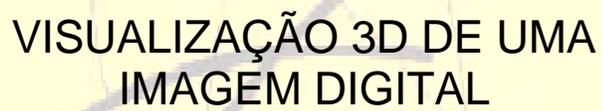




UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**Faculdade de Ciências e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas**

The central graphic features a stylized atomic model with three elliptical orbits in shades of grey and blue. At the center of these orbits is a small, glowing blue and white globe representing Earth. The entire graphic is set against a light yellow background.

**VISUALIZAÇÃO 3D DE UMA
IMAGEM DIGITAL**

Giovana Angélica Ros

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Presidente Prudente
2001

GIOVANA ANGÉLICA ROS

VISUALIZAÇÃO 3D DE UMA IMAGEM DIGITAL

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas (Área de Concentração: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais).

Orientador: Prof. Dr. *Aluir Porfírio Dal Poz*

Co-orientador: Prof. Dr. *Júlio K. Hasegawa*

PRESIDENTE PRUDENTE

2001

COMISSÃO EXAMINADORA

Jorge Antonio Centeno – UFPR - PR

Antonio Maria Garcia Tomaselli – Unesp - SP

Aluir Porfírio Dal Poz – Unesp - SP

PRESIDENTE PRUDENTE, 31 DE JULHO DE 2001

Ao meu pai Luciano, à minha mãe Eunice, aos meus irmãos Renato e Alex, às minhas cunhadas Regina e Adriana, e à minha linda sobrinha Vitória pelo carinho, incentivo e compreensão nos momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Aluir e Júlio, pela atenção e paciência.

Também agradeço a:

- Todos os professores;
- Ricardo Barbosa e professor João Fernando por me cederem os dados necessários para o desenvolvimento deste projeto;
- Almir, Helien, Adriana, Maia, Ítalo, pela amizade, incentivo e atenção;
- Todos os colegas do curso;
- Enfim a todos.

SUMÁRIO

	Página
FOLHA DE ROSTO.....	I
TERMO DE APROVAÇÃO.....	II
DEDICATÓRIA.....	III
AGRADECIMENTOS.....	IV
SUMÁRIO.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VII
RESUMO.....	IX
ABSTRACT.....	X
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INTRODUTÓRIAS.....	1
1.2 OBJETIVOS DO PROJETO.....	4
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2 TÉCNICAS DE TONALIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE E VISUALIZAÇÃO 3D.....	5
2.2.1 Transformações Geométricas.....	6
2.2.1.1 Translação.....	7
2.2.1.2 Rotação.....	7
2.2.1.3 Transformação de Escala.....	8
2.2.2 Projeções.....	9
2.2.2.1 Projeção Ortográfica.....	11
2.2.2.2 Projeção Axométrica.....	14
2.2.2.3 Projeção Oblíqua.....	15
2.2.2.4 Projeção Perspectiva.....	15
2.2.3 Eliminação de Linhas e Superfícies Ocultas.....	16
2.2.3.1 Algoritmo de Memória de Profundidade (<i>Z-buffer</i>).....	17
2.2.4 Modelos de Iluminação.....	20
2.2.5 Modelos de Tonalização.....	25
2.2.5.1 Tonalização Facetada.....	26
2.2.5.2 Tonalização de <i>Gouraud</i>	27
2.2.5.3 Tonalização de <i>Phong</i>	30
2.3 Técnicas para Obtenção do Tom de Cinza de um Vértice do MDT.....	31
2.3.1 Projeção das Coordenadas de um Vértice do MDT para o Referencial Fotogramétrico.....	32
2.3.2 Transformação do Referencial Fotogramétrico para o Centro da Imagem.....	34

2.3.3	Transformação de Coordenadas de um Ponto do Referencial com Origem no Centro da Imagem para o Referencial Digital.....	35
2.3.4	Reamostragem.....	36
2.3.4.1	Vizinho Mais Próximo.....	37
2.3.4.2	Bilinear.....	38
2.3.4.3	Convolução Cúbica.....	39
3	– METODOLOGIA PARA VISUALIZAÇÃO 3D DE UMA IMAGEM DIGITAL.....	42
3.1	INTRODUÇÃO.....	42
3.2	PRINCÍPIO DA VISUALIZAÇÃO 3D DE UMA IMAGEM DIGITAL.....	43
3.3	FLUXOGRAMA.....	45
4	– DESENVOLVIMENTO ALGORÍTMICO E COMPUTACIONAL....	46
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	46
4.2	VISÃO GERAL DO SISTEMA.....	46
4.3	TONALIZAÇÃO FACETADA.....	48
4.4	TONALIZAÇÃO DE <i>GOURAUD</i>	52
5	– RESULTADOS E ANÁLISES.....	55
5.1	INTRODUÇÃO.....	55
5.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	55
5.2.1	Dados Artificiais.....	56
5.2.2	Dados da Maquete.....	57
5.2.3	Dados Reais.....	60
5.3	EXPERIMENTO COM DADOS ARTIFICIAIS.....	64
5.4	EXPERIMENTO COM DADOS REAIS.....	68
5.4.1	Dados de uma Maquete.....	68
5.4.2	Dados de uma Imagem Aérea.....	73
5.4.2.1	Imagem Aérea com MDT Real.....	73
5.4.2.2	Imagem Aérea com MDT Sintético.....	75
6	- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

LISTA DE FIGURAS

	Página
2.1 Hierarquia das projeções (Rogers & Adams, 1985).....	10
2.2 (a) Projeção paralela, (b) Projeção Perspectiva.....	11
2.3 Projeção ortográfica de várias vistas.....	13
2.4 Pontos visíveis a partir de um observador.....	18
2.5 Triângulo atravessando um plano.....	19
2.6 Ângulo de incidência entre o vetor da direção da luz (L) e a normal à superfície (N)- Reflexão difusa.....	23
2.7 Reflexão especular.....	24
2.8 Tonalização Facetada (Rogers, 1989).....	26
2.9 Tonalização de <i>Gouraud</i> (Rogers, 1989).....	27
2.10 Média entre vértices.....	28
2.11 Interpolação de tonalização de <i>Gouraud</i> (Rogers, 1989).....	28
2.12 Comparação de técnicas de tonalização (a) Facetada, (b) <i>Gouraud</i> e (c) <i>Phong</i> (Rogers, 1989).....	31
2.13 Princípio de colinearidade.....	32
2.14 Relação entre os referenciais digital (l,c) e com origem no centro da imagem (x_c, y_c).....	36
2.15 Interpolação pelo vizinho mais próximo (Richards, 1986).....	37
2.16 Interpolação bilinear (Richards, 1986).....	38
2.17 Interpolação por convolução cúbica (Richards, 1986).....	40
3.1 Princípio da visualização 3D de uma imagem digital.....	44
3.2 Fluxograma do processo de visualização 3D.....	45
4.1 Tela do sistema.....	47
4.2 Processo de identificação dos triângulos na malha regular....	48
4.3 Algoritmo para identificar/armazenar os números dos triângulos, os vértices e suas respectivas coordenadas.....	49
4.4 Demonstração das interpolações lineares entre coordenadas dos vértices e entre as arestas.....	50
4.5 Análise de vizinhança de triângulo que utilizam o mesmo vértice.....	53
4.6 Algoritmo para encontrar a média das normais de todos os vértices.....	53
5.1 Imagem digital artificial.....	56
5.2 Curvas de nível do relevo artificial.....	57
5.3 Imagem digital original da maquete.....	59
5.4 MDT da maquete correspondente a região selecionada na (figura 5.3).....	59
5.5 Imagem digital original (real).....	61
5.6 Malha regular interpolada.....	62
5.7 Curvas de nível do relevo simulado.....	63
5.8 (Resultado da imagem artificial) Ângulo de visualização de 60° em torno do eixo x , 5° em torno do eixo y e 90° em torno	

do eixo z. a) tonalização facetada; b) <i>Gouraud</i> ; e c) modelo aramado.....	64
5.9 (Resultado da imagem artificial) Ângulo de visualização de 70° em torno do eixo x , 45° em torno do eixo y e 0° em torno do eixo z. a) tonalização facetada; b) <i>Gouraud</i> ; e c) modelo aramado.....	65
5.10 (Resultado da imagem artificial) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x , 30° em torno do eixo y e 30° em torno do eixo z. a) tonalização facetada; b) <i>Gouraud</i> ; e c) modelo aramado.....	67
5.11 (Resultado da imagem da maquete) Ângulo de visualização de 10° em torno do eixo x e -45° em torno do eixo y. a) tonalização facetada; b) <i>Gouraud</i> ; e c) modelo aramado.....	69
5.12 (Resultado da imagem da maquete) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x, 45° em torno do eixo y e 45° em torno do eixo z. a) tonalização facetada; b) <i>Gouraud</i> ; e c) modelo aramado.....	70
5.13 (Resultado da imagem da maquete) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x, 5° em torno do eixo y e 0° em torno do eixo z. a) tonalização facetada; e b) <i>Gouraud</i>	71
5.14 (Modelo armado da imagem da maquete) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x e 5° em torno do eixo y.....	72
5.15 (Resultado da imagem real) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x e 15° em torno do eixo y. a) Tonalização facetada; b) <i>Gouraud</i> ; e c) modelo aramado.....	74
5.16 (Resultado da imagem real) Ângulo de visualização de 60° em torno do eixo x, 5° em torno do eixo y e 90° em torno do eixo z. a) tonalização facetada; b) <i>Gouraud</i> ; e c) modelo aramado.....	75
5.17 (Resultado da imagem real) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x, 45° em torno do eixo y e 0° em torno do eixo z. a) tonalização facetada; b) <i>Gouraud</i> ; e c) modelo aramado.....	76
5.18 (Resultado da imagem real) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x, 5° em torno do eixo y e 0° em torno do eixo z. a) Tonalização facetada; b) <i>Gouraud</i> ; e c) modelo aramado.....	77

ROS, G.A. Visualização 3D de uma imagem digital. Presidente Prudente, 2001, 84p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

O projeto tem por finalidade integrar técnicas de Computação Gráfica com as de Fotogrametria para obter como resultado final a visualização 3D de uma imagem digital. A partir do DTM regular definido por pontos que se conectam formando uma malha triangular, a tonalização é aplicada triângulo-a-triângulo utilizando um modelo de iluminação, juntamente com o método de tonalização. Para tanto, é necessária a transformação das coordenadas do DTM para as coordenadas fotogramétricas, através da equação de colinearidade, e dessas para as correspondentes coordenadas digitais. Como estas coordenadas não coincidem com as coordenadas de pixel é necessário a aplicação de um método de reamostragem para obter os tons de cinza dos pontos transformados. Esses tons de cinza são usados pelo modelo de iluminação para calcular as intensidades de iluminação nos vértices do MDT, que por sua vez são utilizados pelo modelo de tonalização para tonalizar o MDT. Finalmente, um modelo de projeção é utilizado para obter a sensação 3D no plano 2D. Os resultados obtidos foram satisfatórios, apresentando similaridade entre os métodos de tonalização e a representação da superfície.

Palavras-chaves: Tonalização, Visualização Tridimensional, Imagem Digital.

ABSTRACT

The main purpose of this research is to integrate techniques of both Computer Graphic and Photogrammetry, in order to obtain as a final result the 3D visualization of a digital image. Starting from regular DTM defined by points connected in such a way that they can form a triangular mesh, the shading is applied triangle-to-triangle using an illumination model, together with the shading method. First it is necessary to transform the DTM coordinates through photogrammetric coordinates or collinearity equation, and then the results to digital coordinates. As these last coordinates do not coincide with pixel coordinates, a resampling technique is needed to get gray levels of computed coordinates. The interpolated gray levels are the basic input of the illumination model, which in turn supplies illumination intensities for the shading method, allowing the DTM to be shaded. Finally, a projection model is used to obtain 3D sensation onto 2D plane. The obtained result was satisfactory, showing similarity between the methods of shading and surface rendering.

Keywords: Shading, Three-Dimensional Viewing, Digital Image.

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INTRODUTÓRIAS

A visualização tridimensional tem sido muito utilizada em alguns meios, dentre eles as telas de cinema e mais ainda o mundo da informática. A visualização tridimensional é obtida pelo ser humano através da percepção do sistema nervoso e psicológico, assim dando uma sensação 3D ou também referenciada como visualização tridimensional (Gonzales & Woods, 1993).

A visualização tridimensional compreende um conjunto de técnicas que atende à particularidade de acordo com a área de desenvolvimento. Estas áreas podem ser:

Medicina – A obtenção de imagens realísticas que tem como objetivo auxiliar na visualização, baseada em imagens, de órgãos do corpo humano, capturadas por tomografia computadorizada, ultrassonografia, ressonância magnética e até pela endoscopia (Okatani & Deguchi, 1997), (Geiger, 1993). A mais recente utilização da visualização tridimensional de imagens digitais é no acompanhamento do crescimento de bebês, podendo até ser comparado se o mesmo se parecerá com o pai ou a mãe. Além da visualização médica, técnicas de tomografia computadorizada por raio X podem ser utilizadas em outras aplicações como: análise não destrutiva de materiais, arqueologia e fluidodinâmica.

Geologia – Simulações de reservatórios (petróleo) hoje em dia já podem ser oferecidos como suporte à área de geologia, como base para a simulação de processos em geologia e, em particular, o uso de estruturas de dados topológicas para representar subdivisões espaciais em modelagem e visualização de geologia estrutural. Através desses dados é possível obter a reconstituição de uma seção geológica para o seu estado indeformado, de forma balanceada, o que permite ao geólogo ou geofísico melhorar substancialmente a interpretação estrutural de seções geológicas, além de eliminar situações geológicas impossíveis, através da visualização tridimensional (<http://www.tecgraf.puc-rio.br/scripts/cgilua/princp.htm>).

Cartografia – Em Cartografia, mais especificamente em Fotogrametria, várias técnicas (por exemplo: anaglifo, polarização, estereoscopia, cintilamento) são usadas na fotointerpretação e na extração de informações métricas (Mikhail, et al, 2001). Uma técnica alternativa e não muito explorada em cartografia pode ser o uso de softwares computacionais, que através da projeção de uma imagem sobre um MDT (Modelo Numérico de Terreno) produzem a imagem 3D¹. Contudo dado sua semelhança geométrica com a ortoimagem convencional ou 2D, poderia também ser denominado de ortoimagem 3D. Entretanto, esta agrega a possibilidade de se realizar medidas 3D (e.g., pontos, feições, distâncias), auxiliadas por visualizações 3D

¹ A projeção de uma imagem sobre um MDT (Modelo Numérico de Terreno) é denominado nesta pesquisa de imagem 3D.

(tridimensionais), a partir de múltiplos pontos de vista. Portanto, uma imagem 3D é uma forma alternativa às formas convencionais de visão estéreo, já citadas no parágrafo anterior. É também uma alternativa ao processo de monorestituição proposto por Makarovic (1973), que possui como desvantagem a necessidade de se realizar observações monoscópicas ou 2D sobre uma imagem. Ao contrário, com uma imagem 3D, todas as observações podem ser realizadas tridimensionalmente. Por último, uma outra aplicação seria na atualização cartográfica, mediante o registro de um mapa sobre a imagem 3D.

1.2 OBJETIVOS DO PROJETO

Este trabalho tem por objetivos:

- Estudar técnicas de Computação Gráfica para a tonalização e visualização de superfícies;
- Integrar as técnicas de tonalização e visualização de superfícies com técnicas fotogramétricas, a fim de obter a visualização tridimensional de uma imagem digital; e
- Avaliar experimentalmente (visualmente) os resultados obtidos.

1.3 ESTRUTURA DO PROJETO

O capítulo 2 deste trabalho apresenta uma revisão de algumas técnicas de tonalização de superfície, tais como: transformação de escala, translação, rotação, projeção, algoritmo de eliminação de superfície escondida, métodos de tonalização de superfícies e também técnicas para obtenção do tom de cinza de uma imagem digital.

No capítulo 3 é descrita a metodologia adotada para o desenvolvimento desta pesquisa.

No capítulo 4 são descritos os detalhes de implementação do sistema desenvolvido.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com a utilização das técnicas de tonalização e visualização implementadas.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas algumas conclusões que foram obtidas com a realização deste trabalho, além de algumas recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar algumas técnicas que serão utilizadas no desenvolvimento da metodologia de visualização (capítulo 3).

As seções seguintes apresentam as técnicas que compreendem o processo de tonalização de superfície e a visualização 3D da mesma (seção 2.2), e também as técnicas para obtenção dos tons de cinza na imagem digital (seção 2.3).

2.2 TÉCNICAS PARA TONALIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE E VISUALIZAÇÃO 3D

Para que a tonalização de uma superfície e visualização tridimensional da mesma ocorra, existem algumas técnicas que devem ser avaliadas, tais como: transformação tridimensional, projeção, algoritmo de eliminação de superfície oculta, modelo de iluminação, modelo de tonalização, etc. As transformações geométricas são responsáveis pela escala, rotação ou translação do modelo. Após esse processo, a tonalização é realizada triângulo-a-triângulo.

A intensidade dos pontos no interior do polígono é calculada através de interpolações dos vértices e das arestas do triângulo. Em seguida, partes visíveis da superfície são identificadas através do algoritmo de eliminação de superfícies ocultas. Finalmente visualiza-se o objeto 3D (superfície) através de sua projeção (ortogonal) no plano de visualização, que é a tela do computador.

Estas várias técnicas citadas serão abordadas nas próximas subseções.

2.2.1 TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS

Transformações geométricas são aquelas que modificam a posição, a dimensão e a forma de objetos tridimensionais (Persiano & Oliveira, 1989).

Segundo Cunha et al. (1987) a representação de um ponto bidimensional com coordenadas tridimensionais, ou a representação de um ponto (n) dimensional por um ponto ($n+1$) dimensional é denominada representação por coordenadas homogêneas.

Na próxima seção são apresentadas algumas das principais transformações geométricas utilizando a representação por coordenadas homogêneas.

2.2.1.1 TRANSLAÇÃO

A translação pode ser especificada por uma matriz de translação tridimensional, que determina como o objeto deve ser deslocado em cada uma das três direções.

Em uma representação por coordenadas homogêneas tridimensionais, um ponto é transladado da posição $P=(x,y,z)$ para a posição $P'=(x',y',z')$ com a operação apresentada em (1):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Os parâmetros t_x , t_y e t_z são respectivamente as translações em relação às direções x , y , z .

2.2.1.2 ROTAÇÃO

Para gerar uma transformação de rotação em um objeto, deve ser designado um eixo de rotação, sobre o qual o objeto será rotacionado, além de um ângulo de rotação.

Rotação em torno do eixo z

O parâmetro q especifica o ângulo de rotação. Na forma de coordenadas homogêneas, a equação da rotação tridimensional no eixo z é expressa como:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Rotação em torno do eixo x

Pode ser escrita em coordenadas homogêneas como:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Rotação em torno do eixo y

Pode ser escrita em coordenadas homogêneas como:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2.1.3 TRANSFORMAÇÃO DE ESCALA

Transformação de escala é uma operação bastante usual em computação gráfica. Ela permite compor um objeto, redimensionando horizontal ou verticalmente cada um de seus elementos (Persiano & Oliveira, 1989).

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Se os parâmetros s_x, s_y, s_z não são iguais, as dimensões relativas no objeto são alteradas.

2.2.2 PROJEÇÕES

Projeções visam obter representações bidimensionais de objetos tridimensionais (Hear & Baker, 1997).

A apresentação de objetos por meio de projeções é amplamente utilizada em engenharia, desenhos arquitetônicos, desenhos artísticos, etc. Para tanto a apresentação de objetos tridimensionais numa superfície de exibição (por exemplo, a tela do computador), requer o emprego de transformações tridimensionais (espaciais), tais como: rotação, translação e escala (Persiano & Oliveira, 1989), com o propósito de:

- preservar o máximo possível, na representação 2D as medidas de elementos geométricos da imagem tridimensional, tais como, o comprimento de arestas e a amplitude dos ângulos por elas formados;
- criar um efeito visual similar ao de uma fotografia, introduzindo um certo grau de realismo na representação 2D.

A visualização de um objeto 3D é definida pela projeção de raios (chamados linhas projetoras) emanados do centro de projeção, passando através de cada ponto do objeto e do plano de projeção, assim determinando as projeções dos pontos deste objeto (Foley et al., 1996). A figura 2.1 mostra a hierarquia das projeções.

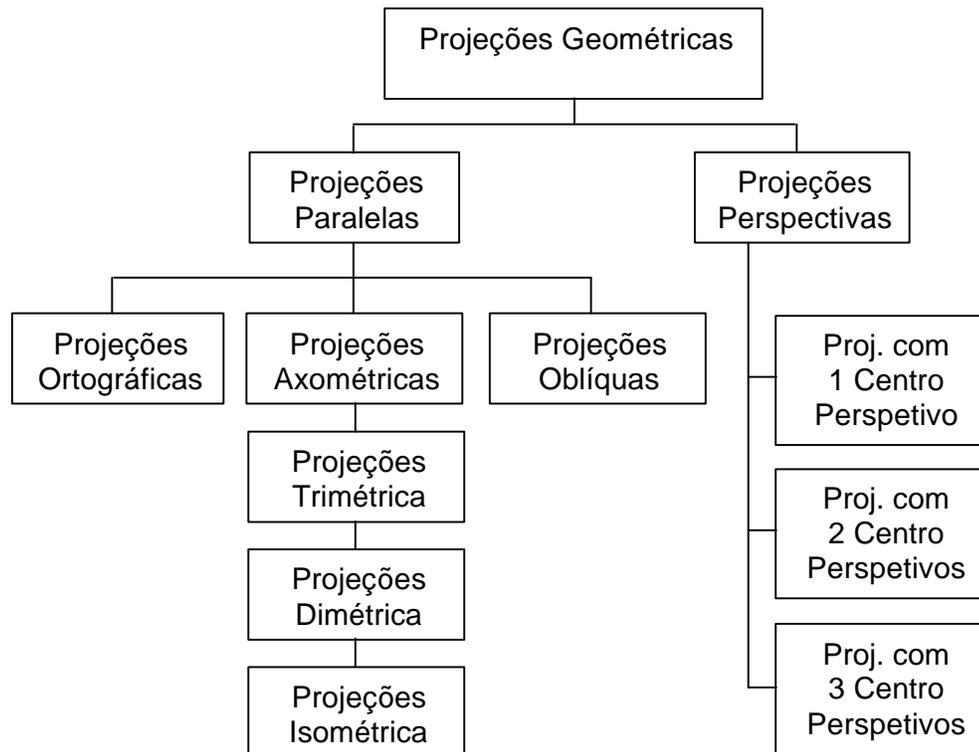


FIGURA 2.1 – Hierarquia das projeções (Rogers & Adams, 1985).

Em função da posição do CP (centro perspectivo) e da posição relativa entre o plano de projeção e as linhas projetoras, pode-se ter diferentes projeções, cada uma com suas características. Em seguida são apresentados de maneira bem sucinta os tipos de projeções, sendo dada

maior ênfase na projeção ortográfica adotada na implementação deste projeto.

Nas projeções paralelas as linhas projetoras são paralelas entre si, sendo o CP localizado no infinito. O CP localizado numa posição finita determina uma projeção perspectiva, podendo-se ter mais de um CP. O que diferencia as projeções paralelas são os modos de interseção das linhas projetoras com o plano de projeção. A figura 2.2 mostra esta comparação.

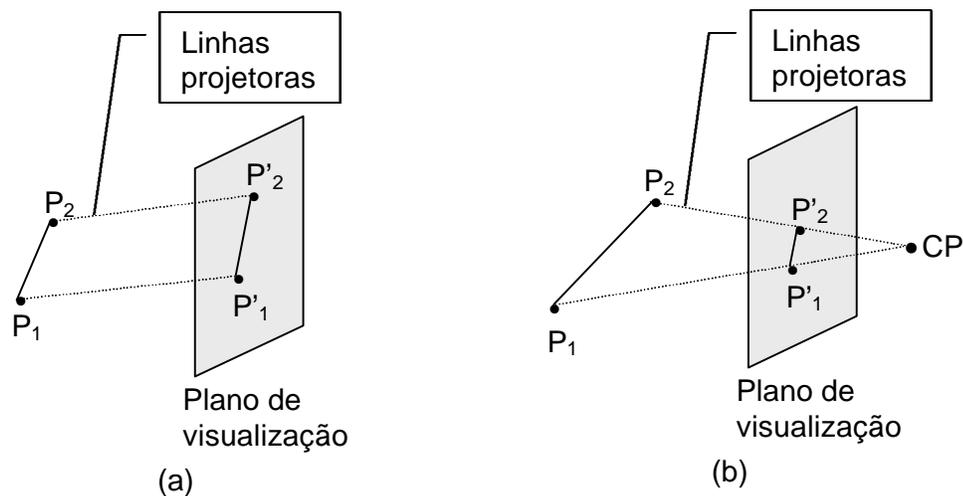


FIGURA 2.2 – (a) Projeção Paralela, (b) Projeção Perspectiva.

2.2.2.1 PROJEÇÃO ORTOGRÁFICA

Se as linhas projetoras forem ortogonais ao plano de projeção tem-se a projeção ortográfica. Geralmente os planos de projeção são os próprios planos coordenados e esta projeção permite visualizar cada uma

das faces de um determinado objeto, não permitindo ter uma visualização global do mesmo. Para suprir isso, é necessário projetar os objetos em diferentes planos, ou em suas várias vistas, como é comumente feito em aplicações de Computação Gráfica ou desenho técnico por exemplo: plantas, cortes, vistas (Hear & Baker, 1997).

As projeções ortográficas apresentam exatamente o tamanho e a forma de uma face simples do plano do objeto. As projeções ortográficas são projeções para um dos planos coordenados $x=0$, $y=0$, $z=0$. A matriz para a projeção no plano $z=0$ é:

$$P_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Analisando (6), nota-se que na terceira coluna da matriz (a coluna do z) todos elementos são nulos. Conseqüentemente, o efeito da transformação acontecerá somente nas coordenadas x e y .

Similarmente, as matrizes para as projeções nos planos coordenados $x=0$ e $y=0$ são:

$$P_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$P_Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

A combinação de reflexão, translação e rotação, seguidas pela projeção em algum dos planos se tornam interessante e importante para apresentar a sensação de visualização 3D.

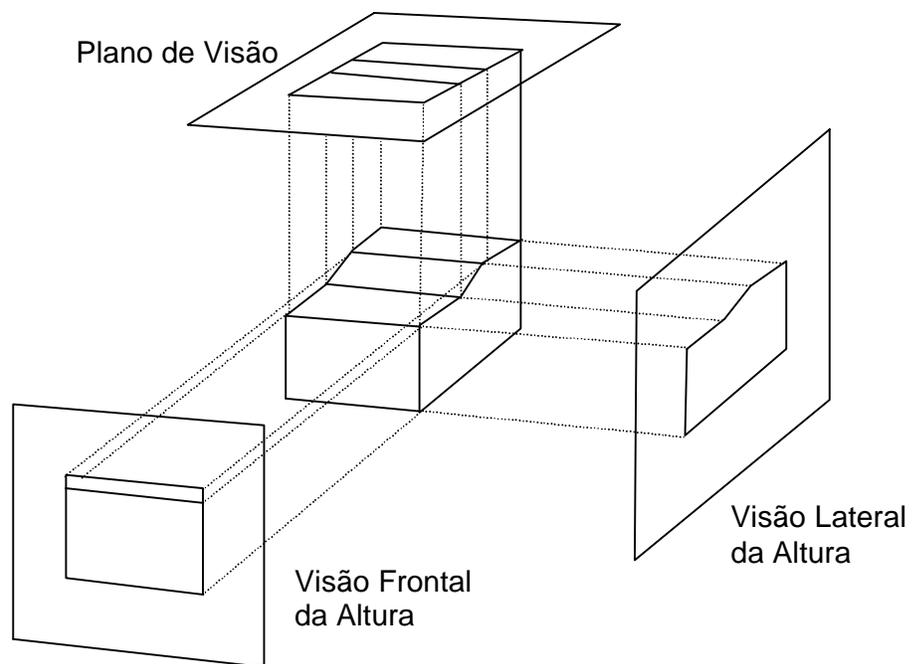


FIGURA 2.3 – Projeção ortográfica de várias vistas.

Na figura 2.3 é apresentada a projeção ortográfica em várias vistas, mas a visualização 3D somente é possível quando a projeção é realizada em vários ângulos de rotação. Por exemplo, aplicando uma rotação no

eixo x, a matriz de projeção é multiplicada pela matriz de rotação no eixo x como é apresentado em (9):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

resultando em,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.2.2.2 PROJEÇÃO AXOMÉTRICA

Nas projeções axométricas procura-se visualizar, simultaneamente, no mínimo três faces dos objetos, por meio de transformações geométricas sobre a superfície de interesse e por uma projeção no plano $z=0$. Existem três projeções axométricas de interesse: isométrica, dimétrica e trimétrica.

Verifica-se que, a menos que uma face seja paralela ao plano de projeção, uma projeção axométrica não apresentará a forma verdadeira de um objeto (Rogers & Adams, 1985).

A projeção trimétrica é formada por rotações arbitrárias, em ordem arbitrárias, sobre qualquer um ou todos os eixos de coordenadas. As projeções mais utilizadas são as axométricas, que são formadas primeiro

sobre rotações no eixo y e então no eixo x , seguidas por uma projeção paralela no plano $z=0$.

2.2.2.3 PROJEÇÃO OBLÍQUA

Na projeção oblíqua, ao contrário das projeções ortográficas e axométricas, os projetores paralelos formam um ângulo oblíquo com o plano de projeção. Nesta projeção também se tem uma visualização 3D geral dos objetos, como nas duas anteriores. A diferença é que as faces não paralelas ao plano de projeção ficam distorcidas (Foley et al., 1996).

Existem duas projeções oblíquas: a *cavalier* e a *cabinet*. A projeção *cavalier* é obtida quando o ângulo entre os projetores oblíquos e a projeção do plano formam 45° . Na projeção *cavalier* o fator de redução de escala para todas as três principais direções são iguais. A projeção *cabinet* é utilizada para corrigir essa deficiência.

Uma projeção oblíqua para a qual o fator de escala para as arestas perpendiculares ao plano de projeção é $\frac{1}{2}$ é chamada de projeção *cabinet* (Rogers & Adams, 1985).

2.2.2.4 PROJEÇÃO PERSPECTIVA

Em contraste com a projeção paralela, na transformação perspectiva as linhas paralelas convergem e o tamanho do objeto é

reduzido com o incremento da distância ao *CP*. Todos esses efeitos incrementam a percepção de profundidade ao sistema de visão humano, embora a forma do objeto não seja preservada (Foley et al., 1996).

2.2.3 ELIMINAÇÃO DE LINHAS E SUPERFÍCIES OCULTAS

Para simular a opacidade de um objeto pode-se evitar que sejam exibidas linhas ou superfícies posicionadas espacialmente atrás dele em relação a um observador. O processo de impedir a exibição dessas linhas ou superfícies é conhecido na literatura como eliminação de linhas ou superfícies ocultas.

Dois tipos de abordagem podem ser aplicadas para desenvolver o problema de eliminação de linhas ou superfícies ocultas (Hear & Baker, 1997):

1. Percorrer o conjunto de objetos de uma cena, explorar as relações geométricas que existem entre esses objetos para determinar quais são as partes visíveis de cada um e depois projetar e exibir essas partes;
2. Determinar para cada *pixel* da tela o objeto que deve fornecer os atributos de intensidade ou cor utilizados por ele.

O problema de linhas e superfícies ocultas é de grande importância na computação gráfica. A idéia geral é determinar as linhas e superfícies que não são visíveis, para uma dada posição do observador. Uma série

de algoritmos pode ser utilizada, entre eles pode-se citar: algoritmo de horizonte flutuante, algoritmo de subdivisão de Warnock, algoritmo de memória de profundidade (*Z-buffer*), algoritmo de lista de prioridades, (Rogers, 1989). A maioria desses algoritmos emprega uma estratégia de “dividir para conquistar” em que o problema global é repartido em problemas menores. Isso é feito restringindo-se o problema inicial a uma subarea da tela, a um trecho de linha ou mesmo a um *pixel*.

A rigor não se pode dizer que qualquer dos algoritmos de eliminação de linhas/superfícies escondidas prevaleça sobre os demais, em geral. Todos eles possuem vantagens e desvantagens, cabe a cada caso analisar qual se adapta melhor.

Neste projeto será estudado o algoritmo de memória de profundidade (*Z-buffer*), porque é de fácil entendimento e implementação.

2.2.3.1 ALGORITMO DE MEMÓRIA DE PROFUNDIDADE (*Z-BUFFER*)

O algoritmo de memória de profundidade trabalha no espaço-imagem e é utilizado para armazenar e comparar a profundidade do objeto que está mais à frente. O algoritmo define que um ponto $p(x_p, y_p, z_p)$ pertencente a uma superfície será visível por um observador localizado em uma posição $o(x_o, y_o, z_o)$, se nenhum outro ponto qualquer $q(x_q, y_q, z_q)$ também pertencente a uma superfície (ou até à mesma

superfície), estiver sobre a linha que liga os pontos p e o , e a distância \overline{qo} for menor que a distância \overline{po} , como mostra a figura 2.4.

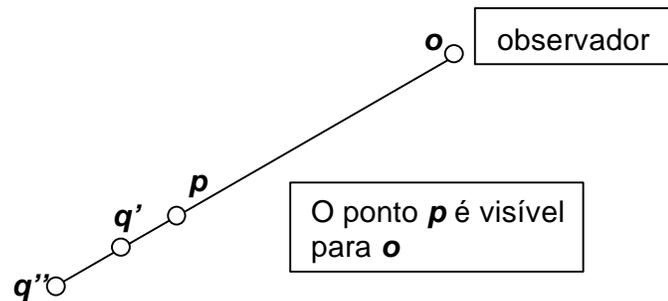


FIGURA 2.4 – Pontos visíveis a partir de um observador.

O ponto p é visível desde “ o ” se $d(p,o) < d(q,o) \forall q = o + d(p-o)$.

Utilizando a métrica euclidiana, a distância entre o ponto $p(x_p, y_p, z_p)$ e o ponto $q(x_q, y_q, z_q)$ indicada por $d(p,q)$ é dada por

$$d(p,q) = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2 + (z_p - z_q)^2} \quad (11)$$

Este algoritmo trabalha com duas matrizes. Uma (C) contendo, para cada pixel da tela, sua intensidade ou cor. Outra (D) com dimensões idênticas que guarda para cada pixel uma profundidade.

Quando o algoritmo se inicia é atribuído, a todas as posições da matriz C , o valor referente à intensidade ou a cor do fundo. Cada $D(x,y)$ recebe 0, que é o maior valor para a profundidade do objeto a ser comparada se está visível ou não.

Feito isso, o algoritmo é aplicado/processado para cada polígono que compõe o objeto da cena da seguinte forma:

- 1 – para cada ponto $p(x_p, y_p, z_p)$ calcule $z = d(p, o)$ (profundidade do ponto);
 - 1.1 – Faça com que $p_{proj}(x_{proj}, y_{proj})$ armazene o valor da projeção do ponto $p(x_p, y_p, z_p)$;
 - 1.2 – Compare z com $D(x_{proj}, y_{proj})$. Se z for maior, atualiza-se $D(x_{proj}, y_{proj})$ com esse valor e faça $C(x_{proj}, y_{proj})$ receber a informação de intensidade ou cor proveniente do ponto $p(x_p, y_p, z_p)$.

O valor de z pode ser encontrado com a aplicação da equação do plano para cada polígono da cena. Se o valor de z calculado for menor que o armazenado em $D(x_{proj}, y_{proj})$, não serão alterados os valores de D . O mesmo acontecerá para C .

A figura 2.5 apresenta um exemplo de um triângulo atravessando um plano, onde as partes do triângulo que estão visíveis são as que estão à frente do plano.

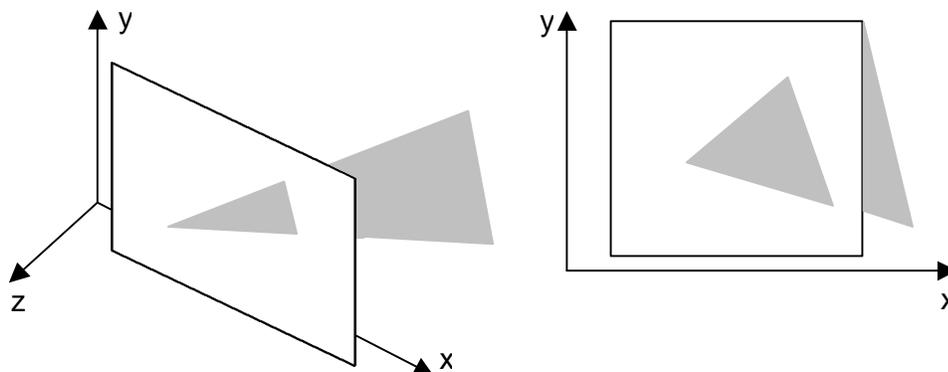


FIGURA 2.5 - Triângulo atravessando um plano.

2.2.4 MODELOS DE ILUMINAÇÃO

Um modelo de iluminação tem a função de calcular a intensidade da luz em um ponto na superfície do objeto (Hall, 1988).

A característica da luz refletida depende da composição, direção e geometria da fonte de luz, orientação e propriedades da superfície.

Neste trabalho, a luz é sempre considerada como um único ponto (fonte pontual).

Os modelos de iluminação podem ser classificados como:

- Local: é a luz que é diretamente refletida de uma fonte de luz para o objeto a ser tonalizado;
- Global: a reflexão de luz de uma superfície é modelada como global com adição da luz incidente na superfície depois de múltiplas reflexões entre outras superfícies. Com isto há um gasto computacional maior, usando um modelo global. Porém, podem ser obtidas imagens mais realistas. Um método que usa o modelo de iluminação global é o Traçado de Raios.

Todas as superfícies refletoras estão compreendidas entre dois casos limites: as que refletem como um espelho segundo as conhecidas leis da óptica geométrica (especulares), e as que refletem a luz de forma totalmente difusa. Para maior clareza do termo especular e difuso é necessária uma breve explicação do termo reflexão e por consequência, reflexão especular e difusa.

Reflexão – É o processo pelo qual o fluxo radiante, incidente numa superfície, deixa o lado incidente desta superfície ou meio estacionário sem mudança de frequência. Ou seja, é o retorno da radiação ao meio de onde ela veio após incidir numa superfície (Novo, 1989).

Reflexão especular – Uma superfície é um refletor quando os ângulos de incidência e reflexão da energia radiante obedecem às leis geométricas da reflexão, ou seja, quando os ângulos de incidência e reflexão são exatamente iguais e situados num plano perpendicular à superfície (Novo, 1989).

Reflexão difusa – Uma superfície é um refletor difuso quando a energia radiante incidente reflete em múltiplas direções devido às irregularidades da própria superfície ou por ela ser constituída de um material óticamente heterogêneo. Um refletor difuso pode ser composto, teoricamente, por refletores especulares infinitamente pequenos tendo orientação e inclinação aleatórias (Novo, 1989).

Quando a luminância é constante em uma dada superfície, qualquer que seja a direção de observação, esta satisfaz às leis de Lambert e por isso é dita superfície Lambertiana, ou ainda, um difusor perfeito. Assim, se uma superfície for Lambertiana e se a fonte luminosa for pontual e de intensidade constante, com o ângulo sólido² de observação sempre o mesmo, a parcela de luz refletida é diretamente proporcional ao cosseno do ângulo de incidência do feixe luminoso com a

² O ângulo sólido representa o ângulo cônico definido a partir do centro de uma esfera pela razão entre a área da calota esférica e o quadrado do raio da esfera (Hall, 1989).

normal à superfície e inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte luminosa (Novo, 1989).

A equação (12) define o modelo mais simples de iluminação (Rogers, 1986):

$$I = I_i K_d \cos \theta \quad 0 \leq \theta \leq p/2 \quad (12)$$

onde I é a intensidade da luz refletida, e I_i é a intensidade da luz incidente, K_d é a constante de reflexão difusa ($0 \leq K_d \leq 1$) e θ é o ângulo entre a direção da luz incidente e a normal à superfície, que fornece o efeito de sombreamento a um objeto ou a uma superfície, como é apresentado na figura 2.6. Para ângulos maiores que $p/2$ a posição da fonte de luz está atrás do objeto, não permitindo assim a iluminação do mesmo. O coeficiente de reflexão difusa K_d define o brilho de uma superfície. Se a superfície for altamente refletiva (brilhante), o valor de K_d está próximo de 1. Para simular uma superfície que absorve mais a luz incidente (superfície com pouco brilho), atribui-se a refletividade para o valor de K_d próximo de 0.

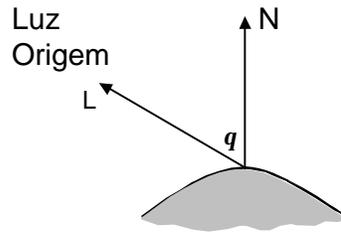


FIGURA 2.6- Ângulo de incidência entre o vetor da direção da luz (L) e a normal à superfície (N)- Reflexão difusa.

Objetos que não recebem luz diretamente aparecem pretos (sem intensidade), pois um ponto de luz é assumido, diferentemente do ambiente real, onde há reflexão da luz de uma superfície para outra. Assim, para modelar uma cena mais realista, acrescenta-se um componente representando a parcela da luz ambiente (iluminando todos os objetos que aparecem na cena) (Rogers, 1986):

$$I = I_a K_a + I_l K_d \cos \theta \quad 0 \leq \theta \leq \pi/2 \quad (13)$$

onde I_a é a intensidade de luz ambiente e K_a é a constante do ambiente de reflexão difusa ($0 \leq K_a \leq 1$).

O modelo de iluminação apresentado gera imagens com a mesma intensidade em planos com a mesma orientação, mas em diferentes profundidades. Sabe-se, entretanto, que a intensidade de iluminação diminui com o aumento da distância do objeto em relação à fonte de luz. Assim, para gerar imagens mais realistas usa-se (Rogers, 1986):

$$I = I_a K_a + \frac{I_l K_d \cos^2 \epsilon}{d + K} \quad 0 \leq \epsilon \leq p/2 \quad (14)$$

onde K é uma constante arbitrária, d é à distância do objeto ao ponto de vista. Com valores adequados para os parâmetros, objetos mais próximos do observador tem maior intensidade.

A fim de tornar mais realistas as imagens geradas, usa-se a componente de reflexão especular, condicionada pela equação de Fresnel (ótica geométrica).

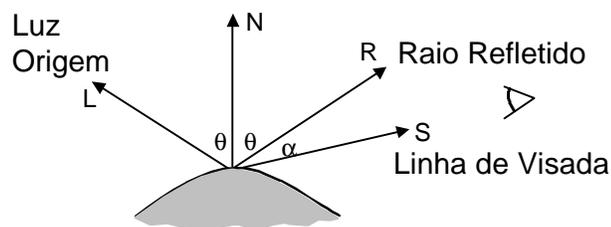


FIGURA 2.7- Reflexão especular

Para uma superfície perfeitamente especular (espelhada) o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, como apresenta a figura 2.7. Isto significa que somente um observador posicionado exatamente na direção do vetor de reflexão, observaria a cena. (Vetor R coincidente ao vetor S). Para superfícies não totalmente espelhadas, introduz-se a função (Rogers, 1986):

$$I_s = I_l w(i, \epsilon) \cos^n \epsilon \quad (15)$$

onde, $w(i,I)$ é a curva de reflectância da superfície, dado o raio de especularidade de luz refletida para luz incidente como uma função de ângulo incidente i e comprimento de onda I . E n é o expoente que aproxima a distribuição espacial da especularidade da luz refletida.

A função de tonalização (geral) para uma fonte de luz pode ser dada como (Rogers, 1986):

$$I = I_a k_a + \frac{I_i}{d+k} (k_d \cos^e + k_s \cos^n a) \quad (16)$$

onde k_s é o mesmo que $w(i,I)$.

2.2.5 MODELOS DE TONALIZAÇÃO

Em seguida são apresentados alguns dos métodos de tonalização, porém, somente dois foram implementados neste projeto, que são: Tonalização Facetada e Tonalização de *Gouraud*.

A metodologia de tonalização, tanto pode ser utilizada para superfícies poligonais, como também para as triangulares. O resultado gerado varia de acordo com a metodologia a ser utilizada, podendo apresentar o aspecto facetado (tonalização facetada), o aspecto

suavizado (tonalização de *Gouraud*), e os aspectos suavizado e mais realístico (tonalização de *Phong*).

2.2.5.1 TONALIZAÇÃO FACETADA

O modelo de tonalização facetada³ usa a normal fixa para os planos definidos, produzindo um aspecto facetado do objeto como apresenta a figura 2.8.



FIGURA 2.8 – Tonalização Facetada (Rogers, 1989).

Para o método de tonalização facetada, a superfície Lambertiana é a ideal (hipoteticamente) porque tem a função de refletividade proporcional ao ângulo incidente. Tem a propriedade de manter o brilho uniforme sob uma iluminação uniforme, ou seja, a intensidade de um elemento da superfície é constante com relação à posição do observador.

³ Facetada(o) – termo usado para definir uma cor contínua de um polígono ou triângulo.

A tonalização da superfície é realizada triângulo-a-triângulo calculando a intensidade de luz refletida, através do modelo de iluminação (equação 12) e aplicada a todos os pontos no interior do triângulo.

2.2.5.2 TONALIZAÇÃO DE GOURAUD

A tonalização de *Gouraud*, também é chamada de Tonalização por Interpolação de Intensidade (*Intensity Interpolation Shading*) ou também tonalização por interpolação de cor (*Color Interpolation Shading*). A tonalização é feita por uma interpolação no interior da face do triângulo a partir dos seus vértices, eliminando a intensidade descontínua (Foley et al., 1996).

O modelo de tonalização de *Gouraud* determina a intensidade do vértice calculando a média em cada vértice do triângulo e a interpolação bilinear é utilizada no interior do mesmo, para a obtenção do aspecto suavizado como apresenta a figura 2.9.



FIGURA 2.9- Tonalização de *Gouraud* (Rogers, 1989).

O processo de tonalização de *Gouraud* requer que a normal seja conhecida para cada vértice do triângulo. O vetor normal é calculado em cada vértice pela expressão que segue:

$$\vec{N}_V = \frac{\sum_{k=1}^n \vec{N}_k}{\left| \sum_{k=1}^n \vec{N}_k \right|} \quad (17)$$

onde N_k são os vetores normais aos planos definidos pelos vértices dos triângulos que compartilham o vértice considerado (V) (figura 2.10).

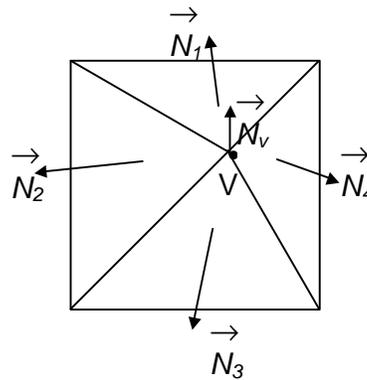


FIGURA 2.10 - Média entre vértices.

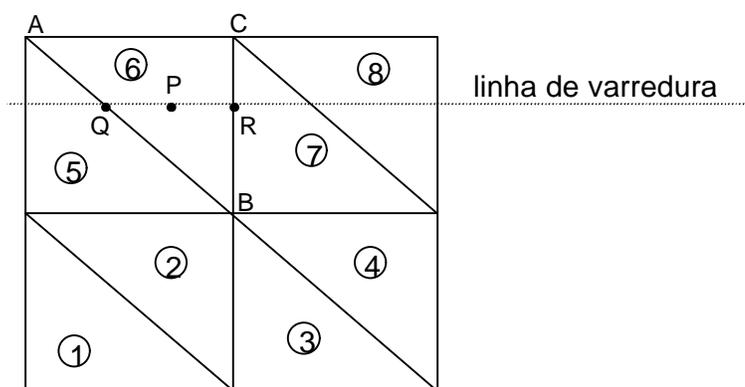


FIGURA 2.11 – Interpolação de tonalização de *Gouraud* (Rogers, 1989).

Considerando a intensidade da superfície triangular (ABC) apresentada na figura 2.11, a intensidade do ponto P é determinada em duas etapas. Primeiramente interpola-se linearmente um valor da intensidade no ponto Q (I_Q) a partir dos valores dos vértices A (I_A) e B (I_B) do triângulo, como segue,

$$I_Q = uI_A + (1-u)I_B \quad (18)$$

onde $u = BQ/AB$ e, Q é a interseção da aresta do triângulo como a linha de varredura. Em seguida, a intensidade dos vértices B e C (I_C) do triângulo, é linearmente interpolada para obter a intensidade do ponto R na linha de varredura.

$$I_R = wI_B + (1-w)I_C \quad (19)$$

onde $w = CR/BC$. Finalmente, a intensidade de P na linha de varredura é também obtida linearmente interpolando entre Q e R ao longo da linha de varredura, isto é.

$$I_P = tI_Q + (1-t)I_R \quad (20)$$

onde $t = RP/QR$ ($0 \leq t \leq 1$).

Um resultado obtido a partir da tonalização de *Gouraud* é apresentado na figura 2.9.

2.2.5.3 TONALIZAÇÃO DE PHONG

O modelo de tonalização de *Phong* foi introduzido por Phong Bui Tuong em 1975 (Hear & Baker, 1997). Observa-se que a tonalização de *Phong* apresenta resultados mais realísticos que a tonalização de *Gouraud*. Este método de tonalização interpola a normal ao longo da linha de varredura e o modelo de iluminação é aplicado em cada *pixel*.

A tonalização de *Phong* dá uma melhor aproximação da curvatura da superfície, gerando assim, uma imagem mais realista.

Novamente usando a figura 2.11, a normal de P é determinada linearmente interpolando entre A e B para obter Q , entre B e C para obter R , e finalmente entre Q e R para obter P . Então,

$$\begin{aligned} n_Q &= un_A + (1-u)n_B & 0 \leq u \leq 1 \\ n_R &= wn_B + (1-w)n_C & 0 \leq w \leq 1 \\ n_P &= tn_Q + (1-t)n_R & 0 \leq t \leq 1 \end{aligned} \quad (21)$$

onde $u = BQ/BA$, $w = CR/CB$ e $t = RQ/QR$. Novamente a normal ao longo da linha de varredura pode ser determinada incrementalmente, isto é,

$$n_{P_2} = n_{P_1} + (n_Q - n_R)(t_2 - t_1) = n_{P_1} + \Delta n \Delta t \quad (22)$$

onde 1 e 2 subscrito indica sucessivos *pixels* ao longo da linha de varredura. A figura 2.12 apresenta uma comparação entre as técnicas de tonalização.

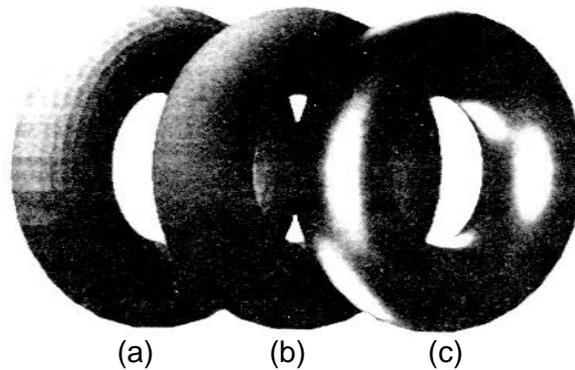


FIGURA 2.12- Comparação de técnicas de tonalização
(a) Facetada, (b) *Gouraud* e (c) *Phong* (Rogers, 1989).

2.3 TÉCNICAS PARA OBTENÇÃO DO TOM DE CINZA DE UM VÉRTICE DO MDT

Nas próximas seções serão apresentadas as técnicas para obtenção do tom de cinza de um vértice do MDT através da projeção do mesmo para o referencial fotogramétrico, bem como a transformação do ponto projetado deste referencial para o centro da imagem, logo em seguida a transformação para o referencial digital e, por final, a utilização da técnica de reamostragem para obtenção do tom de cinza da imagem digital.

2.3.1 PROJEÇÃO DAS COORDENADAS DE UM VÉRTICE DO MDT PARA O REFERENCIAL FOTOGRAMÉTRICO

A projeção de um vértice do MDT para o referencial fotogramétrico é realizada através das equações de colinearidade. Este é o modelo matemático fundamental utilizado em fotogrametria, o qual relaciona pontos dos espaços imagem e objeto (Andrade, 1988). Este modelo matemático baseia-se no princípio de colinearidade (figura 2.13), consistindo no alinhamento do centro perspectivo (CP), do ponto-objeto (V) e do respectivo ponto-imagem (v).

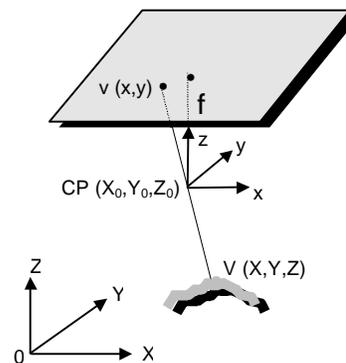


FIGURA 2.13 - Princípio de colinearidade.

O princípio ilustrado na figura 2.13 é expresso matematicamente na forma que segue (Lugnani, 1987):

$$\begin{aligned} x_f &= f \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y_f &= f \cdot \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (23)$$

onde,

- $[X \ Y \ Z]^T$ são as coordenadas de vértice V no referencial do MDT ($0XYZ$) ou no espaço-objeto;
- $[x_f \ y_f]^T$ são as coordenadas do ponto v , imagem de V , no referencial fotogramétrico ($CPxyz$) ou coordenada do ponto espaço-imagem;
- $[X_0, Y_0, Z_0]$ são as coordenadas do centro-perspectivo (CP) no sistema de coordenadas objeto;
- f é a distância focal; e
- r_{ij} , ($1 \leq i \leq 3$ e $1 \leq j \leq 3$), são os elementos da matriz de rotação R^T , definida pelo triplo produto matricial $Rz(\mathbf{k}) \cdot Ry(\mathbf{j}) \cdot Rx(\mathbf{w})$, onde \mathbf{k} , \mathbf{j} e \mathbf{w} são os elementos da atitude da câmara (Krauss, 1992);

$$r_{11} = \cos(\mathbf{j}) \cos(\mathbf{k})$$

$$r_{12} = \cos(\mathbf{w}) \sin(\mathbf{k}) + \sin(\mathbf{w}) \sin(\mathbf{j}) \cos(\mathbf{k})$$

$$r_{13} = \sin(\mathbf{w}) \sin(\mathbf{k}) - \cos(\mathbf{w}) \sin(\mathbf{j}) \cos(\mathbf{k})$$

$$r_{21} = -\cos(\mathbf{j}) \sin(\mathbf{k})$$

$$r_{22} = \cos(\mathbf{w}) \cos(\mathbf{k}) - \sin(\mathbf{w}) \sin(\mathbf{j}) \sin(\mathbf{k})$$

$$r_{23} = \sin(\mathbf{w}) \cos(\mathbf{k}) + \cos(\mathbf{w}) \sin(\mathbf{j}) \sin(\mathbf{k})$$

$$r_{31} = \sin(\mathbf{j})$$

$$r_{32} = -\sin(\mathbf{w}) \cos(\mathbf{j})$$

$$r_{33} = \cos(\mathbf{w}) \cos(\mathbf{j}).$$

As equações de colinearidade são utilizadas em praticamente todos os processos fotogramétricos, tais como a resseção espacial e a fototriangulação por feixe de raios (Barbosa, 1999).

Vale ressaltar que os elementos de orientação exterior (k, f, w, X_0, Y_0, Z_0) são admitidos como conhecidos, isto é, obtidos previamente através da Resseção Espacial ou Fototriangulação por Feixe de Raios.

2.3.2 TRANSFORMAÇÃO DO REFERENCIAL FOTOGRAMÉTRICO PARA O CENTRO DA IMAGEM

Seria ideal que o ponto principal e o centro da imagem equivalassem a um mesmo ponto. Como na prática isto não ocorre, os sistemas com origem no centro da imagem e fotogramétrico diferem por uma translação no plano (x_0, y_0) . A transformação de um ponto do referencial fotogramétrico para o referencial com o centro da imagem é realizada como segue:

$$x_c = x_f + x_0 \quad (24)$$

$$y_c = y_f + y_0$$

onde, x_c e y_c são as coordenadas do sistema de um ponto no sistema com origem no centro da imagem, x_0, y_0 são as coordenadas calibradas do ponto principal no referencial com origem no centro da imagem e x_f e y_f são as coordenadas fotogramétricas obtidas pela equação 23.

2.3.3 TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS DE UM PONTO DO REFERENCIAL COM ORIGEM NO CENTRO DA IMAGEM PARA O REFERENCIAL DIGITAL

Devido à diferença entre o referencial digital (l,c) e com origem no centro da imagem (x_c, y_c) , é necessário fazer uma transformação geométrica linear do sistema com origem no centro da imagem para o sistema digital. O sistema de coordenadas digitais tem o eixo c paralelo ao eixo x_c e o eixo l refletido em relação ao eixo y_c (figura 2.14). Notar que a origem do sistema (l,c) é o canto superior esquerdo da imagem digital. Esta é uma transformação de reflexão e de escala (tamanho do *pixel*), depois de transladar o sistema para a origem do sistema (l,c) .

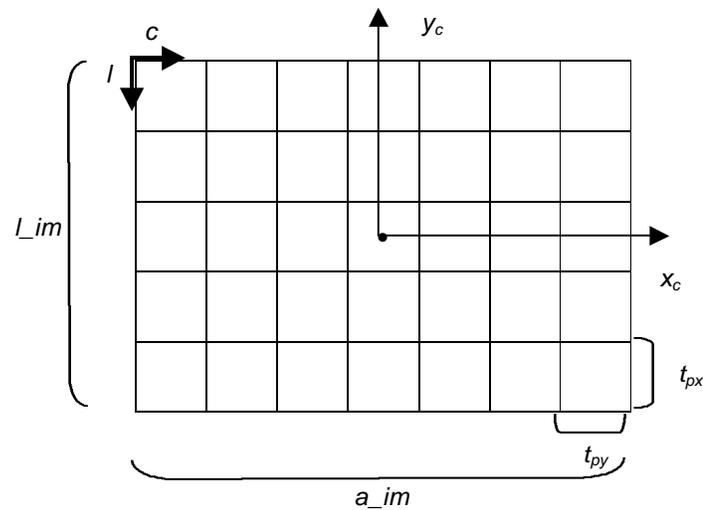


FIGURA 2.14 – Relação entre o referencial digital (l,c) e com origem no centro da imagem (x_c, y_c) .

Esta relação entre o referencial digital e com origem no centro da imagem é válida apenas para câmeras digitais, pois este é o propósito desta pesquisa.

As equações de transformação podem ser escritas como:

$$\begin{aligned}c &= \frac{x_c}{t_{px}} + \frac{l_{im}}{2} + 0.5 \\l &= \frac{y_c}{t_{py}} + \frac{a_{im}}{2} + 0.5\end{aligned}\tag{25}$$

onde c e l são as coordenadas coluna e linha do *pixel*; x_0 e y_0 são as coordenadas calibradas do ponto principal; x_f e y_f são as coordenadas do sistema fotogramétrico; l_{im} é a largura da imagem e a_{im} é a altura da imagem; t_{px} é o tamanho do *pixel* na horizontal e t_{py} é o tamanho do *pixel* na vertical. A constante 0.5 é utilizada para posicionar as coordenadas no centro do *pixel*.

2.3.4 REAMOSTRAGEM

Os métodos de reamostragem normalmente empregados para interpolar os tons de cinza são o vizinho mais próximo, o bilinear e a convolução cúbica (Silva, 1988). Tem a finalidade de encontrar tons de cinza na imagem correspondentes aos pontos fora da grade regular da imagem.

Na seqüência os mesmos são apresentados, sendo dada maior ênfase à interpolação bilinear, pois esta é a técnica utilizada neste projeto.

2.3.4.1 VIZINHO MAIS PRÓXIMO

Este é um dos métodos mais simples de interpolação. A interpolação ocorre com a verificação da menor distância entre o ponto a ser interpolado $g(i+\Delta i, j+\Delta j)$ e os *pixels* vizinhos da malha, como mostra a figura 2.15. A grandeza g é o brilho e $(i+\Delta i, j+\Delta j)$ é a posição na qual a interpolação gerará um valor de brilho (tom de cinza).

Na reamostragem por vizinho mais próximo o nível de cinza de um ponto transformado é igual ao nível de cinza do *pixel* mais próximo na imagem digital.

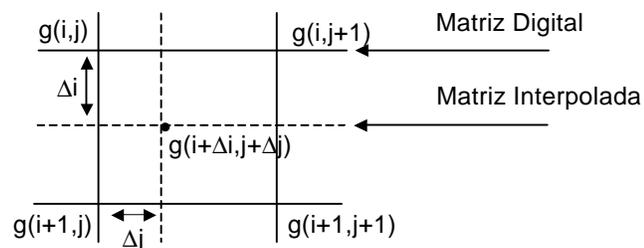


FIGURA 2.15 – Interpolação pelo vizinho mais próximo (Richards, 1986).

Esta interpolação tem um rápido processamento computacional, devido a fácil obtenção dos pontos de interpolação, que são encontrados através do cálculo da distância.

2.3.4.2 BILINEAR

A interpolação bilinear é a mais utilizada por apresentar bons resultados e não exigir grande esforço computacional. Exige, mais do que a interpolação por vizinho mais próximo que não traz tanta qualidade, mas não tanto quanto a interpolação por convolução cúbica que será vista na próxima subseção. As notações a seguir são de acordo com (Richards, 1986).

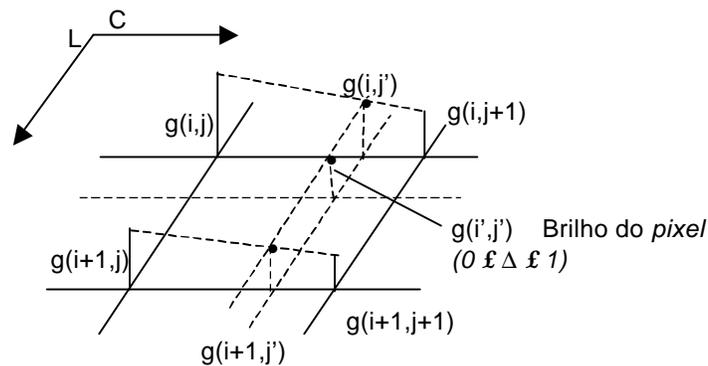


FIGURA 2.16 – Interpolação bilinear (Richards, 1986).

A interpolação bilinear utiliza três interpolações sobre os quatro pontos vizinhos (figura 2.16). A partir dos pontos (i,j) e $g(i,j+1)$, interpola-se um valor para os pontos (i,j') , localizados na mesma linha (i) . Na segunda interpolação, usa-se $g(i+1,j)$ e $g(i+1,j+1)$, para interpolar um valor no ponto $g(i+1,j')$. A terceira e última interpolação é calculada através dos pontos encontrados na primeira e segunda interpolação $g(i+1,j')$ e $g(i,j')$.

Segundo, o ponto encontrado na imagem corresponde ao apresentado na grade da figura 2.16. Duas interpolações lineares são desenvolvidas ao longo das linhas de varreduras para encontrar a interpolação de $g(i,j')$ e $g(i+1,j')$ como é apresentado. Estas são dadas por:

1ª interpolação

$$g(i,j') = j' g(i,j+1) + (1-j')g(i,j) \quad (26)$$

2ª interpolação

$$g(i+1,j') = j' g(i+1,j+1) + (1-j')g(i+1,j) \quad (27)$$

onde a grandeza g é o brilho e (i',j') é a posição a qual a interpolação gerará um valor de brilho (tom de cinza). O passo final é interpolar linearmente sobre $g(i,j')$ e $g(i+1,j')$,

$$g(i',j') = (1-i')\{j' g(i,j+1) + (1-j')g(i,j)\} + i' \{j' g(i+1,j+1) + (1-j') g(i+1,j)\} \quad (28)$$

2.3.4.3 CONVOLUÇÃO CÚBICA

A convolução cúbica é um método de interpolação que exige um maior esforço computacional por trabalhar com cinco interpolações em uma vizinhança de dezesseis pontos. A figura 2.17 abaixo mostra as interpolações.

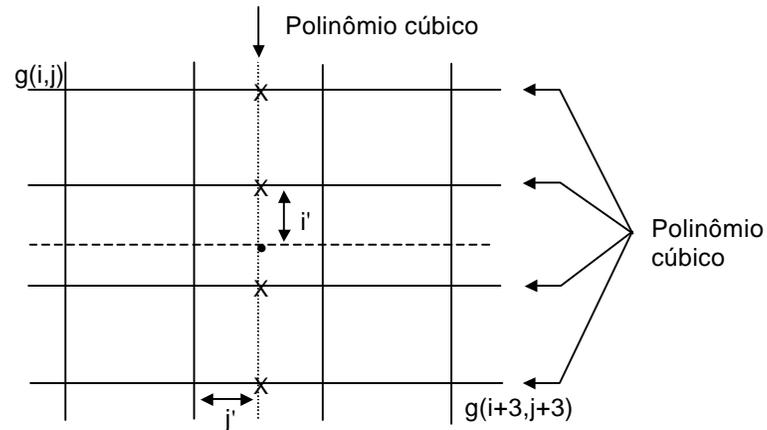


FIGURA 2.17 – Interpolação por convolução cúbica (Richards, 1986).

A interpolação por convolução cúbica utiliza os dezesseis *pixels* vizinhos. O polinômio cúbico é provido por quatro linhas de quatro *pixels* vizinhos do ponto da imagem, como é apresentado na figura 2.17. O quinto polinômio cúbico é então encontrado para sintetizar um valor de brilho para a correspondente localização como mostra a figura 2.17.

A equação abaixo é usada para executar a interpolação por convolução cúbica:

$$\begin{aligned}
 g(i, j') = & j' j'' (j'' [g(i, j+3) - g(i, j+2) + g(i, j+1) - g(i, j)] \\
 & + [g(i, j+2) - g(i, j+3) - 2g(i, j+1) + 2g(i, j)]) \\
 & + [g(i, j+2) - g(i, j)] \} + g(i, j+1)
 \end{aligned} \quad (29)$$

Esta expressão é aplicada para cada uma das quatro linhas descritas na figura 2.17, para assim calcular as quatro interpolações $g(i, j')$, $g(i+1, j')$, $g(i+2, j')$, $g(i+3, j')$. Finalmente estas são interpoladas verticalmente de acordo com:

$$\begin{aligned} g(i, j') = & i' \{ i' [g(i+3, j') - g(i+2, j') + g(i+1, j') - g(i, j')] \\ & + [g(i+2, j') - g(i+3, j') - 2g(i+1, j') + 2g(i, j')] \} \\ & + [g(i+2, j') - g(i, j')] \} + g(i+1, j') \end{aligned} \quad (30)$$

A reamostragem utilizando a interpolação por convolução cúbica, apresenta como produto final uma imagem com aspecto mais suave, sendo freqüentemente usada em fotointerpretação.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA PARA VISUALIZAÇÃO 3D DE UMA IMAGEM DIGITAL

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo trata da metodologia de visualização 3D de uma imagem digital, que nesta pesquisa abrange as áreas de Computação Gráfica e de Fotogrametria.

A tonalização é realizada triângulo-a-triângulo. Dessa forma, é necessário primeiro obter os tons de cinza dos vértices de cada triângulo, sendo necessárias as seguintes etapas:

- 1- transformação das coordenadas dos vértices de cada triângulo do MDT sendo considerado, para o referencial fotogramétrico;
- 2- transformação das coordenadas obtidas no passo anterior para o referencial digital; e
- 3- obtenção por reamostragem dos tons de cinza dos vértices do triângulo. Na seqüência, os tons de cinza obtidos são usados para tonalizar um determinado triângulo do MDT, que posteriormente é projetado para o espaço de visualização (tela do computador) através da projeção ortográfica. Este procedimento é repetido para todos os triângulos do MDT.

A próxima seção trata de cada etapa com maiores detalhes.

3.2 PRINCÍPIO DA VISUALIZAÇÃO 3D DE UMA IMAGEM DIGITAL

A figura 3.1 apresenta o princípio da visualização 3D, a partir da tonalização dos triângulos (geometria simples) que formam o MDT regular e imagem digital propriamente dita.

Como a tonalização do MDT é feita triângulo-a-triângulo, é necessário buscar na imagem digital os tons de cinza dos vértices de cada triângulo, seguida de sua tonalização, segundo o modelo adotado. A repetição desse procedimento para todos os triângulos possibilita a tonalização do MDT, que projetado para o plano de visualização permite obter a sensação 3D.

O processo de tonalização da superfície (figura 3.1) parte das coordenadas do referencial Oxyz que representam os vértices (V_1, V_2, V_3) dos triângulos do MDT. Esses vértices são tonalizados utilizando um modelo de iluminação que calculará a intensidade de luz refletida pela superfície através da intensidade da luz incidente e do ângulo entre a direção da luz e a normal à superfície. A partir dos dados de iluminação pode ser aplicado algum dos métodos de tonalização já citados (tonalização faceta ou tonalização de *Gouraud*). Os métodos de tonalização que foram adotados têm como princípio tonalizar o interior do triângulo através de interpolações entre os vértices e as arestas dos triângulos.

Para a obtenção dos tons de cinza dos vértices (V_1, V_2, V_3) de um determinado triângulo, primeiro é necessário transformá-los para o

3.3 FLUXOGRAMA

Este fluxograma tem como objetivo apresentar o funcionamento de cada etapa do processo de visualização 3D de uma imagem digital, descrita na subseção 3.2.

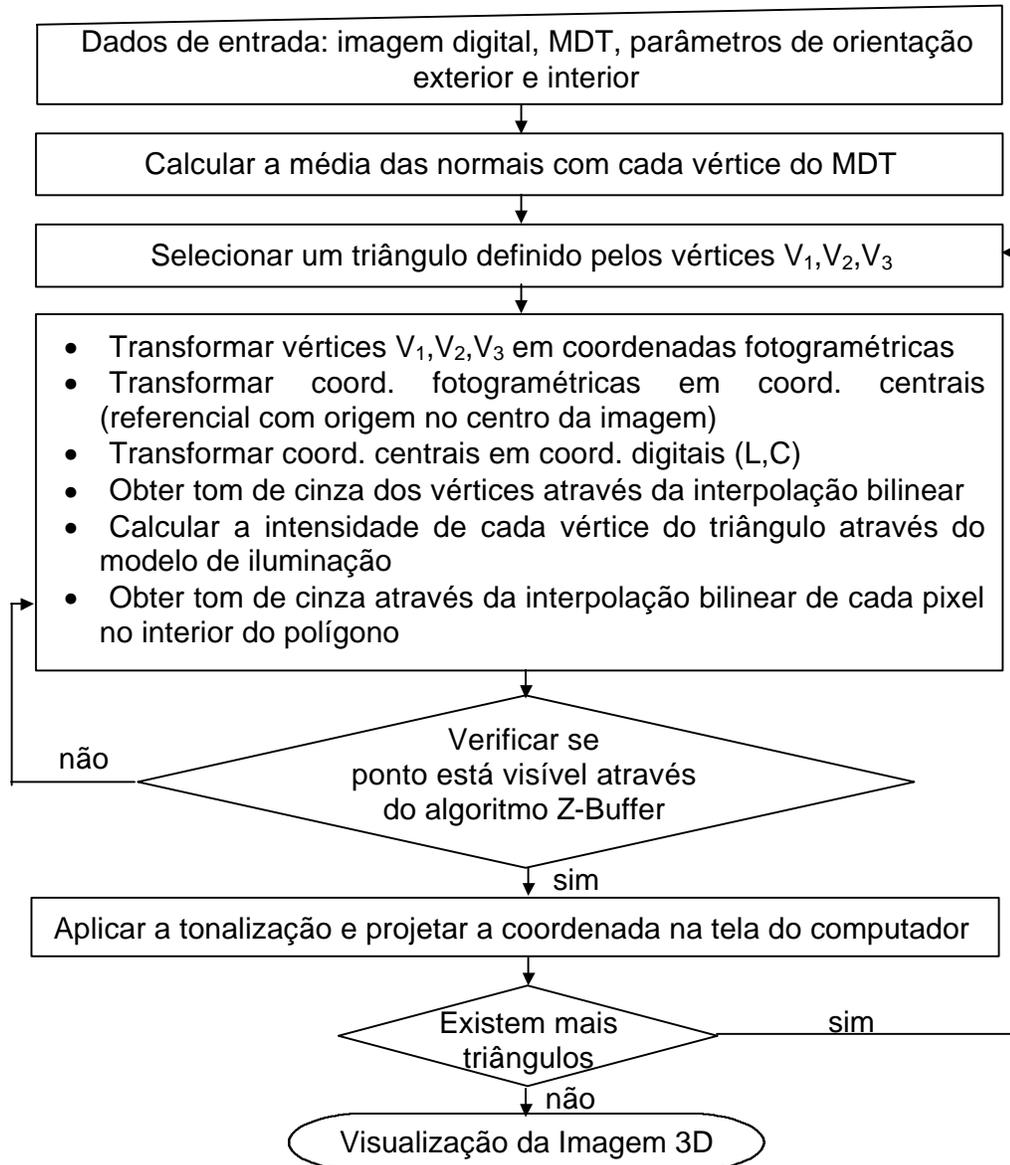


FIGURA 3.2 – Fluxograma do processo de visualização 3D

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTOS ALGORÍTMICO E COMPUTACIONAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O sistema desenvolvido para a realização de experimentos e visualização das imagens foi implementado utilizando a linguagem C++, sendo utilizado o ambiente de programação C++ Builder 4.0. A escolha da ferramenta se justificou por disponibilizar os mais avançados recursos de programação (programação orientada a objetos e eventos) e também por fornecer facilidades para a manipulação de imagens (leitura e escrita de arquivos, além do acesso aos elementos da imagem – *pixels*) de uma forma bem simples.

Neste capítulo são apresentados os aspectos gerais sobre o sistema desenvolvido, com maior ênfase na análise de aspectos algorítmicos.

4.2 VISÃO GERAL DO SISTEMA

Com o objetivo de permitir um acompanhamento dos processamentos realizados (análise visual dos resultados), o sistema apresenta duas áreas de imagens, sendo que a primeira tem dimensão de 200 por 200 *pixels* e a segunda de 400 por 400 *pixels*. A primeira é

destinada à entrada da imagem original. A segunda área de imagem é destinada para apresentar os resultados obtidos com o processamento da imagem de entrada. A figura 4.1 apresenta a tela do sistema desenvolvido.

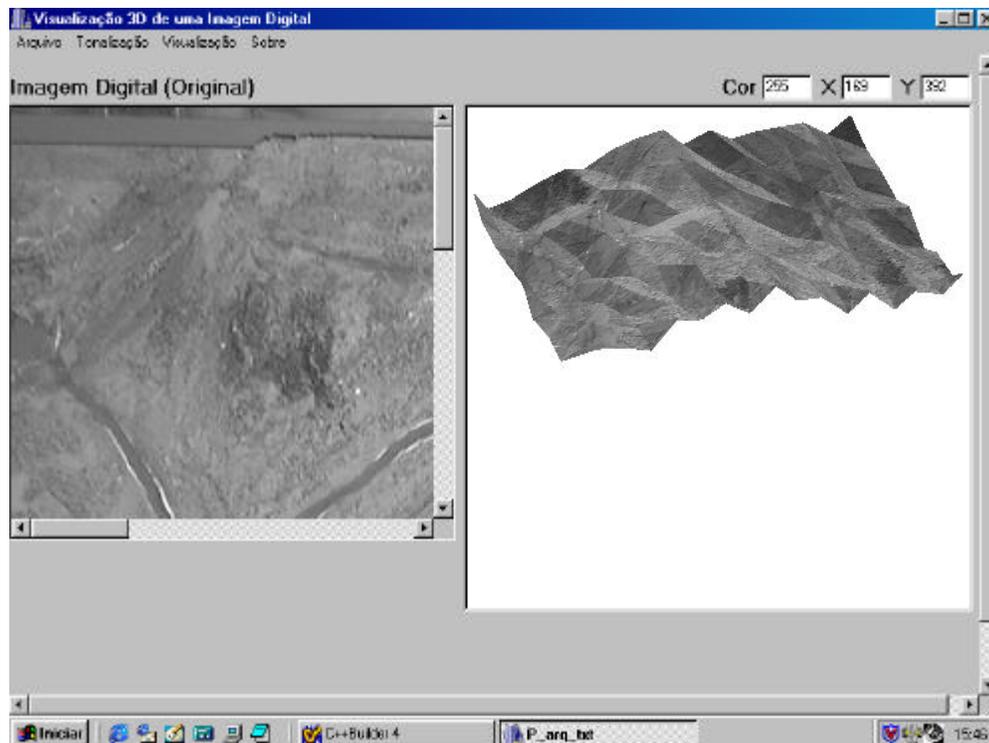


FIGURA 4.1 - Tela do sistema.

A estrutura adotada para processamento dos dados e imagens será descrita detalhadamente nas próximas subseções.

4.3 TONALIZAÇÃO FACETADA

Após a leitura do arquivo de coordenadas do MDT e da imagem digital original, realiza-se a numeração dos vértices de maneira a formar triângulos (figura 4.2). Na seqüência, é também realizado o cálculo da rotação (transformação geométrica) para todas as coordenadas dos vértices.

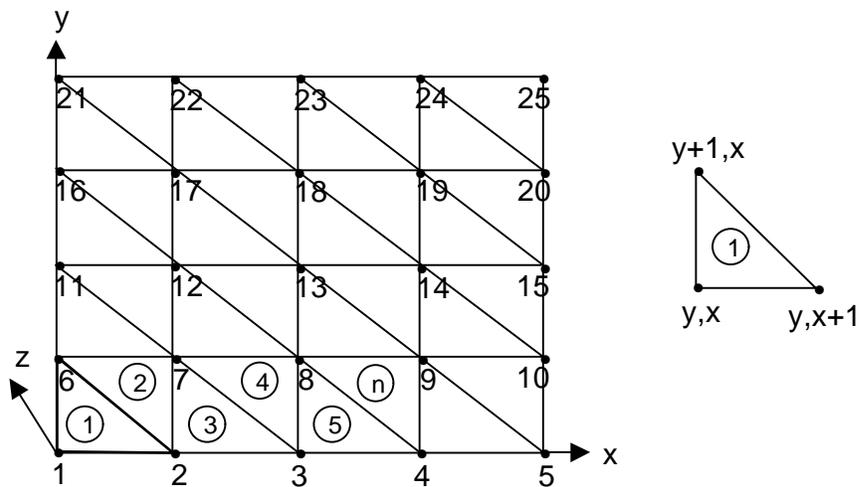


FIGURA 4.2 – Processo de identificação dos triângulos na malha regular.

Foi montada a malha regular de forma triangular neste projeto, por se tratar de uma geometria simples e conveniente.

O processo é realizado como apresentado na figura 4.3.

```

Percorrer todos os y do arquivo de coordenadas (MDT)
  Percorrer todos os x do arquivo de coordenada (MDT)
  Início
    vetor[num-tri]-x1= malha[y][x]-x;
    vetor[num-tri]-y1= malha[y][x]-y;
    vetor[num-tri]-z1= malha[y][x]-z;
    vetor[num-tri]-vértice1= malha[y][x]-vértice;
    vetor[num-tri]-x2= malha[y][x+1]-x;
    vetor[num-tri]-y2= malha[y][x+1]-y;
    vetor[num-tri]-z2= malha[y][x+1]-z;
    vetor[num-tri]-vértice2=malha[y][x+1]-vértice;
    vetor[num-tri]-x3= malha[y+1][x]-x;
    vetor[num-tri]-y3= malha[y+1][x]-y;
    vetor[num-tri]-z3= malha[y+1][x]-z;
    vetor[num-tri]-vértice3= malha[y+1][x]-vértice;
  Fim

```

num-tri= número do triângulo

vetor= estrutura de dados para armazenar as coordenadas e os vértices lidas a partir do arquivo de coordenadas do MDT de uma forma organizada para identificar número de triângulo e vértice com suas respectivas coordenadas

malha= estrutura de dados que armazena as coordenadas e os vértices lidas do MDT

FIGURA 4.3 - Algoritmo para identificar/armazenar os números dos triângulos, os vértices e suas respectivas coordenadas.

O processo de tonalização é aplicado triângulo-a-triângulo. Para tanto a equação do plano é calculada e assim armazena-se em um vetor as normais (a,b,c) de cada triângulo, como demonstra a figura 4.3 e é apresentada na equação 31:

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (31)$$

Posteriormente, para que a tonalização seja realizada, são utilizadas linhas de varredura para percorrer todo triângulo. Elas são encontradas através de comparações entre as coordenadas y (representa a linha) dos três vértices que formam o triângulo.

O processo é inicializado pela menor linha encontrada e é executado até a maior linha. A partir das coordenadas dos três vértices é necessário encontrar a coordenada z . A linha de varredura como pode ser vista na figura 4.4 cruza duas arestas do triângulo. Este cruzamento é encontrado pela interseção das retas. Deste modo, quando encontradas as interseções em uma linha de varredura, é aplicado o processo de interpolação linear para obter os pontos no interior do triângulo de uma aresta até a outra, posteriormente a tonalização é aplicada (figura 4.4).

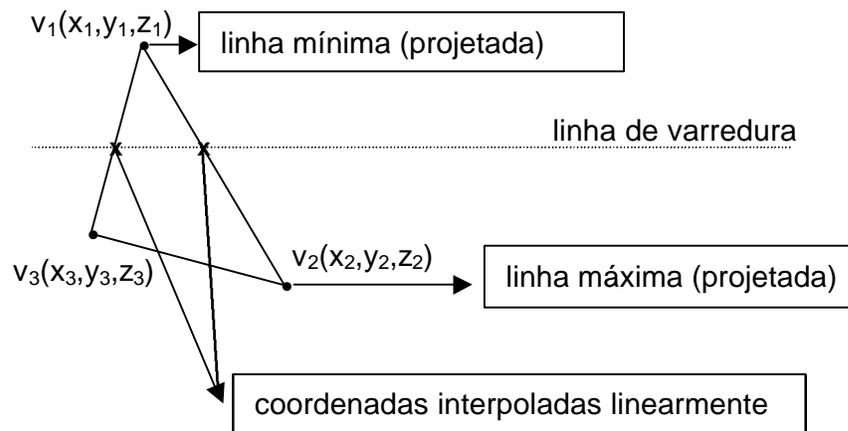


FIGURA 4.4 – Demonstração das interpolações lineares entre coordenadas dos vértices e entre as arestas.

Em conjunto com as interpolações, as coordenadas do MDT são transformadas primeiramente em coordenadas fotogramétricas (equação 23), depois em coordenadas do referencial com o centro da imagem (equação 24) e, finalmente em coordenadas digitais (equação 25).

Como as coordenadas digitais não coincidem exatamente com as coordenadas linha e coluna da tela do computador, a técnica de reamostragem, no caso a interpolação bilinear, adotada nesta pesquisa, é utilizada para obtenção dos tons de cinza da imagem. O tom de cinza capturado da imagem, como foi explicado na seção 2.2.6.4.2, representa a intensidade de luz refletida da superfície. No entanto o modelo de iluminação também utiliza o ângulo que é formado entre a normal ao plano e a direção da luz, para então calcular a intensidade de luz refletida da superfície. A tonalização é facetada porque a tonalização do interior do triângulo utiliza apenas a normal do plano que o contém. Sendo assim, cada triângulo tem a sua referida normal, gerando uma tonalização com aspecto facetado.

No entanto, há a necessidade de analisar se cada linha do interior do triângulo é visível, dependendo da transformação geométrica aplicada. Para resolver esse problema é utilizado o algoritmo de memória de profundidade (*Z-buffer*) que analisa qual parte da superfície está visível, de acordo com a posição do observador que, neste caso, é a mesma da fonte de luz que esta localizada no centro da imagem (área de análise). E

assim, a tonalização pode ser projetada na tela do computador através da projeção ortográfica, dando então a sensação 3D como resultado final.

4.4 TONALIZAÇÃO DE GOURAUD

A tonalização de *Gouraud* é realizada da mesma maneira que a tonalização facetada, diferenciando basicamente pela forma que o vetor normal é utilizado.

Na tonalização facetada, o interior do polígono é tonalizado com apenas a normal do plano que contém o triângulo sendo considerado.

O processo de tonalização é aplicado triângulo-a-triângulo, necessitando para tanto que as normais a cada triângulo sejam calculadas. Posteriormente, para que a tonalização seja realizada, são utilizadas linhas de varredura para percorrer todo triângulo.

A partir das coordenadas dos três vértices é necessário encontrar as coordenadas x , y e z das arestas e o vetor normal, entre os vértices. Analisando novamente a figura 4.4, verifica-se que a linha de varredura cruza duas arestas do triângulo, e através da interseção de reta (aresta) com reta (linha de varredura), é aplicado o processo de interpolação linear para obter os pontos e os vetores normais nas arestas e no interior do triângulo a serem tonalizados.

Na tonalização de *Gouraud* é utilizada a média das normais dos vértices, o que significa encontrar a normal de cada vértice e analisar

quais são os triângulos vizinhos que utilizam o mesmo vértice, como é apresentado na figura 4.5.

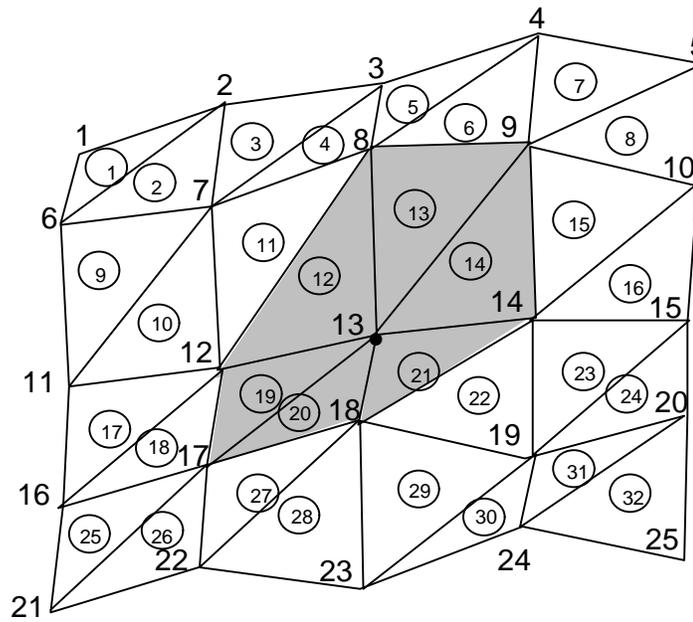


FIGURA 4.5 – Análise de vizinhança de triângulo que utilizam o mesmo vértice.

Como pode ser analisado, o vértice de um triângulo compartilhado por até seis triângulos. Um exemplo notável é o vértice de número 13. Os triângulos que utilizam-no são os de números: 12, 13, 14, 19, 20 e 21.

Uma rotina foi desenvolvida para realizar este processo. Ela tem a função de identificar, vértice por vértice, quais são os triângulos vizinhos que compartilham um mesmo vértice. A figura 4.6 demonstra essa rotina:

-
- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Ler vértice n2. Fazer verificação de todos os triângulos que utilizam o vértice n
 Armazenar as normais quando encontrar o vértice n
 Contar quantos triângulos utilizam o vértice n
 Voltar ao passo 23. Calcular a média das normais pela qtde. de triângulos encontrados
 Voltar ao passo 1 |
|---|

FIGURA 4.6 – Algoritmo para encontrar a média das normais
de todos os vértices.

Novamente há a necessidade de utilizar um algoritmo de eliminação de linhas ocultas, no qual a posição do observador e da fonte de luz é a mesma, e está localizada no centro da imagem (área de análise), como foi explicado na tonalização facetada. Posteriormente, é realizada a projeção ortográfica para visualização com sensação 3D na tela do computador.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados basicamente os resultados obtidos e as respectivas análises. Encontra-se estruturado na forma que segue:

- Material e Métodos (seção 5.2);
- Experimentos com dados sintéticos (seção 5.3); e
- Experimentos com dados reais (seção 5.4).

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

A avaliação experimental será realizada através da análise visual dos resultados, tendo por base os resultados individuais de tonalização e as comparações entre os mesmos e em relação ao MDT da região.

Nos experimentos realizados foram utilizadas três imagens digitais, sendo a primeira uma imagem sintética, a segunda uma imagem de área teste (maquete), e a terceira uma imagem aérea. Nas próximas subseções serão apresentados os métodos e dados utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

5.2.1 DADOS ARTIFICIAIS

Na imagem artificial, formada pelo cruzamento de duas linhas, foram utilizados os mesmos dados de orientação interior e exterior do experimento apresentado na subseção 5.2.2 e 5.2.3. As resoluções geométrica e radiométrica, além do tamanho da imagem, foram também reaproveitadas. Como mostra a figura 5.2, o MDT (20 linhas por 20 colunas) foi montado a partir de um esboço de curvas de nível, que representa cinco montanhas distribuídas espacialmente na forma aproximada de um “X”. As faixas em “X” na imagem digital (figura 5.1) foram desenhadas diretamente na imagem, de tal forma que as mesmas passassem aproximadamente pelos picos das montanhas. Portanto, a equação de colinearidade não foi usada na simulação da imagem.

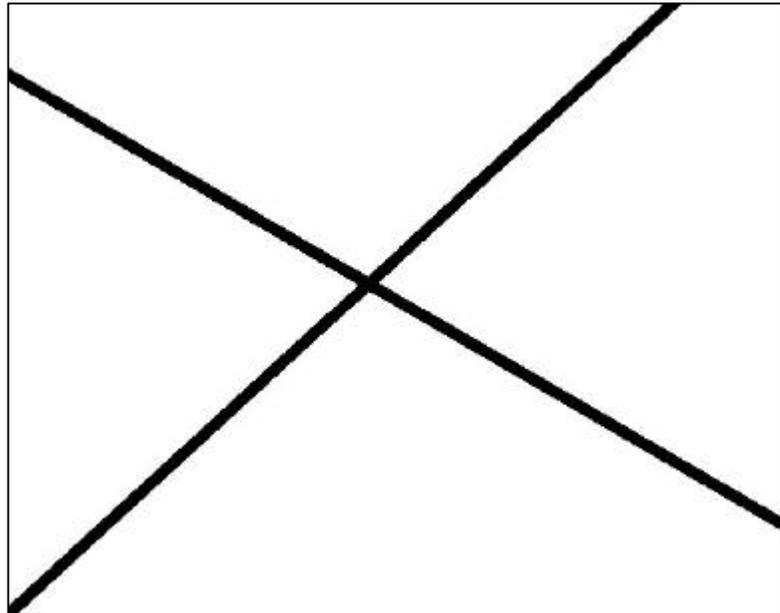


FIGURA 5.1 – Imagem digital artificial.

Na figura 5.2 as linhas mais escuras representam a parte do relevo mais alta e as mais claras a parte mais baixa. A cota mais alta é 58 e a mais baixa (plano horizontal) 50 m.

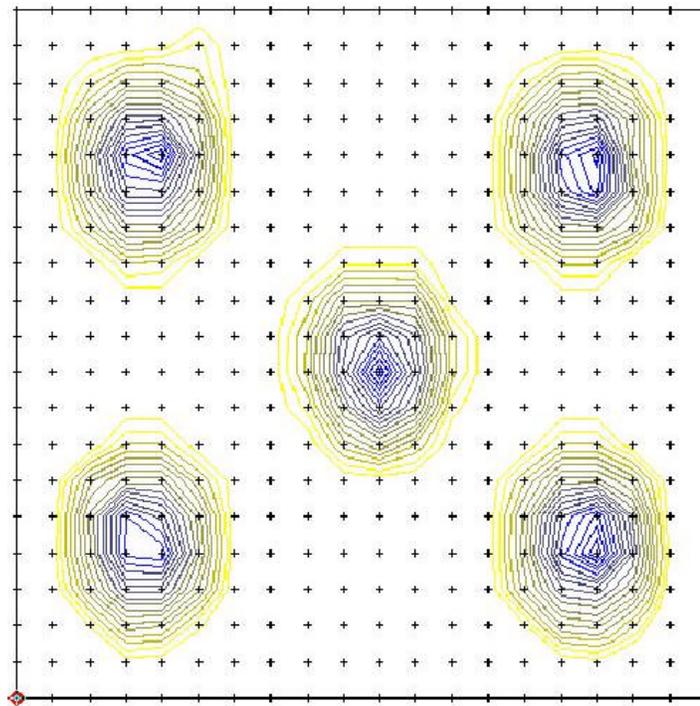


FIGURA 5.2 – Curvas de nível do relevo artificial

5.2.2 DADOS DA MAQUETE

Nesta pesquisa foram utilizados os dados fornecidos pelo projeto “Geração de Modelo Digital de Terreno por Aproximações Sucessivas Utilizando Câmaras Digitais de Pequeno Formato” (Barbosa, 1999), sendo os mesmos:

- imagem digital (Câmara Digital Fujix DS300) de uma área teste (maquete) representando um terreno (figura 4.1), no formato Windows BMP, com 24 bits de resolução radiométrica e com $10\mu\text{m}$ de resolução geométrica, e tamanho da imagem de 1280 x 1000 *pixel*;
- arquivo do tipo texto contendo as coordenadas do MDT (malha regular de 17 linhas por 9 colunas, conforme pode ser verificado na figura 4.2);
- elementos de orientação exterior:
 - $\omega = -0,0072$ (radianos);
 - $\phi = 0,0301$ (radianos);
 - $\kappa = 0,0102$ (radianos);
 - $X_0 = 2,5333$ m;
 - $Y_0 = 1,4914$ m;
 - $Z_0 = 1,9957$ m;
- elementos de orientação interior:
 - $x_0 = -0,1208$ mm;
 - $y_0 = 0,1337$ mm;
 - focal calibrada = 11,5786 mm;

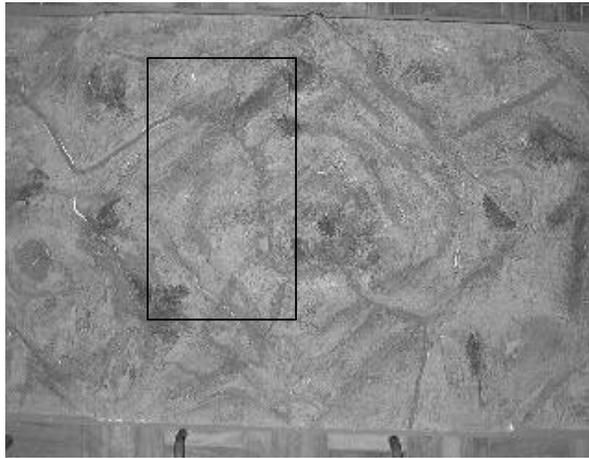


FIGURA 5.3 – Imagem digital original da maquete.

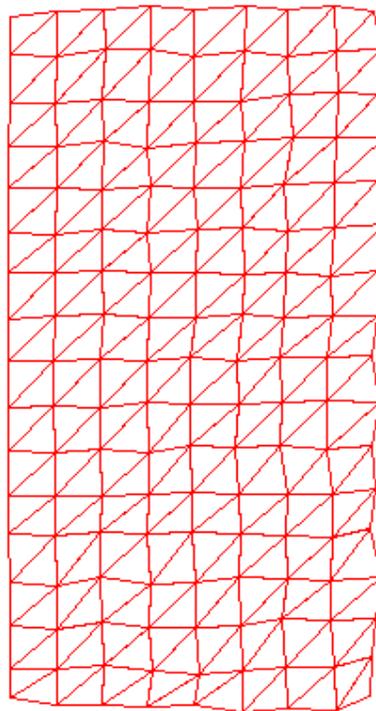


FIGURA 5.4 – MDT da maquete correspondente a região selecionada na
(figura 5.3).

O MDT desta área foi gerado por Barbosa (1999), cuja visualização é apresentada na figura 5.4. Um detalhe importante é notado na figura 5.3, tratando-se de uma pequena região selecionada através de um retângulo. A disponibilidade de dados (MDT) apenas nesta pequena região é um fator limitante do experimento com a maquete.

5.2.3 DADOS REAIS

Os dados reais foram fornecidos por Silva (2001), que são:

- imagem digital (Câmara Digital Fujix DS300) de uma área real (figura 4.3), no formato Windows BMP, com 24 bits de resolução radiométrica e com $10\mu\text{m}$ de resolução geométrica, e tamanho da imagem de 1280×1000 *pixel*;
- coordenadas de pontos irregularmente espaçados no terreno (13 pontos);
- elementos de orientação exterior:
 - $\omega = -0,1567$ (radianos);
 - $\phi = 0,1925$ (radianos);
 - $\kappa = -0,1329$ (radianos);
 - $X_0 = 458508,3271$ m;
 - $Y_0 = 7553361,3291$ m;
 - $Z_0 = 959,3668$ m;
- elementos de orientação interior:

-
- $x_0 = 0,0132$ mm;
 - $y_0 = 0,0060$ mm;
 - focal calibrada = 11,5092 mm;

Um *software* de geração de MDT foi utilizado para transformar a malha irregular de 13 pontos numa outra regular, com 17 linhas por 9 colunas, como pode ser verificado na figura 5.6.



FIGURA 5.5 – Imagem digital original (real).

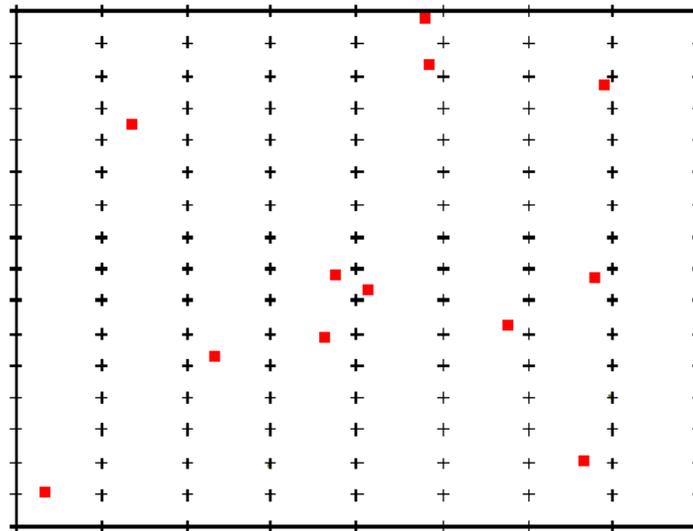


FIGURA 5.6 – Malha regular interpolada.

Como mostra a figura 5.6, a malha irregular (representada pelos símbolos “■”) é composta por pontos muito mal distribuídos, dando origem um MDT de má qualidade. Tendo em vista também que o terreno é pouco movimentado, simulou-se um relevo para possibilitar melhores resultados com a imagem da figura 5.5. Para tanto, este relevo falso foi construído a partir da coleta de várias coordenadas de um esboço de curvas de nível, como pode ser verificado na figura 5.7. A partir destas coordenadas um software de geração de MDT foi utilizado para criar a malha regular de 20 linhas por 20 colunas (figura 5.7).

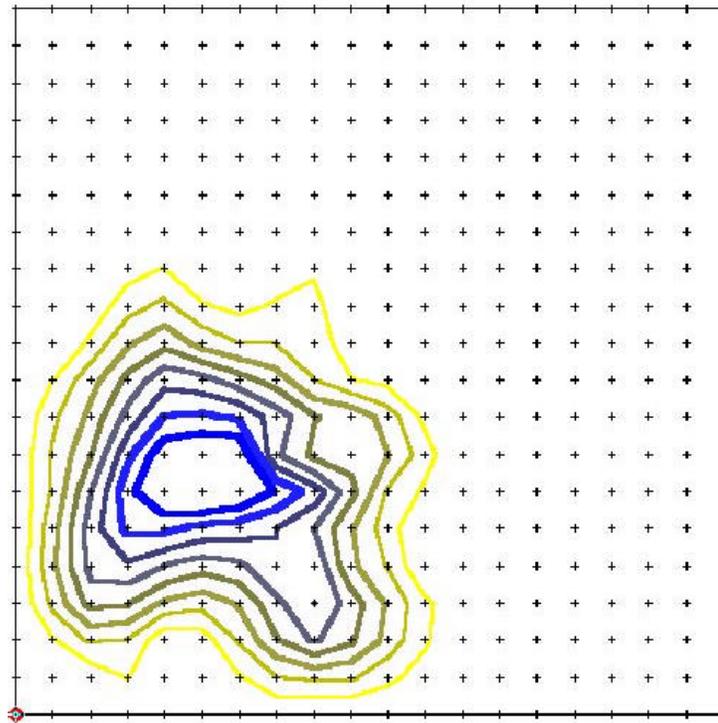


FIGURA 5.7 – Curvas de nível do relevo simulado.

Observando as curvas de nível (figura 5.7), nota-se que as linhas mais escuras representam a parte mais alta do relevo e as mais claras a parte mais baixa. Observa-se também que o relevo falso está localizado no canto inferior esquerdo, onde, se comparado com a imagem original (figura 5.5), verifica-se que é uma região limpa (sem edificações e árvores). Isto foi feito para evitar distorções na visualização, pois não se tem as informações das alturas das edificações da área urbana. A base da montanha possui cota de 100 m e os picos cota de 160 m. A área não relacionada com a montanha é um plano de cota 100 m.

5.3 EXPERIMENTO COM DADOS ARTIFICIAS

Os dados artificiais como apresentados na subseção 5.2.1 representam cinco montanhas, sobrepostas parcialmente por duas faixas estreitas em forma de “X”. Os experimentos a seguir são realizados a partir de vários ângulos de visualização e, em cada um deles, são realizadas comparações entre os resultados dos métodos de tonalização e entre estes e o modelo aramado.

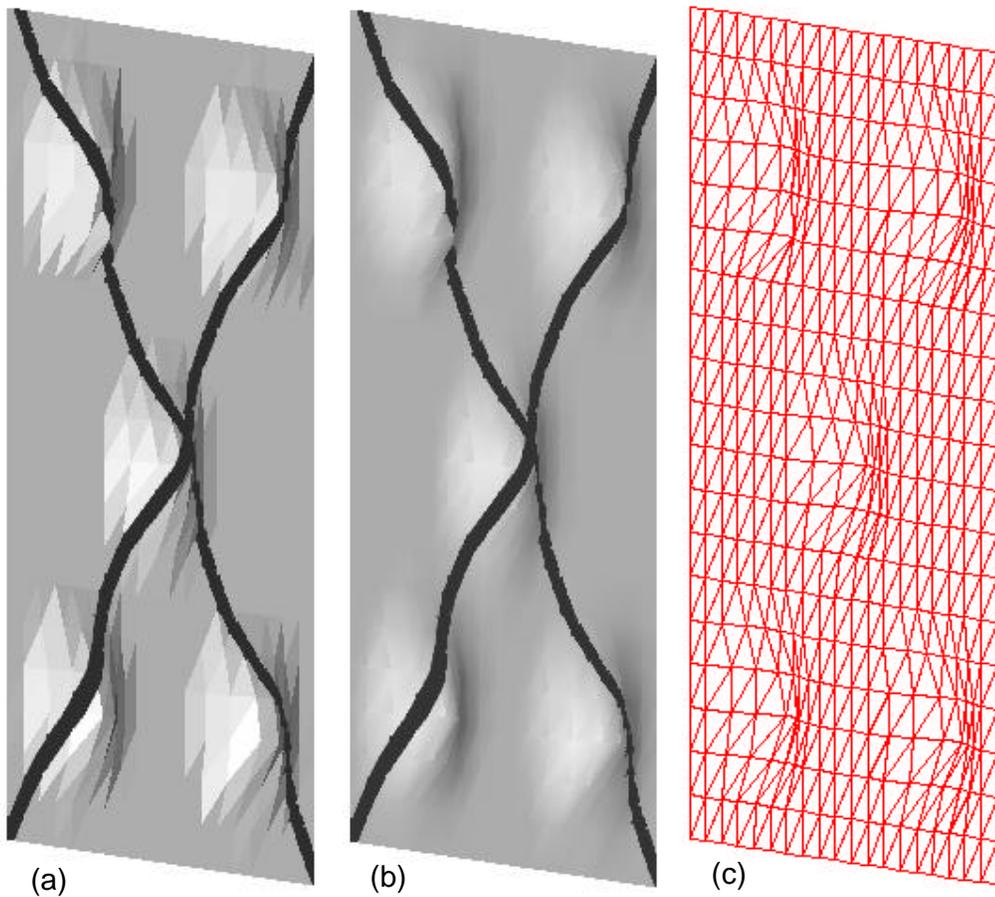


FIGURA 5.8 – (Resultado da imagem artificial) Ângulo de visualização de 60° em torno do eixo x , 5° em torno do eixo y e 90° em torno do eixo z .

(a) tonalização facetada; (b) *Gouraud*; e (c) modelo aramado.

A tonalização facetada apresentada na figura 5.8(a) produz um aspecto facetado. Já na tonalização de *Gouraud* (figura 5.8(b)) o aspecto facetado é eliminado. Comparando-se os resultados da tonalização facetada com um exemplo retirado da literatura (figura 2.8), verifica-se que está dentro do esperado. Comparando-se agora ambos os resultados da tonalização com o modelo aramado que representa o terreno, fica nítida a similaridade entre ambas as representações.

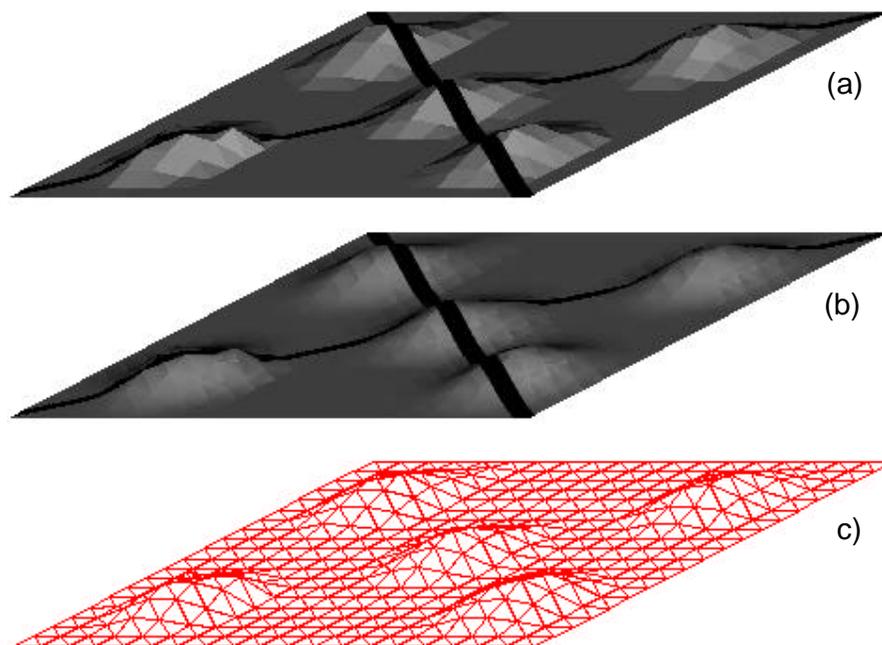
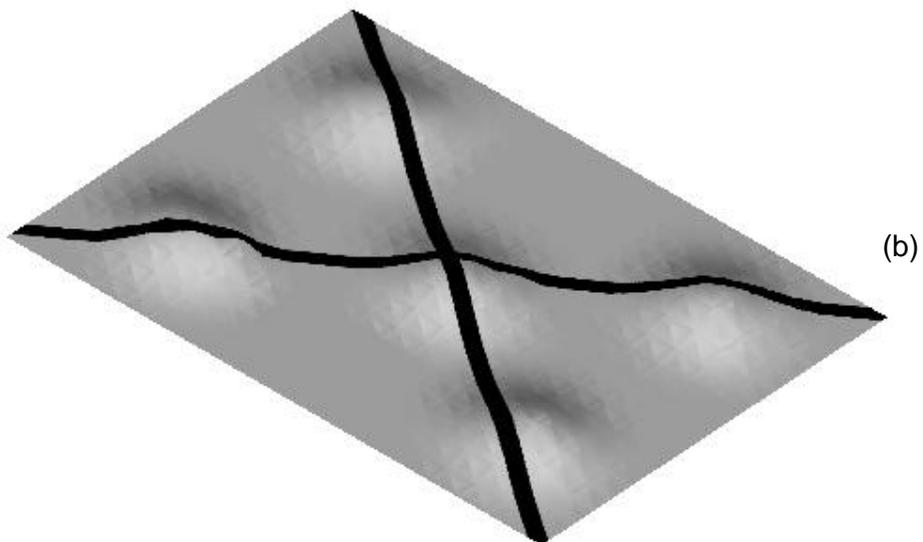
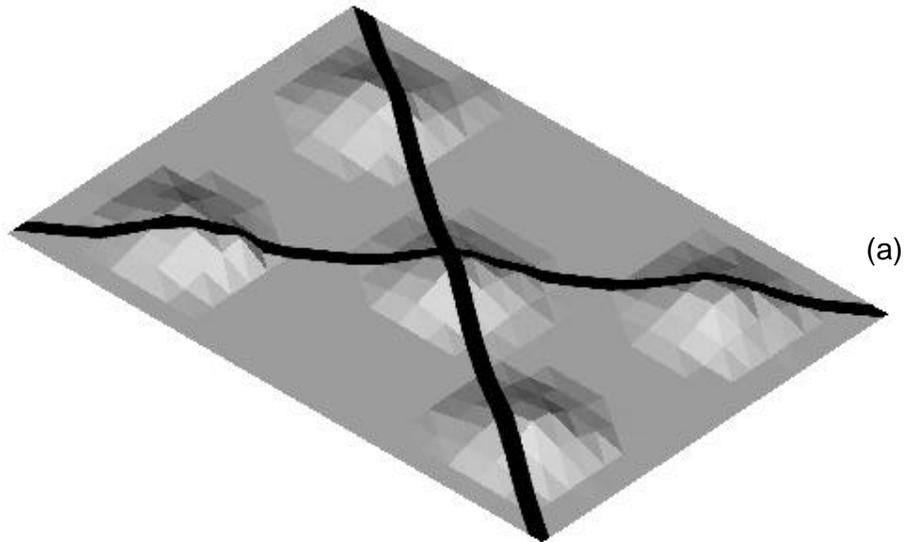


FIGURA 5.9 – (Resultado da imagem artificial) Ângulo de visualização de 70° em torno do eixo x , 45° em torno do eixo y e 0° em torno do eixo z .

(a) tonalização facetada; (b) *Gouraud*; e (c) modelo aramado.

O ponto de vista utilizado no experimento da figura 5.9 facilita a visualização das formas do relevo. Considerando-se agora os métodos de tonalização (figuras 5.9(a) e 5.9(b)) e o modelo aramado (figura 5.9(c)), verifica-se que são bastante compatíveis entre si.



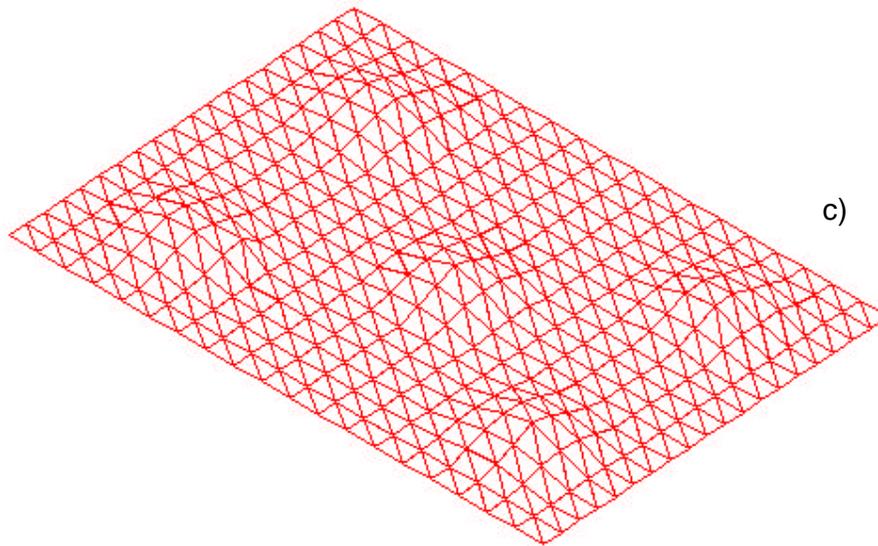


FIGURA 5.10 – (Resultado da imagem artificial) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x , 30° em torno do eixo y e 30° em torno do eixo z.
(a) tonalização facetada; (b) *Gouraud*; e (c) modelo aramado.

No experimento apresentado na figura 5.10, pelos ângulos de visualização serem pequenos, tem-se mais uma visão geral do terreno, não ficando tão nítidas as montanhas. Um outro detalhe que pode ser visto no modelo aramado (figura 5.10(c)) é o modo como foi definida a malha regular do terreno. Por esta ter um espaçamento razoavelmente grande, a tonalização de *Gouraud* (figura 5.10(b)) não suaviza totalmente a superfície. Em geral, quanto mais densa for a malha do MDT, mais suave será a imagem 3D.

Em todos os ângulos de visualização fica nítido o princípio de tonalização visto no capítulo 3, isto é, verificam-se o aspecto facetado para a tonalização facetada e o aspecto suavizado para a tonalização de *Gouraud*. Nota-se também a importância da escolha do ponto de vista para realçar mais, ou menos, o relevo.

5.4 EXPERIMENTO COM DADOS REAIS

5.4.1 DADOS DE UMA MAQUETE

Voltando a analisar a figura 5.3 (seção 5.2.2), verifica-se que a área usada (área destacada com um retângulo) neste experimento é muito pequena, pois há informação de altura apenas para a área destacada. Consequentemente, fica prejudicada a análise visual de características do terreno, tais como: rios, mata, relevo, etc.

Comparando as figuras 5.11(a) e (b), verifica-se que apesar do aspecto facetado do resultado obtido com o método facetado, as formas dos relevos obtidos pelos dois métodos são compatíveis. Nota-se, também a similaridade entre o modelo aramado (figura 5.11(c)) e os resultados dos métodos de tonalização.

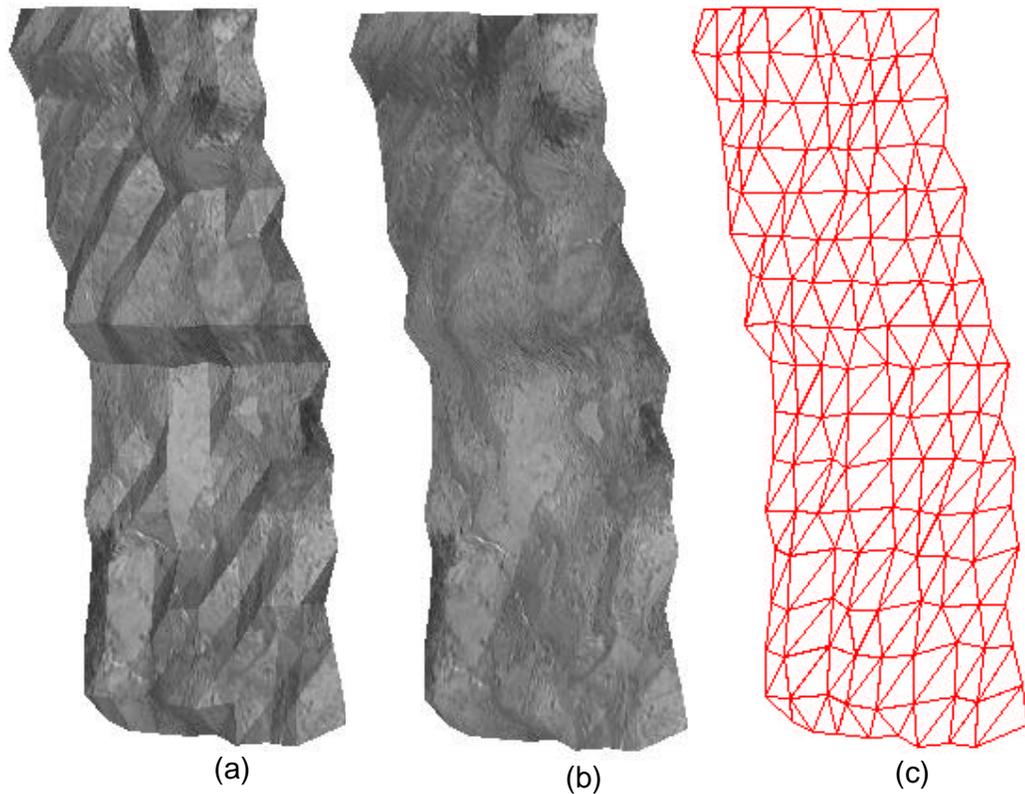


FIGURA 5.11 – (Resultado da imagem da maquete) Ângulo de visualização de 10° em torno do eixo x e -45° em torno do eixo y. (a) tonalização facetada; (b) *Gouraud*; e (c) modelo aramado.

A figura 5.12 mostra os resultados obtidos a partir de um outro ponto de vista. Analisando-se os resultados da tonalização facetada (figura 5.12(a)) e da tonalização de *Gouraud* (figura 5.12(b)), nota-se que as características do terreno são semelhantes. Conclusão semelhante é obtida a partir da comparação do modelo aramado (figura 5.12 (c)) com as representações resultantes dos modelos de tonalização.

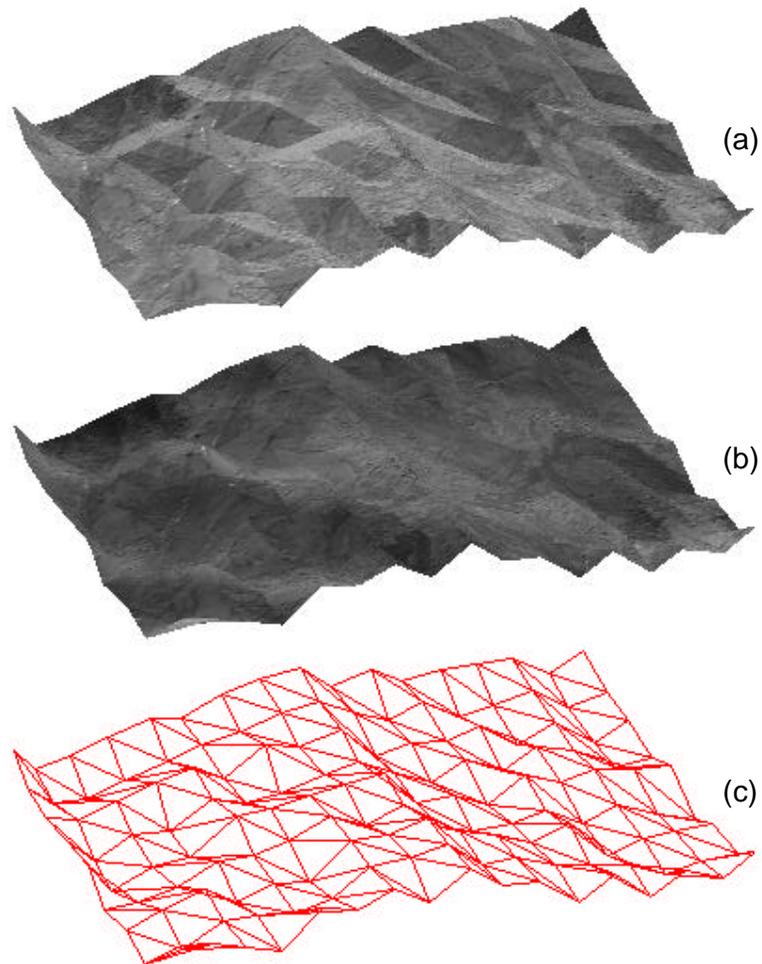


FIGURA 5.12 – (Imagem da maquete) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x, 45° em torno do eixo y e 45° em torno do eixo z. (a) tonalização facetada; (b) *Gouraud*; e (c) modelo aramado.

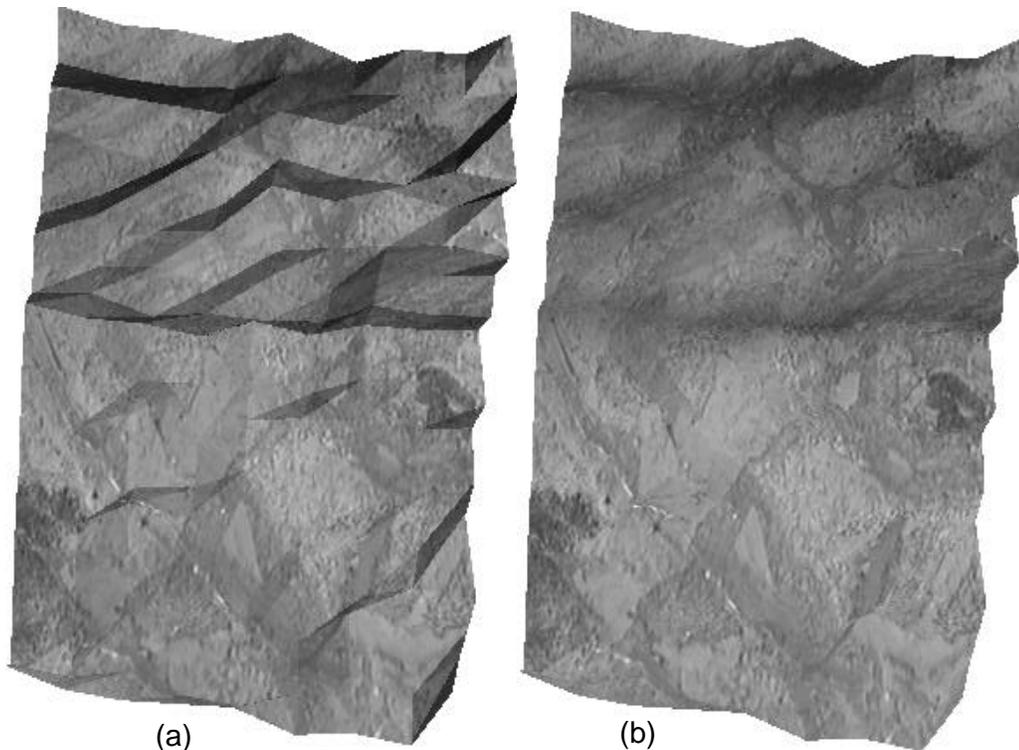


FIGURA 5.13 – (Imagem da maquete) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x, 5° em torno do eixo y e 0° em torno do eixo z. (a) tonalização facetada; e (b) *Gouraud*.

A figura 5.13 apresenta os resultados obtidos a partir de um ângulo de visualização mais favorável para mostrar as características do relevo. Nota-se também a similaridade dos relevos obtidos por ambos métodos. Comparando-se agora estes resultados com o modelo aramado (figura 5.14), verifica-se que as representações do relevo são também compatíveis entre si.

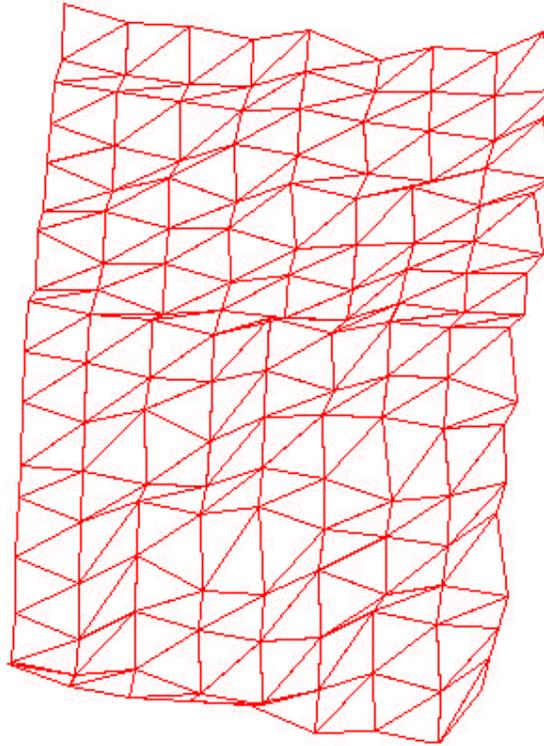


FIGURA 5.14 – (Modelo aramado da imagem da maquete) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x e 5° em torno do eixo y.

Analisando-se novamente as figuras 5.11, 5.12 e 5.13, nota-se que, de uma forma geral, as características do terreno não são bem identificadas, tais como: rios, mata, relevo, etc. Isso ocorre principalmente por que a área teste não apresenta estes detalhes bem definidos. Entretanto, pode ser notada, em todos os experimentos, a similaridade entre as representações geradas por ambos os métodos de tonalização, e também entre estas e a representação aramada.

5.4.2 DADOS DE UMA IMAGEM AÉREA

5.4.2.1 IMAGEM AÉREA COM MDT REAL

Conforme mostra a figura 5.15, os resultados obtidos não mostram claramente o relevo. Além da região ser relativamente plana, os pontos usados para gerar o MDT são poucos e mal distribuídos (figura 5.6). A figura 5.15(c) mostra que as regiões próximas às bordas do MDT, principalmente a inferior e a esquerda, apresentam relevos falsos, semelhantes às faixas planas e inclinadas na direção dos limites do MDT. Como essas regiões são as que apresentam variação de relevo mais pronunciados em relação a todo MDT, os efeitos nos resultados dos métodos de tonalização são claramente identificados, conforme mostram, principalmente, as bordas inferior e esquerda das imagens das figuras 5.15(a) e (b). A próxima subseção mostra os resultados obtidos com os mesmos dados, só que com um relevo artificial.

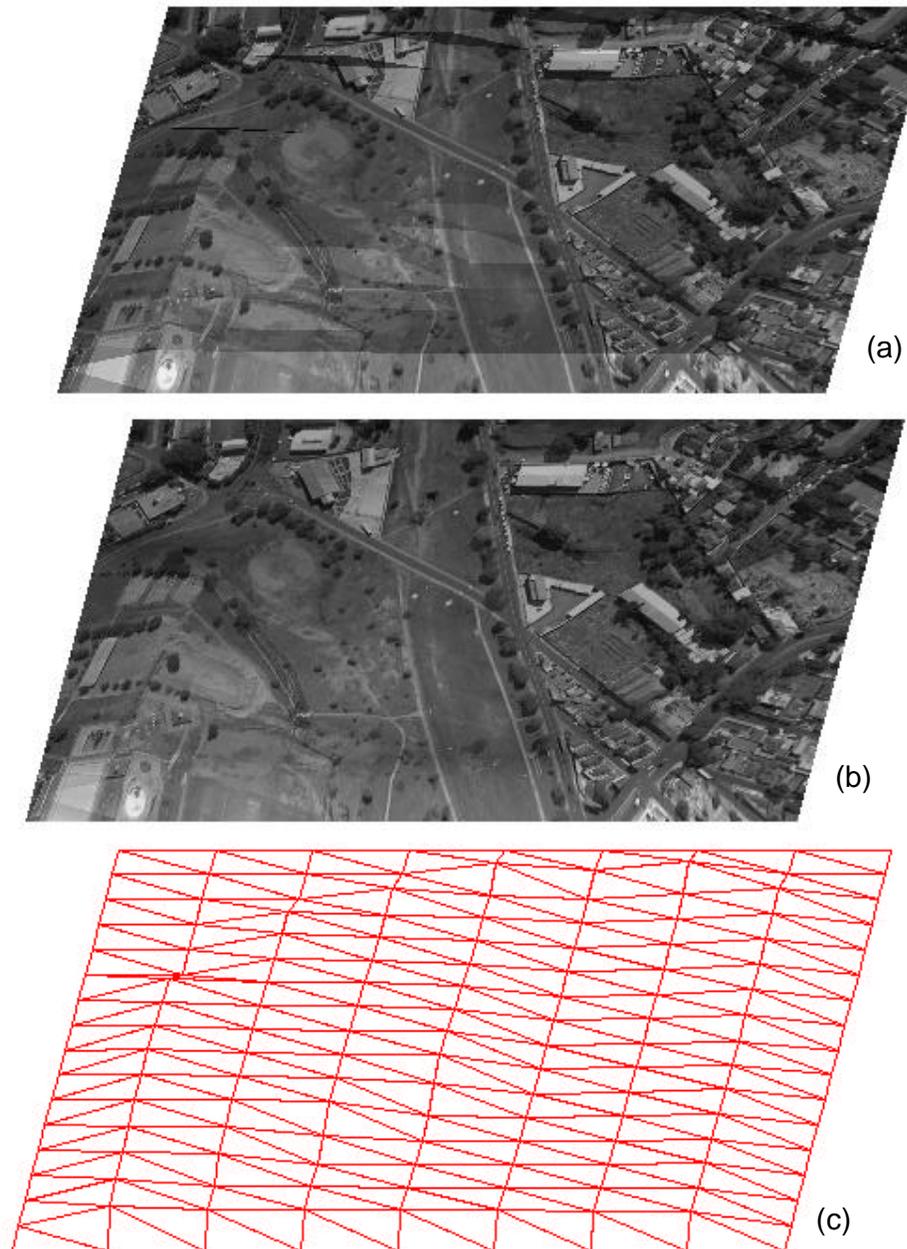


FIGURA 5.15 – (Imagem real) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x e 15° em torno do eixo y. (a) Tonalização facetada; (b) *Gouraud*; e (c) modelo aramado.

5.4.2.2 IMAGEM AÉREA COM MDT SINTÉTICO

A seguir são apresentados alguns resultados usando os mesmos dados do experimento anterior. Como já foi mencionado, a única diferença é que o MDT usado é artificial, tendo sido obtido conforme procedimento descrito na subseção 4.2.3. As figuras 5.16, 5.17 e 5.18 mostram os resultados obtidos a partir de 3 pontos de vista diferentes.

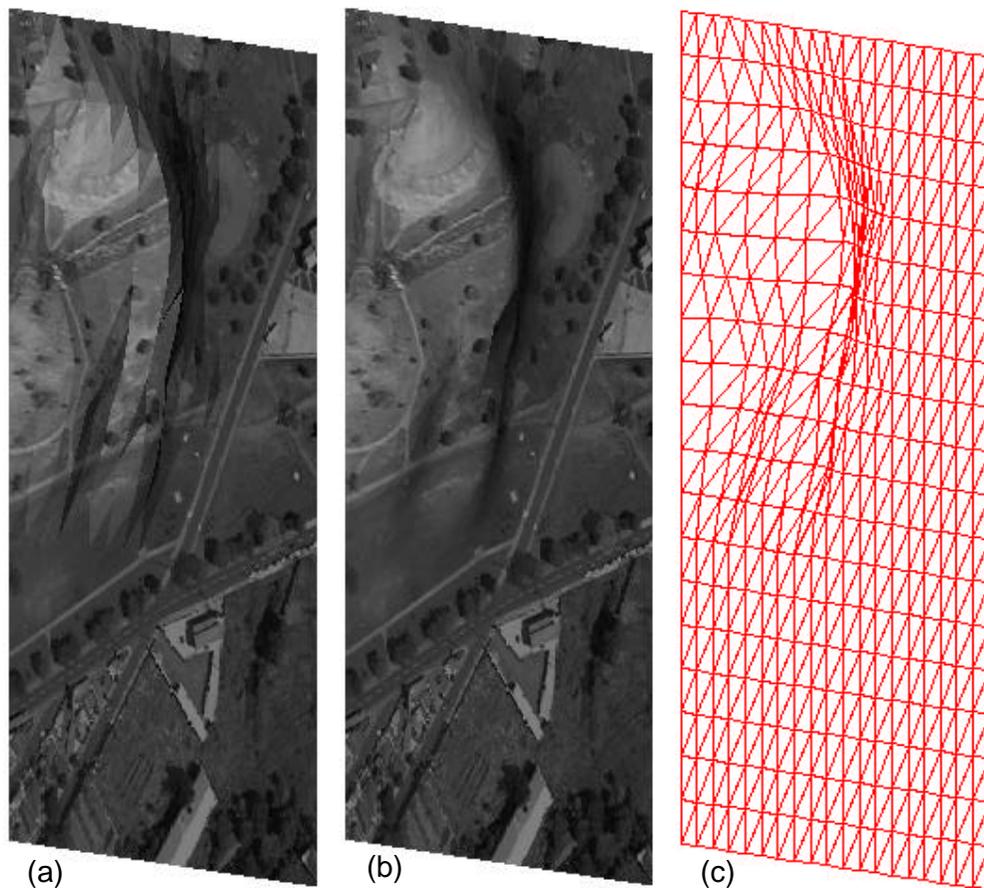


FIGURA 5.16 – (Resultado da imagem real) Ângulo de visualização de 60° em torno do eixo x, 5° em torno do eixo y e 90° em torno do eixo z. (a) tonalização facetada; (b) *Gouraud*; e (c) modelo aramado.

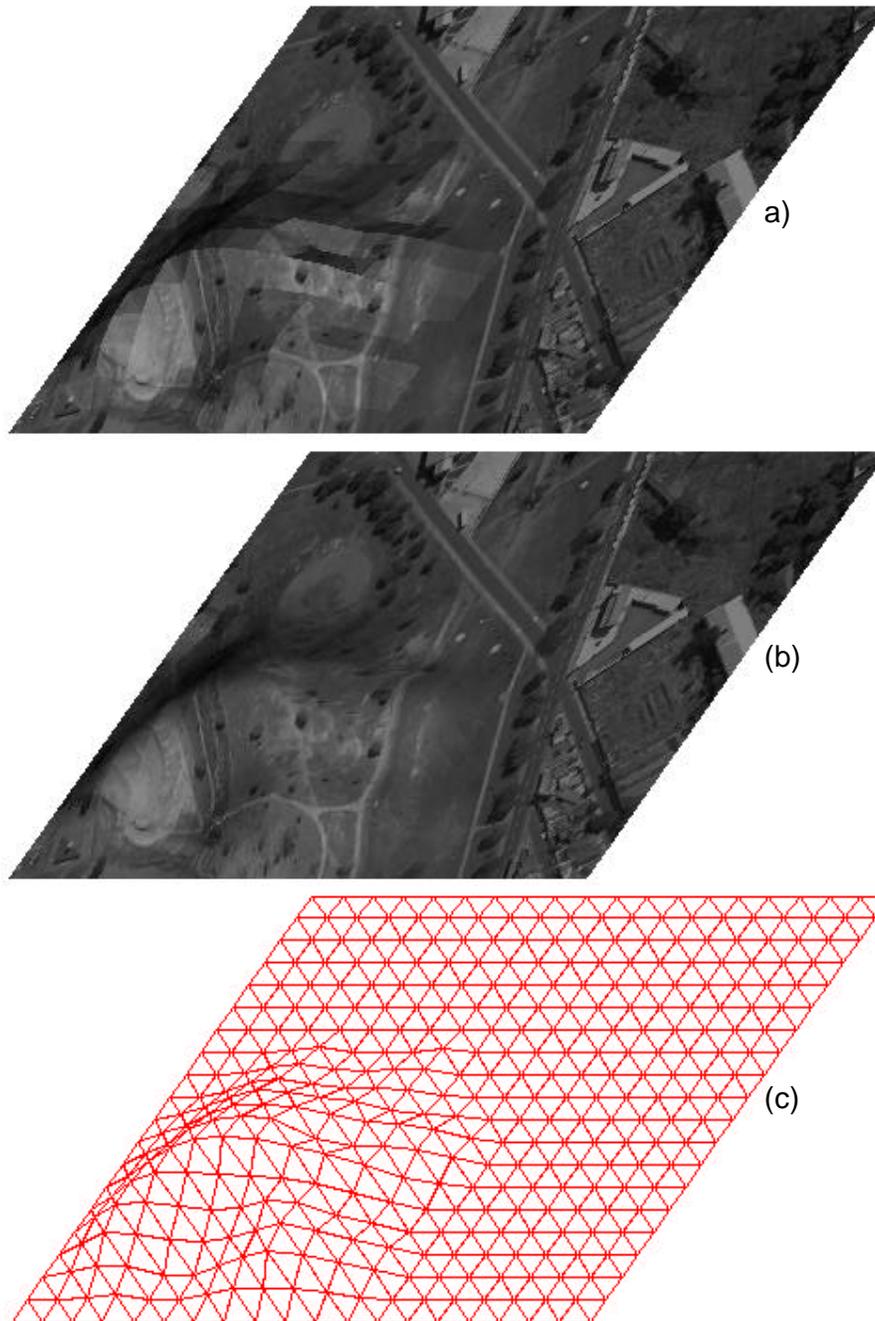


FIGURA 5.17 – (Resultado da imagem real) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x, 45° em torno do eixo y e 0° em torno do eixo z. (a) tonalização facetada; (b) *Gouraud*; e (c) modelo aramado.

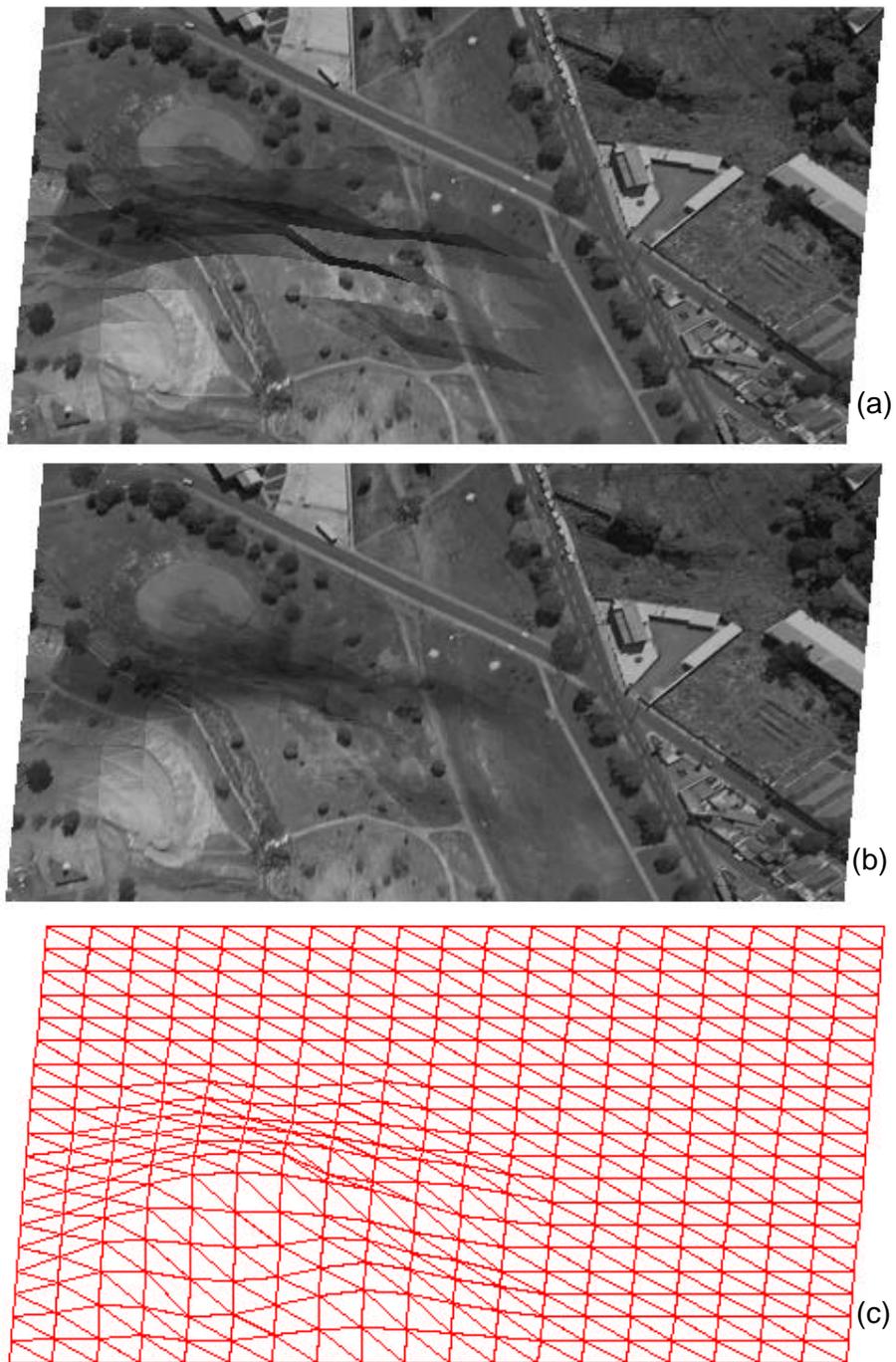


FIGURA 5.18 – (Resultado da imagem real) Ângulo de visualização de 45° em torno do eixo x, 5° em torno do eixo y e 0° em torno do eixo z. (a) tonalização facetada; (b) *Gouraud*; e (c) modelo aramado.

Analisando os experimentos, verifica-se que o relevo é bem nítido na figura 5.16. Esse efeito é obtido a partir de um ponto de vista bastante baixo, adquirido a partir de uma rotação de 60° em torno do eixo x. Um ponto de vista oblíquo (rotação de 45° em torno de x e y) é usado para alcançar os resultados apresentados na figura 5.17, permitindo obter também um excelente efeito 3D. Um ponto de vista oblíquo também é usado na figura 5.18, também com excelentes resultados de visualização 3D.

Portanto, os três pontos de vista permitiram visualizar o relevo de forma nítida. Observa-se também que:

- o método facetado não gerou aspectos de relevo muito facetados;
- a percepção de relevo para ambos os métodos de tonalização são bastante similares; e
- grande similaridade também é observada entre o modelo aramado e os resultados dos dois métodos de tonalização.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foram implementadas e avaliadas técnicas de visualização 3D de uma imagem digital, como mostra o capítulo 3.

Como mostrou o capítulo 5, a análise dos resultados foi realizada visualmente, através da comparação entre os resultados dos métodos de tonalização e entre estes e o modelo aramado para cada ponto de vista.

De uma forma geral, observou-se que:

- os aspectos facetados variam em intensidade entre os experimentos, mas estão dentro do previsto teoricamente. De fato, os aspectos facetados obtidos podem ser considerados compatíveis com um exemplo retirado da literatura e apresentado na figura 2.9 do capítulo 2;
- resultados com textura suave foram obtidos com o método de tonalização de *Gouraud*;
- as percepções de relevo, para ambos os métodos de tonalização, apresentaram-se compatíveis entre si em todos os experimentos;
- as percepções do relevo obtidas com o modelo aramado e com as representações obtidas através dos métodos de tonalização foram também compatíveis;

- embora o modelo de iluminação adotado seja o mais simples, bons resultados foram obtidos;
- a escolha do ponto de vista é um critério fundamental para realçar a percepção do relevo. Em geral, pontos de vista oblíquos permitiram a obtenção de bons resultados;
- excelentes resultados foram obtidos com os experimentos com dados artificiais (seção 5.2.1);
- fatores, como, pequena área com disponibilidade de dados (MDT) e definição ruim dos detalhes da superfície, contribuíram para a obtenção de resultados inferiores com a maquete (seção 5.2.2). Entretanto, nota-se que os resultados dos métodos de tonalização são compatíveis entre si e com o MDT (modelo aramado);
- os resultados obtidos com os dados reais (seção 5.2.3) não foram satisfatórios devido, principalmente, a qualidade ruim dos dados de altimetria. Entretanto, excelentes resultados de visualização 3D foram obtidos com a substituição do MDT original por um artificial (seção 5.4.2.2);
- pela falta de altura de objetos, tais como, construções e árvores, os mesmos poderão aparecer distorcidos na imagem 3D. Pela mesma razão, isto também é problema com o processo de geração de ortofoto;

- embora uma avaliação geométrica não tenha sido realizada, uma imagem 3D possui características métricas, podendo ser usada em várias aplicações cartográficas, como a monorestituição e a atualização cartográfica.

Algumas recomendações para trabalhos futuros são:

- visualização contínua do relevo usando múltiplos pontos de vista (animação);
- implementar um modelo de iluminação mais completo;
- análise geométrica dos dados, principalmente usando métodos estatísticos;
- fazer novos experimentos com dados reais adequados, como por exemplo, de uma área rural; e
- desenvolver aplicações cartográficas (e.g. monorestituição, atualização cartográfica, etc).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, J. B.:** *Fotogrametria*, SBEE, Curitiba, 1998.
- BARBOSA, R. L.:** *Geração de um Modelo Digital de Terreno por Aproximações Sucessivas*, Dissertação de Mestrado, Unesp, Presidente Prudente, 1999.
- CUNHA, G. J.; BERALDO, A. T. M.; BARREIROS, F. P.; BATTAIOLA, A. L.:** *Computação Gráfica e Suas Aplicações em CAD: Introdução e Padronização*, Editora Atlas S.A., São Paulo, 1987.
- FOLEY, J. D.; VAN DAM, A.; FEINER, K.; HUGHES, J. F.:** *Computer Graphics Principles and Practice*, Second Edition In C, Addison Wesley, 1996.
- GEIGER, B.:** *Three-dimensional Modeling of Human Organs and its Application to Diagnosis and Surgical Planning*, Tese Ph.D., INRIA, France, pp 22-49,1993
- GONZALES, R. C. & WOODS, R. E.:** *Digital Image Processing*, Addison Wesley, New York, 1993.
- HALL, R.:** *Illumination and Color in Computer Generated Imagery*, Springer-Verlag, New York Inc., 1988.
- HEAR, D. & BAKER, M. P.:** *Computer Graphics, C Version*, 2a. Ed., Prentice-Hall, 1997.
- KRAUSS, K.:** *Photogrammetry: fundamentals and standard processs*. Vol 1, Ferd Dummler Verlag, 1992.

-
- LUGNANI, J. B.:** *Introdução à Fototriangulação* Curitiba, 1987.
- MAKAROVIC, B.:** *Digital Monoplotters*, ITC Journal, pp 583-599, 1973.
- MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; McGLONE, J. C.:** *Introduction to modern photogrammetry*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.
- NARAYAN S.; SENSHARMA D.; SANTORI E. M.; LEE A. A.; SABHERWAL A.; TOGA A. W.:** *Animated Visualization of a High Resolution Color Three Dimensional Digital Computer Model of the Whole Human Head*, Year Book of Medical Informatics, pp 482-501. IMIA-schattauer, 1994.
- NOVO E.M.L.:** *Sensoriamento Remoto – Princípios e Aplicações*, Editora Edgard Blucher Ltda., 1989.
- OKATANI, T.; DEGUCHI, K.:** *Shape Reconstruction from an Endoscope Image by Shape from Shading Technique for a Point Light Source at the Projection Center*, Computer Vision and Image Understanding, Vol. 66, n.º 2, 1997.
- PERSIANO, R. C. M; OLIVEIRA, A. A. F.:** *Introdução a Computação Gráfica*, LTC Livros Técnicos Científicos Editora Ltda., Rio de Janeiro, 1989.
- RICHARDS, A. J.:** *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Springer-Verlag, New York, 1986.
- ROGERS, David F.:** *Procedural Elements for Computer Graphics*, Mc Graw Hill International Editions, Singapore, 1989.

ROGERS, D. F.; ADAMS, A. J.: *Mathematical Elements for Computer Graphics*, Second Edition, Mc Graw Hill International Editions, Singapore, 1985.

SILVA, A.J.F.: *Modelos de Correção Geométrica para Imagens HRV-SPOT*, Dissertação de Mestrado, Curitiba, 1988.

SILVA, J.F.C.: *PATSIR-Programa de Aerotriângulação por Sucessivas Interseções e Resseções*, Relatório de Pesquisa (Fapesp – processo 98/02236-0, Presidente Prudente, 2001.

_____, Reservatórios e Geologia, <http://www.tecgraf.puc-rio.br/scripts/cgilua/princp.htm>, (01/09/2001).