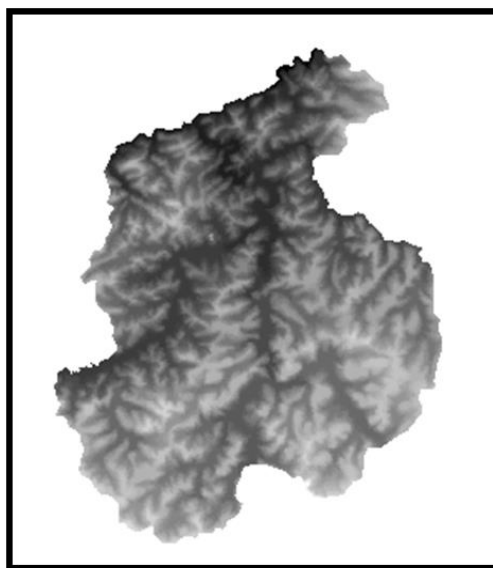


Figura 22: Resultado final da geração do MDT

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante ressaltar que essa modelagem utilizando uma malha regular e/ou o TIN, é apenas uma possibilidade de geração de modelos digitais do terreno. Por meio do MDT é possível realizar ainda fatiamentos da altimetria e associá-lo com classes temáticas, gerando mapas de declividade, perfis do terreno, plantas com curvas de nível, dentre outros sub-produtos georreferenciados, permitindo o cruzamento destes dados para a geração de mapas fundamentais à gestão e ao planejamento territorial.

A área de aplicação deste modelo se torna abrangente na medida em que o usuário vai adquirindo novos métodos de implementação e aplicação do Sistema de Informação Geográfica para fins específicos de planejamento territorial.

Os planos diretores municipais, o planejamento de uso e ocupação do solo, o lançamento do sistema viário e das vias estaduais/federais que cortam o município, cenários futuros para diferentes horizontes, se tornam mais próximos de serem obtidos, a partir dos MDTs gerados para os limites municipais.

Os programas gratuitos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, apresentaram limitações na importação dos arquivos iniciais provenientes do formato DGN de forma a permitir a geração do MDT, conforme descrito nas seções anteriores. Diante das dificuldades encontradas, sugere-se maior investimento em estudos

direcionados á melhoria dos programas gratuitos, de forma que eles se apresentem com interface mais amigável e mais eficientes em suas funções de geração do MDT, foco deste trabalho.