

## Função de distribuição de reflectância bidirecional (FDRB) de uma superfície vegetada sob diferentes geometrias de visada e condições de alagamento

Francielle da Silva Cardozo<sup>1</sup>  
Gabriel de Oliveira<sup>1</sup>  
Matheus Pinheiro Ferreira<sup>1</sup>  
Elisabete Caria Moraes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{cardozo, gdo, mpf, bete}@dsr.inpe.br

**Abstract.** In remote sensing, the targets interact differently with electromagnetic radiation, and the spectral response is related to the physico-chemical and biological properties of objects. Still, the spectral curves of targets can vary depending on the position of the Sun, solar elevation, sensor pointing direction and by biophysical parameters of the sample. Thus, the interpretation of vegetated areas in satellite images becomes complex due to its anisotropic character, where the viewing geometry and lighting influence the spectral response. These factors mean that the surfaces are not lambertian, making necessary to consider the anisotropy in extracting data from satellite images. In this sense, the observation of the spectral curve of a target without the knowledge of the obtaining conditions does not provide enough information about it. This work included the laboratory simulation of the vegetated surface spectral response under different flooding conditions and viewing geometries. The results showed the effect of anisotropy due to the scattering of REM at all viewing angles and hydrological situations simulated, due primarily to differences in the structures and interaction processes that occur in plants in different regions of EEM. It was also noticed the occurrence of specular reflection at the opposite angle of illumination as the influence of water body prevailed in the reflectance spectrum. The experiments showed reliable results compared to lambertian characteristics of natural surfaces, and the results obtained here are intrinsic to the experiment and may vary in other simulations.

**Palavras-chave:** anisotropy, eletromagnetic radiation, eletromagnetic spectrum, remote sensing, anisotropia, radiação eletromagnética, espectro eletromagnético, sensoriamento remoto.

### 1. Introdução

No sensoriamento remoto, os alvos interagem diferentemente com a radiação eletromagnética, sendo que a resposta espectral está intimamente relacionada com as propriedades físico-químicas e biológicas dos alvos e são medidas por radiômetros (Moraes et al., 1996; Novo, 1989; Steffen, 1995), que dividem-se em radiômetros de banda, os quais reproduzem a resposta do alvo em faixas longas do espectro, integrando os valores dos comprimentos de onda que estão compreendidos em cada banda, e também em espectrorradiômetros, os quais operam em faixas estreitas e próximas, de forma que a resposta do alvo é medida de modo quase contínuo ao longo do espectro (Novo, 1989).

Os radiômetros podem ser utilizados tanto em campo, onde é possível obter a resposta espectral de um objeto que interage com o meio, quanto em laboratório, onde pode-se controlar o ambiente em torno do alvo. As medidas geradas por estes instrumentos são dadas em valores de radiância e de reflectância. Como a reflectância é uma grandeza física, foi desenvolvido um artifício matemático para poder estimá-la, chamado Fator de Reflectância, obtido pela razão entre a radiância do alvo e a radiância de uma superfície lambertiana ideal, nas mesmas condições de iluminação e observação (Bowker et al., 1985; Milton, 1987). O fator de reflectância pode ser determinado para um comprimento de onda específico (espectral), para um intervalo ou faixa do espectro (multiespectral ou “*in band*”), ou para todo o espectro eletromagnético e sua obtenção é dependente de uma superfície lambertiana ideal. No Laboratório de Radiometria (Larad) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) existem duas placas que exercem esta função. A primeira delas é a placa de referência,

utilizada essencialmente para trabalhos de campo e a segunda é a padrão, que passou por um processo de calibração, tendo seu espectro de reflectância conhecido.

Segundo Goltz (2005), as curvas espectrais dos alvos podem variar de acordo com a posição do Sol (azimute solar), elevação solar (ângulo de elevação solar), direção de apontamento do sensor (em relação ao nadir), e, no caso da vegetação, por parâmetros biofísicos (teor de umidade, taxa de fotossíntese, estágio de desenvolvimento). Neste sentido, a observação de uma curva espectral de um alvo sem o conhecimento das condições de obtenção não fornece informações suficientes sobre o mesmo.

O imageamento realizado pelos sensores a bordo de plataformas orbitais levando em conta diferentes geometrias de visada permite o estudo da Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional (FDRB) das superfícies terrestres, sendo importante o desenvolvimento de métodos e técnicas que explorem a variabilidade angular destes dados espectrais (Morelli, 1993). A interpretação de superfícies vegetadas em imagens de satélite é bastante complexa devido a seu caráter anisotrópico, sendo que a geometria de visada e iluminação influenciam nas respostas espectrais dos alvos. Estes fatores fazem com que as superfícies não sejam perfeitamente lambertianas, portanto, é necessário considerar a anisotropia ao se extrair dados de imagens de satélite (Nogueira et al., 1996). Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho compreendeu a simulação em laboratório da resposta espectral de uma superfície vegetada, sob diferentes condições de alagamento e geometrias de visada.

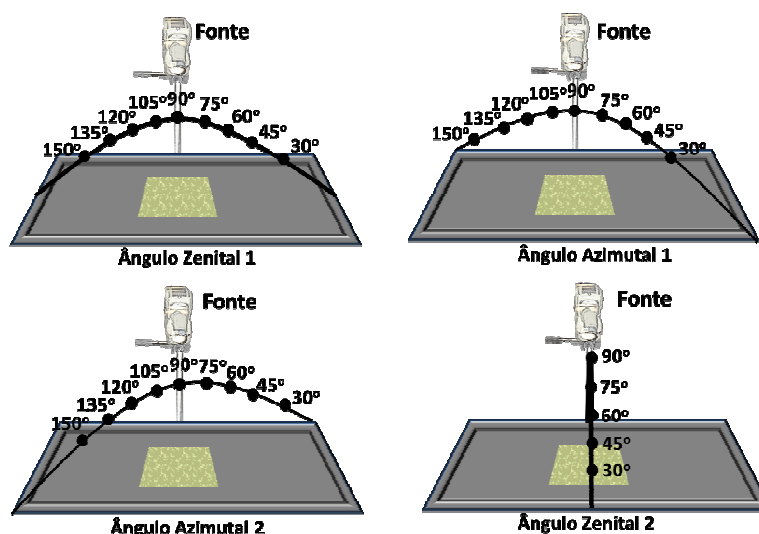
## 2. Metodologia de Trabalho

Os experimentos foram realizados no INPE, com o suporte do Larad. Foram utilizados um espectrorradiômetro *FieldSpec Pro FR* com visada de IFOV de 25 graus, uma fonte de iluminação halógena (*NORIS* – 250W), duas placas padrão *Spectralon* (100% de reflectância), uma régua e um clinômetro. O *FieldSpec* é um espectrorradiômetro que realiza medidas de reflectância solar, radiância e irradiância, trabalha no intervalo espectral de 0,35 a 2,5  $\mu\text{m}$ , possui resolução espectral de 3 nm (até 0,7  $\mu\text{m}$ ) e 10 nm (de 1,4 a 2,1  $\mu\text{m}$ ) e FOV (*Field of View*) de 1° a 25°, podendo coletar até 10 espectros por segundo (Alvarenga, 2004). Devido à anisotropia da superfície do alvo, as medidas ocorreram em diferentes ângulos de visada para traçar as estimativas do FDRB por meio das medidas de radiância do alvo e da placa de referência. A fonte halógena de iluminação foi fixada no ângulo zenital de 45° e no ângulo azimutal de 270° (perpendicular à marcação sobre a caixa do experimento).

A distância definida entre fonte/alvo e fonte/placa padrão foi de 1,20 m e para cada posicionamento foi coletado o espectro de radiância da placa e do alvo com a unidade detectora posicionada a uma altura aproximada de 22,5cm, nos ângulos zenitais e azimutais de 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135° e 150°.

A simulação da vegetação e seus diferentes níveis de inundação ocorreu pela análise das reflectâncias bidirecionais *in band*, equivalentes às bandas do sensor MODIS, obtidas para geometrias de observação dos ângulos zenitais e azimutais de visada do sensor, denominadas neste trabalho de ângulo zenital 1 (orientação paralela em relação à caixa), ângulo azimutal 1 (orientação diagonal com direção esquerda-direita em relação à caixa), ângulo azimutal 2 (orientação diagonal com direção direita-esquerda em relação à caixa) e ângulo zenital 2 (orientação perpendicular em relação à caixa), como pode ser visualizado na Figura 1.

O alvo analisado neste trabalho refere-se a uma amostra de grama "Batatais" de 45x52 cm, disposta sobre uma caixa preta. A amostra foi medida em diferentes posições zenitais e azimutais e em quatro estágios de alagamento: seca, úmida, semialagada (2,5 cm de água acima da superfície) e alagada (5 cm de água acima da superfície) de forma que a superfície da grama ficou completamente submersa, conforme Figura 2.



**Figura 1.** Configuração geométrica da aquisição radiométrica.



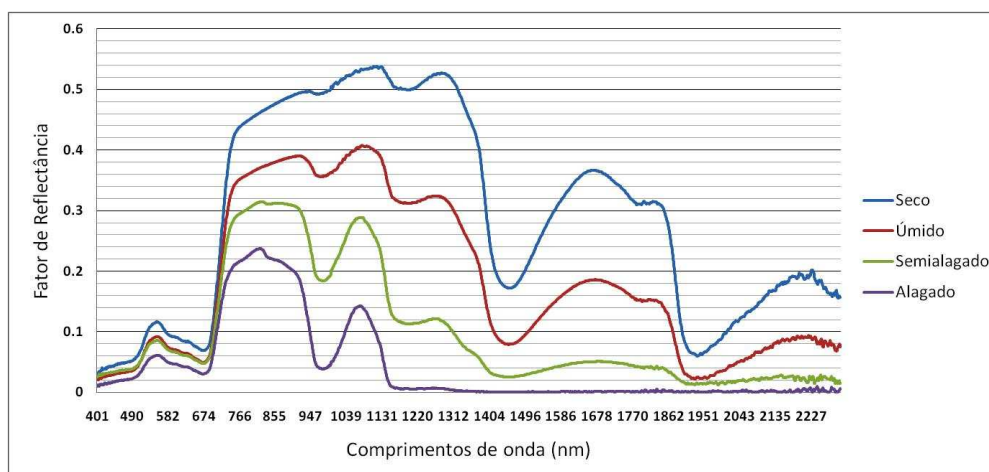
**Figura 2.** Experimento realizado em laboratório a partir da grama em diferentes estágios de inundação: seco (a), úmido (b), semialagado (c) e alagado (d).

Portanto, para cada ângulo de visada foram obtidos três espectros de radiância das placas de referência e da superfície seca e em três estágios de alagamento, representando uma média de 10 amostragens. Após a coleta dos dados, procedeu-se com a redução das medidas radiométricas, visando à obtenção dos espectros dos FRB's médios para cada posicionamento e para cada um dos diferentes estágios de inundação da grama, bem como a obtenção do FRBD *in band* representativo das bandas do sensor MODIS do satélite TERRA/AQUA, que abrangem os intervalos dos comprimentos de onda do azul (banda 3: 459 – 479 nm), do verde (banda 4: 545 – 565 nm), do vermelho (banda 1: 620 – 670 nm), do infravermelho próximo (banda 2: 841 – 876 nm) e do infravermelho médio (banda 5: 1230 – 1250 nm; banda 6: 1628 – 1652; e banda 7: 2105 – 2155 nm).

### 3. Resultados e Discussão

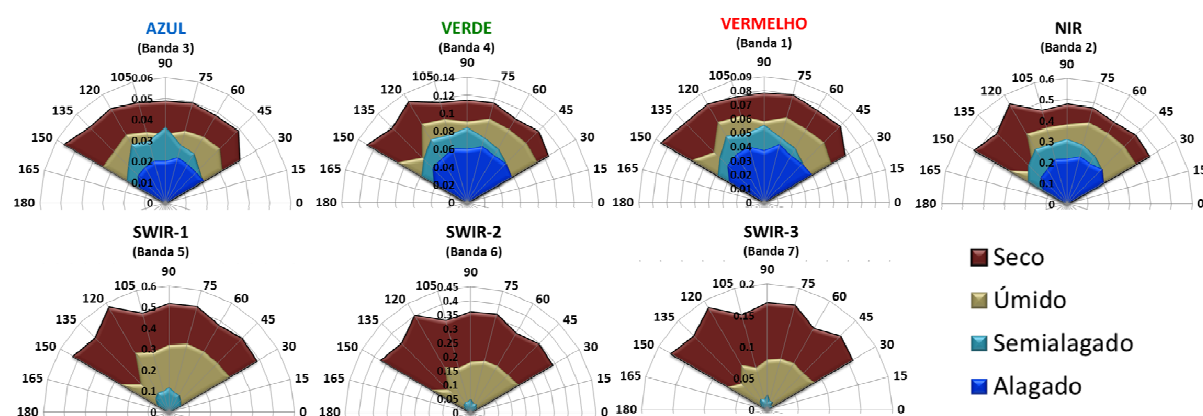
A Figura 3 mostra o espectro de reflectância da amostra de grama (eixo y, adimensional), obtido nos experimentos no intervalo espectral de 400 a 2300 (eixo x, em nm). Observa-se que na região do espectro eletromagnético (EEM) referente ao visível (400 a 700 nm), os principais elementos da vegetação que interagem com a radiação eletromagnética

(REM) são os pigmentos da folha, que atuam como absorvedores da REM. Na região do EEM superior a 700 nm (infravermelho próximo e médio), ocorre um maior espalhamento da radiação devido à estrutura celular da folha, ocasionando o aumento nos valores de reflectância. Ainda, podem-se notar bandas de absorção próximas às faixas de 1400 e 1900 nm, ocasionadas principalmente pelo conteúdo de água presente no interior da folha, que ao absorver a radiação, causam a diminuição nos valores de reflectância. Nota-se ainda que, à medida que o nível de inundação aumenta, o espectro da reflectância diminui, ocasionado pelas propriedades espectrais da água, que absorve praticamente toda a REM na região referente ao infravermelho próximo e médio.



**Figura 3.** Espectro de reflectância da amostra de grama "batatais".

A Figura 4 mostra os gráficos das medidas de reflectâncias bidirecionais *in band*, realizadas a partir do ângulo zenital 1 para as bandas 3 (azul), 4 (verde), 1 (vermelho), 2 (NIR), 5 (SWIR-1), 6 (SWIR-2) e 7 (SWIR-3) do sensor MODIS.

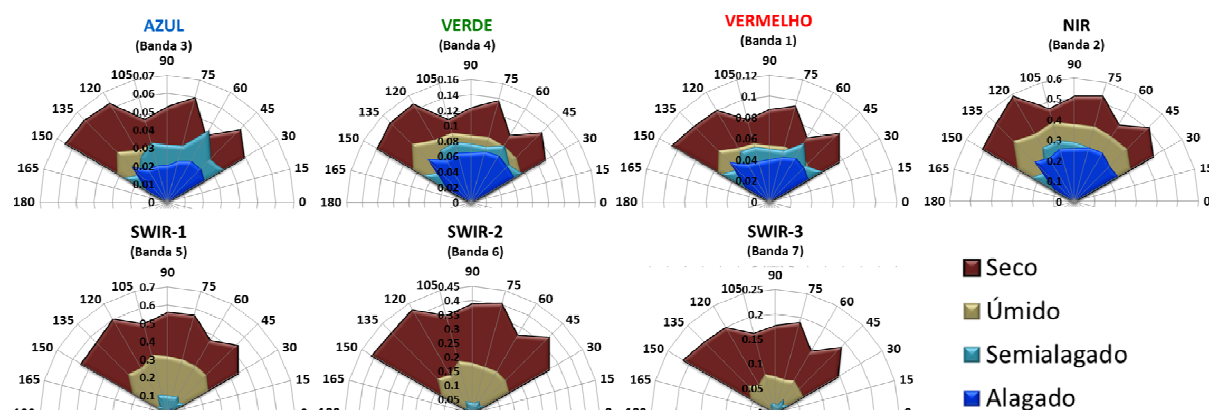


**Figura 4:** Gráficos da reflectância realizada a partir do ângulo zenital-1 para as bandas do sensor MODIS.

Observa-se a ocorrência da anisotropia em todas as situações. Em relação à vegetação seca, o espalhamento preferencial foi observado para o ângulo de 150° nos comprimentos de onda referente ao visível (bandas 3, 4 e 1), e 120° para os comprimentos de onda do infravermelho próximo e médio (bandas 2, 5, 6 e 7). O ângulo preferencial de espalhamento da vegetação úmida obteve variações entre 120° no visível, 75° nas bandas 2 e 5 e 30° nas bandas 6 e 7. Ao se adicionar mais água à amostra, caracterizada pela classe semialagada, observou-se que o espalhamento da radiação ocorreu no ângulo de 90° para todas as bandas. Com a vegetação totalmente alagada, constatou-se que os ângulos de espalhamento da REM

variaram entre  $75^\circ$  nos comprimentos de onda do visível e infravermelho próximo e  $105^\circ$  nas demais bandas.

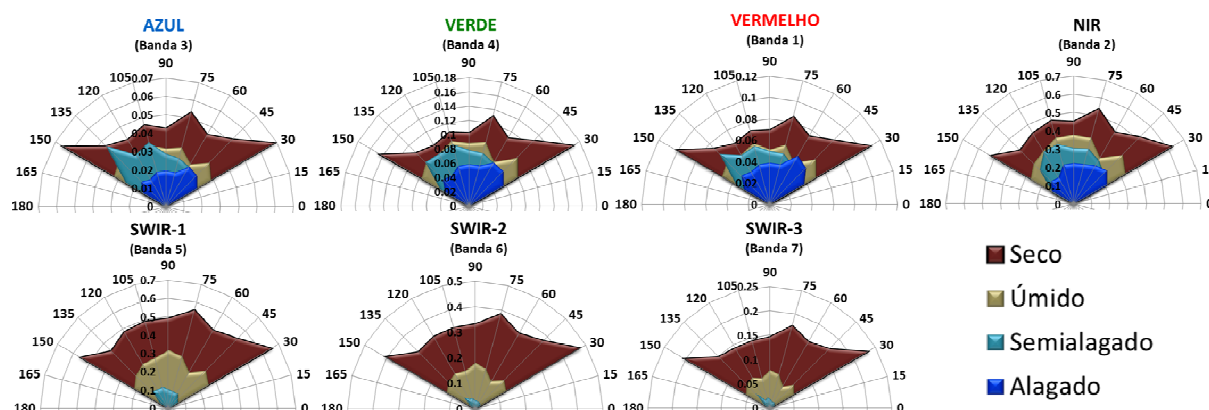
A Figura 5 mostra os gráficos das medidas de reflectâncias bidirecionais *in band*, realizadas a partir do ângulo azimutal 1 para as bandas do sensor MODIS.



**Figura 5:** Gráficos da reflectância realizada a partir do ângulo azimutal-1 para as bandas do sensor MODIS.

Percebe-se que, assim como ocorrido nas medidas realizadas para o ângulo zenital 1, também foi constatada a anisotropia para todas as situações. A classe representada pela vegetação seca apresentou uma variação no espalhamento da REM entre os ângulos de  $150^\circ$  (bandas 3, 1 e 7) e  $120^\circ$  (bandas 4, 2, 5 e 6). A vegetação úmida obteve dois ângulos principais de espalhamento, representados pelos comprimentos de onda referentes ao visível e infravermelho próximo em  $135^\circ$  e infravermelho médio em  $105^\circ$ . O espalhamento da REM na classe semialagada obteve uma variação entre os ângulos de  $60^\circ$  (bandas 3, 4, 1 e 7),  $120^\circ$  (bandas 2 e 5) e  $30^\circ$  (banda 6), com o predomínio do espalhamento em  $60^\circ$ . Por fim, a vegetação alagada obteve dois ângulos principais de espalhamento da REM, sendo que em  $135^\circ$  para os comprimentos de onda do visível e  $60^\circ$  para os comprimentos de onda do infravermelho próximo e médio.

A Figura 6 mostra os gráficos das medidas de reflectâncias bidirecionais *in band*, realizadas a partir do ângulo azimutal 2 para as bandas do sensor MODIS.

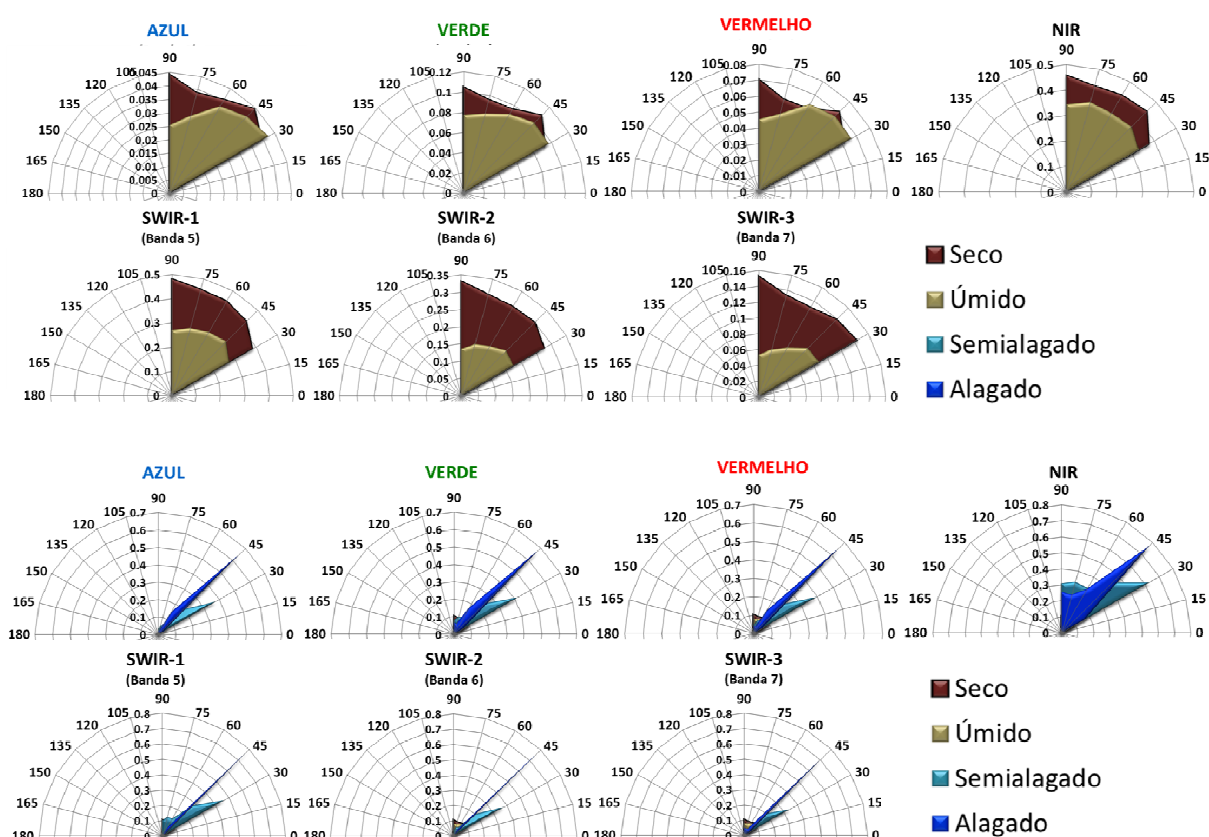


**Figura 6:** Gráficos da reflectância realizada a partir do ângulo azimutal-2 para as bandas do sensor MODIS.

Neste ângulo de aquisição, a ocorrência da anisotropia também foi constatada. Observou-se que a classe da vegetação seca obteve um espalhamento preferencial da REM em  $90^\circ$  para todas as bandas. A vegetação úmida apresentou uma significativa variação nos

ângulos de espalhamento da REM, sendo que para a banda 3 ocorreu em  $135^\circ$ , para as bandas 4 e 1 ocorreu em  $105^\circ$  e  $45^\circ$  igualmente, e para os comprimentos de onda referentes ao infravermelho próximo e médio ocorreu em  $90^\circ$ . Em relação à vegetação semialagada, também ocorreu uma variação no espalhamento da REM, representados pelo espalhamento em  $135^\circ$  (bandas 3, 1, 5, 6 e 7) e  $105^\circ$  (bandas 4 e 2), com o predomínio do espalhamento da REM em  $135^\circ$ . Por fim, a vegetação alagada, assim como na classe úmida, também apresentou uma significativa variação entre os ângulos de espalhamento da REM, sendo que para os comprimentos de onda do visível o espalhamento ocorreu em  $60^\circ$ , para a banda 2 em  $45^\circ$ , para a banda 5 em  $150^\circ$ , para a banda 6 em  $120^\circ$  e para a banda 7 em  $135^\circ$ .

A Figura 7 mostra os gráficos das medidas de reflectâncias bidirecionais *in band* nas condições de vegetação seca e úmida e nas condições de vegetação semialagada e alagada, para as bandas do sensor MODIS.

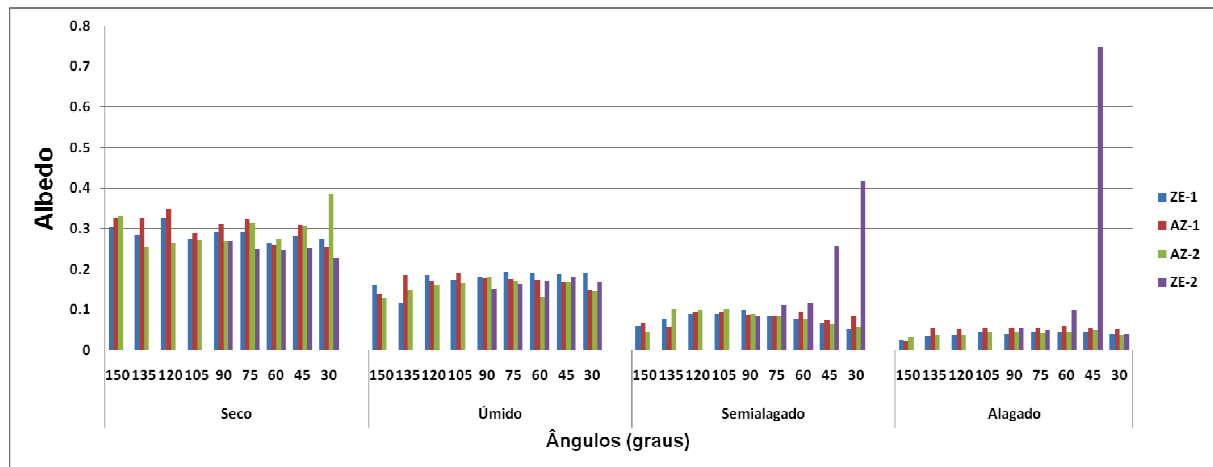


**Figura 7:** Gráficos da reflectância realizada a partir do ângulo zenital-2 para as bandas do sensor MODIS.

Assim como em todos os outros ângulos de aquisição, percebeu-se a ocorrência da anisotropia para todas as situações. O espalhamento da REM foi preferencial para todas as bandas, com exceção da classe úmida. O espalhamento da REM da classe referente à vegetação seca ocorreu em  $90^\circ$  para todas as bandas e a vegetação úmida apresentou espalhamento em  $30^\circ$  (banda 3 e 7) e  $45^\circ$  (bandas 4, 1, 2, 5 e 6). Por fim, a classe semialagada apresentou espalhamento da REM em  $30^\circ$  para todas as bandas e a classe alagada em  $45^\circ$  para todas as bandas, evidenciando a reflexão especular comum em corpos d'água.

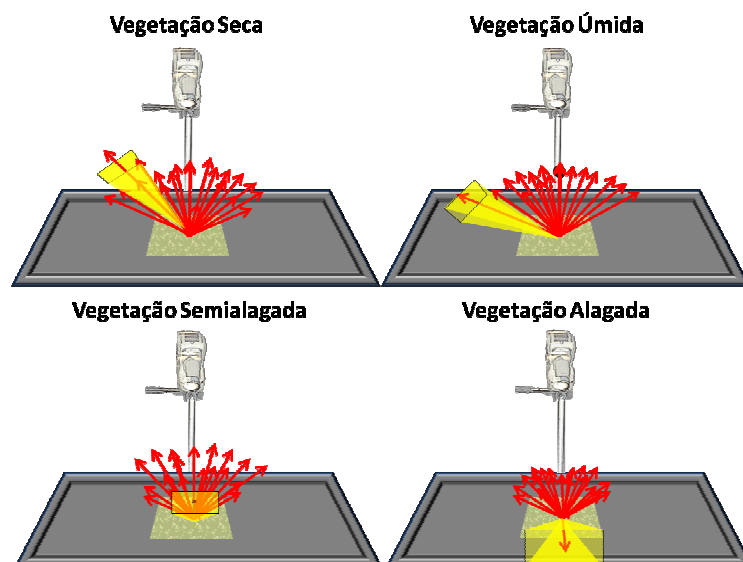
A Figura 8 mostra o gráfico dos valores de albedo obtidos a partir dos quatro ângulos de aquisição e situações hidrológicas analisadas. À medida que o nível de água aumentava nas amostras, os valores de albedo, que corresponde aos valores de reflectância integrada ao longo do espectro eletromagnético (400 a 2230 nm), diminuem. Com a passagem da condição de

vegetação seca para úmida ocorreu uma redução de 37% no albedo, 69% na passagem para a condição semialagada e 86% na passagem para a condição totalmente alagada (referentes à observação ao NADIR).



**Figura 8:** Gráfico dos valores de albedo realizado a partir dos ângulos zenital 1, azimutal 1, azimutal 2 e zenital 2 para as situações de vegetação seca e úmida, semialagada e alagada.

Ainda de acordo com a Figura 8, pode ser visualizada a anisotropia para as quatro situações hidrológicas analisadas. Nota-se que ocorreu uma direção preferencial de 30° no plano azimutal 2 para a superfície composta pela vegetação seca. Em relação à vegetação úmida, embora os valores máximos de espalhamento sejam semelhantes, podem-se encontrar pequenas variações entre 45° e 75° no plano zenital 1. A vegetação semialagada obteve direção preferencial de 30° no plano zenital 2 e a vegetação alagada obteve direção preferencial de espalhamento em 45° também para o plano zenital 2, como podem ser visualizadas na Figura 9.



**Figura 9:** Esboço preferencial de anisotropia.

#### 4. Conclusões

Verificou-se o efeito de anisotropia devido ao espalhamento da REM em todas as bandas do sensor MODIS e em todas as situações hidrológicas simuladas na amostra da vegetação. Em relação à vegetação seca, observou-se o espalhamento preferencial em 30° no plano azimutal 2, e essa condição pode ser explicada devido à constituição espacial da

amostra que promoveu o espalhamento preferencial da REM incidente. Percebeu-se ainda a ocorrência da reflexão especular oposta ao ângulo de iluminação à medida que a influência do corpo d'água predominava no espectro de reflectância.

Ao analisar os principais componentes que interagem com a REM na vegetação, a diferença encontrada nos valores de reflectância para a região do EEM referentes ao infravermelho próximo e médio pode ser relacionada com o posicionamento estrutural da folha, uma vez que a quantidade de água no interior da folha e os espaços intracelulares definem a direção preferencial de espalhamento, e estas características diferem significativamente dos processos de absorção e composição físico-química que ocorrem nos comprimentos de onda referentes ao visível. Portanto, pode-se apontar que uma das causas da anisotropia está relacionada com as diferenças nas estruturas e processos de interação que ocorrem na planta em diferentes regiões do EEM.

Portanto, pode-se inferir que os experimentos realizados em laboratório apresentam resultados confiáveis em relação às características lambertianas das superfícies naturais, embora não representem fielmente a realidade em campo. Ainda, os resultados aqui obtidos são intrínsecos ao experimento realizado e podem variar em outras simulações.

## Referências

Alvarenga, B. S. **Espectro-radiometria de campo em trigo submetido a diferentes isolados bacterianos e adubações nitrogenadas**. 2004. (INPE--TDI/). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004.

Bowker, D. E.; Davis, R. E.; Myrick, D. L.; Stacy, K.; Jones, W. T. Spectral Reflectances of Natural Targets for Use in Remote Sensing Studies. Hampton (Nasa Reference Publication 1139), 1985, 181p.

Goltz, E. **Avaliação do produto MOD09 (reflectância da superfície) fornecido pelo sensor MODIS/Terra através de radiometria de campo em uma área de soja**. 2005. 133 p. (INPE 14219 TDI/1120). Dissertação de Mestrado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

Milton, E. J. Principles of Field Spectroscopy. International Journal of Remote Sensing. 1987, 8(12): 1807-1827.

Moraes, E. C.; Nogueira, J. L. M.; Esposito, E. S. C.; Bastos, E. J. B.; Freire, M. L. F. Comparação entre placas de referência de sulfato de bário (pintada e prensada). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. (SBSR), 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p. 927-931.

Morelli, A. F. **Influência da geometria de visada na reflectância espectral de duas gramíneas forrageiras**. 1993. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1993.

Nogueira, J. L. M.; Moraes, E. C.; Bastos, E. J. B.; Esposito, E. S. C.; Esposito, E. S. C.; Freire, M. L. F. Reflectância de uma superfície vegetada em função da geometria de aquisição. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. (SBSR), 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p. 941-949.

Novo, E. M. L. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 308p.

Steffen, C. A. **Reflectância**. São José dos Campos, INPE (INPE-5638-PUD/070). 1995. 40 p.