

A Integração dos Módulos de Geração do Modelo Digital de Elevações e de Restituição Digital no Projeto E-FOTO

Marcelo Teixeira Silveira¹
Jorge Luís Nunes e Silva Brito²
Raul Queiroz Feitosa¹
Rafael Alves de Aguiar²
Irving da Silva Badolato²

¹ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio
Caixa Postal 38097 - 22451-900 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
{marts, Raul}@ele.puc-rio.br

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
20550-900 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
{jsilvabr, rafael.kamui, irvingbadolato}@gmail.com

Abstract. This paper presents the improvement and integration of Stereoplotter and Digital Elevation Model Generation (DEM) modules from E-FOTO project, which are responsible for the 3D reconstruction part in the photogrammetric process. The Stereoplotter module was developed aiming at digitizing 3D cartographic features from aerial stereopairs. In this module, the student can create, edit and save points, lines or polygons which will be used later in DEM module as break-lines. Some significant improvements were made in this module, like directly image zooming, maximizing the screen and the possibility of editing end fixing points. Moreover, several bugs were found and fixed. The DEM module was designed to generate the digital terrain model or digital surface model which can be performed by measuring points in a user pre-defined GRID or by the interpolation of 3D points measured previously in the Stereoplotter module. An additional image showing the 3D extracting results was added, therefore no 3D viewing engine was developed. Nevertheless, the results of 3D extraction can be exported to Octagon or Matlab for 3D viewing. In order to analyze the accuracy of E-FOTO 3D measuring, we performed a comparison between two sets of 3D points generated from 2D corresponding points from E-FOTO and from Erdas LPS 9.3. The results shown, at 99% of confidence level, that are no significant differences between both software platforms.

Palavras-chave: photogrammetry, fotogrametria, DSM, DEM, estéreo, 3D.

1. Introdução

O projeto E-FOTO tem como por objetivo a implementação de uma estação fotogramétrica digital educacional gratuita e livre, onde os usuários têm a possibilidade de ver em prática a fundamentação teórica e os conceitos fotogramétricos contidos numa solução de estação fotogramétrica digital. O projeto EFOTO teve início em 2002 no Instituto Militar de Engenharia (IME) e atingiu os objetivos planejados em maio de 2007, no Programa de Pós-graduação em Geomática da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), com a conclusão dos módulos previstos, a saber: (1) retificação; (2) orientação interior; (3) orientação exterior; (4) fototriangulação; (5) restituição digital; (6) normalização de estereogramas e; (7) geração do modelo numérico de elevações e ortorretificação.

O módulo de geração do modelo numérico de elevações tem por objetivos permitir ao estudante de fotogrametria entender os conceitos de interseção espacial, visão estereoscópica, modelo digital de elevações (MDE) ou de superfícies (MDS) e ortorretificação de imagens fotogramétricas digitais. É um procedimento seqüencial, onde se verifica o uso e a importância de cada processo citado. A diferença entre os termos MDS e MDE se justifica pelo fato do modelo digital gerado levar em consideração, ou não, os objetos e estruturas construídas pelo homem. Essas feições cartográficas representam descontinuidades na representação digital do relevo terrestre. Assim, o MDE não considera os objetos e estruturas feitos pelo homem; essas estruturas são levadas em consideração no MDS.

O módulo de restituição digital tem como objetivo a extração de feições cartográficas 3D, tais como pontos, linhas e polígonos, a partir de um par de imagens estereoscópicas. Essas feições poderão ser utilizadas no módulo de geração do modelo digital de elevações como linhas ou polígonos de quebra (“break-lines”).

Em trabalho anterior (Silveira et al, 2007), foi apresentada a fundamentação teórica sobre a visão e medição estereoscópicas utilizadas no módulo de geração do modelo digital de elevações, bem como técnicas de medição automática de pontos, que também servirão de referência para o módulo de restituição digital.

Este trabalho está estruturado em 4 seções, inclusive a presente introdução. Na seção 2 são abordados os conceitos envolvidos nos módulos abordados. A seção 3 apresenta e discute os resultados obtidos. A seção 4 apresenta as conclusões do trabalho.

2. Metodologia de Trabalho

Esta seção aborda os fundamentos teóricos envolvidos nos módulos de restituição fotogramétrica digital 3D do E-FOTO, como a reconstrução 3D e geração da orto-imagem e apresenta cada módulo com suas funcionalidades.

2.1 Reconstrução 3D e Geração da Orto-imagem

Para a reconstrução 3D de uma cena, é necessária a identificação de pontos homólogos na área de superposição do par de imagens (modelo estereoscópico), ou seja, dado um ponto em uma imagem de referência, o mesmo deverá ser identificado na outra imagem do par. Desta forma, tem-se um par de pontos homólogos e suas respectivas coordenadas no espaço-imagem. Através das equações de colinearidade, o par de pontos homólogos é projetado no espaço-objeto, obtendo-se assim um terno de coordenadas (X, Y, Z) nesse referencial. Quanto mais pontos homólogos forem identificados na cena, melhor será a representação dos objetos no espaço 3D. Os problemas e questões relacionadas à reconstrução 3D no ambiente E-FOTO podem ser observados pelo usuário durante a execução desse módulo. A figura 1 apresenta o fluxograma do processo de reconstrução 3D do projeto E-FOTO.

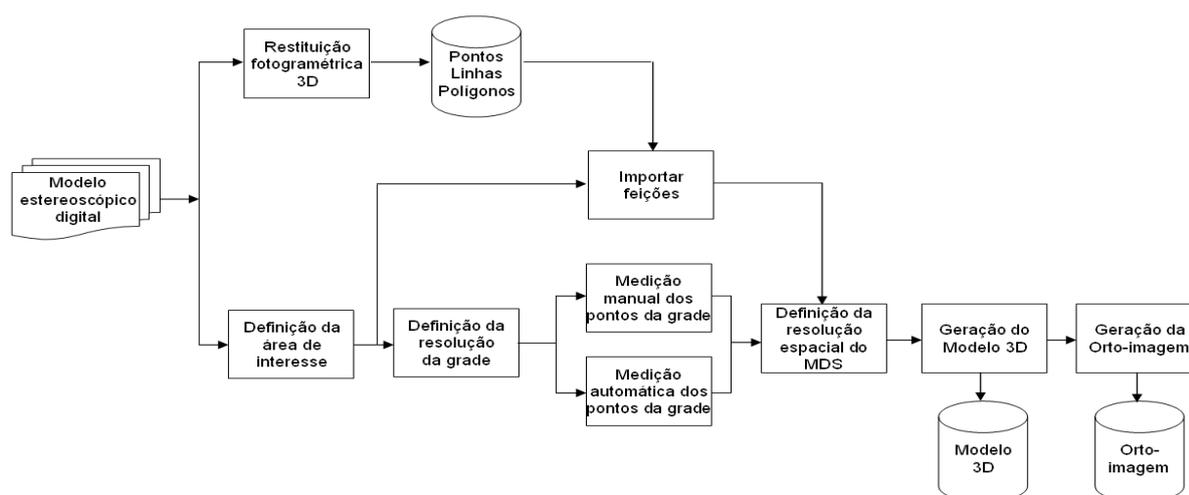


Figura 1. Fluxograma da reconstrução 3D e de da geração da orto-imagem no ambiente E-FOTO.

O usuário fornece como entrada do sistema um par estereoscópico de imagens fotogramétricas juntamente com dados do projeto, a saber: informações sobre os parâmetros

da câmara fotogramétrica utilizada e o valor dos parâmetros das orientações interior e exterior de cada uma das imagens do par estereoscópico.

Uma das formas de se fazer a medição de pontos homólogos é através da restituição estereoscópica 3D de feições, onde as feições cartográficas básicas utilizadas são: pontos, linhas e polígonos. A vantagem da medição de feições é a liberdade de escolha dos pontos no espaço-objeto, ao contrário da medição feita na grade regular. Os pontos e as linhas geralmente servem para a digitalização do terreno e os polígonos para as descontinuidades do terreno como prédios, casas, pontes, etc. Desta forma, os pontos e linhas serão utilizados na reconstrução 3D através de métodos de interpolação de superfície aplicados em uma nuvem de pontos 3D e os polígonos serão utilizados como injunções (“break-lines”) na reconstrução 3D.

Para a medição de pontos 3D, tanto da forma automática, quanto manual, primeiramente o usuário deverá delimitar a área de interesse para a reconstrução 3D no espaço objeto. Esta área de interesse é dividida em uma grade, cuja resolução é especificada a *priori*. Caso a medição de pontos homólogos seja manual, a resolução da grade não deverá ser alta, pois isto resultará em uma grande quantidade de pontos a serem medidos. Já medição automática é feita através do algoritmo de *Vertical Line Locus* (Gyer, 1981). Como ambas as medições são feitas sobre uma grade, onde os espaçamentos dos pontos são fixos no terreno, poderá haver locais onde ocorram oclusões. Desta forma, este modo de medição oferece uma maneira simples de se reconstruir o espaço 3D e apresenta ao usuário a opção de solução dos problemas inerentes à identificação automática de pontos homólogos.

Após a medição dos pontos da grade, aplica-se a interpolação bilinear nos pontos medidos, de forma a converter a resolução espacial da grade para uma resolução espacial maior, determinada pelo usuário. A partir do modelo 3D, é possível gerar a imagem ortoretificada.

2.2 O Módulo de Restituição Digital

Quando foi lançado na versão 0.0.5 do projeto E-FOTO, o módulo de restituição digital era capaz de realizar maioria das operações previstas. Porém, a interface inicial era simples e não dispunha de algumas funcionalidades como a expansão da imagem para tela cheia, ou a limitação da ferramenta de *zoom*, que era exibido em outra janela e limitado a 5 vezes o tamanho da imagem. Além disso, o programa apresentava algumas falhas de execução. Entretanto, os resultados obtidos eram suficientemente acurados.

Na nova versão implementada, a interface foi melhorada, de forma a ser mais clara e simples para o usuário. A janela pode ser expandida para a tela cheia, melhorando o campo visual de trabalho. A ferramenta de *zoom* foi modificada para funcionar diretamente na janela de trabalho e com diversos níveis. Além disso, a parte estrutural deste módulo foi melhorada, de forma a eliminar os problemas de execução antes observados. A figura 2 apresenta as versões antiga e nova do módulo de restituição digital do E-FOTO.

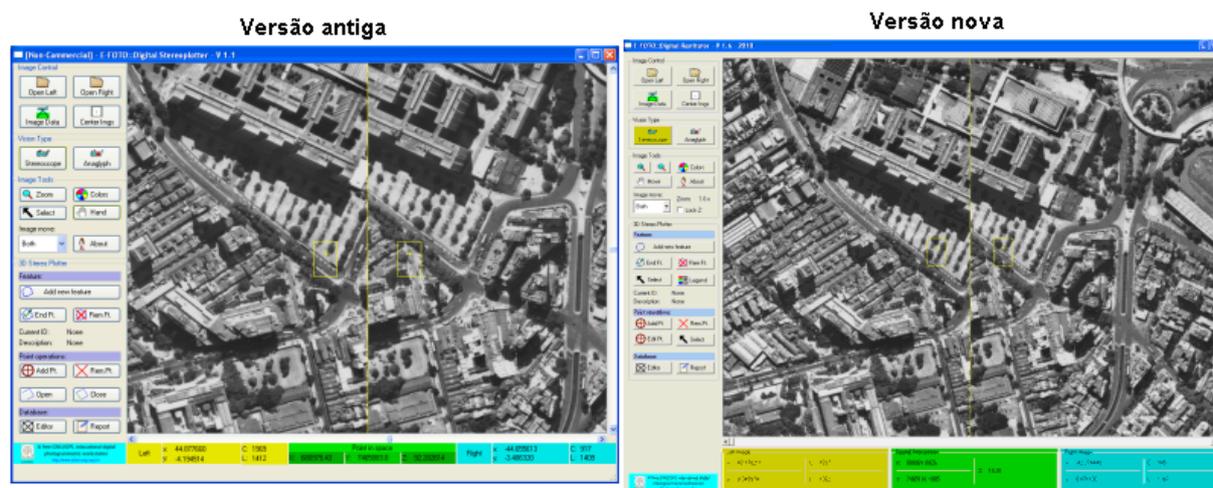


Figura 2. As versões antiga e nova do módulo de restituição digital do E-FOTO.

Nesta nova versão do módulo de restituição fotogramétrica 3D, o usuário fornece de entrada o par de imagens e um arquivo contendo os dados do projeto, conforme descrito na seção anterior. O primeiro passo é determinar o modo de visão estéreo a ser utilizado: separação espacial ou anaglifo. Em seguida, a digitalização das feições pode ser realizada. Para isso, deve-se escolher o tipo de feição utilizada e atribuir uma classe ao objeto que está sendo extraído, conforme mostra a tabela 1. A introdução de classes de objetos é uma novidade da nova versão do módulo de restituição digital.

Tabela 1. As classes disponíveis de acordo com a feição cartográfica.

Classe	Feição cartográfica
Ponto	Feições cuja geometria de representação seja um ponto.
Linha	Estrada pavimentada, Estrada rural, Trilha, Ferrovia, Rio e Ponte.
Polígono	Casa, Prédio, Industrial, Clube, Estação, Terreno, Praça, Parque, Floresta, Lagoa e Piscina.

A restituição fotogramétrica 3D é feita posicionando-se os pontos homólogos de um objeto sob as imagens das marcas estereoscópicas e adicionando-se os respectivos pontos. É possível editar os pontos e modificar medições já feitas ou até mesmo acrescentar ou eliminar pontos intermediários. Foi acrescentada também uma ferramenta de cálculo de atributos das linhas (comprimento) e polígonos (perímetro e área), tanto no espaço-imagem quanto no espaço-objeto. Os objetos digitalizados são exportados para um arquivo texto e poderão ser utilizados posteriormente no módulo de geração do modelo digital de elevações.

2.3 O Módulo de Geração do Modelo Digital de Elevações

O módulo de geração do modelo digital de elevações também foi lançado na versão 0.0.5 do E-FOTO. Assim como no módulo de restituição digital, apresentava uma interface simples, mas era capaz de fornecer resultados satisfatórios.

Na primeira versão, o usuário tinha a opção de delimitar uma área de interesse retangular no espaço-objeto com o objetivo de criar uma grade. Então, determinava o número de células desta grade e realizava a medição estereoscópica de cada ponto. Como a posição X,Y de cada célula é fixa, alguns pares de pontos podem aparecer em situações em que os pontos homólogos não podem ser determinados.

As primeiras versões também não eram capazes de importar os dados provenientes do módulo de restituição digital, limitando a capacidade de extração 3D do projeto E-FOTO. Na

nova versão do módulo de geração do modelo digital de elevações, é possível fazer a importação dos pontos medidos no módulo de restituição digital. Desta forma, pode-se fazer medições 3D em qualquer coordenada X, Y do terreno e, posteriormente, fazer a interpolação de superfícies para a geração de uma grade. Os modelos de interpolação utilizados são:

- Vizinho mais próximo;
- Médias móveis;
- Superfícies de tendência; e
- Superfícies móveis.

Para as feições do tipo polígono, é utilizado o mecanismo de *break-lines*, onde a grade é percorrida, e para cada ponto X, Y , é feita uma verificação se este ponto está ou não dentro de um polígono. Em caso afirmativo, substitui-se o valor de Z desta coordenada pelo valor da média dos pontos Z do polígono. Também é possível importar uma nuvem de pontos 3D obtidos através de algum método de correlação automática, como por exemplo, o *Least-Squares Matching* (LSM) (Grün, 1985).

Na versão corrente do módulo, foi acrescentada uma interface de extração 3D com a visualização dos dados importados e os resultados obtidos da extração 3D e da ortoretificação, conforme se pode observar na figura 3. Após a extração 3D, é possível exportar os resultados para a visualização 3D no formato dos *softwares* Matlab e GNU-Octave.

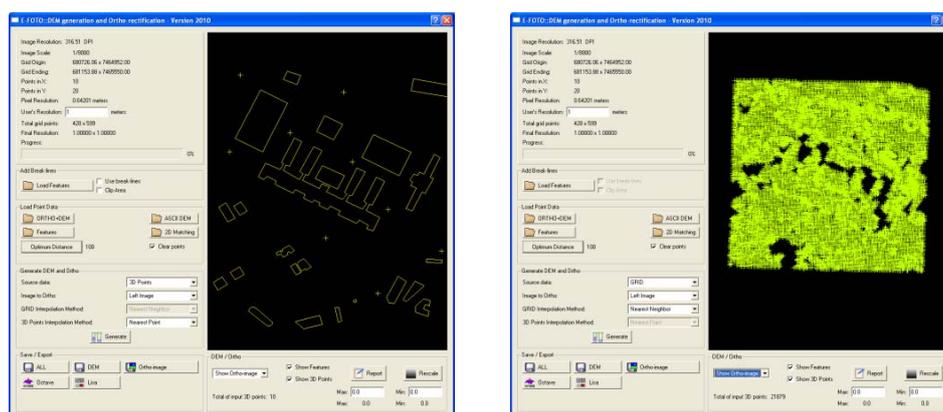


Figura 3. Interface de extração 3D do módulo de geração do modelo digital de elevações do E-FOTO. À esquerda, importação de dados do restituidor digital. À direita, importação de pontos obtidos através do método medição automática *Least-Squares Matching* (Grün, 1985).

3. Resultados e Discussão

Esta seção tem como objetivo apresentar os resultados obtidos através do uso dos módulos de restituição digital e de geração do modelo digital de elevações do projeto E-FOTO, bem como fazer uma comparação dos resultados da extração 3D desses módulos com uma plataforma fotogramétrica comercial confiável. Esta seção está dividida em duas partes: a primeira apresenta os resultados obtidos com a utilização dos módulos e a segunda realiza uma medida de confiabilidade da extração 3D a partir do E-FOTO, comparando dois conjuntos de pontos entre a estação E-FOTO e a estação comercial LPS 9.3 da empresa Leica Geosystems.

3.1 Extração 3D a partir dos módulos do E-FOTO

Um experimento foi realizado a partir de um par de imagens fotogramétricas aéreas de uma área da cidade do Rio de Janeiro. O par possui escala de 1/8000, resolução espacial de

0,6 metros e distância focal de 153,528 mm. Este par também será utilizado na parte experimental de medida de confiabilidade da extração 3D, sendo identificado como *par 1* na tabela 2.

O objetivo deste experimento é a geração do modelo digital de superfícies e a orto-imagem através dos módulos de restituição digital e geração do modelo digital de elevações.

O experimento envolveu os seguintes passos:

- Medição de um conjunto de pontos 3D e extração de feições de edificações no módulo de restituição digital; e
- Criação da área de interesse, definição da resolução espacial e geração do modelo digital de superfícies e da orto-imagem no módulo de geração do modelo digital de elevações.

Na primeira etapa, foram medidos 10 pontos dispersos na área de interesse de forma a modelar o terreno. Em seguida, foram medidos 23 polígonos que representam edificações. Ambas as medições foram feitas no módulo de restituição fotogramétrica digital do E-FOTO, em sua versão 2.5. Os pontos medidos no terreno podem ser vistos em branco na figura 4 à esquerda. Já os polígonos representando as edificações podem ser vistos em azul na figura 4 à direita.



Figura 4. Medição de pontos no terreno, à esquerda. Medição de edificações, à direita.

Para cada ponto medido, o programa fornece as coordenadas no espaço imagem e no espaço objeto. Além disso, é possível calcular o comprimento das linhas e o perímetro e a área dos polígonos digitalizados. A digitalização foi salva em arquivo para posterior uso no módulo de geração do modelo digital de elevações.

No experimento, utilizou-se a resolução de 1 metro para a geração do MDS e da orto-imagem. No passo seguinte, determina-se o modelo de interpolação de superfícies. O modelo utilizado foi o de superfícies de tendência com polinômio de segundo grau. A figura 5 apresenta os resultados obtidos na geração da orto-imagem e do MDS no ambiente E-FOTO.

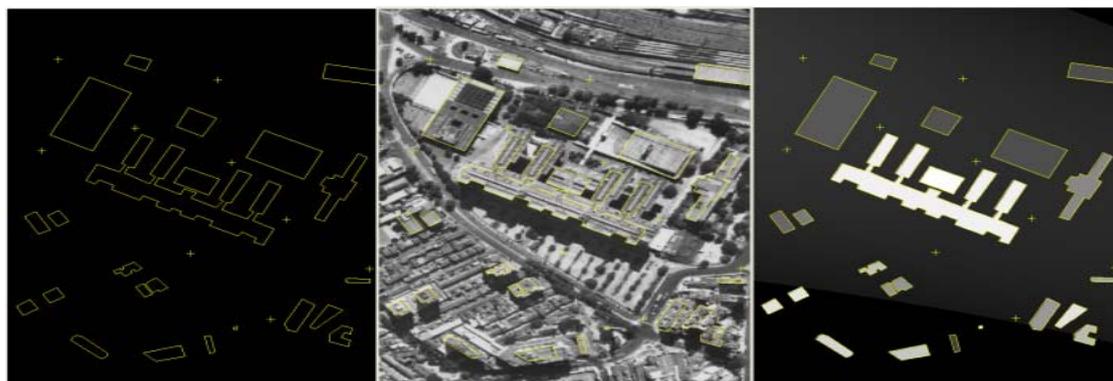


Figura 5. Resultados da extração 3D no E-FOTO. À esquerda, os pontos e polígonos medidos no módulo de restituição. No centro, a orto-imagem gerada. À direita o modelo digital de superfícies gerado.

O resultado da extração 3D pode ser exportado para ser visualizado em outras ferramentas como, por exemplo, o GNU-Octave e o Matlab. A figura 6 apresenta a visualização dos resultados da extração em 3D, utilizando-se um *plug-in* de visualização 3D presente na estação fotogramétrica System BLUH da Universidade de Hannover (Linder, 2006).

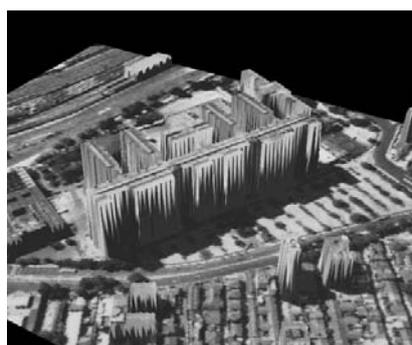


Figura 6. Resultado da extração 3D a partir dos módulos do E-FOTO, visto em 3D, utilizando-se o *plug-in* de visualização 3D da estação fotogramétrica System BLUH.

3.2 Medida de confiabilidade da extração 3D

Para a medição de confiabilidade da extração 3D dos módulos de restituição digital e geração do modelo digital de elevações do projeto E-FOTO, foram utilizados dois pares fotogramétricos aéreos de áreas sobre a cidade do Rio de Janeiro, com as características descritas na tabela 2.

Tabela 2. Característica dos pares fotogramétricos utilizados na medida de confiabilidade.

Par 1		Par 2	
Escala	1/8000	Escala	1/8000
Resolução espacial	0,6 metros	Resolução espacial	0,3 metros
Distância focal	153,528 mm	Distância focal	301,387 mm
Tipo	Urbana	Tipo	Urbana

Para cada par foi aplicado o método de *Least-Squares Matching* (Grün, 1985) com crescimento de regiões, utilizando-se o programa DPCOR da estação fotogramétrica BLUH System, obtendo-se um conjunto de pares de pontos homólogos. Então, foi utilizado o algoritmo de interseção espacial implementado no projeto E-FOTO, descrito em detalhes em (Silveira, 2007; Brito e Coelho, 2007), de forma a se obter um conjunto de pontos 3D.

Procedimento semelhante foi realizado no LPS, onde os pares de pontos foram importados, ajustados para o tipo “none” e calculados como “tie points” na etapa de triangulação, obtendo-se os pontos 3D. Por fim, foram comparadas as diferenças das posições X, Y e Z de cada ponto.

Foram utilizados 21.829 pares de pontos homólogos para o *Par 1* e 23.859 pontos para o *Par 2*. Os resultados das diferenças da reconstrução 3D entre o E-FOTO e o LPS podem ser observados na tabela 3, que apresenta a média e o desvio padrão das diferenças dos pontos para cada coordenada.

Tabela 3. Comparação da extração 3D realizada no E-FOTO e no Erdas/LPS.

<i>Par 1</i>				<i>Par 2</i>			
	X	Y	Z		X	Y	Z
Média (m)	0,025	0,050	0,063	Média (m)	0,003	0,005	0,16
Desvio Padrão (m)	0,016	0,013	0,058	Desvio Padrão (m)	0,002	0,005	0,02

Foi aplicado o teste Qui-quadrado sobre os resultados. Este teste permitiu concluir-se que os valores medidos em ambas as plataformas de software podem ser considerados iguais, em nível de 99% de confiança. Assim, conclui-se que a extração 3D realizada pelo E-FOTO é suficientemente acurada.

4. Conclusões

Os módulos de geração do modelo digital de elevações e de restituição fotogramétrica digital do E-FOTO foram integrados e atualizados de forma a prover uma ferramenta livre e de qualidade aos estudantes de fotogrametria, permitindo lhes por em prática os conceitos aprendidos em sala de aula e observar as questões que envolvem a questão de reconstrução 3D, onde diversas pesquisas sobre o assunto encontram-se em desenvolvimento. Através da análise dos pontos de teste, foi constatada a acurácia do cálculo das coordenadas 3D feitas por ambos os módulos, garantindo assim a confiabilidade das medições fotogramétricas 3D no ambiente E-FOTO.

Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem ao CNPq pelo apoio dado na pesquisa e ao Instituto Pereira Passos pelas imagens fotogramétricas cedidas para a realização dos experimentos.

Referências Bibliográficas

Brito, J.L.N.S; Coelho, L. C.T. Fotogrametria Digital. Ed. UERJ, 196 p., 2007.

E-FOTO, Uma Estação Fotogramétrica Digital Educacional Livre. Disponível em: <<http://www.efoto.eng.uerj.br/>>. Acesso em 9 set. 2010.

Grün, A. Adaptive Least-Squares Correlation: a Powerful Image Matching Technique. South Africa Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, p. 175-187, 1985.

Gyer, M. Automated Stereo Photogrammetric Terrain Elevation Extraction. Tech. Report, Gyer and Saliba Inc., 1981.

Linder, W. Digital Photogrammetry a Practical Course. 2.ed. Berlin: Springer, 2006, 221 p.

Silveira, M.T. et al. Geração do Modelo Digital de Elevações e Orto-retificação: A Experiência do Projeto E-FOTO. XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.