

Metodologia para a Visualização Tridimensional de uma Imagem Digital

Msc, Giovana Angélica Ros ¹
 Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz ²
 Prof. Dr. Júlio Kyoshi Hasegawa ³

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
 UNESP - Universidade Estadual Paulista
 Sítio Bela Vista, Caixa Postal 07, Bairro Km4
 19160-000 - Álvares Machado - SP

¹ ✉ giovana@prudente.unesp.br

² ✉ aluir@prudente.unesp.br

³ ✉ hasegawa@prudente.unesp.br

Conteúdo	
	1 Introdução
	2 Metodologia para visualização 3D de uma imagem digital
	2.1 Princípio do método
	2.2 Processo de tonalização
	2.2.1 Cálculo dos tons de cinza para pontos do poliedro
	2.2.2 Tonalização do poliedro
	2.3 Processo de visualização
	3 Resultados obtidos
	4 Potencial de aplicação em Cartografia
	5 Conclusões
	6 Agradecimentos
	7 Referências Bibliográficas

Resumo: Este artigo apresenta uma metodologia para visualização 3D de uma imagem digital, bem como discute seu potencial de aplicação em cartografia. Dado um MDT (Modelo Digital do terreno) regular, cujos pontos se conectam formando uma malha triangular, uma metodologia de tonalização é aplicada a cada triângulo do MDT. Isto requer o cálculo na imagem digital dos tons de cinza de pontos correspondentes aos pixels do plano de visualização 3D, exigindo a modelagem do sensor utilizado na obtenção da imagem. Na seqüência, um modelo de tonalização pode ser utilizado para adicionar artificialmente um efeito extra de tonalização aos tons de cinza previamente obtidos, gerando, e.g., sombras nas encostas mais elevadas e opostas à fonte artificial de luz. Finalmente, um modelo de projeção é utilizado para obter a sensação 3D no plano de visualização. Os resultados obtidos foram satisfatórios, mostrando que a metodologia de visualização 3D possui potencial para várias aplicações cartográficas, como, e.g., a atualização cartográfica.

Palavras chave: Tonalização Facetada, Tonalização de Gouraud, Visualização 3D.

Abstract: This article presents a methodology for 3D visualization of a digital image and discusses its cartographic potential. Assuming that a regular DTM (Digital Terrain Model) is available, whose points are connected to form a triangular mesh, a shading methodology is applied triangle-by-triangle. This requires the computation of gray levels of image points corresponding to the pixels of 3D visualization plane, what in turn requires the modeling of the sensor used to acquire the image. Next, a shading model may be used to add artificially an extra effect of shading to the gray levels previously obtained, generating, e.g., shadows along the most elevated slopes opposed to the artificial light source. Finally, a projection model is used to obtain the 3D perception on the visualization plane. Results obtained were sufficient, showing that the 3D visualization methodology has the potential to be used in several cartographic application, as, e.g., in the cartographic revision.

Keywords: Flat Shading, Gouraud Shading, 3D visualization.

1 Introdução

A visualização 3D (ou tridimensional) tem sido muito utilizada em alguns meios, dentre os quais podem ser destacados as indústrias cinematográfica e, mais ainda, da informática. A visualização 3D é obtida pelo ser humano através da percepção do sistema nervoso e psicológico (Gonzales & Woods, 1993). Em medicina as imagens 3D, geradas e.g. a partir de imagens de órgãos humanos capturadas através de tomografia computadorizada, endoscopia, ressonância magnética etc., são utilizadas para fazer análises clínicas de doenças ou para fazer o acompanhamento do desenvolvimento de bebês durante a gestação (Okatani & Deguchi, 1997; Geiger, 1993). Além da visualização médica, imagens de raio X podem ser utilizadas para a geração de visualizações 3D para aplicações em Geologia, Arqueologia, Fluidodinâmica etc. (TECGRAF, 2001).

Em Cartografia, várias técnicas de visualização 3D, mais comumente denominadas de visualização estereoscópica, têm sido utilizadas por longa data na fotointerpretação e na extração fotogramétrica de informações georreferenciadas para aplicações em SIG (Sistema de Informações Geográficas) e no mapeamento convencional (Mikhail et al., 2001). Exemplos dessa técnica são o sistema binocular vastamente empregado nos convencionais restituídos fotogramétricos e o sistema de polarização empregado nos modernos sistemas fotogramétricos digitais (Mikhail et al., 2001). Essas técnicas têm em comum a necessidade de um estereopar de fotos, de operadores com boa acuidade visual e bem treinados e de hardwares específicos. Tudo isso tem implicação no custo do sistema de coleta de informações georreferenciadas, tornando mais distante o emprego maciço da tecnologia fotogramétrica. Uma

técnica alternativa, ainda raramente explorada em cartografia e que não compartilha as principais desvantagens da visualização estereoscópica, pode ser as metodologias de visualização 3D baseadas em Computação Gráfica, que através da projeção de uma imagem digital sobre um MDT (Modelo Numérico de Terreno) possibilitam a visualização 3D (Ros, 2001). O resultado seria semelhante a uma ortomagem convencional, mas que apresentaria a possibilidade de se realizar medidas 3D (e.g., pontos, feições, distâncias etc.), auxiliadas por visualizações 3D a partir de múltiplos pontos de vista. Isso abre, de imediato, perspectivas para múltiplas aplicações em Cartografia, como, e.g., na atualização cartográfica, mediante o registro de um mapa desatualizado sobre uma imagem 3D atual.

Este trabalho tem por motivação principal a integração de técnicas das áreas de Fotogrametria e Computação Gráfica, visando a visualização 3D de uma imagem digital, semelhante a que é obtida pelos métodos convencionais de visão estereoscópica. É discutido também o potencial da metodologia em várias aplicações cartográficas. A Seção 2 apresenta os fundamentos matemáticos da metodologia. Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia de visualização são apresentados e discutidos na Seção 3. A Seção 4 discute brevemente o potencial de aplicação do método em Cartografia. A Seção 5 apresenta as principais conclusões e recomendações.

2 Metodologia para visualização 3D de uma imagem digital

2.1 Princípio do método

A Figura 1 ilustra a metodologia para visualização 3D de uma imagem digital, cujo princípio básico consiste em transferir para a superfície poliédrica, gerada a partir de um MDT, os tons de cinza da imagem digital e projetar o resultado para o plano de visualização, permitindo ao observador a sensação 3D da imagem digital projetada sobre o MDT. A opção pelo poliedro definido por superfícies triangulares planas se deve à simplicidade de seu tratamento matemático e algorítmico, além de geralmente possibilitar uma representação satisfatória da superfície, como pode ser constatado nos estudos de Mitishita (1997).

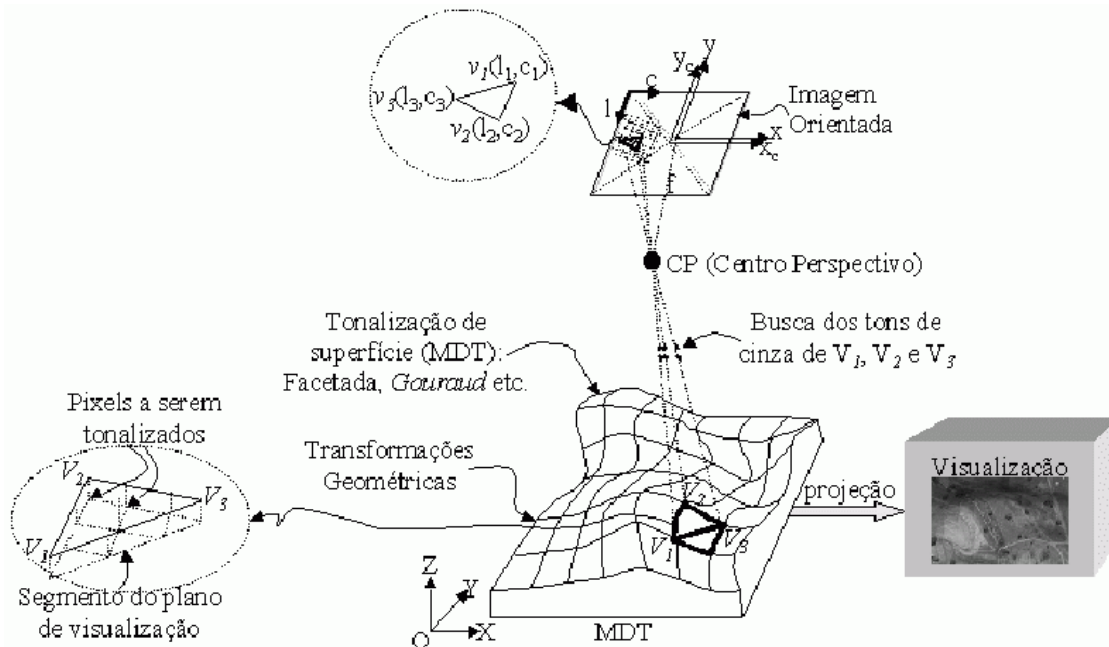


Figura 1 : Princípio do método

A transferência dos tons de cinza da imagem digital para o poliedro, processo que será denominado no restante do trabalho de tonalização do poliedro ou, simplesmente, tonalização, é feita triângulo - a - triângulo. Tomando como exemplo o triângulo definido pelos vértices V_1 , V_2 e V_3 , cujas coordenadas são referidas ao referencial do espaço-objeto OXYZ (na prática, o referencial geralmente utilizado é o UTM (*Universal Transverse of Mercator*) com altura ortométrica (Lugnani, 1987)), as seguintes etapas são necessárias para a tonalização do triângulo: 1- cálculo dos tons de cinza dos vértices e dos pontos internos do triângulo, correspondentes aos pixels a serem tonalizados de um pequeno segmento de visualização (ver ilustração em destaque na figura 1); e 2- tonalização do triângulo usando os tons de cinza obtidos no passo anterior. A primeira etapa requer o conhecimento dos parâmetros de orientação interior e exterior do sensor no instante de tomada da imagem, os quais são geralmente obtidos *a priori* através de um processo de auto-calibração (Barbosa, 1999). Estes parâmetros permitem o cálculo no espaço-imagem das coordenadas dos pontos internos do triângulo e dos vértices v_1 , v_2 e v_3 , sendo estes correspondentes respectivamente aos vértices V_1, V_2 e V_3 . As coordenadas obtidas são então utilizadas para obter, através de algum processo de reamostragem de tons de cinza (Richards, 1986), os tons de cinza dos respectivos pontos. Finalmente, a tonalização do triângulo é realizada através de técnicas de computação gráfica, como, e.g., as técnicas de tonalização Facetada e de Gouraud (Rogers, 1989). Como indicado na figura 1, transformações geométricas podem ser aplicadas, antes do processo de tonalização, ao MDT, possibilitando e.g. rotações e modificações de escala do poliedro.

O processo final é a projeção ortográfica do poliedro tonalizado no plano de visualização (e.g., a tela do computador) para a percepção 3D.

Nas próximas subseções são apresentados os processos de tonalização e de visualização, incluindo uma descrição complementar de aspectos inerentes à geometria de uma imagem aérea, presentes na Figura 1, como e.g. os referenciais do espaço-imagem. Entretanto, detalhes em excesso serão evitados, visto que são encontrados em textos básicos de Computação Gráfica, Fotogrametria e Processamento Digital de Imagem. Uma descrição detalhada do processo como um todo é encontrada em Ros (2001).

2.2 Processo de tonalização

Conforme já foi brevemente descrito na Seção 2.1, o processo de tonalização do poliedro é feito triângulo - a - triângulo. Isso exige o cálculo dos tons de cinza de vértices e de pontos do interior do triângulo considerado, seguido da tonalização propriamente dita do triângulo. Estes dois passos são descritos a seguir.

2.2.1 Cálculo dos tons de cinza para pontos do poliedro

Seja $V(X, Y, Z)$ um ponto qualquer (i.e., vértice ou não) do poliedro definido no referencial do espaço-objeto OXYZ. Seja também $v(l, c)$ o ponto correspondente de $V(X, Y, Z)$ no referencial digital da imagem (l, c). O tom de cinza do ponto $V(X, Y, Z)$ pode ser obtido transformando-o para seu correspondente no espaço-imagem, i.e., $v(l, c)$. Antes de prosseguir, faz-se necessário definir os referenciais do espaço-imagem envolvidos na modelagem de uma imagem digital obtida por uma câmara digital (Figura 1):

- **Referencial cartesiano com origem no centro da imagem (x_c, y_c):** 1- **origem:** centro geométrico da imagem; 2- **eixo x_c :** paralelo as linhas da imagem e com sentido, para o caso aéreo, correspondente ao sentido de vôo; e 3- **eixo y_c :** ortogonal ao eixo x_c e com sentido a 90° - anti-horário.
- **Referencial fotogramétrico (x, y):** 1- **origem:** ponto principal - projeção ortogonal do Centro Perspectivo (CP) no plano da imagem; 2- **eixo x :** paralelo ao eixo x_c e de mesmo sentido; e 3- **eixo y :** paralelo ao eixo y_c e de mesmo sentido.
- **Referencial digital (l, c):** 1- **origem:** canto superior esquerdo da imagem; 2- **eixo l :** paralelo ao eixo y e de sentido contrário; e 3- **eixo c :** paralelo ao eixo x e de mesmo sentido.

A transformação do ponto $V(X, Y, Z)$ no seu correspondente $v(l, c)$ requer a realização de três passos.

O primeiro passo consiste na aplicação das equações de colinearidade (Lugnani, 1987; Mikhail et al., 2001), como segue,

$$\begin{aligned} x &= f \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= f \cdot \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

onde:

- $[X Y Z]^T$ são as coordenadas do ponto V no referencial do MDT (OXYZ) ou no espaço-objeto;
- $[x y]^T$ são as coordenadas do ponto v , imagem de V , no referencial fotogramétrico;
- $[X_0 Y_0 Z_0]^T$ são as coordenadas do centro-perspectivo (CP) no referencial OXYZ;
- f é a distância focal da câmara digital; e
- r_{ij} , ($1 \leq i \leq 3$ e $1 \leq j \leq 3$), são os elementos da matriz de rotação R , definida pelo triplo produto matricial $Rz(\kappa)Ry(\varphi)Rx(\omega)$, onde $Rz(\kappa)$, $Ry(\varphi)$ e $Rx(\omega)$ são as matrizes para as três rotações (κ , φ e ω , respectivamente) da câmara em relação ao referencial do espaço-objeto (OXYZ).

No segundo passo é realizada a transformação das coordenadas do ponto $v(x, y)$, referenciado no referencial fotogramétrico, para seu correspondente ($v(x_c, y_c)$) no referencial com origem no centro da imagem. Devido a definição dos referenciais envolvidos, esta transformação consiste em uma simples translação, como segue,

$$\begin{aligned} x_c &= x + x_0 \\ y_c &= y + y_0 \end{aligned} \quad (2)$$

onde:

- $[x_c y_c]^T$ são as coordenadas do ponto v no referencial com origem no centro da imagem; e
- $[x_0 y_0]^T$ são as coordenadas calibradas do ponto principal no referencial com origem no centro da imagem.

Finalmente, as coordenadas do ponto $v(l, c)$ no referencial digital são calculadas a partir das correspondentes obtidas no passo anterior, como segue (Ros, 2001),

$$\begin{aligned} l &= \frac{y_c}{t_{py}} + \frac{W}{2} + 0,5 \\ c &= \frac{x_c}{t_{px}} + \frac{H}{2} + 0,5 \end{aligned} \quad (3)$$

onde:

- $[l c]^T$ são as coordenadas linha (l) e coluna (c) do ponto v no referencial digital;
- W é a largura (em *pixel*) da imagem;
- H é a altura (em *pixel*) da imagem;

- t_{px} é o tamanho do *pixel* na horizontal; e
- t_{py} é o tamanho do *pixel* na vertical.

Como o ponto $v(l, c)$ geralmente não coincide com um *pixel* da imagem de entrada, algum método para a interpolação de tons de cinza deve ser utilizado. As técnicas de interpolação pelo vizinho mais próximo, bilinear e convolução cúbica são as mais difundidas e podem ser encontradas e.g. em Richards (1986).

Os parâmetros de orientação interior (f, x_0, y_0) e exterior (\dots, X_0, Y_0, Z_0) são geralmente calculados, *à priori*, através de um processo de auto-calibração.

2.2.2 Tonalização do poliedro

Em Computação Gráfica geralmente se tem um modelo 3D de um objeto (e.g., um projeto de um edifício) e sua tonalização é feita artificialmente. Nesse caso, torna-se indispensável o uso de um modelo de iluminação para gerar, com maior realismo possível, o efeito de iluminação sobre o objeto. A intensidade de luz refletida é calculada em um número limitado de pontos da superfície do objeto que, para o caso de uma superfície poliédrica, são os vértices dos triângulos. A intensidade de iluminação do interior dos triângulos é feita por interpolação, segundo um modelo de tonalização (e.g., modelo de Gouraud).

Em Fotogrametria Digital se tem uma situação um pouco diferente, pois, além do objeto 3D (MDT), tem-se também uma imagem digital. Esta imagem armazenou, a partir de um determinado ponto de vista, as condições de iluminação natural do objeto no instante de tomada da imagem. O problema básico a resolver seria então o de reamostrar a imagem sobre o MDT e de projetar o resultado no plano de visualização. Ou também, uma iluminação artificial pode ser sobreposta à iluminação natural, visando produzir e.g. algum efeito de sombreamento nas encostas dos terrenos mais elevados. Pode-se então identificar dois casos de interesse:

- tonalização usando a iluminação capturada no instante de imageamento da cena; e
- como no caso anterior, mas com sobreposição de efeito adicional de sombreamento.

Para o segundo caso, os tons de cinza calculados para os pontos do poliedro (Seção 2.2.1) são modificados segundo um modelo de iluminação. Um modelo de iluminação tem a função de calcular a intensidade da luz em um ponto na superfície do objeto (Hall, 1988). Nesta pesquisa é utilizado o modelo mais simples de iluminação (Rogers, 1989),

$$I = I_i \cdot k_d \cdot \cos \theta \rightarrow 0 \leq \theta \leq \pi / 2 \quad (4)$$

onde (figura 2):

- I é a intensidade da luz refletida;
- I_i é a intensidade da luz incidente, gerada por uma fonte F localizada no infinito;
- K_d é a constante de reflexão difusa ($0 \leq K_d \leq 1$) e está relacionada com brilho de uma superfície (S). Por exemplo, se a superfície for altamente reflexiva (brilhante), K_d assume valor próximo de 1. Ao contrário, se uma superfície absorve bastante a luz incidente, i.e., se uma superfície é pouco brilhante, K_d assume valor próximo de 0; e
- θ é o ângulo entre a direção da luz incidente e a normal (N) à superfície, que fornece o efeito de sombreamento a um objeto ou a uma superfície.

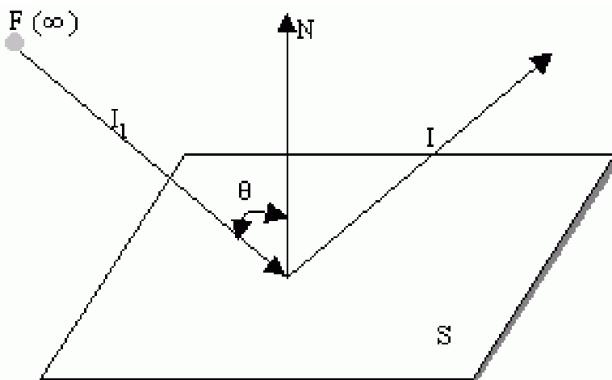


Figura 2 : Modelo de iluminação

Como se quer apenas sobrepor um efeito de sombreamento à iluminação natural capturada pelo sensor no instante de imageamento da cena, pode-se substituir na equação 4 o produto $I_i K_d$ pelo tom de cinza obtido na imagem digital. Sendo V_i o i -ésimo vértice do poliedro, g_i o tom de cinza calculado para o vértice V_i e o ângulo entre a normal à superfície em V_i e a direção da luz incidente em V_i , pode-se calcular em V_i a intensidade I_i , como segue,

$$I_i = g_i \cdot \cos \theta_i \rightarrow 0 \leq \theta_i \leq \pi / 2 \quad (5)$$

O termo $\cos \theta_i$ (eq. 5) pode ser considerado como um fator de iluminação (S) a ser aplicado ao tom de cinza g_i obtido na imagem digital. Entretanto, em se tratando de pontos pertencentes ao interior de um dado triângulo, o respectivos valores de S são normalmente obtidos por interpolação dos fatores de iluminação calculados para os vértices do triângulo considerado. Neste trabalho foram utilizadas duas metodologias para interpolação de S no interior de um dado triângulo, que seguem os mesmos princípios dos

métodos de tonalização Facetada e de Gouraud, comumente empregados em Computação Gráfica. A diferença básica entre ambos os métodos está na forma em que a normal é definida nos vértices de cada triângulo.

Para a tonalização facetada, as normais nos vértices de um triângulo são tomadas como sendo iguais à normal ao plano que o contém, i.e., é utilizada uma única normal para os três vértices do triângulo considerado. Como a fonte de luz está localizada no infinito, os ângulos (θ_i) de incidência da luz nos vértices de um mesmo triângulo são iguais, resultando em iluminações (S_i) iguais para estes vértices. Conseqüentemente, um único fator de iluminação (S) é utilizado para pontos do interior de cada triângulo. A Figura 4(a) mostra um exemplo artificial gerado pela tonalização Facetada. O aspecto facetado pode ser claramente observado, efeito resultante da utilização de apenas uma normal (ou único fator de iluminação) para cada triângulo.

Já para a tonalização de Gouraud são utilizadas normais diferentes para cada vértice de um dado triângulo. A normal num determinado vértice é calculada através da média aritmética de todas as normais aos triângulos adjacentes ao triângulo considerado, incluindo a normal desse último triângulo. O fator de iluminação (S) de cada ponto do interior de um dado triângulo é obtido conforme princípio ilustrado na Figura 3. S_1 , S_2 e S_3 são os fatores de iluminação para os vértices de um dado triângulo, calculados através da eq. 5. Seja P o pixel do plano de visualização onde se deseja interpolar o valor de S . A intersecção da linha de varredura que contém P com duas arestas do triângulo define os pontos P' e P'' . O valor de S é obtido através de três interpolações lineares: 1- interpolação linear do fator de iluminação (S') no ponto P' , utilizando S_1 e S_2 ; 2- interpolação linear do fator de iluminação (S'') no ponto P'' , utilizando S_2 e S_3 ; e 3- interpolação linear do fator de iluminação (S) no ponto P , utilizando S' e S'' .

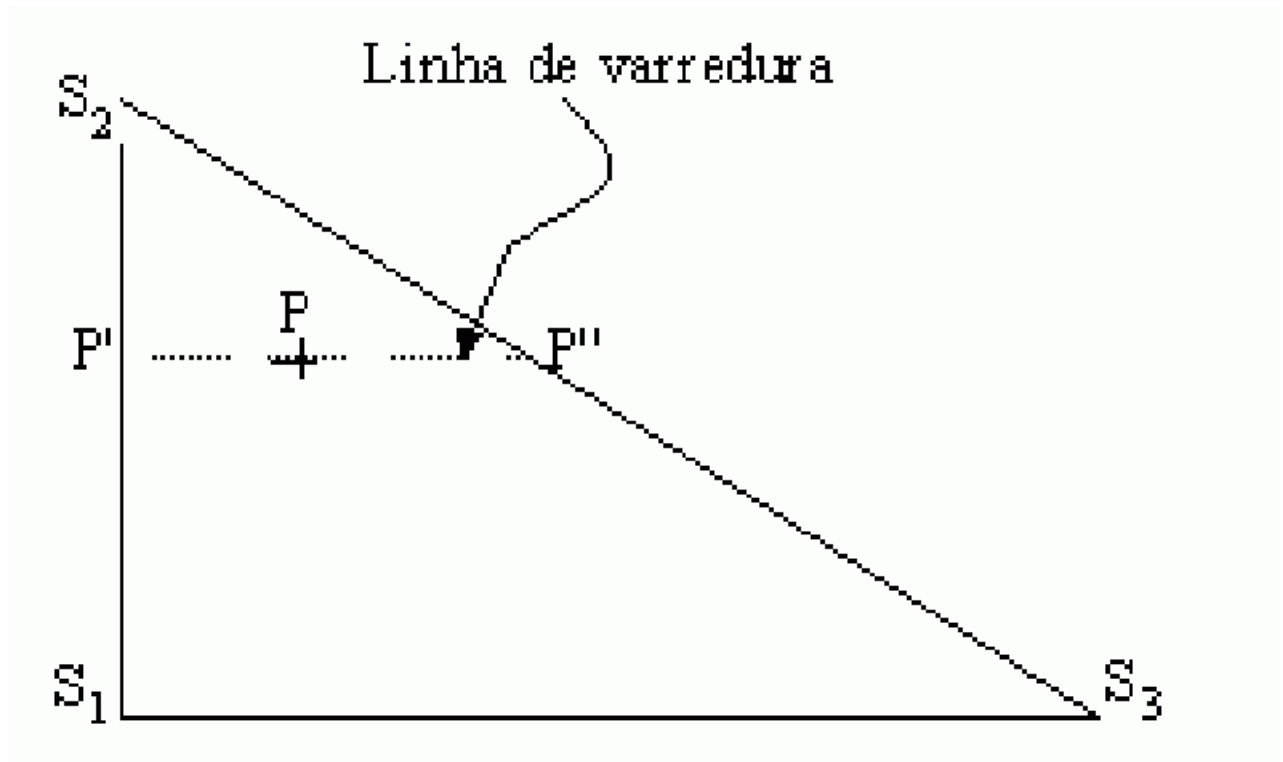
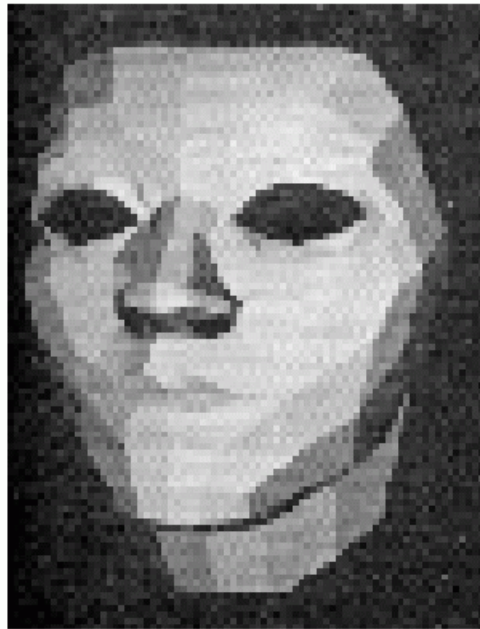


Figura 3 : Interpolação de S

O método de Gouraud possui um esforço computacional consideravelmente maior, mas, por outro lado, permite uma distribuição bem mais homogênea da iluminação nas regiões de transição entre triângulos. Isso pode ser verificado no exemplo mostrado na Figura 4(b).



(a)



(b)

Figura 4 : Exemplo artificial. (a) Tonalização Facetada; e (b) Tonalização de Gouraud (Rogers, 1989).

Quando se deseja tonalizar o poliedro usando apenas a iluminação natural capturada no instante de imageamento da cena (primeiro caso), basta apenas reescrever a equação 5 na forma,

$$I_i = g_i \tag{6}$$

Como mostra a eq. 6, apenas é realizada a reamostragem da imagem sobre o poliedro, sem sobreposição de efeito de sombreamento, i.e., $S_i = 1$.

2.3 Processo de visualização

A visualização do poliedro tonalizado no plano de visualização, com efeito 3D, requer a aplicação de uma projeção geométrica ao poliedro tonalizado. É utilizada neste trabalho a projeção ortogonal, que se caracteriza pelo fato das linhas projetoras serem ortogonais ao plano de projeção ou visualização (Figura 5) (Foley et al., 1996). Os planos de projeção são geralmente os próprios planos coordenados.

A Figura 5 mostra a projeção de um objeto 3D em três vistas diferentes, i.e., a visão frontal da altura, a visão lateral da altura e a visão do topo. Como em aerofotogrametria tradicionalmente se analisa o objeto pelo topo, a visão pelo topo é a vista selecionada para

projetar o poliedro tonalizado. Isto é, o plano coordenado $Z=0$ é selecionado como o plano de projeção. A sensação 3D é obtida em diferentes ângulos de visada através da rotação do poliedro, que é realizada antes da tonalização do poliedro. A matriz de projeção em representação homogênea para a projeção ortogonal no plano $Z=0$ é (Foley et al., 1996),

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

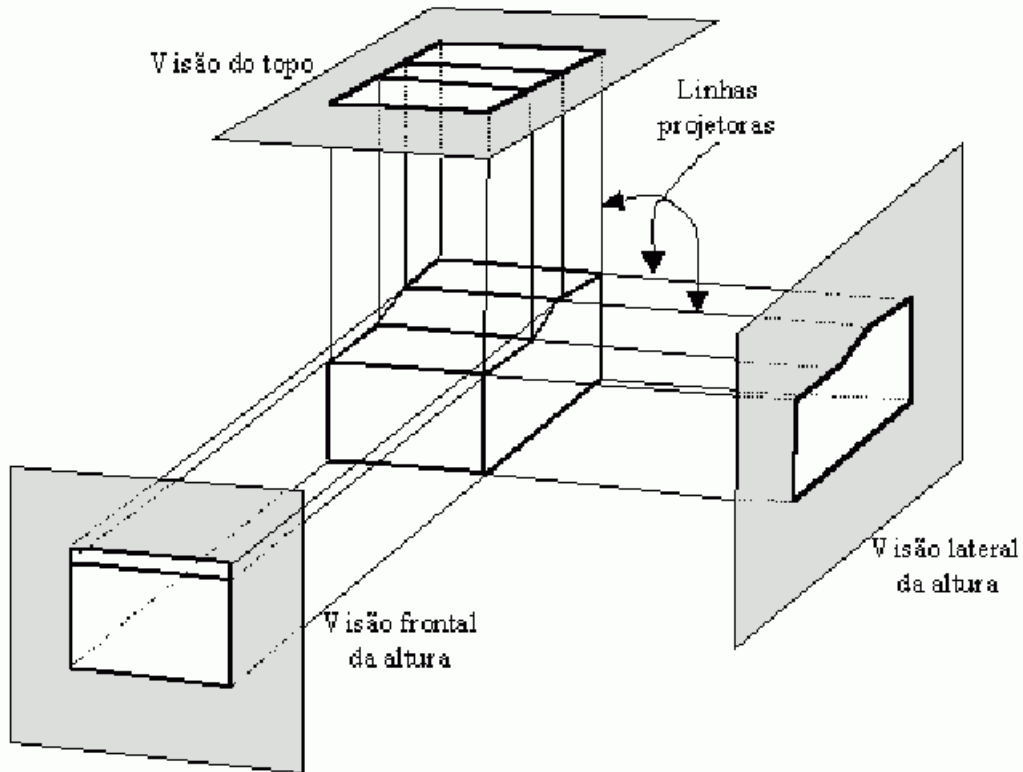


Figura 5 : Projeção ortográfica de várias vistas

O problema de visualização estaria resolvido se todos os pontos do poliedro tonalizado estivesse visível. Como freqüentemente se tem, para um determinado ponto de vista, parte da superfície obstruída, é necessário usar um algoritmo de eliminação de superfície oculta, a fim de verificar se os pontos que estão sendo projetados estarão visíveis no plano de visualização. O algoritmo utilizado é o de memória de profundidade (Rogers, 1989). Sendo S uma determinada superfície, um $P(X_p, Y_p, Z_p)$ S será visto por um observador localizado em $O(X_o, Y_o, Z_o)$, se para nenhum outro ponto $Q(X_q, Y_q, Z_q)$ S , situado ao longo da linha que liga os pontos P e O , a distância for menor que a distância (Figura 6). Portanto, um ponto qualquer do poliedro só será projetado para o plano de visualização se o mesmo não estiver obstruído.

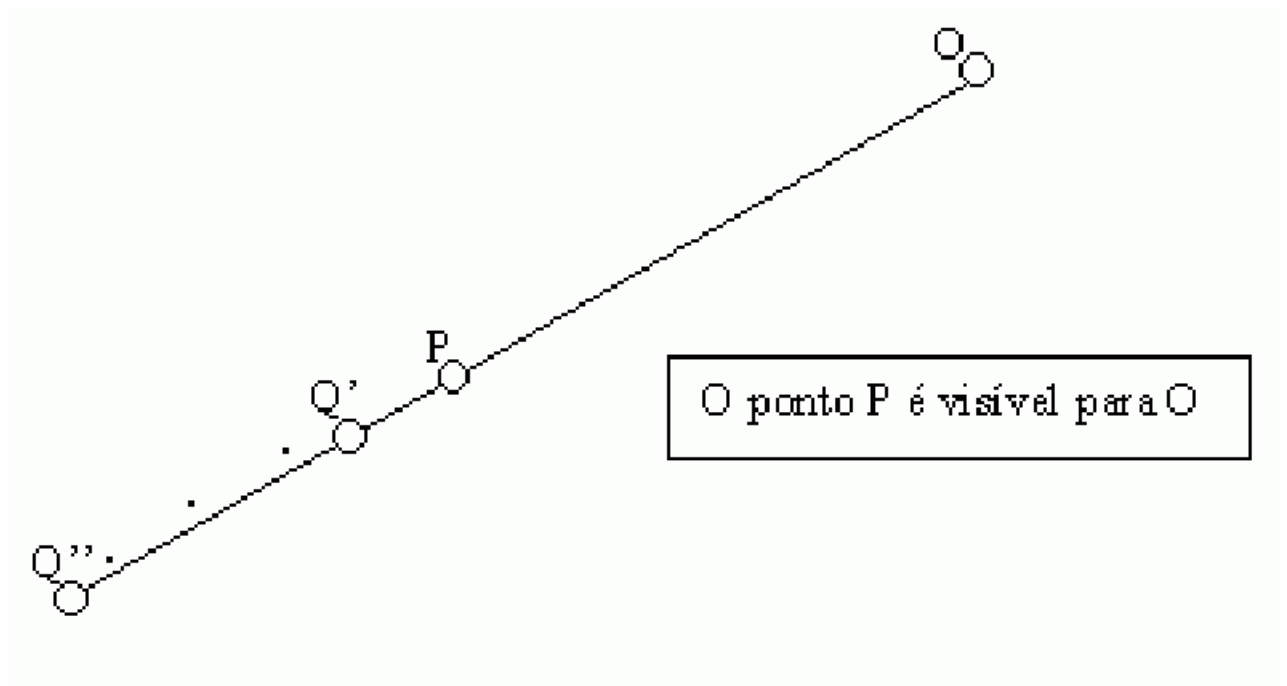


Figura 6 : Princípio do algoritmo de memória de profundidade

3 Resultados obtidos

A metodologia de visualização 3D de uma imagem digital apresentada na Seção anterior foi implementada em Borland C++ Builder 4.0 para ambiente Windows/PC. Com o objetivo de verificar a performance do método, dois experimentos foram conduzidos. Foi utilizada uma imagem digital (Figura 7) obtida pela Câmara Digital Fujix DS300 de uma área urbana de Presidente Prudente, SP. Esta imagem (1280 *pixel* X 1000 *pixel*) possui resolução radiométrica de 24 bits e resolução geométrica de 10 μ m. Os parâmetros de orientação interior e exterior foram previamente gerados em Barbosa (1999), através de um *software* de fototriangulação com auto-calibração.



Figura 7 : Imagem digital utilizada nos experimentos

As informações altimétricas disponíveis eram apenas 13 pontos mal distribuídos, as quais não possibilitaram a geração de um MDT com qualidade aceitável. A solução encontrada foi a simulação de um relevo a partir da coleta de coordenadas de pontos de um esboço de curvas de nível (Figura 8). A partir destas coordenadas foi gerado um MDT regular com 20 linhas e 20 colunas. Na Figura 8 as linhas mais internas representam a parte mais alta do relevo. Observa-se também que o relevo simulado está localizado próximo do canto inferior esquerdo, correspondendo na imagem original (Figura 7) a uma região limpa, i.e., sem edificações e árvores. Desta forma, evita-se distorções na visualização, pois não se tem as informações das alturas de edificações e árvores. A base da "montanha" possui cota de 100 m e a parte mais elevada cota de 160 m. A área não relacionada com a montanha é um plano de cota 100 m.

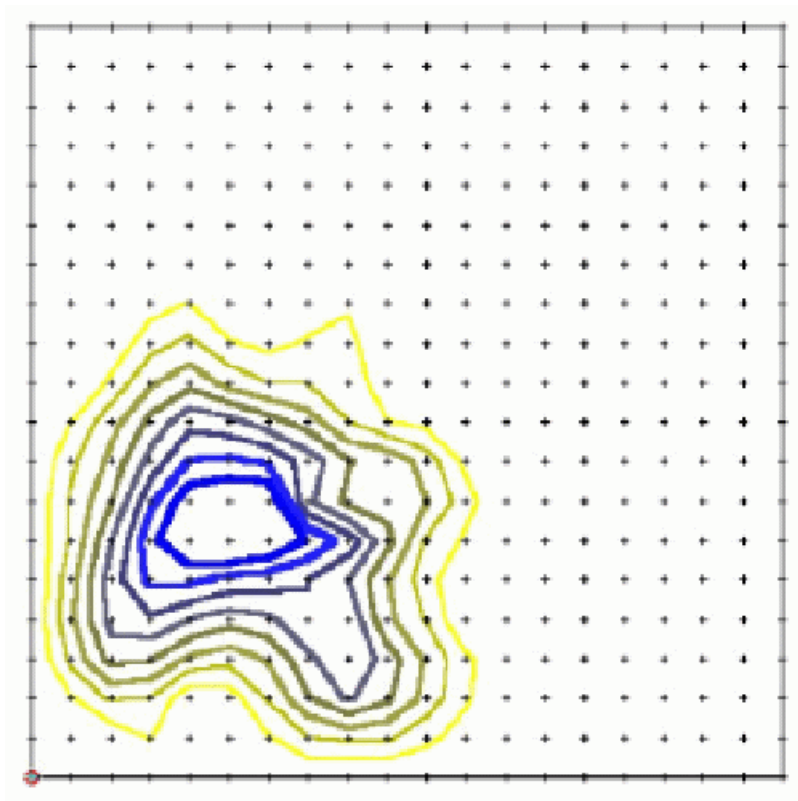


Figura 8 : Curvas de nível do relevo simulado

As Figuras 9 e 10 mostram os resultados obtidos para dois pontos de vista diferentes. Os ângulos de rotação utilizados para modificar o ponto de vista são mostrados nas legendas das Figuras 9 e 10. Os dois métodos de tonalização utilizam o modelo de iluminação que permite sobrepor o efeito de sombreamento à iluminação natural capturada pela câmara digital no instante de tomada da imagem.

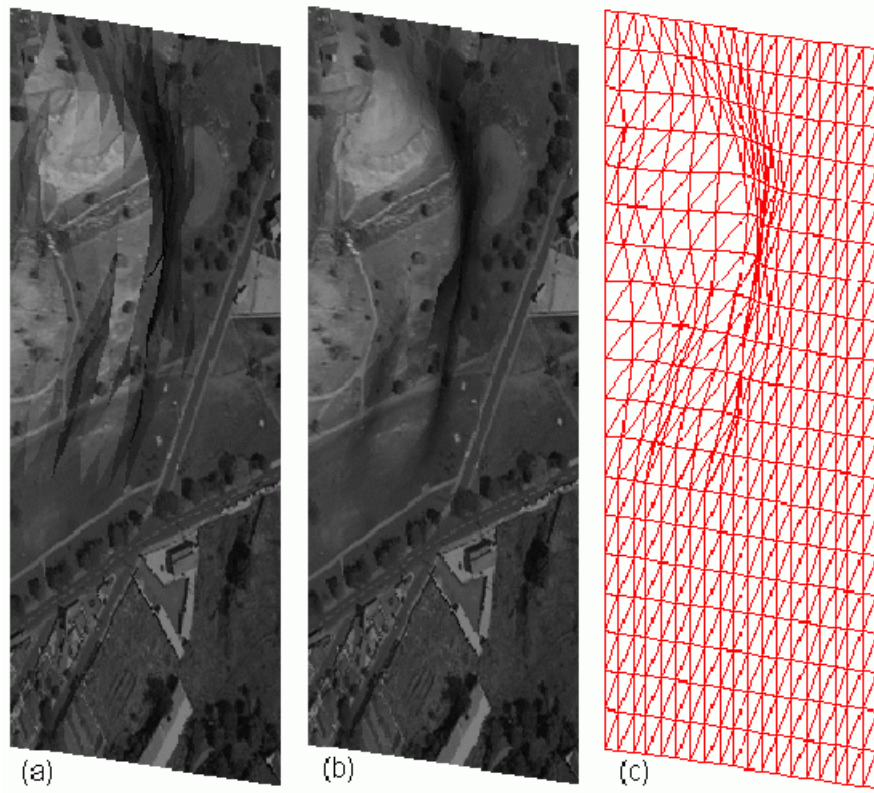


Figura 9 : Experimento 1: Resultados obtidos com ângulo de visualização de 60° em torno do eixo X, 5° em torno do eixo Y e 90° em torno do eixo Z. (a) Facetada; (b) Gouraud; e (c) modelo aramado.

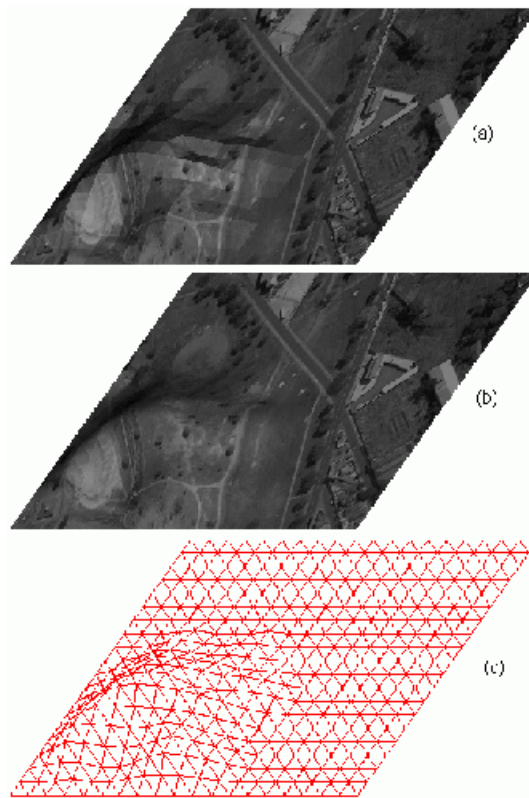


Figura 10 : Experimento 2: Resultados obtidos com ângulo de visualização de 45° em torno do eixo X, 45° em torno do eixo Y e 0° em torno do eixo Z. (a) Facetada; (b) Gouraud; e (c) modelo aramado.

Analisando os resultados, verifica-se que o relevo é bem nítido na Figura 9. 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 10, permitindo obter também um excelente efeito 3D. Portanto, os dois pontos de vista permitiram visualizar o relevo de forma nítida. Observa-se também que:

- como esperado, o aspecto "chapado" é observado nos resultados gerados pelo método Facetado. Entretanto, se assemelham em qualidade ao exemplo artificial apresentado na Figura 4(a);
- a percepção de relevo para ambos os métodos de tonalização são bastante similares;
- grande similaridade em forma é também observada entre os modelos aramados e os respectivos resultados dos dois métodos de tonalização; e
- é nítido o efeito de sombreamento artificial gerado pelo modelo de iluminação (equação 5) em todos os resultados de tonalização. A posição e distribuição do sombreamento dependem da posição da fonte de luz, encontrando-se no lado oposto ao sombreamento das regiões mais levadas.

4 Potencial de aplicação em Cartografia

Como já foi discutido, a metodologia apresentada pode ser uma alternativa vantajosa às formas convencionais de visão estereoscópica. As principais vantagens seriam a não necessidade de operadores bem treinados, de *hardwares* específicos e de um estereopar de imagens convenientemente tomadas. Outra vantagem importante seria a flexibilidade, pois, como em essência se tem

um algoritmo operando sobre informações digitais, é possível a realização de um número ilimitado de efeitos, facilitando ao operador a tarefa de interpretação. Entretanto, duas possíveis desvantagens podem ser apontadas. Uma primeira é a necessidade de se ter um MDT para viabilizar o processo de visualização 3D. Esse problema tende a ser minimizado pelos modernos sistemas fotogramétricos digitais, pois já atualmente a geração de MDT é o processo fotogramétrico com maior grau de automação (Dal Poz & Tommaselli, 2000). A tendência é então que cada vez mais fique facilitado o acesso a esse tipo de dado. Uma segunda desvantagem é que, mesmo com a disponibilidade de um MDT, a altura dos objetos (e.g., árvores e edifícios) sobre a superfície não é incluída nesse tipo de dado. Nesse caso, a tecnologia emergente e com grande potencial para resolver esse problema é o *laser - scanning*, principalmente para áreas urbanas.

A visualização 3D de uma imagem digital pode ser considerada uma extensão da ortoimagem convencional. Como esta última é bidimensional, apenas medidas no plano podem ser realizadas. Ao contrário, a visualização 3D possibilita a realização de medidas 3D, tal como uma distância no espaço tridimensional. Portanto, a visualização 3D de uma imagem digital poderia ser considerada como uma ortoimagem 3D.

Uma outra aplicação de grande potencial seria na atualização cartográfica a partir da comparação de um mapa desatualizado com uma visualização 3D de uma imagem atual. Isto seria realizado através do registro do mapa vetorial sobre a visualização 3D, permitindo a um operador a verificação das desatualizações cartográficas. As modificações no mapa digital poderiam ser realizadas interativamente pelo operador, que apontaria para as informações "velhas" a fim de eliminá-las da base de dados do mapa e que extrairia as novas informações cartográficas diretamente da visualização 3D.

Além das aplicações brevemente descritas acima, várias outras podem ser citadas, como, e.g.: visualização do polígono de inundação na formação de um lago, análise de imagem em casos que os dados altimétricos são importantes (e.g.: reconhecimento automático de um espelho d'água) etc..

5 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada e avaliada uma metodologia para visualização 3D de uma imagem digital, bem como foi brevemente discutido seu potencial cartográfico.

Embora a análise dos resultados foi realizada apenas visualmente, mediante a comparação entre os resultados dos métodos de tonalização e entre estes e o modelo aramado para cada ponto de vista, algumas importantes conclusões podem ser enumeradas:

- 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 nos dois 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 permitem a obtenção de bons resultados;
- pela falta de altura de objetos, tais como, construções e árvores, os mesmos poderão aparecer distorcidos na imagem 3D; e
- embora uma avaliação geométrica não tenha sido realizada, a visualização 3D de imagem digital possui características métricas, podendo ser usada em várias aplicações cartográficas, como e.g. na atualização cartográfica.

A continuidade desta pesquisa deverá envolver três direções principais. Numa primeira, alguns refinamentos deverão ser incluídos na metodologia, como e.g. a visualização contínua (animação) e a realização de medidas 3D (coordenadas, distâncias, área, volume, ângulos etc.) sobre a visualização 3D. Numa segunda, avaliações geométricas baseadas, principalmente, em critérios estatísticos deverão ser conduzidos, possibilitando uma avaliação mais objetiva do potencial cartográfico da metodologia de visualização 3D. Finalmente, aplicações cartográficas deverão ser implementadas e avaliadas.

6 Agradecimentos

Os dados utilizados nesta pesquisa foram gentilmente cedidos pelo Prof. João Fernando Custódio da Silva e Ricardo Luiz Barbosa.

7 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.

Poz, A. P.; Tommaselli, A. M. G.: *Automatic Space Resection Using a Constrained Relational Matching*. *Internacional Archives for Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdã, Holanda, 2000, v.33, p. 206 – 213.

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.

R.: *Illumination and Color in Computer Generated Imagery*, Springer-Verlag, New York Inc., 1988.

- 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.
- Mitshita, E. A.** *Monorestituição Digital de Aerofotos, Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A.D., para Fins de Mapeamento na Área Florestal*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, UFPr, Curitiba-Pr., 1997.
- 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.
- 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, D. 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.
- G. A.:** *Visualização 3D de uma imagem digital*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, UNESP, Campus de Presidente Prudente-SP, 2001.
- Silva, A. J. F.:** *Modelos de Correção Geométrica para Imagens HRV-SPOT*, Dissertação de Mestrado, Curitiba, 1988.
- Silva, J. F. C.:** *PATSIR-Programa de Aerotriangulação por Sucessivas Interseções e Resseções*, Relatório de Pesquisa (Fapesp – processo 98/02236-0, Presidente Prudente, 2001).
- Tecgraf:** *Reservatórios e Geologia*, <http://www.tecgraf.puc-rio.br/scripts/cgilua/princp.htm>, (01/09/2001).