



Aspectos Teóricos da Calibração Geométrica em Órbita de Sensores Remotos Imageadores Lineares do Tipo *Pushbroom*

Theoretical Aspects of the On-Orbit Geometric Calibration of Pushbroom Linear Imaging Remote Sensors

Tiago Lima Rodrigues¹

¹ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, Brasil. tiagorodrigues@ufpr.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3037-9037>

Recebido: 06.2021 | Aceito: 11.2021

Resumo: A fim de que o completo potencial de exatidão geométrica de informações espaciais extraídas a partir de imagens de sensores remotos lineares orbitais do tipo *pushbroom* possa ser alcançado, é imprescindível que todos os erros sistemáticos presentes no processo de aquisição sejam levados em consideração. Além disso, a proximidade dos valores com a realidade física é essencial. No contexto da orientação rigorosa, os parâmetros de orientação interior (POI) devem ser adequadamente identificados e a estimativa de seus valores deve ser feita antes e imediatamente após o sensor ser colocado em órbita. Da mesma forma, devem ocorrer o refinamento dos parâmetros de montagem (PM) e o refinamento do alinhamento das bandas espectrais (ABE). Em órbita, mediante estudo prévio de periodicidade realizado por cada agência responsável, de tempos em tempos faz-se necessárias novas estimativas para verificação de alterações nos valores. Isso não somente por conta da alteração das características físicas do ambiente, mas também pelo próprio desgaste dos componentes internos constituintes. Esta atividade é denominada calibração geométrica em órbita. Neste artigo foram apresentados os principais aspectos teóricos envolvidos no processo, sem, contudo pretender esgotar o assunto.

Palavras-chave: Sensores remotos imageadores lineares. Parâmetros de orientação interior. Revisão teórica.

Abstract: In order that the full potential of geometric accuracy of spatial information extracted from images of orbital pushbroom linear remote sensors can be achieved, it is essential that all systematic errors present in the data acquisition process are taken into account. In addition, the proximity of values to physical reality is essential. In the context of the rigorous orientation, the interior orientation parameters must be properly identified and their values must be estimated before and immediately after the sensor is placed on orbit. Likewise, the refinement of the mounting parameters and the refinement of the alignment of the spectral bands must occur. On orbit, from time to time, new estimates are necessary to verify changes in values. This is not only due to change in the physical characteristics of the environment, but also due to the wear and tear of the constituent internal components. This activity is called on orbit geometric calibration. In this paper the main theoretical aspects involved in the process were presented, without, however, intending to exhaust the subject.

Keywords: Linear imaging remote sensors. Interior orientation parameters. Theoretical review.

1 INTRODUÇÃO

Imagens obtidas por plataformas orbitais são amplamente utilizadas como fonte de aquisição de dados espaciais da superfície terrestre em diferentes áreas do conhecimento. Como exemplo de dados, pode-se citar coordenadas, distâncias, perímetros e áreas. Entretanto, para que haja a possibilidade da extração de tais informações de maneira mais confiável possível, é necessário que as imagens sejam orientadas com relação a um Sistema de Referência do espaço objeto. No âmbito da orientação dita rigorosa há dois tipos de modelos, a saber: o modelo Posição-Rotação (PR) e o modelo Órbita-Atitude (OA). Em ambos, tem-se a utilização dos

parâmetros de orientação exterior (POE) e dos parâmetros de orientação interior (POI). Para o modelo do tipo OA acrescenta-se ainda o uso dos parâmetros de montagem (PM).

Os valores dos PM e dos POI são normalmente estimados a partir de processos de medição em laboratório, previamente ao lançamento do satélite. No entanto, a fim de que o completo potencial de exatidão geométrica de informações espaciais extraídas das imagens possa ser alcançado, os valores podem ser refinados/atualizados periodicamente, após o satélite estar em órbita. Da mesma forma, pode-se considerar o refinamento dos alinhamentos entre as bandas espectrais (ABE). Assim sendo, podem-se ter três tipos de calibração geométrica em órbita, uma relacionada à atualização dos POI, outra para o refinamento dos PM e outra relacionada ao refinamento dos ABE (JACOBSEN, 1997; STOREY, CHOATE; LEE, 2014; ESA, 2020).

A periodicidade em qualquer que seja o tipo de calibração geométrica em órbita torna-se necessária em função de dois problemas que contribuem para a instabilidade dos valores nominais, a saber: as acelerações e mudanças ambientais drásticas impostas durante o lançamento do satélite, e a influência termal do Sol quando o satélite encontra-se em órbita (BALTSAVIAS, ZHANG; EISENBEISS, 2006; JACOBSEN, 2005). É importante mencionar que as atividades de calibração e validação (Cal/Val) são essenciais para o controle de qualidade de uma determinada missão, principalmente na fase de comissionamento (primeiros meses de atividade).

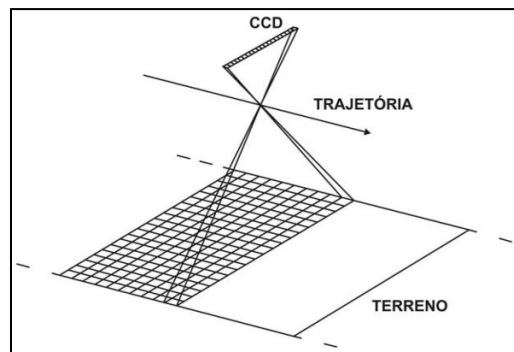
Cabe ainda ressaltar que dentro do contexto do processo de orientação dito generalizado, a utilização de funções racionais tem sido adotada por parte da maioria das agências que comercializam as imagens. Como exemplo pode-se citar a Digital Globe e a JAXA (*Japan Aerospace eXploration Agency*). Conforme pode ser visto em Tao e Hu (2001) e Fraser, Dial e Grodecki (2006), a estimativa dos coeficientes de forma independente do terreno se dá com o uso de um modelo físico. Consequentemente, também há um cenário de dependência dos valores dos POI e dos PM. Quanto mais próximos os valores estiverem da realidade física, melhor será a qualidade dos coeficientes das funções racionais.

Diante do exposto, este trabalho tem por objetivo apresentar os principais aspectos teóricos envolvidos nos processos de calibração geométrica em órbita de sensores remotos lineares do tipo *pushbroom*, com arranjo de constituição em linha. Embora se tenha três tipos de calibração geométrica, conforme mencionado, somente serão apresentados os tipos referentes às atualizações dos POI e refinamentos dos PM. Também é importante mencionar que o assunto é aqui apresentado sem a pretensão de esgotá-lo.

2 SENSORES REMOTOS LINEARES ORBITAIS DO TIPO *PUSHBROOM*

Os sensores remotos lineares orbitais do tipo *pushbroom* utilizam uma ou mais matrizes de detectores CCD (*Charge-Coupled Device*), em arranjo de linha reta, no plano focal da câmera para a aquisição das imagens. Tal arranjo de linha reta é orientado perpendicularmente à linha de deslocamento do satélite em sua órbita (Figura 1).

Figura 1 – Ilustração do esquema de funcionamento de um sensor remoto linear orbital do tipo *pushbroom*.

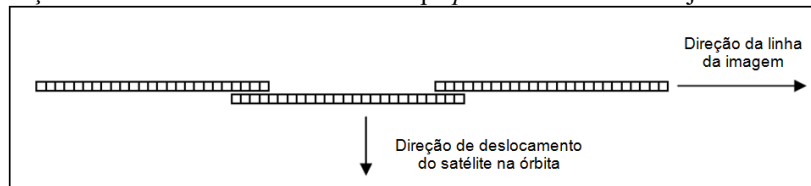


Fonte: Adaptada de Wolf e Dewitt (2000).

Segundo Poli (2005), há diversos tipos de configurações dos arranjos das matrizes de CCD no plano focal, podendo ser classificados em: arranjos de constituição em linha e arranjos de matriz escalonada. A constituição em linha consiste em um arranjo no qual uma ou mais matrizes de CCD formam uma linha da

imagem. No caso de múltiplas matrizes, estas são colocadas uma ao lado da outra, ao longo de uma única linha, conectadas por uma pequena sobreposição (Figura 2). Sensores *pushbroom* como o os embarcados nos satélites IKONOS-2, QUICKBIRD, GEOEYE-1, ALOS-2, WORLDVIEW-1, 2, 3 e 4, ZIYUAN 3-01, CBERS 2B e CBERS 4A são exemplos de sensores com múltiplas matrizes de arranjo de constituição em linha.

Figura 2 – Ilustração de um sensor remoto linear do tipo *pushbroom* com arranjo de constituição em linha.



Fonte: Adaptado de Kocaman (2007).

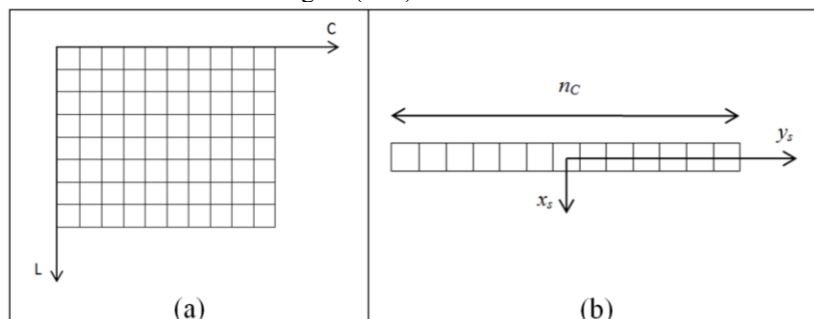
Uma consequência do princípio de funcionamento dos sensores *pushbroom* é que as imagens bidimensionais são formadas a partir da associação das imagens originalmente unidimensionais, adquiridas em intervalos regulares de tempo pelas matrizes de CCD. Quando este tipo de sensor é embarcado em um satélite, a aquisição das imagens unidimensionais é realizada à medida que o satélite se desloca ao longo de sua órbita. Desta forma, diferentes POE são definidos durante o processo de construção das imagens bidimensionais. Ainda na Figura 1 é possível verificar a ilustração do processo de formação de uma imagem obtida a partir de um sensor remoto linear orbital do tipo *pushbroom* com uma única matriz de CCD de arranjo de constituição em linhas.

3 SISTEMAS DE REFERÊNCIA DO ESPAÇO IMAGEM UTILIZADOS

Dentro do contexto da calibração geométrica em órbita são utilizados diferentes Sistemas de Referência relacionados ao espaço imagem. Na sequência de uso dentro do processo tem-se, primeiramente, o Sistema relacionado às imagens, denominado Sistema de Referência da Imagem (SRI). Este é associado à matriz bidimensional dos pixels da imagem em um sistema de coordenadas de coluna (C) e linha (L). Como origem pode-se ter ou o centro geométrico do pixel mais acima e à esquerda da imagem, ou mais comumente o canto superior esquerdo deste. A direção dos eixos L e C são coincidentes com a direção das colunas e das linhas da imagem, respectivamente. Na Figura 3a a seguir são apresentadas a origem e a direção dos eixos no SRI.

O sistema utilizado posteriormente ao SRI é o Sistema de Referência da Matriz de CCD (SRM), sendo bidimensional e com origem no centro geométrico da matriz de CCD. O eixo x_s é coincidente com a direção perpendicular à linha da imagem (eixo L) e a direção do eixo y_s é paralela a esta (Figura 3b).

Figura 3 – Sistema de Referência da Imagem (SRI) e Sistema de Referência da Matriz de CCD (SRM).



Fonte: Rodrigues et al. (2017).

As Eq. (1) e (2) a seguir, indicadas por Rodrigues et al. (2016), apresentam a transformação de coordenadas de um ponto j no SRI para o SRM, para uma dada matriz de CCD i , no caso do sensor de varredura linear com arranjo de constituição em linha.

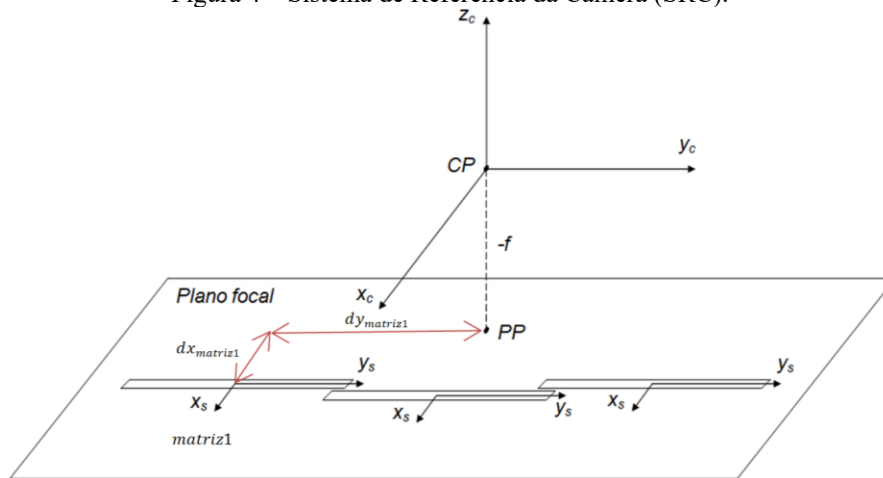
$$x_{sij} = PS \cdot L_j - \text{int}(L_j) \cdot PS + 0,5 \cdot PS = [L_j - \text{int}(L_j) + 0,5] \cdot PS, \tag{1}$$

$$y_{sij} = PS \cdot C_j - \frac{(n_{c_i}-1)}{2} \cdot PS = \left(C_j - \frac{(n_{c_i}-1)}{2}\right) \cdot PS, \tag{2}$$

nas quais x_{sij} e y_{sij} são as coordenadas de um ponto j no SRM para uma dada matriz de CCD i , PS é o tamanho do pixel na matriz de CCD i em mm (considerando um pixel quadrado) e n_{c_i} é o número de colunas da imagem referente à matriz de CCD i em questão.

Dispondo-se das medidas de um ponto j no SRM em cada matriz de CCD, utiliza-se posteriormente o Sistema de Referência da Câmera (SRC). Este sistema é tridimensional e dextrogiro, com as direções dos eixos x_c e y_c paralelas às direções dos eixos x_s e y_s do SRM, respectivamente, e com origem no Centro Perspectivo (CP) do sensor, equivalente ao ponto nodal posterior da objetiva (RODRIGUES et al., 2016). A projeção do CP no plano focal é denominada de ponto principal (PP) e a distância entre o CP e o PP é a distância focal f . Na Figura 4 tem-se a ilustração do SRC e de três SRM para um plano focal com 3 matrizes de CCD alocadas.

Figura 4 – Sistema de Referência da Câmera (SRC).



Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. (2017).

Para a transformação de coordenadas do SRM para o SRC, pode-se utilizar a Eq. (3), indicada por Rodrigues et al. (2016), considerando um caso ideal de uma matriz de CCD i isenta de distorções.

$$\begin{bmatrix} x_{c_j} \\ y_{c_j} \\ z_{c_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{s_{ij}} \\ y_{s_{ij}} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx_i \\ dy_i \\ -f \end{bmatrix}, \tag{3}$$

na qual dx_i e dy_i são as translações do centro de uma dada matriz de CCD i para o PP no plano focal.

4 ORIENTAÇÃO INTERIOR

A orientação interior, ou modelo de sensor, está relacionada à definição de parâmetros geométricos internos ao sensor, os quais são necessários para a reconstrução dos feixes de raios que ligam pontos nos espaços objeto e imagem (MIKHAIL, BETHEL; MCGLONE, 2001). A orientação interior é realizada desde que se tenham definidos os POI. Na grande maioria dos sensores de varredura linear orbitais, conforme mencionado anteriormente, o arranjo da(s) matriz(es) de CCD no plano focal é do tipo de constituição em linha, no qual uma ou mais matrizes formam uma única linha da imagem (POLI, 2005).

No caso de múltiplas matrizes, estas são colocadas uma ao lado da outra, ao longo da direção de um único eixo (normalmente o eixo x_c), conectadas por uma pequena sobreposição. Em teoria, no caso de múltiplas matrizes de CCD, estas devem ser exatamente alinhadas ou no mínimo paralelas, sendo as posições das mesmas em relação ao PP conhecidas no plano focal (JACOBSEN, 2005).

Porém, durante a fabricação imperfeições podem ocorrer, gerando pequenos deslocamentos

bidirecionais, rotações, alterações de tamanho e até afastamento de linearidade (flexão) das matrizes (KOCAMAN, 2007; POLI, 2005; JACOBSEN, 2005).

As características geométricas bem como os efeitos das imperfeições de fabricação citadas constituem-se em erros sistemáticos. Parâmetros relacionados a estes erros devem fazer parte do conjunto de POI de sensores remotos lineares *pushbroom*, podendo ser estimados antes do lançamento do satélite, a partir de uma calibração em laboratório. Porém, mesmo que haja este procedimento, frequentes reestimativas dos valores após o satélite ser colocado em órbita também devem ocorrer, isto é, atualizações. Cabe ressaltar que na fase de comissionamento, ou seja, no período inicial do satélite em órbita, as atividades de calibração e validação (Cal/Val) são imprescindíveis para que se tenha um estudo de capacidade geométrica das imagens, com e sem apoio de campo (georreferenciamento direto).

Ao considerar os diferentes POI dos sensores de varredura linear orbitais, Poli (2005) propôs uma separação para os mesmos, indicando os que estão relacionados com o sistema óptico e os que estão relacionados com as matrizes de CCD. Os POI relacionados ao sistema óptico compreendem as coordenadas do PP no plano focal, a variação da distância focal (Δf), os parâmetros de distorção radial simétrica e descentrada do sistema de lentes (K_1, K_2, K_3 e P_1, P_2) e os coeficientes das variações de escala na direção dos eixos x_c e y_c (s_x e s_y). Já os POI relacionados com as matrizes CCD são os fatores de escala da mudança na dimensão do pixel na direção de x_s e y_s (p_x e p_y), o deslocamento bidimensional (Δx e Δy) e as rotações (θ) das matrizes de CCD no plano focal com relação às suas posições nominais e o ângulo central do efeito da flexão (não linearidade geométrica - δ). Ainda segundo Kocaman (2007), os parâmetros de translação do centro geométrico da matriz de CCD em relação ao PP também podem ser considerados POI relacionados com as matrizes de CCD. A seguir são apresentados os efeitos e os equacionamentos.

4.1 Parâmetros de orientação interior relacionados ao sistema óptico

Primeiramente, com relação à posição do PP, conforme mencionado anteriormente, esta é definida pela projeção do CP da câmera no plano focal. Em um sistema de lentes ideal, o plano da imagem é exatamente perpendicular ao eixo óptico. Na realidade isto não ocorre. Considerando o sistema de lentes real, com imperfeições, o PP será deslocado de sua posição nominal, assumindo coordenadas x_0 e y_0 , as quais são obtidas a partir da calibração da câmera em laboratório, utilizando, por exemplo, um goniômetro óptico. Estas coordenadas podem sofrer variações quando o sensor é colocado em órbita, e neste caso, podem ser refinadas. As correções dos efeitos sistemáticos causados pelas componentes do deslocamento do PP são efetuadas simplesmente subtraindo as coordenadas do mesmo (x_0, y_0) das coordenadas do SRC (x_c, y_c). Neste caso, tem-se:

$$x_s = x_c - x_0, \quad (4)$$

$$y_s = y_c - y_0. \quad (5)$$

Com relação à mudança Δf no valor calibrado em laboratório da distância focal f , esta pode vir a causar um efeito sistemático de mudança de escala na(s) matriz(es) de CCD. A partir das equações a seguir é possível efetuar a correção sobre as coordenadas do SRC:

$$dx_f = -\frac{(x_c - x_0)}{f} \cdot \Delta f, \quad (6)$$

$$dy_f = -\frac{(y_c - y_0)}{f} \cdot \Delta f. \quad (7)$$

É importante mencionar que o erro sistemático causado pelo parâmetro Δf cria um efeito de mudança de escala que apresenta alta correlação com outros dois pares de parâmetros, os coeficientes da variação de escala do sistema óptico (s_x e s_y) e os fatores de escala de mudança da dimensão do pixel na direção de x_s e y_s (p_x e p_y). As correções da variação de escala do sistema óptico sobre as coordenadas do SRC são dadas por:

$$dx_{sx} = s_x \cdot (x_c - x_0), \tag{8}$$

$$dy_{sy} = s_y \cdot (y_c - y_0), \tag{9}$$

nas quais s_x e s_y são os coeficientes de variação de escala na direção dos eixos x_c e y_c , respectivamente. Tendo em vista que o maior efeito ocorre na direção de y_c , pode-se desconsiderar, sem prejuízo de exatidão, o efeito na direção de x_c . Outra questão é que estes POI são altamente correlacionados com os parâmetros p_x e p_y .

Em relação ao sistema de lentes, têm-se as distorções radiais simétricas e as descentradas. O efeito da distorção radial simétrica é um deslocamento radial dos pontos na imagem a partir do ponto principal de simetria. O modelo de Brown (1971) para a correção do erro sistemático causado pela distorção radial simétrica nas coordenadas do SRC é dado por:

$$dx_r = K_1 r^2 \cdot (x_c - x_0) + K_2 r^4 \cdot (x_c - x_0) + K_3 r^6 \cdot (x_c - x_0), \tag{10}$$

$$dy_r = K_1 r^2 \cdot (y_c - y_0) + K_2 r^4 \cdot (y_c - y_0) + K_3 r^6 \cdot (y_c - y_0), \tag{11}$$

$$r = \sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2} \tag{12}$$

nas quais K_1 , K_2 e K_3 são os parâmetros de distorção radial simétrica, os quais podem alterar-se em relação aos valores calibrados em terra, durante o lançamento do satélite e quando o satélite encontra-se em órbita, devido a diferença de temperatura.

A distorção descentrada é causada pelo não alinhamento dos eixos ópticos das lentes que compõem a objetiva da câmera, causando deslocamentos dos pontos na imagem. Porém, os parâmetros P_1 e P_2 do modelo são estimáveis apenas se houver imagens com um giro de 90° em torno do eixo óptico da câmara com relação à faixa de voo.

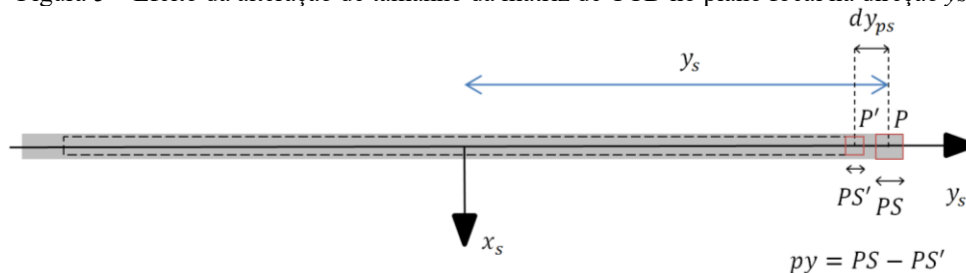
4.2 Parâmetros de orientação interior relacionados às matrizes de CCD

Como apresentado no item 2 os sensores de varredura linear com arranjo de constituição em linha podem ser compostos por uma ou mais matrizes de CCD no plano focal. Independentemente da quantidade de matrizes, os parâmetros deste conjunto são aplicados a cada uma separadamente.

Primeiramente, com relação às dimensões dos pixels na (s) matriz (es) de CCD na direção de x_s e y_s , os valores nominais podem ser alterados durante o lançamento do satélite e/ou com o mesmo em órbita. Tais alterações propõem alterações nos valores de dimensões, p_x e p_y , respectivamente para as direções x_s e y_s . Para fins de simplificação, pode-se considerar que todos os pixels de uma dada matriz de CCD apresentam os mesmos fatores de escala. Neste caso, o que acaba ocorrendo na realidade é um aumento ou diminuição da matriz em relação ao seu valor nominal. Na Figura 5 é apresentada uma ilustração do efeito, onde l e l' são respectivamente os tamanhos da matriz, nominal e alterado. A correção deste erro sistemático tem efeito significativo apenas na direção do eixo y_s . Deste modo, a correção para esta coordenada é:

$$dy_{ps} = -y_s \cdot \frac{p_y}{PS}. \tag{13}$$

Figura 5 – Efeito da alteração de tamanho da matriz de CCD no plano focal na direção y_s .



Fonte: O autor (2020).

As rotações θ das matrizes de CCD são medidas em relação às posições nominais, ou seja, em relação

ao eixo perpendicular ao deslocamento do satélite na órbita (y_s). Normalmente estas rotações são pequenas e ocorrem no processo de montagem do arranjo de CCD no plano focal. Durante o lançamento, acelerações duras, como as impostas pela propulsão do veículo lançador e pelo arrasto atmosférico, são impostas ao satélite e alterações nos valores obtidos em laboratório podem ocorrer. Uma ilustração do efeito de rotação em uma matriz de CCD é apresentada na Figura 6.

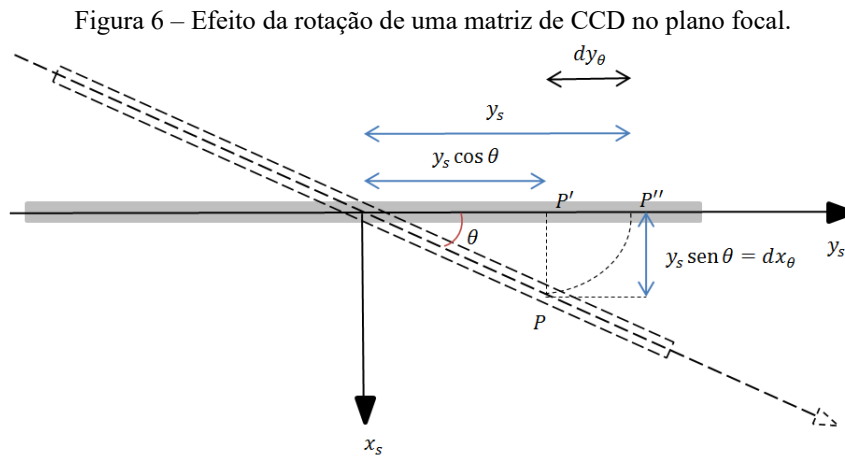


Figura 6 – Efeito da rotação de uma matriz de CCD no plano focal.

Fonte: O autor (2020).

A partir do ilustrado na Figura 6 pode-se notar que o erro sistemático causado pela rotação θ na direção y_s é igual à distância de P' (projeção ortogonal de P para o eixo y_s) para P'' (posição de P quando $\theta = 0^\circ$). Neste caso tem-se para as direções x_s e y_s :

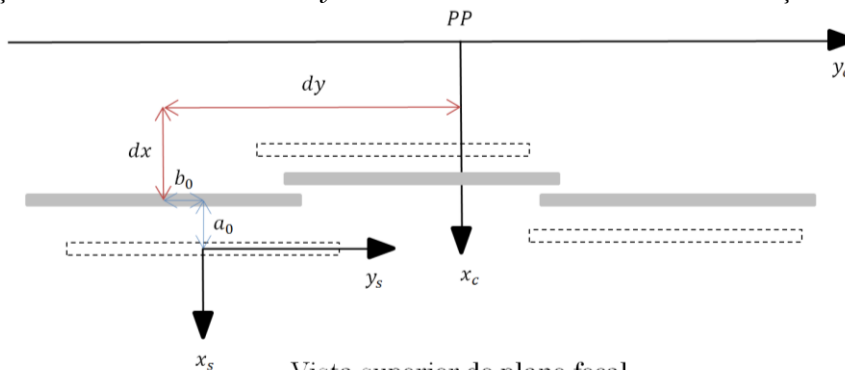
$$dx_\theta = y_s \cdot \text{sen } \theta, \tag{14}$$

$$dy_\theta = y_s - y_s \cdot \text{cos } \theta = y_s(1 - \text{cos } \theta). \tag{15}$$

No que se refere aos deslocamentos dx e dy dos centros das matrizes de CCD em relação ao PP no plano focal, pode-se ter alterações de valores devido às acelerações impostas durante o lançamento do satélite e até após o satélite ser colocado em órbita, em virtude da variação da temperatura. Na Figura 7 é apresentada uma ilustração do efeito em um plano focal com três matrizes de CCD. Uma forma de se corrigir os erros provenientes deste efeito é considerar parâmetros corretivos dos deslocamentos como incógnitas nos ajustamentos de observações, isto é, translações a_0 e b_0 . Neste caso, tem-se:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ -f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{16}$$

Figura 7 – Alteração dos deslocamentos dx e dy dos centros das matrizes de CCD em relação ao PP no plano focal.



Vista superior do plano focal

Fonte: O autor (2020).

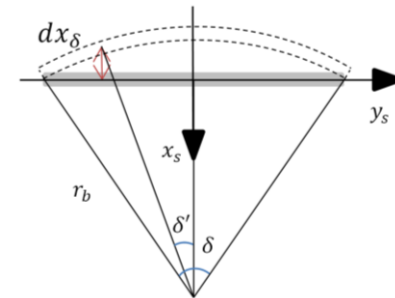
Como alternativa, pode-se refinar os valores de dx e dy , calibrados antes do lançamento do satélite, no

processo de ajustamento simultâneo por feixes de raios perspectivos, a partir da aplicação de injunções relativas nos mesmos. Uma questão relevante a ser destacada na primeira metodologia é que os parâmetros a_0 e b_0 são altamente correlacionados com os parâmetros x_0, y_0 respectivamente. Deste modo, como opção pode-se utilizar os valores calibrados em laboratório fixados (injunção absoluta) de x_0 e y_0 , de forma que os erros sistemáticos decorrentes deste procedimento possam ser absorvidos pelos parâmetros correlacionados citados.

Por fim, o efeito de flexão horizontal das matrizes de CCD é causado pela não linearidade geométrica das mesmas. Em vez de se ter uma linha reta, tem-se uma forma de arco (Figura 8). Para modelar este formato pode-se imaginar uma circunferência que contém o arco, com ângulo central δ e raio r_b (Figura 8), sendo este último calculado a partir do número de colunas da matriz de CCD (n_c), da dimensão do pixel (PS) e de δ (POLI, 2005):

$$r_b = \frac{n_c \cdot PS}{2 \cdot \text{sen} \frac{\delta}{2}} \tag{17}$$

Figura 8 – Efeito da flexão horizontal de uma matriz de CCD no plano focal.



Vista superior do plano focal
Fonte: O autor (2020).

O efeito da flexão horizontal da matriz de CCD é significativo apenas na direção x_s , dependendo da posição ocupada pelo pixel na matriz, sendo máxima no centro da matriz e nula nas bordas (Figura 8). Para um valor qualquer de y_s , a correção dx_δ aplicada em x_s é dada por (POLI, 2005):

$$dx_\delta = - \left(r_b \cdot \cos \delta' - r_b \cdot \cos \frac{\delta}{2} \right) = -r_b \left(\cos \delta' - \cos \frac{\delta}{2} \right), \tag{18}$$

$$\delta' \approx \frac{y_s}{r_b}, \tag{19}$$

na qual o ângulo central δ é o parâmetro a ser estimado. Cabe ressaltar que o efeito da flexão vertical, ou seja, o afastamento do paralelismo de uma matriz de CCD em relação ao plano focal pode ser absorvido pelo efeito da mudança do tamanho dos pixels na direção y_s (dy_{ps}), pelo fator de escala de mudança da dimensão do pixel na direção de y_s (p_y) ou ainda pela mudança Δf no valor calibrado em laboratório da distância focal f , dependendo da configuração de POI que se utilize.

5 ORIENTAÇÃO EXTERIOR E A MODELAGEM RIGOROSA

A orientação exterior está relacionada com a definição das três componentes de posição, três de velocidade, no caso do modelo OA, e das três de orientação do centro perspectivo (CP) do sensor, no momento da aquisição de uma determinada linha da imagem. A necessidade de se estimar este conjunto de seis parâmetros para cada linha é substituída por uma modelagem matemática que permita interpolar e extrapolar valores dos diversos conjuntos de POE, entre as diversas linhas da imagem, a partir somente da estimativa dos POE referente à primeira linha da imagem. A interpolação/extrapolação pode ser realizada em função do tempo ou da linha da imagem, sendo esta última dependente do conhecimento do tempo de integração da linha CCD (dt). Esta modelagem matemática é definida a partir do denominado modelo de plataforma, proposto por McGlone e Mikhail (1981) e utilizado em todos os casos em que se pretende realizar a orientação de imagens

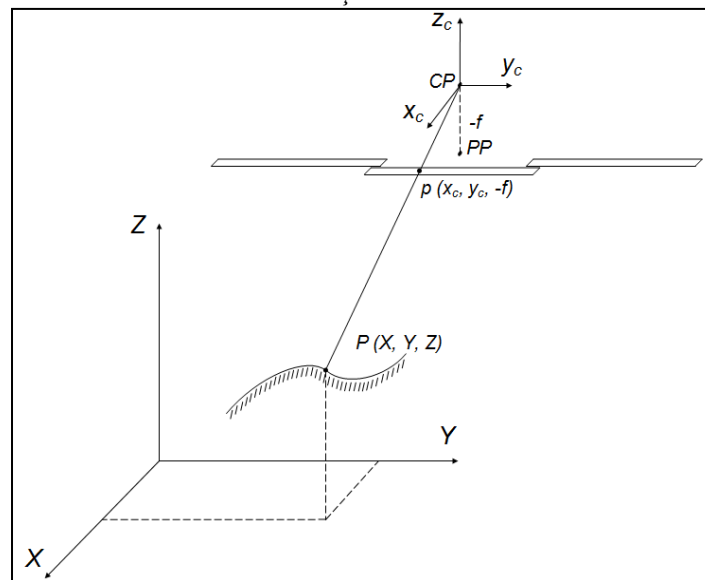
obtidas por sensores lineares do tipo *pushbroom* com arranjo de constituição em linha. Mais detalhes sobre estes modelos podem ser vistos em Mikhail, Bethel e McGlone (2001).

Os valores dos POE referentes à primeira linha da imagem podem ser obtidos de forma direta, a partir de dados de rastreamento de órbita e de sensores instalados no próprio satélite. Para o caso das componentes de posição e velocidade, tem-se a possibilidade de uso de receptores GPS (*Global Positioning System*) ou GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Já para o caso das componentes de orientação, podem-se utilizar giroscópios, sensores de estrela e até sensores de deslocamento angular quando se deseja medir oscilações de alta frequência. A orientação com aplicação direta dos POE no modelo matemático rigoroso é denominada de georreferenciamento direto. De forma indireta, os valores dos POE são estimados sem nenhum dado prévio, a partir de um ajustamento por feixes perspectivos, utilizando-se feições de controle em campo.

Uma questão a ser mencionada é que os POE obtidos de forma direta podem apresentar incertezas que podem tornar o georreferenciamento direto inviável para algumas aplicações. A fim de contornar tal situação, há a possibilidade de refinar os POE a partir de um ajustamento de observações com injunções relativas de peso ou utilizando termos corretivos. Em ambas as metodologias feições de controle em campo são necessárias.

Após definidos os conjuntos de POI e de POE, o objetivo é relacionar matematicamente coordenadas do SRI com coordenadas de sistemas tridimensionais do espaço objeto. Geralmente, a modelagem matemática rigorosa para orientação de imagens orbitais de varredura linear baseia-se no Princípio de Colinearidade entre um ponto no espaço imagem, o CP do sensor e um ponto no espaço objeto (Figura 9). Para tanto, são utilizadas as Equações de Colinearidade.

Figura 9 – Princípio da colinearidade aplicada a sensores remotos lineares orbitais do tipo *pushbroom* com arranjo de constituição em linha.



Fonte: Rodrigues (2016).

No caso de sensores remotos lineares orbitais do tipo *pushbroom*, as Equações de Colinearidade são modificadas com o objetivo de se adequar a geometria de imageamento. Uma vez que há apenas uma linha, Gagan e Dowman (1988) indicam que a componente x_c do SRC pode ser aproximada como zero. Porém, no processo de calibração geométrica em órbita é imprescindível que se leve em consideração valores de coordenadas ao nível sub-pixel. Além disso, como visto, na maioria dos casos, o ponto principal (PP) mantém um afastamento (dx) em relação ao centro geométrico da (s) matriz (es) de CCD no plano focal. Assim, as coordenadas de um ponto j no SRC (x_{c_j} e y_{c_j}) devem ser determinadas utilizando-se as Eq. (3).

Mesmo partindo do princípio de colinearidade, de uma forma geral, os modelos rigorosos podem ser separados em duas classes, a saber: modelo Posição-Rotação e modelo Órbita-Atitude (KIM; DOWMAN, 2006). O modelo do tipo PR foi o modelo primeiramente desenvolvido e é o mais utilizado nos aplicativos comerciais. Este modelo leva em consideração na orientação apenas o SRC e algum Sistema de Referência Terrestre (SRT). Partindo do princípio de colinearidade entre um ponto j no espaço objeto, o seu

correspondente no espaço imagem e o CP do sensor no instante da tomada da imagem, tem-se a seguinte transformação:

$$\begin{bmatrix} x_{cj} \\ y_{cj} \\ -f \end{bmatrix} = \lambda_j R(t)^T \begin{bmatrix} X_j - X_S(t) \\ Y_j - Y_S(t) \\ Z_j - Z_S(t) \end{bmatrix}, \tag{20}$$

sendo:

$$R(t) = R_Z(\kappa(t))R_Y(\varphi(t))R_X(\omega(t)), \tag{21}$$

na qual X_j, Y_j e Z_j as coordenadas geocêntricas cartesianas terrestres de um ponto j qualquer em algum SRT; $X_S(t), Y_S(t)$ e $Z_S(t)$ as coordenadas do CP do sensor no SRT, as quais variam em função do tempo t e; $R(t)$ é uma matriz de rotações, em função dos ângulos de orientação $\omega(t), \varphi(t)$ e $\kappa(t)$, os quais também variam em função do tempo, e são responsáveis por alinhar diretamente o SRT com o SRC. Cabe ressaltar que os ângulos ω, φ e κ não podem ser chamados de ângulos de atitude da plataforma, uma vez que estes não são definidos em relação aos eixos físicos do movimento do satélite no Sistema de Referência da plataforma (SRP). A partir da Eq. (20) podem-se deduzir as Equações de Colinearidade adaptadas, dividindo-se as duas primeiras equações obtidas da transformação pela terceira.

O modelo de plataforma mais tradicionalmente utilizado no modelo PR, desenvolvido por Guban e Dowman (1988), apresenta o relacionamento entre os POE da primeira linha da imagem e o tempo t a partir de polinômios de 2º grau:

$$\begin{aligned} X_S &= X_0 + a_1t + b_1t^2, \\ Y_S &= Y_0 + a_2t + b_2t^2, \\ Z_S &= Z_0 + a_3t + b_3t^2, \\ \omega &= \omega_0 + a_4t + b_4t^2, \\ \varphi &= \varphi_0 + a_5t + b_5t^2, \\ \kappa &= \kappa_0 + a_6t + b_6t^2, \end{aligned} \tag{22}$$

nas quais X_0, Y_0 e Z_0 são as coordenadas do CP do sensor na primeira linha da imagem no SRT; ω_0, φ_0 e κ_0 representam os ângulos de orientação na primeira linha da imagem e; $a_1, b_1, \dots, a_6, b_6$ são os coeficientes polinomiais da modelagem de mudança nos POE. Cabe mencionar que, como indicado em Orun e Natarajan (1994), alternativamente ao uso do tempo t , pode-se utilizar a coordenada L do SRI, considerando que esta é função linear de t ($t = dt \cdot L$). Neste caso, as mudanças em unidades, fator de escala entre t e L , podem ser absorvidas pelos coeficientes polinomiais.

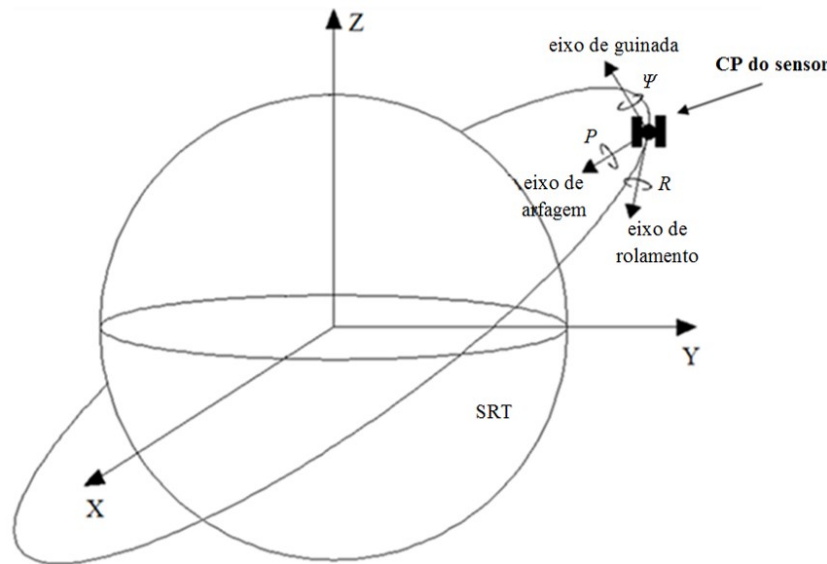
No caso do modelo OA, para o alinhamento do SRC com algum SRT são considerados dois Sistemas de Referência intermediários, a saber: o SRP e o Sistema de Referência da Órbita (SRO). O SRP é um sistema dextrogiro fixado ao satélite, com origem no centro de massa do mesmo. A direção dos eixos é definida a partir da direção dos eixos do SRC, aplicando-se uma série de rotações em função dos denominados ângulos de visada do sensor (*boresight angles*), b_X, b_Y e b_Z . A matriz de rotação que leva do SRC para o SRP é dada por:

$$R_C^P = R_Z(b_Z)R_Y(b_Y)R_X(b_X). \tag{23}$$

Para compatibilizar as origens do SRP com o SRC, basta aplicar um vetor de translações (dX, dY, dZ) entre o centro de massa do satélite (CMS) e o CP do sensor. Cabe aqui dizer que se no satélite estiver embarcado um receptor GPS ou GNSS que forneça dados de vetor de estado para o satélite, um vetor de três translações a mais deve ser aplicado, de modo a compatibilizar o Centro de fase da antena (CFA) do receptor GPS ou GNSS com o CMS. Uma vez que a estimativa dos valores desta translação é complexa com o satélite em órbita, por conta da alta correlação com dX, dY, dZ , pode-se fazer o agrupamento das translações. O conjunto dos três ângulos de visada do sensor (b_X, b_Y e b_Z) com as três transações (dX, dY, dZ) formam o conjunto de PM do sensor (WESER et al., 2007).

O SRO também é um sistema dextrogiro com origem no centro de massa do sensor, porém, o que o difere do SRP é a orientação dos eixos. O eixo z aponta para o centro de massa da Terra, o eixo x aponta para o sentido do deslocamento da plataforma na órbita e o eixo y completa o sistema dextrogiro tridimensional. Para realizar a passagem do SRP para o SRO basta aplicar uma matriz de rotações em função dos ângulos de atitudes da plataforma, isto é, rolamento (R), arfagem (P) e guinada (Ψ) (*roll, pitch e yaw*) que são dependentes do tempo. Os ângulos de rolamento, arfagem e guinada são contados em torno dos eixos x, y e z do SRO, respectivamente, e representam variações em orientação que a plataforma sofre em sua órbita (WERTZ, 1978). Assim, estes eixos também são conhecidos como eixos de rolamento, arfagem e guinada (Figura 10). O sentido positivo dos ângulos é o sentido anti-horário.

Figura 10 – Ângulos de atitude e eixos do SRO.



Fonte: Adaptado de Wertz (1978).

A estimativa destes ângulos pode se dar de duas formas. A primeira, de forma direta, é a partir de dados provenientes de sensores embarcados no próprio satélite, como sensores de estrela, giroscópios e sensores de deslocamento angular. Na segunda, de forma indireta, os valores são estimados, ou refinados, a partir de um ajustamento por feixes perspectivos, utilizando-se feições de controle em campo, como pontos, retas ou polígonos. Para realizar a passagem do SRP para o SRO tem-se, então (JOVANOVIC et al., 1999):

$$R_P^O(t) = R_Z(R(t))R_Y(P(t))R_X(\Psi(t)). \tag{24}$$

Por fim, para passar do SRO para o SRT aplica-se uma matriz de rotação em função das componentes do vetor de estado do satélite referenciadas ao CP do sensor. Estes também podem ser obtidos de forma direta ou indireta. De forma direta, a partir do uso de um receptor GPS ou GNSS embarcado no satélite, ou a partir de dados de rastreamento de órbita. De forma indireta, tem-se a mesma configuração indicada anteriormente no caso dos ângulos de atitude. Assim, tem-se, então (JOVANOVIC et al., 1999):

$$R_O^T(t) = \begin{bmatrix} \frac{V_Z X_S Z_S - Z_S^2 V_X - V_X Y_S^2 + X_S Y_S V_Y}{L_P^2 L_V} & \frac{-Y_S V_Z + V_Y Z_S}{L_V L_P} & -\frac{X_S}{L_P} \\ \frac{V_X Y_S X_S - X_S^2 V_Y - V_Y Z_S^2 + Y_S Z_S V_Z}{L_P^2 L_V} & \frac{-Z_S V_X + V_Z X_S}{L_V L_P} & -\frac{Y_S}{L_P} \\ \frac{V_Y Z_S Y_S - Y_S^2 V_Z - V_Z X_S^2 + X_S Z_S V_X}{L_P^2 L_V} & \frac{-X_S V_Y + V_X Y_S}{L_V L_P} & -\frac{Z_S}{L_P} \end{bmatrix}, \tag{25}$$

sendo:

$$L_P = \sqrt{X_S^2 + Y_S^2 + Z_S^2}, \tag{26}$$

$$\tag{27}$$

$$L_V = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2}.$$

Considerando o princípio de colinearidade entre um ponto j no espaço objeto, o seu correspondente no espaço imagem e o CP do sensor no instante da tomada da imagem, tem-se a seguinte transformação:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ y_{c\ j} \\ -f \end{bmatrix} = \lambda_j R_C^{P^T} \left(R_P^O(t)^T R_O^T(t)^T \begin{bmatrix} X_j - X_S(t) \\ Y_j - Y_S(t) \\ Z_j - Z_S(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} \right). \tag{28}$$

Da mesma forma que no caso do modelo PR, dividindo a primeira e a segunda equação obtidas da Eq. (28) pela terceira, obtêm-se as Equações de Colinearidade adaptadas para um ponto j .

O modelo de plataforma mais comum utilizado com este modelo é o polinomial de 2ª grau em função do tempo t , conforme apresentado em Kim e Dowman (2006):

$$\begin{aligned} X_S &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2, \\ Y_S &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2, \\ Z_S &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2, \\ V_x &= V_{x0} + a_4 t + b_4 t^2, \\ V_y &= V_{y0} + a_5 t + b_5 t^2, \\ V_z &= V_{z0} + a_6 t + b_6 t^2, \\ R &= R_0 + a_7 t + b_7 t^2, \\ P &= P_0 + a_8 t + b_8 t^2, \\ \Psi &= \Psi_0 + a_9 t + b_9 t^2, \end{aligned} \tag{29}$$

nas quais $X_0, Y_0, Z_0, V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}$ são as componentes da posição e velocidade do satélite em algum SRT na primeira linha da imagem; R_0, P_0 e Ψ_0 representam os ângulos de atitude na primeira linha da imagem e; $a_1, b_1, \dots, a_9, b_9$ são os coeficientes polinomiais da modelagem de mudança nos POE.

Cabe ressaltar que segundo Marcatto Júnior et al. (2011) os parâmetros de velocidade apresentam correlação com os parâmetros de posição, pois a velocidade é calculada por meio da diferença de posição em um determinado intervalo de tempo. Portanto, os parâmetros $V_{x0}, a_4, b_4, V_{y0}, a_5, b_5, V_{z0}, a_6$ e b_6 devem ser calculados antes do processo de orientação, e seus valores devem entrar fixados com injunção absoluta no ajustamento de observações realizado no processo de orientação da (s) imagem (ns).

Uma questão importante é que este modelo permite o uso de observações de ângulos de atitude do satélite (R, P, Ψ) diretamente, se estes estiverem disponibilizados nos metadados das imagens. Caso sejam disponibilizados os *quaternions*, podem-se obter os ângulos de atitude pelas relações (SCHNEIDER et al., 2008):

$$\begin{aligned} R &= -\arcsen(Q_{23}), \\ P &= \arctan\left(\frac{Q_{13}}{Q_{33}}\right), \\ \Psi &= \arctan\left(\frac{Q_{21}}{Q_{22}}\right), \end{aligned} \tag{30}$$

nas quais Q_{ij} são os elementos em uma dada linha i e coluna j da matriz dos *quaternions* Q , construída a partir dos *quaternions* q_0, q_1, q_2 e q_3 , dada por (SCHNEIDER et al., 2008):

$$Q = \begin{bmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{bmatrix}. \tag{31}$$

Uma opção ao uso dos modelos de plataforma citados, tanto no modelo PR quanto no OA é o modelo UCL Kepler. Neste contexto, tem-se o modelo original proposto por Michalis e Dowman (2005) para uso no modelo PR; o modelo adaptado ao uso de coordenadas referenciadas ao SRT para uso no modelo PR, proposto por Rodrigues et al. (2015) e; o modelo adaptado ao uso de coordenadas referenciadas ao SRT para uso no modelo OA, proposto por Rodrigues e Machado (2019), indicado nas Eq. (32). A grande vantagem é a diminuição do número de parâmetros incógnitos nos ajustamentos de observações, o que é mais crítico no caso de bloco de imagens.

$$\begin{aligned}
 X_s(t) &= X_0 + V_{0_x}t + \left[-\frac{GM \cdot X_0}{2 \cdot r^3} + \omega_t^2 X_0 + 2\omega_t V_{0_y} \right] \cdot t^2, \\
 Y_s(t) &= Y_0 + V_{0_y}t + \left[-\frac{GM \cdot Y_0}{2 \cdot r^3} + \omega_t^2 Y_0 + 2\omega_t V_{0_x} \right] \cdot t^2, \\
 Z_s(t) &= Z_0 + V_{0_z}t - \frac{GM \cdot Z_0}{2 \cdot r^3} \cdot t^2, \\
 V_x(t) &= V_{0_x} + \left[-\frac{GM \cdot X_0}{2 \cdot r^3} + \omega_t^2 X_0 + 2\omega_t V_{0_y} \right] \cdot t, \\
 V_y(t) &= V_{0_y} + \left[-\frac{GM \cdot Y_0}{2 \cdot r^3} + \omega_t^2 Y_0 + 2\omega_t V_{0_x} \right] \cdot t, \\
 V_z(t) &= V_{0_z} - \frac{GM \cdot Z_0}{2 \cdot r^3} \cdot t, \\
 R &= R_0, \\
 P &= P_0, \\
 \Psi &= \Psi_0 + d_1 t + d_2 t^2,
 \end{aligned} \tag{32}$$

nas quais:

$$r = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}. \tag{33}$$

sendo ωt o módulo da velocidade angular de rotação da Terra com valor definido para um dado SRT utilizado.

6 ÁREA DE TESTE/CAMPO DE CALIBRAÇÃO E OBTENÇÃO DE COORDENADAS

Para que a calibração geométrica em órbita seja realizada adequadamente, faz-se necessária uma área de teste ou campo de calibração, com um conjunto denso, preciso e bem distribuído de pontos de controle e verificação no terreno sobre toda a imagem (BALTSAVIAS, ZHANG; EISENBEISS, 2006). Jiang et al., (2018) cita que a China possui três campos de calibração permanentes para seus satélites de observação da Terra, como os da série Zi Yuan. São eles: Henan, Tianjin e Taiyuan. Exemplos podem ser vistos em Zhang et al. (2014) e Cao, Yuan e Gong (2016), com calibrações dos sensores do satélite Zi Yuan-3.

Já a França, conforme pode ser visto em ESA (2014), tem a disposição, por exemplo, as áreas de teste de La Crau, na França, com 35 pontos com coordenadas obtidas por GPS e um Modelo Digital de Elevação (SPOT); Manosque, na França, com ortofotos e modelo digital de superfície (MDS) obtidos por aerofotogrametria; Bern/Thun, na Suíça, com 138 pontos com coordenadas obtidas por GPS e um MDS obtido por aerofotogrametria; e Cape Town, na África do Sul, com 35 pontos com coordenadas obtidas via imagens do satélite IKONOS. Isso para a calibração dos sensores das missões SPOT, AGILE, PLEIADES e SENTINEL, dentre outras. Como exemplos de trabalhos de calibração utilizando estes campos pode-se citar: Santer et al. (1992) e Valorge et al. (2004), para os sensores SPOT; Pi et al. (2019), para o sensor do satélite AGILE; e Dechoz et al. (2014), para os sensores dos satélites SENTINEL 2A e 2B.

Ainda em Mulawa (2004), o autor menciona que para a calibração dos sensores do satélite Orbview-3 foram utilizadas diversas áreas de teste.

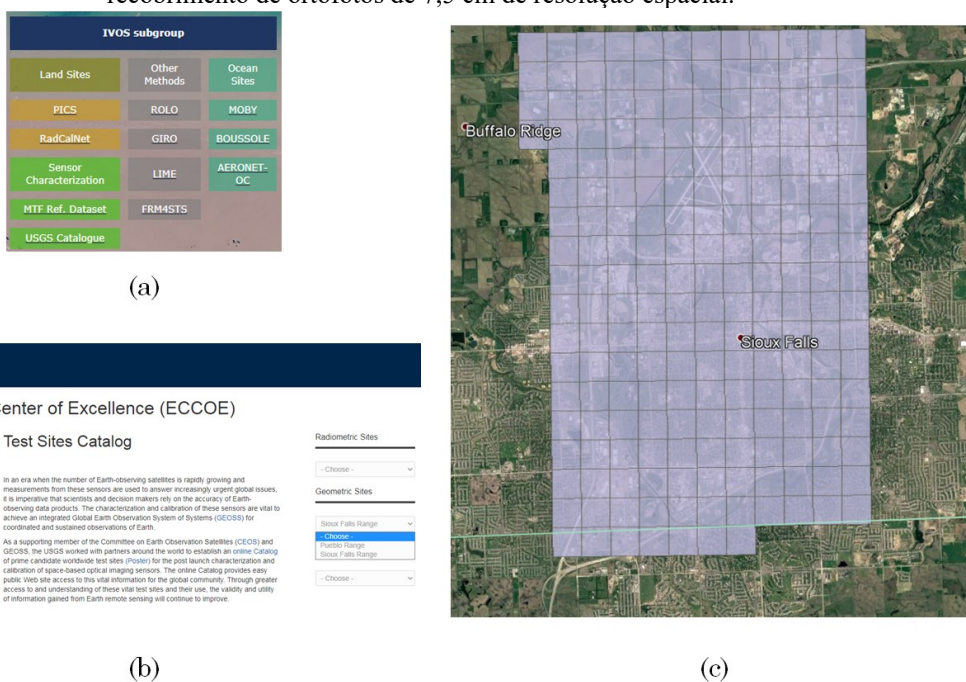
Preferencialmente, as coordenadas dos pontos de controle e verificação devem ser obtidas a partir de posicionamentos GPS ou GNSS em campo. Como alternativa tem-se a obtenção a partir de ortofotos e MDS obtidas por processamento aerofotogramétrico, com resolução espacial e acurácias adequadas. Adicionalmente, o uso de alvos para a identificação dos pontos na imagem é altamente indicado. Outro ponto importante é a ausência de nuvens na imagem a ser utilizada para a calibração.

Dentro deste contexto, é importante mencionar os esforços do grupo de trabalho em calibração e

validação (WGCV do inglês *Working Group on Calibration and Validation*) do Comitê de Satélites de Observação da Terra (CEOS do inglês *Committee on Earth Observation Satellites*). Conforme visto em CEOS WGCV (2016), este grupo tem a missão de garantir a confiança, em longo prazo, na precisão e qualidade dos dados e produtos de Observação da Terra baseados em satélite. Além disso, o grupo fornece um fórum para a troca de informações sobre calibração e validação, e promove o intercâmbio internacional de informações técnicas e documentação, experimentos conjuntos e o compartilhamento de instalações, conhecimentos e recursos.

Uma das atividades do CEOS WGCV foi de disponibilizar áreas de teste para calibração/validação radiométrica e geométrica, com dados obtidos por instituições ligadas á subgrupos. No caso da calibração geométrica, tem-se, por exemplo, duas áreas de teste para sensores aerotransportados e imagens orbitais de alta resolução, administradas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS do inglês *U.S. Geological Survey*), filiado ao subgrupo Sensores ópticos infravermelhos e visíveis (IVOS do inglês *Infrared and Visible Optical Sensors*). São elas: Pueblo Range e Sioux Falls Range. Em ambas as áreas de teste têm-se coberturas de ortofotos com resoluções de 7,5 cm até 30,5 cm, em diferentes valores de áreas de recobrimento, devidamente validadas com levantamentos GPS. As acurácias associadas podem ser vistas no próprio site da USGS referente ás áreas de teste.

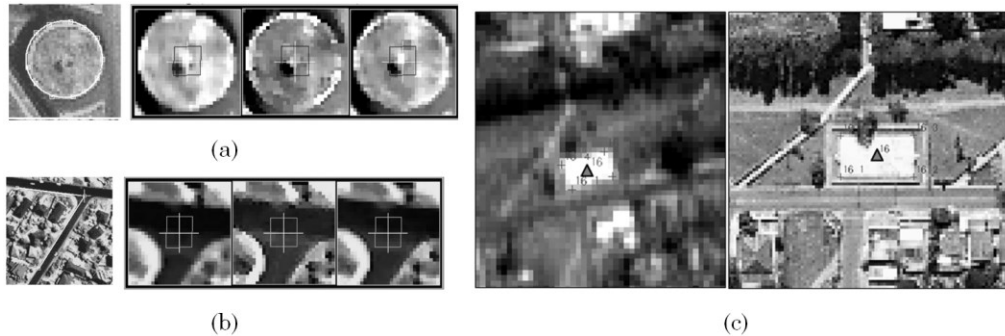
Figura 11 – Parte do portal de Cal/Val do CEOS (a), de áreas de teste do USGS (b) e a área de teste de Sioux com recobrimento de ortofotos de 7,5 cm de resolução espacial.



Fonte: (a) ESA (2021), (b) USGS (2021a) e (c) USGS (2021b)/Google Earth.

Outra questão a ser mencionada é o cuidado na medição pontual manual das coordenadas C e L do SRI, tanto na imagem do sensor a ser calibrado, quanto nas ortofotos de referência para extração dos pontos de controle e verificação no terreno, se for o caso. Neste caso, têm-se alguns métodos, como ajuste de elipse ou interseção de linhas (FRASER et al., 2002; EISENBEISS et al., 2004), ou ainda o cálculo de centroide (RODRIGUES et al., 2017). Exemplos de medidas de pontos utilizando os métodos mencionados são apresentados na Figura 12.

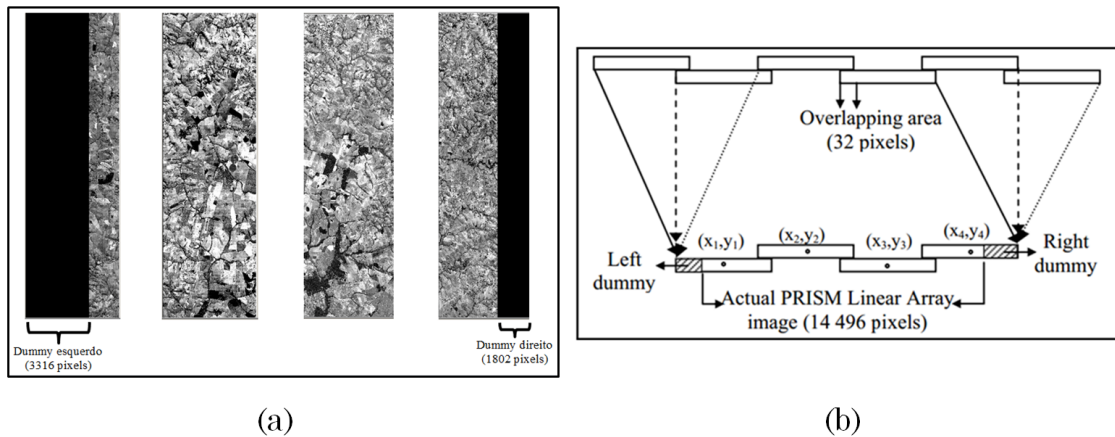
Figura 12 – Medição pontual manual utilizando o método do ajuste de elipse (a), interseção de linhas (b) e cálculo do centroide (c).



Fonte: (a) e (b) Baltasvias, Zhang e Eisenbeiss (2006); (c) Rodrigues et al. (2017).

Ainda no contexto das medições no espaço imagem, para a obtenção das coordenadas x_s e y_s do SRM em cada matriz de CCD, deve-se conhecer o número de colunas (n_c) das mesmas e se as subimagens obtidas por cada uma são entregues ao usuário separadas ou mosaicadas. Por exemplo, para o caso das imagens do sensor PRISM do satélite ALOS-2, no nível de processamento 1B1, têm-se as subimagens separadas (Figura 13a).

Figura 13 – Exemplo de subimagens obtidas pelas matrizes de CCD do sistema óptico ré do sensor PRISM



Fonte: (a) Rodrigues (2016) e (b) Kocaman (2007).

No caso das imagens PRISM, por exemplo, para o sistema óptico nadir, tinha-se um plano focal composto por 6 matrizes de CCD, cada uma com 4992 colunas, tendo-se uma sobreposição de 32 pixels entre cada uma (Figura 13b). Pode-se observar na Figura 13a que das 6 matrizes, apenas 4 são utilizadas, e, neste conjunto, ainda eram suprimidas duas quantidades de pixels na parte extrema direita e esquerda (*left dummy* e *right dummy*). Assim sendo, para a obtenção das coordenadas x_s e y_s de pontos em cada matriz de CCD podem-se utilizar diretamente as Eq. (1) e (2), com $n_c = 4992$.

7 CALIBRAÇÃO GEOMÉTRICA EM ÓRBITA DE SENSORES REMOTOS LINEARES DO TIPO PUSHBROOM COM ARRANJO DE CONSTITUIÇÃO EM LINHA

Calculadas as coordenadas dos pontos de controle e verificação no SRM e no SRT pode-se partir para a formulação do modelo matemático funcional (MMF) para a calibração geométrica em órbita para atualização dos POI, com e sem considerar o refinamento dos PM, no caso do modelo OA.

Os POI que podem ser considerados são aqueles apresentados no item 4. No contexto dos POI relacionados ao sistema óptico, para a questão da distância focal, há duas opções no ajustamento de feixes. A primeira é fixar o valor de f com injeção absoluta, utilizando-se o valor nominal, e utilizar o parâmetro Δf para estimar a alteração sistemática de f . A segunda, é aplicar uma injeção relativa no valor nominal de f , considerando um determinado valor arbitrário de incerteza. Nesta segunda opção, tem-se o refinamento do

valor calibrado em laboratório de f (RODRIGUES, 2016).

Ainda no contexto dos POI relacionados ao sistema óptico, deve-se considerar a alta correlação dos parâmetros s_x e s_y com Δf (POLI, 2005). Assim, uma vez utilizado Δf , deve-se considerar s_x e s_y iguais a zero e fixá-los com injeção absoluta no ajustamento. Desta forma, o parâmetro Δf absorverá os efeitos. Caso seja utilizada a ideia de refinamento de f , o parâmetro s_y pode ser estimado livremente. Isso considerando que o efeito do parâmetro s_x na direção de x_c é não significativo e que pode ser desconsiderado sem prejuízo (KOCAMAN, 2007).

Outro ponto a ser considerado é a alta correlação entre s_y e os parâmetros p_y das matrizes de CCD (POLI, 2005). A fim de evitar tal situação, os parâmetros p_y podem ser considerados diferentes para cada matriz de CCD, o que também corrobora com a ideia de se ter mais proximidade da realidade física (RODRIGUES et al., 2017). Adicionalmente, evita-se ainda a alta correlação de p_y com Δf , caso este último seja utilizado. É importante lembrar que, similarmente ao caso do parâmetro s_x , os efeitos das mudanças das dimensões dos pixels nas direções dos eixos x_s em cada matriz de CCD (p_x) podem também ser desconsiderados sem prejuízo de exatidão. Outro parâmetro também pode ser considerado único para cada matriz de CCD é o ângulo central δ das flexões das matrizes de CCD.

Os parâmetros dx e dy , cujos valores tendem a ser conhecidos de laboratório, ou de calibração em órbita prévia, podem também ser injuncionados de forma absoluta, uma vez que suas alterações são estimadas a partir dos parâmetros a_0 e b_0 . Alternativamente, pode-se desconsiderar a_0 e b_0 e aplicar injeções relativas nos valores nominais de dx e dy com o intuito de refiná-los (WESER et al., 2008). Os parâmetros x_0 e y_0 também podem ser injuncionados de forma absoluta, à medida que os efeitos causados pelos mesmos podem ser modelados pelos parâmetros a_0 e b_0 , se estes forem utilizados. Alternativamente, seus valores nominais também podem ser refinados com uso de injeções relativas.

Um ponto importante a se destacar é que os parâmetros a_0 , b_0 , se forem utilizados, p_y e θ de alguma das matrizes de CCD no plano focal devem receber injeções absolutas. Tal procedimento visa tornar uma das matrizes fixa no ajustamento a fim estabelecer o referencial no plano focal e evitar singularidades, conforme pode ser visto em Poli (2005), Weser et al., (2008), Rottensteiner et al., (2009), Zhang e Zheng (2012) e Rodrigues et al. (2016). Os valores adotados podem ser iguais à zero, por exemplo. Os erros sistemáticos decorrentes deste procedimento são assumidos por parte dos POE, conforme indicado por Weser et al. (2008).

Considerando uma configuração de uso dos parâmetros a_0 , b_0 , Δf , x_0 e y_0 , e considerando ainda p_y diferente para cada matriz de CCD, as coordenadas do SRC, para um ponto j em uma dada matriz de CCD i , com os POI, são dadas por:

$$x_{c_j} = x_{s_{ij}} + dx_i + a_{0_i} - x_0 + dx_f + dx_r + dx_{\theta_i} + dx_{\delta_i}, \tag{34}$$

$$y_{c_j} = y_{s_{ij}} + dy_i + b_{0_i} - y_0 + dy_f + dy_r + dy_{\theta_i} + dy_{ps}. \tag{35}$$

Assim sendo, as Equações de Colinearidade obtidas a partir da Eq. (20) ou da Eq. (28), com os POI, para um ponto j em uma dada matriz de CCD i , compõem os MMF por:

$$x_{s_{ij}} = -f \frac{\Delta X_j}{\Delta Z_j} - dx_i - a_{0_i} + x_0 - dx_f - dx_r - dx_{\theta_i} - dx_{\delta_i}, \tag{36}$$

$$y_{s_{ij}} = -f \frac{\Delta Y_j}{\Delta Z_j} - dy_i - b_{0_i} + y_0 - dy_f - dy_r - dy_{\theta_i} - dy_{ps}, \tag{37}$$

nas quais ΔX_j e ΔY_j são as partes dos numeradores das equações de colinearidade para um ponto j ; e ΔZ_j a parte do denominador para o mesmo ponto.

No caso do uso do modelo OA, para a calibração com a finalidade de se refinar os PM, pode-se ter ou não a simultaneidade com a calibração para atualizações dos POI. No caso de não se ter a simultaneidade, os valores dos POI previamente atualizados compõem os MMF, podendo ser injuncionados de forma relativa ou absoluta no ajustamento por feixes (WESER et al., 2008). Em qualquer dos casos, de simultaneidade ou não, para o refinamento dos PM, os parâmetros b_x , b_y , b_z , dX , dY e dZ são inseridos nas Equações de Colinearidade obtidas pela Eq. (28), com seus valores nominais de laboratório ou de calibração em órbita prévia, e são

injunccionados de forma relativa no ajustamento por feixes (WESER et al., 2008).

Para o ajustamento de feixes perspectivivos das calibrações pode-se utilizar tanto o Método Paramétrico como o Método Combinado de ajustamento de observações via Método dos Mínimos Quadrados, considerando as injunções absolutas ou relativas.

Exemplos de calibrações geométricas em órbita podem ser vistos em Jacobsen (1997) para o sensor IRS-1C PAN; Kornus, Lehner e Schroeder (1998) para o sensor MOMS-2P; Mulawa (2004) para os sensores do satélite Orbview-3; Tadono et al. (2004) para o sensor PRISM-ALOS-2; Gachet (2004) para o sensor HRG e HRS - SPOT 5; Poli (2005) para os sensores MOMS-2P, HRS - SPOT 5, ASTER, MISR - TERRA e EROS-AI; Baltasvias, Zhang e Eisenbeiss (2006) com sensores do satélite IKONOS-2; Toutin et al. (2006) com sensores HRS e HRG - SPOT 5 e RSI - FORMOSAT-2; Gruen, Kocaman e Wolff (2007) e Kocaman (2007) com o sensor PRISM-ALOS-2; Radhadevi e Solanki (2008) com sensores do satélite IRS P6; Lussy et al. (2012) com o sensor HiRI dos satélites PLEIADES 1A e 1B; Zhang e Zheng (2012) e Rodrigues et al. (2016) com o sensor HRC do satélite CBERS 2B; Wang et al. (2014) com o sensor pancromático do satélite ZY1-02C e com o sensor do satélite ZY-3; Dechoz et al. (2014) com os sensores do satélite SENTINEL-2 e; Storey, Choate e Lee (2014) com o sensor OLI do satélite LANDSAT 8.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentados os principais aspectos teóricos envolvidos no processo de calibração geométrica em órbita de sensores remotos imageadores lineares do tipo *pushbroom*, para atualização dos valores dos POI, levando e não levando em consideração a simultaneidade com o refinamento dos PM. Especificamente, foi tratada a questão relacionada aos sensores de constituição em linha.

A calibração geométrica em órbita é de suma importância, uma vez que permite que o completo potencial de exatidão geométrica de informações espaciais extraídas das imagens possa ser alcançado. Após o satélite estar em órbita, de tempo em tempos os valores de POI e de PM devem ser refinados/atualizados, a fim de se tenha valores mais próximos da realidade física no instante da formação da imagem. Também é importante mencionar que as atividades de calibração e validação (Cal/Val) são essenciais para o controle de qualidade de uma determinada missão, principalmente na fase de comissionamento (primeiros meses de atividade). Além disso, no contexto de orientação pelo modelo generalizado de funções racionais, pode-se dispor de coeficientes polinomiais racionais mais acurados.

Com este trabalho espera-se colaborar com o tratamento da temática de calibração geométrica em órbita de sensores remotos imageadores lineares do tipo *pushbroom* no Brasil, uma vez que há poucos trabalhos que a abordam até o momento. É importante mencionar que foram apresentados os principais aspectos, sem, contudo ter a pretensão de esgotar o assunto. Cabe ressaltar também que há outros métodos de calibração que podem ser utilizados, como o “*auto-reverse*” e o método que utiliza estrelas como pontos de controle automáticos. Mais detalhes sobre estes dois métodos podem ser vistos em Greslou et al. (2012) e Delvit et al. (2012).

Contribuição dos Autores

O autor Tiago Lima Rodrigues foi responsável pela conceptualização, pesquisa, visualização, redação e edição.

Conflitos de Interesse

O autor declara que não há conflito de interesse.

Referências

- BALTSAVIAS, E.; ZHANG, L.; EISENBEISS, H. DSM generation and interior orientation determination of IKONOS images using a Testfield in Switzerland. **Photogramm. Fernerkund. Geoinf.**, vol. 1, 2006. pp. 41-54.
- BROWN, D. C. Close-range camera calibration. **Photogrammetric Engineering**, vol. 37, 1971. pp. 855-866.
- CAO, J.; YUAN, X.; GONG, J. Geometric calibration of ZIYUAN-3 three-line cameras combining ground control points and lines. **Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. XLI Part B1, Prague, 2016. pp. 163-168.
- COMMITTEE ON EARTH OBSERVATION SATELLITES - WORKING GROUP ON CALIBRATION & VALIDATION. **CEOS WGCV Terms of Reference**, Version 1.0 / November 2nd, 2016. 9p.
- DECHOZ, C.; LANGUILLE, F.; TREMAS, T.; NOSAVAN, J.; PETRUCCI, B.; MASSERA, S.; GACHET, R.; MARTIMORT, P.; ISOLA, C. Sentinel 2: Geometric calibration during commissioning phase. **Proceedings of the SPIE 9244, Image and Signal Processing for Remote Sensing XX**, 92440B, Amsterdam, 2014. pp. 89-101.
- DELVIT, J M.; GRESLOU, D.; AMBERG, V.; DECHOZ, C.; DELUSSY, F.; LEBEGUE, L.; LATRY, C.; ARTIGUES, S.; BERNARD, L. Attitude assessment using PLEIADES-HR capabilities. **Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. XXXIX Part B1, Melbourne, 2012. pp. 525-530.
- EISENBEISS, H., BALTSAVIAS, E. P., PATERAKI, M., ZHANG, L. Potential of IKONOS and QUICKBIRD Imagery for Accurate 3D-Point Positioning, Orthoimage and DSM Generation. **Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. XXXIX Part B1, Istanbul, 2004. pp. 522-528.
- EUROPEAN SPACE AGENCY – CEOS CAL/VAL PORTAL – CEOS CAL/VAL SITES. Disponível em: < <http://calvalportal.ceos.org/calvalsites>> Acesso em: fev. 2021.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **Document - Sentinel-2 Calibration and Validation Plan for the Operational Phase**, vol. 1, Rev. 6, European Space Agency, 2014. 120p.
- EUROPEAN SPACE AGENCY – SENTINEL - CALIBRATION. Disponível em: < <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/calibration>>, Acesso em: dez. 2020.
- FRASER, C., BALTSAVIAS, E. P., GRUEN, A. Processing of IKONOS Imagery for Sub-meter 3D Positioning and Building Extraction. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, vol. 56, n. 3, 2002. pp. 177-194.
- FRASER, C.S.; DIAL, G.; GRODECKI, J. Sensor orientation via RPCs. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, vol. 60, 2006. pp. 182-194.
- GACHET, R. Spot5 In-Flight Commissioning: Inner orientation of HRG and HRS instruments. **Proceedings of the ISPRS Congress**, vol. XXXV Part B1, Istanbul, 2004. pp. 535-539.
- GRESLOU, D.; LUSSY, F.; DELVIT, J. M.; DECHOZ, C.; AMBERG, V. PLEIADES-HR innovative techniques for geometric image quality commissioning. **Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. XXXIX Part B1, Melbourne, 2012. pp. 543-547.
- GRUEN, A.; KOCAMAN, S.; WOLFF, K. Calibration and validation of early ALOS/PRISM images. **The Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 46, n. 1, 2007. pp. 24-38.
- GUGAN, D. J.; DOWMAN, I. J. Topographic mapping from SPOT imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 54, n. 10, 1988. pp. 1409-1414.
- JACOBSEN, K. Calibration of IRS-1C PAN-camera, **Proceedings of the Joint Workshop “Sensors and Mapping from Space”**, Hannover, 1997.
- JACOBSEN, K. Geometry of satellite images – calibration and mathematical models. **Proceedings of the Korean Society of Remote Sensing - ISPRS international conference**, Jeju, 2005. pp. 182-185.
- JIANG, Y.; ZHANG, G.; WANG, T.; LI, D.; ZHAO, Y. In-Orbit Geometric Calibration Without Accurate

- Ground Control Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 84, n. 8, 2018. pp. 485-493.
- JOVANOVIĆ, V. M., SMYTH, M. M., ZONG, J. MISR Level 1 In-flight Geometric Calibration Algorithm Theoretical Basis. JPL report, code JPL D-13399, **Rev. B, Jet Propulsion Laboratory - California Institute of Technology**, 1999. 80p.
- KIM, T.; DOWMAN, I. Comparison of two physical sensor models for satellite images: Position-Rotation model and Orbit-Attitude model. **The Photogrammetric Record**, vol. 21, n. 114, 2006. pp. 110–123.
- KOCAMAN S. Sensor modeling and validation for linear array aerial and satellite imagery. Tese de doutoramento. **Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology - ETH**, Zurich, 2007. 178p.
- KORNUS, K.; LEHNER, M.; SCHROEDER, M. Geometric Inflight Calibration of the Stereoscopic CCD-Linescanner MOMS-2P, **Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. 32-1, 1998. pp. 148-155.
- LUSSY, F.; GRESLOU, D.; DECHOZ, C.; AMBERG, V.; DELVIT, J.M.; LEBEGUE, L.; BLANCHET, G.; FOUREST, S. Pleiades HRin flight geometrical calibration: Location and mapping of the focal plane. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIX-B1:519-523**, 2012. pp. 519-523.
- MARCATO JUNIOR, J.; TOMMASSELLI, A. M. G.; OLIVEIRA, R. A.; MEDEIROS, N. G.; MARCATO, V. J. Orientação de imagens CBERS-2B usando o modelo rigoroso de colinearidade com dados orbitais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol. 17, n. 3, 2011. pp. 401-416.
- MICHALIS, P.; DOWMAN, I. J. A model for along track stereo sensors using rigorous orbit mechanics. **Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. XXXVI Part 1/W3, Hannover, 2005.
- MCGLONE, J. C.; MIKHAIL, E. M. **Photogrammetric Analysis of Aircraft Multispectral Scanner Data, Technical Report**, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1981. 178p.
- MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. New York: John Wiley & Sons, 2001. 496p.
- MULAWA, D. On-Orbit geometric calibration of the Orbview-3 high resolution imaging satellite. **Proceedings of the ISPRS Congress**, vol. XXXV Part B1, Istanbul, 2004. pp. 1-6.
- ORUN, A. B. NATARAJAN, K. A Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photography: Tradeoff. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, vol. 60, n. 12, 1994. pp. 1431-1437.
- PI, Y.; YANG, B.; LI, X.; WANG, M. Study of full-link on-orbit geometric calibration using multi-attitude imaging with linear agile optical satellite. **Optics Express**, vol. 27, n. 2, 2019. pp. 980-998.
- POLI, D. **Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors**. Tese de doutoramento. Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology - ETH, Zurich, 2005. 217p.
- RADHADEVI, P. V.; SOLANKI, S. S. In-Flight geometric calibration of different cameras of IRS P6 using a physical sensor model. **The Photogrammetric Record**, vol. 23, n.121, 2008. pp. 69-89.
- STOREY, J.; CHOATE, M.; LEE, K. Landsat 8 Operational Land Imager On-Orbit Geometric Calibration and Performance. **Remote Sensing**, vol. 6, 2014. pp. 11127-11152.
- RODRIGUES, T. L. **Fototriangulação de imagens PRISM-ALOS com estimativa dos POI em órbita utilizando os modelos de plataforma UCL e J2**. Tese de doutoramento. Universidade Federal do Paraná, Programa Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 2016. 170p.
- RODRIGUES, T. L.; MACHADO, M. V. A novel model for orientation of linear optical satellite images based in the adaptation of the orbit-attitude model. **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol. 25, n. 3, 2019.
- RODRIGUES, T. L.; MACHADO, M. V.; DEBIASI, P.; MITISHITA, E. A.; FERREIRA, L. D. D. Calibração geométrica em órbita do sensor HRC-CBERS 2B. **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol. 22 n. 1, 2016.

pp. 1413-4853.

- RODRIGUES, T. L.; MITISHITA, E. A.; FERREIRA, L. D. D. Orientação de imagens PRISM – ALOS utilizando diferentes modelos de plataforma. **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol. 21, n. 2, 2015. pp. 409-432.
- RODRIGUES, T. L.; MITISHITA, E. A.; FERREIRA, L. D. D.; TOMMASELLI, A. M. G. Accuracy Improvements in the Orientation of ALOS PRISM Images Using IOP Estimation and UCL Kepler Platform Model. **Remote Sensing**, vol. 9, n. 7, 2017. pp.634-665.
- ROTTENSTEINER, F., WESER, T., LEWIS, A. AND FRASER, C.S. A strip adjustment approach for precise georeferencing of ALOS imagery. **Proceedings of the 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Cape Town, 2009. pp. 4083-4091.
- SANTER, R.; GU, X. F.; GUYOT, G.; DEUZE, J. L.; DEVAUX, C.; VERMOTE, E.; VERBRUGGHE, M. SPOT calibration at the La Crau test site (France). **Remote Sensing of Environment**, vol. 41, n. 2-3, 1992. pp. 227-237.
- SCHNEIDER, M.; LEHNER, M.; MÜLLER, R.; REINARTZ, P. Stereo evaluation of alos/prism data on ESA-AO test sites-first DLR results. **Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. XXXVII Part B1, Beijing, 2008. pp.739-744.
- STOREY, J.; CHOATE, M.; LEE, K. Landsat 8 Operational Land Imager On-Orbit Geometric Calibration and Performance. **Remote Sensing**, vol. 6, 2014. pp. 11127-11152.
- TADONO T.; SHIMADA M.; WATANABE M.; HASHIMOTO T.; IWATA T. Calibration and Validation of PRISM Onboard ALOS. **Proceedings of the ISPRS Congress**, vol. XXXV Part B1, Istanbul, 2004. pp. 13-18.
- TAO, C. V.; HU, Y. A comprehensive study of the rational function model. *Photogrammetric processing, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 67, n. 12, 2001. pp. 1347-1357.
- TOUTIN, T.; BLONDEL, E.; MIETKE, S., ROTHER, K. In-flight calibration of SPOT-5 and Formosat-2. **Proceedings of the ISPRS Congress, ISPRS Commission I Symposium**, vol. XXXVI Part B1, Paris, 2006. pp. 360-367.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY - **EROS CAL/VAL CENTER OF EXCELLENCE (ECCOE) - TEST SITES CATALOG**. Disponível em: < https://calval.cr.usgs.gov/apps/test_sites_catalog>. Acesso em: fev. 2021a.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY - **EROS CAL/VAL CENTER OF EXCELLENCE (ECCOE) - TEST SITES CATALOG - SITE NAME: SIOUX FALLS RANGE**. Disponível em: < <https://calval.cr.usgs.gov/apps/sioux-falls-range>>, Acesso em: fev. 2021b.
- VALORGE, C.; MEYGRET, A.; LEBÈGUE, L.; HENRY, P.; BOUILLON, A.; GACHET, R.; BRETON, E.; LÉGER, D.; VIALLEFONT, F. Forty years of experience with SPOT in-flight calibration. In: MORAIN, S. A.; BUDGE, A. M. **Post-Launch Calibration of Satellite Sensors**. London: CRC Press, 2004. cap. 5, p. 116-148.
- WANG, M.; YANG, B.; HU, F.; ZANG, X. On-Orbit geometric calibration model and its applications for high-resolution optical satellite imagery. **Remote Sensing**, vol. 6, 2014. p. 4391-4408.
- WERTZ, J. R. **Spacecraft Attitude Determination and Control**. Reidel, Dordrecht, 1978. 880 p.
- WESER, T., ROTTENSTEINER, F., WILLNEFF, J. AND FRASER, C.S. A generic pushbroom sensor model for high-resolution satellite Imagery applied to SPOT 5, QUICKBIRD and ALOS data sets. **Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. XXXVI Part I/W51, Hannover, 2007.
- WESER, T.; ROTTENSTEINER, F.; WILLNEFF, J.; POON, J.; FRASER, C. S. Development and testing of a generic sensor model for pushbroom satellite imagery. **The Photogrammetric Record**, vol. 23, n. 123, 2008. pp. 255-274.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry: With Applications in GIS**. 3ª ed. U.S.A:

McGraw-Hill Book Company, 2000. 676p.

ZHANG, Y.; ZHENG. M. Bundle Block Adjustment with self-calibration of long orbit CBERS-02B imagery. **Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. XXXIX Part B1, Melbourne, 2012. pp. 291-296.

ZHANG, Y.; ZHENG. M.; XIONG, J.; LU, Y.; XIONG, X. On-orbit geometric calibration of ZY-3 three-line array imagery with multistrip data sets. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 52, n. 1, 2014. pp. 224-234.

Biografia do autor principal



Tiago Lima Rodrigues, nascido em 13 de novembro de 1985 na cidade de Niterói – RJ. É Engenheiro Agrimensor formado pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em 2010, mestre e doutor em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná (2016). Trabalha como docente pesquisador na Universidade Federal do Paraná em Curitiba desde 2016. Atua desde 2009 com modelagem matemática de orientação e correção geométrica de imagens orbitais, calibração geométrica de sensores imageadores lineares *pushbroom* e análise de potencialidade cartográfica de imagens orbitais. Em 2016 e 2017 conduziu experimentos de calibração geométrica em órbita dos sensores HRC-CBERS 2B e PRISM-ALOS.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.