

---

## EXPERIMENTOS COM CORRESPONDÊNCIA POR ÁREA PARA IMAGENS MULTIESCALA

ADILSON BERVEGLIERI<sup>1</sup>

ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI<sup>2</sup>

Univ Estadual Paulista - UNESP

Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – Bolsista FAPESP DR1

<sup>2</sup>Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, SP

aberveg@yahoo.com.br, tomaseli@fct.unesp.br

---

**RESUMO** - Muitas tarefas nas áreas de Visão Computacional e Fotogrametria requerem a correspondência de imagens. Vários problemas provenientes tanto da aquisição das imagens quanto da manipulação por parte de um operador humano dificultam o estabelecimento da correspondência. Nesse sentido, investiga-se, sobre as condições iniciais de fotografias aéreas e terrestres, a possibilidade de correlação por área, em diferentes níveis de resolução, de maneira que partindo de uma imagem de alta resolução (terrestre) seus elementos possam ser localizados na imagem aérea e ser utilizada como cena de controle. Assim, com base nos experimentos preliminares realizados, conclui-se que há correlação entre as imagens multiescala, o que possibilita automatizar o processo de correspondência para localização automática de cenas de controle.

**ABSTRACT** - Many Computer Vision and Photogrammetry tasks require image matching. Several problems derived both from the image acquisition and manipulation by a human operator make difficult the matching establishment. In this sense, it is observed on the initial conditions of aerial and terrestrial photographs, with different levels of resolution, the possibility of correlating areas, in such a way that elements in a high resolution image (terrestrial) could be matched with elements in the aerial image and being used as a control scene. Based on preliminary experiments, it can be concluded that there is correlation among the multiscale images, which allows the automation of the matching process.

---

### 1 INTRODUÇÃO

A correspondência, no contexto das áreas de Fotogrametria e Visão de Máquina, consiste no estabelecimento de uma relação entre vários conjuntos de dados, tais como imagens, ou imagens e descrições. Este objetivo é alcançado, no caso de um par de imagens, mediante a transformação de uma delas para chegar ao melhor ajuste em relação a outra, de maneira que se tenha uma função de transformação geométrica e uma função de transformação de intensidades (LANG e FORSTNER, 1998).

Segundo Delgado (2004), são muitos os processos que fazem uso desse tipo de operação, como, por exemplo, na etapa de orientação interior, em que modelos teóricos de marcas fiduciais são usados para buscar as correspondentes em imagens digitalizadas; orientação relativa e transferência de pontos em aerotriangulação, as quais dependem da identificação de pontos homólogos nas fotografias que formam o modelo; reconstrução da geometria 3D dos objetos etc. Ou seja, são importantes processos que demonstram a necessidade dessa tarefa dentro da Fotogrametria e Visão de Máquina.

Entretanto, sabe-se que grandes problemas, para o caso de correspondência, vêm da dificuldade de obtenção de uma solução robusta automatizada, ou seja, de uma forma que garanta o casamento correto entre as imagens de modo eficiente e com precisão subpixel, permitindo a utilização de imagens de alta resolução como fontes de controle para orientação de imagens. Nesse sentido, alguns autores como Gianinetta e Scaioni (2008) desenvolveram uma técnica automática de extração de pontos de controle, chamada de *Automatic Ground control points Extraction*, para orientar imagens de satélite de alta resolução, baseando-se na correspondência entre a imagem de satélite e uma de maior resolução, previamente ortoretificada e georreferenciada. Implementaram um algoritmo adaptativo de correspondência por mínimos quadrados com detecção robusta de erros grosseiros, permitindo a medição de centenas de feições

topográficas nas imagens. Nos testes realizados, extraíram cerca de 4 pontos/km<sup>2</sup> em imagens QuickBird e Spot5 HRG, com as respectivas precisões de 0,9 m e 3,9 m. A respeito das imagens ortoretificadas, tendo resolução de 1 m e tomadas como base pelos autores, concluíram que o processo proposto funciona automaticamente, levando à exatidão esperada.

Entretanto, para o caso brasileiro, não é comum haver ortoimagens atualizadas e de alta resolução nas áreas de trabalho, o que limita tal técnica como descrita por Gianinetto e Scaioni (2008). Além disso, a precisão dos pontos depende da resolução e da exatidão final da ortoimagem de referência.

Desse modo, alternativamente neste trabalho, investiga-se uma estratégia similar, mas utilizando imagens terrestres de alta resolução como cenas de controle, ao invés de uma ortoimagem obtida com fotografias aéreas. Este trabalho propõe, ainda, analisar objetivamente as condições iniciais de correspondência por área entre imagens terrestres nadirais e aéreas, a fim de verificar os limites de uso das técnicas convencionais de correspondência por área para este tipo de imagens. Procura-se também observar os níveis de resolução adequados para se trabalhar com as operações fotogramétricas, pois a superamostragem da imagem aérea para a mesma resolução da imagem terrestre não produz o mesmo nível de informação desta, devido à própria imagem não conter elementos suficientes para garantir uma boa reamostragem (ver Figura 2). Ao contrário, partindo-se de uma imagem de altíssima resolução (terrestre), que pode ser subamostrada, aproximando-se do nível da aérea, obtendo-se uma reamostragem com mais qualidade, uma vez que as informações presentes são suficientes para produzir uma imagem com o mesmo conteúdo da imagem aérea, exceto pelas diferenças radiométricas e geométricas.

## 2 CORRESPONDÊNCIA BASEADA EM ÁREA E OPERADOR DE INTERESSE

### 2.1 Funções de correlação

Bastante comum em Fotogrametria e Visão Computacional, a correspondência por área (ou por sinal) tem como base os níveis de cinza (ou as bandas espectrais) dos pixels. São utilizadas as distribuições desses níveis de cinza em subimagens, sendo uma delas considerada como janela de referência e a outra que deve abranger o espaço de busca, como janela de pesquisa (SCHENK, 1999).

Desse modo, a partir de uma janela de referência ( $g_r$ ), contento alguma entidade de interesse, busca-se em cada janela de pesquisa ( $g_p$ ) a existência desta mesma entidade por meio de uma comparação de similaridade. A determinação de subimagens e a redução do espaço de busca são necessárias por motivos de processamento e para evitar ambiguidades, caso haja mais de um alvo com semelhanças em relação ao alvo de referência. A Figura 1 dá um exemplo com duas imagens, sendo uma de entrada e outra de saída. A primeira indica a janela de referência com o objeto de interesse e a segunda ilustra o espaço de busca para realizar a correspondência (GALO, 2003).

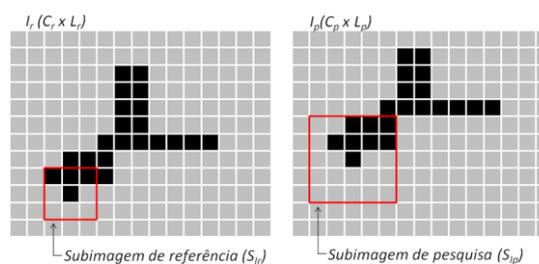


Figura 1 – Imagens de entrada ( $I_r$  e  $I_p$ ) e subimagens de referência ( $S_r$ ) e pesquisa ( $S_p$ ).  
Fonte: Galo (2003).

Dessa forma, em cada posição da janela, são comparados os valores de cinza, medindo-se a similaridade por alguma função que quantifique as semelhanças. Diversas funções ou medidas podem ser utilizadas, tais como: função erro, função erro quadrático, função correlação cruzada normalizada e função quociente, as quais são brevemente descritas a seguir, de acordo com Galo (2003).

- **Função erro:** para todo  $(a, b)$  com  $a \in \{1, 2, \dots, L_p - L_r + 1\}$ , a função erro é dada por (1):

$$F_{erro} = \frac{1}{L_r C_r} \sum_{i=0}^{L_r - C_r - 1} \sum_{j=0}^{L_r - C_r - 1} |g_r(i, j) - g_s(i + a, j + b)| \quad (1)$$

Em que  $g_r(i, j)$  e  $g_p(i, j)$  representam os tons de cinza das respectivas subimagens  $S_{I_r}$  e  $S_{I_p}$ . Caracterizada pela simplicidade, depois de calculado todos os valores de  $a$  e  $b$ , a posição homóloga é dada pelo valor absoluto em que  $F_{erro}$  seja mínimo, ou seja, quanto maior a resposta da função, menor será a similaridade.

- **Função erro quadrático:** parecido com o caso anterior, o cálculo é feito pela função (2):

$$F_{eq} = \frac{1}{L_r C_r} \sum_{i=0}^{L_r-1} \sum_{j=0}^{C_r-1} (g_r(i, j) - g_s(i+a, j+b))^2 \quad (2)$$

A avaliação da similaridade também é obtida pelo menor valor de resposta da função.

- **Função Quociente:** tem seu valor calculado pela Equação (3):

$$F_{quoc} = \frac{1}{L_r C_r} \sum_{i=0}^{L_r-1} \sum_{j=0}^{C_r-1} \frac{g_s(i+a, j+b)}{g_r(i, j)} \quad (3)$$

A posição da subimagem homóloga é encontrada quando o resultado aproxima-se ao valor 1. Porém, esta função apresenta problemas se o denominador for zero.

- **Função covariância cruzada normalizada:** é dada em função do coeficiente de correlação da Equação (4), em que  $\bar{g}_r$  e  $\bar{g}_{p(a,b)}$  são as médias dos tons de cinza das respectivas janelas de referência e pesquisa.

$$\rho = \frac{\sigma_{rp}}{\sigma_r \sigma_p} = \frac{\sum_{i=0}^{L_r-1} \sum_{j=0}^{C_r-1} (g_r(i, j) - \bar{g}_r) \times (g_p(i+a, j+b) - \bar{g}_{p(a,b)})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{L_r-1} \sum_{j=0}^{C_r-1} (g_r(i, j) - \bar{g}_r)^2 \sum_{i=0}^{L_r-1} \sum_{j=0}^{C_r-1} (g_p(i+a, j+b) - \bar{g}_{p(a,b)})^2}} \quad (4)$$

O coeficiente de correlação  $\rho$  normalizado ( $-1 \leq \rho \leq +1$ ) indica grau de similaridade máximo para valor igual a 1; caso seja -1, ocorre semelhança inversa e se for 0, não há correlação entre as correspondências.

Uma vez determinada a correspondência, pode-se refiná-la pelo método dos mínimos quadrados, *Least Squares Matching* (LSM), Equação (5), chegando-se a uma precisão de frações do pixel (KRAUS, 2007; ATKINSON, 1996).

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (5)$$

Em que:  $A$  é a matriz dos coeficientes;  $P$ , matriz dos pesos;  $L$ , o vetor das observações e  $\hat{X}$ , o vetor solução dos parâmetros estimados.

## 2.2 Operador de Förstner

Os operadores de interesse, segundo Haralick e Shapiro (1993), são definidos como um operador de vizinhança que objetivam localizar coordenadas pixel ou subpixel. E, dentre vários existentes, tem-se o operador de Förstner, o qual determina analiticamente a posição subpixel de um canto, com base em vetores perpendiculares às direções de máximo gradiente sobre as bordas. As coordenadas, de acordo com Förstner (1993), são dadas pela Equação (6):

$$\begin{pmatrix} \sum_i f^2 r_i & \sum_i f r_i f_{c_i} \\ \sum_i f r_i f_{c_i} & \sum_i f^2 c_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_0 \\ c_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_i (f^2 r_i r_i + f r_i f_{c_i} c_i) \\ \sum_i (f r_i f_{c_i} r_i + f^2 c_i c_i) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Em que: ( $r_0$  e  $c_0$ ) são as coordenadas subpixel do canto; ( $r_i$  e  $c_i$ ) são coordenadas pixel de uma janela  $m \times m$  e ( $f_{r_i}$  e  $f_{c_i}$ ) são gradientes em  $y$  e  $x$ , respectivamente.

### 2.3 Redução do espaço de busca e correspondência multiescala

Um importante problema a ser tratado na correspondência entre imagens é a determinação e a redução do espaço de busca. Na procura por características homólogas, caso este espaço não seja restringido, o custo computacional torna-se muito elevado e, ainda, podem ocorrer ambiguidades, ocasionando em falsas correlações, se consideradas apenas as informações locais. A fim de evitar cálculos desnecessários e otimizar a computação, limita-se o espaço de busca pelo emprego da busca hierárquica, por meio de uma pirâmide de imagens (SCHENK, 1999)

Em uma abordagem multiescala mais geral, para determinar a correspondência entre imagens, estimativas de uma solução desejada são encontradas usando-se diferentes níveis hierárquicos. A robustez da abordagem dependerá do método de otimização utilizado, e a redução/ampliação de escala pode ser alcançada de diversas formas, como a alteração da resolução (reamostragem), pela média dos valores de cinza de um grupo de pixels, precedida por uma suavização gaussiana (PLUIM et al., 1998).

A técnica matemática de reamostragem é usada para criar uma nova versão da imagem original com as dimensões do pixel diferentes. Quando se aumenta o tamanho de uma imagem, faz-se uma superamostragem e quando se diminui, faz-se uma subamostragem.

## 3 METODOLOGIA

Os dados utilizados são imagens aéreas e terrestres do campus da FCT/UNESP, provenientes de sensores ópticos. A imagem aéreas foi adquirida por uma câmara Hasselblad, e a terrestre foi tomada por uma câmara Fuji FinePix S3pro com lente fish-eye Bower de 8mm. Após a coleta, as imagens terrestres foram retificadas, utilizando parâmetros de orientação interior previamente determinados.

Com o objetivo de tratar da correspondência baseada em área, implementou-se, em código C, as quatro funções de correlação apresentadas.

Em razão das posições de aquisição serem diferentes e as orientações das fotos terrestres, conhecidas, inicialmente, rotacionam-se estas imagens para que seus pixels fiquem aproximadamente orientados em relação aos da imagem aérea. Neste primeiro momento, efeitos como variações radiométricas, diferenças de geometria e resolução espacial, bem como diferenças temporais, não foram considerados, pois objetiva-se verificar qual a qualidade da correspondência entre pares de imagens para os dados brutos.

Devido às diferenças de escala, opera-se sobre uma pirâmide hierárquica, pois a correspondência só é estabelecida entre imagens de mesma resolução neste tipo de técnica. Neste sentido, o método proposto leva em consideração três níveis com os seguintes GSDs: 5 cm, 10 cm e 15 cm. Logo, realizaram-se as superamostragens e subamostragens, como ilustra a Figura 2, para aplicar as funções de correlação em cada nível.

Outras considerações importantes a serem levadas em conta dizem respeito: ao entorno do relevo da janela de referência da imagem terrestre, a qual deve ser plana, para que as diferenças geométricas não sejam significativas; à variação temporal que também não pode ser grande, pois os elementos da cena estão constantemente sujeitos a alterações e, ainda, ao ajuste radiométrico, necessário nos casos de correspondências.

Desse modo, tomando a imagem terrestre como referência, uma parte da imagem aérea, próxima à área esperada para correspondência, foi determinada para servir como janela de pesquisa e restringir o espaço de busca, já que, na prática, o georreferenciamento possibilita tal restrição. Assim, busca-se verificar os valores das correlações por área.

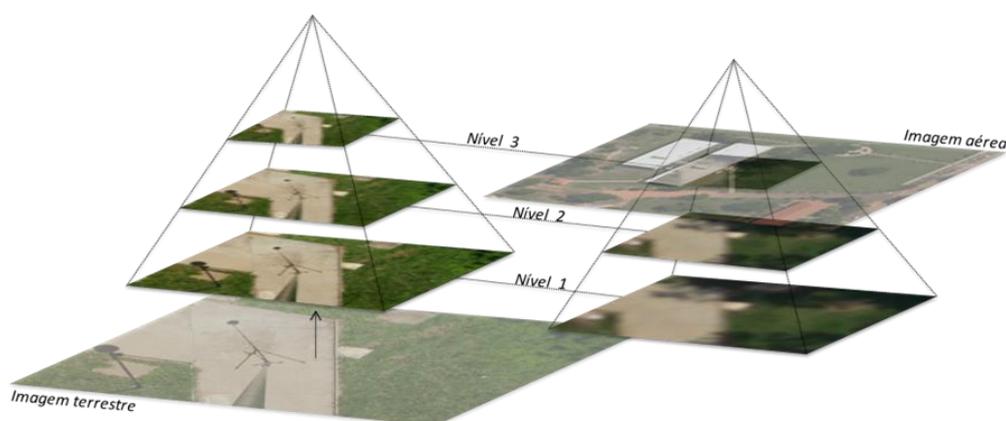


Figura 2 – Pirâmide hierárquica para correspondência entre os níveis de resolução.

#### 4 EXPERIMENTOS E ANÁLISE

Os experimentos foram realizados com dois conjuntos de imagens, em duas áreas, adquiridas da seguinte forma: duas imagens terrestres coletadas em pontos diferentes, mas contidas na mesma imagem aérea. Para a aquisição dessas imagens terrestres, foi utilizada uma câmara Fuji Finepix S3pro, com lente fish-eye Bower e distância focal de 8 mm, acoplada em um bastão levantado a aproximadamente 4,6 m do solo sobre um tripé, como aparece na Figura 3(a), tomada em uma posição nadiral.

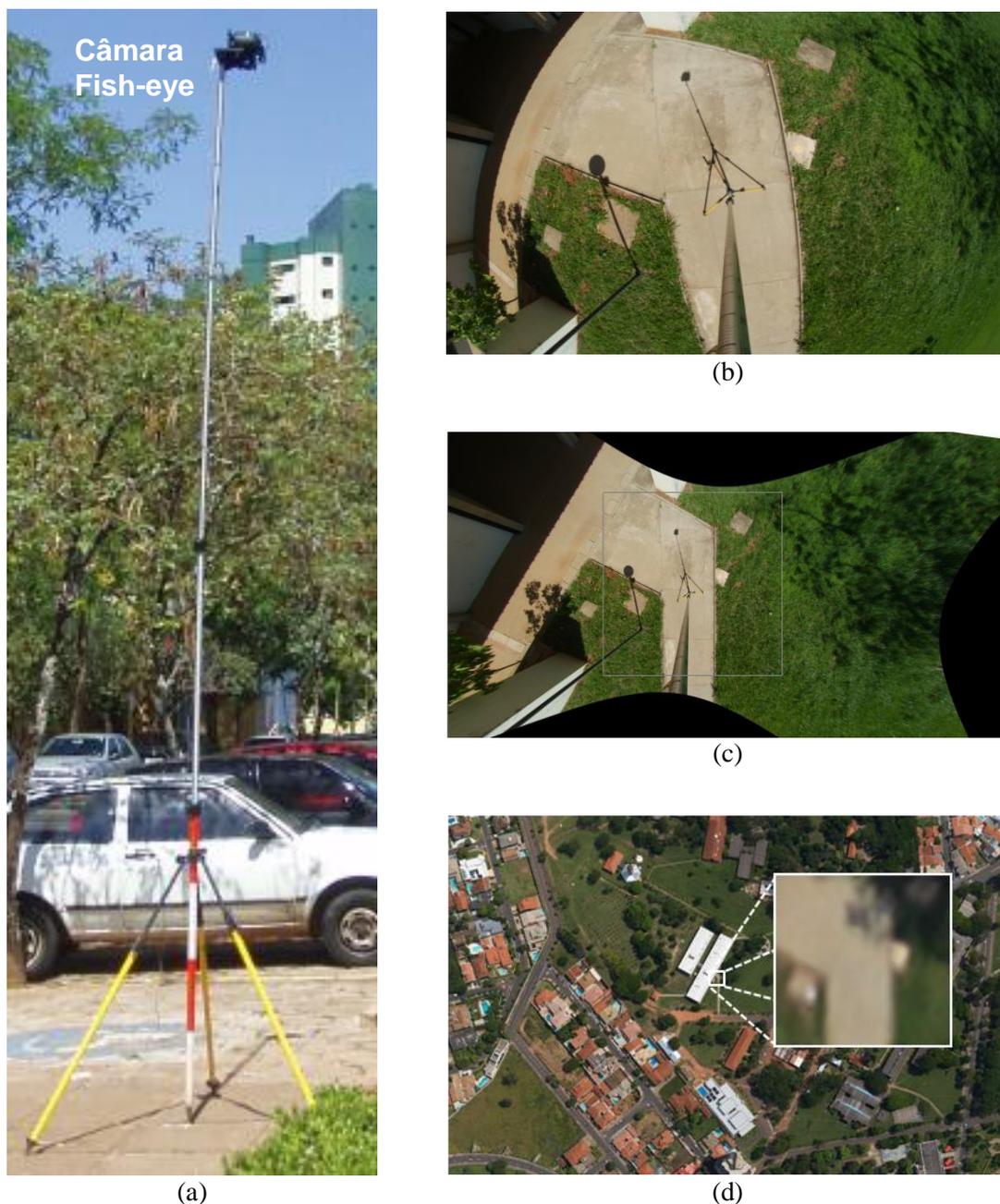


Figura 3 – (a) Dispositivo terrestre nadiral para aquisição de imagens; (b) Imagem original; (c) Imagem retificada com indicação da área utilizada; (d) Imagem aérea Hasselblad com o recorte especificando a área para correspondência.

As imagens adquiridas têm o efeito aparente da Figura 3(b) e que, depois de retificadas, ficam conforme exhibe a Figura 3(c). Nota-se que nem toda a área é passível de ser utilizada, por causa das distorções que se acentuam ao distanciar do centro. Consequentemente, aproveita-se apenas uma parte da fotografia. Esta imagem tem a função de

fazer correspondência com a imagem aérea tomada por uma câmara Hasselblad, mostrada pela Figura 3(d) e que indica, pelo recorte, a área para correlação.

Em se tratando dos experimentos, depois da coleta, tais fotos foram retificadas, apresentando, no caso aéreo, um *Ground Sample Distance* (GSD) de aproximadamente 15 cm e, no terrestre, fotos com GSD entre 2 mm e 3 mm. A Figura 4(a) forma o primeiro par de imagens, denominado Área 1, composto, respectivamente, pelas fotos terrestre e aérea, ambas no mesmo nível de resolução, com GSD de 5 cm. Nos mesmos moldes, a Figura 4(b) também forma outro par de imagens, sendo esta denominada Área 2.

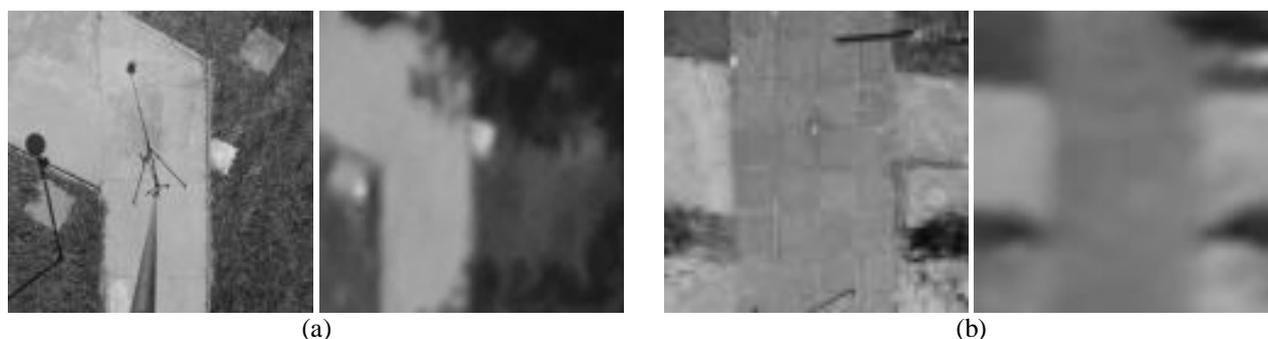


Figura 4 – Pares de imagens (terrestre-aéreo) para correspondência com GSD de 5cm: (a) Área 1; (b) Área 2.

Preliminarmente, a fim de viabilizar a aplicação das funções de correlação, cada imagem foi transformada em tons de cinza. A Tabela 1 expõe, para a Área 1, os resultados sem e com refinamento por Mínimos Quadrados (MQ) das quatro funções de correlação aplicadas aos três diferentes níveis de resolução. Nela, têm-se as coordenadas do ponto central da janela de melhor correspondência, obtida em relação à imagem de pesquisa e os resultados das respectivas correlações. As colunas “Coluna x escala e Linha x escala” informam valores multiplicados pelas escalas 2 e 3, as quais correspondem ao dobro e ao triplo do GSD 5 cm.

Pelo fato da função covariância cruzada normalizada (coeficiente de correlação) ser mais robusta, esta foi tomada como referência, usando o GSD de 5 cm. A partir dela, calcularam-se as diferenças para as coordenadas resultantes das funções de GSD 10 cm e 15 cm, compondo as duas colunas que apontam a diferença em relação ao coeficiente de correlação.

Com isso, verifica-se, pelas respostas das funções e, principalmente, pelo coeficiente de correlação, cujos índices obtidos valem 0,68; 0,70 e 0,75, que há correlação entre as janelas de referência e de busca. Além disso, tanto em  $x$  quanto em  $y$  as diferenças ficam restritas a apenas 1 pixel, excetuando-se a função quociente e sem levar em conta a precisão subpixel. Somente este resultado preliminar já confirma a proposta de utilização de imagens multiescala como ferramenta para a produção de controle.

Tabela 1: Resultado das funções de correspondência por área nos 3 níveis de resolução para a Área 1, sem e com MQ.

Função	GSD	Coluna de correspondência (X)		Linha de correspondência (Y)		Coluna x escala		Linha x escala		Diferença em relação ao coeficiente de correlação (Coluna)		Diferença em relação ao coeficiente de correlação (Linha)		Valor da função de correlação
		px	subpx	px	subpx	px	subpx	px	subpx	px	subpx	px	subpx	
Cov cruz norm	5 cm	73	73,14	73	73,51									0,68
Erro (médio)		73	73,14	73	73,51									31,07
Err quad (médio)		73	73,14	73	73,51									1709,00
Quociente		84	84,32	73	73,44									0,94
Cov cruz norm	10 cm	36	36,14	36	36,71	72	72,28	72	73,42	-1	-0,86	-1	-0,09	0,70
Erro (médio)		36	36,14	36	36,71	72	72,28	72	73,42	-1	-0,86	-1	-0,09	29,66
Err quad (médio)		36	36,14	36	36,71	72	72,28	72	73,42	-1	-0,86	-1	-0,09	1571,00
Quociente		42	42,55	36	36,60	84	85,10	72	73,20	11	11,96	-1	-0,31	0,93
Cov cruz norm	15 cm	24	24,04	24	24,68	72	72,12	72	74,04	-1	-1,02	-1	0,53	0,75
Erro (médio)		24	24,04	24	24,68	72	72,12	72	74,04	-1	-1,02	-1	0,53	26,66
Err quad (médio)		24	24,04	24	24,68	72	72,12	72	74,04	-1	-1,02	-1	0,53	1275,00
Quociente		29	29,71	24	24,57	87	89,13	72	73,71	14	15,99	-1	0,20	0,93

Agora, considerando o refinamento por MQ, nota-se que o ajuste consegue manter a diferença entre as coordenadas  $y$  a menos de 1 pixel. Já para  $x$ , com exceção da função quociente, os resultados mostram diferença subpixel para a imagem com GSD 10 cm e um valor pouco acima de 1 pixel para a imagem com GSD 15 cm.

Os resultados para a Área 2 são mostrados na Tabela 2 e também indicam ocorrência de correlação, visto que as respostas do coeficiente de correlação exprimem os significativos valores 0,77; 0,79 e 0,81. Observa-se, neste caso, sem considerar a função quociente e a precisão subpixel, que as variações das coordenadas para o GSD 10 cm equivalem a 1 pixel e para o GSD 15 cm, ficam em 1 pixel na coordenada  $x$  e 2 em  $y$ .

Tabela 2: Resultado das funções de correspondência por área nos 3 níveis de resolução para a Área 2, sem e com MQ.

Função	GSD	Coluna de correspondência (X)		Linha de correspondência (Y)		Coluna x escala		Linha x escala		Diferença em relação ao coeficiente correlação (Coluna)		Diferença em relação ao Coeficiente Correlação (Linha)		Valor da função de correlação
		px	subpx	px	subpx	px	subpx	px	subpx	px	subpx	px	subpx	
Cov cruz norm	5 cm	49	49,12	53	52,94									0,77
Erro (médio)		49	49,09	54	54,09									18,41
Err quad (médio)		48	48,04	53	52,98									477,00
Quociente		58	58,45	57	56,99									0,94
Cov cruz norm	10 cm	25	25,20	27	26,96	50	50,40	54	53,92	1	1,28	1	0,98	0,79
Erro (médio)		25	25,20	27	26,96	50	50,40	54	53,92	1	1,28	1	0,98	17,81
Err quad (médio)		24	23,98	27	27,06	48	47,96	54	54,12	-1	-1,16	1	1,18	432,00
Quociente		30	30,70	29	28,98	60	61,40	58	57,96	11	12,28	5	5,02	0,93
Cov cruz norm	15 cm	16	16,21	17	16,91	48	48,63	51	50,73	-1	-0,49	-2	-2,21	0,81
Erro (médio)		16	16,21	17	16,91	48	48,63	51	50,73	-1	-0,49	-2	-2,21	16,91
Err quad (médio)		16	16,21	17	16,91	48	48,63	51	50,73	-1	-0,49	-2	-2,21	384,00
Quociente		19	19,67	19	19,33	57	59,01	57	57,99	8	9,89	4	5,05	0,93

Se para a Área 2 for levado em conta o refinamento por MQ e novamente não for considerada a função quociente, a precisão para o GSD 10 cm fica em torno de um pixel, ao passo que no GSD 15 cm diminui para 0,5 pixel em  $x$  e sobe para pouco mais de 2 pixels em  $y$ .

No geral, percebe-se que as três funções de correspondência por área, covariância cruzada normalizada, erro e erro quadrático, exprimem ocorrência de correlação e resultados similares entre si. Já quanto à função quociente, apesar de indicar correlação, seus valores divergem mais acentuadamente com relação às outras três funções.

No sentido de obter uma estimativa dos resultados, identificou-se tanto na imagem aérea como na terrestre cantos bem definidos em ambas as áreas de teste (Figura 5). Essa identificação foi realizada da seguinte maneira: na aérea, aplicou-se o operador de Förstner, o qual permitiu encontrar automaticamente a posição do ponto de interesse com precisão subpixel (canto bem definido). Já para as imagens terrestres, o processo de localização por tal operador não pode ser executado, devido a alguns elementos, como grama, sombra entre outros, que influenciavam na detecção do mesmo canto correspondente na imagem aérea. Porém, a alta resolução da imagem com GSD 5 cm possibilitou identificar manualmente esse canto. Assim, procedeu-se a localização, e as coordenadas obtidas foram reamostradas para os outros níveis de menor resolução.



Figura 5 – Pontos de interesse dentro das janelas de correspondências e distância entre eles.

Tendo encontrado um ponto de interesse em cada área de teste, o próximo passo foi fazer a transformação dos centros das janelas de correspondência, resultantes da aplicação das funções de correlação, para o nível da imagem aérea, a fim de calcular as distâncias de cada centro ao canto, dentro da janela de correlação.

Isto foi feito para cada área separadamente, como na Tabela 3, em que constam, para as duas áreas, as coordenadas dos centros das janelas de correspondência e a posição de cada canto, já no nível da imagem aérea. Por conseguinte, também se calculou a distância entre os dois pontos de interesse, segundo cada resposta da função de correlação, cujos valores variaram de 586,90 a 589,25 pixels (ou 86,10 a 86,44 metros).

Tabela 3: Distâncias entre dois pontos de interesse calculadas em duas áreas distintas por meio da correspondência.

Função	G S D	Ponto de interesse 1				Ponto de interesse 2				Distância entre os dois pontos na imagem aérea		Diferença entre as distâncias	
		Ponto de correspondência (centro da janela)		Canto (terrestre)		Ponto de correspondência (centro da janela)		Canto (terrestre)		pixel	m	Img (px)	Terr (m)
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y				
C Cr Nor	5 cm	5521,93	3188,05	5517,84	3177,49	5642,85	3762,08	5638,97	3751,75	586,90	86,10	-1,77	-0,09
Erro		5521,93	3188,05	5517,84	3177,49	5642,84	3762,45	5638,96	3752,13	587,26	86,15	-1,41	-0,04
Erro quad		5521,93	3188,05	5517,84	3177,49	5642,50	3762,09	5638,63	3751,77	586,84	86,09	-1,83	-0,10
Quociente		5525,74	3188,03	5521,65	3177,46	5645,85	3763,38	5641,98	3753,06	588,04	86,27	-0,64	0,08
C Cr Nor	10 cm	5521,64	3188,02	5517,55	3177,46	5643,26	3762,39	5637,13	3752,39	587,24	86,15	-1,44	-0,04
Erro		5521,64	3188,02	5517,55	3177,46	5643,26	3762,39	5637,13	3752,39	587,24	86,15	-1,44	-0,04
Erro quad		5521,64	3188,02	5517,55	3177,46	5642,47	3762,46	5636,34	3752,46	587,14	86,13	-1,53	-0,06
Quociente		5526,00	3187,95	5521,91	3177,38	5646,81	3763,70	5640,68	3753,70	588,42	86,32	-0,25	0,13
C Cr Nor	15 cm	5521,04	3187,68	5516,95	3177,11	5643,21	3761,91	5637,08	3751,91	587,22	86,14	-1,46	-0,05
Erro		5521,04	3187,68	5516,95	3177,11	5643,21	3761,91	5637,08	3751,91	587,22	86,14	-1,46	-0,05
Erro quad		5521,04	3187,68	5516,95	3177,11	5643,21	3761,91	5637,08	3751,91	587,22	86,14	-1,46	-0,05
Quociente		5526,71	3187,57	5522,62	3177,00	5646,67	3764,33	5640,54	3754,33	589,25	86,44	0,57	0,25
Coordenada do canto, medido com o operador de Förstner na imagem aérea		X		Y		X		Y		Distância entre cantos (img)		588,39 px ou 86,32 m	
		5518,08		3175,27		5638,29		3751,25		Distância entre cantos no solo		86,19 m	

Pela aplicação automática do operador de Förstner diretamente sobre a foto aérea, chegou-se aos valores subpixels (5518,08; 3175,27) para o canto da Área 1 e (5638,29; 3751,25) para o canto da Área 2, os quais permitiram estimar a distância euclidiana entre os cantos (ilustrada na Figura 5), cujo valor encontrado foi de 588,39 pixels ou 86,32 m, usando uma escala aproximada.

Com base nessa distância de 588,39 pixels, foram calculadas as discrepâncias para as distâncias calculadas pelos cantos provenientes das fotos terrestres, acarretando nas diferenças de -1,77 a 0,57 pixels, mostradas na Tabela 3. Além disso, para se ter um valor aproximado da distância verdadeira, também se mediu com um distanciômetro eletrônico a distância horizontal entre os cantos, resultando em 86,19 m. Esta medida real serviu como referência para computar as diferenças entre ela e os resultados das distâncias obtidas pelas funções de correlação, via imagem aérea, compondo a última coluna da tabela. Com exceção do valor de 0,25 m, tais diferenças expressam variações (em módulo) entre 4 e 13 cm, sendo muito significativas, uma vez que os problemas oriundos da aquisição da imagem ainda não foram tratados e o erro apresentado inferior a 13 cm, quando o esperado seria de 1 pixel, ou seja, cerca de 15 cm.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram apresentados resultados preliminares de uma técnica em desenvolvimento para a determinação de correspondência entre imagens de diferentes resoluções. Estes experimentos, embora iniciais, possibilitam verificar a viabilidade de uso de correspondência por área, desde que adotadas as restrições apontadas na seção 3. Entretanto, ressalta-se que vários problemas não foram considerados neste momento e devem ser tratados em etapas futuras, como as diferenças de radiometria, temporalidade, geometria, resolução espacial etc.

De modo geral, com base nos experimentos realizados, pôde-se constatar a ocorrência de correlação entre imagens terrestres e aéreas em diferentes níveis de resolução, o que permite afirmar a possibilidade de automação desse processo de correspondência. Quanto à precisão, outros experimentos mais específicos e mais criteriosos devem ser realizados para esse fim. No entanto, pelos testes aqui apresentados, verifica-se que essa precisão também é passível de ser atingida, uma vez que vários resultados já demonstram diferença no nível subpixel.

Os resultados apresentados reforçam a possibilidade de automatização do procedimento de correspondência entre imagens multiescalas de maneira que, a partir de uma foto terrestre, esta possa ser correlacionada com outra de diferente resolução e sirva como cena de controle.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro do trabalho na forma de uma bolsa de doutorado, ao aluno Marcus V. A. Moraes e à mestranda em Ciências Cartográficas Raquel Alves de Oliveira, pela coleta das imagens terrestres e medições em campo.

## REFERÊNCIAS

- ATKINSON, K. B. **Close Range Photogrammetry and Machine Vision**. Whittle Publishing, Bristol, 371 p. 1996.
- DELGADO, G. J. **Fotogrametría Digital**. Jaén: Universidad de Jaén, 612 p. 2004.
- FORSTNER, W. Image Matching. In: HARALICK, R.; SHAPIRO, L. G. **Computer and Robot Vision**. Addison-Wesley Publishing Company, 1993. v. 2, cap. 16, p. 289-378.
- GALO, M. **Automação dos processos de correspondência e orientação relativa em visão estéreo**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – FEEC – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- GIANINETTO, M; SCAIONI, M. Automated Geometric Correction of High-resolution Pushbroom Satellite Data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 74, n.1, p. 107-116, 2008.
- HARALICK, R. M.; SHAPIRO, L. G. **Computer and Robot Vision**. V.2. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1993, 630 p.
- KRAUS, K. **Photogrammetry: Geometry from images and laser scans**. 2 ed..v. 1. Berlin: de Gruyter, 2007. 459 p.
- LANG, F.; FÖRSTNER, W. Matching techniques. In: **Third Course in Digital Photogrammetry**. Bonn, Germany. Institute for Photogrammetry at Bonn University and Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen. 1998.
- PLUIM, J.P.W.; MAINTZ, J.B.A.; VIERGEVER, M. A. A multiscale approach to mutual information matching. In: **Medical Imaging: Image Processing**, v. 3338, p. 1334-1344. 1998.
- SCHENK, T. **Digital Photogrammetry: Background, Fundamentals, automatic orientation procedures**. Laurelville: TerraScience. 1999. 428p.