

TÉCNICA PARA DETERMINAR A FUNÇÃO DE RESPOSTA DOS FILTROS DE RADIAÇÃO VISÍVEL DAS CÂMARAS DIGITAIS

Technique for determining the digital camera response function of the visible radiation filters

JOÃO BATISTA TAVARES JÚNIOR¹
EVALDO RIBEIRO²
DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS¹
FLAVIO JORGE PONZONI³

^{1,2}Universidade Federal do Paraná – UFPR

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
e-mail: joaotavaresjunior@yahoo.com.br; danielsantos@ufpr.br

²Programa de Pós-Graduação em Física
Curitiba – Paraná - Brasil
e-mail: evaldo@fisica.ufpr.br

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
São José dos Campos – São Paulo – Brasil
e-mail: flavio@dsr.inpe.br

RESUMO

Para efetuar a calibração radiométrica de um sistema sensor imageador é fundamental estudar a função de resposta dos filtros (FRF), contidos no mesmo. Dada à importância do tema, neste trabalho é proposta uma técnica para determinar a FRF de radiação visível utilizando: uma esfera integradora - modelo 2500; e um espectrofotômetro - modelo Beckman Acta MIV (UV – Visible Spectrophotometer). Para avaliar a técnica proposta, foram conduzidos experimentos em laboratório com a câmara SONY DSC – F828. Os resultados obtidos foram analisados com uso de gráficos de frequência de níveis de cinza registrados e com a largura espectral nominal dos filtros definida pelo critério da Largura Completa na Metade do Máximo (FWHM – em inglês, *Full Width at Half Maximum*). Os resultados obtidos mostraram sua aplicabilidade, apontando seu

potencial e eficiência no processo de determinação da FRF de radiação visível de câmaras digitais.

Palavras-chave: Esfera integradora; Espectrofotômetro; Beckman Acta; corrente escura, CCD; SONY DSC – F828.

ABSTRACT

To effect the radiometric calibration of an imaging sensor system which is basic to study the response function of the filters, contained in the same. Given the importance of the subject, in this work a technique is proposed to determine the response function of visible radiation filters using: an integration sphere - model 2500; and one spectrophotometer - model Beckman Acta MIV (UV - Visible Spectrophotometer). To evaluate the proposed technique, were conducted experiments in laboratory with camera SONY DSC - F828. The gotten results were analyzed with use of graphs of frequency of registered gray levels and with the nominal spectral width of the filters defined by the criterion of the Full Width at Half Maximum (FWHM). The gotten results showed the proposed technique; it has potential for determine the response function of the visible radiation filters for digital camera.

Keywords: Integration sphere; Spectrophotometer; Beckman Acta; dark current; CCD; SONY DSC - F828.

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico no processo de aquisição de imagens de sensoriamento remoto foi marcado pelo desenvolvimento dos detectores fotoelétricos e do sistema de rastreamento e de transmissão de dados de satélites (*Tracking and Data Relay Satellite Systems – TDRS*) (JENSEN, 2009).

Originalmente aplicado como dispositivo de memória, o CCD (em inglês, *Charge Coupled Device*), por apresentar: sensibilidade à radiação eletromagnética, ser de baixo custo, baixa relação sinal/ruído (S/R) e de excelente confiabilidade quando comparado a outros dispositivos; foi rapidamente aplicado no processo de aquisição de imagens, sendo hoje o dispositivo mais popular e usual nos sensores imageadores disponíveis no mercado, revolucionando a coleta de dados digitais (ISAAC NEWTON GROUP OF TELESCOPES, 2008; ATKINSON, 1996 e JENSEN, 2009).

Kasser e Egels (2002) retratam que o desenvolvimento dos sistemas sensores imageadores movera-se em dois sentidos simultâneos, usando dois dispositivos CCD: (1) o CCD linear, encontrado, por exemplo: no sensor Ikonos e na câmara ADS - 40 da Leica; e (2) o CCD de quadro, encontrado, por exemplo: em câmara fotográfica digital convencional e na câmara DMC 2001 da Zeiss-Intergraph. É importante frisar que, apesar da consolidação da eficiência dos sistemas sensores já desenvolvidos, pesquisadores ainda continuam a busca por sistemas sensores imageadores mais eficientes.

Basicamente, o CCD é um dispositivo composto por material semicondutor fotoelétrico, que mediante um processamento específico, é estruturado na forma de uma matriz unidimensional e/ou bidimensional de capacitores (fotocélulas/pixels), capaz de transformar a energia luminosa em energia elétrica, sendo esta acumulada nos capacitores. Ao final da exposição, o circuito transforma a carga acumulada em cada capacitor em uma voltagem, que será utilizada para montar a imagem (RIBEIRO, 2008).

De acordo com Tommaselli et al. (2000) e Atkinson (1996) um conjunto básico para coleta de imagens é composto por um sistema de lentes, um material foto-sensível e um sistema de gravação final da imagem. Para formar a imagem, as câmaras digitais possuem um conversor analógico digital (A/D) que transforma o sinal elétrico analógico gerado pelo CCD em um sinal digital, sendo este armazenado em uma unidade de memória. Nas câmaras digitais, a formação da cor é baseada nos princípios de filmes coloridos. Para tanto, são dispostas três películas (filtros de radiação visível) sobre o CCD que são sensíveis às cores fundamentais (azul, verde e vermelho) (BOCKAERT, 2003).

Segundo Atkinson (1996) a necessidade de utilizar filtros de radiação visível sobre o CCD para formar as cores, está relacionada com a capacidade de sensibilização da grande maioria dos CCD, nos comprimentos de onda compreendidos entre 400 a 1100 nm; região correspondente à faixa espectral do visível e infravermelho próximo. Assim, somente os fluxos de radiação eletromagnética (REM), pertencentes à região definida pela função de resposta dos filtros (FRF), sensibilizam o dispositivo supracitado.

Para Bockaert (2003), devido às características do CCD, não é possível utilizar camadas de filtros de radiação visível (Filtro passa banda) contínua sobre o CCD. Neste caso, os filtros são dispostos sobre o CCD em forma de uma grade de filtro de radiação visível, denominada filtro de Bayer (FB). Atualmente existem diversas composições de filtros para a grade FB, mas a composição de filtro originalmente proposta por Bayer é baseada no processo aditivo das cores fundamentais, sendo composta por um arranjo de filtros RGB (*Red* – vermelho, *Green* – verde, *Blue* – azul) (SAVARD, 2005 e McHUGH, 2008).

Devido às características do CCD e dos filtros de radiação visível, algumas câmaras são dotadas de um filtro de absorção infravermelho (filtro interno), evitando que o CCD seja sensibilizado pelos comprimentos de onda maiores que 700 nm, ou seja, comprimentos de onda pertencentes à faixa do infravermelho próximo (700 – 1100 nm) (TOMMASELLI e IMAI, 2008). Portanto, segundo Tommaselli e Imai, (2005) apud Sartori et al. (2007), para obter uma imagem infravermelha é necessário eliminar o filtro interno infravermelho e introduzir, externamente, um filtro bloqueador do visível, o leitor interessado em mais informações sobre outras formas em obter imagens infravermelha com câmaras digitais ver Disperati, et al. (2009). Geralmente, os fabricantes de câmaras digitais

não disponibilizam a função de resposta dos filtros que compõem o sistema radiométrico das câmaras.

Com o avanço da tecnologia dos sensores digitais em câmaras fotográficas e sua conseqüente popularização, surge a possibilidade de aplicar este instrumento em trabalhos científicos que vislumbram seu emprego como meio de aquisição de dados espaciais para o estudo das propriedades físicas da superfície; para tanto, é indispensável o conhecimento dos parâmetros de transformação dos valores digitais em valores físicos, cujo processo é conhecido como calibração radiométrica da câmara. Para executar este processo é necessário conhecer as características dos elementos (CCD, filtros e lentes) que compõem o sistema radiométrico da câmara digital. Neste artigo é proposta uma técnica para determinar a FRF de radiação visível do sistema sensor da câmara SONY DSC – F828 por meio de análises de imagens adquiridas em laboratório com uso de um espectrofotômetro - Beckman Acta MIV (UV – *Visible Spectrophotometer*) - e uma esfera integradora modelo 2500.

2. MÉTODO

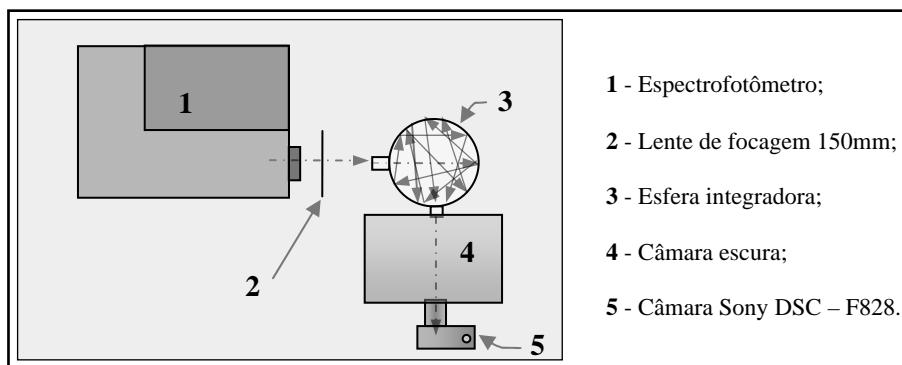
2.1. Determinação da Função de Resposta dos Filtros (FRF) de Radiação Visível de Sistemas Sensores Imageadores

Como descrito anteriormente, para determinar a FRF que compõem a grade de filtro de radiação visível do CCD de quadro da câmara Sony DSC – F828 é proposto, neste trabalho, o uso de um espectrofotômetro - Beckman Acta MIV (UV – *Visible Spectrophotometer*) e uma esfera integradora - modelo 2500.

O espectrofotômetro supracitado é um equipamento capaz de emitir um fluxo de luz monocromático dentro da faixa espectral compreendida entre 350 a 1000 nm, sendo regulável a largura do feixe de REM emitido. Neste trabalho, foi utilizada a fonte de Tungstênio do espectrofotômetro e as fendas foram ajustadas para manter uma resolução espectral de 2 nm. Já a esfera integradora é, basicamente, uma esfera oca com no mínimo dois orifícios, sendo um para a entrada de REM e o outro para a instalação de fotodetectores (PONZONI et al., 2007). Seu interior é revestido com uma substância isotrópica (geralmente utiliza o sulfato de bário (BaSO_4)) que reflete e difunde a REM incidente homogeneizando-a em todas as direções (LABSPHERE, 2003).

Para evitar que a câmara registre valores diferentes do emitido pelo equipamento (advindos da interferência da luz externa), neste trabalho, é proposta a confecção de uma câmara escura com duas aberturas laterais, isto é: uma adaptada na objetiva da câmara; e outra na abertura de saída da esfera integradora (Figura 1).

Figura 1: Sistema de aquisição de dados para determinar a FRF de radiação visível pertencente a sistema sensor imageador.



A Figura 1 mostra a disposição dos equipamentos supracitados: O espectrofotômetro - Beckman Acta MIV (UV – Visible Spectrophotometer) (1) emite o fluxo de REM que incide sobre uma lente de focagem 150 mm (2) a qual o focaliza dentro da esfera integradora (3) onde é homogeneizado pelo processo de reflexão e difusão. Como o diâmetro das aberturas de entrada e saída de REM da esfera integradora é em torno de 3,16 cm e o da lente da câmara (5) em torno de 5,8 cm; é necessário utilizar uma câmara escura (4) para evitar interferência de REM externa, contudo, somente uma parte da área do CCD da câmara digital será sensibilizada pela REM difusa na esfera integradora.

Por conseguinte, uma análise gráfica (nível de cinza (NC) x frequência) é realizada para avaliar as bandas sensibilizadas por determinados comprimentos de onda do espectro eletromagnético. A análise gráfica possibilita determinar a função de resposta dos filtros de radiação visível dispostos sobre o CCD. No entanto, é importante lembrar que durante a interação CCD-REM, uma interferência térmica é acumulada em cada pixel da imagem, sendo seu efeito conhecido como corrente escura (em inglês, *dark current*). A corrente escura provoca dois tipos de ruídos, isto é: o ruído de leitura; e o ruído espacial. O leitor interessado em mais informações consultar Theta System Elektronik GmbH (2004), Ré (2005), Beynon e Lamb (1980).

Tavares Jr. (2008) relaciona os ruídos nas imagens, que segundo a Digital Photography Review (2009) aumenta ao variar o ISO da câmara, ao ruído de leitura provocado pela corrente escura. O ISO (*International Standards Organization*) é um número usado para indicar a “sensitividade” e velocidade de interação do CCD-REM, portanto, fazendo analogia com o filme fotográfico, ao mudar o valor ISO, automaticamente muda a “sensibilidade do sensor” à REM, sendo que quanto

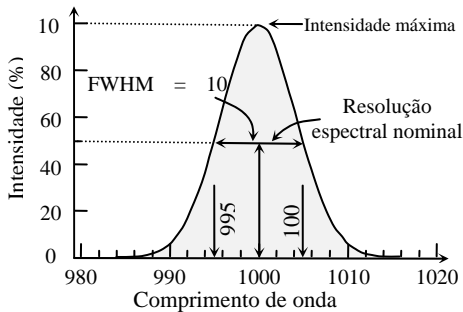
menor o valor ISO menor a “sensibilidade do sensor” à REM. Por outro lado, quanto maior for o ISO maior a “sensibilidade do sensor” à REM.

De acordo com o exposto acima, para verificar o efeito ISO x Ruído de leitura na redução ou ampliação nos valores de NC gerados pela carga acumulada no CCD (corrente escura) é proposta a tomada de imagens variando o ISO da câmara. Desta forma, foi adotada como estratégia a aquisição de três conjuntos de dez imagens em ambiente totalmente escuro, cujas variações de ISO foram 200, 400 e 800. Os gráficos de frequência foram gerados com uso do valor mínimo, médio, mediano, moda e máximo de NC registrados.

Usualmente, a literatura sugere que as bandas espectrais terminam abruptamente, o que de fato não ocorre. Pois devido às aberrações no sistema óptico, o perfil da FRF passa banda, em sua grande maioria, aproxima-se a uma forma Gaussiana (CLARK, 1999).

Para Clark (1999) e Jensen (2009), a forma mais precisa para estabelecer o intervalo de comprimento de onda específicos (banda ou canal) no espectro eletromagnético de um filtro passa banda ou de um sensor é observar a forma Gaussiana da função de resposta do filtro ou do sensor, sendo sua largura espectral definida pelo critério da Largura Completa na Metade do Máximo (FWHM - *Full Width at Half Maximum*) (Figura 2). Cabe ressaltar que, o critério FWHM, foi adotado pela NASA para calcular a amplitude nominal dos filtros (amplitude espectral das Bandas) dos sensores dos satélites da série LandSat (NASA, 2008).

Figura 2 – Intervalo espectral definido com base no critério da Largura Completa à Metade do Máximo (FWHM).



Fonte: Clark (1999)

No entanto, para calcular a amplitude espectral nominal dos filtros de radiação visível dispostos sobre o CCD da câmara Sony DSC – F828, neste trabalho, optou-se pelo uso do critério FWHM aplicado à curva resultante da FRF ajustada à forma Gaussiana.

3. EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os experimentos e análises conduzidos neste trabalho estão divididos em três etapas, a saber: 1) Avaliação ISO x Ruído de leitura; e 2) Determinação da função de resposta dos filtros (FRF) de radiação visível da câmara SONY DSC - F828. 3) Definição da amplitude espectral nominal dos filtros de radiação visível da câmara SONY DSC - F828.

3.1. Avaliação ISO x Ruído de leitura

Como a quantidade de ruído na imagem altera conforme a variação do ISO da câmara, para verificar o efeito de redução ou ampliação nos valores de NC gerados em cada elemento de imagem (pixel) pela corrente escura foram adquiridos três conjuntos de dez imagens em ambiente totalmente escuro, cujas variações de ISO foram: 200; 400; e 800; obtendo assim, dez amostras para cada elemento da imagem (pixel).

Para avaliar os dados obtidos, foram construídos gráficos (histogramas) de frequência (4ª Etapa – Figura 3) representando os valores:

mínimo ($NC_{\text{mínimo}} = \min(A)$), médio ($NC_{\text{médio}} = \text{mean}(A)$), mediano ($NC_{\text{mediano}} = \text{median}(A)$), moda ($NC_{\text{moda}} = \text{mode}(A)$) e máximo ($NC_{\text{máximo}} = \max(A)$) ($A = p(l, c, k)$ onde p é o pixel na posição (l, c) , sendo l o número da linha, c o número da coluna e k o número de cenas que compõem o conjunto de imagem em análise) de NC (3ª Etapa – Figura 3) registrados em cada pixel do conjunto de cenas (2ª Etapa – Figura 3) que compõem o conjunto de imagens (1ª Etapa – Figura 3) adquirido em ambiente escuro, como pode ser observado no fluxograma da Figura 3.

Aplicando as etapas descritas no fluxograma apresentado na Figura 3 aos conjuntos de imagens, cujas variações de ISO foram: 200; 400; e 800; foram obtidos os seguintes gráficos apresentados na Figura 4.

Como pode ser observado na Figura 4, os gráficos demonstram que quanto menor o ISO menor o valor de NC resultante da corrente escura. Também pôde ser observado que, em todos os casos, os valores de máximo de NC registrados na banda do vermelho foram maiores que os valores de NC registrados nas demais bandas, que também diferem entre si. Isto demonstra que os operadores de transformação A/D operam com coeficientes distintos para cada banda espectral e para cada número ISO, o que mostra a dificuldade e justifica a necessidade em realizar a calibração radiométrica de câmaras digitais.

Pode-se perceber na Figura 4 que o valor máximo de NC gerado ao utilizar o ISO200 não ultrapassou 24 NC. Já com o ISO400 esse valor passou para 50 NC e com o ISO800 para 85 NC. Em porcentagem, esses valores correspondem a 9,41%, 19,60% e 33,33% do valor de NC para imagens de 8 bits.

Figura 3 – Fluxograma das etapas para avaliar o efeito ISO x Ruído de leitura.

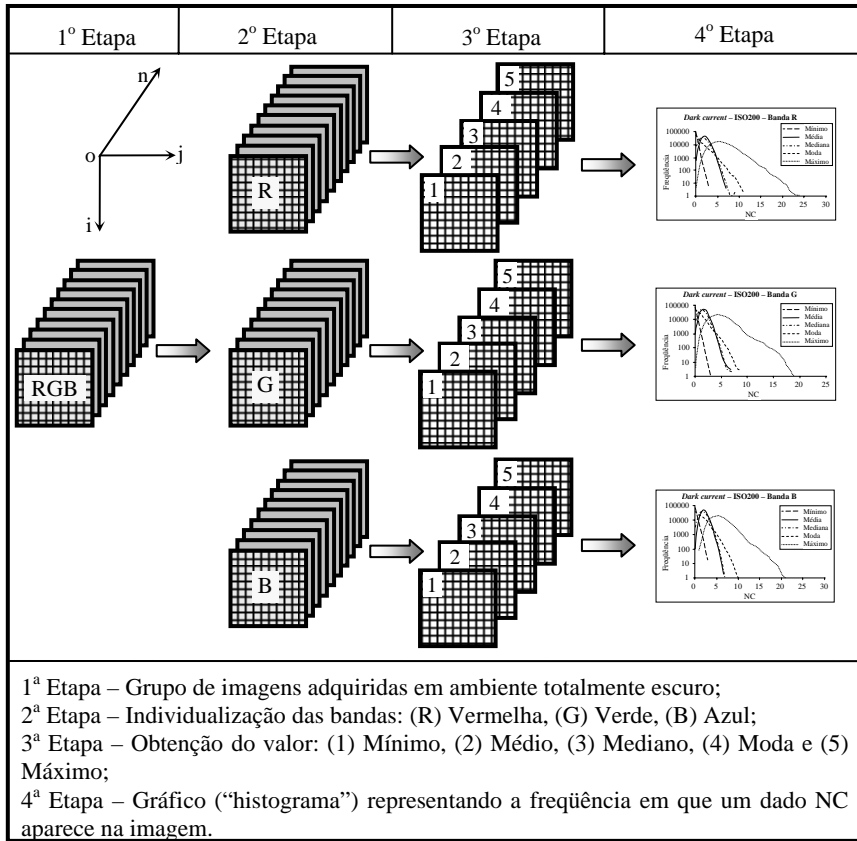
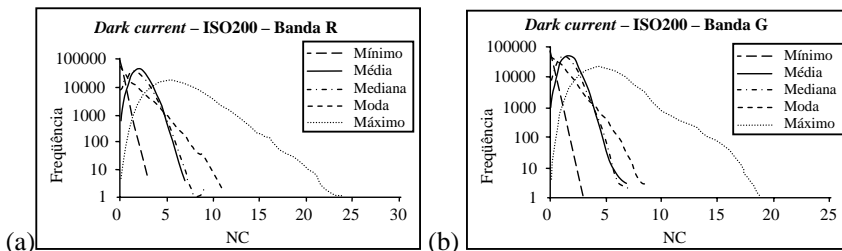
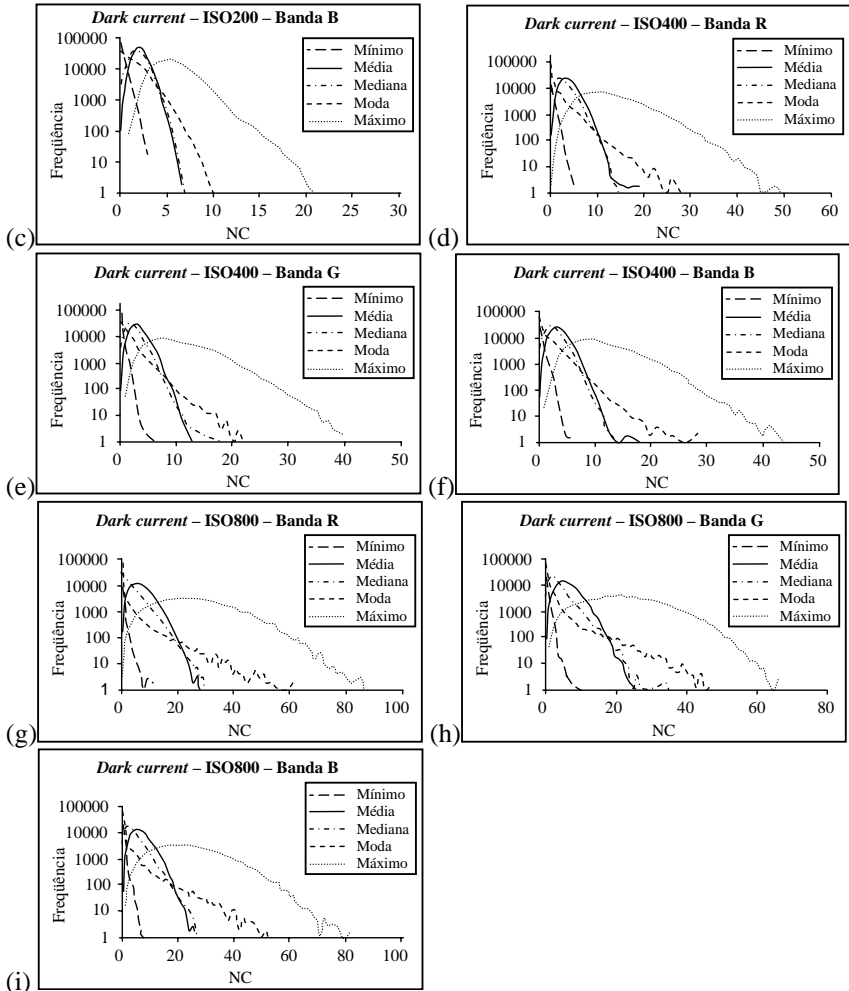


Figura 4 – Frequência de valores mínimo, médio, mediano, moda e máximo de NC registrados em cada banda das imagens obtidas em ambiente totalmente escuro variando o ISO em 200 (a, b, c); 400 (d, e, f) e 800 (g, h, i).





3.2. Determinação da função de resposta dos filtros (FRF) de radiação visível da câmara SONY DSC - F828

Para determinar a FRF dispostos sobre o CCD da câmara SONY DSC – F828, foi obtido um grupo de imagens do fluxo de REM emitido pelo espectrofotômetro - Beckman Acta MIV (UV – Visible Spectrophotometer) em intervalos de 5 nm na faixa espectral de 405 – 725 nm.

Para realizar a análise das imagens foram construídos gráficos, cujo eixo x representa o valor digital (nível de cinza – NC), e y representa a frequência dos

valores de NC de cada banda (*layer*) (Azul, Verde e Vermelho); e em sua parte superior direita encontra-se a imagem analisada. O gráfico (NC x Freqüência) permitiu verificar quais bandas são sensibilizadas por um determinado comprimento de onda do espectro eletromagnético. A Figura 5 ilustra o gráfico gerado com os dados advindos da imagem obtida com um feixe de radiação eletromagnética (REM) com 640 nm de comprimento de onda.

Figura 5 – Freqüência de valores registrados na imagem gerada com o feixe de REM no comprimento de onda 640 nm.

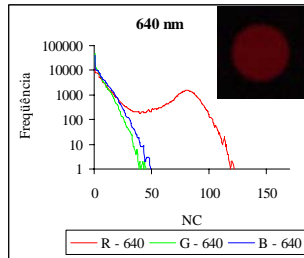
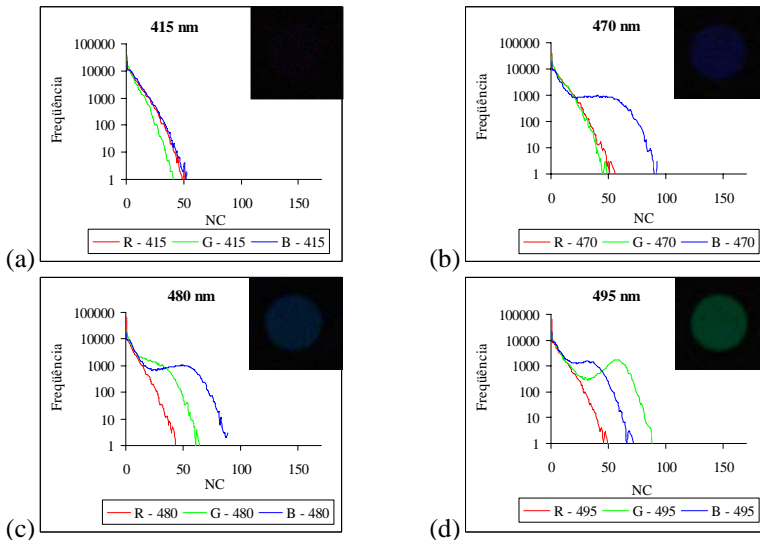
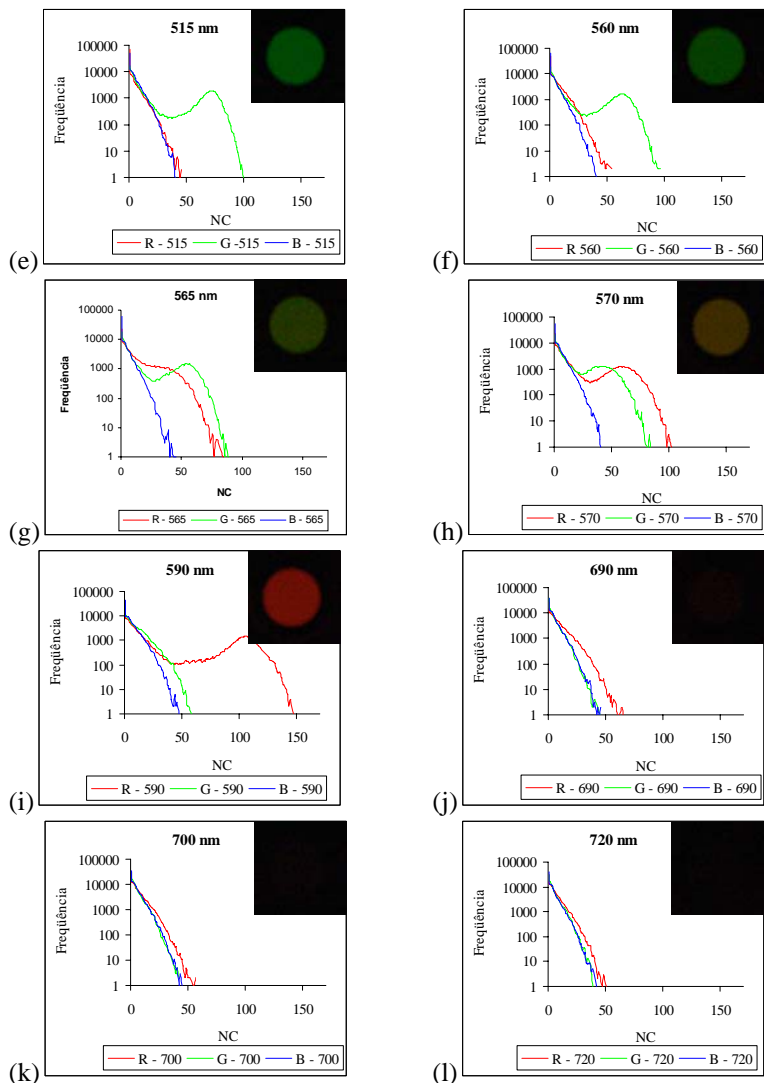


Figura 6 – Alguns gráficos de freqüência de valores de NC registrados nas bandas da imagem em análise. Onde: R é a banda do vermelho, G a banda verde e B a banda azul - o comprimento de onda em nm.





A Figura 5 demonstra que a banda do vermelho foi mais sensibilizada pelo fluxo de REM de comprimento de onda 640 nm do que as demais bandas. A análise do gráfico consiste em avaliar o afastamento em que uma determinada curva se encontra das demais, por exemplo, na Figura 5 a curva da banda do vermelho se encontra afastada das demais curvas indicando que esta banda foi a mais sensibilizada pelo fluxo de REM de comprimento de onda 640 nm. A resposta na

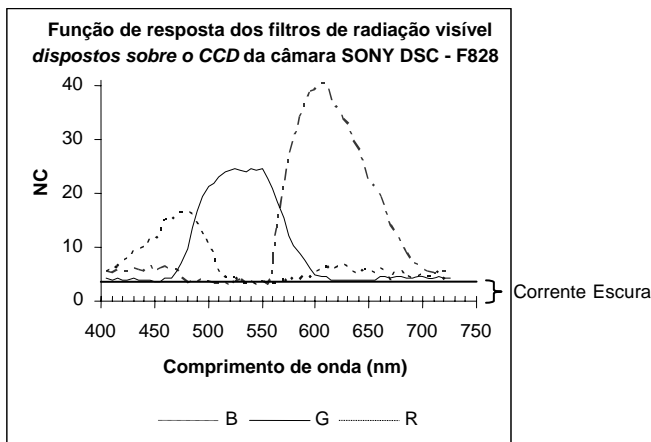
banda do azul e verde se deve à corrente escura, conforme demonstrado anteriormente no item 3.1. A Figura 6 apresenta parte dos resultados obtidos com os dados do grupo de imagens adquiridas em laboratório.

Pelos gráficos expostos na Figura 6, pôde-se determinar a FRF de radiação visível dispostos sobre o CCD da câmara supracitada. Como já mencionado, para determinar se um feixe de REM - de um dado comprimento de onda - sensibiliza ou não o CCD, se deve observar se os valores de NC são maiores e com maior freqüência do que os valores resultantes da corrente escura, o que pode ser analisado com a curva que representa os valores de NC da banda (*layer*).

Na figura 6 constata-se que os valores de NC registrados em 6a, 6k, 6l são, em parte, resultantes da corrente escura; os gráficos 6b, 6e, 6f, 6i, 6j possuem uma curva (banda) com valores de NC maiores do que os registrados pelas demais bandas. Já os gráficos 6c, 6d, 6g, 6h, possuem apenas uma curva (bandas) com valores de NC menores que as demais bandas.

Para melhor caracterizar as regiões de transição entre uma banda e outra, foi obtido um valor de NC médio de cada banda (dessas imagens), representados em um gráfico onde o eixo *x* define o comprimento de onda e o eixo *y* o NC médio da banda, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Gráfico representando a FRF de radiação visível dispostos sobre o CCD da câmara DSC – F828.



A Figura 7 mostra que: a figura formada pela FRF aproxima-se à forma gaussiana e que a FRF azul cobre o intervalo do espectro eletromagnético compreendido de 405 a 520 nm; a do filtro verde de 460 a 615 nm e do filtro vermelho de 555 a 725 nm. Havendo, neste caso, sobreposição espectral entre a

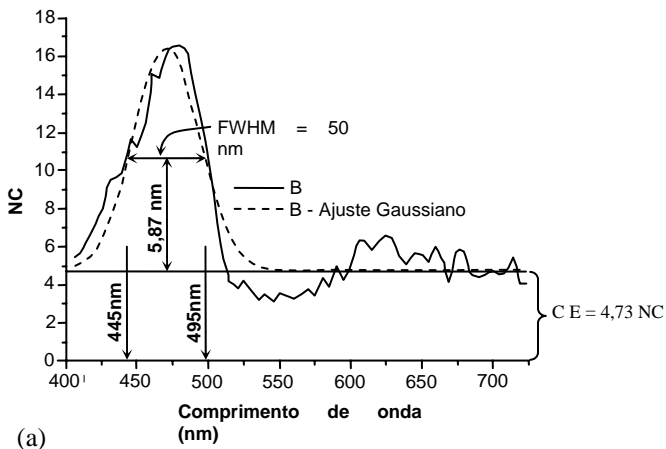
FRF azul com a do filtro verde entre 470 a 515 nm; e a do filtro verde com a do filtro vermelho entre 560 a 600 nm.

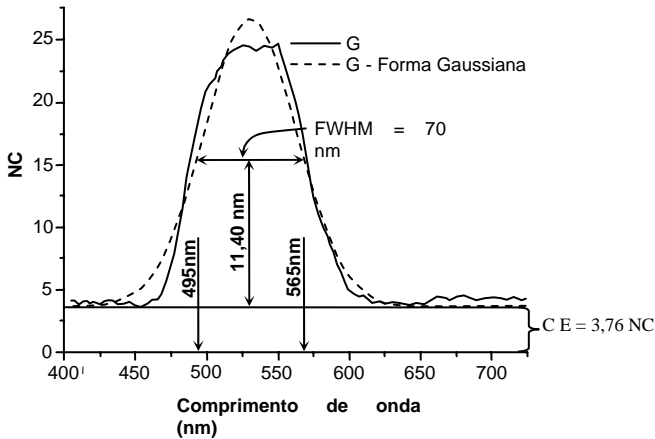
3.3. Definição da amplitude espectral nominal dos filtros de radiação visível da câmara SONY DSC - F828

Para definir a amplitude espectral nominal (largura da banda espectral) dos filtros de radiação visível da câmara SONY DSC - F828 aplicou o ajuste gaussiano à FRF; os resultados obtidos podem ser observados na Figura 8, onde, a linha cheia representa a FRF e a linha tracejada a FRF ajustada. Note, na Figura 8, que os picos máximos da curva que representa a FRF e a FRF ajustada ocorrem em comprimento de onda distintos e que, na Figura 8b, o valor da ordenada do pico da FRF ajustada é maior que o da FRF.

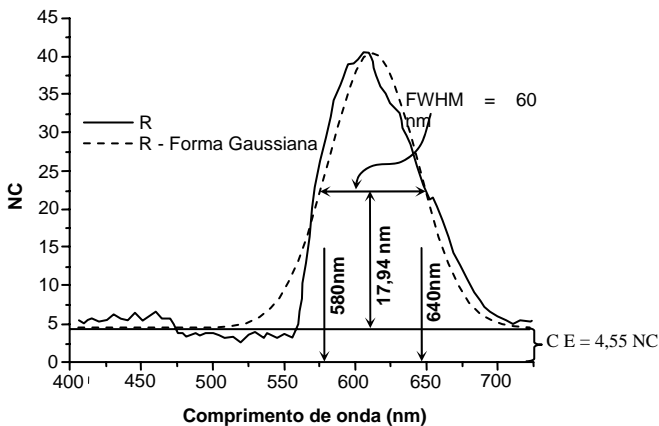
Após realizar o ajuste da FRF, aplicou-se o critério FWHM para definir a amplitude da banda espectral. O critério FWHM considera que a amplitude nominal de uma curva bem comportada é definida pelo intervalo de comprimentos de onda da resposta de 50% da altura do pico máximo da curva, como pode ser observado na Figura 2 e 8.

Figura 8 – Gráficos apresentando a FRF (mensurada e ajustada) de radiação visível da câmara SOMY DSC – F828 e a amplitude espectral nominal definida pelo critério FWHM. Onde: NC = Nível de cinza; B = Banda Azul (*Blue*); G = Banda Verde (*Green*); R = Banda Vermelha (*Red*); CE= Corrente escura; FWHM = Largura Completa na Metade do Máximo.





(b)



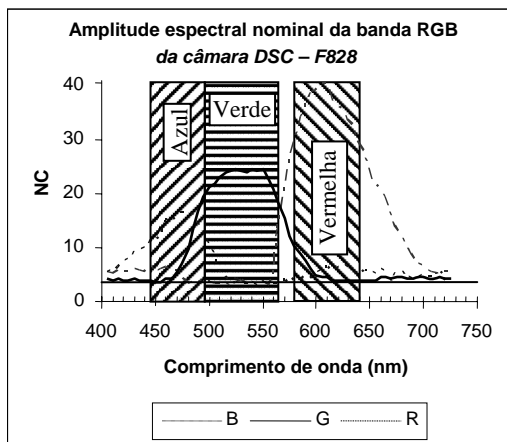
(c)

Pela análise da Figura 8 observa-se que a amplitude espectral do filtro azul (Figura 8a) está compreendida no intervalo de comprimento de onda de 445 – 495 nm do espectro eletromagnético, perfazendo uma amplitude de 50 nm. O filtro verde (Figura 8b) possui uma amplitude espectral de 70 nm e se situa no intervalo de 495 – 565 nm do espectro eletromagnético. Já o filtro vermelho (Figura 8c) possui uma amplitude de 60 nm, e está situado no intervalo de 580 – 640 nm do espectro eletromagnético.

Para melhor visualizar e localizar as faixas espectrais no espectro eletromagnético em que os filtros de radiação visível da câmara SONY DSC – F828

operam, foi obtido um gráfico representando a FRF com sua amplitude espectral nominal correspondente, como pode ser observado na Figura 9, a qual mostra que a sobreposição espectral existente entre as FRF (Figura 7), comentada no item 3.2, não ocorre entre as amplitudes definidas pelo critério FWHM.

Figura 9 – Amplitude espectral da banda RGB da câmara SONY DSC – F828.



Para definir a FWHM de uma curva, primeiro é necessário encontrar a altura absoluta do pico mais elevado da curva. Note, na Figura 8, que a altura absoluta é contada a partir da linha de base a qual coincide com os valores de NC oriundos do efeito da corrente escura, conforme comentado no item 3.1. Caso não houvesse o efeito da corrente escura na imagem, a altura da linha de base seria zero. Neste caso, ao aplicar a FWHM além de determinar a amplitude espectral dos filtros, também se determina o valor do offset de NC a ser aplicado na imagem para corrigir o efeito da corrente escura.

4. COMENTÁRIOS

Neste trabalho foi apresentada uma técnica para determinar a FRF de radiação visível dispostos sobre o CCD de quadro da câmara digital SONY DSC-F828 com uso de um espectrofotômetro e uma esfera integradora, assim como foi realizado um breve estudo sobre a interferência térmica acumulada em cada pixel da imagem (efeito da corrente escura).

De acordo com os resultados obtidos na avaliação ISO x Ruído de leitura, pôde-se constatar que ao mudar o número ISO ocorre variação nos valores registrados advindos da carga acumulada no CCD, sendo maior quanto maior for o valor ISO demonstrando que a relação ISO x Ruído de leitura causa alterações indesejáveis nos valores de NC registrados na imagem quando se pretende utilizar

estes dados para estudar as propriedades espectrais dos objetos contidos na superfície física e até mesmo no resultado final de uma classificação digital.

Para Ré (2005), o efeito da corrente escura pode ser corrigido empregando um mapa da corrente escura. Esta correção se dá pela subtração: Imagem – Mapa da corrente escura, o qual é obtido pela soma mediana de 7 a 10 imagens obtidas em total obscuridade. Uma das desvantagens deste método consiste na obtenção de um mapa que represente o efeito da corrente escura em qualquer situação uma vez que o efeito da corrente escura varia com a variação da temperatura.

Uma segunda alternativa para efetuar a correção do efeito da corrente escura na imagem consiste em refrigerar o CCD, pois segundo Beynon e Lamb (1980) e Ré (2005) em baixas temperaturas o efeito da corrente escura é reduzido e pode ser considerado negligenciável. Para tanto é necessário adaptar na câmara um mecanismo capaz de refrigerar o CCD e manter sua temperatura constante.

Pelas observações dos gráficos apresentados na Figura 6, pôde constatar que há uma dinâmica de ascendência e descendência dos NC de cada banda espectral. De posse desta observação foi possível gerar o gráfico apresentado na Figura 7 no qual pôde constatar que a figura expressa pelas FRF de radiação visível dispostos sobre o CCD da câmara SOMY DSC – F828 aproxima-se à forma gaussiana, conforme descrito por Clark (1999) e Jensen (2009). No entanto, para Clark (1999) e Jensen (2009), devido às aberrações do sistema óptico a amplitude da largura nominal da FRF deve ser dada pelo critério da FWHM aplicado à curva resultante do ajuste gaussiano da FRF (Figura 8). Seguindo estes critérios, certificou que a amplitude espectral do filtro azul é de 50 nm, a do filtro verde de 70 nm e a do filtro vermelho de 60nm, as quais situam na faixa de 445 – 495 nm, 495 – 565 nm e 580 – 640 nm do espectro eletromagnético respectivamente (Figura 8 e 9). Também, pelos resultados da FWHM pôde obter os valores aproximados do offset de NC, que devem ser aplicados à imagem para corrigir o efeito da corrente escura conforme já comentado.

Portanto, os resultados obtidos evidenciaram a potencialidade e aplicabilidade da técnica proposta neste trabalho para determinar a FRF de radiação visível dispostos sobre o CCD de câmaras digitais, recomendando apenas que utilize esfera integradora que possua o diâmetro do orifício de saída maior ou equivalente ao diâmetro da objetiva da câmara para que todo o CCD seja sensibilizado pelo fluxo de REM emitido pelo espectrofotômetro. Enfim, o grupo de trabalho está despendendo esforços na obtenção de um dispositivo para resfriar o CCD; e em investigações sobre o funcionamento do sistema radiométrico das câmaras digitais com incumbência de realizar a calibração radiométrica destes sistemas.

AGRADECIMENTOS

Ao Alex Bruno Keitzke e Carlos Silvano da Luz (Lima) do Centro de Fabricação Mecânica, Setor de Usinagem da Universidade Federal Tecnológica do Paraná – UFTPR pela confecção do dispositivo de adaptação do filtro

infravermelho; Ao Laboratório de Propriedades Ópticas do Departamento de Física da Universidade Federal do Paraná pela disponibilidade de uso dos equipamentos utilizados na elaboração deste trabalho; e Ao Prof. Dr. Edson A. Mitishita por disponibilizar o acesso à câmara digital SONY DSC – F828 para realização dos experimentos (câmara adquirida com recursos do CNPq – UNIVERSAL N° 477222/2003-0 do Projeto: Obtenção de Informações Espaciais da Superfície Terrestre a Partir de Par Estereoscópico de Imagens Orbitais de Alta Resolução); Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATKINSON, K.B.: *Close range photogrammetry and machine vision*. Bristol: Whittles Publishing, 1996. 371p.
- BOCKAERT, V.: *Sensors*. IN: Digital Photography Review. 2003. Disponível em: <http://www.dpreview.com/learn/?/Glossary/Camera_System/sensors_01.htm> Acesso em: 24 de junho de 2008.
- BEYNON, J. D. E.; LAMB, D. R.: *Charge coupled devices and their applications*. McGraw-Hill, London, 275p., 1980.
- CLARK, R. N.: Chapter 1: Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy, in *Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences*, (A. N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York, p 3 – 58, 1999.
- DIGITAL PHOTOGRAPHY REVIEW (2009). Disponível em: < <http://www.dpreview.com/articles/compactcamerahighiso/page2.asp>>. Acesso em 14 de setembro de 2009.
- DISPERATI, A. A.; ALMEIDA, F. H.; MENDONÇA Jr., S.: *Fotografias digitais do infravermelho próximo obtidas por meio de câmaras digitais convencionais para estudos da vegetação*. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2009, Natal. Anais do SBSR. Florianópolis: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009. p.2689 – 2695.
- ISAAC NEWTON GROUP OF TELESCOPES: *Introduction to CCDs*. 2008. Disponível em <http://www.ing.iac.es/~smt/CCD_Primer/CCD_Primer.htm>. Acesso em 25 de junho de 2008.
- JENSEN, J. R.: *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. Tradução: José Carlos Neves Epiphanyo (coordenador)...[et al.]. – São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.
- KASSER, M; EGELS, Y.: *Digital photogrammetry*. Taylor & Francis, London, 2002.
- LABSPHERE, Inc. “A guide to integrating sphere radiometry and photometry”. North Sutton, 2003. 26 p. Disponível em: < <http://www.labsphere.com/data/userFiles/A%20Guide%20to%20Integrating%20Sphere%20Radiometry%20and%20Photometry.pdf>> Acesso em 14 de setembro de 2009.

- McHUGH, S. T.: *Digital camera sensor*. 2008. Disponível em: <<http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/camera-sensors.htm>> Acesso em 02 de setembro de 2009.
- NASA: *Chapter 8 - ETM+ Calibration*. 2008. Disponível em: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/chapter8/chapter8.html#section8.1.2.pdf> Acesso em 28 de janeiro de 2010.
- PONZONI, F. J.; ZULLO Jr., J.; LAMPARELLI, R. A. C.: *Calibração Absoluta de Sensores Orbitais*. Editora Parentes, 70p, 1ª edição, 2007.
- RÉ, P.: *O ABC das câmeras CCD*. 2005. Disponível em: <http://www.astrosurf.com/re/abc_camaras_ccd_pre.pdf> Acesso em: 02/09/2009.
- RIBEIRO, E.: *Notas de aulas*. 2008
- SARTORI, L. R.; IMAI, N. A.; TOMMASELLI, A. M. G.; RUY, R. S.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; CAMARGO, P. O.: *Potencial do uso da banda do infravermelho próximo na classificação de imagens adquiridas por câmeras digitais*. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2007, Florianópolis. Anais do SBSR. Florianópolis: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007. v.1. p.6151 - 6158
- SAVARD, J. J. G.: *Color filter array designs*. 2005. Disponível em:<<http://www.quadibloc.com/other/cfaint.htm>> Acesso em 02 de setembro de 2009.
- TAVARES Jr.: *Avaliação da potencialidade de sensores remotos na detecção da *Loranthaceae* (erva-de-passarinho)*. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- THETA SYSTEM ELEKTRONIK GmbH. *Glossar - Beschreibung der Eigenschaften einer CCD Kamera*. (2004). Disponível em <<http://www.theta-system.de/Datasheet/Glossar.pdf>> acessado em 02/09/2009.
- TOMMASELLI, A.M.G.; HASEGAWA, J.K.; GALO, M.: *Modernas tecnologias de aquisição de imagens em fotogrametria*. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 49-64, 2000.
- TOMMASELLI, A. M. G.; IMAI, N. A.: *Comunicação pessoal*. 2005.
- TOMMASELLI, A. M. G.; IMAI, N. A.: *Comunicação pessoal*. 2008.

(Recebido em abril de 2009. Aceito em fevereiro de 2010).