

Mapeamento e Monitoramento Ambiental Usando Imagens Aéreas de Pequeno Formato

Natal Henrique Cordeiro

Bruno Motta de Carvalho

Luiz Marcos Garcia Gonçalves

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Laboratório Natalnet

Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal, RN, Brasil

natalhenrique@gmail.com, motta@dimap.ufrn.com, lmarcos@dca.ufrn.br

Resumo

No presente trabalho ¹ descrevemos uma metodologia para a construção de mosaicos georreferenciados a partir de imagens aéreas de pequeno formato, ou SFAI, consideradas não controlada. Técnicas de Estéreo-Fotogrametria e de Visão Computacional são aplicadas para auxiliarem em resultados de qualidade e confiabilidade. As imagens são obtidas através de uma câmera digital comum acoplada a um helicóptero aeromodelo. Técnicas para eliminar distorções comuns são aplicadas e a orientação relativa dos modelos é realizada baseada na geometria perspectiva. Pontos reais do terreno são usados para executar a orientação absoluta, além de uma definição de escala e de um sistema de coordenadas que relaciona a imagem medidas no terreno. O mosaico será manipulado em um SIG (Sistema de Informação Geográfica), fornecendo informação útil para diferentes tipos de usuários tais como pesquisadores, instituições governamentais, pescadores e empresas de turismo. Resultados são mostrados, ilustrando a aplicabilidade do sistema. A principal contribuição é a geração de mosaicos georreferenciados usando imagens aéreas de pequeno formato, o que tem sido pouquíssima explorada em projetos de cartografia. A arquitetura proposta apresenta uma solução viável e bem barata quando comparada com sistemas que utilizam imagens controladas.

Abstract

We propose a technique that uses small format aerial images, or SFAI, considered as not controlled, and stereo-photogrammetry techniques to construct georeferenced mo-

saics. Images are obtained using a simple digital camera coupled to a radio controlled (RC) helicopter. Techniques for removing common distortions are applied and the relative orientation of the models are recovered using perspective geometry. 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 read into a GIS system, providing useful information to different types of users, such as researchers, government officers, fishers and tourism enterprises. Results are reported, illustrating the applicability of the system. The main contribution is the generation of georeferenced mosaics using SFAIs, what has not been widely explored previously in cartography projects. The proposed architecture presents a viable and much less expensive solution, when compared to systems using controlled pictures.

1. Introdução

Neste trabalho, propomos uma metodologia visando produzir mosaicos georreferenciados usando imagens aéreas de pequeno formato (small format aerial images - SFAI). Um mosaico nada mais é que uma composição de várias fotos ou imagens adjacentes, visando ter uma visão mais ampla (e na mesma escala) de uma determinada cena, no caso, com mais realismo que os mapas. Imagens aéreas de pequeno formato resumem-se à imagens capturadas com uma câmera digital comum, de baixa resolução.

Esta metodologia envolve a realização de uma série de etapas, desde a retirada de erros e distorções causados pelo processo (ou pelo sistema) de aquisição, até a colagem final das imagens. No processo, devem ser aplicadas transformações, visando reconstruir a orientação relativa das imagens, umas às outras, e absoluta, em relação à cena; Finalmente,

¹ Este documento contém informações da dissertação de mestrado denominada "Construção de Mosaicos Georreferenciados Usando Imagens Aéreas de Pequeno Formato".

a definição e a adoção de uma escala e de um sistema de representação, em relação à cena (terreno) imageada.

A metodologia para SFAI, em linhas gerais, segue aproximadamente o mesmo processo tradicional de cartografia, e do caso de se usarem imagens de grande formato (big format aerial images - BFAI), sendo que esta última, permite uma precisão significativamente melhor, uma vez que o sistema de aquisição é controlado.

Quando mencionamos sobre um sistema de aquisição controlado, significa dizer que as imagens podem ser tomadas em um momento desejado e a uma altura significativa, em que permite diminuir substancialmente as distorções geradas pelas variações de vôo e de vista perspectiva comparado com as obtidas usando uma câmera digital comum acoplada a um helicóptero aeromodelo. É importante ressaltar que estas imagens(BFAI) possuem alta resolução e não geram distorções oriundas da curvatura da lente como comparado à uma câmera digital comum. Dessa forma, existe a possibilidade de se produzir orto-imagens, ou imagens muito próximas de uma projeção ortográfica.

Isso facilita muito o processo de correção das distorções. Neste trabalho, o uso de imagens aéreas de pequeno formato implica o cálculo de todos os coeficientes das transformações(orientação relativa e absoluta) citadas acima, antes da geração do mosaico. Um dos principais problemas na geração de mosaicos georreferenciados refere-se à qualidade das imagens adquiridas.

No processo cartográfico tradicional, imagens adquiridas por técnicas controladas são utilizadas, sendo que este processo, no entanto, mesmo com a introdução de etapas automatizadas pelo uso de tecnologia recente, é ainda caro, pois envolve também o uso de câmeras especiais e o emprego de aviões específicos para aquisição dos dados.

O uso de imagens de satélite é uma alternativa, porém menos precisa que as imagens obtidas a partir de aviões, por serem estas últimas adquiridas de altitudes menores, com os sensores mais próximos da cena, portanto em escalas maiores.

O uso de câmeras comuns e helicópteros ou aviões aeromodelos tornam o processo muito mais barato. Claro, ocorre também uma perda na precisão do controle de georreferenciamento do produto final, mas há o apelo de que a precisão visual é muito melhor que as outras duas, sendo por isso aceitável em algumas aplicações, tais como em monitoramento ambiental, inspeção de locais, turismo, entre outras. No presente trabalho, buscamos justamente uma nova abordagem para a geração de mosaicos georreferenciados, que se encaixe nesta terceira categoria.

Usamos imagens aéreas de pequeno formato (Small Format Aerial Images - SFAI), obtidas por uma câmera digital Sony comum, acoplada ao helicóptero aeromodelo mostrado na Figura 1. O helicóptero é guiado remotamente, sobrevoando áreas de interesse para a aquisição de seqüên-

cias de vídeo, que são posteriormente quebradas em quadros que, finalmente processados, produzem o mosaico final.



Figura 1. Helicóptero Aeromodelo.

2. Trabalhos Relacionados

Neste trabalho, como são disponibilizadas apenas imagens aéreas de pequeno formato sem um maior controle, torna-se indispensável adaptar e/ou criar metodologias adequadas para trabalhar com este formato de imagem. Sistemas como o ArcView da ESRI, ERDAS da Leica Geosystem, Regeemy e Spring do INPE, entre outros permitem gerar mosaicos de qualidade, usando a técnica de registro em imagens aéreas de grande formato (BFAI).

Convém ressaltar que, por definição, imagens do tipo BFAI são controladas. Imagens controladas não apresentam distorções, como as geradas pelo processo usando câmera digital comum e pelas orientações do vôo, principalmente quando se obtêm imagens de escala grande. Ainda equipamentos que adquirem BFAI permitem gerar conhecimentos prévios, tais como de que forma e em que momento adquirir uma imagem. Desta maneira, as imagens de grande formato, controladas, podem possuir algumas distorções. Mas são mínimas e, em alguns casos consideradas livres de distorções e até mesmo já georreferenciadas, dependendo da aplicação. Isso facilita substancialmente o processo, o que não ocorre no tipo de dados que estamos tratando.

As imagens obtidas com câmeras digitais comuns têm o ângulo de abertura maior em relação às fotografias aéreas controladas ou às imagens de satélite, o que causa maior distorção radial e radiométrica.

Ainda devido à baixa altitude, geralmente necessita-se de inúmeras imagens a partir de diferentes pontos de vista, sendo que a projeção perspectiva caracteriza as imagens

dessas câmeras, em contraposição à projeção ortogonal, ou muito próxima desta, conseguida usando câmeras fotogramétricas ou imagens de satélite,

Notamos que o processo de mosaicamento será utilizado, justamente quando a área de estudo é maior que a imagem disponibilizada pela câmera, visando cobrir melhor a área de interesse. Além dos sistemas comerciais e outros acima citados, vimos na literatura alguns que projetos usam técnicas de registro de imagem para correção geométrica antes do processo de geração do mosaico [6, 17, 8, 7, 16].

As técnicas de registro de imagens propiciam corrigir pequenas distorções geométricas, presentes em imagens de grande formato, principalmente pela baixa resolução, mesmo com distorções irrelevantes, usando uma variedade de pontos de controle (pontos no terreno). Observamos que este modelo é diferente para as imagens de pequeno formato, cujos sistemas de aquisição não têm os mesmos requisitos.

No presente projeto, estaremos empregando SFAIs não controladas e com vários tipos de distorções e, o que complica mais, usaremos poucos pontos de controle devido à região de trabalho ser marinha, dificultando a sua aquisição. Observamos que o mosaico final é mais rico de detalhes, por usarmos imagens com escala maior, obtidas mais próximas da superfície terrestre. Por outro lado, projetos que utilizam BFAI permitem monitorar áreas maiores, apesar do custo de aquisição ser maior.

O Global Rain Forest Mapping Project (GRFM) [6] é um projeto gerenciado pela Agência Nacional de Desenvolvimento do Espaço do Japão (NASDA). Tem por objetivo gerar mosaicos georreferenciados a partir de BFAIs adquiridas por satélites. São aplicadas técnicas para correção radiométrica nas imagens, a fim de melhorar a qualidade e de não perder informações nas regiões de sobreposição do mosaico. O trabalho apresentado por Xiao e seus colaboradores [16] também se preocupa com problemas ocorridos devido à iluminação, criando um método que combina ruídos na busca de qualidade. O método criado por Albrecht e Michaelis [1] apresenta técnicas de estéreo-fotogrametria com melhorias na resolução espacial dos pares estereoscópicos, a fim de reduzir erros em regiões com relevo acentuado.

Já Nicolas [10] criou um método de mosaicamento, utilizando um critério de minimização analítica, para determinação de coeficientes baseados na variação temporal das imagens de fundo, com foco em corrigir distorções geométricas. Zomet [18] propõe novos métodos com melhores formas de correção geométrica de distorções resultantes da transformação 2D para 3D. Este projeto utiliza cálculos analíticos para resolução do problema, e a sua relação com o nosso projeto (NatalGIS) é a busca de disponibilizar informações confiáveis após correção das distorções.

Syuhei [12] descreve uma nova abordagem para o posicionamento de helicópteros aeromodelos operados de forma

autônoma. Métodos para obter a terceira dimensão e a altitude do helicóptero são realizados através de sensores, GPS (Global Positioning System), IMU (Inertial Measurement Unit) e imagens, que são utilizadas para permitir que o sistema de controle do helicóptero seja autônomo. Metodologias para a detecção de pontos no terreno são usadas para a solução do problema de posicionamento.

No trabalho em questão [12], o helicóptero aeromodelo não é utilizado para mapeamento da área ou para gerar mosaicos georreferenciados. Entretanto as técnicas utilizadas são interessantes para aplicações que podem usar helicóptero aeromodelo e para futuros trabalhos relacionados ao presente projeto.

3. Construção de mosaicos georreferenciados usando SFAIs

Como visto anteriormente, o processo de construção de mosaicos georreferenciados é dificultado pelo uso de imagens aéreas de pequeno formato (SFAI). Além disso, o ambiente escolhido (região marinha) para mapeamento neste projeto é muito dinâmico, sofrendo mudanças devido a vento, maré e iluminação (sol), aumentando a probabilidade de ocorrência de erros nas imagens. Também ocorrem variações de posição e orientação do helicóptero durante o voo, que podem gerar erros imprevisíveis. Outras distorções geodésicas, como as geradas pela curvatura da terra e a variação do relevo, são insignificantes neste projeto, podendo ser desprezadas. Porém distorções causadas pelos parâmetros intrínsecos da câmera digital usada, tais como a radial e radiométrica devem ser retiradas.

Gonçalves [5] esclarece que, no processo de cartografia tradicional, as condições de clima (vento, etc) e pilotagem não permitem que o avião mantenha sua altitude constante, bem como a velocidade e horizontalidade das asas. Esses, entre outros fatores, afetam a obtenção de um modelo "ideal" para a estéreo-fotogrametria. Ou seja, mesmo usando dados supostamente controlados (no caso tradicional), o que se obtém é um modelo mais ou menos próximo do ideal, com pequenas distorções. Isso se agrava ao usar dados não controlados, ou seja, imagem sem nenhum controle na sua aquisição como é o caso no presente trabalho.

As câmaras de pequeno formato podem produzir imagens instáveis em relação à iluminação e à geometria, não somente pelas distorções radial e radiométrica, mas também pela instabilidade do voo, frequente no helicóptero aeromodelo, no momento da aquisição de imagens. O fato de a câmera digital comum não se manter ortogonalmente à superfície terrestre é um outro problema que produz mais distorções. Desta forma, são obtidas várias imagens, em vista perspectiva, o que gera outras distorções geométricas na transformação da imagem de mundo (3D) para a imagem digital (2D).

O processo de criação do mosaico resume-se à realização das fases descritas a seguir: Calibração de câmera, correção das distorções radial e radiométrica, reconstrução a partir de estéreo-fotogrametria, geração do mosaico georreferenciado;

3.1. Calibração da câmera e correção da distorção radial e radiométrica

Quando se pretende obter informação tridimensional de uma cena ou objeto utilizando Visão Computacional, é geralmente necessário determinar um modelo matemático da câmera utilizada. No presente projeto, usamos o método Tsai [14] para a etapa de calibração de câmera. O método usa um esquema de transformação do sistema de coordenadas de mundo para o sistema de coordenadas de imagem. No método tradicional, são determinados 11 parâmetros, sendo 5 deles intrínsecos (f (distância focal), κ_1 (coeficiente de distorção radial da lente de 1ª ordem), C_x e C_y (coordenadas de centro de distorção radial da lente), S_x (fator de escala)) e 6 extrínsecos (R_x , R_y e R_z (ângulos de rotação para a transformação entre as coordenadas nos frames de mundo e de câmera), T_x , T_y e T_z (componentes de translação para a transformação entre as coordenadas nos frames de mundo e de câmera)) [14]. Além destes parâmetros, neste trabalho, determinamos também o coeficiente de distorção radial de 2ª ordem da lente, conhecido como κ_2 , para o processo de retirada de distorção radial e também o ângulo α (para retirada de distorção radiométrica, vista adiante). Após realizar a calibração da câmera, podemos corrigir a distorção radial (equação 1) e radiométrica (equação 2) usando as equações abaixo [13].

$$\begin{aligned} x &= x_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4), \\ y &= y_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4), \\ r &= \sqrt{x_d^2 + y_d^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

onde, x_d e y_d são pontos na imagem distorcida. A incógnita r é a distância do centro da imagem até o pixel. O κ_1 e κ_2 são os coeficientes de distorção descobertos na etapa de calibração de câmera.

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

Convém ressaltar que a iluminação na imagem P cresce o mesmo que a quarta potência do cosseno do ângulo formado entre o raio principal que chega a P e o eixo ótico. Em caso de pequena abertura, este efeito pode ser negligenciado; então, a irradiância na imagem pode ser entendida como uniformemente proporcional à radiância da cena sobre todo o plano da imagem [13].

3.2. Estéreo-Fotogrametria

Na aplicação em monitoramento ambiental, foco deste trabalho, temos recobrimento tanto longitudinal (pelo menos 70%) quanto lateral (pelo menos 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 possam ser 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* [9], e o denominaremos simplesmente de correspondência, sendo ele a etapa mais demorada e uma das mais estudadas em Visão Estéreo.

Em nossa aplicação, depois de determinadas as correspondências de todos os pixels das imagens, esta informação é 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. Essa 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 devidos ao processo de aquisição.

A correspondência entre as imagens pode ser feita por área [4] ou atributo [9]. Neste trabalho, a correspondência por área poderia ser usada com algumas simplificações observadas adiante. Esse 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) [2]. 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, que pode ser dada pela Equação 3:

$$r_{x,y} = \frac{n \sum(x_i y_i) - \sum(x_i) \sum(y_i)}{\sqrt{n \sum(x_i^2) - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum(y_i^2) - (\sum y_i)^2}}. \quad (3)$$

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 o número de pixels dessa janela.

3.3. Orientação Relativa

Uma simplificação adotada neste trabalho, com o objetivo de reduzir a complexidade do modelo acima, é considerar que o relevo da região é plano. Essa simplificação se

justifica pelo fato de ser uma região marinha com diferenças mínimas de nível do fundo (variando entre zero e dois metros), o que é desprezível em relação à altitude de voo.

Dessa maneira, distorções causadas pelo relevo podem ser desconsideradas. Isto simplifica substancialmente o processo de reconstrução, permitindo realizar a orientação relativa entre cada par de imagens, [15] usando 6 pontos apenas, não exigindo, portanto, que a correspondência estéreo, o gargalo do processo de reconstrução estéreo [9] seja determinada para todos os pixels de cada par de imagens. Mais especificamente, os princípios de estéreo-fotogrametria são empregados 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 da tomada de cada imagem. A posição aproximada do momento da tomada das imagens é dada pelo GPS de bordo, facilitando a determinação de uma primeira aproximação para os parâmetros de orientação exterior.

Com essas simplificações, com apenas 6 pares de pontos conhecidos (pontos de Von Grüber) em cada modelo (entre cada par de imagens), uma boa precisão pode ser conseguida na determinação de coeficientes das transformação que deverão retirar as distorções causadas pelo posicionamento e orientação não conhecidos do helicóptero. Dadas duas imagens da mesma cena, supondo-se uma à direita (r) e outra à esquerda (l) sendo p_l e p_r pixels nessas imagens, o que se deseja é determinar a transformação que leva os pixels de uma imagem p_r na outra p_l . A princípio, esta transformação envolve mais que uma transformação 2D, uma vez que os pontos homólogos são projeções de pontos 3D na cena.

3.4. Orientação Absoluta

Para o georreferenciamento em si (determinação de escala e referência à um sistema de coordenadas) são determinados a priori, na região a ser imageada, pontos de controle, cujas coordenadas são determinadas por GPS. Neste projeto, poucos pontos de apoio de campo serão determinados, o que dificulta o processo de georreferenciamento usando SFAI. Essa complexidade é existente por várias destas imagens não presenciarem os pontos previamente escolhidos no terreno. Usando técnicas de aerotriangulação [15], as coordenadas (Geográficas, UTM) conhecidas (dos Pontos de controle) são estendidas para os pontos determinados pelo processo de orientação relativa.

A partir desses, em caso de não assunção de um modelo de relevo plano, seria possível 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 [5]. Note que cada modelo (par de imagens) pode ser ligado ao posterior via uma das imagens 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. Esse erro pode ser minimizado através de outros cálculos, a partir de um outro ponto de terreno (Obtido pelo GPS) presente em uma outra imagem selecionada para o mosaico. Dessa forma, extrapolaríamos novamente as coordenadas das imagens.

A técnica tradicional de aerotriangulação é readaptada neste trabalho, usando mínimos quadrados, para minimizar erros no processo de determinação de coordenadas para os pontos de cada modelo. Ao final, obtêm-se, por uma técnica de ajuste de bloco, as coordenadas georreferenciadas de todos os pontos. Usando essas, podem-se determinar quais os coeficientes das transformações necessárias a serem aplicadas em cada imagem para geração do mosaico final.

4. Implementação

O sistema foi desenvolvido em C++, usando a biblioteca QT para criação de interfaces gráficas com o usuário. A estrutura geral do sistema é mostrado na Figura 2. Note que o módulo de calibração de câmera está localizado externo à região com linhas tracejadas. Isto ocorre devido ao processo de calibração de câmera ser realizado apenas uma vez, em que determina-se os parâmetros intrínsecos para correção da distorção radial e radiométrica.

Na fase de calibração, computamos todos parâmetros necessários usando método de Tsai, em que relaciona-se coordenadas do mundo com coordenadas da imagem. Assim, a correção radial e radiométrica foram realizadas aplicando a Equação 1 e a Equação 2, seguido por interpolação de pixels, resultando em uma imagem corrigida. Após a correção radial e radiométrica, a orientação relativa é determinada. Para calcular esta, definimos pontos homólogos entre pares estéreos e computamos as transformações de mapeamento de uma imagem em relação a outra através do método de mínimos quadrados. As transformações, contém translação, rotação e escala, em que estas operações são usadas para mapear os pixels correspondentes em diferentes imagens, então, estes são ajustados no mosaico final.

Para gerar mosaicos georreferenciados, precisamos executar a orientação absoluta, assim, obteremos coeficientes para realizar o processo de aero-triangulação e ajustar o mosaico com as coordenadas do mundo (terreno).

No módulo de correção geométrica, transformações afim (Equação 4) ou projetiva (Equação 5) são aplicadas (usando interpolação bilinear ou bicúbica). A transformação afim é formalizada a seguir:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 + A_1X' + A_2Y' \\ B_0 + B_1X' + B_2Y' \end{bmatrix} \quad (4)$$

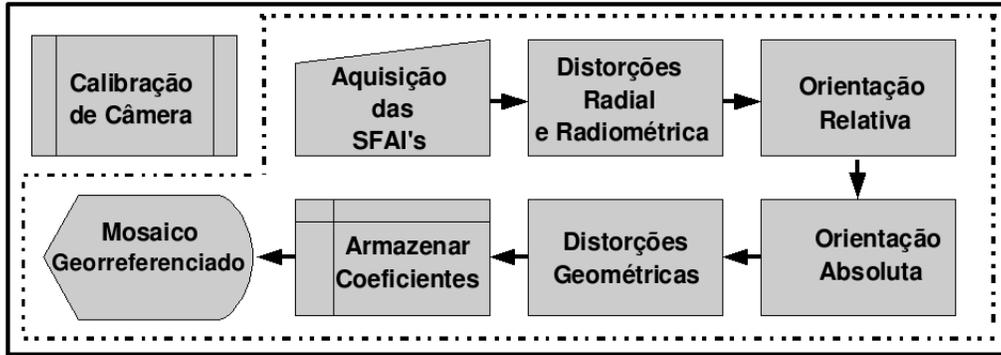


Figura 2. Estrutura do sistema.

onde $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2$ 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 serem 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 [11].

A transformação projetiva é dada por:

$$\begin{aligned} X' &= \left[\frac{a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}}{a_{31}X + a_{32}Y + 1} \right] \\ Y' &= \left[\frac{a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}}{a_{31}X + a_{32}Y + 1} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

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 [3].

A implementação dessas duas transformações é de suma importância para que possamos comparar os mosaicos gerados após as suas aplicações nas imagens. O objetivo é retirar distorções geométricas referentes às imagens que farão parte do mosaico, principalmente da área de sobreposição. No caso, distorções geradas pela variação da orientação do helicóptero aeromodelo na captação das imagens em pontos diferentes.

Essa diferença de resultados entre as transformações afim e projetiva pode ser justificadas, porque o paralelismo na transformação afim é mantido, enquanto que, na transformação projetiva pode não se manter. As duas transformações são semelhantes nos aspectos de posição, escala e forma. Esses itens são alterados na transformação da imagem. Contudo a colinearidade não é alterada.

5. Experimentos e Resultados

Com intuito de verificar nossa metodologia, primeiramente realizamos testes para validar os módulos do sistema

desenvolvido, passo a passo. Na Figura 3(a) mostra-se uma imagem aérea de pequeno formato obtida com a câmera digital comum acoplada ao helicóptero aeromodelo. Na Figura 3(b) é ilustrado a correção radial e radiométrica, obtida após aplicar a distorção "pincushion". É interessante ressaltar que esta correção foi realizada justamente com os coeficientes gerados no processo de calibração de câmera (Tsai). Nestes resultados pode observar-se uma sutil diferença geométrica e de iluminação, principalmente nas áreas colaterais da imagem.

Posteriormente, vários experimentos foram executados no processo de orientação relativa, usando ambas as transformações, e observamos visualmente que a transformação projetiva produziu mosaicos com melhor qualidade. Essa diferença de resultados entre as transformações afim e projetiva pode ser justificadas, porque o paralelismo na transformação afim é mantido, enquanto que, na transformação projetiva pode não se manter. As duas transformações são semelhantes nos aspectos de posição, escala e forma. Esses itens são alterados na transformação da imagem. Contudo a colinearidade não é alterada e essas informações são visíveis na figura 4.

Na Figura 4 é ilustrado o módulo de correção geométrica e orientação relativa, além dos resultados das transformações oriundas desse módulo. Pode ser observado que neste caso, as transformações foram geradas somente com a transformação projetiva, justamente pela geração de resultados melhores. Na Figura 5 é mostrado dois exemplos de mosaicos produzidos usando os mesmos módulos e as mesmas transformações. Finalmente, na Figura 6 ilustramos o resultado de um mosaico georreferenciado. Para este processo foi necessário conhecer as coordenadas geográficas dos pontos de controle (terreno) usando GPS. Assim, através de uma interface gráfica, o usuário insere estas informações, clicando nos pontos de controle planejados no mosaico (imagem) e associando com as coordenadas geográficas colhidas no terreno.

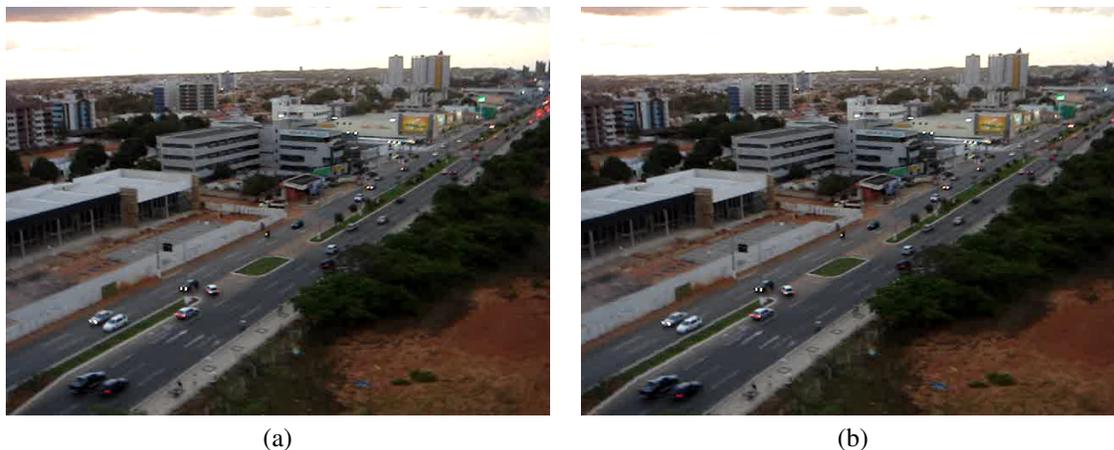


Figura 3. Imagem Original (a), e imagem corrigida da distorção "Pincushion" $\kappa_1 = -2$, $\kappa_2 = -0.025$ e $\alpha = 0.45$ (b)

6. Conclusão

Propomos, neste trabalho, um sistema completo para gerar mosaicos georreferenciados, usando imagens aéreas de pequeno formato, obtidas por uma filmadora digital comum acoplada a um helicóptero aeromodelo. Por meio de técnicas da estéreo-fotogrametria e da visão computacional, retiramos distorções, corrigimos as imagens visando a sua ortogonalização e construímos o mosaico final.

Então, com base em coordenadas de terreno (reais) de pontos de controle, previamente escolhidos, o georreferenciamento foi realizado. O mosaico final está, então, pronto para ser usado em um SIG, correntemente em desenvolvimento na UFRN.

Uma das principais contribuições do presente trabalho reside no fato de que esse tipo de imagem tem sido ainda muito pouco explorado na geração de mosaicos georreferenciados; especificando ainda mais, com o uso de um helicóptero aeromodelo não foi encontrado nenhum trabalho, talvez em função de uso de imagens de grande formato, e controladas (BFAI) ser geralmente a técnica adotada nos projetos de cartografia, solicitados pelos órgãos governamentais e empresas.

Note que o uso de BFAI encarece o mapeamento, principalmente em projetos como o nosso, onde um monitoramento constante da região de interesse é necessário. Ainda projetos dessa natureza em regiões costeiras, que implicam sobrevôos rotineiros, visando checar determinadas características, tornam-se factíveis com a nossa técnica.

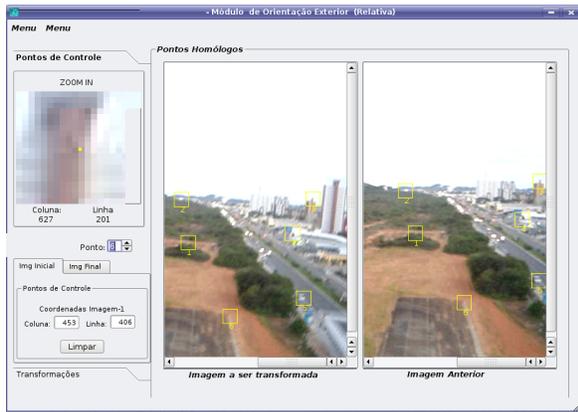
Assim, como principal contribuição, com a implementação dessas técnicas, mostramos ser possível desenvolver uma metodologia de baixíssimo custo, com o uso de um helicóptero aeromodelo e câmera digital comum, voltada a projetos de monitoramento ou a projetos onde a coleta de dados deve ser constante. No caso, uma câmera Sony sem

controle fotogramétrico foi usada.

Ainda como trabalho futuro, faremos mais alguns vôos na região dos Parrachos de Maracajaú, com o helicóptero já operacional (vários vôos experimentais já foram realizados em terra). Depois de adquiridos novos dados, estes servirão de base para a construção do mosaico e, conseqüentemente, a alimentação do SIG de monitoramento ambiental em desenvolvimento na UFRN.

Referências

- [1] P. Albrecht and B. Michaelis. Stereo photogrammetry with improved spatial resolution. In *Proceedings of the 14th International Conference on Pattern Recognition*, Otto-von-Guericke University Magdeburg Institute for Measurement Technology and Electronics P. O. Box 4120, D-39016 Magdeburg, Germany, 1998. IEEE Computer Society Washington, DC, USA.
- [2] D. Ballard and C. Brown. *Computer Vision*. Prattice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
- [3] L. Fonseca, E. Xavier, J. Alge, and E. Castejon. Implementação da transformação projetiva na terralib: uma análise comparativa com a transformação afim. In *XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, pages 6283–6290, Florianópolis/SC, 21-26 Abril 2007. INPE.
- [4] M. Galo. Automação dos processos de correspondência e orientação relativa em visão estéreo. Master's thesis, UNICAMP - Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, Dezembro 2003.
- [5] L. M. G. Gonçalves. *Reconstrução a partir de estéreo fotogrametria*. Rio de Janeiro - BRASIL, 1995.
- [6] G. Grandi, P. Mayaux, Y. Rauste, A. Rosenqvist, M. Simard, and S. Saatchi. The global rain forest mapping project jers-I radar mosaic of tropical africa: Development and product characterization aspects. *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), Setembro 2000.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4. Módulo de orientação relativa e correção geométrica (a), SFAI Original (Primeira) (b), SFAI Original (Segunda) (c), SFAI Original (Terceira) (d), SFAI Corrigida (Segunda) com transformação projetiva (e), SFAI Corrigida (Terceira) com transformação projetiva (f).



(a)



(b)

Figura 5. Mosaico com três SFAs da Figura 4 (a), Outro exemplo de mosaico com cinco SFAs (b).



(a)



(b)

Figura 6. Exemplo de mosaico com cinco SFAs (a), Mosaico da Figura (a) georeferenciado com pontos dado pelo GPS (Coordenadas Geográficas) (b).

- [7] S. Hsu. Geocoded terrestrial mosaics using pose sensors and videos registrations. In *ICCV. Proceedings. Eighth IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 834–841. IEEE Computer Society, Julho 2001.
- [8] M. Lhuillier, L. Quan, H. Shum, and H. Tsui. Relief mosaics by joint view triangulation. In *ICCV. Proceedings. Eighth IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 785–790. IEEE Computer Society Washington, DC, USA, Julho 2001.
- [9] D. Marr and T. Poggio. A computational theory of human stereo vision. In *PROC*, volume 204, pages 301–328. Royal Society Publishing, 1979.
- [10] H. Nicolas. New methods for dynamic mosaicking. *IEEE Transactions On Image Processing*, 10(9), Agosto 2001.
- [11] F. Nogueira. Geração automática de mapas de disparidade em visão estéreo. Master’s thesis, UNICAMP - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC, Campinas, SP, Abril 1998.
- [12] S. Syuhei, B. Yue, and M. Takahito. Autonomous flight control for rc helicopter using camera image. In *SICE*, Kagawa University, September 2007. IEEE Computer Society.
- [13] E. Trucco and A. Verri. *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1998.
- [14] R. Tsai. An efficient and accurate camera calibration technique for 3d machine vision. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 364–374, 1986.
- [15] P. Wolf. *Elements of Photogrammetry*. McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1983.
- [16] N. Xiao, Z. Wu, L. Xjao, Y. Tang, and W. Junma. Auto method for ambient light independet panorama mosaics. In *Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, pages 3851–3854. IEEE Computer Society, Agosto 2004.
- [17] Z. Zhu, A. Hanson, and E. Riseman. Parallel-perspective stereo mosaics. In *ICCV. Proceedings. Eighth IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 345–352, Department of Computer Science, University of Massachusetts at Amherst, MA 01003, Julho 2001. IEEE Computer Society.
- [18] D. Zomet. Generating mosaics with minimum distortions. In *Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW’04)*, School of Computer Science and Engineering - The Hebrew University of Jerusalem, Junho 2004. IEEE Computer Society.