

GERAÇÃO DE MDT USANDO FOTOS DE PEQUENO FORMATO

Ricardo Luis Barbosa¹
João Fernando C. da Silva²

¹ Curso de Pós Graduação em Ciências Cartográficas
ricardo@prudente.unesp.br

² Departamento de Cartografia
jfcsilva@prudente.unesp.br

FCT - Faculdade de Ciências e Tecnologia
Unesp - Universidade Estadual Paulista
19060-900 Presidente Prudente SP

RESUMO

A proposta deste trabalho é testar uma metodologia iterativa e seqüencial para gerar o MDT, a partir de um par de fotos digitais (obtidas com câmaras digitais de pequeno formato) com superposição aproximada de 60% e conhecidos os elementos de orientação exterior e os pontos de Gruber. A estratégia de aproximação é iniciada com uma Resseção Espacial Dupla de um par de fotos digitais. É feita uma interpolação linear nos quadriláteros formados pelos pontos de referência (sinalizados). Com os pontos interpolados determinam-se as fotocoordenadas nas imagens da esquerda e da direita. Tomando-se as fotocoordenadas da esquerda como referência, busca-se uma melhor localização das fotocoordenadas da direita. Com as fotocoordenadas refinadas pela correspondência, é realizada a Intersecção para corrigir a interpolação linear. Com este novo conjunto de pontos, é realizado um reajustamento da Resseção Dupla. Em seguida, o processo se repete, interpolando-se novos pontos nos quadriláteros formados pelos pontos interpolados no passo anterior, até atingir-se uma densidade definida. Os resultados mostraram que o tamanho da janela de referência e de busca influenciam tanto na parte interna (estatística) quanto na externa (erro médio com o modelo de referência) e em um dos experimentos realizados, esse erro foi de 0,0014m. A metodologia se mostrou funcional e futuros trabalhos podem contribuir para melhorar a acurácia.

ABSTRACT

The proposal of this work is to test an iterative and sequential methodology to generate a DTM from a pair of digital images with end overlap of about 60% and their exterior orientation and the points of Gruber known in the object reference system. The approximation strategy starts with a double resection of the image pair with both the (Gruber) signalized control points on 3D-model and the respective photocoordinates. It follows a linear interpolation in the quasi-squares figures formed by the reference points. The interpolated object points and the exterior orientation (double resection) in the collinearity equations determine left and right image photocoordinates. Then the photocoordinates in the image at left are taken as reference for the an correlation function to estimate the correspondent photocoordinates in the image at right.. The refined photocoordinates are inserted in the inverse collinearity equations to return to the 3D-model points in order to update and improve the interpolated coordinates. From this new set of points it is performed a double resection readjustment. The process is repeated by interpolating new 3D-model points in the quasi-squares formed by the interpolated points in the previous step until the 3D-model point density reaches.

Palavras chaves: MDT, interpolação, resseção espacial.

Apoio : FAPESP – Processos 97/13890-0, 98/05392-2 e 98/02236-0

1. INTRODUÇÃO

A representação do relevo ou terreno é uma componente fundamental no processo cartográfico que, em formato digital, recebe o nome de Modelo Digital do Terreno (MDT) e consiste de um conjunto de dados que explicitam as coordenadas (X, Y, Z) do terreno e a forma como os mesmos estão relacionados.

Existem vários métodos para se obter os dados do MDT; os principais são (Petrie & Kennie, 1990) o levantamento topográfico, técnicas fotogramétricas e técnicas cartográficas.

Os dados obtidos através destas técnicas de aquisição constituem o Modelo Digital do Terreno, ou se for o caso, uma base sobre a qual poderá ser realizada uma densificação (interpolação).

O MDT pode ser classificado quanto à forma como os dados estão distribuídos (Burrough, 1986) em regular ou irregularmente espaçados. A distribuição regular faz uso de malhas (ou grades) que em geral são retangulares, hexagonais ou triangulares.

A forma mais comum de se representar pontos irregularmente espaçados é a triangulação, pois triângulos oferecem uma maneira relativamente fácil de incorporar as linhas notáveis ou *breaklines* - feições lineares onde ocorrem mudanças na suavidade ou continuidade da superfície (Maune, 1996) - como por exemplo em um fundo de vale. Na malha triangular, os pontos amostrados devem pertencer aos vértices dos triângulos. Uma das triangulações mais utilizadas é a Triangulação de Delaunay.

Tanto nas malhas regulares quanto nas irregulares, se for necessário realizar uma densificação, esta é feita através de uma interpolação na malha regular, ou com a colocação de uma malha regular sobre a irregular.

Os requisitos desejáveis para uma função interpoladora são (McCullagh, 1988) : que ela reproduza uma superfície contínua; que o tempo de computação não seja proibitivo; que tenha propriedades matemáticas de interesse para a aplicação.

Em geral são utilizados dois métodos de interpolação : global e local. Os métodos globais levam em consideração todos os pontos que foram amostrados, ajustando alguma função que passe por todos esses pontos. Os métodos locais são influenciados por pontos que estejam em uma certa vizinhança, diminuindo sua contribuição à medida em que a distância ao ponto interpolado aumenta.

Uma variedade muito grande de formas de interpolação podem ser utilizadas para a densificação do MDT: polinômios, *splines*, krigagem etc. Lancaster & Salkauskas (1990) mostram a fundamentação matemática para estas formas de interpolação e Yamamoto (1998) detalha formas de interpolação para dados geológicos e particularmente para o MDT.

O presente trabalho apresenta um novo método para a geração do MDT a partir dos pontos de Gruber, utilizando uma câmara digital de pequeno formato e com conhecimento dos parâmetros de

orientação exterior de cada foto e dos parâmetros de orientação interior da câmara digital. Uma maquete de superfície irregular foi construída para permitir o controle dos experimentos.

2. PROPOSIÇÃO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e testar um algoritmo automático para geração do Modelo Digital do Terreno (MDT), com base em aproximações e interpolações sucessivas, a partir de um par de fotos digitais (obtidas com uma câmara digital de pequeno formato), com conhecimento dos parâmetros de orientação exterior e dos pontos de Gruber.

Com um par de fotos digitais de superposição longitudinal de aproximadamente 60%, é realizada a resseção espacial dupla com autocalibração, utilizando injunções nos parâmetros de calibração interior e nos pontos de terreno, que são modelados como se fossem pseudo-observações. A resseção espacial dupla tem por objetivo (Wolf, 1983) ajustar os seis parâmetros de orientação exterior de cada foto: a orientação angular (ω , ϕ , κ) e a posição espacial (X^C , Y^C , Z^C). Neste trabalho também são ajustados pela resseção espacial dupla, três parâmetros de orientação interior da câmara: distância focal (f) e as coordenadas do ponto principal (x_0 , y_0). As coordenadas dos pontos no terreno, na maquete no caso, também são ponderadas, sendo portanto ajustadas como as demais variáveis do projeto.

Inicialmente são tomadas 24 observações, que são as fotocoordenadas da direita e da esquerda dos seis pontos de Gruber. Os parâmetros a serem ajustados são: 12 parâmetros de orientação exterior para as fotos da esquerda e da direita, 3 parâmetros de calibração da orientação interior e as 18 coordenadas no terreno (X, Y, Z), totalizando 33 parâmetros. A tabela 1 mostra o total de parâmetros que são ajustados em cada passo da interpolação.

Tabela 1 – Total de parâmetros a serem ajustados em função do passo da interpolação.

Passo	[1]	[2]	[3]	[4]
0	24	33	57	33
1	60	60	120	60
2	180	150	330	150
3	612	474	1086	474
4	2244	1698	3942	1698
5	8580	6450	15030	6450

[1]: total de equações de observação (4* npt)

[2]: total de equações de injunção

[3]: total de equações [= (1) + (2)]

[4]: total de parâmetros (12+3+3* npt)

npt : número de pontos no terreno (maquete).

O processo de aproximação se inicia após uma resseção espacial dupla inicial, com a interpolação nos quadriláteros formados pelos pontos de Gruber. No

terreno, a interpolação pode assumir a seguinte configuração, por exemplo:

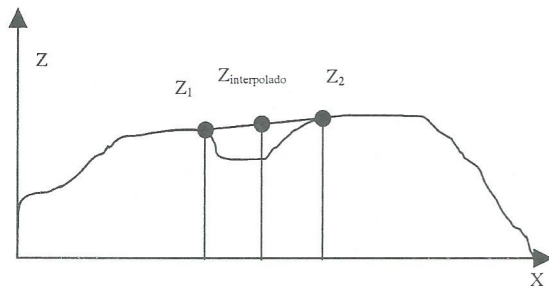


Figura 1: Interpolação linear no terreno.

No primeiro passo da interpolação são interpolados 9 pontos. A tabela 1 mostra o aumento (A) do número de pontos no MDT e o total de quadriláteros (Q) em cada passo da interpolação (n):

Tabela 2 - Crescimento do número de pontos e quadriláteros em função do número da interpolação.

n	A	Total de pontos	Q
1	9	15	8
2	30	45	32
3	108	153	128
4	408	561	512
5	1584	2145	2048

O aumento de pontos em cada etapa da interpolação é dado pela seguinte equação :

$$A = 2^n(2^n + 2^{n-1} + 15) \quad (1)$$

A quantidade de quadriláteros em cada etapa é dado por:

$$Q = 2^{2n+1} \quad (2)$$

onde n é o passo da interpolação.

Em cada etapa da interpolação, novos pontos no terreno vão sendo obtidos e novos quadriláteros vão sendo criados. À medida que os pontos no terreno vão sendo interpolados, suas fotocoordenadas são obtidas utilizando-se as equações de colinearidade (equação 3), ou seja, resolvendo-se o problema da intersecção, já que se conhecem os parâmetros de orientação exterior da foto da direita e da esquerda e os parâmetros de orientação interior.

As equações de colinearidade usadas são (Krauss, 1992) :

$$x = x_0 - f \frac{N_x}{D} \quad (3)$$

$$y = y_0 - f \frac{N_y}{D}$$

com

$$N_x = m_{11}(xf - x_0) + m_{12}(yf - y_0) - m_{13}f$$

$$N_y = m_{21}(xf - x_0) + m_{22}(yf - y_0) - m_{23}f$$

$$D = m_{31}(xf - x_0) + m_{32}(yf - y_0) - m_{33}f$$

(4)

onde (x_0, y_0) são as coordenadas do centro principal em relação ao centro da imagem; f é a distância focal e m_{ij} são os elementos da matriz de rotação R (5).

$$R = R_\omega R_\phi R_\kappa = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Em torno das fotocoordenadas da esquerda, é tomada uma janela de referência, para se buscar uma correspondência na imagem da direita, na tentativa de se melhorar o resultado da interpolação linear. As fotocoordenadas na imagem da direita são utilizadas como o centro da janela de busca.

A correspondência baseada em área para duas imagens com superposição, consiste em buscar na imagem da direita (busca) a região que tenha a melhor correspondência com uma dada região na imagem da esquerda (referência).

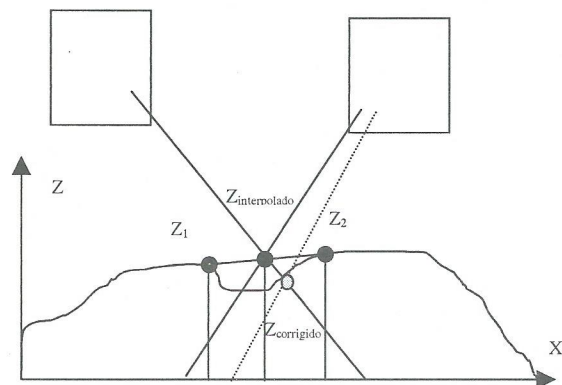


Figura 2: Interpolação corrigida pela correspondência.

A função de correspondência usada para medir a similaridade foi o erro quadrático (Gonzalez, 1993):

$$eq(s, t) = \frac{1}{\sum_{x=0}^{r-1} \sum_{y=0}^{r-1}} [f(x, y) - g(x+s, y+t)]^2 \quad (6)$$

onde:

eq(s,t) : erro quadrático na posição (s,t) na imagem da direita

f(x,y): é o valor do nível de cinza na posição (x,y) na janela da esquerda (referência)

g(x + s, y + t) : é o valor do nível de cinza na posição (x+s, y+t) na janela de busca

r_x, r_y : quantidade de pixels na horizontal e vertical respectivamente.

Com a função (6), a posição (s, t) onde ocorrer o menor valor é a posição que contém a melhor correspondência. Esta posição então é tomada como sendo a das fotocoordenadas da direita corrigidas, melhorando a interpolação linear feita no terreno, quando da intersecção (figura 2).

Na etapa seguinte, calculam-se novamente os pontos no terreno, utilizando-se as equações de colinearidade na forma inversa, já que os elementos de orientação exterior e interior estão disponíveis. Dada as fotocoordenadas da esquerda e da direita, as equações para a resolução do problema da intersecção são (Krauss, 1992), para as fotocoordenadas da esquerda:

$$X = X_c^e + (Z - Z_c^e) \frac{N_{xe}}{D_c^e} \quad (7)$$

$$Y = Y_c^e + (Z - Z_c^e) \frac{N_{ye}}{D_c^e}$$

para as fotocoordenadas da direita :

$$X = X_d^e + (Z - Z_d^e) \frac{N_{xd}}{D_d^e} \quad (8)$$

$$Y = Y_d^e + (Z - Z_d^e) \frac{N_{yd}}{D_d^e}$$

Como é necessário determinar 3 incógnitas (X, Y, Z) com 4 equações, o Z é isolado fazendo-se uso de (7) e (8):

$$Z = \frac{X_d^e - Z_d^e k_2 + Z_c^e k_1 - X_c^e}{k_1 - k_2} \quad (9)$$

onde,

$$k_1 = \frac{N_{xe}}{D_c^e} \quad k_2 = \frac{N_{xd}}{D_d^e} \quad (10)$$

As coordenadas X e Y podem ser computadas a partir da média aritmética entre (7) e (8). De posse das coordenadas do terreno "corrigidas", faz-se necessário o reajustamento dos parâmetros de orientação exterior, interior e dos pontos no terreno. Este processo se repete até atingir uma densidade de pontos previamente definida. Ao final do processo, são gerados relatórios que contêm as informações do

ajustamento, do controle de qualidade e dos pontos interpolados no terreno e uma visualização em perspectiva do MDT resultante.

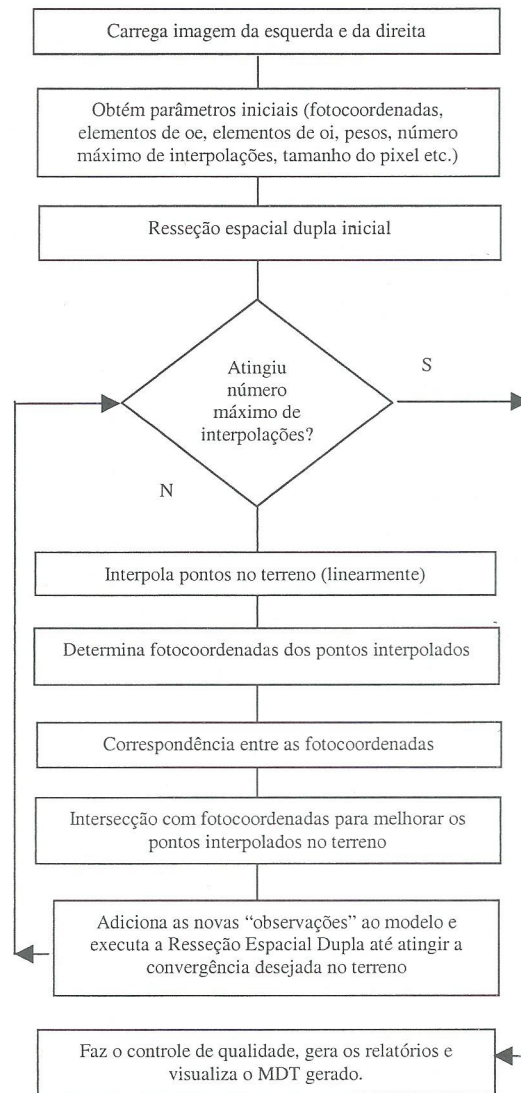


Figura 3: Fluxograma do método proposto.

3. MATERIAL E MÉTODO

Para testar a metodologia proposta, foi construída uma maquete representando uma porção de terreno, com dimensões 2,0 m x 1,0 m. Na maquete há um conjunto de 15 pontos sinalizados e com suas respectivas posições (X, Y, Z) conhecidas.

Para a simulação do voo, foi também construída uma trave com largura de 2,20 m e altura de 2,10 m. A câmara digital Fujix DS 300 foi fixada nesta trave, de onde foram tomadas as fotos de uma altura de 2 m. Após a tomada das fotos, as mesmas foram transferidas para o computador. Estas fotos estão no

formato Windows BMP com 24 bits de resolução radiométrica e resolução geométrica de 1280 x 1000 pixels. O software GA_MDT (Geração Automática de Modelo Digital do Terreno) implementado em linguagem C++, ambiente Builder 3.0, realiza os processos descritos na figura 3.

Modelo matemático

As equações de colinearidade (3) constituem o modelo matemático funcional que relaciona as variáveis do problema, a saber: fotocoordenadas (observações), parâmetros de orientação exterior, parâmetros de orientação interior e coordenadas do espaço objeto (pontos no terreno):

$$\{x, y\} = F\{f, x_0, y_0, \omega, \varphi, \kappa, \dots\} \quad (11)$$

O modelo de ajustamento (de observações) a ser utilizado com o propósito de estimar a solução única é o paramétrico sob a condição dos mínimos quadrados (MMQ). Além disso, um conjunto de injunções aos parâmetros complementa o modelo (Gemael, 1994; Uotila, 1986):

$$\begin{cases} L_a = F(X_a) \\ L_x = G(X_x) \end{cases} \quad (12)$$

L_a : vetor das observações ajustadas

X_a : vetor dos parâmetros ajustados

L_x : vetor do "erro de fechamento" do modelo injuncional

O modelo matemático funcional é não linear e portanto requer a linearização por série de Taylor:

$$\begin{cases} V = AX + L \\ V_x = X_0^o - X_b + \hat{X} \end{cases} \quad (13)$$

onde,

$$L = L_a - L_b$$

V : vetor dos resíduos das fotocoordenadas

V_x : vetor dos resíduos das injunções

\hat{X} : vetor das correções aos parâmetros

X_0^o : vetor das aproximações iniciais dos parâmetros

X_b : vetor das pseudo-observações

L_b : vetor das fotocoordenadas observadas

A : matriz das derivadas parciais em relação aos parâmetros de orientação exterior, interior e coordenadas dos pontos no terreno

Após a aplicação do MMQ com o uso de pesos, a equação matricial (14) é a solução para as equações (13):

$$X = -(A'PA + P_x)^{-1}(A'PL + P_xL_x) \quad (14)$$

onde

P : peso relativo das observações

P_x : peso relativo das injunções

A solução da equação (14) requer iterações por causa da não linearidade do modelo matemático funcional. A variância *a posteriori* é dada por:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V'PV + V_x'P_xV_x}{n + n_x - u} \quad (15)$$

onde n é o número de equações de observações, n_x o número de equações de injunções e u o total de parâmetros. Neste modelo, $n_x = u$ em todos os passos da interpolação.

Controle de qualidade

Para a verificação da qualidade do MDT, foi realizada uma fototriangulação com o programa FOTRAC (Silva, 1987), que fornece uma relação dos pontos fototriangulados e respectivas coordenadas. Este programa foi escolhido porque já foi amplamente testado em simulações e projetos de fototriangulação. O controle de qualidade por meio do método de triangulação foi motivado por causa da dificuldade de medição direta de pontos na maquete. Em trabalhos futuros, pretende-se utilizar fotos aéreas e pontos sinalizados no terreno com posições determinadas por GPS (Sistema de Posicionamento Global).

O projeto desta fototriangulação é composto de 3 fotos, 4 pontos de apoio HV (horizontal-vertical), 5 pontos de checagem e 215 pontos fototriangulados. Os resultados obtidos pelo FOTRAC são tomados como referência, ou seja, considerados como sendo o terreno "real", representado na figura 4 como sendo a região entre as retas. O procedimento do controle de qualidade é feito da seguinte forma: a) para cada ponto fototriangulado, determina-se a qual quadrilátero ele pertence, utilizando as coordenadas (X, Y); b) com as coordenadas (X, Y, Z) dos 4 vértices do

quadrilátero, é realizada uma interpolação bilinear para obtenção da cota Z no ponto em questão; c) esta cota é comparada com a de referência e o erro calculado.

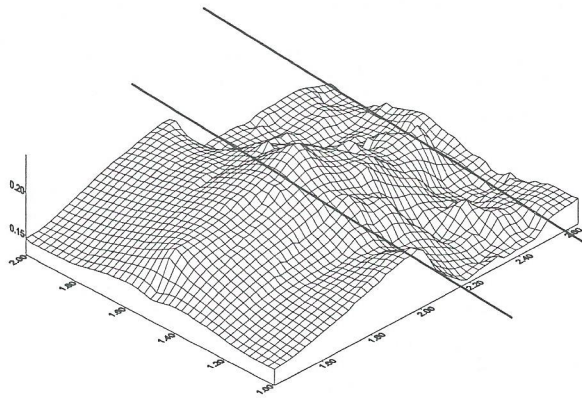


Figura 4: Terreno tomado como referência.

É possível que o ponto a ser verificado esteja dentro dos limites estabelecidos, mas não pertença ao quadrilátero, pois este pode não ser regular. Para verificar se um ponto pertence ou não a um dado quadrilátero, é utilizado o produto vetorial no plano, pois através dele consegue-se determinar a posição de um ponto em relação a um vetor (figura 5).

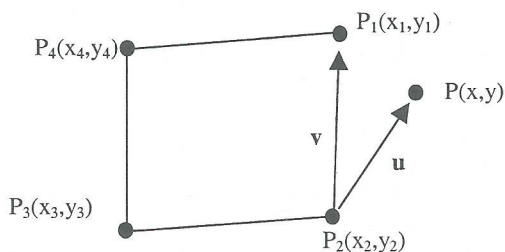


Figura 5: Produto vetorial no plano.

O produto vetorial no plano é definido por (Figueiredo & Carvalho, 1991):

$$u \wedge v = \begin{vmatrix} x-x_2 & y-y_2 \\ x_1-x_2 & y_1-y_2 \end{vmatrix} = (x-x_2)(y_1-y_2) - (y-y_2)(x_1-x_2) \quad (16)$$

onde, $u = (x - x_2, y - y_2)$ e $v = (x_1 - x_2, y_1 - y_2)$.

Através de uma inspeção nos vetores formados com os lados dos quadriláteros P_1, P_2, P_3 e P_4 e o ponto a ser testado P, se o produto vetorial for positivo (equação 16), P está à direita do vetor v. Como os vértices do quadrilátero estão ordenados em sentido anti-horário, para o ponto ser interior é necessário que o produto vetorial seja negativo em todos os lados do quadrilátero. Se for positivo em algum lado, basta trocar

o quadrilátero atual com o quadrilátero vizinho. Se não houver quadriláteros na vizinhança, o ponto não é testado pois neste caso ele não pertence a nenhum quadrilátero e não é possível fazer a interpolação.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

A seguir são detalhados os resultados obtidos com a metodologia aqui apresentada. Os resultados são referentes a três passos da interpolação, ou seja, quando a quantidade de pontos interpolados e aproximados é de 147, para que se possa comparar com o resultado da fototriangulação, que foi realizada com 215 pontos.

A variância *a priori* de todos os experimentos relatadas abaixo foi igual a 1. O tamanho da janela de referência e de busca influenciam no resultado da correspondência baseada em área e desta forma foram feitos experimentos variando-se tanto a janela de referência quanto a de busca. Outro ponto a destacar é a redução dos pesos das fotocoordenadas e dos pontos no terreno que são obtidos pela interpolação. Estes pesos vão sendo reduzidos empiricamente em cada etapa da interpolação:

$$P_{i+1} = \frac{P_i}{2} \quad (17)$$

Como os pontos iniciais (de Gruber) têm a mesma variância, a estratégia de redução diferenciada de pesos, como descrito abaixo, se refere à diminuição dos pesos das fotocoordenadas da direita no primeiro passo da interpolação, visando diminuir a influência dos erros cometidos durante a correspondência. As tabelas 3 a 6 sintetizam os resultados obtidos em vários experimentos.

Tabela 3 – Janela 3 x 3 sem redução diferenciada dos pesos

Busca	Variância <i>a posteriori</i>	Erro médio
5 x 5	1.2287	-0.0298
7 x 7	2.0935	-0.0230
9 x 9	3.2675	-0.0201
11 x 11	4.8879	-0.0108
13 x 13	7.0939	0.0011
15 x 15	8.9206	0.0106

Pode-se constatar na tabela 3 que o menor erro médio aritmético entre a superfície gerada e a de controle ocorre quando a janela de busca têm dimensões 13 x 13, mas a variância *a posteriori* cresce com o tamanho da janela.

Tabela 4 – Janela 3 x 3 com redução diferenciada dos pesos

Busca	Variância <i>a posteriori</i>	Erro médio
5 x 5	0.8017	-0.0306
7 x 7	0.8254	-0.0235
9 x 9	0.8598	-0.0196
11 x 11	0.9018	-0.0090
13 x 13	0.9721	0.0014

A redução diferenciada dos pesos (tabela 4) para as fotocoordenadas e para os pontos no terreno provenientes do processo de interpolação mostra que com esta estratégia a variância *a posteriori* se aproxima do valor 1. Nesta situação, o menor erro médio ocorre na janela 13 x 13.

Tabela 5 – Janela 5 x 5 sem redução diferenciada dos pesos

Busca	Variância <i>a posteriori</i>	Erro médio
7 x 7	1.2822	-0.0337
9 x 9	2.1121	-0.0263
11 x 11	3.3812	-0.0202
13 x 13	5.5004	-0.0113
15 x 15	7.0721	-0.0034

Conforme pode ser visto na tabela 5, os resultados são semelhantes aos da tabela 3, ou seja, o erro médio diminui à medida que a janela de busca aumenta, mas a variância *a posteriori* aumenta consideravelmente. O menor erro ocorre na janela 15 x 15.

Tabela 6 – Janela 5 x 5 com a estratégia de redução dos pesos

Busca	Variância <i>a posteriori</i>	Erro médio
7 x 7	0.8026	-0.0345
9 x 9	0.8256	-0.0277
11 x 11	0.8619	-0.0212
13 x 13	0.9111	-0.0125
15 x 15	0.9488	-0.0024

Mais uma vez, o erro médio entre o modelo gerado e o de controle diminui com o crescimento da janela de busca e, como ocorreu nos resultados mostrados na tabela 4, a variância *a posteriori* se aproxima de 1.

A figura 6 resume as informações das tabelas 3 a 6, no que se tange ao desvio médio aritmético encontrado, e a figura 7 refere-se à variância *a posteriori*.

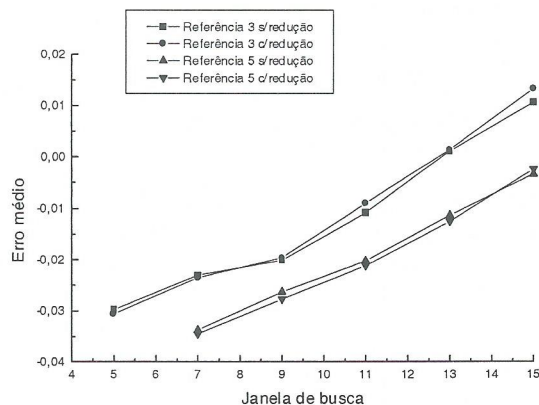


Figura 6: Erro médio aritmético em função da janela de busca.

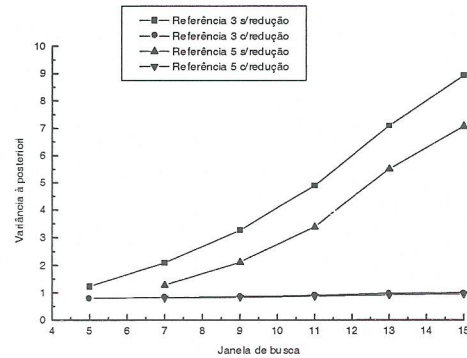


Figura 7: Variância *a posteriori* em função da janela de busca.

Combinando-se um bom resultado estatístico, dado pela variância *a posteriori* próxima de 1, e o menor erro médio aritmético, a melhor estimativa do modelo digital foi obtida com a janela de referência igual a 3 x 3 e a janela de busca 13 x 13, com a estratégia de redução diferenciada dos pesos.

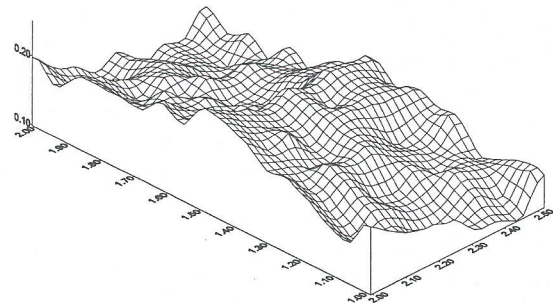


Figura 8: Perspectiva do MDT com o menor erro médio aritmético.

Fazendo-se a relação entre o erro médio aritmético calculado (0,0014m) e a altura de vôo (2,0m), obtém-se 0,0007, ou seja, 0,7‰ (sete décimos por mil) da altura de vôo.

Em conseqüência dos resultados apresentados, pode-se afirmar que a metodologia aqui apresentada mostra um bom desempenho, tendo em vista que o MDT é gerado automaticamente a partir do conhecimento de apenas seis pontos no terreno e com fotos obtidas com uma câmara digital de pequeno formato. Para colocá-la em uma escala comercial ou de produção, são necessários alguns aprimoramentos, tais como:

- Técnicas de correspondência: um dos grandes problemas da automação na fotogrametria digital é o estabelecimento da correspondência de

pontos homólogos. Existem inúmeras técnicas que apresentam uma melhor acurácia do que a correspondência aqui testada e que poderiam ser usadas, bem como o ajustamento por Mínimos Quadrados quando do estabelecimento da correspondência em nível de pixel;

- Técnicas de interpolação: com a interpolação linear, vimos que o ponto interpolado pode ficar muito acima ou abaixo do terreno, o que pode acarretar paralaxes residuais em x e em y, as quais a correspondência visa diminuir. Técnicas de interpolação que levam em consideração a inclinação do terreno podem ser usadas e com isso poderiam diminuir estas paralaxes;

- Visualização: existem atualmente técnicas de realidade virtual sendo aplicadas à visualização de MDT, que fazem uso de ferramentas para renderização, técnicas de sombreado, passeios pelo modelo, mudança de ângulo de vista etc., ou então implementar algoritmos dentro do sistema para eliminação de linhas ocultas, iluminação entre outras;

Uma extensão desta metodologia para que possa ser usada com múltiplas imagens também é importante, visto que daí, poderia resultar em um mosaico e posteriormente a produção de uma ortofotodigital.

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi mostrada a geração automática de uma superfície materializada por uma maquete, com imagens obtidas com uma câmara digital de pequeno formato, a partir de apenas 6 pontos (Gruber) conhecidos e sinalizados no terreno, utilizando uma interpolação linear e uma estratégia de correspondência baseada em área para corrigir esta interpolação.

Os resultados mostraram que o menor erro ocorre quando se usa uma janela alvo de 3 x 3 pixels e janela de busca 13 x 13 pixels na correspondência, com redução dos pesos das fotocoordenadas da direita e dos pontos no terreno que vão sendo interpolados. Estes resultados indicam que o método funciona a contento (0,7 / 1000 da altura de vôo) e futuros aprimoramentos ao método sugerem que se pode atingir uma acurácia maior.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURROUGH, P. A. **Digital Elevation Models:** principles of geographical information system for land resources assesment monographs on soil and resources survey. Oxford, 1986.

FIGUEIREDO, L. H. & CARVALHO, P. C. P. **Introdução à Geometria Computacional.** Rio de Janeiro, IMPA, 1991.

GONZALEZ, R. C. & WOODS, R. E. **Digital Image Processing.** Addison-Wesley, 1993.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações:** aplicações geodésicas. Curitiba, UFPR, 1994.

LANCASTER, P. & SALKAUSKAS, K. **Curve and Surface Fitting:** an introduction. Academic Press, 1990.

KRAUSS, K. **Photogrammetry:** fundamentals and standard processes, v. 1. Dummler Verlag, 1992.

MAUNE, D. F. DEM extraction, editing, mathing and quality control techniques. **Digital photogrammetry: in addendum to the manual of photogrammetry.** Amer. Soc. Photogramm. & Remote Sensing, p. 131-134, 1996.

McCULLAGH, M. J. Terrain and surface modelling systems: theory and practice. **Photogrammetric Record**, v.72, n. 12, p. 747-779. 1988.

MERCHANT, D. C. **Analytical photogrammetry:** Theory and practice. (unpublished notes). Department of Geodetic Science and Surveying. Columbus: The Ohio State University. 1979.

PETRIE, G. & KENNIE, T. J. M. **Terrain modelling in surveying and civil engineering.** Caithness: Whittles, 1990.

SILVA, J. F. C. **A inferência bayesiana e a detecção de erros grosseiros em fototriangulação por feixes de raios.** Curitiba, 1987. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), UFPR, 1987.

UOTILA, U. **Notes on adjustment computations – part I.** (unpublished notes.) Department of Geodetic Science and Surveying. Columbus, Ohio State University, 1986.

YAMAMOTO, J. K. A review of numerical methods for the interpolation of geological data. **Anais Academia Brasileira de Ciências**, v. 70, n. 1, 1998.

WOLF, P. R. Elements of photogrammetry, with air photo interpretation and remote sensing. MacGraw-Hill, 1983.