

Calibração de câmaras de drones

José A. GONÇALVES¹, André PINHAL¹

¹ Faculdade de Ciências, Universidade do Porto

jagoncal@fc.up.pt; apinhal@fc.up.pt

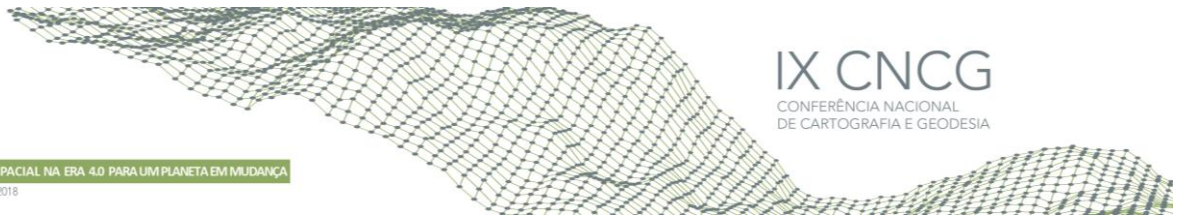
Palavras-chave: Drone, Orientação interna, Orientação externa, Pontos de apoio, Auto calibração.

Resumo: Os levantamentos com *drones* recorrem a câmaras não métricas, para as quais são conhecidos apenas valores aproximados dos parâmetros de orientação interna: distância focal e tamanho do pixel. Habitualmente inclui-se na triangulação aérea a auto calibração da câmara, com ajuste da distância focal, posição do ponto principal, coeficientes de distorção radial e tangencial e outros ainda. Frequentemente não é feita uma escolha criteriosa de quais os parâmetros necessários ou a sua correlação com os de orientação externa. Podem ocorrer situações de deformação do modelo, devido a uma má calibração da câmara, que podem ser mascaradas, especialmente com reduzido número de pontos de apoio.

Este artigo descreve uma metodologia para a determinação da distância focal de uma câmara com base em alvos de coordenadas conhecidas, sendo conhecida também a posição da câmara, obtidos por meio de medição topográfica com estação total. Ocupando os alvos a parte mais central da imagem, onde a distorção radial é menos significativa, faz-se uma orientação individual da imagem deixando como incógnitas apenas os ângulos de atitude e a distância focal. O artigo descreve testes com várias câmaras de *drones* DJI e câmaras Canon compactas. Nalguns casos os valores encontrados diferiram até 3% em relação ao valor nominal.

Numa segunda fase procedeu-se a uma calibração dos restantes parâmetros (ponto principal, distorção radial e tangencial) através de uma auto-calibração com imagens obtidas em voo, mantendo a distância focal fixa. Os voos foram feitos numa área de 50 x 50 m onde foram colocados 61 alvos com forma circular que foram coordenados com estação total. Os pontos foram identificados nas imagens através de um método baseado em segmentação e geração de centroides. Testaram-se diferentes combinações de parâmetros, tendo-se optado, para além da manutenção da distância focal inicialmente calculada, pelo uso da combinação da distorção radial e tangencial e, no caso de uma das câmaras, também o ajuste no ponto principal.

O conhecimento prévio de parâmetros robustos de calibração de uma câmara liberta os utilizadores de um processo – a auto-calibração – que quando feito em situações reais de trabalho, obriga a um maior número de pontos de controlo para ter maior confiança.



1. Introdução

A aquisição de dados geo-espaciais com veículos aéreos não tripulados, vulgo *drones*, tem-se tornado cada vez mais popular, dados os desenvolvimentos que têm existido, a sua facilidade de operação e os relativamente baixos custos do equipamento (Remondino et al., 2011). Ainda assim, a popularidade desta técnica de aquisição de informação não seria possível sem o grande desenvolvimento que também tiveram as técnicas de processamento automático de imagem, baseadas em algoritmos vindos da área da visão computacional, que permitem a obtenção de grande número de pontos de ligação fiáveis, entre imagens de uma mesma cena, mesmo com condições de observação diferentes. Um exemplo disso é o algoritmo SIFT (Scale Invariant Feature Transform) desenvolvido por Lowe (2004). Algoritmos desenvolvidos com base neste são usados em diferentes pacotes de software comercial, como o Pix4d Mapper ou o Agisoft Photoscan, que incorporam também todo um conjunto de outras operações automáticas, como a triangulação aérea, calibração de câmaras, densificação de nuvem de pontos 3D, filtragens e montagem de ortomosaicos, com intervenção mínima por parte do operador.

Devido à sua facilidade de operação estas ferramentas de aquisição de dados passaram a ser usadas por muitos utilizadores sem conhecimentos na área da fotogrametria. Normalmente, o seguimento de regras bem definidas relativamente à aquisição de dados, em particular cumprir determinadas sobreposições de fotos e uma boa distribuição de pontos de apoio, proporciona bons resultados. Contudo nem todas as situações são sempre simples, por exemplo devido às características do terreno, em que a cobertura com pontos de apoio pode não ser a ideal. São reportados problemas de deformação do modelo de superfície extraído (Jaud et al., 2016, Tournadre et al 2015, James e Robson, 2014), designados por “*bowling effect*”, que nalguns casos poderão ser claramente evidentes e que originem a sua rejeição, mas noutros possam passar despercebidas. Estes efeitos resultam da possível correlação que pode ocorrer entre parâmetros determinados durante o processamento, que possam originar soluções alternativas pouco adequadas à realidade. Podem resolver-se com maior número de pontos de controlo (James et al., 2017) ou com mais fiadas de sobreposição, mas ao mesmo tempo com mais custos de operação.

Muitos dos problemas resultam do facto de, sendo as câmaras utilizadas não-métricas, ter de ser incluído no processamento a determinação de correções a parâmetros de orientação interna e de distorção da câmara, através de um processo de auto-calibração. A excessiva liberdade que há na escolha desses parâmetros e o desconhecimento do seu efeito poderá levar, em algumas situações, a maus resultados. No caso de existir um conhecimento prévio de um conjunto de parâmetros da câmara teremos como incógnitas apenas os parâmetros de orientação externa, o que poderá permitir a redução do número de pontos de controlo a usar ou menores sobreposições de imagens. Este artigo propõe uma metodologia para a calibração de câmaras de *drones*, com uma avaliação da distância focal de forma independente.

2. Modelo de distorção utilizado

Uma câmara digital ideal gera imagens através de uma projeção central, que é modelada pelas equações de colinearidade (Remondino e Fraser, 2006). Normalmente, por uma questão de simetria de construção da câmara o ponto principal estará no centro da imagem. Assim, bastaria conhecer a dimensão do pixel no sensor e a distância focal, na mesma unidade métrica, para conhecermos a orientação interna da câmara. Podemos usar a unidade pixel, exprimindo também a distância focal nessa unidade. Iremos usar essa unidade ao longo deste trabalho.

Normalmente numa câmara não métrica, não calibrada, é conhecido um valor nominal da distância focal, podendo ser necessário dispor de um valor com melhor aproximação, que terá de ser determinado. Para além da distância focal há um conjunto de parâmetros que são necessários para modelar pequenas distorções da lente. O modelo de Brown (1971) (Remondino e Fraser, 2006) é normalmente usado para este fim, sendo o que se encontra, com uma ou outra variante, nos programas mais populares de processamento de imagens de *drones*. No presente trabalho foi utilizado o programa Agisoft Photoscan, que faz uso de um sistema de coordenadas fotográficas (x,y) , como descrito na Figura 1, com origem no ponto principal, x crescente para a direita, y para baixo, expressos em unidades de distância focal (Agisoft, 2017). A figura mostra também o sistema de coordenadas imagem, (u,v) expressas em pixels, com origem no canto superior esquerdo.

No caso das câmaras grande angular usadas em *drones* a distância focal será da ordem da dimensão dos lados da imagem, pelo que as coordenadas fotográfica (x,y) terão valores máximos da ordem da unidade. Concretamente no caso da câmara do *drone* DJI Phantom 4 Pro, com 3648 por 5472 pixels, o valor da distância focal é exatamente igual a 3648 pixels. Os maiores valores absolutos de coordenadas fotográficas serão 0,75 para x e 0,50 para y .

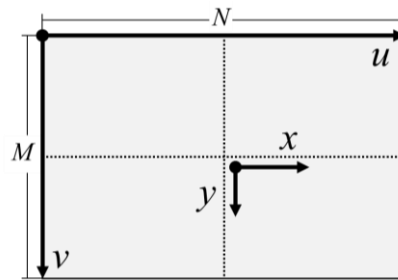


Figura 1 – Sistemas de coordenadas fotográficas (x,y) e imagem (u,v) para uma imagem com M por N pixels.

Para além da distância focal são considerados os seguintes parâmetros característicos de uma câmara:

- (c_x, c_y) Posição do ponto principal em relação ao centro da imagem,
- (k_1, k_2, k_3) Coeficientes do polinómio da distorção radial simétrica,
- (p_1, p_2) Parâmetros da distorção tangencial.

Estes são os parâmetros habituais do modelo de Brown (1971), frequentemente usados na calibração de câmaras em fotogrametria. No caso das câmaras digitais poderemos considerar ainda outros.

Nas imagens digitalizadas das câmaras aéreas analógicas, estabelece-se uma transformação afim entre coordenadas imagem e coordenadas fotográficas, usando as marcas fiduciais, que podem modelar deformações envolvidas no processo de rasterização de diapositivos. No caso das imagens digitais consideram-se também parâmetros de uma transformação afim, para resolver possíveis diferenças de escala e/ou falta de perpendicularidade entre os eixos das linhas e das colunas. Consideram-se os parâmetros de afinidade e não-ortogonalidade, que designaremos por b_1 e b_2 .

Assim, no modelo seguido pelo programa utilizado, teremos, para um par de coordenadas fotográficas (x,y) , resultantes da aplicação das equações de colinearidade, com os parâmetros de orientação externa, as coordenadas imagem corrigidas (x',y') , através dos seguintes passos de cálculo (Agisoft, 2017):

$$\begin{aligned} x' &= x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2xy, \\ y' &= y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1xy, \end{aligned} \quad (1)$$

em que $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, e finalmente as coordenadas imagem (u,v) :

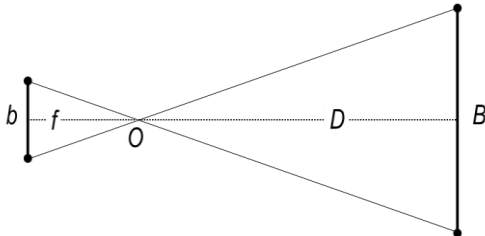
$$\begin{aligned} u &= \frac{N}{2} + c_x + x'f + x'b_1 + y'b_2, \\ v &= \frac{M}{2} + c_y + y'f, \end{aligned} \quad (2)$$

Poderão ainda ser considerados parâmetros adicionais, 2 para a distorção tangencial e 1 para a radial, para admitir um polinómio de maior grau (Agisoft, 2017). Ao todo teremos assim um total de 13 parâmetros. Vários destes parâmetros podem ter efeitos semelhantes, que por sua vez se combinam com os efeitos de pequenas alterações nos parâmetros de orientação externa. Num processo de auto-calibração de uma câmara a determinação dos parâmetros de orientação externa é feita em simultâneo com a determinação destes parâmetros de orientação interna. Facilmente ocorrem correlações entre estes parâmetros, sendo possíveis diferentes combinações que se ajustem às medidas de pontos de controlo. Um exemplo típico é o da relação entre a distância focal e a altura da câmara, nas fotografias verticais. Um ligeiro aumento na coordenada Z do centro de projeção pode ser compensada por um ligeiro aumento da distância focal na mesma proporção. Naturalmente que a geometria da imagem muda com a variação da distância focal, mas uma má distribuição de pontos de apoio juntamente com os erros de medição, pode originar soluções bem ajustadas localmente, mas não adequadas globalmente.

O processo de calibração apresentado neste artigo contempla em primeiro lugar uma determinação independente da distância focal. Uma vez fixado um valor para a distância focal procede-se a uma autocalibração, com imagens adquiridas em voo, sobre uma área com muitos pontos de apoio marcados. Descrevem-se a seguir as duas componentes do processo, juntamente com os resultados obtidos para algumas câmaras analisadas.

3. Calibração da distância focal

O processo que se estabeleceu baseia-se na medição de comprimento de uma linha plana de dimensão conhecida (B). Idealmente este método faria uso de imagens obtidas com o eixo da câmara ortogonal ao plano onde se encontra essa linha. Conhecida a distância da câmara (D) ao plano e medida a dimensão do objeto na imagem (b) facilmente se estabelece uma relação de triângulos que permite obter o valor da distância focal (f), como se mostra na Figura 2:



Através de uma relação de triângulos poderemos obter a distância focal, pela expressão (3):

$$f = D \cdot b/B \quad (3)$$

Figura 2 – Imagem (b) de um comprimento B , por uma lente de distância focal f à distância D do centro de projeção O .

Várias questões se podem levantar de imediato. Uma refere-se a que a medição do comprimento na imagem é afetada por possíveis distorções (radial e tangencial, por exemplo), que são desconhecidas. No caso das câmaras que estão a ser estudadas as distorções são pequenas e só adquirem valores com algum significado longe do centro da imagem. Assim, se o objeto se encontrar na parte mais central, desprezar-se-ão, para já, essas distorções. Posteriormente, após a conclusão da calibração, com a avaliação de distorções, poderá ser avaliada a validade da suposição que se fez, eventualmente corrigir a medida e entrar num processo iterativo.

A distância entre o plano do objeto e a câmara pode ser medida com rigor, por exemplo até à face da lente. Contudo, uma vez que não há informação detalhada sobre a posição real do centro de projeção, que poderá ser num ponto mais interior da lente, teremos um pequeno erro na distância D . No caso presente, uma vez que a distância utilizada é de mais de 25 metros, e que essa incerteza será de, no máximo de 2 cm, o erro relativo máximo é de 0,08%.

A aquisição de imagens para determinar a distância focal foi efetuada no Observatório Astronómico da Universidade do Porto, com a câmara montada num pilar, fotografando a parede de um edifício. Devido à localização dos pilares não permitir apontar a câmara ortogonalmente à parede seguiu-se uma abordagem diferente da acima referida. Marcaram-se 12 pontos na parede, que foram levantados com uma estação total. Com a estação total foi também medida a posição tridimensional do centro da lente. Utilizou-se como sistema de coordenadas objeto um sistema com eixos X e Y no plano da parede (Y na vertical) e Z ortogonal.

Adquirida uma imagem, tentando que as marcas fiquem na parte mais central, procede-se à determinação dos seus parâmetros de orientação externa (“*space resection*”, na designação inglesa), com base nas coordenadas imagem das marcas, fixando as coordenadas da câmara e deixando livres os 3 ângulos de atitude, juntamente com a distância focal. Utilizaram-se as equações de colinearidade linearizadas (Berberan, 2003), a que foi acrescentada a derivada parcial relativamente à distância focal. Temos assim um sistema de 24 equações (2 por ponto) e 4 incógnitas, que é resolvido pelo método dos mínimos quadrados, originando resíduos que permitem avaliar a qualidade do resultado. A Figura 3 mostra uma das fotos onde se vê o edifício com as 12 marcas e uma ampliação que mostra em mais pormenor 6 marcas.



Figura 3 – Marcas utilizadas para a calibração: (A) Foto completa com as 12 marcas, (B) visão ampliada de 6 marcas.

Foram testadas 3 tipos de câmaras. Uma delas foi a câmara do drone DJI Phantom 4 Pro (fixa no drone), da qual foram testadas 3 unidades diferentes. Testou-se também uma câmara DJI Zenmuse X4S, cujas características são em tudo semelhantes à câmara do Phantom 4, e que foi montada num drone DJI Matrice 200. Testou-se ainda uma câmara compacta do modelo Canon Powershot SX26, que foi usada de forma autónoma, mas que é também frequentemente usada em drone de asa fixa. A Figura 4 mostra as 3 câmaras usadas. O Quadro 1 mostra as características das câmaras e os valores obtidos no ajustamento: nova distância focal e erros médios quadráticos (EMQ) obtidos no ajustamento, no espaço imagem.



Figura 4 – Câmaras utilizadas: (A) Phantom 4 Pro, (B) DJI X4S montada no *drone* Matrice 200, (C) Canon Powershot SX260

Quadro 1 – Características das câmaras usadas e resultados da determinação da distância focal corrigida

Câmara	Dimensão do sensor	Dist. focal inicial	Dist. focal corrigida	Varição relativa	EMQx, EMQy (pixeis)
DJI Phantom 4 Pro #1	5472 x 3648	3648	3650,2	+0,06 %	0,25, 0,23
DJI Phantom 4 Pro #2	5472 x 3648	3648	3655,8	+0,21 %	0,28, 0,26
DJI Phantom 4 Pro #3	5472 x 3648	3648	3649,8	+0,05 %	0,23, 0,29
DJI Matrice200 – X4S	5472 x 3648	3648	3677,7	+0,80 %	0,28, 0,18
Canon SX260	4000 x 3000	2904	2995,7	+3,21 %	0,24, 0,40

As variações na distância focal das câmaras dos *drone*s Phantom 4 Pro são pequenas, em dois deles mesmo desprezáveis, de acordo com o rigor que se poderia esperar para este método. No caso da câmara X4S há uma clara diferença na distância focal, que terá de ser considerada. A câmara Canon apresenta uma variação ainda maior, de mais de 3%. Ao contrário das restantes, esta tem uma lente com zoom, tendo sido usada a menor distância focal. A existência de partes móveis da lente poderá explicar a diferença em relação ao valor nominal.

4. Auto-calibração

A determinação dos restantes parâmetros de calibração das câmaras baseia-se num processamento de orientação de imagens aéreas de um local com muitos alvos coordenados. É feito o ajustamento de feixes, com os pontos de apoio e com uma auto-calibração, mantendo a distância focal obtida no passo anterior. O trabalho decorreu num parque de estacionamento plano. Foram colocadas ao todo 61 marcas da seguinte forma: 36 numa grelha de 6 por 6, com espaçamento entre marcas de 10 metros; um segundo conjunto de 25 marcas, em grelha de 5 por 5, também com 10 metros de espaçamento, colocadas a meio das quadrículas da primeira grelha. A Figura 5-A mostra a distribuição dos pontos. As marcas são círculos pretos, com 10 cm de diâmetro, em papel, coladas sobre azulejos (Figura 5-B). Depois de colocados os azulejos no chão, houve o cuidado de não alterar as suas posições durante todo o trabalho. A Figura 5-C mostra uma das imagens com as marcas já identificadas, pelo processo automático descrito abaixo.

As marcas foram levantadas com estação total, num sistema de coordenadas local. Estas têm um pequeno sinal no centro, para colocação do bastão da estação total. Foi utilizado um pequeno prisma refletor, montado sobre um bastão fino com apenas 10 cm de altura. Os pontos foram todos coordenados, com um rigor estimado de 2 a 3 mm.

Foram efetuados testes apenas para 3 das câmaras do teste anterior: P4P #1, P4P #2 e M200, que eram as que estavam disponíveis. Foram feitos voos sobre as marcas, nas direções norte-sul e este-oeste (no caso do M200 também diagonalmente), à altura de 23 metros a que correspondeu um pixel no terreno de 6,3 mm. As sobreposições longitudinal e lateral foram de 80% e 70%. Foi utilizada uma velocidade do *drone* baixa para minimizar efeitos de arrastamento. Foram mantidas apenas as fotografias que tinham o seu centro de projeção no interior do quadrado definido pelas 4 marcas maiores representadas na Figura 5.

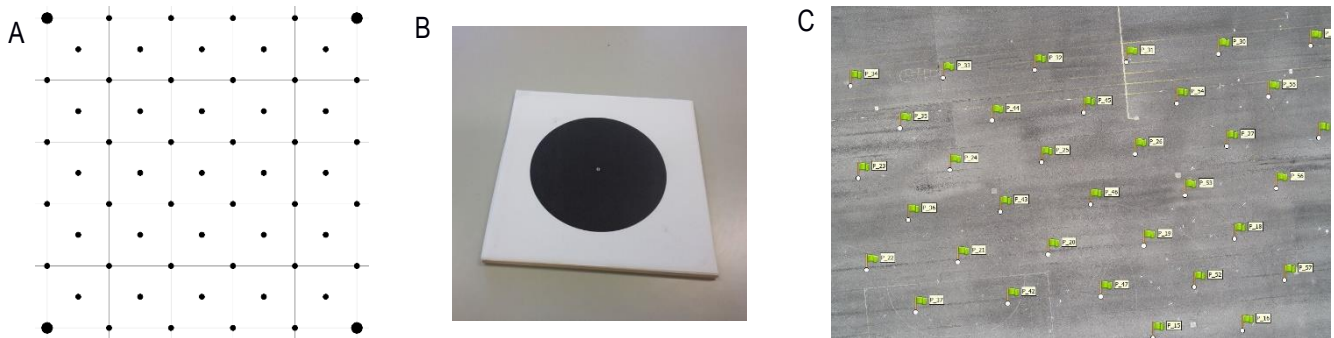


Figura 5 – Marcas utilizadas para a calibração: A – Grelhas com 61 marcas, B – marca circular com 10 cm colada num azulejo, C – Pontos identificados numa das fotos.

A identificação das marcas foi feita automaticamente, através de segmentação, definição das regiões correspondentes às marcas e cálculo dos centroides. Há uma primeira fase manual em que as 4 marcas dos cantos são identificadas por um operador em algumas das fotografias em que são observadas. Isto permite uma primeira triangulação, que fornecerá orientação externa razoavelmente aproximada. Com esses parâmetros todas as marcas são projetadas para todas as fotos em que se localizem, com uma margem em relação aos limites da fotografia, para evitar marcas cortadas. É extraído um quadrado (de 200x200 pixels nos testes efetuados, mas que poderia ser menor) que se espera que contenha a marca.

A Figura 6 mostra a sequência na identificação automática das marcas. É feita uma segmentação do quadrado por conversão de 256 bits para 2 bits com um valor de corte: empiricamente foi escolhido o valor DN=200. A Figura 6B mostra o resultado, que foi melhorado por eliminação de pequenos polígonos, com área inferior a uma tolerância, tendo sido usado o valor de 20 pixels (Figura 6C). É corrido um algoritmo de identificação de regiões, na forma de polígonos, sendo depois calculado o centroide de cada polígono (Figura 6D). Dos vários polígonos que resultam interessa-nos os originalmente pretos, com área dentro de um intervalo esperado (à volta de 150 pixels, para a altura de voo 23 m), e próximo do centro da área. Nestas operações de processamento de imagem foram utilizados programas da biblioteca GDAL.

Neste processo espera-se que os pontos extraídos tenham um bom rigor uma vez que o centroide é muito estável, isto é, se houver pequenas alterações na fronteira da área extraída a posição do centroide é pouco afetada, a não ser que essas alterações fossem sistemáticas, por exemplo com pixels mal classificados, todos do mesmo lado do círculo.

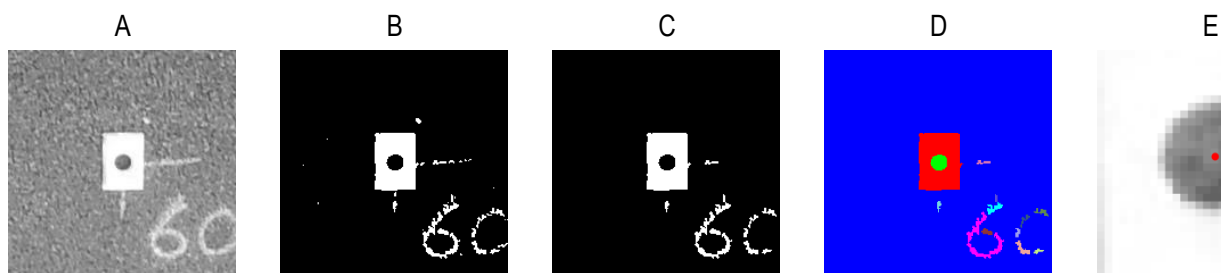


Figura 6 – Sequência da obtenção automáticas dos pontos: A - quadrado extraído depois de projetado o ponto do terreno para a imagem, B - resultado do algoritmo threshold, C - resultado do algoritmo Sieve (elimina áreas pequenas), D - Identificação dos diferentes polígonos para os quais são calculados centroides, E - centroide sobre a marca depois da correta identificação.

Ao todo existiam 61 marcas no terreno, cada uma delas aparecendo em várias fotos. Temos assim um número de observações elevado, que nos vários testes foi superior a 1000. Uma das vantagens da automatização é a redução do tempo de trabalho manual. Outra será o rigor do processo sistemático de extração de centroides.

Os pontos obtidos automaticamente foram importados para o projeto no Photoscan e procedeu-se ao ajustamento de feixes, com auto-calibração da câmara, sem atuar na distância focal. Foram atribuídos pesos às observações através da indicação da precisão das medidas envolvidas: 2 mm para as marcas no terreno, 0,3 pixels para as coordenadas imagem das marcas.

Avaliaram-se vários cenários de calibração, sendo o primeiro (A) o de executar a otimização da orientação externa sem considerar auto-calibração. Uma segunda abordagem (cenário B) foi a de executar a otimização com a opção “adaptive model fitting” do programa, que escolhe a combinação mais adequada de acordo com determinados critérios (não documentados). Nos vários testes efetuados foram sempre escolhidos pelo programa os parâmetros b1 e b2, com um efeito pequeno sobre as

coordenadas imagem. Repetiu-se o ajuste sem eles, no que se chamou cenário C. No caso do Matrice 200 o programa tinha também sugerido o ajuste no ponto principal. Para este último, testou-se um cenário D, que para além de não considerar b1 e b2, também não considerou o ponto principal. O Quadro 2 contém os resultados obtidos: os resíduos em mm referem-se às coordenadas terreno das 61 marcas, em planimetria (norma dos resíduos em X e Y) e em altimetria (Z). Os resíduos em pixels referem-se à reprojeção das marcas para o espaço imagem, também na forma de norma dos resíduos em linha e coluna. São sempre dados a raiz quadrada da média quadrática (EMQ) e o valor máximo absoluto.

Quadro 2 – Resíduos obtidos nos 3 testes efetuados (dois Phantom 4 e um Matrice 200) em vários cenários de escolha de parâmetros de calibração da câmara. Valores de EMQ e máximo absoluto.

Drone	Cenário e parâmetros usados	rXY (mm)		rZ (mm)		r-img (pix)	
		EMQ	Max	EMQ	Max	EMQ	Max
P4P #1 102 fotos 1234 pontos	A: sem calibração	3,6	9,7	13,3	38,6	1,16	4,96
	B: $k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, b_1, b_2$	2,1	5,1	2,3	11,5	0,47	1,34
	C: k_1, k_2, k_3, p_1, p_2	2,2	5,0	2,4	11,4	0,47	1,33
P4P #2 81 fotos 1271 pontos	A: sem calibração	3,7	10,7	4,8	16,8	0,89	3,05
	B: $k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, b_1, b_2$	2,2	4,8	2,4	9,7	0,44	1,44
	C: k_1, k_2, k_3, p_1, p_2	2,6	6,6	2,4	10,4	0,47	1,44
M200 141 imagens 1922 pontos	A: sem calibração	3,4	8,0	4,8	36,9	1,24	5,80
	B: $c_x, c_y, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, b_1, b_2$	2,2	5,4	2,0	7,9	0,46	1,47
	C: $c_x, c_y, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2$	2,3	5,6	1,9	7,7	0,47	1,41
	D: k_1, k_2, k_3, p_1, p_2	2,7	5,9	2,2	6,7	0,55	1,82

Depois de se analisar o efeito dos parâmetros b1 e b2 observou-se que faziam correções sub-pixel. A sua não consideração originou resíduos muito semelhantes (cenário C por oposição ao cenário B). Os resíduos da reprojeção, a negrito, revelam exatamente isso, uma vez que praticamente não há alterações (centésimo do pixel).

A câmara do Matrice 200 foi a única em que foi proposto pelo “adaptive model fitting” a atuação sobre o ponto principal. O mesmo aconteceu em testes (não apresentados) com subconjuntos de pontos ou de fotos. A não consideração dos parâmetros c_x, c_y (cenário D) revelou uma degradação dos resíduos, pelo que se conclui pelo interesse de os incluir.

Finalmente, e a fim de garantir a não existência de enviesamentos, repetiu-se, o processo da auto-calibração, mas deixando alguns pontos como pontos de verificação, portanto fora do processo de ajustamento. Concretamente foram usado como pontos de verificação os 25 da grelha interior e como pontos de controlo os restantes 36 da grelha exterior. Para os cenários C apresentam-se no Quadro 3 os EMQ encontrados em planimetria e altimetria. Como se pode observar, os EMQ nos pontos de controlo são muito semelhantes aos do cenário C do quadro 2 e os EMQ nos pontos de verificação são também muito semelhantes, o que evidencia que a solução encontrada não sofre enviesamentos.

Quadro 3 – EMQ em planimetria e altimetria, nos 36 pontos de controlo e nos 25 pontos de verificação

Câmara	Pontos de controlo		Pontos de verificação	
	EMQ XY (mm)	EMQ Z (mm)	EMQ XY (mm)	EMQ Z (mm)
DJI Phantom 4 Pro #1	2,2	2,8	2,3	3,0
DJI Phantom 4 Pro #2	2,7	3,0	2,9	2,0
DJI Matrice200 – X4S	2,4	2,0	2,3	2,2

5. Conclusões

Efetou-se a calibração de várias câmaras utilizadas em *drones*, através de uma metodologia em dois passos, um primeiro com a determinação da distância focal de forma independente e os restantes num processo de auto-calibração com imagens obtidas em voo.

No caso da calibração da distância focal das câmaras acopladas aos *drones* DJI Phantom 4 Pro, observou-se que em duas delas o valor nominal foi praticamente mantido, tendo a outra tido uma correção muito pequena, de apenas 8 pixels. As restantes duas câmaras tiveram correções superiores em particular a Canon SX260, possivelmente devido à lente com zoom.

A metodologia proposta para a calibração dos restantes parâmetros das câmaras, requer algum trabalho preparatório de campo, mas em gabinete possui um grau elevado de automatização na componente de identificação das marcas. Nos três casos de estudo foram identificadas com sucesso todas as marcas pretendidas (mais de 1000 pontos identificados em cada caso). Os resultados obtidos foram bons, com parâmetros que originam uma projeção para o espaço imagem com precisão subpixel da ordem de 0,3 pixels. Os parâmetros de calibração das câmaras obtidos serão mantidos para futuros trabalhos, em que se pretende evitar a autocalibração. Este procedimento poderá ser repetido periodicamente para avaliar a manutenção dos parâmetros ao longo do tempo.

Agradecimentos

Agradecemos aos colegas Gil Gonçalves e Luís Seco o empréstimo dos drone Phantom 4 Pro.

Referências Bibliográficas

- Agisoft (2017). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.3. http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_3_en.pdf
- Berberan, A., 2003. Elementos de fotogrametria aplicada à aquisição de informação geográfica. ISBN 972-95873-5-3. Edição de autor, Lisboa, 2003.
- Brown, D.C., 1971. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 37(8), pp.855-866.
- Remondino, F., and C. Fraser. 2006. "Digital Camera Calibration Methods: Considerations and Comparisons. *ISPRS – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXVI (5)*: 266–272.
- James, M. R., and S. Robson. 2014. Mitigating Systematic Error in Topographic Models Derived from UAV and Ground-Based Image Networks. *Earth Surface Processes and Landforms* 39 (10): 1413–1420. doi: 10.1002/esp.3609.
- James, M. R., S. Robson, S. d'Oleire-Oltmanns, and U. Niethammer. 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology* 280: 51–66. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.11.021
- Tournadre, V., Pierrot-Deseilligny, M., Faure, P.H., 2015. UAV linear photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015, 40, 327–333.
- Lowe, D., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60 (2), 91–110.
- Jaud, M., S. Passot, R. Le Bivic, C. Delacourt, P. Grandjean, and N. Le Dantec. 2016b. Assessing the Accuracy of High Resolution Digital Surface Models Computed by PhotoScan and MicMac in Sub-Optimal Survey Conditions. *Remote Sensing* 8 (6): 465. doi: 10.3390/rs8060465.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D., 2011. UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(1), C22.