

Qualidade das Imagens de Alta Resolução Geradas por Sensores Aéreos Digitais

Image Quality from High Resolution Airborne Sensors

Irineu da Silva¹

Guillermo Gallo²

Resumo

Os sensores digitais aerotransportados atualmente disponíveis no mercado possuem dois tipos de soluções: a solução de imagens por quadros, que emula a fotografia clássica, e a solução de imagem tipo “pushbroom”, que se caracteriza por uma imagem contínua, gerada a partir de um arranjo linear de sensores, que varrem a cena e possuem capacidade para gerar faixas de imagens pancromáticas, coloridas e de falsa cor com um nível de resolução elevado, compatível com as imagens pancromáticas geradas pelas câmaras convencionais. Neste artigo serão analisadas e discutidas as principais características das imagens geradas por esse tipo de sensor.

Palavras-chave: fotogrametria digital; câmara aérea digital; sensor digital aerotransportado; imagem digital.

Abstract

The airborne digital sensors available in the market today offer two types of solutions: one emulates the classical frame image and the other is the so called “pushbroom”, which consists of a continuous image, generated by an array of line sensors that sweep the scene, generating pixel carpets of high resolution, equivalent to the images generated by film cameras, and with panchromatic, color, and near infrared bands of various perspectives. In this article, we analyze the characteristics of the images generated by this type of sensor.

Key words: digital photogrammetry; airborne digital sensor; digital image.

¹ Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. E-mail: Irineu@sc.usp.br

² Leica Geosystems, Inc. E-mail: Guillermo.Gallo@leicaus.com

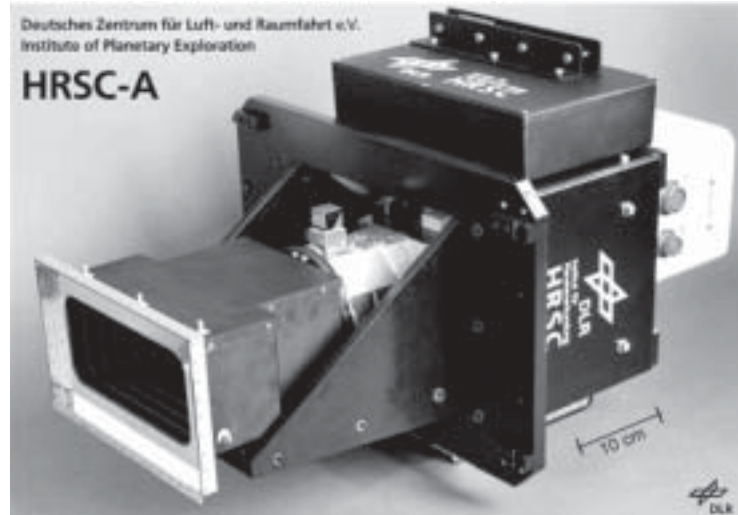
Introdução

A partir do ano 2001 foram disponibilizados para o mercado vários tipos de sensores digitais aerotransportados, entre os quais o sensor ADS40 da empresa Leica Geosystems. Esse sensor possui a característica de incorporar, ao mesmo tempo, as vantagens das câmaras aéreas baseadas em filmes e dos sensores espaciais. Fundamentalmente este sensor é formado por um conjunto de câmaras CCD lineares montado exatamente no plano focal de um sistema único de lentes de altíssima resolução. Dessa forma, tornou-se possível alcançar resoluções da ordem de 5 centímetros a 1 metro e, ao mesmo tempo, gerar diretamente imagens RGB e IR com a mesma resolução sem a necessidade de tratamento de imagens para realçar ou colorir a imagem pancromática original a partir de imagens RGB de menor resolução (pan-sharpening). Além do sensor ADS40, encontram-se também disponíveis no mercado dois outros sensores digitais: o sensor aéreo DMC (Digital Mapping Camera) e o sensor aéreo UltracCam-D. Esses dois sensores, ao contrário da ADS40, usam um arranjo matricial de câmaras CCD. Neste caso, o imageamento é feito “quadro” a “quadro”, similar ao processo de filme convencional, e usa o mesmo princípio de centro de perspectiva da câmera convencional. Para solucionar o problema de limitação de tamanho do CCD, em geral 4000x4000 e 9000x9000 pixels, a DMC usa oito estruturas individuais de CCD matriciais na composição do sistema da câmera, quatro CCDs pancromáticos de 7.000 x 4.000 pixels e quatro CCDs multi-espectrais de 3.000 x 4.000 pixels. A câmera UltraCam-D possui uma resolução de 11.500 x 7.500 pixels e utiliza 8 cones óticos e distâncias focais variáveis. Para maiores informações sobre os sensores de arranjo matricial, o leitor interessado poderá consultar as páginas web de cada fabricante e os artigos indicados nas Referências Bibliográficas. Embora seja interessante a discussão da qualidade entre as imagens geradas por esses três tipos diferentes de sensores, este artigo discute apenas as principais características do sensor ADS40.

O Projeto da Câmara

A câmara ADS40 foi projetada em conjunto com o Centro Aeroespacial Alemão – DLR baseando-se na câmara de alta resolução HRSC, desenvolvida originalmente para a missão Mars96, a qual estava baseada no princípio de três linhas de sensores estéreos, também conhecidos como sensores “pushbroom”. Para tornar o sistema adequado para o uso na fotogrametria convencional foi desenvolvido um sistema especial de lentes e um sistema separador de bandas de cores, denominado “tricóide”, o qual permitiu manter um registro perfeito da banda colorida de qualquer parte da imagem sem ser afetado pelo ângulo de perspectiva ou pela topografia do terreno. A figura 1 mostra uma imagem do protótipo do sensor desenvolvido.

Figura 1. Protótipo usado para o desenvolvimento da câmara digital ADS40



A câmara apresentada ao mercado é composta de uma série de elementos conforme apresentado na figura 2. A figura 3 exibe os detalhes da montagem da câmara em uma aeronave.

Figura 2. Componentes da câmara aérea digital ADS40



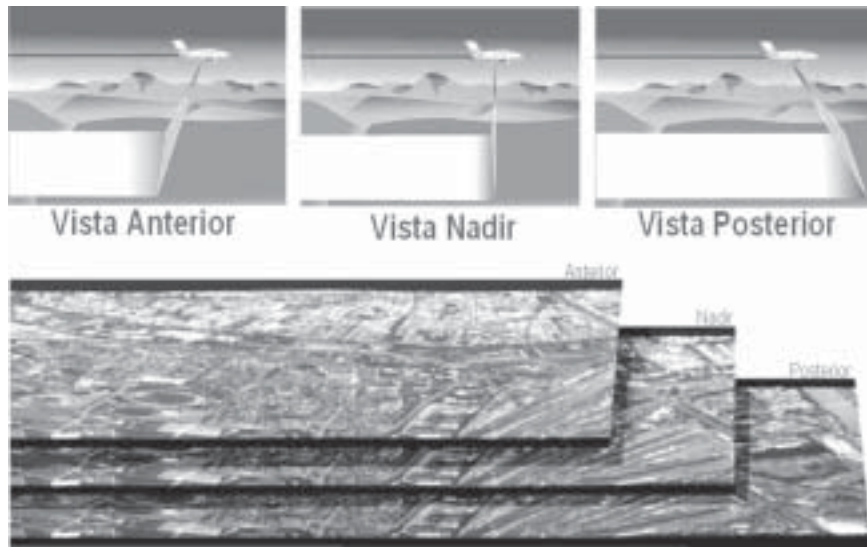
Figura 3. Montagem da câmara aérea digital ADS40 em uma aeronave



Características do Arranjo Linear de Sensores

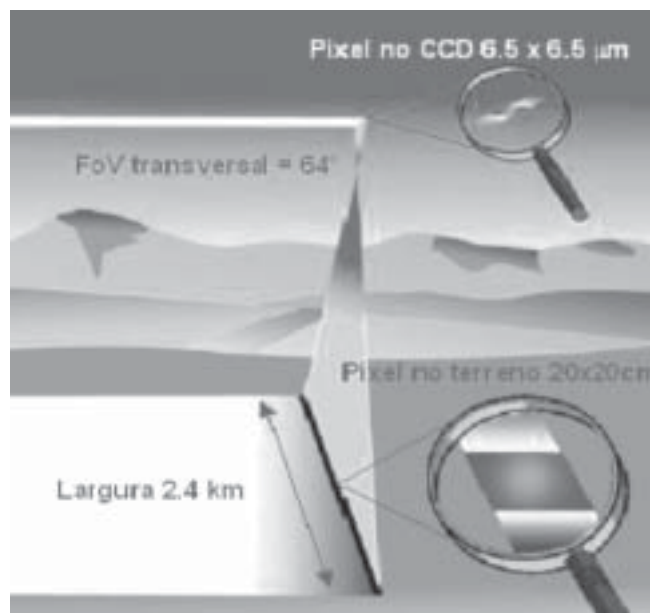
A câmara aérea digital ADS40 possui três arranjos lineares de pixels compostos de três linhas de sensores CCD dispostos nas posições anterior, nadir e posterior. Cada linha de sensores CCD pancromáticos possui uma linha dupla de 12.000 pixels, o que permite obter uma imagem linear perpendicular a linha de voo de 24.000 pixels. Ela possui ainda capacidade para imageamento multiespectral com sensores CCD capazes de armazenarem informações RGB e infravermelho próximo. Cada linha de sensores CCD multiespectral é formada por 12.000 pixels. A construção estereoscópica pode ser feita com a composição entre duas vistas quaisquer, ou seja, anterior e nadiral, nadiral e posterior ou anterior e posterior. A figura 4 exhibe um exemplo das três faixas de imagens geradas a partir do uso do arranjo linear das três linhas de sensores pancromáticos da ADS40.

Figura 4. Exemplo da captura de imagens pelo arranjo tri-linear de sensores da câmara aérea digital ADS40



O tamanho de cada pixel na imagem é igual a $6,5 \mu\text{m}$ e a distância focal é igual a $62,5 \text{ mm}$, o que permite obter um abertura de visualização no solo (FOV) igual a 64° . Nestas condições é possível obter um tamanho de pixel colorido no solo igual a 20 cm para uma altura de vôo igual a aproximadamente 1.950 m . Vide figura 5.

Figura 5. Geometria da tomada de imagem da câmara ADS40 para um linha simples de CCD (12.000 pixels)

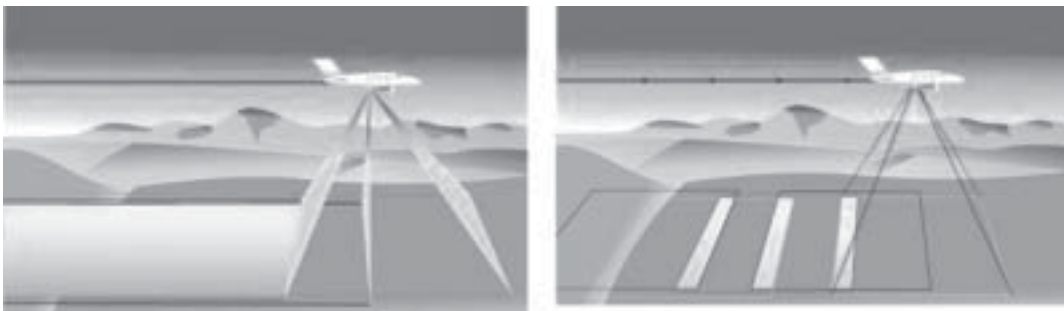


A principal característica do novo sistema com arranjo linear de sensores é que, à medida que a aeronave varre o terreno, devido ao seu posicionamento nadiral, os sensores produzem uma faixa de imagem com perspectiva constante, que na direção do voo, pode ser considerada como uma imagem quasi-ortogonal, a qual é denominada “pixel carpet”. Além disso, esse arranjo linear permite obter imagens com 100% de recobrimento (todos os pontos do terreno são fotografados em três perspectivas diferentes), o que oferece várias vantagens, como indicadas a seguir:

- menor quantidade de dados para a geração de ortofotos verdadeiras;
- compensação automática do deslocamento da aeronave sem necessidade do uso de compensadores mecânicos;
- a imagem nadiral é obtida com a parte central do sistema ótico, o que constitui-se na melhor parte do sistema ótico;
- as imagens feitas com a linha de sensores nadirais constituem-se em uma imagem quasi-ortogonal;
- facilidade para a criação de mosaicos devido à geração de imagens em faixas.

A figura 6 exhibe um exemplo da geração das faixas de imagens a partir do uso do arranjo linear de sensores comparado com o método convencional de geração de imagens aéreas. Por exemplo, com 60% de recobrimento típico da fotogrametria, apenas 60% dos objetos são fotografados três vezes com perspectivas diferentes. No caso das imagens “pushbroom”, todos os objetos aparecem em todas as imagens.

Figura 6. Faixas de imagens estéreas geradas pelo arranjo linear de sensores da câmara aérea digital ADS40 comparado com o método convencional



A figura 7 exibe um exemplo do efeito da quasi-ortogonalidade gerado pelo arranjo linear de sensores da câmara digital ADS40. Todos os pixels estão na posição correta (ortogonal) na direção do vôo. O deslocamento ocorre apenas na direção perpendicular a linha de vôo.

Figura 7. Efeito da quasi-ortogonalidade gerado pelo arranjo linear da câmara digital ADS40



Resolução Geométrica e Escala da Carta

A melhor resolução geométrica no solo (GSD) de uma câmara do tipo *pushbroom* é da ordem de 5 cm para as imagens pancromáticas (figura 8) e da ordem de 15 cm para imagens RGB. Acima de 15 cm ambas as imagens são obtidas com a mesma resolução. Considerando que o tamanho do pixel neste tipo de câmara é igual a 6,5 μm , para obter resolução dessa ordem, a altura de vôo deve ser igual a 1500 m acima do solo. Uma relação prática para calcular a altura de vôo com a câmara ADS40 pode ser a relação 1:10.000, ou seja, multiplicar o tamanho do pixel no solo por 10.000 para obter a altura do vôo.

No que diz respeito à relação entre a resolução e a escala do mapa, a prática tem mostrado que, para alcançar a mesma precisão na posição de um elemento, os dados extraídos diretamente de uma imagem digital podem ter um GSD duas vezes maior do que o dado extraído de uma imagem numerizada a partir de uma foto convencional. Dessa forma, um GSD de 10 cm em uma imagem colorida numerizada a partir de uma foto convencional corresponde a um GSD de 20 cm em uma imagem da ADS40. Essa característica pode ser explicada pela alta qualidade do sistema ótico da ADS40 e pela eliminação de várias fontes de erros que ocorrem no processo convencional, tais como, as deformações do filme e as deformações mecânicas e óticas do scanner.

Isso representa a coleta de apenas $\frac{1}{4}$ de dados para cobrir a mesma área. A tabela 1 mostra as relações entre a escala do mapa e o tamanho do pixel em uma imagem convencional numerizada a partir de um scanner e em uma imagem digital natural.

Figura 8. Imagem de alta resolução gerada pela ADS40 com um GSD igual a 5 cm



Tabela 1. Relação entre a dimensão do pixel no solo (GSD) e escala da carta

GSD médio com ADS40	Escala da carta	Padrões de Precisões		Comparação com fotos convencionais	
		Precisão xy RMS	Intervalo das curvas de nível	Escala da foto	Tamanho do pixel no solo (rasterizado)
5 - 10 cm	1 : 500	0.125 m	0.25 m	1 : 3,000 to 1 : 5,500	2.5 - 5 cm
10 - 15 cm	1 : 1,000	0.25 m	0.5 m	1 : 5,000 to 1 : 8,000	5 - 7.5 cm
15 - 20 cm	1 : 1,500	0.40 m	0.75 m	1 : 6,500 to 1 : 10,000	7.5 - 10 cm
20 - 30 cm	1 : 2,000	0.50 m	1m	1 : 8,000 to 1 : 11,000	10 - 15 cm
25 - 35 cm	1 : 2,500	0.60 m	1.25 m	1 : 8,500 to 1 : 13,000	12.5 - 17.5 cm
30 - 50 cm	1 : 5,000	1.25 m	2.5 m	1 : 12,000 to 1 : 18,000	15 - 25 cm
40 - 60 cm	1 : 10,000	2.50 m	5m	1 : 17,000 to 1 : 27,000	20 - 30 cm
50 - 70 cm	1 : 20,000	5.00 m	10 m	1 : 25,000 to 1 : 35,000	25 - 35cm
50 - 80 cm	1 : 25,000	6.25 m	12.5 m	1: 28,000 to 1 : 42,000	25 - 40 cm
50 - 100 cm	1 : 50,000	12.5 m	20 m	1 : 40,000 to 1 : 60,000	25 - 50 cm
50 - 100 cm	1 : 100,000	25 m	50 m	1 : 60,000 to 1 : 90,000	25 - 50 cm

Precisão Altimétrica

De acordo com a fórmula da fotogrametria para a estimativa da precisão altimétrica, é obvio que a característica do sensor linear de permitir que se escolha a melhor posição da linha de sensores, em relação ao plano focal, possui uma grande vantagem sobre as câmaras de quadro, nas quais a dimensão do pixel é retangular e menor na direção da linha de vôo. Essa melhor condição reflete-se em uma melhora na relação altura/base que tem permitido obter uma maior precisão na altimetria das imagens geradas a partir de sensores lineares. A tabela 2 exibe um quadro comparativo dos resultados obtidos por uma prova de campo feita pela Universidade de Stuttgart.

Tabela 2. Comparação da relação altura/base para diferentes tipos de câmaras digitais

Câmara	Comparação entre Câmaras				Comparação entre a área coberta e a precisão					
	Parâmetros de cada câmara				Normalizado para um pixel com GSD de 10 cm (escala da foto normalizada 1:10.00)					
	Linha (Pixels)	Tam do pixel µm	Dist Focal mm	GSD a 1000m cm	Área coberta			Precisão		
n.dist focal mm					Area km ²	Rel h/b	x,y cm	altitude (pontos) cm	altitude (terreno) cm	
ADS40	12000 x 1	6.5	62.5	10.4	96	1.44	1.26	20	12.6	24.2
DMC (Pan)	13824 x 7680	12	120	10	100	1.06	3.3	20	33	66
UltraCam (Pan)	11500 x 7500	9	100	9	111	0.86	3.7	20	37	74
DIMAC	5440 x 4800	9	120	7.5	134	0.26	4.7	20	47	94
Aerial Photo (UAG)	15333 x 15333	15	153	9.8	103	2.35	1.66	20	16	32

Acurácia dos Resultados

Em julho de 2004, a Universidade de Stuttgart realizou um teste de vôo usando a câmara ADS40 com três tipos diferentes de IMU. A altura de vôo foi de 1.500 m para um tamanho de pixel GSD igual a 15 cm. Foram realizadas quatro linhas de vôos com duas linhas cruzadas com um total de 12 pontos de controle para o ajustamento de bloco da triangulação aérea. A acurácia foi testada sobre 198 pontos de verificação distribuídos na área. Um resumo dos resultados obtidos está apresentado na tabela 3.

Tabela 3. Acurácia da câmara ADS40 com o uso do IMU LN200 para uma altura de vôo de 1.500m

	Este	Norte	Altitude
RMS [m]	0.052	0.054	0.077
Média [m]	0.000	-0.022	0.045
Max. [m]	0.133	0.188	0.242

Modelagem de Superfícies

A câmara com arranjo linear tem demonstrado ser uma ferramenta importante para a produção de ortofotos verdadeiras quando as suas imagens são processadas com o uso de softwares aplicativos eficientes de correlação de imagens. Devido a sua capacidade de garantir a obtenção de uma densidade de pontos elevada e a disponibilidade de três ou mais ângulos de perspectiva para a correlação das imagens, esse tipo de sensor permite obter um modelo 3D rico em detalhes para todos os objetos da imagem, o que facilita a produção de ortofotos verdadeiras. Provas de campo demonstraram que a ADS40 gera 10 vezes mais pontos para um Modelo de Digital de Superfície – DSM quando comparado com um sensor a laser aerotransportado – LIDAR, pela eliminação de oclusões que ocorrem devido aos ângulos oblíquos de visão disponíveis na câmara digital. As figuras 9 e 10

Figura 9. DSM derivado de uma imagem digital da câmara ADS40 com GDS igual a 30 cm



Figura 10. Ortofoto Verdadeira gerada a partir de um DSM com GSD igual a 30 cm



NOTA: uma ortofoto verdadeira é aquela em que não apenas a superfície do terreno é perfeitamente ortogonal, mas também todos os objetos construídos sobre o terreno. Notar na figura 10 que os edifícios estão representados na vertical.

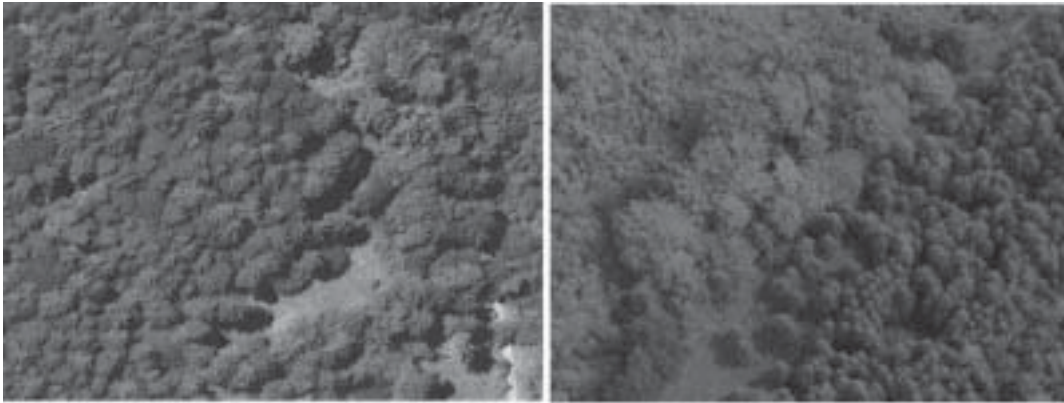
exibem um Modelo Digital de Superfície – DSM e uma Ortofoto Verdadeira gerados pela câmara ADS40 com o uso do software ISTAR.

Resolução Radiométrica

Para garantir a qualidade na interpretação de imagens no que concerne aos estudos de identificação e mapeamento florestal, a câmara com arranjo linear foi projetada de maneira a não ter um recobrimento das bandas espectrais. Devido a isso, a resolução das imagens RGB é a mesma das imagens pancromáticas, o que torna o produto da ADS40 adequado para o desenvolvimento de estudos florestais baseados em técnicas de sensoriamento remoto conhecidas. Assim, não é realizado nenhum tipo de “pan-sharpening” para produzir imagens RGB de alta resolução. A diferença de qualidade entre as imagens digitais geradas a partir de um sensor sem recobrimento de bandas e a partir de uma imagem digital com aplicação do “pan-sharpening” pode ser visto nas figuras 11 e 12. As figuras mostram claramente que, no caso do mapeamento florestal, a aplicação do “pan-sharpening” deteriora completamente a qualidade da imagem impossibilitando a identificação de espécies florestais que compõem o estrato superior do povoamento.

Figura 11. Imagem gerada com a câmara ADS40

Figura 12. Imagem gerada a partir da aplicação de um “pan-sharpening”



Conclusões

Somente um arranjo de sensores com 12.000 x 12.000 pixels e com 6 camadas transparentes para a detecção das bandas vermelha, verde, azul, infravermelho próximo e pancromático teria condições para competir com a tecnologia de câmaras tipo “pushbroom”. Devido a essa capacidade, esse tipo de câmara vem se tornando uma ferramenta importante no gerenciamento florestal, na agricultura de precisão e na detecção de alterações do meio ambiente, além do uso ostensivo no planejamento urbano. O mercado tem mostrado

que as câmaras aéreas digitais, em pouco tempo, substituirão completamente as câmaras aéreas convencionais devido a sua capacidade para a aquisição mais rápida de imagens com um custo altamente competitivo.

Bibliografia de apoio

CRAMER, M. *ADS40 performance test Vaihingen/Enz*. Flight June 26, 2004

FRICKER, P., GALLO, G. *High Resolution Color Imagery for Orthomaps and Remote Sensing*. Rio de Janeiro: Pipeline, 2005.

HINZ A; DÖRSTEL C. HEIER; H. DMC. *The Digital Sensor Technology of Z/I-Imaging – Photogrammetric Week 01*, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2001.

KRÖPFL, M., KRUCK, E., BRUBER, M. *Geometric Calibration of The Large Format Aerial Camera UltraCam*. GIP Geoinformatics & Photogrammetric Engineering, Aalen, Germany.

NEUMAN, K. J. *Operational Aspects of Digital Aerial Mapping Cameras*. Commission I, WG I/6, Proceedings of XXXV ISPRS Congress, Istanbul, 2004.