

Caracterização Espectral e Radiométrica de Câmera na faixa do Visível

Robert Cardoso Fernandes de Almeida ¹
Thiago Batista dos Santos ²
Ruy Morgado de Castro ^{1,3}

¹ Instituto de Estudos Avançados – IEAv
Caixa Postal 6044 – 12.228-970 – São José dos Campos – SP, Brasil
rmcastro@ieav.cta.br; robert.rcfa@gmail.com

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
batista.pqt@gmail.com

³ Universidade de Taubaté - UNITAU
Av Marechal Deodoro, 605 – 12080-000 - Taubaté - SP, Brasil
rmcastro@unitau.br

Abstract. Nowadays, with the cheapness and the reliability of unmanned aerial vehicles (ARPs or drones) the use of small sensors has been gaining space. With this, high-resolution commercial digital cameras are being used to obtain images in remote sensing. However, to use this data quantitatively it is necessary that these sensors be known. Therefore, the objective of this work was to propose a methodology to characterize, spectral and radiometric, commercial digital cameras that operate in the visible region of the electromagnetic spectrum. Thus, in the Spectral Characterization the camera sensitivity is determined for each wavelength of the incident electromagnetic radiation. In the Radiometric Characterization, a relation is established between the digital numbers obtained in an image, when the camera is illuminated by a source of electromagnetic radiation whose radiance is known. To test the proposed methodology the characterizations were performed for a Canon camera. For this, the facilities of the LaRaC, of the IEAv, were used. The spectral characterization was performed by the indirect method using a monochromator, a reference sensor with spectral response function calibrated. In the radiometric characterization, the relationship between radiance and digital numbers of the camera was evaluated using an integrating sphere and a spectroradiometer. The results obtained for the spectral characterization are consistent with the expected. The radiometric characterization showed that the behavior of the radiance as a function of digital number does not have a linear behavior.

Palavras-chave: remote sensing, spectral characterization, radiometric characterization, sensoriamento remoto, caracterização espectral, caracterização radiométrica.

1. Introdução

Dados obtidos por técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizados nas mais diferentes áreas do conhecimento, variando desde defesa civil até planejamento urbano. Geralmente estes sistemas sensores são robustos, grandes e pesados, e são instalados em satélites e/ou aeronaves. Atualmente, com o barateamento e a confiabilidade dos veículos aéreos não tripulados (ARP ou *drones*) o uso de sensores de pequeno porte vem ganhando espaço. Em geral, para utilização em *drones*, os sensores precisam ter massa e tamanho reduzidos, para não comprometerem significativamente a sua autonomia (consumo de energia). Com isto, câmeras fotográficas digitais comerciais de alta resolução e com três bandas, RGB (às vezes com pequenas adaptações), estão sendo utilizadas para a obtenção das imagens. Entretanto, para que estes dados possam ser utilizados de maneira quantitativa é necessário que estes sensores sejam conhecidos (PONZONI, 2007).

Para conhecer adequadamente as câmeras (mesmo aquelas que possuam um certificado de “calibração” emitido pelo fabricante ou por outra instituição) é necessário realizar as caracterizações. Assim, o objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para caracterizar espectral e radiometricamente câmeras comerciais que operam na região visível do espectro eletromagnético. Além disso, como aplicação desta metodologia, é apresentado o resultado obtido para a câmera *PowerShot S110 (BK)* da Canon.

2. Materiais e Métodos

Neste trabalho, caracterizou-se uma câmera *PowerShot S110 (BK)* da Canon, pertencente à Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), cujas características resumidas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características da Câmera *PowerShot S110 (BK)*.

Tipo de sensor	CMOS
Elementos de Imagem efetivos (<i>pixel</i>)	4000 x 3000
Dimensão do Sensor (mm)	7,53 x 5,64
Objetiva	Canon Lens
Distância Focal (mm)	5 - 26

Fonte: Canon, 2005.

Para a realização das caracterizações, espectral e radiométrica, foram utilizadas as facilidades do Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletro-ópticos (LaRaC), do Instituto de Estudos Avançados – IEAv, em São José dos Campos.

2.1. Caracterização Espectral

Na Caracterização Espectral é determinada a sensibilidade do sistema sensor para cada comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente. Nesse procedimento, identifica-se a intensidade da resposta do sensor a um fluxo monocromático, cuja varredura em uma determinada região do espectro proporciona a Função de Resposta Espectral de cada banda do sensor. A varredura espectral é obtida com o uso de um monocromador e uma fonte de radiação, os quais possam disponibilizar uma farta amostragem da sensibilidade espectral de cada banda do sensor.

Neste trabalho, o método utilizado para determinar a resposta espectral do sensor eletro-óptico foi o indireto. Na Figura 1, é apresentado o arranjo experimental típico utilizado nas medições para caracterização espectral de sensores no LaRaC (LIMA FILHO, 2015). O arranjo é formado basicamente por: uma fonte de radiação eletromagnética (lâmpada incandescente halógena com filamento de Tungstênio e potência de 100 W); um monocromador *Acton SpectraPro 2500i* (ACTON RESEARCH 2003); um sensor de referência Acton Research modelo SI440 com resposta espectral conhecida.

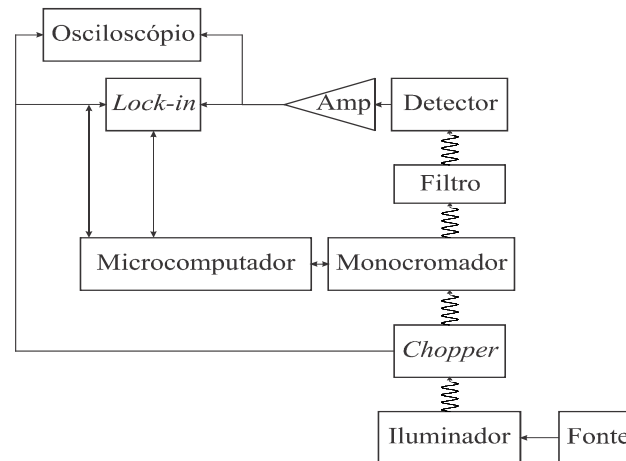


Figura 1. Diagrama esquemático do arranjo para caracterização espectral.
 Fonte: (LIMA FILHO, 2013)

Neste arranjo o sinal medido pelo sensor de referência, que não utilizou o filtro indicado na Figura 1, pode ser escrito por:

$$S_{ref}(\lambda) = Fonte(\lambda) \cdot Mono(\lambda) \cdot Atm(\lambda) \cdot FRE_{ref}(\lambda) \quad (1)$$

onde: S_{ref} é o sinal medido pelo sensor padrão em função do comprimento de onda, λ ; $Mono$ é o sinal de saída do monocromador em função de λ , Atm é a influência da atmosfera em função de λ ; e FRE_{ref} é a função de resposta espectral do detector em função de λ .

A medição do sinal pela câmera foi realizada com o mesmo arranjo, acrescentando um filtro de densidade neutra (para diminuir a intensidade do feixe) após a saída do monocromador. Com a câmera são obtidas imagens e com isto o sinal é fornecido, em cada uma das bandas, em Número Digital (ND) proporcional a radiância incidente. Com isto, na leitura do sinal pela câmera é acrescido um fator que depende do filtro de densidade neutra. Assim o sinal da câmera em uma determinada banda (RGB) é dado por:

$$S_{cam\ banda}(\lambda) = Fonte(\lambda) \cdot Mono(\lambda) \cdot Atm(\lambda) \cdot FRE_{cam\ banda}(\lambda) \cdot Filtro(\lambda) \quad (2)$$

onde: S_{cam} é o sinal medido pela câmera; e FRE_{cam} é a função de resposta espectral da câmera; e $Filtro_{cam}$ é a transmitância do filtro em função de λ .

Considerado que as condições experimentais foram constantes ao longo das medições para ambos os sensores, alguns dos termos das Equações (1) e (2) são os mesmos. Assim, calculando a razão entre as Equações (1) e (2) é possível eliminar os termos em comum. Deste modo, determina-se a FRE da câmera, para cada banda, por:

$$FRE_{cam\ banda}(\lambda) = \frac{S_{cam\ banda}(\lambda)}{S_{ref}(\lambda)} \cdot \frac{FRE_{ref}(\lambda)}{Filtro(\lambda)} \quad (3)$$

Além disso, geralmente, os valores da FRE são apresentados de maneira normalizada (entre 0 e 1), no qual o valor 1 é atribuído ao maior valor da FRE e o 0 corresponde a FRE igual a zero. Com isto o restante da FRE é obtida proporcionalmente a estes dois valores.

Neste experimento, tanto para a câmera quanto para o sensor de referência, foram realizadas medidas entre 380 e 1100 nm, com intervalos de 10 nm. A Câmera e o sensor foram posicionados a 7 cm da saída do monocromador. As medições para o sensor de referência ocorreram de maneira automática, controlada pelo sistema de aquisição de dados do LaRaC. Já as medições com a câmera (ou seja, as imagens) foram obtidas manualmente.

2.2. Caracterização Radiométrica

Na Caracterização Radiométrica é estabelecida uma relação entre o sinal de um sistema sensor e a radiância de uma fonte de radiação eletromagnética padrão, a qual ilumina o sistema sensor.

Em geral, na caracterização radiométrica, é utilizada fonte uma Esfera Integradora – EI, que consiste de uma esfera oca com a superfície interna coberta uniformemente por uma camada de material com alta refletância difusa (AVELISIO *et al.*, 2008). Ela pode possuir orifícios para que sejam acoplados iluminadores e/ou lâmpadas internas. A esfera integradora disponível no LaRaC é a USS2000 da LabSphere, que possui um iluminador, no qual é possível ajustar a quantidade de radiação que penetra na esfera por meio de um parafuso micrométrico. Deste modo, a caracterização radiométrica foi realizada de acordo com o esquema exposto na Figura 2.

O procedimento envolveu a medição da radiância espectral, L_{λ} , da fonte (no caso a EI) por meio de um espectrorradiômetro *FieldSpecPro*. Este espectrorradiômetro mede a radiância espectral no intervalo de 350 e 2500 nm. Entretanto, neste trabalho só havia interesse até o comprimento de 1200 nm.

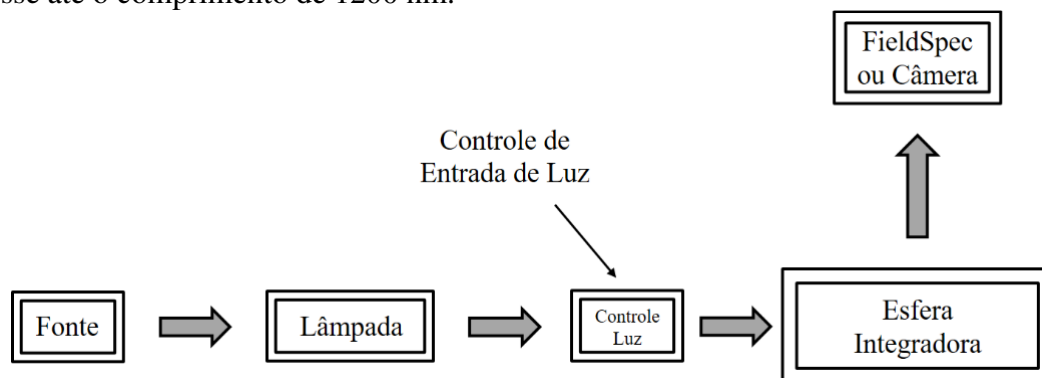


Figura 2. Esquema do arranjo experimental da Caracterização Radiométrica.

A “pistola” de medição do espectrorradiômetro foi posicionada, perpendicularmente, a 25 cm do centro da abertura da esfera. Em seguida o parafuso micrométrico era ajustado em uma posição pré-determinada. Deste modo, para cada ajuste no parafuso micrométrico foi obtida uma curva da radiância espectral.

Da mesma maneira, a câmera foi posicionada perpendicularmente a 25 cm do centro da abertura da esfera. Em seguida, o parafuso micrométrico foi ajustado nas mesmas posições que foram realizadas as medições com o espectrorradiômetro. Para cada ajuste era obtida uma imagem com a câmera.

É conveniente lembrar que a medição da radiância espectral com o espectrorradiômetro variou entre 350 e 2500 nm, ao passo que no sensor eletro-óptico da câmera, para cada uma das suas bandas, é realizada em uma faixa de comprimento de onda. No caso do canal azul, a FRE (obtida com a caracterização espectral, ver Seção 2.1) compreende a faixa espectral entre os comprimentos de onda λ_1 e λ_2 , ver Figura 3. Entretanto a curva radiância espectral fornecida pela fonte é bem mais ampla.

Com isto, para determinar a radiância em cada banda da câmera, temos que ponderar a curva de radiância espectral com a função de resposta espectral da banda. Assim:

$$L_{banda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} FRE_{cam\ banda}(\lambda) \cdot L_{\lambda} \cdot d_{\lambda}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} FRE_{cam\ banda}(\lambda) \cdot d_{\lambda}} \quad (4)$$

onde L_{banda} é a radiância em cada banda.

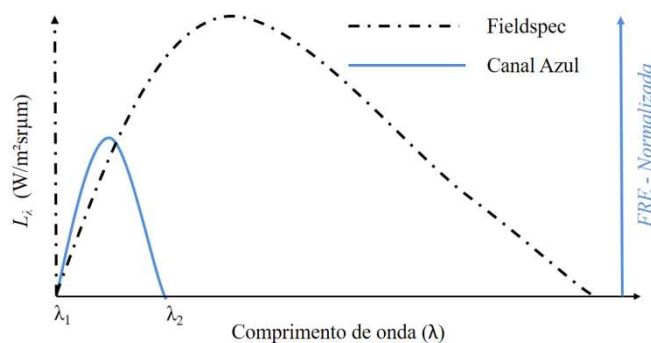


Figura 3. Comparação da radiância espectral e a FRE da banda azul da câmera.

Todavia, além dos valores de leitura não serem, em geral, contínuos (neste trabalho os intervalos utilizados na determinação da FRE são de 10 nm) a equação pode ser reduzida para:

$$L_{banda} = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} FRE_{cam\ banda}(\lambda) \cdot L_{\lambda}}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} FRE_{cam\ banda}(\lambda)} \quad (5)$$

Assim, com o valor de ND obtido da imagem, é possível obter uma relação entre ND e a radiância em cada banda, para cada curva radiância obtida. Com isto é estabelecida a caracterização radiométrica.

3. Resultados

Para a realização das caracterizações a câmera foi ajustada para condições de uso em voo, ou seja, com ISO200 e distância focal de 5 mm. Na Figura 4 é possível observar o arranjo experimental envolvido na caracterização espectral.

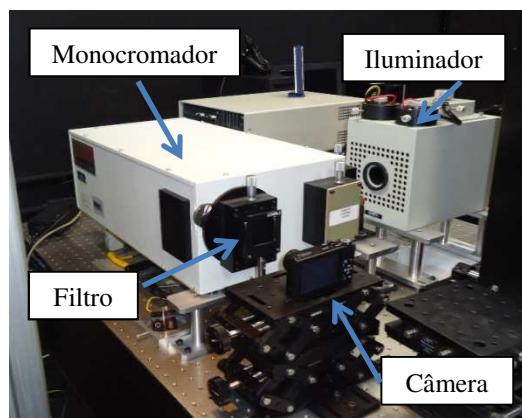


Figura 4. Arranjo experimental envolvido na caracterização espectral.

3.1. Caracterização Espectral

Os resultados da caracterização espectral se apresentam conforme o procedimento exposto na Seção 2.1. Com isto o sinal, $S_{ref}(\lambda)$, obtido com o detector de referência é apresentado na Figura 5a. Já FRE do detector de referência, $FRE_{ref}(\lambda)$, é apresentada na Figura 5b.

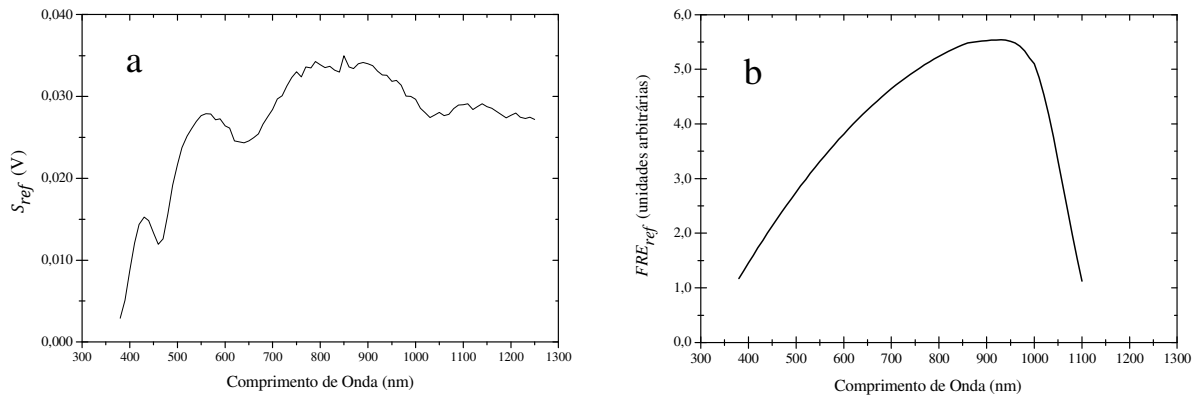


Figura 5. Gráficos do: a) Sinal e b) FRET, do detector de referência.

O sinal obtido com a câmera, para cada uma das bandas, $S_{cam\ banda}(\lambda)$, é apresentado na Figura 6a. A transmitância do filtro é apresentada na Figura 6.b.

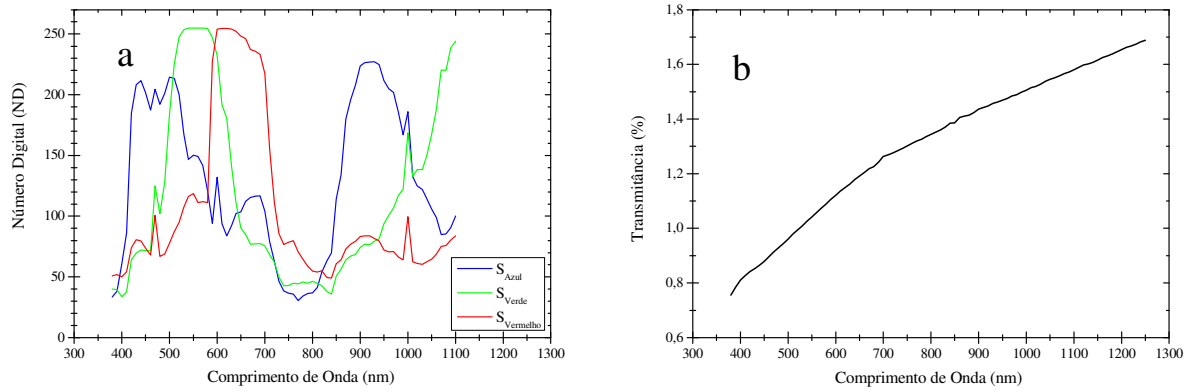


Figura 6: Em a) Sinal das três bandas da câmera. Em b) Transmitância do filtro.

Após realizar os cálculos propostos na Equação (3), tem-se a FRET das três bandas da câmera, que são apresentadas na Figura 7.

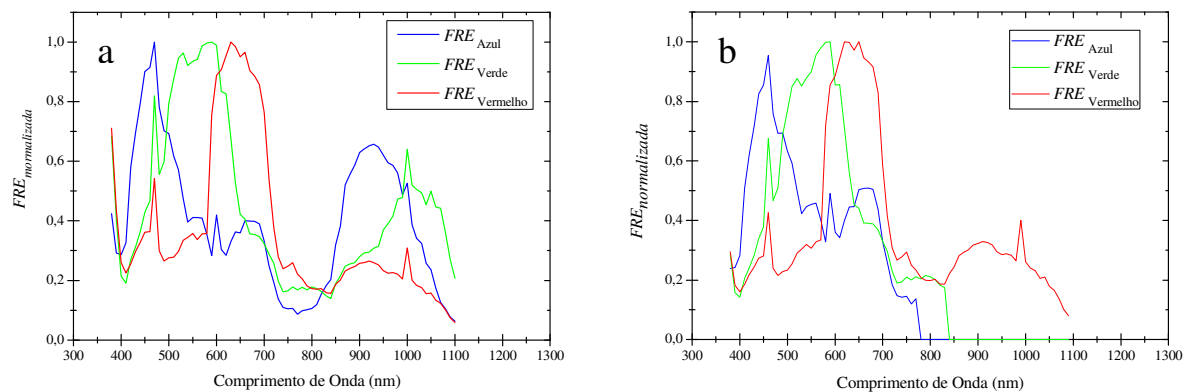


Figura 7. FRET das três bandas da câmera. Em a) com a contribuição dos harmônicos e bem) sem a contribuição dos Harmônicos nas bandas do azul e verde.

Analisando as Figuras 6a e 7a, observa-se que para o canal azul, a partir do comprimento de onda 800 nm, há um reinício de ciclo. Isto deve-se aos “harmônicos” dos comprimentos de ondas fornecidos pelo monocromador. Assim, caso houvesse um filtro para evitar as contribuições dos harmônicos, esse ciclo provavelmente não se reiniciaria, mas, como já citado, não foi possível obter esse filtro. Assim, para “substituir” a função do filtro passa alta, foi considerado não haver contribuição a partir do comprimento de onda 790 nm para o azul e 850 nm para o canal verde. Isto não foi necessário para o canal vermelho. Portanto a FRE normalizada da câmera, para as três bandas, sem a contribuição dos harmônicos, pode ser visualizada na Figura 6b.

3.2. Caracterização Radiométrica

A medição da radiância, ver Figura 8a, foi realizada utilizando um espectrorradiômetro, para cada um dos ajustes, do parafuso micrométrico, disponíveis no iluminador da esfera integradora. Na Figura 8b são apresentados os ND obtidos com a câmera para cada um dos ajustes do parafuso.

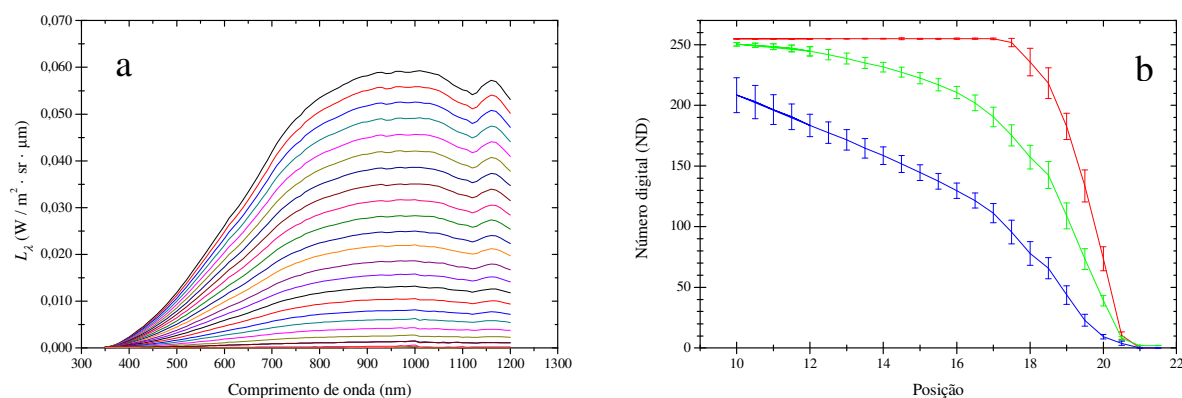


Figura 8. Em a) radiância espectral obtida com o espectrorradiômetro para cada ajuste do parafuso micrométrico do iluminador da Esfera Integradora. Em b) ND obtido para cada banda da câmera para cada ajuste do parafuso.

Analisando a Figura 8b verificamos que cada banda responde de uma maneira diferente. A resposta da banda do azul não satura em nenhum momento. O contrário ocorre com a banda do vermelho e em alguns momentos na banda do verde. Esta saturação significa que valores de radiância superiores aos limites das bandas foram associados ao número digital 255. Assim, os pontos nos quais ocorreu a saturação não foram considerados na caracterização radiométrica.

Por fim, foi obtido o resultado da caracterização radiométrica, para cada banda da câmera, utilizando a Equação (5). Na Figura 9 tem-se o gráfico radiância em cada banda da câmera em função do ND, estabelecendo a caracterização radiométrica.

Por meio da Figura 8a, verifica-se que o comportamento da radiância, em cada banda, em função do ND, não possui um comportamento linear em toda a faixa de ND.

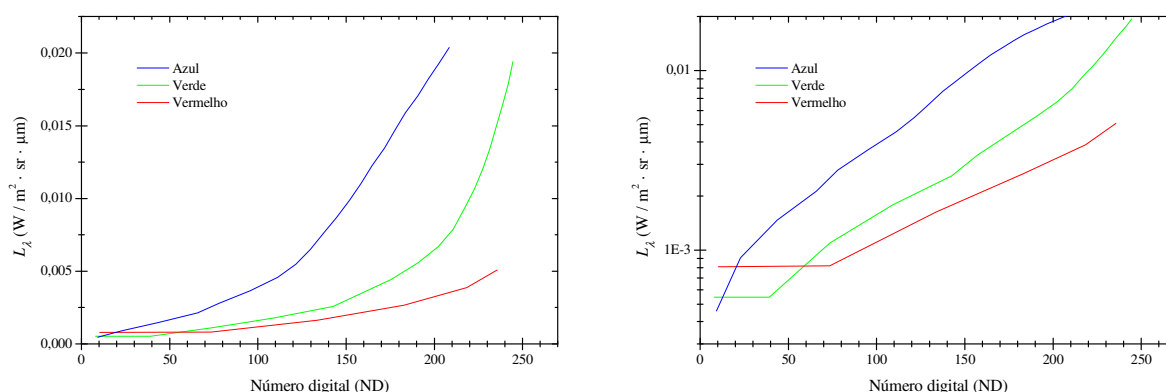


Figura 9. Gráfico da radiância em cada banda da câmera em função do ND. Em a) gráfico com escalas lineares e em b) a escala do eixo vertical é logarítmica.

4. Conclusão

Este trabalho teve como objetivo, estabelecer uma metodologia experimental de caracterização espectral e radiométrica para câmeras fotográficas digitais comerciais para uso embarcado em VANTS e *drones*. Foi avaliada a câmera Canon PowerShot S110 (BK), para cada uma das suas bandas (azul, verde e vermelho), o que permitiu obter, por comparação com o detector Acton modelo SI440, o conhecimento da Função de Resposta Espectral.

A caracterização radiométrica proposta por esta metodologia, estabelece a radiância para cada número digital de cada banda da câmera. No caso da câmera Canon PowerShot S110 (BK), constatou-se que para cada banda a curva da radiância em função do ND possui um comportamento não linear.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, Robert Cardoso Fernandes de. **Avaliação de sistemas eletro-ópticos imageadores para missões de inteligência de imagens na faixa do visível**. 2016. 146f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Física e Matemática Aplicadas) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2016.
- ACTON RESEARCH CORPORATION. **Spectrapro-2500i**: operating instructions. Acton, MA, 2003.
- AVELISIO, M. A; SILVA, M. L; MELO, M. C; PINTO, C. T; CASTRO, R. M; MOREIRA, R. C. Caracterização Radiométrica de Sensores Eletroópticos. In: II Seminário de Iniciação Científica do IEAv, 2008, São José dos Campos. Anais... São José dos Campos: IEAv, p. 25-26, 2008.
- LIMA FILHO, G. M. de. **Caracterização radiométrica de câmera que opera no infravermelho médio**. 2013. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Especialização em Análise de Ambiente Eletromagnético) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos.
- LIMA FILHO, G. M. de. **Metodologia de caracterização de sistema eletro-óptico para missões de busca e patrulha marítima**. 2015. 106f. Dissertação de mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- PONZONI, F. J.; ZULLO JR., J.; LAMPARELLI, R. A. C. **Calibração absoluta de sensores orbitais: conceituação, principais procedimentos e aplicação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. v. 1, 64 p.