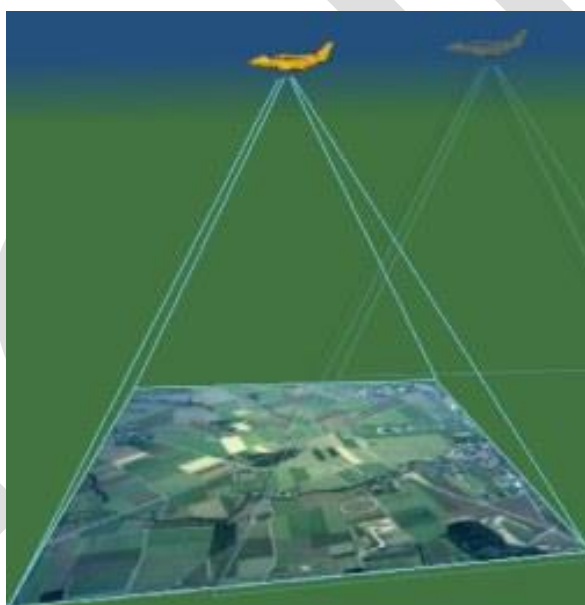


FOTOGRAMETRIA DIGITAL



Professora Doutora Paula Redweik
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
2019

1 - Projeto fotogramétrico

1.1 Essencialidade da fotografia aérea na produção de informação geográfica

A Fotogrametria aérea é já há largas dezenas de anos uma peça indispensável na produção cartográfica. De facto, o levantamento fotogramétrico está atualmente na base de qualquer carta topográfica, mesmo de zonas de dimensões reduzidas em que os levantamentos por UAV concorrem com os levantamentos por topografia clássica. Isto deve-se a vários fatores, entre os quais, uns de carácter geral, como:

- a afinidade entre o conteúdo de uma fotografia aérea e aquilo que se convencionou representar numa carta topográfica (edifícios, caminhos, muros, etc. vistos de uma perspetiva vertical);

- a densidade de informação contida numa fotografia;

- a possibilidade de restituir diversos tipos de informação em variadas épocas;

e outros cuja relevância se foi revelando a par da evolução tecnológica, como:

- a possibilidade de mecanizar o processo de produção fotogramétrica;

- a possibilidade de associar o processamento eletrónico de dados e a computação gráfica à restituição fotogramétrica;

- a possibilidade de automatizar o processo de restituição, utilizando o processamento digital de imagens e modelos analíticos (equações).

O produto final da Fotogrametria até há poucos anos era considerado como sendo a carta em papel. Atualmente esse produto é considerado um conjunto de dados geoespaciais (tridimensional) que constitui a base de qualquer sistema de informação geográfica (SIG), sobre os quais se combinam dados de natureza não geográfica, quer para obtenção de novas cartas temáticas, quer para permitir análises de variadas situações. Deste ponto de vista, a Fotogrametria é uma das técnicas de aquisição de dados para um SIG.

Mas, não só a carta (em papel ou digital) é um produto da Fotogrametria. Os modelos tridimensionais de elevação, também importantes para os SIG quando a terceira dimensão é relevante para a análise, podem ser obtidos com elevada precisão por métodos fotogramétricos. As ortofotocartas e os modelos tridimensionais urbanos e não urbanos (realistas ou não) com crescente importância em contextos de gestão urbana e simulação, são também produtos da Fotogrametria, embora a associação e integração de dados provenientes de outros sensores e por outras técnicas seja cada vez mais comum.

1.2 Técnicas fotogramétricas para produção de informação geográfica

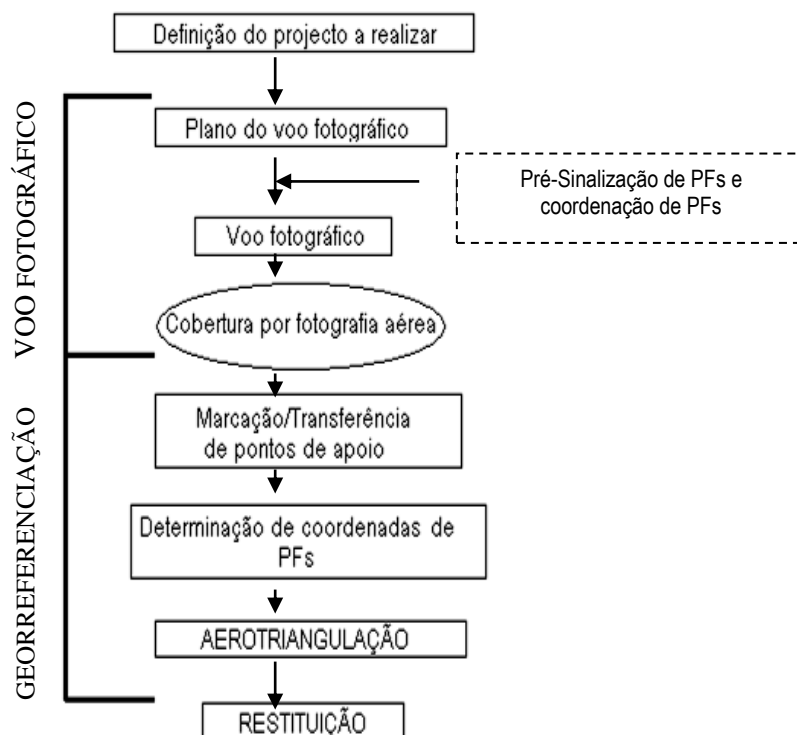
Para a produção cartográfica e dos outros produtos mencionados é utilizada primordialmente a fotogrametria aérea. Os métodos de restituição utilizados são a retificação fotográfica e a estereorrestituição interativa ou automática. Para projetos de modelação 3D urbana surgiram nos últimos anos soluções com restituição múltipla de fotografias aéreas convergentes.

Quanto ao formato dos resultados, os produtos fotogramétricos podem constituir uma representação de traço (carta), uma representação em formato de imagem (ortofoto, modelo 3D com textura realista) ou uma representação puramente numérica (modelo digital de elevação, nuvem de pontos 3D). Associada a cada uma das técnicas e formatos está uma determinada precisão que, complementada com a precisão dos dados de entrada (fotografia, imagem digitalizada e respetiva georreferenciação) vai condicionar a precisão do produto fotogramétrico final (precisão do produto final = função de [precisão das imagens, precisão da georreferenciação, precisão da técnica e formato final]).

1.3 Operações fotogramétricas preliminares

A base de todos os processos fotogramétricos para produção de informação geográfica é composta por duas grandes fases que são o voo fotográfico e a georreferenciação. Só após estas operações é que se pode passar à restituição do pormenor (extracção de informação da fotografia), por retificação, por estereorrestituição ou por restituição múltipla.

O esquema geral das operações preliminares é o seguinte:



1.3.1 Definição do projeto

Neste passo há que formular em problema fotogramétrico a tarefa proposta (pelo cliente, pelo plano, etc.)

Em especial interessa saber e definir :

- a área a levantar (localização e dimensões)
- a disposição espacial da área (região extensa bidimensionalmente ou uma tira ao longo de um eixo ainda que de orientação variável)
- o tipo de representação que se pretende (carta de traço, ortofoto, modelo tridimensional do terreno, etc.)
- a escala da representação (condiciona a escala da foto inicial e o tipo de pormenor a representar)
- a precisão pretendida (planimétrica, altimétrica, e de pormenor: determina métodos a utilizar, escala da foto e número de pontos de apoio)
- o prazo de execução
- restrições ao voo (época do ano, vegetação, luminosidade, dimensão das sombras, zonas interditas)
- outros aspectos relevantes para a restituição.

1.4 Voo fotográfico

1.4.1 Plano de voo

No planeamento do voo fotográfico há que decidir e considerar os aspectos que se seguem.

1.4.1.1 Escala da fotografia

A escala deve ser escolhida ponderando dois aspectos opostos:

. o aspecto técnico, segundo o qual, para produzir uma carta a uma determinada escala, quanto maior for a escala da fotografia aérea, melhor se identificam os pormenores do terreno e maior será a precisão das medições a efectuar.

. o aspecto económico, segundo o qual, quanto menor for a escala da foto, mais terreno será abrangido por cada foto e serão necessárias menos fotos para cobrir a mesma área, o que significa economia no número de restituições a realizar e no número de pontos de apoio necessários (Pontos fotogramétricos (PFs) e outros).

Empiricamente estabeleceu-se a seguinte regra para determinar a escala da foto em função da escala da carta pretendida (Regra de 'von Gruber'), onde m_f é o módulo da escala da foto, m_c o módulo da escala da carta e k um valor que varia

$$m_f = k \sqrt{m_c}$$

$$E_f = 1/m_f$$

$$E_c = 1/m_c$$

entre 150 e 200 para câmaras analógicas e cerca de 350 para câmaras digitais.

A tabela seguinte mostra o módulo das escalas de foto em função do módulo das escalas de carta mais usuais para uma constante de 150. Na prática, devido ao facto de a atmosfera terrestre não ser totalmente transparente, e de, a escalas menores corresponder, em geral, uma maior altura da plataforma onde se encontra a câmara fotográfica (avião, por exemplo), a camada de atmosfera que medeia o avião e a superfície terrestre é mais espessa e menos transparente e consequentemente, a qualidade das fotografias obtidas a menores escalas pode não ser suficiente para produzir cartas. Por isso, sobretudo em face de câmaras analógicas, opta-se frequentemente por escalas maiores do que as que estão indicadas na tabela (para a carta 1:25000 é corrente utilizarem-se fotografias à escala 1:22000). As imagens de câmaras aéreas digitais, no entanto, têm mostrado ter definição suficiente para se poderem utilizar escalas muito menores de foto para produzir uma mesma escala de carta ($k \approx 350$).

mc	mf
500	3500-5000
1000	5100-8000
2500	8500-13000
5000	12100-18000
10000	17000-26000
25000	28000-42000
50000	40000-60000
100000	60000-90000

Tabela 1.4.1.1 - Módulo de escala da foto para diversas escalas de carta ou ortofoto

Uma outra expressão para a escala de uma fotografia ou imagem aérea, mais utilizada em imagens digitais, aéreas e de satélite, é o Ground Sampling Distance, GSD. O GSD corresponde à distância entre os centros de dois pixels adjacentes no terreno. Considerando que o pixel da imagem é quadrado, o GSD corresponde também à dimensão (linear) no terreno coberta pelo lado do pixel da imagem. Assim, se dissermos que uma imagem tem um GSD de 15cm, significa que o lado do pixel, ou a sua largura no terreno são cerca de 15 cm. A relação entre GSD e escala da imagem é a seguinte:

$$1 \text{ GSD} = \text{pixel métrico} \times mf$$

onde, *pixel métrico* significa a dimensão do pixel na imagem em unidades do sistema métrico. Sendo dada a resolução de uma imagem digital em ppp (pixels por polegada) ou dpi (dots per inch), o pixel métrico obtém-se pela seguinte relação:

$$\text{Pixel métrico[mm]} = \text{valor da polegada[mm]} / \text{resolução[dpi]}$$

$$1 \text{ polegada} = 25.4[\text{mm}]$$

1.4.1.2 Sobreposições

Os voos fotogramétricos são planeados de modo a que se venha a obter uma cobertura da região a levantar constituída por fotografias verticais (idealmente nadirais), na qual as fotografias sucessivas apresentem uma zona de sobreposição, ou seja, a mesma área da superfície terrestre deverá ser captada e registada em duas (ou mais) imagens distintas.

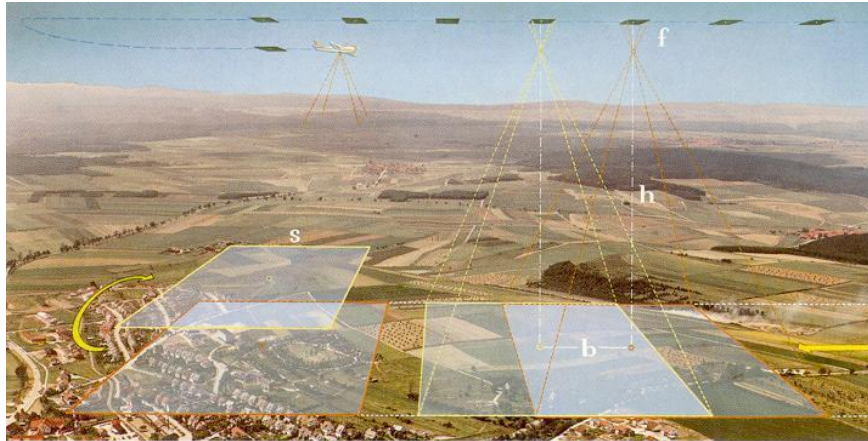


Figura 1.4.1.2.1 - Voo fotogramétrico

A sobreposição mede-se em percentagem da dimensão da fotografia, quer na direção de voo (sobreposição longitudinal ℓ), quer na direção perpendicular à do voo (sobreposição lateral q). É comum descrever a sobreposição longitudinal como a sobreposição entre fotos sucessivas e a lateral como a sobreposição entre fiadas sucessivas ou adjacentes. O objetivo da sobreposição longitudinal é permitir a visualização tridimensional e a restituição estereoscópica na zona comum a duas fotografias, enquanto a sobreposição lateral tem principalmente a função de constituir uma margem de segurança para evitar lacunas entre fiadas.

Para efeitos de estereorrestituição é exigida normalmente uma sobreposição longitudinal de 60 % da dimensão da foto na direção do voo e uma sobreposição lateral de 20 a 30 % da dimensão da foto na direção transversal à do voo.

Para efeitos de aerotriangulação, para medições de alta precisão, voa-se com $\ell = 60\%$ e $q = 60\%$ e fazem-se ainda fiadas na direção perpendicular à principal com o objetivo de cada ponto do objeto poder ser medido num grande número de fotografias (até 18).

Em voos com UAV usam-se também sobreposições ℓ e q iguais mas geralmente maiores (80%) com o intuito também de aumentar o número de medições de cada ponto do objeto.

Para efeitos de retificação fotográfica, para produzir ortofotomapas, embora em teoria não seja necessária qualquer sobreposição longitudinal para além da margem de segurança, pois não se pretende usufruir da estereoscopia, os voos são geralmente feitos com sobreposições superiores a 70%. As fórmulas a utilizar no plano de voo para ortoretificação têm algumas particularidades e são apresentadas na secção 1.4.2.1 - Orçamento.

O relevo do terreno influencia as sobreposições que se vão obter na cobertura fotográfica (figura 1.4.1.2.2), pelo que, por vezes é necessário ajustar o plano de voo à realidade do terreno considerando o seu relevo.

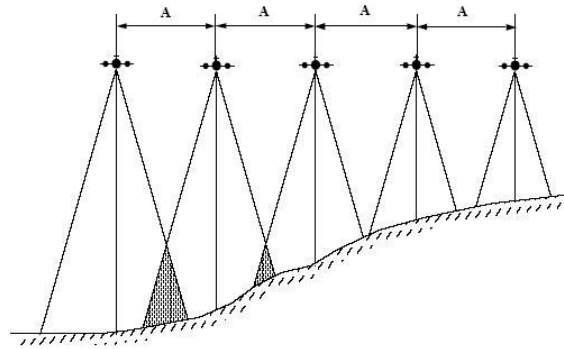


Figura 1.4.1.2.2 - Influência do relevo na sobreposição lateral (Alvarez)

Em geral se o terreno sobe, o valor da sobreposição desce. Isto é válido tanto para a sobreposição longitudinal como para a lateral. Sendo a sobreposição lateral em regra muito menor que a longitudinal, facilmente deixa de existir dando origem a lacunas fotográficas devidas ao relevo. Conhecendo o relevo do terreno previamente (por meio da carta topográfica ou informação 3D semelhante) esta situação pode-se evitar, alterando no mapa de voo um de dois parâmetros: a distância entre eixos de fiadas, mantendo a altura absoluta de voo (figura 1.4.1.2.3) ou a altura absoluta de voo, mantendo a altura sobre o solo e a distância entre eixos de fiadas (figura 1.4.1.2.4). A altura absoluta de voo é a que se refere ao datum altimétrico.

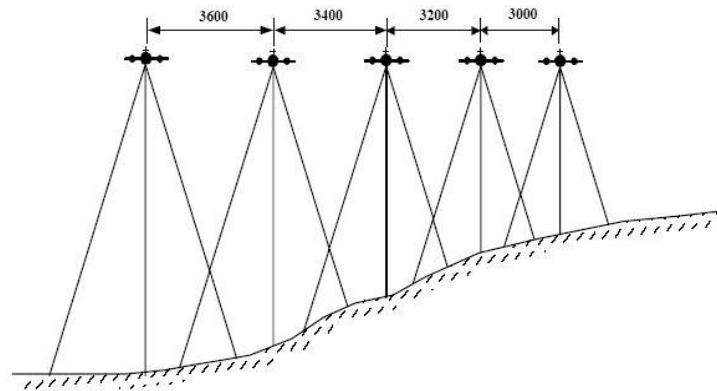


Figura 1.4.1.2.3 - Variação de distância entre eixos para garantir sobreposição lateral (Alvarez)

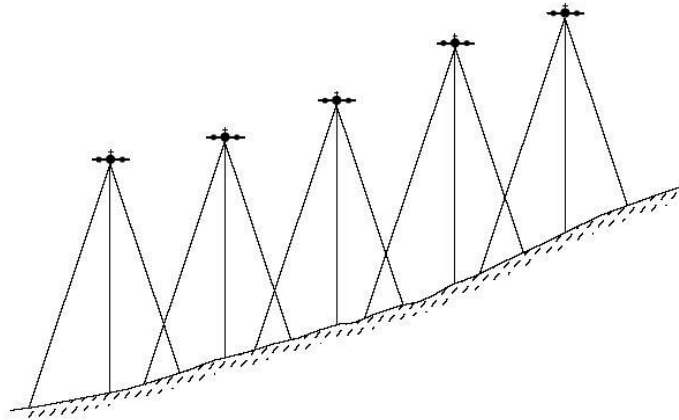


Figura 1.4.1.2.4 - Variação de altura absoluta de voo para garantir sobreposição lateral (Alvarez)

A nível da sobreposição longitudinal, uma sobreposição menor que 55% vai prejudicar a ligação entre modelos e uma redução abaixo dos 50% vai originar mesmo lacunas estereoscópicas. Analogamente, a solução para este problema passa pela variação da base aérea, mantendo a altura absoluta, ou pela variação da altura absoluta. Sendo tecnicamente mais exequível que o avião mantenha a altura absoluta ao longo da fiada, opta-se preferencialmente pela primeira solução. Nas câmaras aéreas analógicas com controlador de sobreposição, é possível corrigir em tempo real o intervalo de tempo entre os disparos consecutivos o que equivale a alterar a distância entre os disparos (= base aérea). Nas câmaras aéreas digitais, tal correção é realizada com base nos dados posicionais fornecidos por GPS a alta frequência durante o voo fotográfico.

Caso o relevo varie ao longo da direção da fiada de modo crítico, e se não for possível controlar e alterar a base “on-line”, ter-se-á que, semelhante ao que está ilustrado na figura 1.4.1.2.5, na fase de planeamento realizar uma partição de fiadas, planeando para cada direção uma fiada parcial a uma determinada altura absoluta de voo e uma segunda (ou terceira) fiada parcial a uma altura absoluta diferente. O avião realizará primeiro as fiadas à mesma altura e numa segunda fase as restantes fiadas a altura(s) diferente(s). O plano deve incluir pelo menos um modelo de sobreposição entre as fiadas parciais da mesma direção de alturas diferentes.

Para cartografia sistemática, em que a intenção é cartografar grandes extensões de terreno de um país, as direções de voo preferenciais para as fiadas são Norte-Sul ou Este-Oeste, mas qualquer outra direção é restituível, optando-se normalmente pela direção ao longo da qual as fiadas poderão ser mais longas.

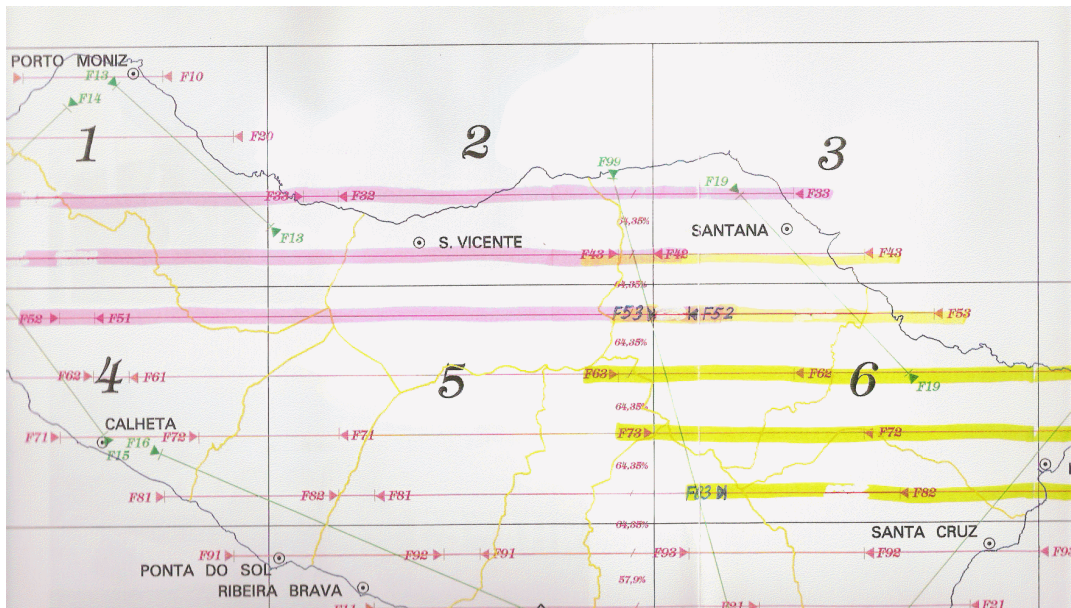


Figura 1.4.1.2.5 - Esquema de voo com partição de fiadas. As setas indicam o início e o fim de cada fiada. (Cavaca e Sequeira, Relatório de Estágio)

1.4.1.3 Câmaras e objetivas a utilizar

As câmaras a utilizar em fotogrametria aérea para produção cartográfica dependem da dimensão do projeto. Para projetos de maior dimensão, como para cartografia sistemática, são usadas câmaras métricas aéreas digitais de grande formato de imagem, as quais produzem séries de fotografias com a sobreposição que se pretende. Atualmente, para produção cartográfica, podem ser ainda usadas câmaras de médio formato e de pequeno formato, sobretudo para projetos de menor dimensão em que a câmara pode ir a bordo de um UAV (ou drone). Há ainda a alternativa de utilizar imagens de satélite de alta resolução (Ikonos, Quickbird, Orbview, Worldview), embora estas sejam apenas aplicáveis para cartografia de média/pequena escala a partir de imagens estereoscópicas ou na produção de ortoimagens de grandes zonas.

Existem câmaras com objetivas de diferentes distâncias focais (diferentes constantes de câmara). Em algumas câmaras, sobretudo nas mais recentes, existe a possibilidade de intermutar as objetivas mantendo o mesmo corpo da câmara. As câmaras (ou objetivas) de diferentes distâncias focais, devem ser escolhidas para o tipo de missão em vista. Variando a objetiva numa mesma câmara é possível variar a escala da foto mantendo a altura de voo ou então, variar a altura de voo mantendo a escala da foto.

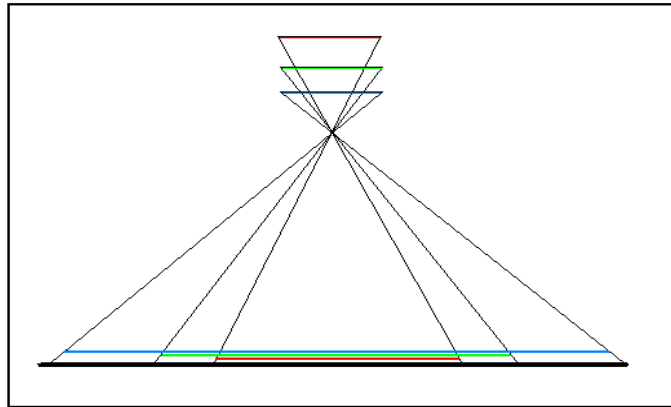


Figura 1.4.1.3.1 - variação de escala a partir da mesma altura de voo usando diferentes objetivas (diferentes constantes da câmara)

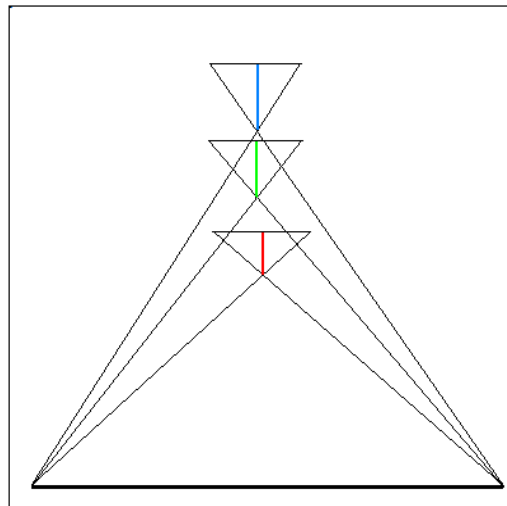


Figura 1.4.1.3.2 - Escala igual a partir de várias alturas de voo usando diferentes objetivas (diferentes constantes da câmara)

Existem vários critérios para a escolha da objetiva certa. Há uma tendência para usar distâncias focais maiores (cone de menor abertura -> menores distorções perspectivas) quando o objetivo da missão fotográfica é:

- a fotointerpretação
- produzir ortofotocartas
- cartografar terreno com altas montanhas e vales profundos
- cartografar cidades com prédios muito altos.

A tendência é para usar distâncias focais menores quando o objetivo é:

- a aerotriangulação
- reduzir custos de voo
- realizar voos panorâmicos
- aumentar a precisão altimétrica dos resultados (aumentando a relação base-altura)

As objetivas mais usuais em câmaras analógicas (não digitais) que maioritariamente apresentavam formatos de imagem quadrados, eram as seguintes:

objetiva	abertura [grados]	constante [cm]
ang. estreito	33	60
ang. normal	62	30
ang. intermédio	85	21
grande angular	100	15
super grande angular	140	9

Tabela 1.4.1.3.1 - Constantes e aberturas de objetivas de câmaras analógicas - formato de fotografia: 23cm x 23cm

Na maioria das câmaras digitais que associam várias câmaras numa só, não existe a possibilidade de alterar a constante da câmara, visto a imagem final distribuída ao utilizador ser uma construção analítica das imagens originais captadas pela câmara, à qual está associado um determinado valor de constante de câmara fictício. O formato da imagem final não é quadrado (é retangular ou em faixa) pelo que os ângulos de abertura da objetiva são diferentes na direção do voo e na direção perpendicular à do voo (Figura 1.4.1.3.3).

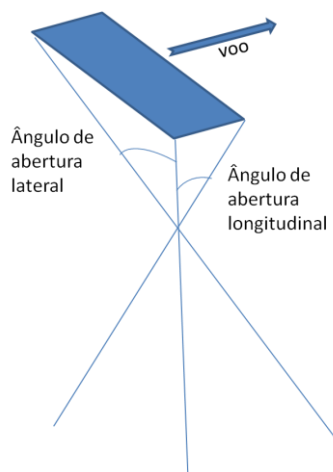


Figura 1.4.1.3.3 - ângulos de abertura em câmaras digitais

As constantes e aberturas de algumas câmaras digitais de grande formato atualmente mais implantadas no mercado estão indicadas na tabela abaixo.

Câmara Digital	c	Abertura longitudinal	Abertura lateral
ADS 40	62,5mm	-	69 grad
DMC	120mm	49 grad	78 grad
UltraCamD	100mm	41 grad	61 grad

Tabela 1.4.1.3.2 - Constantes e aberturas de câmaras digitais

1.4.1.4 Traçado de voo

O traçado de voo que vai determinar a rota a seguir pelo avião, depende diretamente da forma dos limites e extensão do terreno a levantar fotogrametricamente. O objetivo é, sempre que possível, obter fiadas rectilíneas de fotografias com determinada sobreposição entre si. Tanto o eixo da fiada como as margens superior e inferior das fotografias devem ser projectáveis como rectas no terreno.

-Se o terreno a levantar for uma área extensa aproximadamente retangular, o avião deverá sobrevoá-lo em traçados paralelos, varrendo toda a área como ilustrado na figura.

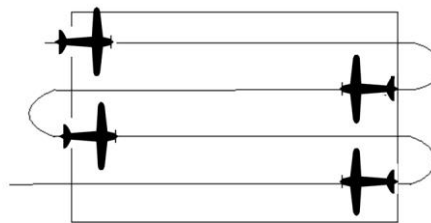


Figura 1.4.1.4.1 - Traçado de voo em área de terreno retangular

- Se a área a levantar apresentar um formato irregular, normalmente é subdividida em vários rectângulos de diversas dimensões e orientações, de modo a que o conjunto de todas as sub-áreas cubra toda a área pretendida. Dentro de cada rectângulo planeia-se o traçado de voo como no caso anterior.

-Se a área a levantar for apenas uma faixa estreita coberta em largura por apenas uma fiada de fotografias, por ex. ao longo de um rio, da linha de costa, de uma estrada, caminho de ferro ou faixa de terreno onde virá a ser implantada uma estrada ou caminho de ferro, o voo terá de ser constituído por vários troços rectilíneos mas de direcções variáveis, como ilustra a figura.

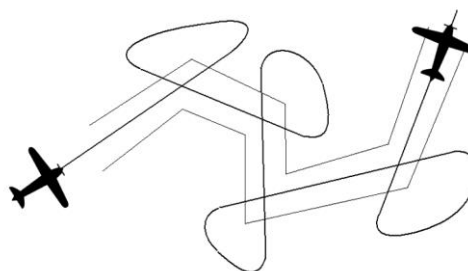


Figura 1.4.1.4.2 -Traçado de voo em faixa estreita de terreno

Neste caso, os traçados sobre a zona de interesse deverão ser retilíneos, sendo todas as curvas necessárias à mudança de direcção realizadas fora da zona de interesse.

1.4.1.5 Época do voo

A época em que o voo terá lugar depende, por um lado, das condições climatéricas da região a sobrevoar e, por outro lado, do estado da cobertura vegetal. Para um levantamento fotogramétrico o mais completo possível, não deve haver nuvens nem copas de árvores a cobrir o terreno. Assim, a melhor época do ano para realizar um voo fotogramétrico às nossas latitudes é o princípio da Primavera, quando a maior parte das árvores ainda não tem muita folhagem e já não há tantas nuvens no céu (tudo isto varia muito de região para região). Para que a fotografia aérea tenha luminosidade suficiente, e as sombras não tenham dimensões que impossibilitem a restituição, é normalmente exigido que o Sol tenha uma determinada altura mínima durante a sessão fotográfica. O valor para essa altura mínima varia não só com a latitude média da região a levantar como também com o objetivo final do voo fotográfico. Enquanto para cartografia de traço, às nossas latitudes é exigida uma altura mínima do Sol de 30°, para ortofotomapas poderá ser exigida uma altura mínima superior, visto pretender-se evitar as sombras no produto final. Para fotointerpretação, sobretudo em zonas de pouco contraste, as sombras podem ser úteis na identificação de objetos, pelo que se deve voar com Sol baixo. O valor da altura mínima do Sol determina para cada dia do ano uma janela temporal dentro da qual é possível realizar um voo fotográfico em condições, desde que não haja nuvens. Por outro lado, há situações que obrigam a voar sob um tecto de nuvens para obter uma luminosidade homogénea. As imagens “sem sombras” assim obtidas, permitem a restituição de zonas que estão permanentemente em sombra (vales, falésias, fajãs). As imagens de câmaras digitais, pelo facto de terem uma maior resolução radiométrica que o filme fotográfico, permitem distinguir muito mais pormenores em zona de sombra, pelo que os voos com câmaras digitais podem ser realizados dentro de janelas temporais mais alargadas.

1.4.1.6 Tipo de imagens

Interessa também definir se se pretendem imagens pancromáticas, coloridas ou de infra-vermelhos (multiespectrais). Em geral as câmaras digitais atuais são capazes de fornecer num só voo imagens de todos os tipos referidos. As resoluções geométricas dessas imagens é que poderão ser diferentes. Em geral, as imagens pancromáticas proporcionam melhor resolução geométrica e as imagens coloridas apresentam informação radiométrica mais diferenciada, o que facilita a interpretação do pormenor. Para as câmaras digitais, tanto a resolução geométrica e radiométrica como a sensibilidade com que a imagem é captada, são características da câmara (sensor) visto a captação de imagens ser realizada pelos sensores CCD que as integram.

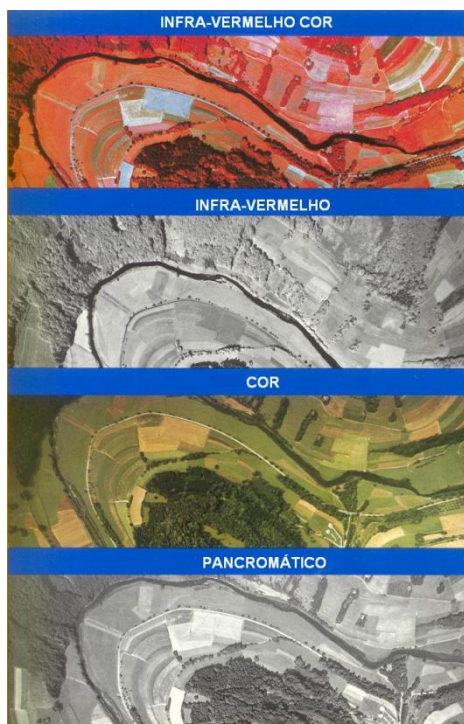


Figura 1.4.1.6.1 - Tipos de imagem utilizados em Fotogrametria aérea

1.4.1.7 Avião fotogramétrico/ plataforma aérea

Embora atualmente se possa realizar coberturas aéreas a partir de vários tipos de plataformas aéreas, incluindo UAV (drones), grandes projetos cartográficos continuam a preferir câmaras digitais de grande formato montadas em aviões fotogramétricos. O avião a utilizar, caso haja hipótese de escolha, deve ser um aparelho que apresente poucas vibrações durante o voo. Em princípio, qualquer avião onde seja possível perfurar a fuselagem inferior para montar uma câmara aérea pode ser transformado num avião fotogramétrico. Geralmente as firmas optam por aviões de pequeno porte que são mais económicos na manutenção. A considerar na escolha, se a velocidade mínima, a altura máxima de voo (teto), o alcance máximo e a autonomia de voo satisfazem os requisitos do projeto.

Marca/modelo	Num.Lugares	Capacidade p/ combustível	Altitude máxima operacional	Velocidade horizontal	Alcance	Autonomia de voo
Beach/King air	6-10	1170 ℓ	7800m	320km/h	2125km	6:10h
De Havilland/Twin Otter	22	1150 ℓ	8150m	258km/h	1200km	4:50h
Cessna 402	8	~500 ℓ	7980m	180-300km/h	640km	6:30h
Cessna 404	8	~500 ℓ	7980m	200-340km/h	1000km	10:00h

Tabela 1.4.1.7.1 - Características de alguns aviões fotogramétricos



Figura 1.4.1.7.1 - Exemplos de aviões fotogramétricos

1.4.2. Mapa de voo

Pertence ao plano de voo um esquema de navegação, ou mapa de voo, elaborado sobre uma carta topográfica da região a levantar, de escala menor que a da cobertura fotográfica pretendida. O mapa de voo deverá conter o traçado planeado para a rota do avião ao longo de cada fiada, na mudança de fiada e por vezes no início e no fim do voo fotográfico. Apenas o traçado dentro da área a levantar é da responsabilidade de quem pretende a cobertura, sendo os restantes traçados da responsabilidade de quem voa. Em cada fiada podem estar assinalados todos os pontos de tomada de foto ou apenas o primeiro, o último e a indicação da sobreposição entre fotos requerida. No início de cada fiada está ainda indicado o rumo a tomar pelo avião e a altura absoluta a garantir na entrada da fiada. Juntamente com o mapa de voo, deve ser elaborada uma folha ou ficheiro de informações adicionais de onde constem os seguintes elementos:

- nome do projeto
- data pretendida para a realização do voo
- escala das fotos
- constante da câmara a utilizar
- altura absoluta do avião
- sobreposições longitudinal e lateral
- tipo de imagem (pancromático, RGB, IV, etc)

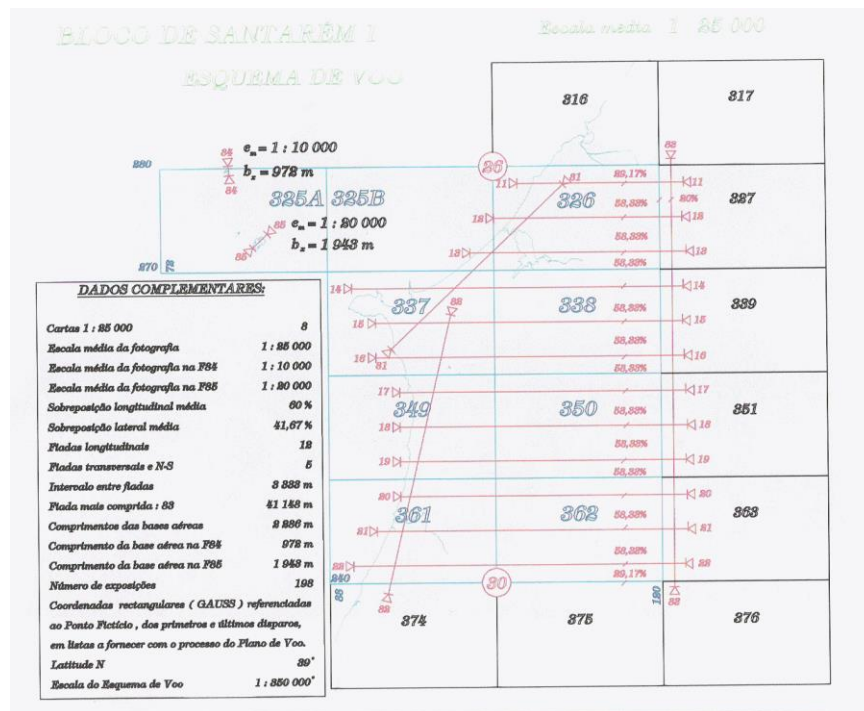


Figura 1.4.2.1 - Exemplo de esquema de voo com dados complementares (Cavaca e Sequeira, Relatório de Estágio)



1.4.2.1 Orçamento

O orçamento de um projeto fotogramétrico envolve os custos na aquisição das imagens, na georreferenciação e na restituição. Aqui, limitar-nos-emos a considerar a parte relativa ao voo (aquisição das imagens).

Ao plano de voo está normalmente associado um orçamento dos custos. Para efeitos de planeamento e de cálculo do orçamento considera-se o caso geral da cobertura de uma extensa área retangular (dimensões $L \times Q$, $L > Q$) por fiadas paralelas, assumindo ainda o terreno plano e as fotografias rigorosamente verticais.

As velocidades do avião estão normalmente expressas em nós (milhas náuticas por hora), sendo a conversão a seguinte:

$$1 \text{ nó} = 0.515 \text{ [m/s]} = 1.852 \text{ [km/h]}$$

Vejamos então como calcular as variáveis que nos permitem elaborar o mapa de voo e o orçamento.

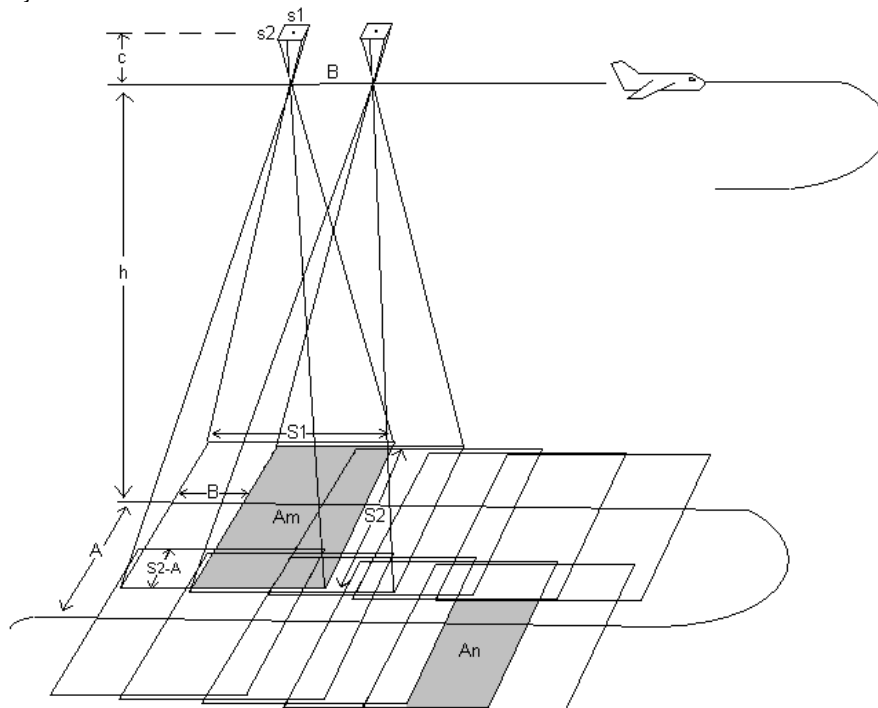


Figura 1.4.2.1.1 - Esquema do plano de voo

A- distância entre eixos de fiada

B- base real: distância entre pontos de tomada de foto

c- constante da câmara

s1- lado da fotografia na direção do voo (sem informações marginais)

s2- lado da fotografia na direção perpendicular à do voo

h- altura acima do solo

Z- cota do terreno

Zo- altura absoluta do avião

v- velocidade média do avião (durante a sessão fotográfica)

L- comprimento de uma faixa ou do bloco

Q- largura do bloco

Formulário geral para o plano de voo

módulo da escala da foto: $mf = h / c$

lado da foto no terreno ao longo da fiada : $S1 = s1 \cdot mf$

lado da foto no terreno perpendicular à fiada : $S2 = s2 \cdot mf$

base fotográfica : $b = B / mf$

altura de voo sobre o solo : $h = c \cdot mf$

altura de voo absoluta : $Zo = h + Z$

sobreposição longitudinal % : $\ell = ((S1-B)/S1) \cdot 100 = (1-B/S1) \cdot 100$

sobreposição lateral % : $q = ((S2-A)/S2) \cdot 100 = (1-A/S2) \cdot 100$

área coberta por uma foto: $Af = S1 \cdot S2 = s1 \cdot mf \cdot s2 \cdot mf$

comprimento da base aérea para $\ell\%$ de sobreposição longitudinal : $B = S1 (1 - \ell / 100)$

distância entre eixos de fiadas para $q\%$ de sobreposição lateral : $A = S2 (1 - q/100)$

número de modelos por fiada: $nm = \text{int} ((L/B) + 1)$

número de fotos por fiada: $nf = nm + 1$

número de fiadas por bloco : $nfx = \text{int} ((Q/A)+1)$

área estereoscópica coberta por um modelo : $Am = (S1-B) \cdot S2$

área de sobreposição entre modelos consecutivos : $Asm = (S1-2B) \cdot S2$

área nova no bloco, por modelo (a partir da 2ª fiada): $An = A \cdot B$

intervalo de sequência de fotos : $t[s] = B[m] / v[m/s]$ > ciclo da máquina fotográfica (2.0 seg p/camaras analógicas, varia para câmaras digitais)

tempo de exposição máximo : $dt = a \times mf/v$ (a -arrastamento admissível de 5 a 15 μm)

Especificidades para voos para ortofotomapas:

Como referido anteriormente, para efeitos de retificação fotográfica, para produção de ortofotomapas, embora em teoria não seja necessária qualquer sobreposição longitudinal para além da margem de segurança, os voos são geralmente feitos com sobreposições superiores a 70% sendo estas variáveis. Assim, o ortofotomapa final pode ser produzido a partir apenas das zonas centrais das várias fotografias aéreas as quais vão formar um mosaico fotográfico. As zonas centrais são onde as distorções radiais devidas ao relevo e à altura dos objetos são menores. Essas distorções são inerentes à projeção central, ou seja, devem-se à natureza da fotografia aérea que é aproximadamente uma projeção central.

Normalmente é adotada no plano de voo para este caso, uma distância entre eixos de fiadas (A) igual à base aérea (B). B corresponde à distância real entre dois pontos de tomada de foto sucessivos, enquanto A corresponde à distância entre as linhas que unem os pontos de tomada de foto ao longo de cada fiada, em duas fiadas adjacentes.

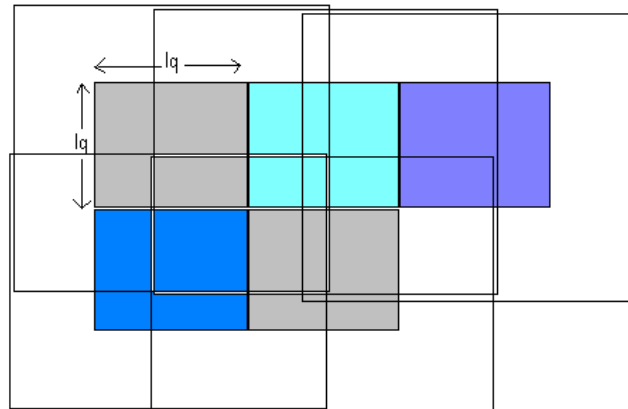


Figura 1.4.2.1.2- Mosaico de ortofotos de quadrados centrais de fotografias aéreas. As zonas coloridas são as que se aproveitam para o ortofotomapa final.

O valor da sobreposição longitudinal, ℓ , para além de no caso geral ser superior a 70%, depende ainda, da dimensão do lado do quadrado central das fotografias, lq , que se pretende aproveitar para a ortofoto final. A base aérea B toma-se, então, igual à dimensão do lado do quadrado central no terreno, ou seja, a dimensão lq na foto multiplicada pelo módulo da escala média da foto m_f :

$$B = lq \cdot m_f$$

A dimensão do quadrado central depende da distorção radial admissível na ortofoto final Δr , a qual por sua vez, depende diretamente da variabilidade (amplitude) Δh do relevo na zona coberta pela fotografia aérea (para zonas pouco acidentadas pode lq ser maior do que para zonas muito acidentadas ou com objetos elevados, como prédios altos).

$$\Delta r = \frac{r}{h_0} * \Delta h = \frac{r}{c.m_f} * \Delta h$$

$$r = \frac{\Delta r}{\Delta h} . c.m_f$$

$$\ell q = r\sqrt{2}$$

r = distancia radial máxima do quadrado central (= semi diagonal do quadrado)

Δr = distorção radial máxima admissível na ortofoto (\approx erro de graficismo 0,2 mm no produto impresso)

Δh = variação máxima de cota dentro do quadrado central

h_0 = altura de voo sobre o ponto médio da fotografia.

ℓq = lado do quadrado central

c = constante da câmara

m_f = módulo da escala da fotografia

Os custos considerados para o orçamento são a soma de:

- o número total de fotografias, N , a multiplicar pelo preço de cada fotografia ;

$$N = nfx \times nf$$

$$\text{Custo fotos} = N \times \text{preço foto}$$

- o tempo total de voo em horas, T , a multiplicar pelo preço da hora de voo (inclui eventualmente o tempo de deslocação entre a base aérea (aeródromo) e o local na ida e na volta)

$$T = (B / v) . nfx . (nf - 1) + tf . (nfx - 1)$$

$$\text{Custo tempo voo} = T \times \text{preço hora de voo}$$

tf : tempo de mudança de faixa [h]

v : velocidade do avião [km/h]

B : Base aérea [km]