

## Metodologia de aferição espectral para espectrorradiômetro

DAVI AFFONSO DA SILVA<sup>1</sup>  
ELISABETE CARIA MORAES<sup>2</sup>  
ORLANDO ALVES MÁXIMO<sup>1</sup>  
PEDRO RONALD VIEIRA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Estudos Avançado do Centro Técnico Aeroespacial  
Caixa Postal 6044, 12231-970 São José dos Campos, SP, Brasil  
{affonso, maximo}@ieav.cta.br

<sup>2</sup>INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515, 12201-970 São José dos Campos, SP, Brasil  
bete@met.inpe.br

**Abstract.** This work describes a methodology to evaluate the spectral resolution of the spectroradiometer Spectron SE-590. The waveband checking of the SE-590 was performed by Material and Sensors Laboratory at INPE, using a grating monochromator model 7240. In the spectral range between 400 and 700nm the monochromator was adjusted for a waveband range of 6.2nm, while in the spectral range between 700 and 1100nm a waveband range of 12.4nm was used. Differences among spectral detector heads from the SE-590 were observed. Therefore, it is recommended to have a reference calibrated detector head in order to correct for errors in the BRF that appear while using uncalibrated spectral detector head(s) in field works.

**Keywords:** resolução espectral, espectrorradiômetro.

### 1 Introdução

O Sensoriamento Remoto é uma ciência multidisciplinar que consiste na aquisição e análise de dados, os quais se relacionam de algum modo com o ambiente e recursos naturais terrestres. Tais dados são obtidos através de sensores optoeletrônicos que podem ser utilizados a nível orbital, aerotransportado, de campo, ou mesmo laboratorial (Steffen et al. 1993). A utilidade destes dados é evidenciada na medida que for possível estabelecer uma relação entre os mesmos e as características de interesse dos alvos que os originaram.

Dentro deste aspecto *Radiometria* objetiva a compreensão dos processos de interação da energia radiante com os objetos terrestres. Através deste estudo pode-se obter uma quantificação das causas e efeitos envolvidos nestes processos. Tal quantificação exige, na maioria dos casos, a utilização de instrumentos sensíveis à energia eletromagnética em faixas específicas de comprimento de onda. Estes equipamentos são conhecidos como espectrorradiômetros, e quanto mais sensíveis e calibrados estiverem, mais abrangentes e acurados serão os resultados, além de apresentarem respostas realmente compatíveis com as características dos objetos em estudo.

O espectrorradiômetro Spectron SE-590 é amplamente utilizado em pesquisas básicas, principalmente, no INPE, por ser um radiômetro portátil, projetado para operações de campo. Desse modo, este trabalho tem por objetivo avaliar a resposta espectral das unidades detectoras deste equipamento, e propor uma metodologia para a normalização dos erros entre as mesmas, assegurando assim uma relação constante entre as medidas adquiridas através de diferentes unidades e avaliar a coerência espectral das unidades detectoras do espectrorradiômetros Spectron SE-590 existentes no Laboratório de Radiometria (LARAD) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

### 2 Materiais e Método

Com a finalidade de verificar a existência ou não de defasagens na sensibilidade espectral das unidades detectoras do SPECTRON SE-590 realizou-se o seguinte experimento:

#### 2.1 Descrição dos materiais

Os materiais empregados para a realização dos experimentos consistiram de:

- Espectrorradiômetro Spectron-SE590 composto de uma unidade processadora (CE500) acoplada a quatro unidades detectoras (Model CE 390-WB S/N 1408, 1409, 1441 e 1445) com ângulos de visada de 6 graus.
- Monocromador marca Oriel (com redes de difração de 500nm e 1nm) denominado "Grating Monochromator model 7240".
- Iluminante composto de uma fonte de luz halógena direcional "Trump Halog" BNDE 7719 com potência de 250 watts, cuja característica é a de fornecer um fluxo constante de radiação eletromagnética em direção ao alvo.
- Filtro passa-alta OG695 da Eppley.
- Placa Spectralon-11, n°SRT-99-050-9375-B.
- Nivelador também denominado inclinômetro. É um dispositivo que possui uma escala graduada para o posicionamento da cabeça detetora em relação ao ângulo zenital .
- Tripés.
- Computador tipo IBM-PC, utilizado para armazenar os dados transmitidos via saída serial da unidade processadora CE 500.
- Programa Espectro (Steffen et al, 1993), utilizado para processamento dos dados.
- Programa Excel 4.0 da Microsoft.

## 2.2 Metodologia para a detecção das defasagens

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Materiais e Sensores (LAS) do INPE. A sala foi preparada de forma a facilitar as medições conforme montagem descrita na Figura 1.

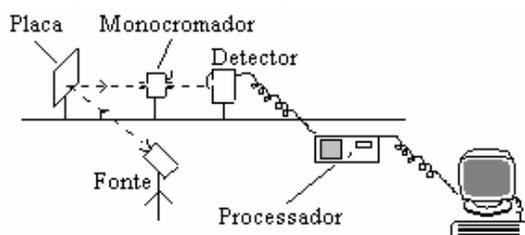


Fig. 1 - Diagrama esquemático do experimento

Os equipamentos foram montados em uma bancada e uma lâmpada halógena foi utilizada como única fonte de iluminação direcionada para a placa de Spectralon-11. O monocromador foi posicionado normalmente à superfície da placa e a unidade detectora posicionada depois do monocromador. A radiação refletida pela placa sensibilizava a unidade detectora após ter passado pelo monocromador, onde foram selecionadas as faixas espectrais de interesse ( $\lambda$ ). As faixas espectrais no monocromador foram selecionadas de 25 em 25 nm, de acordo com a faixa de operação do SPECTRON SE-590 (400 a 1100 nm). A cada nova seleção de faixas no monocromador adquiriu-se um novo espectro. Cada espectro, adquirido e gravado

como um registro, foi relacionado ao comprimento de onda médio da faixa especificada no monocromador. Esta operação foi então realizada para cada uma das unidades detectoras existentes no Larad.

Com a finalidade de eliminar a influência de harmônicos para comprimentos de onda ajustados acima de 700 nm foi utilizado um filtro padrão internacional OG695, fabricado pela Eppley, o qual foi fixado na unidade detectora do espectrorradiômetro.

A largura de banda ajustada no monocromador foi de 6,2 nm, no intervalo de 400 a 700 nm, e de 12,4 nm no intervalo de 700 a 1100 nm. Tais ajustes foram os mínimos compatíveis com a sensibilidade demonstrada pelo Spectron e que forneceram quantidade de energia suficiente para a sensibilização das unidades de forma interpretável (sinal maior que o ruído). Durante as medições o laboratório foi completamente escurecido e, tanto a unidade detectora do Spectron como a saída do monocromador foram cobertas com um tecido negro e espesso, para eliminar o efeito da radiação difusa, proveniente da fonte e de suas reflexões em objetos próximos.

## 3 Resultados e Discussões da detecção de defasagens

Os arquivos gerados através do experimento foram transferidos para o programa espectro, convertidos para o formato ASCII (conversão interno-->Grapher) e processados no programa Microsoft Excel 4.0, onde foi obtido, para cada ajuste do monocromador, o canal (comprimento de onda) do Spectron que mais foi sensibilizado. Após processados, tais resultados permitiram a confecção das curvas mostradas a seguir, sendo que as retas denominadas como "identidade" foram confeccionadas considerando-se o monocromador como padrão, visto que tal equipamento é utilizado somente no LAS do INPE, com a finalidade de caracterização de células fotossensíveis lá produzidas.

A observação das curvas resultantes revela algumas características importantes relacionadas às unidades detectoras. Primeiramente fica evidente que existe uma defasagem espectral entre as cabeças.

Analisando as Figuras 2 e 3, vê-se que não há uma sobreposição completa em nenhuma curva, sendo que as unidades que apresentam uma maior proximidade entre si são a "1408" e "1441", como mostra a Figura 9.

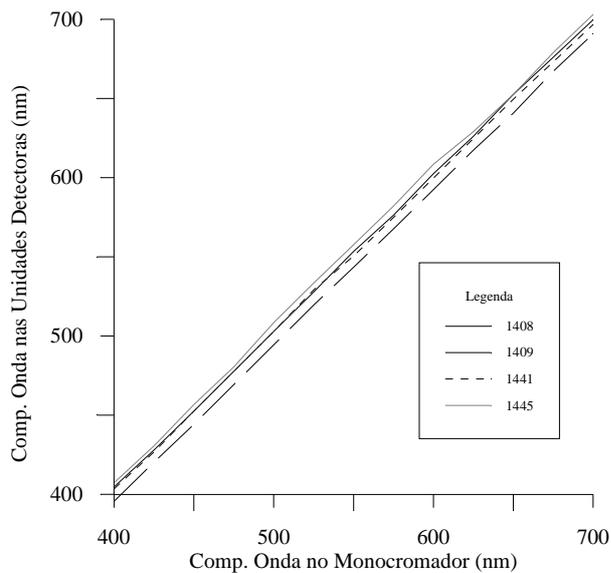


Fig. 2 - Comparação entre o monocromador e as unidades detectoras do Spectron SE-590 no intervalo espectral compreendido entre 400 e 700nm.

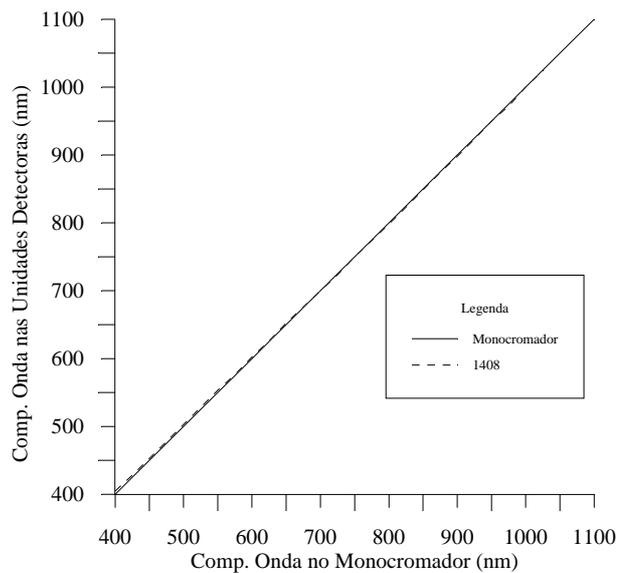


Fig. 4 - Comparação entre o monocromador e a unidade detectora 1408.

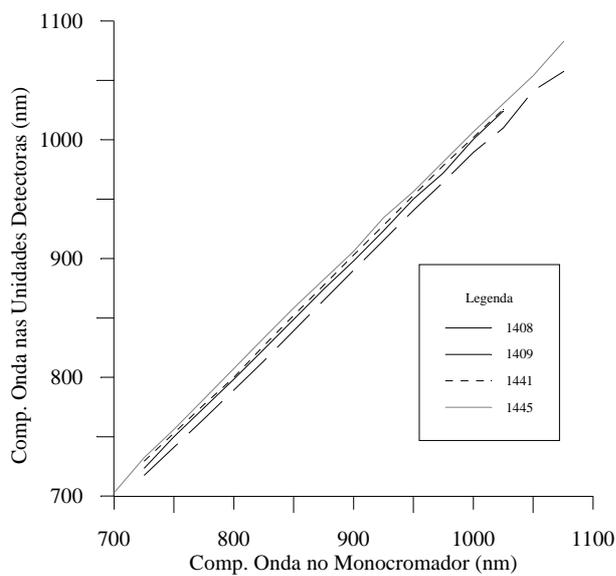


Fig. 3 - Comparação entre o monocromador e as unidades detectoras do Spectron SE-590 no intervalo espectral compreendido entre 700 e 1100nm.

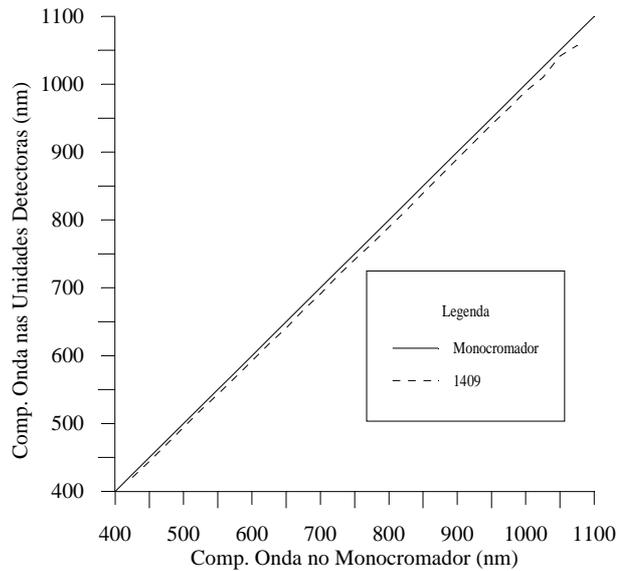


Fig. 5 - Comparação entre o monocromador e a unidade detectora 1409.

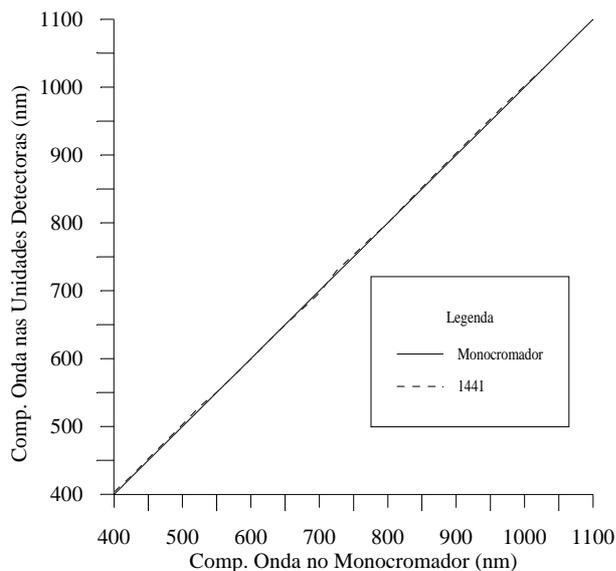


Fig. 6 - Comparação entre o monocromador e a unidade detetora 1441.

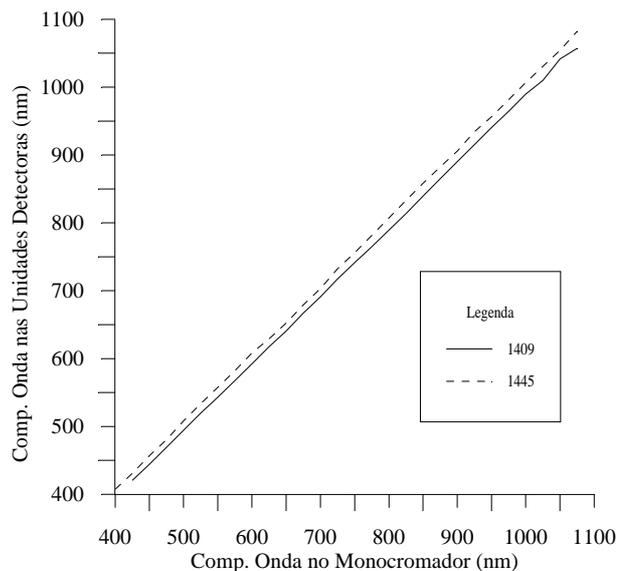


Fig. 8 - Intercomparação entre as unidades detetoras 1409 e 1445.

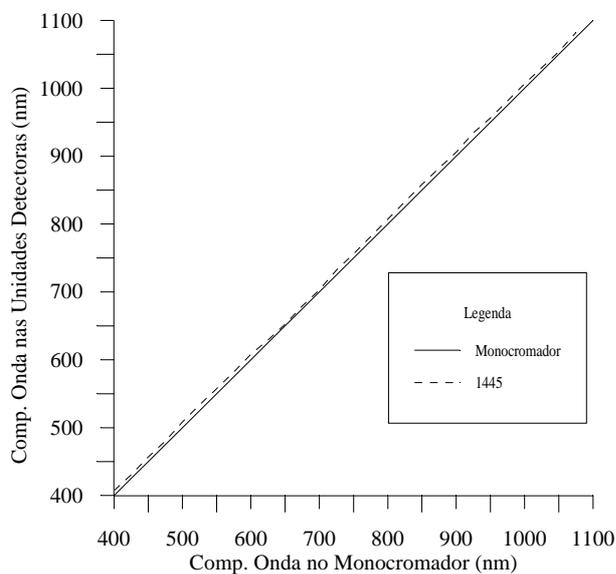


Fig. 7 - Comparação entre o monocromador e a unidade detetora 1445.

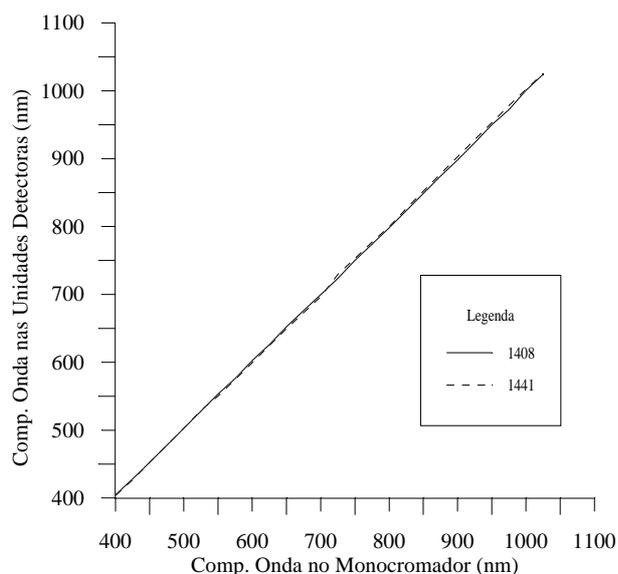


Fig. 9 - Intercomparação entre as unidades detetoras 1408 e 1441.

As unidades 1409 e 1445 apresentaram a maior defasagem entre si. Esta defasagem apresenta valores menores no intervalo de 400 a 700 nm, quando fica em torno de 15 nm. Já no intervalo de 700 a 1100 nm, a defasagem fica em torno de 20 nm (Figura 8).

Comparando os resultados de cada unidade com a reta identidade, tem-se que as unidades 1408 e 1441, apresentam um comportamento semelhante, e se aproximam da identidade (Figuras 4 e 6).

As unidades 1409 e 1445 apresentam uma pequena defasagem em relação à identidade (uma para cada

lado). Esta defasagem é praticamente constante no intervalo considerado - 400 a 1100 nm - (Figuras 5 e 7).

Ao analisar a irradiância obtida através da média dos espectros de radiância coletados com as unidades detectoras 1408, 1409 e 1445, confirmou-se a defasagem espectral existente entre elas, a qual fora observada através da comparação destas com o monocromador, bem como a necessidade da recalibração absoluta destas unidades.

A irradiância espectral,  $E_\lambda$ , foi obtida através expressão:

$$E_\lambda = L_\lambda \cdot \Pi / \rho_\lambda \quad (1)$$

onde  $L_\lambda$  é a radiância espectral e  $\rho_\lambda$  é a reflectância espectral de uma superfície lambertiana, que no caso foi utilizada a placa de referência spectralon, cuja reflectância espectral se aproxima da unidade.

A Figura 10 mostra em detalhes a defasagem espectral próxima ao comprimento espectral de 760nm, região onde ocorre o máximo de absorção devido ao vapor d'água (Gibbons e Richards, 1979). Ao comparar estas curvas de irradiância espectral com a literatura verificou-se que a unidade detectora 1445 era a que mais se aproximava do padrão de irradiância, e que a diferença entre as amplitudes evidência erro nas curvas espectrais de calibração absoluta destes equipamentos.

A intercalibração destas curvas pode ser realizada desde que haja um espectrorradiômetro aferido, tanto em relação aos comprimentos de onda como em amplitude.

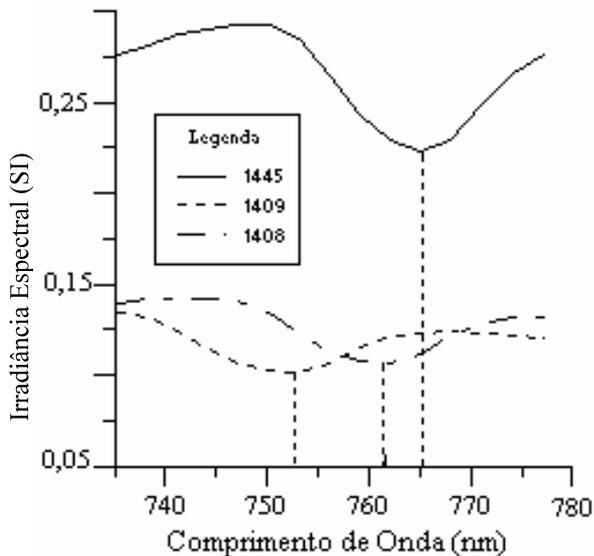


Fig. 10 - Detalhe da irradiância espectral na região próxima ao comprimento de onda de 760nm.

#### 4 Metodologia para a normalização das unidades detectoras

A segunda parte do experimento foi realizada através da montagem que está apresentada de forma esquemática na Figura 11. O mesmo procedimento foi repetido em laboratório, alterando-se a fonte de iluminação para a fonte halógena.

As medidas foram realizadas num intervalo de tempo total de 10 min., sendo que cada unidade detectora realizou 3 aquisições do espectro de radiância da placa de referência.

Todas as unidades detectoras utilizaram a abertura padrão de 6°, sem óptica.

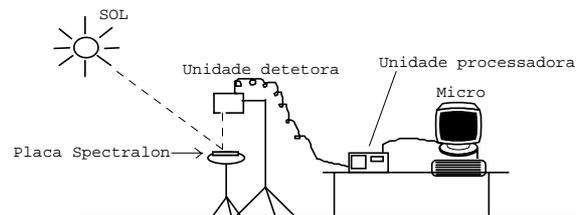


Fig. 11 - Diagrama esquemático do experimento

Os dados resultantes de cada aquisição foram calibrados (calibração absoluta) e convertidos no programa Espectro para o formato ASCII. Os novos arquivos foram transferidos para uma planilha do EXCEL 4.0, onde foram gerados arquivos para cada unidade detectora com as médias dos três espectros adquiridos e pré-processados. De posse da curva de calibração da placa SPECTRALON utilizada, cada um destes arquivos de radiância espectral foram novamente processados no EXCEL, obtendo-se os valores aproximados de irradiância solar espectral medidos com cada unidade. Para isso utilizou-se a transformação descrita na equação 1

Os resultados do processamento descrito anteriormente podem ser observados na Figura 12.

#### 5 Análise de resultados

Colocando-se os resultados obtidos em um único gráfico nota-se uma sensível diferença entre as unidades detectoras. A unidade 1445 é bem mais sensível que as outras, apresentando valores de irradiância bem maiores.

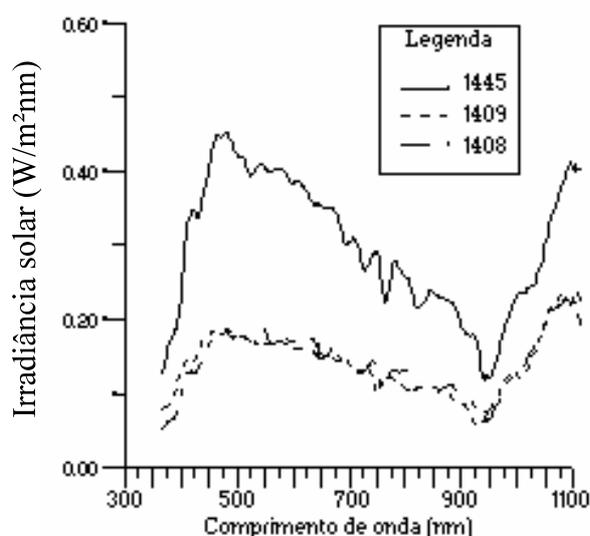


Fig.12 - Irradiância Calculada para as Unidades Detectoras

Comparando-se os valores de irradiância calculados para cada unidade detectora com os valores da literatura verificou-se que a unidade 1445 era a que mais se aproximava do padrão.

### 5.1 Normalização de erros

A técnica utilizada para a normalização de erros foi a adoção de uma curva de "intercalibração" entre as unidades detectoras e uma unidade considerada como referência. Tal curva de intercalibração é gerada pela razão entre a curva original (média) não calibrada para radiância (arquivo no formato ".LRD" do programa Espectro) de cada unidade e a curva gerada pela unidade de referência nas mesmas condições.

A aplicação da intercalibração consiste em dividir a curva gerada na unidade detectora pela curva de intercalibração correspondente. Desse modo, obtém-se uma curva semelhante àquela que seria gerada pela unidade de referência nas mesmas condições.

Quanto mais precisa e calibrada estiver a unidade de referência maior será a acurácia da curva de intercalibração e, conseqüentemente, da curva calibrada.

Analisando-se os resultados, chegou-se à conclusão de que a unidade detectora que apresentava as melhores condições era a unidade 1445.

De posse dos dados das unidades detectoras, foram construídas as curvas de intercalibração para as unidades 1408 e 1441, duas para cada unidade.

Na primeira curva foi utilizado o Sol como fonte de iluminação. Já na segunda, foi utilizada uma

lâmpada halógena WIKO AV/PHOTO LAMP de 650 W.

A proposta de normalização de erros consiste na aplicação de tais curvas aos dados brutos ".LRD" gerados pelas respectivas unidades detectoras. Uma vez que os dados brutos foram normalizados para a sensibilidade da unidade 1445, a calibração absoluta deverá ser feita utilizando-se a curva de calibração desta unidade, encontrada no programa Espectro.

A seguir são apresentadas as curvas de intercalibração calculadas para cada unidade detectora.

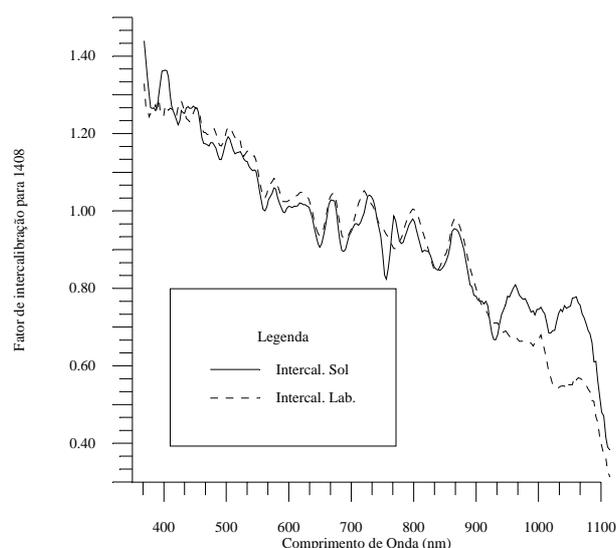


Fig. 13 - Curvas de intercalibração da unidade 1408

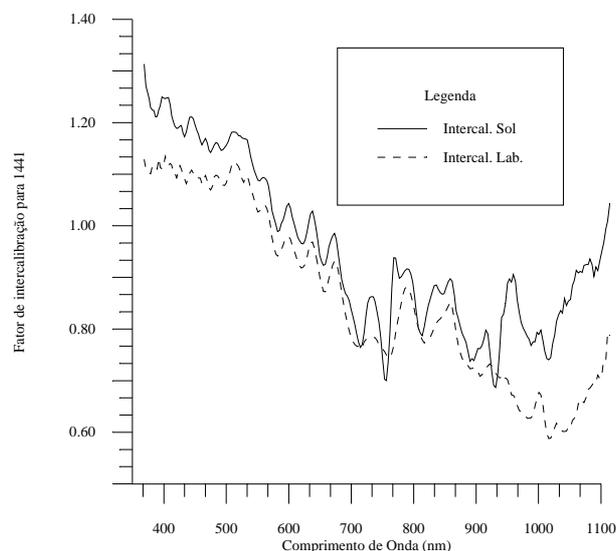


Fig. 14 - Curvas de intercalibração da unidade 1441

As curvas resultantes podem ser utilizadas como meios de normalização dos erros das unidades

detectoras através da divisão do espectro obtido com a unidade utilizada pela respectiva curva de intercalibração, obtendo-se assim uma nova curva que deverá ser semelhante àquela obtida do mesmo alvo e nas mesmas condições pela unidade 1445.

#### 4.2 Apresentação do teste das curvas de intercalibração em medidas realizadas em um alvo qualquer experimental

A seguir são apresentadas as curvas geradas com as diferentes unidades detectoras, na medição de um alvo teste, antes e após a aplicação da curva de intercalibração gerada. As curvas são apresentadas sempre em parceria com a curva gerada pela unidade de referência (1445), nas mesmas condições e do mesmo alvo, possibilitando uma comparação das mesmas.

Tais medições foram realizadas em duas etapas. A primeira obedecendo o mesmo diagrama esquemático do experimento em campo, e a segunda em laboratório. O alvo teste escolhido foi uma folha de vegetação.

A seguir são apresentados os resultados da aplicação das curvas de intercalibração para cada unidade detectora.

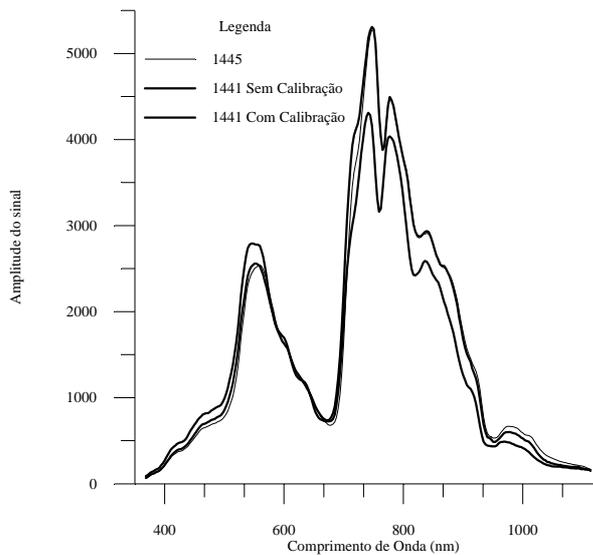


Fig. 15 - Medições em campo, comparação 1445-1441 com e sem calibração de campo

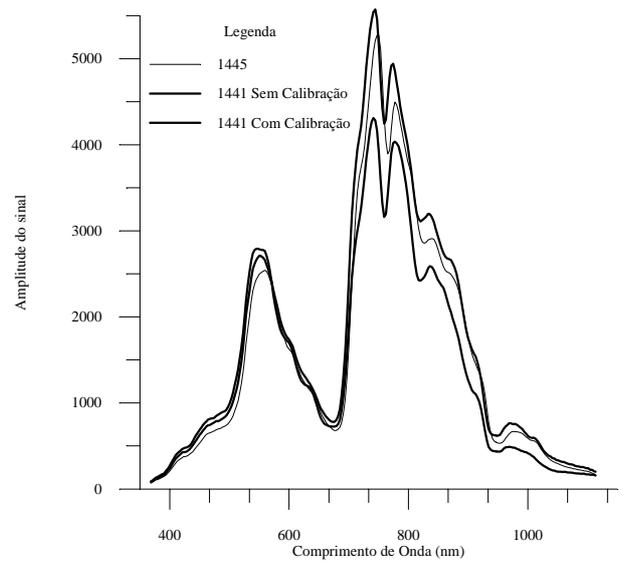


Fig. 16 - Medições em campo, comparação 1445-1441 com calibração de laboratório e sem calibração

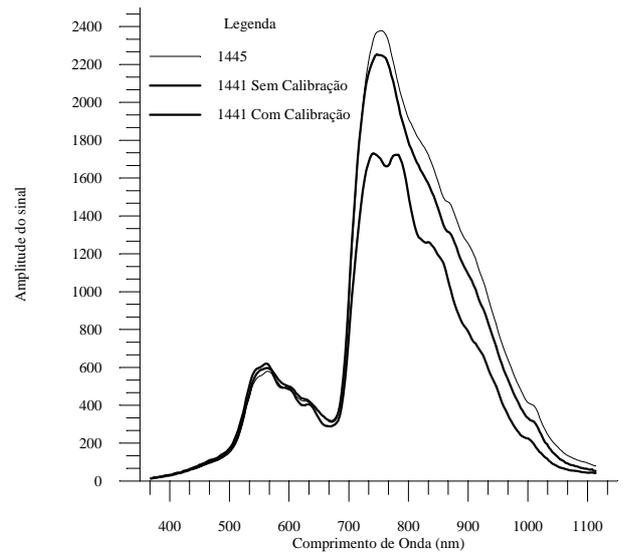


Fig. 17 - Medições em laboratório, comparação 1445-1441 com e sem calibração, sendo a fonte de dados de intercalibração obtida em laboratório.

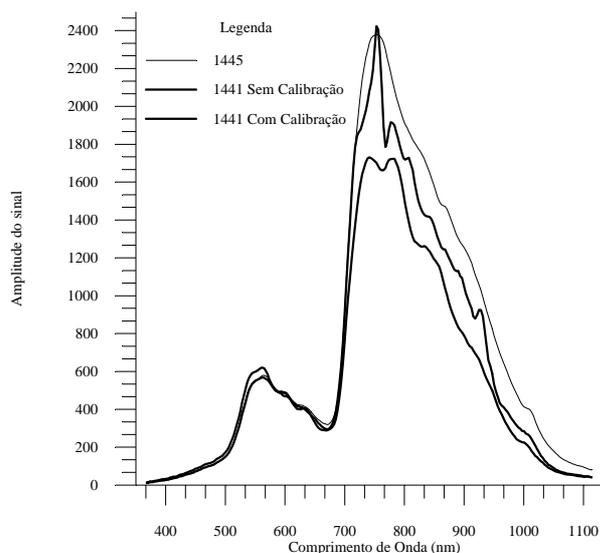


Fig. 18 - Medições em laboratório, comparação 1445-1441 com e sem calibração, sendo a fonte de dados de intercalibração obtida em campo.

A aplicação das curvas de intercalibração para a unidade detectora 1441 (Figuras 15 a 18) proporcionou uma diminuição nas diferenças de amplitude de sinal entre a curva não calibrada nesta unidade detectora e os sinais da unidade detectora 1445.

Para as medições em campo, a aplicação da curva de ajuste que tem como fonte de dados de intercalibração o Sol proporcionou uma grande redução nas diferenças entre os sinais. Já a aplicação da curva de ajuste que tem como fonte de dados o laboratório proporcionou uma redução menor.

Para as medições de laboratório, a aplicação da curva de intercalibração que teve como fonte de dados o Sol apresentou maior ajuste no intervalo de 400 a 700 nm do que no intervalo de 700 a 1100 nm (Figuras 17 e 18). A aplicação da curva de intercalibração que teve como fonte de dados o laboratório apresentou comportamento semelhante à anterior no intervalo de 400 a 700 nm, porém esta curva permitiu um ajuste melhor para o intervalo de 700 a 1100 nm.

Esta mesma avaliação foi realizada para as unidades detectoras 1408 e 1409. Na unidade 1408 as curvas calibradas (tanto a de campo como a de laboratório) se ajustaram bem tanto no uso da curva de intercalibração de campo como com a de laboratório. Entretanto, notou-se um desajuste das curvas na análise das medições em laboratório, usando-se os dados de intercalibração de campo nos intervalos compreendidos entre 560 a 660 nm e 750 a 780 nm. Na avaliação da unidade 1409 foi verificada uma total inconsistência

dos resultados, o que ocasionou o encaminhamento desta para uma avaliação por parte do fabricante.

## 6 Conclusão

Da análise dos resultados chega-se às seguintes conclusões:

- . as unidades detectoras apresentaram defasagens espectrais e diferenças de sensibilidade;
- . a utilização de diferentes unidades detectoras para medição, em um mesmo experimento, do alvo e placa de referência constitui um fator de inclusão de erros nos resultados, caso exista defasagem entre elas;
- . a normalização dos erros entre as unidades detectoras minimiza os erros entre as medidas adquiridas utilizando-se diferentes unidades;
- . há necessidade da existência de uma unidade detectora que seja calibrada periodicamente para ser usada como padrão na obtenção das demais curvas de intercalibração;
- . a utilização da curva de ajuste que teve como fonte de dados o sol para a unidade detectora 1409 foi severamente prejudicada devido a inconsistência dos dados utilizados para a obtenção da curva, sendo, portanto, não recomendada a utilização desta para qualquer tipo de experimento;
- . a utilização das demais curvas de intercalibração para suas respectivas unidades resultou numa minimização das defasagens existentes entre estas e a padrão. Esta defasagem não se mostrou constante ao longo do espectro; e
- . recomenda-se que seja realizado periodicamente a intercalibração das unidades detectoras.

## 7 Referências Bibliográficas

- Gibbons, D.E.; Richards, R.R. Determination of noise equivalent reflectance foi multispectral scanner - A scanner sensitivity study. NASA Technical Paper 1575, 1979.
- Steffen, C.A.; Moraes, E.C.; Gama, F.F. Tutorial de radiometria. VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, 10-14 de maio de 1993.
- Steffen, C.A. Técnicas radiométricas com o Spectron SE-590. Tutorial de radiometria. VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, 10-14 de maio de 1993.