

Utilização de VANT para geração de ortomosaicos e aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)

Cristiano Alves da Silva¹
Cynthia Romariz Duarte²
Michael Vandesteem Silva Souto²
José Antonio Beltrão Sabadia²

¹ Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM
Rua Dr. José Lourenço 905 – 60115-280 – Fortaleza - CE, Brasil
cristiano.silva@dnpm.gov.br

² Universidade Federal do Ceará – UFC
Pós-Graduação em Geologia - Bloco 912 – 60455-760 – Fortaleza - CE, Brasil
{cynthia.duarte; michael.souto; sabadia}@ufc.br

Abstract. This paper show the methodology used by DNPM to generate orthomosaics using UAVs (Unmanned Aerial Vehicle), and evaluation of standard cartographic accuracy of the products obtained with small non metric camera format. The UAV used in this study was developed by UNB (University of Brasília), in partnership with the DNPM. It has 1,90m wingspan, payload of 700g and autonomy 45min, one of the few aircraft of this kind that has the ANAC - National Agency of Civil Aviation authorization to operate. This study evaluated an orthomosaic of one tailing's pile of laminated limestone, with very irregular surface, with elevations ranging between 486 and 535m above sea level and covering approximately 3ha of area in the Santana do Cariri's municipality, Ceará State/Brazil. For a better understanding of the reliability of the data generated by the UAV, orthomosaics the same flight, with and without ground control points were assessed. To assess the geometric quality and apply the standard of cartographic accuracy of the method of hypothesis tests based on analysis of trends and precision was used. The obtained results showed that even without the use of support points, obtained by the UAV's orthomosaic, presents the geometry of their consistent features, but shifted components in East and North. Already when orthomosaics are generated using ground control points, they present high quality geometric and cartographic accuracy. Overall, all results were satisfactory for the use of this tool in the DNPM's inspections, because, not always, are necessary images obtained with high precision positional.

Palavras-chave: positional accuracy, UAV, standard cartographic accuracy, exatidão posicional, VANT, padrão de exatidão cartográfica.

1. Introdução

O Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), com o objetivo de maximizar suas ações de fiscalização e gestão da mineração, firmou parceria com a Universidade de Brasília (UnB) para desenvolvimento de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) de pequenas dimensões, para geração de ortomosaicos e modelos de elevação, capaz de operar em situações restritas para pouso e decolagem.

Para alcançar tal objetivo, a UnB desenvolveu uma aeronave remotamente pilotada batizada de μ VANT (Figura 1) com: 1,90m de envergadura, velocidade de cruzeiro de 60km/h, capacidade de carga paga (*payload*) de 700g, peso total de 2,5kg, motor elétrico *brushless*, capacidade de operar a uma distância de até 4km da base, bateria de LiPo de 4 células, 14.8v e 5.000mAh, autonomia de 45 minutos, tempo suficiente para percorrer até 20km de linhas de voo, recobrando cerca 2km²



Figura 1. μ VANT desenvolvido pela UnB.

por voo, voando a 200m de altura e com área de recobrimento lateral das fotos de 60%.

Para captura das aerofotos foi utilizada uma câmera digital não métrica *Sony Cyber-shot*, modelo DSC-RX100 de 20,2 megapixels (5472 x 3648px), sensor CMOS de 13,2 x 8,8mm, distância focal de 10,4mm e abertura f/1,8, com estabilização óptica, velocidade de obturação máxima de 0,0005s, pesando 213g com bateria e cartão de memória.

O μ VANT recebeu da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) em 2013 o Certificado de Autorização de Voo Experimental (CAVE). Desde então, o DNPM vem realizado várias etapas de campo nas mais diversas áreas de mineração, em todas as regiões do Brasil.

De posse dos dados obtidos em campo, surge a necessidade de avaliar a qualidade geométrica dos dados geográficos gerados. Tal ação é fundamental para estabelecer as aplicações desta ferramenta, ciente de suas potencialidades e restrições.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo principal demonstrar a metodologia utilizada pelo DNPM para geração de ortomosaicos utilizando VANT e a avaliação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) dos produtos obtidos, com câmera de pequeno formato não métrica.

Os ensaios de campo foram realizados pelo DNPM em parceria com a Universidade Federal do Ceará (UFC) em uma área de extração de calcário laminado (explorado para fabricação de lajotas *in natura* comercializado com o nome de “Pedra Cariri”), localizada geologicamente na Bacia do Araripe, no município de Santana do Cariri, porção Sul do Estado do Ceará, próxima do Sopé da Chapada do Araripe, dentro dos limites do Geopark Araripe (Figura 2).

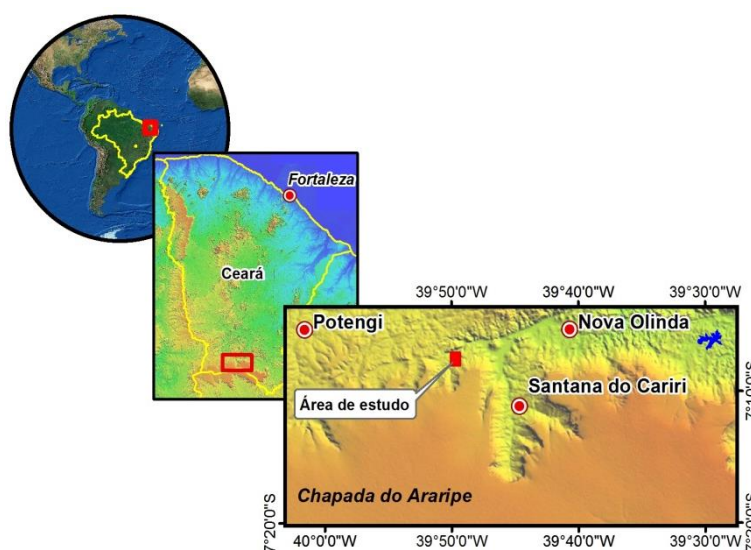


Figura 2. Localização da área de estudo

Para alcançar o objetivo proposto, foi realizada uma pré-sinalização (marcação artificial no terreno possível de ser identificada na fotografia aérea) e georreferenciamento dos marcos com utilização de receptor GNSS de dupla frequência L1/L2. Tais marcos foram utilizados como pontos de apoio para a aerotriangulação e como referência para avaliação da qualidade geométrica e aplicação do PEC.

Neste estudo de caso, foi avaliado o ortomosaico de um voo realizado a 100m de altura em relação base, com resolução espacial de 0,02m, em três situações distintas: (1) sem pontos de apoio; (2) com 5 pontos de apoio; (3) com 10 pontos de apoio. Os cálculos para determinar a qualidade geométrica e aplicação do PEC foram realizados a partir de outros 10 marcos de referência pré-sinalizados na área de estudo.

A aplicação do PEC foi realizada conforme as disposições do Decreto-Lei n°. 89.817/84. Entretanto, Santos (2009) apresenta três métodos distintos para aplicação do PEC, considerando as disposições do Decreto-Lei, por meio: (1) do desvio padrão da amostra; (2) da porcentagem da amostra; (3) de testes de hipóteses. Isto ocorre já que o Decreto-Lei não define uma metodologia específica para sua aplicação.

Sendo assim, neste estudo de caso, foi utilizado o método de testes de hipóteses baseado na análise de tendências e precisão do produto. Segundo Galo & Camargo (1994) os testes

específicos para esse tipo de análise, são realizados através da detecção de tendências, baseada na distribuição *t de Student*, identificando a existência de erros sistemáticos, e a análise de precisão baseada na distribuição *Qui-quadrado*. Ambos os testes com nível de significância de 90%.

2. Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho esta dividida em quatro etapas, ilustrada na Figura 3 e descrita em detalhe na sequência.

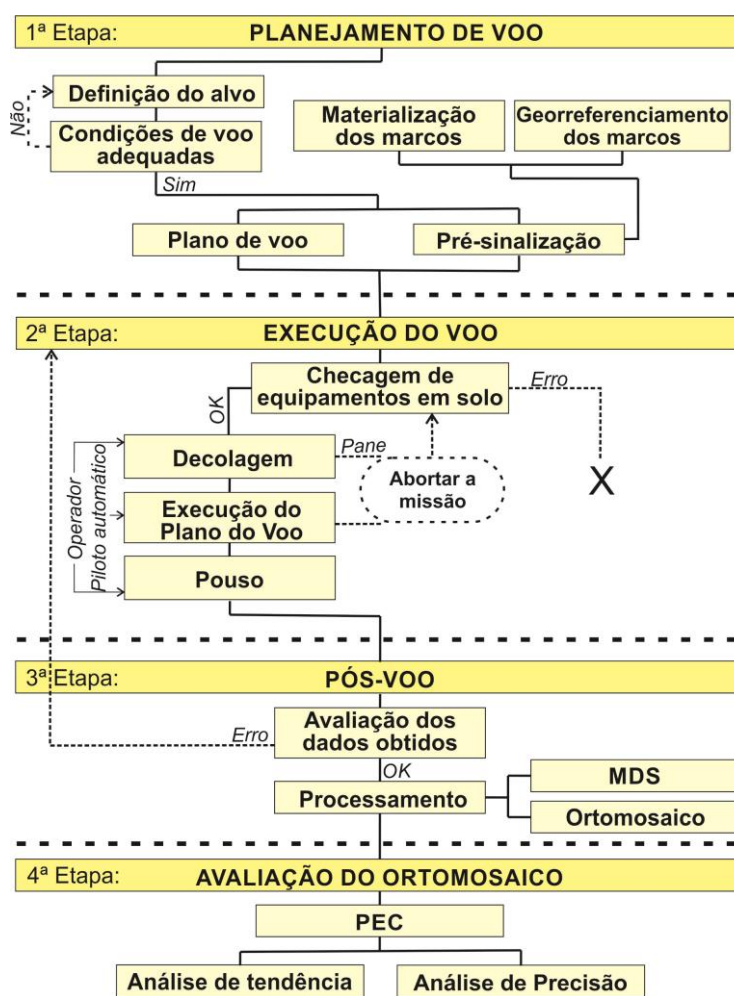


Figura 3. Fluxograma da metodologia empregada pelo DNPM para aquisição e avaliação dos dados gerados pelo μ VANT.

2.1. Planejamento de voo

Nesta etapa foi definido o alvo sobrevoado, neste estudo de caso, uma pilha de rejeito de exploração de calcário laminado, de superfície muito irregular, com cotas variando entre 486 e 535m de altitude, recobrando uma área de aproximadamente 3ha no município de Santana do Cariri/CE.

O próximo passo consistiu em verificar as condições necessárias para realização do voo, tais como fatores meteorológicos (vento e chuva), assim como autorização de voo das autoridades competentes. A autorização de voo se deu por meio da solicitação de um NOTAM (acrônimo de "Notice to Airmen", que significa "Aviso aos Aeronavegantes") ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), órgão ligado a Aeronáutica. O objetivo deste documento foi estabelecer um espaço aéreo segregado para operação do

μ VANT, ficando proibida a operação em espaço aéreo compartilhado com aeronaves tripuladas, garantindo a segurança da navegação aérea.

Com todas as condições de voo adequadas, foi realizado o plano voo, a ser executado pelo piloto automático do μ VANT, e a pré-sinalização da área do sobrevoo, que consistiu em materializar em campo uma marcação artificial no terreno possível de ser identificada nas fotografias aéreas.

De acordo Costa (2012) o objetivo mais comum para os pontos foto-identificáveis pré-sinalizados é proporcionar medições mais precisas das coordenadas dos pontos de apoio necessários na fototriangulação. Então, foram pré-sinalizados, com tinta *spray* vermelha, em uma área de 3,24ha, 20 marcos de 50cm x 50cm de dimensão. Do total de marcos feitos, 10 foram usados como pontos de apoio para orientação do ortomosaico e 10 como pontos de referência para realizar a análise de tendência e precisão.

Todos os marcos foram georreferenciados com receptor GNSS de dupla frequência L1/L2, obtendo erro milimétrico, atendendo o requisito proposto por Merchant (1982) *apud* Itame (2001), que diz que a precisão requerida para os pontos de verificação deve ser melhor que a terça parte do erro padrão do documento a ser analisado.

2.2. Execução do voo

Esta etapa inicia com a checagem dos equipamentos em solo, na hipótese de detecção de algum problema, por medida de segurança, a operação é cancelada.

A decolagem é feita através de lançamento manual. Isto descarta a necessidade de pista, dando maior mobilidade para operações em locais de difícil acesso.

Ao atingir a altura de voo estabelecida no planejamento, o operador aciona o piloto automático, que imediatamente irá executar o plano de voo elaborado na etapa anterior. Vale salientar que durante esta fase o μ VANT opera de forma automática, mas não autônoma, sendo possível a intervenção do operador a qualquer momento.

Toda a operação do μ VANT foi controlada pela base de solo, que recebe em tempo real o vídeo da câmera frontal e os dados de telemetria (altitude, velocidade, localização, número de satélites captados pelo GPS e carga da bateria), conforme pode ser observado na Figura 4.

O μ VANT está equipado com equipamentos de segurança, como a função de retorno para a base ou RTH (do inglês *returning to home*), acionada em caso de perda de sinal da base; e de um localizador via satélite que permite encontrar o equipamento, em caso de pane em que o avião não consiga retornar.

A função RTH também é acionada automaticamente quando o plano de voo é finalizado, fazendo com que a aeronave retorne e realize voo em círculo sobre a base até que o operador assumo o comando e realize o procedimento de pouso.

As características do voo realizado para este estudo de caso podem ser observadas na Tabela 1.

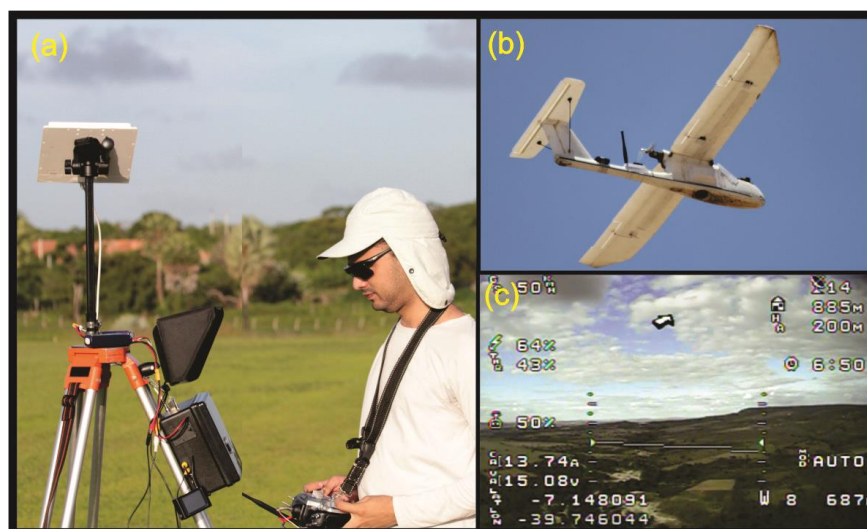


Figura 4. (a) base de solo; (b) μ VANT; (c) vídeo recebido na base de solo da câmera frontal da aeronave.

Tabela 1. Características do voo realizado

<i>Características do Voo</i>	<i>Valores observados</i>
Altura do voo em relação à base	100m
Velocidade média	60km/h
Distância percorrida	4km
Número de linhas de voo	5
Maior distância da base	500m
Área sobrevoada	29,7ha
Área de interesse	3,24ha
Intervalo de tomada das fotografias	2 seg
Número de fotografias	177
Recobrimento frontal	80%*
Recobrimento lateral	60%*
Resolução espacial	0,02m

* Recobrimento médio, variando de acordo com as condições de vento.

2.3. Pós-voo

Finalizada a etapa de execução do voo é feita uma avaliação dos dados coletados, (fotografias e *track* do GPS). No tocante as fotografias, é verificada a qualidade da imagem quanto ao contraste e nitidez. No caso do *track*, se toda a trilha do voo foi gravada sem interrupções e se durante o voo, devido ao vento, o μ VANT não se distanciou em demasia da linha planejada, causando perda no recobrimento lateral das fotografias.

De posse dos dados de voo inicia-se a fase de processamento para geração do ortomosaico e do Modelo Digital de Superfície (MDS). Para tanto foi utilizado o *software* Agisoft Photoscan, solução baseada na tecnologia de reconstrução 3D *multi-view*.

As cinco etapas básicas do processamento com o Photoscan são: (1) calibração automática da câmera – com base nos dados do EXIF das fotografias; (2) alinhamento das fotos – a partir dos pontos em comum entre as fotografias; (3) geração da nuvem de pontos – com base nas posições estimadas das fotografias são identificadas as coordenadas x, y e z; (4) criação de um MDS de malha triangular – usando a nuvem de pontos como nós, é gerada uma estrutura do tipo vetorial com topologia do tipo nó-arco que representa a superfície através de um conjunto de faces triangulares interligadas; (5) geração do ortomosaico – gerado a partir da texturização da geometria construída pela malha triangular.

2.4. Avaliação do Ortomosaico

A avaliação do ortomosaico foi realizada por meio da aplicação do PEC, segundo o Decreto-Lei nº. 89.817/84, utilizando o método proposto por Galo & Camargo (1994) de testes de hipóteses, baseado na análise de tendências e precisão. Sendo este um dos métodos mais completos dentre os existentes na literatura, pois além de avaliar o PEC, avalia também se no produto cartográfico existe alguma tendência nas componentes das coordenadas, indicando a existência de erros sistemáticos.

Análise de tendência

Baseada na distribuição *t de Student* consiste no teste de detecção de tendências com nível de significância de 90%, indicando a existência de erros sistemáticos.

A análise de tendência é realizada com base nas discrepâncias entre as coordenadas observadas e as coordenadas de referência (Equação 1), de onde obtêm-se as estatísticas como média (Equação 2) e desvio padrão (Equação 3), sendo n o número de elementos da amostra.

$$\Delta X = (X_o - X_r) \quad \text{e} \quad \Delta Y = (Y_o - Y_r) \quad (1)$$

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X \quad \text{e} \quad \overline{\Delta Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Y \quad (2)$$

$$S_{\Delta X} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta X - \overline{\Delta X})^2} \quad \text{e} \quad S_{\Delta Y} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta Y - \overline{\Delta Y})^2} \quad (3)$$

Sendo avaliadas para o teste de tendência as hipóteses: H_0 : Se $\overline{\Delta X} = 0$, então X não é tendencioso, contra, H_1 : Se $\overline{\Delta X} \neq 0$, então X é tendencioso; e H_0 : Se $\overline{\Delta Y} = 0$, então Y não é tendencioso, contra, H_1 : Se $\overline{\Delta Y} \neq 0$, então Y é tendencioso.

A partir do número de pontos de referência utilizados na análise, obtém-se o valor limite tabelado $t_{n-1, \alpha/2}$. Se o valor do teste *t de Student* calculado (Equação 4) for inferior ao tabelado, atendendo a Equação 5 para as componentes X e Y , podemos afirmar que o ortomosaico está livre de erros sistemáticos.

$$t_X = \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta X}} \sqrt{n} \quad \text{e} \quad t_Y = \frac{\overline{\Delta Y}}{S_{\Delta Y}} \sqrt{n} \quad (4)$$

$$|t_{calc}| < t_{n-1, \alpha/2} \quad (5)$$

Análise de precisão

A análise de precisão foi realizada utilizando o teste *Qui-quadrado*, com nível de significância de 90%, obedecendo aos valores do Erro Padrão (EP), determinados no Decreto-Lei nº. 87.817/84, que estabelece três classes quanto à precisão (Tabela 2).

Tabela 2. Valores do PEC e do EP planimétrico de acordo com o Decreto-Lei nº. 89.817/1984.

Classe	PEC	EP
A	0.5mm x escala	0.3mm x escala
B	0.8mm x escala	0.5mm x escala
C	1.0mm x escala	0.6mm x escala

Para realizar o teste *Qui-quadrado* inicialmente calcula-se o erro padrão esperado (σ) de cada componente, conforme a Equação 6.

$$\sigma_Y = \sigma_X = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

Posteriormente aplica-se um teste de hipótese, comparando-se o desvio-padrão das discrepâncias com o EP esperado para a classe do PEC a qual se deseja testar, $H_0: S_{\Delta X}^2 = \sigma_X^2$, contra, $H_1: S_{\Delta X}^2 > \sigma_X^2$; e $H_0: S_{\Delta Y}^2 = \sigma_Y^2$, contra, $H_1: S_{\Delta Y}^2 > \sigma_Y^2$.

Para atender a precisão de uma determinada classe (A, B ou C) o valor do teste *Qui-quadrado* calculado (χ_X^2 e χ_Y^2), conforme a Equação 7, deve ser inferior ao teste *Qui-quadrado* tabelado $\chi_{n-1, \alpha}^2$, de acordo com a Equação 8.

$$\chi_X^2 = (n-1) \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} \quad \text{e} \quad \chi_Y^2 = (n-1) \frac{S_{\Delta Y}^2}{\sigma_Y^2} \quad (7)$$

Onde n é o tamanho da amostra, s o desvio padrão das discrepâncias e σ_0^2 é o EP esperado para a classe do PEC, a qual se deseja testar pelo Decreto-Lei nº. 89.817/84.

$$\chi_X^2 \leq \chi_{(n-1, \alpha)}^2 \quad \text{e} \quad \chi_Y^2 \leq \chi_{(n-1, \alpha)}^2 \quad (8)$$

3. Resultados e Discussão

Para uma melhor compreensão da confiabilidade dos dados gerados pelo μ VANT, foram avaliados três ortomosaicos do mesmo voo, mudando apenas a quantidade de pontos de apoio utilizados no processamento, sendo eles:

- **Ortomosaico I:** gerado sem pontos de apoio, utilizando como referência apenas os dados do GPS de navegação embarcado na aeronave;
- **Ortomosaico II:** elaborado utilizando 5 pontos de apoio;
- **Ortomosaico III:** utilizando 10 pontos de apoio.

Todos os ortomosaicos foram avaliados com base em outros 10 pontos de referência pré-sinalizados, distintos dos utilizados para correção dos ortomosaicos (Figura 5).

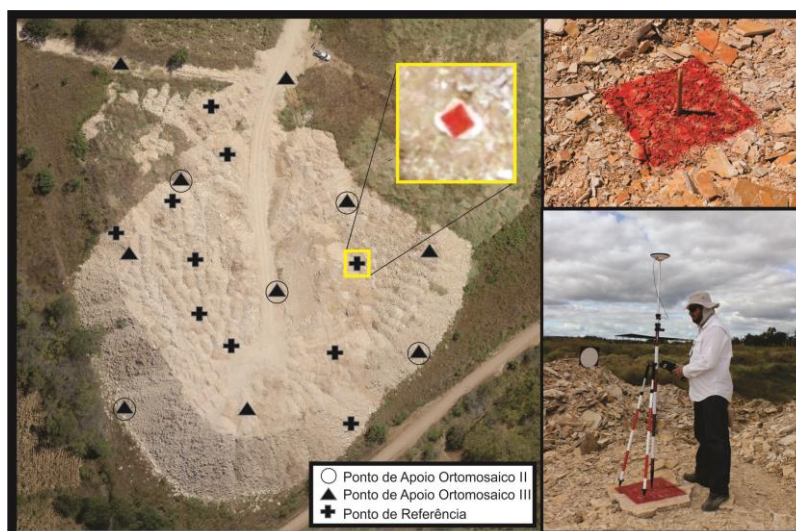


Figura 5. Pontos de apoio e de referência pré-sinalizados e georreferenciados com receptor GNSS L1/L2.

A Tabela 3 apresenta os resultados das análises de tendência e precisão, realizadas nos três ortomosaicos. Também é possível observar o Erro Médio Quadrático (EQM) (ou RMS do inglês *Root Mean Square*) da discrepância em planimetria, e o valor dado pela norma CE90 (*circle error 90%*), que estipula que noventa por cento dos resíduos nas medições das coordenadas dos pontos de referência estejam abaixo de um determinado valor.

Considerando a norma CE90, podemos afirmar que existe 90% de chance de um ponto dentro do Ortomosaico I estar localizado dentro de um raio de 4,6m de sua posição original no terreno, e que para os Ortomosaicos II e III, este raio cai para menos de 0,2m.

Tabela 3. Resultados das análises de tendência e precisão.

	Ortomosaico I (Sem PA)		Ortomosaico II (5 PA)		Ortomosaico III (10 PA)	
	X	Y	X	Y	X	Y
Média	-0,4546	-1,9302	-0,0065	0,0319	0,0088	0,0180
Desvio Padrão	0,3766	0,2080	0,0590	0,0474	0,0536	0,0424
RMS	2,134		0,083		0,072	
CE90	4,588		0,178		0,155	
ANÁLISE DE PRECISÃO (Teste <i>Qui-quadrado</i>)						
Variância esperada	σ_X	σ_Y	σ_X	σ_Y	σ_X	σ_Y
	0,318	0,318	0,053	0,053	0,042	0,042
Limite $\chi^2_{9,0,10} = 14,684$	χ^2_X	χ^2_Y	χ^2_X	χ^2_Y	χ^2_X	χ^2_Y
	12,609	3,847	11,153	7,190	14,372	8,987
Classificação	Classe B (escala 1:900)		Classe A (escala 1:250)		Classe A (escala 1:200)	
ANÁLISE DE TENDÊNCIA (Teste <i>t de Student</i>)						
Limite $t_{10\%(9)} = 1,3830$	$ t_X $	$ t_Y $	$ t_X $	$ t_Y $	$ t_X $	$ t_Y $
	3,8170	29,3394	0,3482	2,1282	0,5167	1,3419
	Existe Tendência	Existe Tendência	Não Existe Tendência	Existe Tendência	Não Existe Tendência	Não Existe Tendência

No tocante a análise de tendência, foi possível observar a existência de tendência, nas componentes X e Y do Ortomosaico I, e na componente Y do Ortomosaico II, denotando a existência de erros sistemáticos na imagem processada sem pontos de apoio, que foram

parcialmente resolvidos, utilizando 5 pontos de apoio e totalmente resolvidos com 10 pontos, uma vez que o Ortomosaico III não apresentou tendência em nenhuma componente.

A análise de precisão enquadrou o Ortomosaico I na classe B para uma escala de 1:900, e os Ortomosaicos II e III, na classe A, com escalas de 1:250 e 1:200, respectivamente.

4. Conclusões

A metodologia utilizada para aplicação do PEC, segundo o Decreto-Lei nº. 89.817/84, utilizando o método de testes de hipóteses, baseado na análise de tendências e precisão, demonstrou-se eficiente para avaliar a precisão posicional, bem como os erros sistemáticos oriundos dos ortomosaicos gerados pelo μ VANT.

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que apesar do Ortomosaico I (sem pontos de apoio) ter sido classificado como PEC classe B no teste de precisão, o que denota que a geometria das suas feições está relativamente consistente com a realidade, ele está deslocado nas componentes X e Y , devido aos erros sistemáticos identificados no teste de tendência.

Entretanto, de acordo com Galo & Camargo (1994) a existência de tendências em alguma direção indica a ocorrência de algum problema (cujas causas podem ser as mais variadas), mas uma vez conhecida, o seu efeito pode ser minimizado pela subtração de seu valor a cada coordenada "lida" na imagem.

Quanto aos ortomosaicos II (5 pontos de apoio) e III (10 pontos de apoio), conclui-se que ambos apresentam boa qualidade posicional. O fato do Ortomosaico II apresentar tendência na componente Y , pode ser atribuído ao número insuficiente de pontos de apoio, uma vez que o Ortomosaico III, que fez uso de 10 pontos de apoio, não apresentou tendência em nenhuma das componentes.

Todos os resultados foram considerados satisfatórios, levando em conta as finalidades de uso do μ VANT nas rotinas de fiscalização do DNPM, que vão desde levantamentos de reconhecimento (para averiguar se está ocorrendo mineração em uma determinada área) até levantamentos de precisão onde é necessário mensurar com exatidão uma área minerada, por exemplo. Sendo assim, nem sempre será necessário um produto acurado e preciso como o Ortomosaico III, sendo suficiente o resultado obtido no Ortomosaico I, uma vez que a maior discrepância entre as coordenadas observadas e as coordenadas de referência no Ortomosaico I foi de apenas 2,37m, erro insignificante para muitas aplicações no âmbito do DNPM.

Referências Bibliográficas

BRASIL, Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 – Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Diário Oficial da União, Brasília, Brasil, 1984.

COSTA, G. C. Pré-sinalização de pontos de apoio em aerofotogrametria com câmeras de pequeno formato. IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife – PE, 2012. p. 001 – 009.

GALO, M.; CAMARGO, P. de O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Tomo II, p. 41-48, Florianópolis – Brasil, 1994.

ITAME, O. Y. Controle de Qualidade Aplicado na modelagem digital de terreno. 2001. 106p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2001.

MERCHANT, D. C., Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. In Proceedings of the Technical Congress on Surveying and Mapping (1), 222-231, 1982, 1982.

SANTOS, A. P. Avaliação do Padrão de Exatidão Cartográfico em imagens orbitais IKONOS e CBERS-2B, na bacia do Ribeirão São Bartolomeu em Viçosa-MG. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 1021-1030.