

## Construção de Mosaicos Georreferenciados Usando Imagens Aéreas de Pequeno Formato para SIG

Natal Henrique Cordeiro<sup>1</sup>, Bruno Motta de Carvalho<sup>1</sup>, Luiz Marcos Garcia Gonçalves<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerdidade Federal do Rio Grande do Norte(UFRN)  
Campus Universitário – Lagoa Nova – Natal – RN – Brasil

natal@ppgsc.ufrn.br, motta@dimap.ufrn.br, lmarcos@dca.ufrn.br

**Abstract.** *We propose to use small format aerial images (SFAI) that are considered as not controlled and stereo-photogrammetry techniques for construction of georeferenced mosaics. The images are obtained using a simple digital camera coupled to a small radio controlled helicopter. Techniques for removing common distortions are applied and the relative orientation of the models are performed based on perspective geometry. Then, ground truth points are used to get absolute orientation, plus a definition of scale and a coordinate system which relates image measures to the ground. The mosaic is to be read into a GIS system, which is also being developed based on AJAX, providing useful information to users. Preliminary results have shown the aplicability of the system.*

**Resumo.** *Propomos construir mosaicos georreferenciados com técnicas da estéreo-fotogrametria usando imagens aéreas de pequeno formato(SFAI) não controladas. As imagens são obtidas com uma câmera digital comum acoplada a um helicóptero aeromodelo. Técnicas para corrigir distorções é aplicada e a orientação relativa dos modelos é realizada baseada na geometria perspectiva. Pontos reais do terreno são usados para executar a orientação absoluta, definindo uma escala e um sistema de coordenadas que relacione medidas da imagem com o terreno. O mosaico será manipulado em um SIG, que esta sendo desenvolvido baseado em AJAX, fornecendo informação útil aos usuários.*

### 1. Introdução

A digitalização dos processos analógicos propiciou a geração de mosaicos georreferenciados, o que antes não era possível com qualidade sem um processo fotográfico complexo. Um mosaico nada mais é que uma colagem de várias imagens adjacentes, visando ter uma visão mais ampla (e na mesma escala) de uma determinada cena. No caso, um mosaico georreferenciado pode ser obtido após uma série de etapas, que envolvem a retirada de erros e distorções causados pelo processo ou pelo sistema de aquisição, com aplicação de transformações visando reconstruir as posições e orientações relativa, das imagens umas às outras, e absoluta, em relação à cena, e finalmente a definição e adoção de uma escala e sistema de representação.No processo cartográfico, imagens adquiridas por técnicas controladas são utilizadas, sendo este processo, caro, pois envolve uso de câmeras especiais e o emprego de aviões específicos para aquisição. O uso de imagens de satélite é uma alternativa, porém menos precisa em relação a profundidade e em relevos acentuados, comparado ao modelo utilizado neste trabalho, caso esta seja necessário. Com o uso do helicóptero aeromodelo podemos obter imagens com escalas bem próximas da superfície, além de realizar mapeamento de quaisquer regiões, como exemplo, a título de inovação, neste projeto, trabalhamos com regiões marinhas, carentes de mapeamento detalhado.

## 2. Estado da Arte

Como visto, o processo de aquisição usando uma câmera digital comum acoplada no helicóptero aeromodelo torna-se mais barato se comparado aos processos de aquisição via satélite ou de câmeras aerofotogramétricas acopladas em aviões. No entanto, como são disponibilizadas SFAI sem um maior controle, torna-se indispensável readaptar e/ou criar metodologias adequadas para este formato de imagem. Sistemas como o ArcView da ESRI, ERDAS da Leica Geosystem, Regeemy do INPE entre outros como [Grandi et al. 2000, Lhuillier et al. 2001, Hsu 2001], permitem gerar mosaicos de qualidade usando técnicas de registro em imagens aéreas de grande formato (BFAI). Convém ressaltar que, por definição, imagens do tipo BFAI são controladas, sendo em alguns casos consideradas com distorções mínimas e até mesmo já georreferenciadas em algumas aplicações. Isso facilita substancialmente o processo, o que não ocorre no tipo de problema que estamos tratando. No presente projeto, estaremos empregando SFAI com vários tipos de distorções e que presenciam pouquíssimos pontos de controle. Os métodos apresentados por [Albrecht and Michaelis 1998, Nogueira ], expõem áreas relacionadas com este projeto, como técnicas da estéreo-fotogrametria a fim de reduzir erros em regiões com relevo acentuado e geração de mapas de disparidades.

## 3. Geração de mosaicos georreferenciados com SFAI's

O processo de reconstrução de mosaicos georreferenciados é dificultado pelo uso de SFAI. Além disso, ocorrem variações de posição e orientação do helicóptero durante o vôo, que podem gerar erros imprevisíveis e ainda, os parâmetros intrínsecos da câmera digital usada podem causar distorções radial e radiométrica. Para a obtenção de resultados interessantes e de qualidade, vários procedimentos ou técnicas devem ser aplicados, sendo elas, basicamente, técnicas de calibração de câmera, correção das distorções radial e radiométrica, reconstrução a partir de estéreo-fotogrametria e a geração do mosaico georreferenciado propriamente dita. Determinamos os parâmetros internos e externos da câmera no módulo de calibração com modelo Tsai. Seguida da calibração de câmera realizamos a correção das distorções radial, com a Equação 1 e radiométrica, com a Equação 2 que tem por objetivo corrigir as distorções ou degradações oriundas do processo de aquisição da imagem, tanto geométrica como de iluminação respectivamente.

$$\begin{aligned}x &= x_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4) \\y &= y_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4) \\r &= \sqrt{x_d^2 + y_d^2}\end{aligned}\quad (1)$$

Na Equação 1,  $x_d$  e  $y_d$  são os pontos na imagem distorcida,  $r$  é a distância do centro da imagem até o pixel e  $k_1$  e  $k_2$  são os coeficientes de distorção. Em seguida, é realizada a correção da distorção radiométrica, usando a Equação 2, [Trucco and Verri 1998].

$$E(p) = L(P) \left[ \frac{\pi}{4} \left( \frac{d}{\hat{z}} \right)^2 \cos^4 \alpha \right] \quad (2)$$

Convém ressaltar que a iluminação na imagem  $P$  decresce o mesmo que a quarta potência do cosseno do ângulo formado pelo raio principal que chega em  $P$  com o eixo ótico [Trucco and Verri 1998].

### 3.1. Estereofotogrametria

Na aplicação de monitoramento ambiental, foco deste trabalho, temos recobrimento tanto longitudinal (cerca de 70%) quanto lateral (30%) entre as imagens que farão parte do mosaico e cada imagem é adquirida de uma posição diferente. Isso propicia que técnicas de reconstrução estéreo sejam empregadas visando melhorar ainda mais a qualidade do mosaico final. O principal problema das técnicas de reconstrução a partir de imagens estéreo é descobrir quais pontos em cada imagem correspondem às projeções de um mesmo ponto da cena. Este problema é mais conhecido como *matching* [Marr and Poggio 1979], sendo ele a etapa mais demorada e uma das mais estudadas em reconstrução estéreo. Determinadas as correspondências de todos os pixels das imagens, esta informação pode ser utilizada na construção do mosaico. A profundidade de cada pixel pode ser determinada em relação a um referencial fixo, por triangulação, em relação às câmeras. Esta profundidade pode ajudar a distinguir as características ou atributos de um dado pixel que aparece em mais de uma imagem. Note que, no pior caso, uma média entre os atributos pode ajudar a minimizar problemas de erros das imagens. A correspondência entre as imagens pode ser feita por área ou atributo [Marr and Poggio 1979]. Neste trabalho, a correspondência por área pode ser usada, com algumas simplificações observadas adiante. Este tipo de operação é realizado com aplicação de operadores de correlação cruzada normalizada (ou simplesmente correlação) ou então pela soma do quadrado das diferenças (SSD) [Ballard and Brown 1982]. A SSD é mais rápida de ser calculada do que a correlação, mas não é imune a variações de contraste e brilho nas imagens, problemas que não afetam a correlação cruzada normalizada, dada abaixo:

$$r_{x,y} = \frac{n \sum(x_i y_i) - \sum(x_i) \sum(y_i)}{\sqrt{n \sum(x_i^2) - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum(y_i^2) - (\sum y_i)^2}}$$

onde  $n$  é o número de amostras em cada sinal. Para o *matching*, a correlação é restrita a uma região (janela de comparação) de cada imagem, sendo  $n$  a área desta janela.

### 3.2. Orientação relativa

Alguns princípios de estereofotogrametria são empregadas na fase de orientação relativa dos modelos produzidos por cada par de imagens consecutivas, visando determinar as relações espaciais que o helicóptero possuía no momento de tomada de cada imagem, dada aproximadamente pelo GPS de bordo. O problema de orientação relativa é atualmente bem determinado dentro da área de fotogrametria e encontra-se formalizado em livros e artigos [Wolf 1983]. Com as simplificações, com apenas 6 pares de pontos conhecidos em cada modelo (entre cada par de imagens), uma boa precisão pode ser obtida na determinação de coeficientes de transformação que deverão retirar as distorções causadas pelo posicionamento e orientação (desconhecidos) do helicóptero.

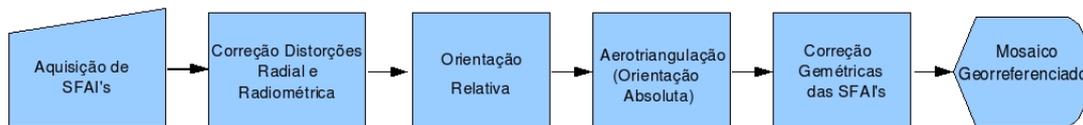
### 3.3. Orientação absoluta (escala e georreferenciamento)

Para o georreferenciamento em si (determinação de escala e referenciamento a um sistema de coordenadas), são determinados a priori, na região a ser imageada, pontos de controle, cujas coordenadas são determinadas por GPS. Então, usando técnicas de aerotriangulação [Wolf 1983], estas coordenadas conhecidas são estendidas para os pontos determinados no processo de orientação relativa. A partir destes, em caso de não assunção de um modelo de relevo plano, poderia-se estender a todos os outros pontos de todas as imagens,

gerando assim coordenadas de terreno, referenciadas em relação a um sistema de coordenadas, para todo o mosaico [Gonçalves]. Note que cada modelo (par de imagens) pode ser ligado ao posterior via uma das imagens que é comum a dois modelos adjacentes. Estender as coordenadas dos pontos de controle significa usar este recobrimento para extrapolar as coordenadas de uma imagem a outra. Note que um erro inerente ao processo de digitalização aparece aqui. A técnica de aerotriangulação adotada neste trabalho usa o modelo dos mínimos quadrados para minimizar estes erros no processo de determinação de coordenadas para os pontos de cada modelo. Ao final, obtém-se por um ajuste de bloco as coordenadas georreferenciadas de todos os pontos. Usando estas, pode-se determinar quais os coeficientes das transformações necessárias a serem aplicadas em cada imagem para geração do mosaico final.

#### 4. Implementações parciais

A linguagem de desenvolvimento utilizada é C/C++, com bibliotecas do QT Designer.



Após a etapa de calibração, foi calculada a equação de mapeamento radial e radiométrica com seguinte interpolação de pixels, resultando na imagem corrigida. Para as correções geométricas oriundas da vista perspectiva, inicialmente, foi implementado um módulo, onde, a partir de duas imagens, aplicamos transformações para coincidir as medidas geométricas, preparando para fase de mosaico. Para o uso deste módulo, é preciso definir os pontos de controle nas imagens e a equação de mapeamento. Assim obteremos os coeficientes que determinarão as transformações. Estes coeficientes são determinados pelo processo de aerotriangulação, em fase de implementação. Foram implementados neste módulo a transformação afim, com a Equação 3 e transformação projetiva, com a Equação 4 com o método de interpolação bilinear. Para a geração de mosaicos, basta inserir pontos correspondentes em ambas as imagens que será realizado o mosaico.

$$\begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde  $a_{ij}$  são parâmetros correspondentes a dois fatores de escala, um de rotação, e um de não ortogonalidade(cisalhamento), com  $i$  e  $j= 1$  ou  $2$ ;  $X$  e  $Y$  são coordenadas a ser transformadas no espaço;  $X^*$  e  $Y^*$  são coordenadas no espaço transformado;  $X_0$  e  $Y_0$  são parâmetros de translação na direção  $X$  e  $Y$  [Nogueira].

$$X^* = \left[ \frac{a_{11}X+a_{12}Y+a_{13}}{a_{31}X+a_{32}Y+1} \right] \quad Y^* = \left[ \frac{a_{21}X+a_{22}Y+a_{23}}{a_{31}X+a_{32}Y+1} \right] \quad (4)$$

Onde  $a_{ij}$  são os parâmetros das transformações geométricas, com  $i$  e  $j= 1, 2$  ou  $3$ ;  $X$  e  $Y$  são os valores medidos no sistema de referência;  $X^*$  e  $Y^*$  são os valores calculados para o sistema de ajuste [Nogueira].

## 5. Resultados Parciais

Experimentos parciais foram realizados, visando testar os módulos implementados até o momento. A Figura 1 mostra o resultado do processo de calibração de Tsai implementado com correções radial e radiométrica. A Figura 2 mostra a aplicação de transformações afim e projetiva, às imagens. Estas transformações serão aplicadas na construção do mosaico, com coeficientes fornecidos pelo processo de orientação relativa e absoluta, descritos no texto, não implementados ainda. As duas transformações são importantes e tem em comum modificar a posição, escala e forma, no entanto a transformação projetiva se mostrou mais eficaz em algumas ocasiões comparada a transformação afim por afetar também o paralelismo. As Figuras 3 e 4 expõem os mosaicos gerados sem e com correção de iluminação nas áreas de recobrimento, ainda sem a determinação precisa dos coeficientes de transformação, usando a metodologia a ser implementada aplicando orientação relativa e absoluta. Nesta etapa foram obtidas imagens com a câmera do helicóptero, adquiridas em terra, por ora e se mostrou ideal após corrigir as distorções radial, radiométrica, geométrica e de iluminação nas áreas de recobrimento do mosaico.

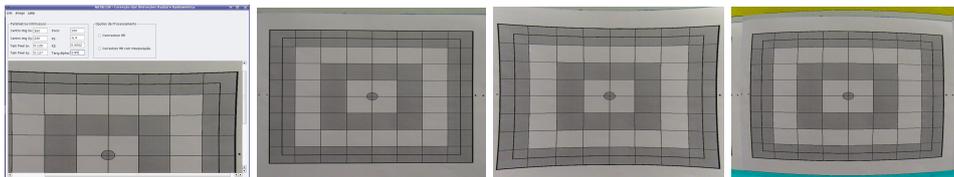


Figure 1. Módulo de Correção Radial e Radiométrica / Imagem Original / Imagem Distorcida "Pincushion"  $K1=-3.5$  / Imagem Distorcida "Barrel"  $K1=+4.5$

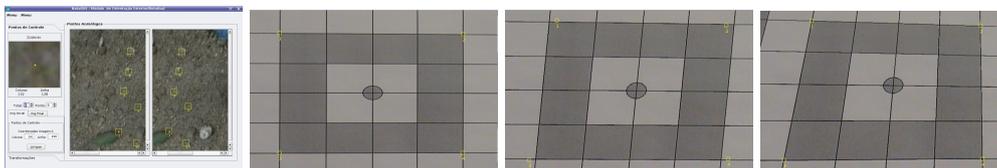


Figure 2. Módulo de Correção Geométrica e Mosaico / Imagem Inicial / Imagem após transformação Afim/ Imagem após Transformação Projetiva



Figure 3. Mosaico de 9 imagens sem correção de iluminação



Figure 4. Mosaico de 10 imagens com correção de iluminação em algumas áreas

## 6. Conclusão

Propomos neste trabalho o desenvolvimento de um sistema completo, que visa gerar mosaicos georreferenciados por meio das técnicas de estéreo-fotogrametria, usando imagens aéreas de pequeno formato obtidas por uma filmadora digital comum acoplada a um helicóptero aeromodelo. A contribuição principal do presente trabalho reside no fato deste tipo de imagens ter sido ainda muito pouco explorada na geração de mosaicos georreferenciados, talvez em função do uso de imagens de grande formato e controladas ser geralmente a técnica adotada nos projetos de cartografia. Note que o uso deste último tipo de imagem torna o projeto de monitoramento constante caro. Projetos como o nosso são essenciais a regiões costeiras, implicando em sobrevôos rotineiros visando checar determinadas características. Com a implementação parcial destas técnicas, mostramos ser possível desenvolver uma metodologia a baixo custo. Estas técnicas se mostram essenciais na busca de dados mensuráveis confiáveis de modo que possam gerar um monitoramento de áreas com maiores detalhes, no qual, satélites não operam ao mesmo nível de escala próxima ao terreno e nas quais o uso de fotogrametria aérea profissional se torna caro. Já foram estudadas e principalmente formalizadas todas as técnicas necessárias, estando na fase final de implementação. Os próximos passos são o sobrevôo da região dos Parrachos de Maracajaú, com o helicóptero já adquirido (vôos experimentais já estão sendo realizados em terra). Depois de adquiridos os dados, estes servirão de base para a construção do mosaico e consequente alimentação do SIG de monitoramento ambiental.

## References

- Albrecht, P. and Michaelis, B. (1998). Stereo photogrammetry with improved spatial resolution. In *ICPR '98: PROC-Volume 1*, page 845, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- Ballard, D. and Brown, C. (1982). *Computer Vision*. Prattice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Gonçalves, L. *Reconstrução a partir de estéreo fotogrametria - UFRJ - 1995*. Rio de Janeiro - BRASIL.
- Grandi, G., Mayaux, P., Rauste, Y., Rosenqvist, A., Simard, M., , and Saatchi, S. (2000). The global rain forest mapping project jers-1 radar mosaic of tropical africa. *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*.
- Hsu, S. (2001). Geocoded terrestrial mosaics using pose sensors and videos registrations. In *ICCV. PROC*, pages 834–841. IEEE Computer Society.
- Lhuillier, M., Quan, L., Shum, H., and Tsui, H. (2001). Relief mosaics by joint view triangulation. In *ICCV - PROC*, pages 785–790. IEEE Computer Society, USA.
- Marr, D. and Poggio, T. (1979). A computational theory of human stereo vision. In *PROC*, volume 204, pages 301–328. Royal Society Publishing.
- Nogueira, F. Geração automática de mapas de disparidade em visão estéreo - UNICAMP - 1998. Master's thesis.
- Trucco, E. and Verri, A. (1998). *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Wolf, P. (1983). *Elements of Photogrammetry*. McGraw-Hill Book Company, Singapore.