

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/10.11.21.05-TDI

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE MUDANÇAS DE ESCALA DE OBSERVAÇÃO SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA REFLECTÂNCIA BIDIRECIONAL

Jefferson Fernandes Teixeira Júnior

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Flávio Jorge Ponzoni, e Ruy Morgado de Castro, aprovada em 25 de agosto de 2017.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3PQ65N5>

> INPE São José dos Campos 2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE Gabinete do Diretor (GB) Serviço de Informação e Documentação (SID) Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970 São José dos Campos - SP - Brasil Tel.:(012) 3208-6923/6921 E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID) **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID) EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/10.11.21.05-TDI

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE MUDANÇAS DE ESCALA DE OBSERVAÇÃO SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA REFLECTÂNCIA BIDIRECIONAL

Jefferson Fernandes Teixeira Júnior

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Flávio Jorge Ponzoni, e Ruy Morgado de Castro, aprovada em 25 de agosto de 2017.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3PQ65N5>

> INPE São José dos Campos 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Teixeira Júnior, Jefferson Fernandes.

T235a Análise da influência de mudanças de escala de observação sobre a caracterização da função de distribuição da reflectância bidirecional / Jefferson Fernandes Teixeira Júnior. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xxiv + 92 p.; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/10.11.21.05-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadores : Drs. Flávio Jorge Ponzoni, e Ruy Morgado de Castro.

Função de distribuição da reflectância bidirecional.
Goniômetro. 3. Textura. 5. Escala de observação. I.Título.

CDU 528.711.7



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aluno (a): Jefferson Fernandes Telxelra Júnior

Título: "ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE MUDANÇAS DE ESCALA DE OBSERVAÇÃO SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA REFLECTÂNCIA BIDIRECIONAL"

> Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de *Mestre* em

Sensoriamento Remoto

Dra. leda Del' Arco Sanches

Leda Del'Ouo San

Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Flávio Jorge Ponzoni Dr.

17200

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Ruy Morgado de Castro

Orlentador(a) / IEAv/CTA / Sto José dos Campos - SP

Dra. Elisabete Caria Moraes

Romero da Costa Moreira

Membro da Banca / INPÉ / São José dos Campos - SP

Convidado(a) / ITA / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maloria simples

(<) unanimidade

Dr.

A meus pais, Jefferson e Célia, e a minha irmã, Larissa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida que me concede e por me sustentar, guiar e fortalecer a cada instante.

A meus pais, Jefferson Fernandes Teixeira e Célia Regina de Oliveira Teixeira, pelo auxílio e sustento durante toda minha vida e principalmente nos momentos de maior necessidade.

Aos meus orientadores, Dr. Flávio Jorge Ponzoni e Dr. Ruy Morgado de Castro, pelos ensinamentos, conselhos, paciência e apoio durante o mestrado.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de estudos e pela estrutura disponibilizada.

Ao Instituto de Estudos Avançados (IEAv), pela utilização do Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletroópticos (LaRaC).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelos financiamentos da Pesquisa.

A todos os amigos do INPE pelo apoio e contribuições, bem como pelos momentos de estudo e de descontração compartilhados.

Aos amigos do IEAv, pelo apoio, ajuda e amizade.

RESUMO

A descrição do modo como uma superfície reflete a radiação, em termos direcionais, pode ser realizada por meio da função de distribuição da reflectância direcional (BRDF). Esta função é geralmente caracterizada com o auxílio de goniômetros em laboratório e/ou campo e utilizada na comparação de dados de sensores remotos obtidos em diferentes níveis (como aeroembarcado e orbital) e em diferentes geometrias de iluminação e observação. Neste trabalho foram investigados os possíveis efeitos que a BRDF pode sofrer ao ser caracterizada em diferentes níveis de aquisição, os quais foram simulados pela mudança no campo de visada (FOV) de um espectrorradiômetro. A variação desse parâmetro (FOV) está relacionada à mudança da "escala de observação", termo usado para definir a relação entre as dimensões dos parâmetros geométricos envolvidos na aquisição de dados. Dessa forma, com o auxílio do goniômetro do LaRaC (Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletroópticos) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), foram caracterizadas as BRDF's de três superfícies artificiais, de mesmo material, com diferentes texturas (lisa, com ranhuras regulares e com ranhuras irregulares), observadas por três diferentes FOV's (1°, 8° e 25°) de um espectrorradiômetro. As BRDF's estimadas com os FOV's de 8° e de 25° se mostraram iguais para todas as superfícies, considerando as incertezas das medições. Por outro lado, a BRDF estimada com FOV de 1° se mostrou igual às estimadas com os outros FOV's apenas para o caso da superfície lisa, enquanto para as demais superfícies apresentou diferenças quanto à intensidade (superfície com ranhuras regulares) e quanto à forma (superfície de ranhuras irregulares). Deste modo, foi possível concluir que a BRDF de uma superfície pode variar com a escala de observação. Assim, o presente trabalho expõe a necessidade de se investigar a premissa de que a BRDF é a mesma ao se comparar dados de uma superfície adquiridos em diferentes níveis.

Palavras-chave: Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional. Goniômetro. Textura. Escala de observação.

CHANGES ON DATA COLLECTION SCALE INFLUENCING THE BIDIRECTIONAL REFLECTANCE DISTRIBUTION FUNCTION ABSTRACT

The description of how a surface reflects the radiation in directional terms can be performed by the Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF). This function is generally characterized using goniometers at laboratory and/or at field level and it has been used comparing remote sensing data obtained at different levels (such as airborne and orbital) and at different illumination and viewing geometries. This work investigated the possible effects that BRDF can suffer being characterized at different acquisition levels, which were simulated by changing the field of view (FOV) of a spectroradiometer. The variation of FOV was related to the "observation scale" changes, term used to define the relationship between the dimensions of the geometric parameters involved in data acquisition. Thus, the BRDF of three artificial surfaces made by the same material but presenting different superficial textures were spectrally characterized using a goniometer developed by the Laboratory of Radiometry and Characterization of Electro-optical Sensors (LaRaC) of the Instituto de Estudos Avançados (IEAv). Three different FOVs (1°, 8° and 25°) were used for the BRDF characterization with a spectroradiometer to simulate observation scales. The BRDF estimated with 8° and 25° FOVs were similar for all surfaces, considering the measurement uncertainties. On the other hand, the BRDF estimated with 1° FOV was similar to those estimated by both 8° and 25° only for the flat surface, while for the other surfaces there were differences in intensity (regular texture surface) and in shape (irregular texture surface). It was possible to conclude that the surface BRDF can vary with the observation scale. Thus, the present work exposed the need to investigate the premise that the BRDF maintains the same when comparing surface data acquired at different levels.

Keywords: Bidirectional Reflectance Distribution Function. Goniometer. Texture. Observation Scale.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema representativo de ângulo sólido projetado
Figura 2.2 - Representação esquemática dos conceitos e parâmetros envolvidos em aquisição de dados radiométricos: Irradiância (dEi), Radiância (dLr), ângulo zenital de incidência (θi), ângulo zenital de reflexão (θr), ângulo azimutal de incidência (φi) e ângulo azimutal de reflexão (φr)
Figura 2.3 – Exemplos de equipamentos goniômetros: Goniômetros: a) ClabSpeG; b) FIGOS; c) GRASS
Figura 2.4 – Goniômetro do Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletro-ópticos do IEAv
Figura 2.5 – Exemplos de representações gráficas de <i>ANIF</i> e FR comumente utilizados na literatura. a) Resultados obtidos por Sandmeier e Itten (1999) com o uso do goniômetro FIGOS; b) resultados obtidos por Schaepman-Strub et. al (2006) em simulações de reflectância de neve e; c) Correspondência entre os sistemas de coordenadas cartesianas e cilíndricas
Figura 2.6 – Estimativa da BRDF de uma placa Spectralon 19
Figura 2.7 – Aquisição de dados com uso de sensores remotos em diferentes escalas de observação
Figura 2.8 – Exemplo de efeito de escala sobre a variação de dados
Figura 2.9 – Imagens da área florestal em resoluções espaciais de 0,75 m, 6 m e 24 m, obtidas pela reamostragem dos pixels de uma imagem do sensor TM
Figura 2.10 – Mudança de escala definida pelo FOV do sensor
Figura 3.1 – Objetos de gesso, com superfícies: a) S1 – lisa; b) S2 – regular e c) S3 – irregular
Figura 3.2 – Diagrama esquemático do sistema de Automação e Controle
Figura 3.3 – Imagem da janela do software de controle do Goniômetro, desenvolvido na Plataforma LabVIEW
Figura 3.4 – Esquema de funcionamento dos modelos ASD FieldSpec Pro e ASD FieldSpec 4 e seus principais constituintes
Figura 3.5 – Limitadores de ângulo sólido, com FOV de 1° à esquerda e de 8° à direita.

Figura 3.6 – Parâmetros geométricos envolvidos na determinação do diâmetro (D) do FOV (α) projetado, de acordo com o raio do Arco sensor (rs)
Figura 3.7 – Curvas de FR espectral da placa de Spectralon no início e no final do ciclo de medições
Figura 3.8 – Sequência de movimentação do goniômetro do LaRaC 40
Figura 3.9 – Procedimento experimental do teste de reprodutibilidade
Figura 3.10 – Disposição da superfície S2 no teste de reprodutibilidade 47
Figura 3.11 – Espectro de emissão de radiância espectral de um corpo negro a 3000 K.
Figura 4.1 – Variações absolutas da radiância espectral nos comprimentos de onda de 650 nm e 930 nm, para aproximadamente 4,0 horas de medições (1500)
Figura 4.2 – Medições de parâmetros ambientais durante o as medições exploratórias.53
Figura 4.3 – Na curva em vermelho (FieldSpec), a lâmpada foi ligada e aquecida por mais de 1,5 h antes das medições. Na Curva em azul (Lâmpada), o espectrorradiômetro foi ligado e aquecido por mais de 1,5 h antes das medições
Figura 4.4 – FR da superfície S1 de gesso. Os dados correspondem à geometria: $\varphi fonte = 0^{\circ} e \theta fonte = 15^{\circ}$, sensor apontado ao nadir e suporte de amostras na posição 0°
Figura 4.5 – Resultados do teste de repetitividade para a banda de 1 a 9 (de (a) a (g)). Os FR's em função do ângulo zenital (θ) de iluminação são separados em cores
Figura 4.6 – Fator de Reflectância (FR) em banda na faixa de comprimentos de onda de 450 a 510 nm (banda 2), em função do FOV, para cada ângulo zenital (θ) da fonte luminosa e para os objetos de superfície: a) lisa (S1), b) regular (S2) e c) irregular (S3).
Figura 4.7 – Valores absolutos de desvio-padrão do <i>FR</i> na banda 1, para as superfícies: a) S1; b) S2; e c) S3
Figura 4.8 – Curvas de FR espectral da superfície S1 de gesso, correspondentes à etapa 1 do ciclo de medições
Figura 4.9 – Comportamento do FR, em 830 nm, em função da geometria de iluminação e de observação. Os dados correspondem à superfície S1, obtidos com FOV de 1° 65
Figura 4.10 – Comportamento do FR da superfície S2 em 830 nm, utilizando os FOV's de (a) 1°, (b) 8° e (c) 25°
Figura 4.11 – Comportamento do FR da superfície S3 em 830 nm, utilizando os FOV's de (a) 1° , (b) 8° e (c) 25°

Figura 4.12 - Variação do FR em função da variação dos 24 ângulos	azimutais de
iluminação, para as superfícies: a) S1; b) S2 e; c) S3	69
Figura 4.13 - Correlação entre os FR obtidos com diferentes FOV's. Os	dados foram
comparados aos pares de FOV's: a) 1° e 8°; b) 1° e 25° e; c) 8° e 25°	

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 3.1 - Bandas espectrais e seus respectivos comprimentos de onda centrais 43

Tabela 4.2 - Resultados do teste de Bartlett para o Teste de repetitividade. Os valos	res
do nível de significância (valor-p) são distribuídos em função do ângulo da fonte θ pa	ara
cada banda espectral	60
Tabela A.1 – Teste Chi-quadrado para o teste de reprodutibilidade	87
Tabela A.2 – Teste de Bartlett para a reprodutibilidade	90

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BRDF	Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional
FR	Fator de Reflectância
BRF	Fator de Reflectância Bidirecional
FOV	Field of view
IEAv	Instituto de Estudos Avançados
IFOV	Instantaneous field of view
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LaRaC	Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletroópticos
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

LISTA DE SÍMBOLOS

- Φ Fluxo radiante
- Φ_i Fluxo incidente
- Φ_r Fluxo refletido
- λ Comprimento de onda
- ρ Reflectância
- Ω Ângulo sólido
- *k* Fator de correção
- θ Ângulo zenital
- φ Ângulo azimutal
- A Área
- L_{λ} Radiância espectral
- *E* Irradiância
- M Exitância
- FR Fator de reflectância
- *r* Coeficiente de Correlação de Pearson
- f_r Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional
- *C* Fator de Correção
- χ^2 Chi-Quadrado
- χ^2_{red} Chi-Quadrado reduzido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO1
1.1	Objetivos5
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA7
2.1	Grandezas Radiométricas7
2.2	Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional12
2.3	Goniômetros14
2.4	Fator de Anisotropia16
2.5	Escalas de observação19
2.6	Mudança de escala de observação24
3	MATERIAIS E MÉTODOS
3.1	MATERIAIS
3.1.1	Superfícies
3.1.2	Goniômetro
3.1.2.1	Especificações
3.1.2.2	Automação e Controle
3.1.3	Espectrorradiômetros
3.1.3.1	FOV
3.1.3.2	Limitadores de ângulo sólido
3.2	MÉTODOS
3.2.1	Medições exploratórias
3.2.1.1	Teste de aquecimento geral
3.2.1.2	Testes de aquecimento individuais
3.2.2	Medições Radiométricas40
3.2.3	Dados Radiométricos42
3.2.4	Análise Estatística– Incertezas
3.2.4.1	Teste de repetitividade44
3.2.4.2	Testes de reprodutibilidade45
3.2.5	Análise Estatística – Teste de Hipótese

Lâmpada halógena	48			
RESULTADOS E DISCUSSÃO	51			
Medições exploratórias	51			
Teste de aquecimento geral	51			
Testes de aquecimento individuais	53			
Comportamento espectral do gesso	55			
Incertezas	56			
Repetitividade	56			
Reprodutibilidade	61			
Anisotropia das superfícies	63			
Testes de correlação	72			
CONCLUSÕES	79			
ÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81			
APÊNDICE A				
É	Lâmpada halógena RESULTADOS E DISCUSSÃO Medições exploratórias Teste de aquecimento geral Testes de aquecimento individuais Comportamento espectral do gesso Incertezas Repetitividade Reprodutibilidade Anisotropia das superfícies Testes de correlação CONCLUSÕES ÈNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ICE A			

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da disponibilidade de dados de sensoriamento remoto, acompanhado do avanço tecnológico de sensores remotos, diversas pesquisas têm sido conduzidas com ênfase à extração de informações quantitativas desses dados, que permitem inferir sobre processos e fenômenos que ocorrem na superfície terrestre, auxiliando no monitoramento dos recursos naturais e na tomada de decisões para sua conservação e uso racional.

Nos casos de sensores imageadores aeroembarcados e orbitais que operam na região de comprimentos de onda entre 0,35 e 15 µm do espectro eletromagnético (região óptica do espectro eletromagnético), os dados obtidos na faixa entre 0,35 e 2,5 µm geralmente correspondem ao registro da parcela da radiação solar que é refletida após incidir nos objetos na superfície. Por esse motivo, a análise destes tipos de dados é feita em função da reflectância, inferidos a partir das medições de radiância. A reflectância é uma propriedade dos objetos que, por definição, é determinada pela razão entre o fluxo de radiação incidente na superfície dos objetos. Deste modo, é possível extrair, através dessa relação, informações a respeito de propriedades físico-químicas dos objetos. Entretanto, a maioria dos objetos na superfície terrestre reflete a radiação em direções preferenciais, característica esta conhecida como anisotropia. Para um objeto que apresenta essa característica anisotrópica, a reflectância de sua superfície é uma grandeza física que depende das geometrias de iluminação e de observação.

Considerando os efeitos angulares da reflectância, quando dados radiométricos obtidos de diferentes condições geométricas de iluminação e visada são comparados, geralmente são aplicados modelos que levam em consideração a Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional (do inglês, BRDF). Essa função descreve as propriedades da reflectância intrínsecas à superfície e, portanto, todas as outras grandezas de reflectância podem ser derivadas dela, considerando os devidos cálculos que levem em consideração os limites dos feixes de radiação incidentes e reflectidos (DI GIROLAMO, 2003; SCHAEPMAN-STRUB et al., 2006).

Embora definida para condições ideais, envolvendo ângulos sólidos infinitesimais de radiação, a BRDF pode ser modelada por meio de dados de reflectância obtidos em variadas geometrias de iluminação e observação. Para isso, sua caracterização geralmente é feita com o auxílio de equipamentos denominados goniômetros, os quais permitem a aquisição de dados radiométricos em diversas geometrias. Dependendo do tipo de aplicação e do tipo de superfície de interesse, os goniômetros podem ser aplicáveis em laboratório e/ou de campo (MÜLLER et al., 1998).

Por simplificação, costuma-se assumir a BRDF como universal para qualquer escala de comparação. Em diversas pesquisas, a BRDF de uma superfície, caracterizada em campo e/ou laboratório, é aplicada em modelos, correções e análises envolvendo dados radiométricos obtidos de sensores aéreos e orbitais. Um exemplo claro dessa prática pode ser encontrado em metodologias de calibração absoluta de sensores orbitais (DINGUIRARD; SLATER, 1999), nas quais são realizadas medições radiométricas em campo de uma superfície de referência no mesmo momento de passagem do sensor. Assim, os dados obtidos pelo sensor são comparados com os dados de campo, mediante correções atmosféricas e dos efeitos angulares da reflectância, estes últimos, associados à BRDF da superfície.

Considerando que os fatores que contribuem para a anisotropia da reflectância tem origem principalmente nas estruturas da superfície, diferentes resultados podem ser encontrados na caracterização da BRDF quando esta é realizada em diferentes níveis de aquisição de dados, uma vez que a capacidade de discriminação dessas estruturas está relacionada às características do sistema sensor e às condições espaciais e geométricas de aquisição de dados, tais como a altura do sensor em relação à superfície, ângulos de visada e suas consequências sobre o campo instantâneo de visada (do inglês, IFOV). No entanto, devido à falta de estudos na área, as relações entre os dados obtidos em diferentes escalas de comparação ainda não são bem compreendidas (WALTHALL et al., 2000).

A combinação desses parâmetros geométricos permite definir o que é conhecido como "escala de observação", termo que pode ser associado à resolução espacial de um sensor, ou seja, ao nível de detalhamento espacial que o sensor pode obter (GOODCHILD; QUATTROCHI, 1997). Deste modo, as relações entre o tamanho das estruturas na superfície e a escala de observação podem ter efeitos diferentes nos dados obtidos em diferentes níveis. Caso essas relações não sejam consideradas, as diferenças nos resultados podem ser interpretadas de modo inconsistente. Por esse motivo, ao se comparar as grandezas físicas associadas à reflectância, é preciso definir a relação adequada entre os parâmetros geométricos envolvidos na aquisição de dados, tendo em vista o tipo de superfície em estudo.

Outro importante fator a ser considerado ao se comparar dados radiométricos é a característica dos feixes de radiação incidentes e refletidos. As primeiras definições radiométricas relacionadas à reflectância das superfícies, propostas por Nicodemus et al. (1977), consideram a existência de nove possíveis grandezas físicas associadas à reflectância de acordo com o formato (direcional, cônico ou hemisférico) dos feixes de radiação. No entanto, tais definições foram construídas a partir de restrições dificilmente alcançadas na prática, considerando as condições em que os dados de sensores remotos são obtidos. Desde então, trabalhos mais recentes (MARTONCHIK et al., 2000; SNYDER, 2002; DI GIROLAMO, 2003) foram conduzidos com o objetivo de estender tais definições para condições mais próximas à realidade.

Embora a maior parte da comunidade científica tenha conhecimento desses trabalhos, é possível encontrar em muitas pesquisas e até mesmo em produtos de sensores orbitais e aeroembarcados confusões e equívocos quanto às definições das grandezas radiométricas. Termos como BRDF e BRF (do inglês, fator de reflectância bidirecional), por exemplo, são frequentemente associados à mesma grandeza física, quando de fato não são, apesar de estarem relacionadas entre si. Com o objetivo de alertar a comunidade científica sobre importância da padronização e do uso correto das terminologias relacionadas à reflectância, Schaepman-Strub et al. (2006) proveram uma revisão dos conceitos básicos e definições das grandezas de reflectância, destacando as diferenças entre esses tipos de grandezas e indicando os casos em que duas ou mais podem ser comparadas, dependendo da geometria da aquisição de dados e das correções atmosféricas aplicadas a esses dados.

Embora esses esforços para a padronização das grandezas de reflectância sejam notórios, a definição dos limites em que cada grandeza radiométrica atua é subjetiva, em boa parte devido às dificuldades em se delimitar quando um feixe de radiação pode ser considerado direcional, cônico ou hemisférico. Tais delimitações dependem principalmente da maneira como um fenômeno é observado, ou seja, da escala de observação (MARTONCHIK et al., 2000). Como exemplo, o campo de visada (do inglês, FOV) de um sensor orbital como o MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) com 0,1º de abertura angular, pode projetar na superfície terrestre um IFOV (*instantaneous field-of-view*) de 1,1 km (BARNES et al., 1998). Considerando as dimensões envolvidas na aquisição de dados desse sensor, o feixe refletido compreendido nesse FOV pode ser considerado aproximadamente direcional. No entanto, caso essa mesma área seja imageada por um sensor aeroembarcado, por exemplo, a mesma aproximação não é válida, visto que o FOV necessário para abranger tal área deve ser maior (da ordem de dezena de grau), deixando de ser considerado direcional.

Nessa perspectiva, alguns trabalhos têm se desenvolvido com o objetivo de avaliar e tentar compreender os efeitos da escala de observação sobre os dados de sensores remotos. Woodcock e Strahler (1987) já apontavam para os efeitos da mudança de escala em imagens de sensores aeroembarcados, estabelecendo uma relação entre a resolução espacial do sensor e o número de pixels contendo mais de um tipo de cobertura/uso da terra.

Em trabalhos mais recentes, resultados interessantes destacam as influências da escala de observação sobre modelos de BRDF (ROMÁN et al., 2011), índices de vegetação (YAN et al., 2016; TAO et al., 2016) e sistemas de monitoramento (HUAGUO et al., 2005). Román et al. (2011) aplicaram um modelo de BRDF em áreas cobertas por vegetação, utilizando dados de imagens de diferentes resoluções espaciais, obtidas por um sensor imageador aeroembarcado (CAR) e pelo sensor orbital MODIS. Os resultados mostraram boa correspondência entre os dados dos dois sensores apenas para ângulos de visada próximos ao nadir (ângulos zenitais de observação menores que 30°), enquanto que para ângulos de visada maiores, o comportamento dos dados se mostrou

dependente da escala. Foi verificado que nas imagens de menor resolução espacial (<60 m), a direção de maior espalhamento da radiância por parte da vegetação foi inversa àquela verificada para imagens de maior resolução espacial (>240 m).

Dentro dessa perspectiva, o presente trabalho investiga as possíveis influências da escala de observação sobre a caracterização da BRDF de uma superfície em nível de laboratório. O comportamento dos dados radiométricos foi avaliado para diferentes tipos de superfícies e FOV's do sistema sensor. Desta forma, as variações nas combinações dos parâmetros envolvidos na aquisição dos dados simularam variações na escala de observação.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é investigar possíveis influências causadas pela mudança de escalas, em virtude da adoção de diferentes ângulos de FOV de um sensor espectrorradiômetro, sobre a caracterização da BRDF de superfícies.

Para isso, foi utilizado o goniômetro do Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletro-ópticos – LaRaC (CASTRO et al., 2017) do Instituto de Estudos Avançados - IEAv em São José dos Campos –SP. Como o trabalho foi realizado logo após o término da construção do goniômetro, testes iniciais com o equipamento foram necessários para se direcionar a metodologia a ser adotada na pesquisa em foco.

Assim, para o cumprimento do objeto principal do trabalho, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- medições exploratórias: foram realizadas medições iniciais de teste com o goniômetro, que teve como objetivo verificar o funcionamento adequado de cada equipamento envolvido nos processos de medição;
- determinação das incertezas: foram realizados testes de repetitividade e reprodutibilidade das medições radiométricas, com o objetivo de avaliar as incertezas das medições;

3) caracterização da BRDF: a partir da análise dos resultados das etapas anteriores, foi estabelecida a metodologia adequada para se caracterizar a BRDF de três superfícies artificiais com diferentes texturas¹, sob três diferentes ópticas de um sistema sensor, simulando assim a variação da escala espacial de observação.

¹ O termo "textura" aqui, conforme Meneses et al. (2012), representa a rugosidade topográfica da superfície, podendo ser compreendida como o conjunto de variações verticais de altura da superfície de um material.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A relação entre dados radiométricos adquiridos em diferentes escalas espaciais ainda não é bem compreendida, principalmente devido ao comportamento anisotrópico da reflectância da maioria das superfícies, embora a metodologia comumente utilizada assuma correlação direta entre dados de laboratório, campo, aéreo e orbital, como pode ser encontrado, por exemplo, em procedimentos de calibração de sensores orbitais.

O comportamento anisotrópico da reflectância decorre das interações da radiação eletromagnética (REM) com as estruturas superficiais de um objeto (ROUJEAN et al., 1992). As características dessas estruturas tais como formato e textura, podem contribuir para estabelecer direções preferenciais de reflexão da REM. Como essas características podem variar de acordo com a escala de observação envolvida no processo de aquisição de dados, é esperado que o caráter anisotrópico da reflectância também seja dependente da escala de observação.

Os conceitos e as definições das grandezas radiométricas fundamentais, envolvidas nas metodologias em sensoriamento remoto, necessárias para a compreensão da anisotropia da reflectância são apresentados nas Seções 2.1, 2.2 e 2.4. Na Seção 2.3 são apresentados os goniômetros atualmente utilizados para auxiliar a caracterização da BRDF de superfícies. Na Seção 2.5, são discutidos os conceitos referentes ao termo "escala" e os efeitos da mudança de escala em dados de sensores remotos. Na Seção 2.6 são apresentadas as relações de escala obtidas com a mudança do FOV do sensor.

2.1 Grandezas Radiométricas

O pré-requisito para a extração de informação quantitativa dos dados de sensores orbitais, aeroembarcados e/ou de laboratório no domínio espectral óptico baseia-se na determinação da radiância espectral (SCHAEPMAN-STRUB et al., 2006). Segundo Schaepman-Strub et al. (2006), a radiância espectral (L_{λ}) é o fluxo radiante ($d\Phi$) de um feixe por unidade de comprimento de onda (λ), por unidade de área projetada ($A \cdot cos(\theta)$) e ângulo sólido (Ω) do feixe (Equação 2.1), podendo ser expressa na unidade W·m⁻²·sr⁻¹·nm⁻¹, conforme o Sistema Internacional de Unidades, SI:

$$L_{\lambda} = \frac{\mathrm{d}^{3}\Phi}{\mathrm{d}\lambda \cdot \mathrm{d}\Omega \cdot \mathrm{d}A} \qquad , \qquad (2.1)$$

, em que Ω denota a projeção do ângulo sólido ω sobre a superfície, observada sob um ângulo θ medido em relação à normal à superfície ($\Omega = \omega \cdot \cos \theta$). Na Figura 2.1 é apresentado um esquema, identificando a relação entre a projeção do ângulo sólido e o ângulo zenital θ .



Figura 2.1 – Esquema representativo de ângulo sólido projetado.

Em sensoriamento remoto para a observação e o monitoramento da superfície da Terra, a radiância espectral detectada pelo sistema sensor no espectro óptico refletido se refere à parcela da radiação solar que após incidir sobre uma superfície ou objeto, é refletida em direção ao sensor. Quando um feixe de radiação incide sobre uma superfície, este pode sofrer três fenômenos simultaneamente: reflexão, transmissão e/ou absorção. A quantidade de radiação refletida pelos diferentes elementos que compõem a superfície terrestre depende de propriedades físico-químicas inerentes a esses objetos.

A reflectância (ρ), uma propriedade da matéria que indica a quantidade da radiação refletida, pode ser determinada pela razão entre o fluxo refletido (Φ_r) e o fluxo incidente (Φ_i) em uma superfície (NICODEMUS et al., 1977), conforme a Equação 2.2, variando em valores de 0 a 1, seguindo a lei de conservação de energia. Convém destacar que todas as grandezas e funções radiométricas apresentadas adiante podem ser dependentes do comprimento de onda. No entanto, para simplificação nas equações, o termo λ será suprimido.

$$\rho = \frac{\mathrm{d}\Phi_r}{\mathrm{d}\Phi_i} \tag{2.2}$$

Outra forma de determinar a reflectância é pela razão entre a exitância ($M [W \cdot m^{-2}]$) e a irradiância ($E [W \cdot m^{-2}]$) (SCHAEPMAN-STRUB, 2006):

$$\rho = \frac{M}{E} \tag{2.3}$$

A exitância (M), e a irradiância (E) são densidades de fluxo radiante, diferenciadas segundo o sentido de propagação do fluxo em relação à área da superfície, ou seja, incidente (irradiância) ou emergente à superfície (exitância), podendo ser obtidas pelas seguintes equações:

$$E = \frac{\mathrm{d}\Phi_i}{\mathrm{d}A} \qquad \qquad ; \qquad \qquad M = \frac{\mathrm{d}\Phi_r}{\mathrm{d}A} \qquad \qquad (2.4)$$

Segundo Milton (1987), devido às dificuldades técnicas de se medir a reflectância (como a dificuldade de se determinar a irradiância), mede-se em seu lugar uma quantidade equivalente denominada fator de reflectância (*FR*). Conforme proposto por Nicodemus et al. (1977), o FR é definido como a razão entre o fluxo radiante refletido pela superfície ($d\Phi_{r,s}$) e o fluxo radiante refletido por uma superfície de referência lambertiana ideal ($d\Phi_{r,r}$) sob as mesmas condições de iluminação e de observação. Assim temos:

$$FR = \frac{\mathrm{d}\Phi_{r,s}}{\mathrm{d}\Phi_{r,r}} \tag{2.5}$$

A placa de Spectralon (Labsphere, Inc.) tem sido consensualmente utilizada como superfície lambertiana de referência na maioria das metodologias que incluem coleta de dados em laboratório e em campo em que se recorre ao fator de reflectância, devido a sua estável e alta reflectância ao longo do espectro óptico (MILTON et al., 2009).

As grandezas reflectância e fator de reflectância envolvem, em teoria, elementos infinitesimais não mensuráveis diretamente. Na prática, as medições devem conter intervalos não nulos desses parâmetros. Além disso, os fluxos dos feixes de radiação medidos pelo sensor são delimitados por seu campo de visada (FOV), representados por ângulos sólidos com direção definida pelos ângulos de zênite (θ) e de azimute (φ) (ver Figura 2.2). Nesse caso, a grandeza física relacionada ao feixe de radiação que sensibiliza o sistema sensor é a radiância. Assim, segundo a definição proposta por Milton (1987), o FR pode ser determinado pela razão entre a radiância refletida pela superfície $(dL_{r,s})$ e a radiância refletida por uma superfície de referência lambertiana ideal $(dL_{r,r})$ sob as mesmas condições de iluminação e observação. Ou seja, para que a Equação 2.6 seja equivalente à definição (2.5), é necessário que os ângulos sólidos da superfície $(d\Omega_{r,s})$ seja igual ao da superfície de referência $(d\Omega_{r,r})$ e que a área da superfície (dA_s) seja igual à da superfície de referência (dA_r) . Em resumo, não deve haver alteração do FOV do sensor, nem da altura, nem do ângulo de visada em relação à superfície e à superfície de referência, bem como da potência da fonte e do seu ângulo e distância para a superfície e para a superfície de referência. Deste modo, a Equação 2.5 pode ser reescrita como:

$$FR = \frac{\mathrm{d}\Phi_{r,s}/(\mathrm{d}\Omega_{r,s}\cdot\mathrm{d}A_s)}{\mathrm{d}\Phi_{r,r}/(\mathrm{d}\Omega_{r,r}\cdot\mathrm{d}A_r)} = \frac{\mathrm{d}L_{r,s}}{\mathrm{d}L_{r,r}}$$
(2.6)

Além disso, deve-se considerar que placas de referência não são refletores perfeitos e, portanto, é preciso inserir um fator de correção (*C*) para a reflectância espectral da placa, fazendo com que a Equação 2.6 se torne:

$$FR = \frac{\mathrm{d}L_{r,s}}{\mathrm{d}L_{r,r}} \cdot C \tag{2.7}$$

A Figura 2.2 representa esquematicamente a geometria de aquisição de dados comumente envolvida no uso de sensores remotos.
Figura 2.2 - Representação esquemática dos conceitos e parâmetros envolvidos em aquisição de dados radiométricos: Irradiância (dE_i) , Radiância (dL_r) , ângulo zenital de incidência (θ_i) , ângulo zenital de reflexão (θ_r) , ângulo azimutal de incidência (φ_i) e ângulo azimutal de reflexão (φ_r) .



Fonte: Sandmeier e Itten (1999)

Nessa representação, a geometria de aquisição é descrita pelos ângulos zenitais (θ) e azimutais (ϕ) de iluminação e observação (índices *i* e *j*, respectivamente). A irradiância e a radiância refletida são denotadas por d E_i e d L_r

Dependendo das características angulares das radiâncias incidente e refletida, foram definidas por Nicodemus et al. (1977) nove terminologias de fatores de reflectância (FR's), de acordo com a geometria de iluminação e aquisição de dados, conforme são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Relação entre as radiâncias incidentes e refletidas usadas nas terminologias definidas por Nicodemus et al. (1977), considerando um elemento de área dA. As figuras esquemáticas em fundo cinza representam grandezas mensuráveis.

Incidente/ Refletida	Direcional	Cônico	Hemisférico	
Direcional				
	Bidirecional	Direcional-cônico	Direcional-hemisférico	
Cônico				
	Cônico-direcional	Bicônico	Cônico-hemisfério	
Hemisférico				
	Hemisférico-direcional	Hemisférico-cônico	Bi-hemisférico	

Fonte: Adaptada de Schaepman-Strub et al. (2006).

As geometrias em destaque (fundo cinza) na Tabela 2.1 representam as situações possíveis na prática, pois não envolvem quantidades infinitesimais de fluxo radiante. Segundo Milton et al. (2009), para FOV's até 3° podemos assumir o caso de feixe de radiação direcional, desde que a superfície possa ser considerada homogênea. Nesse sentido, portanto, todos os espectrômetros de campo que, em geral, possuem um FOV com maior abertura, coletam feixes cônicos de radiação. Para os feixes de radiação incidentes, os casos direcionais e hemisféricos compreendem geralmente situações de céu limpo (predominância da irradiância direta) e de céu nublado (predominância da irradiância difusa), respectivamente; os casos cônicos geralmente são associados a situações de laboratório, em que são utilizadas lâmpadas como fonte de radiação.

2.2 Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional

A maioria dos objetos na superfície terrestre, inclusive aqueles usados como superfícies de referência em processos de calibração radiométrica de sensores em voo, apresentam caráter espectralmente anisotrópico, embora alguns possam parecer quase lambertianos

em algumas faixas espectrais e dentro de certos ângulos limites de iluminação e visada (SANDMEIER e ITTEN, 1999). Superfícies lambertianas são aquelas cuja intensidade radiante refletida decai com o cosseno do ângulo de observação, medido em relação à superfície normal. Como resultado, a radiância desses objetos independe da direção de observação (SCHAEPMAN-STRUB, 2006). Quando uma superfície reflete a radiação em direções preferenciais ela é dita de comportamento anisotrópico. Os principais fatores que produzem a anisotropia são de origem espacial, como: textura, tamanho, forma, espaçamento, orientação e volume dos objetos (LIANG et al., 2000).

A descrição matemática do comportamento das superfícies quanto à maneira como a radiação é refletida por elas, em termos direcionais, pode ser realizada por meio da BRDF. Segundo Nicodemus et al. (1977), para o caso de irradiância uniforme sobre uma área suficientemente extensa de uma superfície uniforme e isotrópica, a BRDF (f_r) pode ser descrita por:

$$f_r(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i) = \frac{\mathrm{d}L_r(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i; E_i)}{\mathrm{d}E_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{\mathrm{d}L_r(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i; E_i)}{\mathrm{d}L_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \mathrm{d}\Omega_i} \qquad [\mathrm{sr}^{-1}] \quad (2.7)$$

Em que: $\theta \in \varphi$ denotam os ângulos zenitais e azimutais; os índices *i* e *r* dos ângulos se referem ao sentido de incidência e de reflexão; $d\Omega_i = d\omega_i \cdot \cos(\theta_i)$ é o elemento de ângulo sólido projetado na direção normal à superfície; $dL_i \in dL_r$ se referem às radiâncias incidente e refletida, respectivamente; e dE_i é a irradiância.

Embora seja um conceito fundamental, a BRDF não pode ser medida diretamente, pois considera ângulos sólidos infinitesimais que não incluem quantidades mensuráveis de fluxo radiante (NICODEMUS et al., 1977), conforme discutido anteriormente para a reflectância e o fator de reflectância. No entanto, alguns modelos podem estimar a BRDF por meio de medições de radiância e/ou cálculos de fator de reflectância para algumas geometrias hemisféricas e/ou cônicas.

Na prática, as condições de iluminação ideais e a superfície ideal requeridas nas definições da BRDF não são possíveis de serem alcançadas. Porém, conforme demonstrado por Snyder (2002) e Di Girolamo (2003), as propriedades intrínsecas da

BRDF são invariantes quando a superfície não é plana e homogênea, desde que a irradiância seja uniforme e unidirecional (feixes luminosos paralelos). Entre essas propriedades se destaca a reciprocidade, que se refere à invariância da função quando, por exemplo, são invertidas as posições do sensor e da fonte luminosa. Os efeitos de heterogeneidade e não paralelismo da irradiância podem ser minimizados aplicando-se procedimentos de correção, como a correção do formato cônico dos feixes luminosos (DANGEL et al., 2005; SERROT et al. 1998) e a correção do ângulo zenital da fonte luminosa (SANDMEIER et al. 1998).

Nesses casos, para assegurar maior acurácia e precisão das medições, são utilizados equipamentos chamados goniômetros, desenvolvidos para práticas de campo ou de laboratório, aos quais é acoplado um ou mais sensores. Aos goniômetros que operam em laboratório é necessário acoplar uma fonte luminosa com características conhecidas, como radiância espectral emitida e o ângulo de iluminação.

2.3 Goniômetros

Goniômetros têm sido desenvolvidos e utilizados em diversos institutos de pesquisa com o objetivo de melhor compreender os efeitos da BRDF na caracterização de superfícies comumente estudadas em sensoriamento remoto. Dentre esses equipamentos, podemos citar alguns que operam em laboratório, como o CLabSpeG (Compact Laboratory Spectro-Goniometer) da Universidade Católica de Leuven (BILIOURIS et al., 2007); e o EGO (European Goniometric Facility) (KOECHLER et al., 1994); que operam em campo, como o SFG (Sandmeier Field Goniometer) (MÜLLER et al., 1998); e aqueles projetados para operar tanto em laboratório como em campo, como o goniômetro da ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales) (SERROT et al., 1998), o FIGOS (Swiss Field Goniometer System) da Universidade de Zurique (SANDMEIER e ITTEN, 1999) e o GRASS (Gonio RAdiometric Spectrometer System) do Laboratório Nacional de Física de Teddington (PEGRUM et al., 2007). Na Figura 2.3 são apresentados alguns exemplos desses equipamentos.

Figura 2.3 – Exemplos de equipamentos goniômetros: Goniômetros: a) ClabSpeG; b) FIGOS; c) GRASS.



Fontes: Biliouris et al. (2007); Sandmeier e Itten (1999); Pegrum et al. (2007).

No Brasil, o goniômetro desenvolvido no Instituto de Estudos Avançados (IEAv), em São José dos Campos, SP, está operando no Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletro-ópticos (LaRaC) (CASTRO et al., 2017). Este goniômetro, conforme apresentado na Figura 2.4, é um equipamento composto por dois arcos metálicos verticais sobre os quais são acoplados um espectrorradiômetro ASD FieldSpec Pro (ASD, 1999) e uma fonte de luz (uma lâmpada halógena de 50 W) capazes de se movimentar em ângulos zenitais e azimutais. Figura 2.4 – Goniômetro do Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletro-ópticos do IEAv.



Vale destacar também que, em todos os procedimentos de medições radiométricas, como os que se utilizam de goniômetros, devem ser levadas em consideração as possíveis variações nos parâmetros climáticos, os quais podem exercer diferentes influências sobre os dados de diferentes escalas. Variações na temperatura e na humidade do ar, por exemplo, podem influenciar o meio existente entre fonte-superfície-sensor, alterando assim, a propagação da REM ao interagir com os gases, vapor d'água e particulados. Além disso, as variações nos parâmetros climáticos podem também afetar o funcionamento dos equipamentos utilizados no processo de medição, como os sensores e a fonte de iluminação

2.4 Fator de Anisotropia

Para os equipamentos que operam em laboratório, a metodologia comumente aplicada envolve dados de fator de reflectância obtidos para várias geometrias de iluminação e de observação. Para isso, o sensor e a fonte variam de posicionamento ao longo da estrutura do goniômetro em sequências pré-definidas e, para cada combinação de ângulos de zênite e de azimute da fonte e do sensor, são coletados dados de radiância

espectral da superfície. Para se determinar os FR's a partir desses dados de radiância, de acordo com a Equação 2.7, são adquiridos dados de radiância de uma superfície de referência, geralmente de uma placa de Spectralon (LABSPHERE, 2017), antes e depois das medições da superfície de interesse (PINTO, 2011).

Para melhor visualização e análise do comportamento angular das medições, os dados de fator de reflectância (*FR*), para cada combinação de ângulo de iluminação e observação, são normalizados em relação à medição ao nadir (*FR*₀) (menos para a configuração em que a fonte é posicionada também ao nadir, devido à superposição dos equipamentos), determinando um índice conhecido como fator de anisotropia (*ANIF*), que pode ser determinado por:

$$ANIF(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i; \lambda) = \frac{FR(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i; \lambda)}{FR_0(\theta_i, \varphi_i; \lambda)}$$
(2.8)

Os valores de *ANIF*, para um determinado comprimento de onda e uma determinada geometria de iluminação, podem ser visualizados inserindo-os em um espaço tridimensional, como aquele representado na Figura 2.5(a). Para isso, geralmente é utilizado um sistema de coordenadas cilíndricas, em que a escala de valores do ângulo zenital de observação é atribuída aos eixos do plano horizontal. Outra forma de representação consiste de um espaço bidimensional onde são distribuídos pontos ou áreas correspondentes a uma combinação de ângulo zenital e azimutal de observação, para uma geometria fixa de iluminação, onde cada ponto ou área possui um valor agregado de reflectância, fator de reflectância ou *ANIF*, conforme pode ser visto na Figura 2.5(b). A correspondência entre os sistemas de coordenadas cartesianas e cilíndricas pode ser visualizada na Figura 2.5(c).

Figura 2.5 – Exemplos de representações gráficas de ANIF e FR comumente utilizados na literatura. a) Resultados obtidos por Sandmeier e Itten (1999) com o uso do goniômetro FIGOS; b) resultados obtidos por Schaepman-Strub et al. (2006) em simulações de reflectância de neve e; c) Correspondência entre os sistemas de coordenadas cartesianas e cilíndricas.









Fontes: Adaptado de Sandmeier e Itten (1999); Schaepman-Strub et al. (2006); Müller et al. (1998).

Na Figura 2.6 é apresentada a caracterização da BRDF de uma placa de Spectralon, com uso do goniômetro instalado no LaRaC, para variação dos ângulos (zenital e azimutal) da fonte, mantendo-se fixos o ângulo zenital (em 30°) e o ângulo azimutal (em 0°) do sensor, para o comprimento de onda de 900 nm. Os valores do gráfico correspondem ao *ANIF* da placa, calculado em relação à posição em que a fonte estava apontada ao nadir. As regiões em cinza e em preto se referem às geometrias em que havia sombra dos equipamentos.



Figura 2.6 – Estimativa da BRDF de uma placa Spectralon.

Fonte: Castro et al. (2017).

2.5 Escalas de observação

Segundo Wu e Li (2009) a maneira como observamos/modelamos/representamos um evento/fenômeno/superfície está relacionado a uma escala (ver Tabela 2.2). O termo

"escala" pode apresentar diferentes significados dependendo da área de estudo em que ele se aplica. Pode se referir tanto à amplitude espacial de uma região, ou seja, sua extensão geográfica, quanto ao grau de detalhamento, aplicado em um contexto de espaço, tempo ou outras dimensões de pesquisa (GOODCHILD; QUATTROCHI, 1997). No domínio espacial, podem ser distinguidos diferentes significados para o termo escala: a escala de observação, de modelagem, operacional, geográfica, política e cartográfica, os quais são comparados na Tabela 2.2.

Tipo de Escala	Descrição	Observações
Observação	Unidade de medida da grandeza	Pode ser uma descrição da resolução espacial, intervalo de tempo, alcance espectral, ângulo sólido ou direção de polarização.
Modelagem	Escala em que o modelo é descrito	Como os modelos são baseados em medições em uma escala de observação, as quais servem como parâmetros de entrada, ambas as escalas devem ser compatíveis.
Operacional	Escala de ação em que os processos operam	Pode ser definido por uma extensão espacial ou o período de um ciclo natural.
Geográfica	Extensão geográfica do estudo	Representa o conjunto de estruturas mais evidentes em observação (exemplo: folha, dossel, conjunto de plantas).
Política	Escala de decisão política	Para garantir uma conclusão política confiável, a escala política deve ser maior que a escala operacional.
Cartográfica	Razão entre a distância em um mapa e em solo	Usada para representar a distribuição espacial dos resultados em um mapa.

Tabela 2.2 - Descrição e comparação dos tipos de escala espaciais.

Fonte: Adaptada de Wu e Li (2009).

A escala associada à observação está relacionada às resoluções: espacial, a espectral, a radiométrica e a temporal de um sensor. Dependendo das diferentes combinações dessas resoluções, um sistema sensor poderá observar uma superfície em diferentes escalas.

Para exemplificar a definição de escala, podemos considerar que ao observarmos um tecido orgânico sob a óptica de um microscópio, estamos observando um conjunto de objetos pertencentes a uma escala de observação considerada microscópica. Quando, porém, observamos um conjunto de estrelas sob a óptica de um telescópio, estamos tratando de uma escala de observação considerada macroscópica. Embora o sensor utilizado em ambos os casos seja o mesmo (o olho humano), o simples fato de alterar o sistema óptico de coleta (microscópio e telescópio) e as distâncias envolvidas no processo de coleta faz com que a escala de observação seja alterada.

A resolução espacial se refere à menor área observada pelo sensor, definida pela projeção do FOV de seu sistema óptico sobre a superfície, o que pode ser compreendido como a menor dimensão da separação angular ou linear de dois objetos distinguíveis pelo sistema sensor. A resolução espectral expressa a capacidade dos detectores de um sistema sensor em discriminar a radiação em intervalos de comprimento de onda. A resolução radiométrica é definida pela quantização da radiância, que sensibiliza os detectores, em números digitais e, no caso de sensores imageadores, representa o brilho do pixel em escala de cinza. A resolução temporal, no caso de sensores orbitais, representa o intervalo de tempo em que o satélite revisita uma mesma área na superfície (JENSEN, 2009).

Em sensoriamento remoto, pode existir a necessidade de se transferir informações de uma escala a outra, principalmente devido à existência de diversos sensores com diferentes características.

Somado a isso, temos o fato de que a escala na qual são realizadas as medições é geralmente diferente daquela requerida pelos modelos (WU; LI, 2009).

Desta forma, fatores externos, como os ângulos de iluminação e de observação e a altura do sensor em relação à superfície, e fatores relacionados ao sistema sensor, como seu sistema óptico e resolução espacial, podem influenciar significativamente a aparência dos objetos. Para ilustrar a influência desses fatores, são representados esquematicamente na Figura 2.7 diferentes configurações de aquisição de dados destacando os objetos que podem ser discriminados em cada escala de observação.

Figura 2.7 – Aquisição de dados com uso de sensores remotos em diferentes escalas de observação.



Fonte: Gamon et al. (2006).

Na resolução espacial, em particular, os modelos e algoritmos são usualmente derivados de medições assumindo áreas homogêneas. Isso pode acarretar discrepâncias entre os resultados dos modelos e as fontes de dados, uma vez que os padrões espaciais são geralmente dependentes da escala, ou seja, da resolução espacial. Deste modo, os processos espaciais podem operar em escalas diferentes e, portanto, conclusões baseadas em uma escala podem não ser aplicáveis em outra. Este contraste de informação ou de características entre escalas é conhecido como efeito de mudança de escala (WU; LI, 2009).

As principais razões dos efeitos de mudança de escala, resumidamente, tem origem nos seguintes fatores: a) as limitações dos instrumentos de medida, que incorporam escala

própria de medições, podendo levar a diferentes conclusões de um processo ou fenômeno devido à amplitude de uma informação; b) a aplicabilidade dos modelos, cujos parâmetros devem ser reformulados, e não apenas ajustados, a fim de se adaptar às condições de uma nova escala adotada; c) a heterogeneidade da superfície observada, que pode ser causada tanto por mudanças de densidade quanto por contrastes na cobertura da superfície; e d) as características de linearidade ou não linearidade dos modelos, sendo que, modelos lineares podem provocar, em geral, menos efeitos do que os não lineares (WU; LI, 2009).

Com a intenção de identificar e tentar compreender a extensão dos efeitos de mudança de escala, vários métodos podem ser aplicados dependendo da natureza dos dados utilizados e tipo de fenômeno estudado (CAO; LAM, 1997; WU; LI, 2009). Na Figura 2.8 é apresentado um exemplo de como pode ser identificado o efeito de mudança de escala quando o comportamento dos dados é avaliado conforme a variação de escalas.





Fonte: Adaptado de Woodcock e Strahler (1987).

A Figura 2.9 representa um dos resultados obtidos por Woodcock e Strahler (1987), ao estudarem o efeito de mudança de escala através do método da variância local. Este método consiste em determinar a variância dos pixels de uma imagem em função de sua resolução espacial, a qual foi alterada por um método de degradação baseado na média dos pixels. A imagem, referente ao gráfico da Figura 2.8, foi obtida do sensor TM

(*Thematic Mapper*) e abrange uma área de floresta, conforme é apresentado na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Imagens da área florestal em resoluções espaciais de 0,75 m, 6 m e 24 m, obtidas pela reamostragem dos pixels de uma imagem do sensor TM.



Fonte: Woodcock e Strahler (1987).

Aplicando o mesmo método a imagens de outras áreas, referentes a outros tipos de cobertura/uso do solo, e comparando os resultados assim obtidos, Woodcock e Strahler (1987) puderam estabelecer uma relação entre o tamanho dos objetos que compunham a área e a resolução espacial em que ocorre maior variância dos pixels.

Dentro dessa perspectiva, pesquisas tem se desenvolvido atualmente buscando encontrar modelos que possam determinar os efeitos da mudança de escala sobre dados de sensores remotos. Para isso, geralmente são utilizados dados ou produtos de imagens de diversos sensores (TARNAVSKY et al., 2008; HUAGUO et al., 2005) ou ainda de um mesmo sensor, processadas em diferentes resoluções espaciais (WOODCOCK E STRAHLER, 1987; YAN et al., 2016).

2.6 Mudança de escala de observação

Diante do exposto, a possível influência da mudança de escala sobre dados de sensoriamento remoto é uma questão que deve ser levada em consideração, principalmente em metodologias que envolvam a comparação entre dados adquiridos em escalas de observação distintas como laboratório, campo, aeroembarcado e/ou orbital.

Dadas as dificuldades de se realizar medições em diferentes escalas de observação, como a variação gradual de um único parâmetro, alguns estudos se baseiam em metodologias que utilizam dados de sensores remotos com diferentes resoluções espaciais. No entanto, nesses casos, diferenças: a) no funcionamento dos equipamentos; b) nas condições de iluminação e visada; c) nas condições atmosféricas, entre outras, podem contribuir para o aumento das incertezas e comprometer a discriminação e a análise individual dos parâmetros mais influentes nos efeitos de mudança de escala.

Assim, uma maneira de se estudar a questão da resolução espacial, preservando outras variáveis, é realizar medições de uma mesma superfície utilizando um único sensor, porém com diversos FOV's. Essa condição pode ser obtida com o uso de limitadores de ângulos sólidos acoplados ao sistema óptico do sensor, conforme esquematizado na Figura 2.10.





Nessas perspectivas se fundamentou a escolha dos materiais e a definição dos métodos utilizados nesse trabalho, conforme descritos na Seção 3.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, foram realizadas medições radiométricas de objetos artificiais com o auxílio de um goniômetro disponível no LaRaC, a fim de possibilitar a aquisição de dados em diversas geometrias de iluminação e de observação, com o objetivo de caracterizar a BRDF de diferentes superfícies.

3.1 MATERIAIS

Para estudar as possíveis relações entre as mudanças de escala e a anisotropia de superfícies, foram adotadas neste trabalho três tipos de superfícies com diferentes estruturas, descritas na Seção 3.1.1. Foi realizada a caracterização da BRDF dessas superfícies por meio da determinação do FR espectral em várias geometrias de aquisição de dados, utilizando para isso sensores ASD FieldSpec (ASD, 1999) acoplados no goniômetro do LaRaC. Para se determinar o FR espectral das superfícies, foi utilizada uma placa de Spectralon da Labsphere (LABSPHERE, 2004). Sabe-se que as propriedades de reflectância da placa de Spectralon podem ser afetadas devido à exposição da radiação UV (MÖLLER et al., 2003). Contudo, como a placa utilizada neste trabalho foi manuseada previamente em poucas situações e apenas em laboratório, foi assumido que suas propriedades não foram significativamente alteradas desde sua calibração (em 2009). As descrições dos equipamentos utilizados são apresentadas nas Seções 3.1.3 e 3.1.2, respectivamente. Para simular a mudança de escala de observação, foram utilizados três ópticas de coleta da radiância das superfícies, com diferentes FOV's. Essas ópticas consistem na própria ponteira do sensor FieldSpec e em dois limitadores de ângulo sólido, estes últimos descritos na Seção 3.1.3.2.

3.1.1 Superfícies

Neste trabalho, definimos uma terminologia própria para os alvos de observação, a fim de evitar interpretações equivocadas. O termo "superfície" é usado para se referir à face superior dos alvos, enquanto o termo "objeto" se refere ao artefato como um todo.

A escolha dos objetos foi baseada em propriedades como a rugosidade da superfície observada, que é dependente da escala de observação (RAMACHANDRAN et al., 2010). Elas possuem origem no relevo da superfície, a qual é responsável pela produção de sombras em direções preferenciais, além de ser uma característica determinante no direcionamento dos feixes de radiação nos fenômenos de reflexão.

A influência da escala de observação foi analisada em estágios graduais de mudança de tipos de superfície: liso, com relevo regular e com relevo irregular. A variação das características dessas superfícies teve como objetivo identificar possíveis variações no fator de reflectância espectral e na anisotropia do fator de reflectância das superfícies em virtude de diferenças na rugosidade de uma superfície. Nesse sentido, foram utilizados como alvo três objetos com diferentes características. Os objetos possuem aproximadamente 30 cm de diâmetro, conforme os limites do suporte de amostras do goniômetro.

Devido à exposição prolongada à fonte luminosa, foi necessário adotar um material estável, capaz de proporcionar boa reprodutibilidade das medições. Desta forma, o gesso foi escolhido como material conveniente para tal fim, pois além de ser resistente às trocas de calor, apresenta maleabilidade que possibilita a confecção de diferentes formas de objetos. Deste modo, os objetos foram construídos sobre uma fôrma metálica, cada um com diferentes tipos de superfície: o primeiro, S1, com superfície lisa; o segundo, S2, com padrão regular de relevo, formado por fendas praticamente paralelas entre si. As dimensões das ranhuras na superfície são de aproximadamente 1,5 cm de espaçamento e 1,0 cm de profundidade e; o terceiro, S3, com relevo irregular, com fendas dispostas aleatoriamente, com ranhuras de diversas espessuras (de no máximo 2 cm) e profundidades (de no máximo 1 cm).

As dimensões de profundidade e espaçamento das ranhuras foram definidas de modo a corresponderem à ordem de grandeza da projeção dos FOV's sobre as superfícies dos objetos. Na Figura 3.1 são apresentados esses objetos e seus respectivos esquemas de cortes transversais, com destaque para as diferenças em suas superfícies.



Figura 3.1 – Objetos de gesso, com superfícies: a) S1 – lisa; b) S2 – regular e c) S3 – irregular.

(c)

A variação do tipo de superfície combinada ao uso de diferentes FOV's fez com que diferentes feições fossem discriminadas pelo sistema sensor. Essa variação representa, portanto, a mudança entre escalas de observação. Nesse sentido foram investigadas possíveis ocorrências de efeitos de mudança de escala sobre a caracterização da BRDF das três superfícies.

3.1.2 Goniômetro

O goniômetro do LaRaC (CASTRO et al., 2017), utilizado nesse trabalho, foi projetado para caracterizar a BRDF de superfícies em ambiente de laboratório. Este modelo é constituído basicamente por: a) Arco fonte: arco semicircular para sustentação e movimento (para estabelecer o ângulo zenital, θ_i , ver Figura 2.2) de uma fonte luminosa (lâmpada halógena em um iluminador); b) Arco Sensor: arco semicircular para sustentação e movimento (ângulo zenital, θ_r) de um espectrorradiômetro; c) Anel: anel circular para a sustentação e movimento do Arco fonte (para estabelecer, juntamente com o suporte das amostras, o ângulo azimutal, φ_i); e d) Suporte da Amostras: suporte giratório para a sustentação e movimento da superfície em estudo (e, consequentemente, estabelecer o ângulo azimutal, φ_r). Com isso o goniômetro possui quatro movimentos, realizados por meio da utilização de motores.

Devido às limitações referentes ao arranjo experimental e à estrutura do goniômetro, as combinações de ângulos foram definidas de modo a não descartar situações onde haja projeção de sombra sobre a superfície e obstrução de campo de visada por parte de qualquer equipamento e/ou da própria estrutura de arcos.

3.1.2.1 Especificações

Nesse goniômetro (ver Figura 2.4) o arco da fonte é fixado a um anel horizontal que permite movimento em ângulos azimutais. Ao centro do equipamento e ao mesmo nível do anel da fonte, se localiza um suporte rotatório sobre o qual são apoiados objetos que ficam distantes de 50 cm do sensor e 55 cm da fonte luminosa. A movimentação no equipamento é realizada por meio de motores de passo, que proporcionam boa precisão em seu posicionamento, favorecendo as condições de repetitividade e reprodutibilidade das medições. Além disso, ele possui um suporte para objetos com diâmetro de 30 cm e é capaz de rotacionar perfazendo um curso de 360°, além de possuir ajuste de altura de aproximadamente 10 cm, para o correto posicionamento dos objetos.

Para assegurar o correto posicionamento do goniômetro, o Anel, o Arco Fonte e o Arco Sensor possuem demarcações separadas a 15°, que podem ser utilizadas como referência durante o movimento automático, contando com o auxílio de *lasers* e sensores de luz usados para detectar tais demarcações, ou até mesmo para a movimentação manual do equipamento. Convém destacar que a geometria do equipamento não está limitada a medições apenas nestas marcações. As medições podem ser realizadas com intervalos angulares menores, ou maiores, a critério do experimentador. Entretanto a precisão do posicionamento nestas marcações adotadas é maior.

3.1.2.2 Automação e Controle

Considerando o número elevado de medições para uma análise da BRDF, o goniômetro conta com um sistema de controle computadorizado que envolve: todos os motores e seus respectivos movimentos; os sensores envolvidos (acelerômetros, temperatura umidade, fim de curso, etc.); e a aquisição de dados.

A configuração do sistema de automação e controle consiste de: um microcontrolador; motores e *drivers*; sensores; e plataforma (*software*) para controle das medições. Na Figura 3.2 é apresentado o diagrama esquemático deste sistema.



Figura 3.2 – Diagrama esquemático do sistema de Automação e Controle.

Fonte: Castro et al. (2017)

Na Figura 3.3 é apresentada a imagem da janela de configuração do *software* desenvolvido para a automação, controle das medições e aquisição de dados.

Figura 3.3 – Imagem da janela do *software* de controle do Goniômetro, desenvolvido na Plataforma LabVIEW.

12			movime	nto basico 10.vi Front Panel	×		- 🗆 🗙
File	Edit View Project Oper Check list Parametros	ate Tools Window pplication Font 💌 👯 Amostra Anel I	Help p* 편· 빨· 양· Fonte Sensor			• Search	
	Ang Inicial Sensor	Ang Final Sensor	Incremento Sensor	Numero de angulos do Sensor	Sensor	Por enquanto!!! Limitado a 15o Mov do sensor	
	Ang Inicial Fonte	Ang Final Fonte	Incremento Fonte	Numero de angulos da Fonte	Fonte	Mov da Fonte	
	Ang Inicial Anel	Ang Final Anel	Incremento Anel	Numero de angulos do Anel 24 Numero de angulos da Amostra	Anel	Mov do Anel	
	Problema	a com os limites		1		•	
	Estes parametr	os estao correto	ıs?	Sistema Habilitado	0	Medição Encerra	da 🚽
	Tempo estimad	do de Medicao ((min)	Numero da medicao	lumoro da modico es		
	Tempo estimad 0,066666	do de Medicao (h)	Realizado %	24		

Fonte: Castro et al. (2017)

O tempo entre uma medição e a seguinte é de aproximadamente 10 s, sendo: 5 s, em média, para a movimentação do arranjo; 2 s para a realização da medição de reflectância; outros 2 s para a medição de parâmetros ambientais e de posicionamento; e 1 s para a gravação dos dados. O número de medições necessárias para compor um ciclo completo envolvendo todas as geometrias na escala de 15° é de 20736, compreendendo: 24 posições do ângulo azimutal da Fonte; 24 posições do ângulo azimutal do Sensor; 6 posições do ângulo zenital da Fonte; 6 posições do ângulo zenital do sensor. Com isto, são necessárias aproximadamente 60 h de medição de dados radiométricos utilizados para modelar a BDRF de uma superfície.

3.1.3 Espectrorradiômetros

Nesse trabalho foram utilizados dois espectrorradiômetros FieldSpec da ASD (*Analytical Spectral Devices Inc.*), sendo um do modelo FieldSpec Pro e, o outro, do modelo FieldSpec 4. Os equipamentos operam na faixa de comprimentos de onda de 350 nm a 2500 nm do espectro eletromagnético, compreendendo, portanto, as regiões do ultravioleta (UV), visível (VIS), infravermelho próximo (VNIR) e do infravermelho

de ondas curtas (SWIR). Ambos apresentam as mesmas características de funcionamento, no que se refere à tecnologia e arquitetura de coleta, transporte, distribuição e detecção do feixe de REM.

Os espectrorradiômetros dessa linha de sistemas sensores consistem em um equipamento que utiliza um conjunto de 57 fibras ópticas, distribuídas aleatoriamente no momento de manufatura, para a coleta da radiação. Na Figura 3.4 são apresentados os principais constituintes do ASD FieldSpec Pro e ASD FieldSpec 4. Do total do conjunto de fibras, 3 subconjuntos de 19 fibras são responsáveis por conduzir a radiação a ser distribuída para 3 grades de difração distintas, pertencentes a cada um dos três radiômetros internos, de acordo com a faixa espectral em que atuam, sendo uma fixa e outras duas móveis.

Figura 3.4 – Esquema de funcionamento dos modelos ASD FieldSpec Pro e ASD FieldSpec 4 e seus principais constituintes.



Fonte: Adaptada de Arthur et al. (2012).

O radiômetro que atua na faixa de 350 nm a 1000 nm (UV/VIS/VNIR), é composto por uma grade de difração fixa e um *array* de fotodiodos, com 512 elementos, sendo que cada um registra a energia dentro de um intervalo de comprimento de onda de 1,4 nm (ASD,1999). Assim, a resolução espectral média na faixa espectral de operação é de 3 nm.

Os radiômetros que atuam nas faixas de 1000 nm a 1750 nm (SWIR1) e de 1750 nm a 2500 nm (SWIR2), com grade de difração móvel, possuem, cada um, detectores

fotodiodos InGaAs. O intervalo espectral de registro de ambos os radiôemtros é de 2 nm, sendo a resolução espectral média nessas regiões espectrais igual a 10 nm (ASD, 1999).

A aquisição de dados é realizada por meio de um *software* específico, que permite o registro dos dados no formato de número digital, radiância espectral e reflectância espectral. A conversão entre o número digital e a radiância espectral é realizada pelo próprio *software*, levando em consideração parâmetros espectrais de calibração armazenados no sistema, enquanto os espectros de reflectância podem ser obtidos ao acessar a função específica do *software* que fornece a razão entre os valores de radiância obtidos e o de referência no início das medições, respeitando a Equação 2.7.

3.1.3.1 FOV

Como cada fibra do sistema sensor possui seu próprio FOV e é distribuída aleatoriamente, cada radiômetro interno poderá receber a radiação proveniente de diferentes partes da superfície "observada" (Arthur et al., 2012). Como consequência, em casos de superfícies consideradas não uniformes, os dados dos radiômetros internos podem divergir entre si, por estarem relacionados a diferentes áreas da superfície.

O FOV nominal, fornecido pelo fabricante, se refere à soma do total de FOV's individuais de cada fibra. No entanto, devido à disposição aleatória das fibras, podem haver áreas de sobreposição de cada FOV individual de modo a diminuir a área efetiva do FOV nominal.

Em seus trabalhos, Arthur et al. (2007, 2012) avaliaram a área efetiva observada por dois espectrorradiômetros, entre eles, um sensor ASD FieldSpec Pro, utilizando para isso sistemas ópticos baseados em lentes (de 5° e 10°) e de abertura óptica limitada (18°, sem lentes). Adotando uma distância fixa à superfície observada, concluíram que, para os sistemas ópticos baseados em lentes, cada fibra recebe a radiação de diferentes áreas da superfície observada e transmite essa energia para o radiômetro correspondente (Arthur et al., 2012). Além disso, áreas com mais que 5% de sinal foram localizadas fora dos limites previamente determinados pelo FOV nominal. Já no caso do sistema de abertura óptica limitada, a área observada foi a que mais se aproximou daquela determinada pelo FOV nominal.

Arthur et al. (2012) também analisaram a resposta direcional dos dois espectrorradiômetros, concluindo que essas funções podem variar espacialmente de modo significativo.

Deste modo, esses resultados apontam para possíveis influências da óptica utilizada em medições de superfícies não homogêneas e não uniformes. Considerando a possibilidade de que diferentes sensores recebam a radiação proveniente de diferentes áreas da superfície, é possível ainda que ocorram divergências espectrais entre os resultados obtidos pelo simples fato de que o mensurando não é o mesmo.

3.1.3.2 Limitadores de ângulo sólido

Vale ressaltar que podem ser acoplados à ponteira do conjunto de fibras ópticas um conjunto de lentes, conhecido como limitador de ângulo sólido, com diferentes ângulos FOV's, que pode ser útil quando se pretende alterar o campo de visada do sistema sensor, de acordo com a aplicação de interesse. Nesse caso, o tipo de coleta da radiação é alterado, uma vez que o conjunto de lentes interage com a radiação incidente. Em virtude disso, é preciso selecionar no *software* do espectrorradiômetro qual o tipo de coleta a ser utilizado, para que o sistema selecione os parâmetros de calibração adequados.

Neste trabalho foram adotadas três diferentes ópticas de captação da radiação pelo sensor: uma definida pela própria ponteira (FOV = 25°) do FieldSpec e; outras duas compostas por limitadores de ângulo sólido fixados à ponteira, sendo um de 1° e outro de 8° de FOV. Na Figura 3.5 são apresentados exemplos desses acessórios.

Figura 3.5 – Limitadores de ângulo sólido, com FOV de 1° à esquerda e de 8° à direita.



Fonte: Produção do autor.

Na configuração adotada nos experimentos, com o sensor sempre apontado ao nadir, a uma altura fixa de 50 cm em relação à superfície, as estimativas das projeções dos FOV's de 1°, 8° e 25° (este último, correspondente à ausência de limitadores de ângulo sólido) sobre as superfícies possuem diâmetro de 0,9 cm, 7,0 cm e 22,0 cm, respectivamente. Entretanto, deve-se considerar também o efeito das lentes dos limitadores.

O cálculo dos diâmetros das áreas projetadas (*D*), considerando um feixe cônico de REM, foi realizado com base na Equação 3.1, respeitando as relações entre as grandezas geométricas envolvidas na aquisição de dados, conforme apresentado na Figura 3.6:

$$D = 2 \cdot h \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{3.1}$$

Em que α é o ângulo do FOV e *h* é a altura do sensor em relação à superfície.

Figura 3.6 – Parâmetros geométricos envolvidos na determinação do diâmetro (D) do FOV (α) projetado, de acordo com o raio do Arco sensor (r_s) .



Fonte: Produção do autor.

Com a utilização de diferentes ópticas, a radiância registrada pelo sensor correspondeu à radiância proveniente de diferentes porções das superfícies analisadas no experimento. Como efeito, as grandezas físicas associadas à radiância obtida com cada FOV foram associadas a diferentes escalas de observação.

3.2 MÉTODOS

A metodologia empregada é apresentada nas próximas Seções, que foram organizadas da seguinte forma: na Seção 3.2.1, são descritas algumas das medições exploratórias realizadas; o procedimento experimental foi detalhado na Seção 3.2.2, incluindo as etapas e as geometrias de aquisição de dados; o armazenamento e a organização dos dados, seguidos das descrições das análises estatísticas foram apresentadas nas Seções 3.2.3, 3.2.4 e 3.2.5, respectivamente.

Em todos os procedimentos de aquisições de dados, as medições foram obtidas em radiância espectral. Antes de se iniciarem as medições e logo após ligar os equipamentos, a corrente de fundo do espectrorradiômetro foi determinada (pela função "Opt", ou seja, *optmize*, do *software*) e considerada para que o *software* ajustasse o tempo de integração e os parâmetros de ganho dos detectores. Os dados de fator de

reflectância foram obtidos pelo uso da Equação 2.7 com os valores de radiância espectral das medições.

3.2.1 Medições exploratórias

Considerando que este trabalho utilizou pela primeira vez o goniômetro do LaRaC, alguns testes foram realizados a fim de avaliar o funcionamento de goniômetro e de cada equipamento envolvido no processo de aquisição de dados, necessário para caracterizar a BRDF das superfícies, servindo para estabelecer um procedimento experimental.

Durante o primeiro ciclo reduzido de medições, Teixeira Jr. et al. (2017) verificaram comportamento inesperado na curva de FR espectral da placa de Spetralon. Na Figura 3.7 são apresentadas as curvas obtidas no início e ao final do ciclo reduzido. Os valores de FR, tanto no início quanto no final, foram determinados com o uso da Equação 2.7, utilizando a medição inicial como referência, ou seja, o FR foi determinado pela razão entre a radiância final e a radiância inicial da placa de referência.





Como os equipamentos utilizados não haviam passado por um período de aquecimento, as diferenças entre as duas curvas foram atribuídas a possíveis alterações no

funcionamento da lâmpada e do sensor espectrorradiômetro (TEIXEIRA Jr. et al., 2017).

A fim de se investigar possíveis alterações no comportamento dos equipamentos devido ao longo período de funcionamento, foram realizados testes de aquecimento, em que foram realizadas medições de radiância espectral, L_{λ} , de uma placa de Spectralon.

3.2.1.1 Teste de aquecimento geral

No primeiro teste, denominado teste de aquecimento geral, a ponteira do espectrorradiômetro foi posicionada ao nadir e a fonte, em aproximadamente 30° em zênite e 90° em azimute, em relação ao sistema de coordenadas centrado na placa de Spectralon. Em seguida, tanto o espectrorradiômetro quanto a fonte de iluminação foram ligados e, depois de 30 minutos, tiveram início as medições. Foram obtidos espectros de radiância a cada 10 segundos durante aproximadamente 4 h.

Com o objetivo de se investigar qual equipamento pudesse sofrer mais alterações e, com isso, pudesse ser mais influente no comportamento dos dados, foram realizados testes de aquecimento "individuais". Nesses testes, tanto o aquecimento do espectrorradiômetro quanto o da lâmpada foram estudados separadamente, por meio da comparação entre os valores absolutos da radiância espectral em alguns comprimentos de onda, apresentados na Tabela 3.1, Seção 3.2.3.

3.2.1.2 Testes de aquecimento individuais

Para o teste do espectrorradiômetro, a lâmpada passou por um período de 1,5 h de aquecimento e, então, o espectrorradiômetro foi ligado e mantido em aquecimento por 0,5 h. Em seguida foram realizadas 1500 medições de radiância espectral, em intervalos de 10 segundos, totalizando cerca de 4,0 horas de medição. Analogamente, o procedimento inverso foi realizado para lâmpada.

As medições dos testes de aquecimento individuais foram feitas com o goniômetro em geometria de iluminação e de observação fixa, a saber: a) a fonte luminosa em 30° em zênite e 0° azimute e; b) placa de Spectralon (como alvo) em 0° em azimute. Além

disso, mesmo sendo descartada a dependência com algum parâmetro ambiental, eles foram monitorados durantes as medições.

A análise do comportamento da radiância espectral, ao longo do tempo de aquecimento, foi realizada comparando-se a variação relativa da radiância espectral em torno da média obtida em cada teste.

3.2.2 Medições Radiométricas

Para caracterizar a BRDF das superfícies, o experimento foi composto por medições de radiância espectral com o auxílio do goniômetro para determinação dos fatores de reflectância espectral. Para isso, foram adotados ciclos de medições para cada superfície e para cada tipo de óptica do sensor. A fim de diminuir incertezas relacionadas ao posicionamento do FOV projetado na superfície, o sensor foi mantido apontado sempre ao nadir. Um ciclo completo, conforme apresentado na Figura 3.8, constituía nas seguintes etapas:



Figura 3.8 – Sequência de movimentação do goniômetro do LaRaC.

Fonte: Adaptado de CASTRO et al. (2017)

- O sistema era calibrado em sua posição inicial: a) fonte, sensor e suporte de amostras em 0° em azimute; b) sensor em 0° em zênite e; c) fonte em 15° em zênite. A partir disso, o suporte de amostras realizava rotação em 360° em azimute, em passos de 15°, totalizando 24 posições. Era realizada uma medição de radiância espectral da superfície para cada posição. Ao fim desse processo, o suporte retornava à posição inicial.
- A fonte se posicionava no próximo ângulo em azimute, que variava de 0° a 345°, em passos de 15°. Para cada nova posição em azimute da fonte, a etapa (1) se repetia. Ao fim desse processo, a fonte retornava à posição inicial em azimute.
- 3. A fonte se posicionava no próximo ângulo em zênite, variando de 15° a 60° em passos de 15°. Para cada nova posição em zênite da fonte, as etapas (1) e (2) se repetiam. Ao fim do processo, o sistema retornava à posição inicial.

Por motivos operacionais, o ciclo completo foi dividido em ciclos menores, chamados de ciclos primários, que consistem na combinação das etapas 1 e 2.

Deste modo, foi possível realizar medições de FR espectral da placa de Spectralon no início (6 medições) e fim (6 medições) de cada ciclo primário. As médias dessas medições eram comparadas permitindo identificar e corrigir possíveis alterações no FR espectral da placa de referência registrada pelo sensor, no decorrer das medições das superfícies de interesse. Além disso, esse processo descarta a necessidade de se corrigir os efeitos de não simetria do feixe cônico de luz (SCHÖNERMARK et al., 2004). A correção foi feita por meio da interpolação linear da radiância da placa de referência, obtendo-se, assim, a radiância da placa que deveria ser obtida no momento de aquisição da radiância da superfície. A etapa 3 (posicionamento da fonte em zênite) foi realizada manualmente, utilizando-se para isso a fixação da fonte nas marcações do goniômetro, o que proporciona maior estabilidade ao conjunto e, portanto, maior reprodutibilidade das medições.

Com isto, cada ciclo primário envolvia: o aquecimento de 2,0 h dos equipamentos (espectrorradiômetro e lâmpada halógena); 6 medições de radiância espectral da placa de Spectralon; 576 medições de radiância espectral da superfície, em aproximadamente 1,5 h; 6 medições de radiância da placa de Spectralon. Desta maneira, cada ciclo primário, totalizava um intervalo de tempo de aproximadamente 4,0 h. Ao término do primeiro ciclo primário do dia, o ciclo posterior dispensava o período de aquecimento. Desta maneira, eram realizados em média 2 ciclos primários por dia.

Portanto, o ciclo completo envolvia em média 2 dias de medição, o que demandou cerca de 20 dias de medição para englobar as 3 superfícies e 4 ângulos zenitais da fonte, considerando que o ciclo completo foi repetido para cada óptica do sensor, seguindo a ordem de 25°, 8° e 1° de FOV.

3.2.3 Dados Radiométricos

Os dados de radiância espectral foram armazenados em um banco de dados em formato de texto, organizados por ciclo de medições e separados por superfície, seguido do ângulo de FOV utilizado. Deste conjunto de dados, foram selecionadas medições em alguns comprimentos de onda e em algumas faixas de comprimento de onda (bandas espectrais) de interesse, a fim de reduzir a dimensionalidade dos dados e facilitar a análise do comportamento da anisotropia do FR das superfícies. As bandas espectrais, apresentadas na Tabela 3.1, foram escolhidas com base (porém não equivalentes) nas do sensor OLI/Landsat8, por representarem regiões espectrais geralmente exploradas em trabalhos de aplicação das técnicas de sensoriamento remoto.

Banda Espectral (número)	Faixa de comprimento de onda (nm)	Comprimento de onda central (nm)
1	430 - 450	440
2	450 - 510	480
3	530 - 590	560
4	640 - 670	655
5	705 - 745	725
6	760 - 900	830
7	860 - 1.040	950
8	1.570 - 1.650	1.610
9	2.080 - 2.350	2.215

Tabela 3.1 - Bandas espectrais e seus respectivos comprimentos de onda centrais

A análise das incertezas das medições, conforme descrita na Seção 3.2.4 a seguir, levou em consideração os valores de radiância em banda, resultantes da integração da radiância espectral dentro de cada faixa de comprimentos de onda da Tabela 3.1. Dessa forma, os foram determinados fatores de reflectância em banda ($FR_{\Delta\lambda}$) correspondentes, conforme a Equação 3.2 a seguir:

$$FR_{\Delta\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,sup} \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,ref} \cdot d\lambda} \qquad , \quad (3.2)$$

em que λ_1 e λ_2 representam os comprimentos de onda inicial e final da banda espectral, respectivamente, e; $L_{\lambda,sup}$ e $L_{\lambda,ref}$ denotam as radiâncias espectrais da superfície e da placa de referência, respectivamente.

3.2.4 Análise Estatística– Incertezas

Como em todo procedimento de medições, fez-se necessário representar os resultados de forma coerente, ou seja, atribuindo-lhes o valor estimado da grandeza acompanhado de sua incerteza. A incerteza final da medição (σ_{final}) considera a influência de várias fontes de incerteza, podendo ser obtida após a avaliação do Tipo A (σ_A), baseada em parâmetros estatísticos, e do Tipo B (σ_A), feita por meios não estatísticos:

$$\sigma_{final} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sum (\sigma_B)^2}$$
(3.1)

, onde: $\sigma_A^2 e \sum (\sigma_B)^2$ denotam, respectivamente, a incerteza com avaliação do tipo A e a somatória quadrática de todas as incertezas com avaliação do Tipo B (ABNT; INMETRO, 2003).

A avaliação do tipo B das incertezas foi realizada pelo julgamento científico baseado em informações obtidas a partir de dados de medições anteriores, do conhecimento geral das propriedades dos materiais utilizados, dos instrumentos de medição, das especificações do fabricante e de dados provenientes de calibração.

A avaliação do tipo A das incertezas foi realizada por meio do estudo da repetitividade $(\sigma_{repetitividade})$ e da reprodutibilidade $(\sigma_{reprodutibilidade})$ das medições (MENDES; ROSÁRIO, 2005):

$$\sigma_{A} = \sqrt{\left(\sigma_{repetitividade}\right)^{2} + \left(\sigma_{reprodutibilidade}\right)^{2}}$$
(3.2)

Os procedimentos experimentais de cada teste foram descritos a seguir nas Seções 3.2.4.1 e 3.2.4.2. Em ambos, tanto a fonte (lâmpada halógena) quanto o espectrorradiômetro foram submetidos ao período de aquecimento de 2,0 h antes de se iniciarem as medições.

3.2.4.1 Teste de repetitividade

Os testes de repetitividade foram realizados variando o ângulo zenital da fonte, mantendo fixos o ângulo azimutal da fonte e o ângulo azimutal do suporte de amostras, com o sensor apontado sempre ao nadir. Deste modo, após o período de aquecimentos dos equipamentos, foram realizadas 30 medições consecutivas de radiância espectral de uma placa de Spectralon, em intervalos de 1,0 segundo, para cada geometria formada pela combinação do FOV e do ângulo zenital da fonte.

Com os valores de radiância espectral obtidos, foram determinados fatores de reflectância em banda da própria placa de Spectralon em relação à primeira medição.

O desvio padrão das medições do teste foi assumido como a incerteza da repetitividade $(\sigma_{repetitividade})$. O número de medições (30) está associado à facilidade das medições e ao fator de abrangência da distribuição de probabilidades T-Student para uma correção inferior a 2%, não sendo, portanto, necessária correção para obter um intervalo de confiança de 68%.

3.2.4.2 Testes de reprodutibilidade

Os testes de reprodutibilidade foram realizados para cada uma das três superfícies, variando-se o ângulo zenital de iluminação e mantendo fixos o ângulo azimutal de iluminação e o ângulo azimutal do suporte de amostras. O sensor foi mantido apontando sempre ao nadir.

Em cada ângulo zenital da fonte luminosa, variando de 15° a 60° em intervalos de 15°, foi medida a radiância de uma placa de referência de Spectralon. Desta forma, para se determinar o fator de reflectância em cada geometria, não foi preciso corrigir o efeito do ângulo zenital sobre a radiância incidente, cuja projeção sobre a superfície tende a adquirir um formato de elipse em decorrência do aumento do ângulo zenital. A sequência de procedimentos experimentais adotados para o teste de reprodutibilidade é representada na Figura 3.9 e descrita conforme segue:

- a) A partir do ângulo zenital de 15° da fonte luminosa, foram realizadas 6 medições de radiância da placa de Spectralon.
- b) Em seguida, um dos objetos foi posicionado no suporte de amostras e foram realizadas 10 medições de radiância de sua superfície. No início de cada uma dessas 10 medições, a geometria formada pelo suporte da amostra, pelo suporte da fonte luminosa e pelo anel foi alterada e restabelecida, com o objetivo de simular a reprodução do aparato experimental. O objeto também foi retirado e realocado no suporte, sempre na mesma posição angular. Para isso, foi utilizado um nível a laser que permitia alinhar uma marcação fixa no objeto com uma marcação fixa na mesa que sustenta o goniômetro.

c) Desta forma, o ângulo zenital da fonte foi alterado para a posição seguinte, em passos de 15° até o ângulo 60°. Em cada ângulo zenital da fonte, os procedimentos (b) e (c) foram repetidos.

Figura 3.9 – Procedimento experimental do teste de reprodutibilidade.



Apenas no caso do objeto com superfície regular, S2, a posição azimutal foi escolhida sob um critério, que consistiu em manter o alinhamento perpendicular entre as ranhuras da superfície e o plano da fonte de iluminação, conforme pode ser observado na Figura 3.10. Essa geometria foi utilizada como tentativa de garantir o correto posicionamento da superfície no suporte de amostras.




O número de medições (10) está relacionado à dificuldade da operação de retirar e de reposicionar os objetos. Deste modo, o desvio padrão obtido deve ser multiplicado por um fator de abrangência $\alpha = 1,06$ (ABNT, INMETRO, 2003), ou seja, correção de 6% para obter um intervalo de confiança de 68%. O desvio padrão dessas medições foi considerado a incerteza da reprodutibilidade ($\sigma_{reprodutibilidade}$).

3.2.5 Análise Estatística – Teste de Hipótese

Após esse procedimento e a partir da análise qualitativa inicial do comportamento dos dados de FR, foram selecionadas algumas geometrias de iluminação e observação para as quais havia maior variação de FR.

Desta forma, a avaliação de possíveis influências da variação de ângulos de FOV sobre os FR's foi realizada mediante aplicação do teste de correlação de Pearson (BEVINGTON; ROBINSON, 2003). Este teste possibilita medir o grau de associação linear entre duas variáveis aleatórias (assim como foi admitido para os dados). Assim, para cada ângulo azimutal da fonte, foram comparados, aos pares, os FR's obtidos com diferentes FOV's, de modo a totalizar 24 dados para cada FOV, correspondentes à etapa 1 do ciclo de medições (ver Seção 3.2.2). A estatística do teste foi realizada por meio do *software* estatístico "R" para cada superfície e banda espectral.

O coeficiente de correlação de Pearson, r_{XY} , é computado como sendo a razão entre a covariância (Cov(X, Y)) entre as duas variáveis e o produto de seus desvios-padrões, conforme a Equação 3.3:

$$r_{XY} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \qquad , \quad (3.3)$$

em que σ_X e σ_Y são os desvios padrões das grandezas *X* e *Y*, respectivamente, e a covariância Cov(X, Y) é dada pela Equação 3.4:

$$Cov(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})$$
, (3.4)

em que, para um número de medições n, X_i denota o valor observado para a variável X e Y_i denota o valor correspondente observado para a variável Y, sendo \overline{X} e \overline{Y} as médias de X e Y, respectivamente.

No caso de um conjunto de dados em que as variáveis pareadas alinham-se direta e perfeitamente, o valor de r_{XY} é igual a +1; caso não haja associação linear, o resultado será zero e; o valor igual a -1 corresponde à pares perfeitamente correlacionados, porém de modo inverso.

Por meio dessa estatística, aplicada aos pares de FOV's, é possível inferir se a mudança do FOV influencia o comportamento do FR de uma superfície. Caso não haja influência, espera-se obter coeficiente de correlação próximo de +1, o que indica que os dados são equivalentes independentemente do FOV utilizado. Por outro lado, quanto menor o resultado do coeficiente de correlação (incluindo os valores negativos), espera-se que maior seja a influência da mudança do FOV.

3.2.6 Lâmpada halógena

A fonte de iluminação adotada para as medições radiométricas neste trabalho foi uma lâmpada halógena de tungstênio com 50 W de potência. Assumindo que o emissor da lâmpada se comporte como um corpo negro à temperatura de aproximadamente 3000 K, seu espectro de emissão de radiação pode ser obtido pela lei de Planck (EISBERG; RESNICK, 1979), correspondendo ao gráfico da Figura 3.11.



Figura 3.11 – Espectro de emissão de radiância espectral de um corpo negro a 3000 K.

Os dados da Figura 3.11 pertencem à mesma faixa espectral de operação dos sensores FieldSpec. Pode-se perceber do gráfico, que a lâmpada emite pouca radiação na faixa de comprimentos correspondentes ao UV (entre 100 nm e 400 nm). Seu pico de emissão ocorre próximo ao comprimento de onda 1000 nm, atingindo aproximadamente $1,0\times10^6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$. Em 2500 nm, comprimento de onda final de operação do FieldSpec, a radiância emitida é de $2,1\times10^5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, o que corresponde a 21% do valor da radiância máxima.

4 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nesta Seção são apresentados os resultados obtidos das medições. São também discutidos os comportamentos das superfícies e os resultados dos testes estatísticos.

4.1.1 Medições exploratórias

Conforme mencionado na Secção 3.2.2, as medições com o goniômetro podem levar várias horas, assim alguns fatores podem alterar significativamente as medições radiométricas. Entre estes efeitos podemos citar o aquecimento dos equipamentos (lâmpada e espectrorradiômetro) e alterações nos parâmetros ambientais do Laboratório.

Para medir as eventuais alterações dos parâmetros ambientais do Laboratório foi utilizada: uma estação de monitoramento (RUBIATTI; CASTRO, 2017) de temperatura, umidade, pressão e intensidade luminosa; um monitor da qualidade de ar HD21AB17, da Delta OHM, que media a temperatura, umidade, pressão e a concentração de CO_2 e CO.

Adicionalmente, para verificar o efeito do aquecimento dos equipamentos nas medições radiométricas foram realizadas medições específicas.

4.1.2 Teste de aquecimento geral

Neste experimento os equipamentos foram ligados e, depois de 30 minutos, conforme recomendação dos fabricantes (ASD, 1999), foram iniciadas as medições. Foram realizadas medições da radiância espectral de uma placa de Spetralon a cada 10 s por 4 h conforme descrito na Seção 3.2.1.1. Os resultados do teste de aquecimento geral, referentes aos comprimentos de onda de 650 e 930 nm, podem ser observados na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Variações absolutas da radiância espectral nos comprimentos de onda de 650 nm e 930 nm, para aproximadamente 4,0 horas de medições (1500).



Por meio da Figura 4.1 observa-se um comportamento tendencioso até que a estabilidade fosse alcançada, após aproximadamente 2 h (0,5 h de aquecimento e 540 medições, totalizando 2h). Depois deste tempo os valores apresentaram um comportamento "aleatório" em torno de um valor médio. A variação da radiância, que depende do comprimento de onda, foi de 0,8% para 650 nm e de 2,5% para 930 nm.

Alguns parâmetros ambientais apresentaram variação sistemática, conforme apresentado na Figura 4.2. Esse comportamento pode estar relacionado ao funcionamento dos equipamentos de controle de temperatura e umidade do ar (ar-condicionado e desumidificador de ar) que operam de modo sistemático.



Figura 4.2 – Medições de parâmetros ambientais durante o as medições exploratórias.

Como não foi verificada correlação entre o comportamento dos parâmetros ambientais e o comportamento crescente da radiância espectral da placa de Spectralon, foi suposto que este último pudesse ter origem nas mudanças das propriedades dos detectores do espectrorradiômetro Fieldspec e/ou do filamento da lâmpada halógena (TEIXEIRA Jr. et al., 2017). Para tentar determinar qual o equipamento seria responsável por este comportamento, foram realizados experimentos individuais de aquecimento.

4.1.3 Testes de aquecimento individuais

Nestes experimentos, cujas metodologias são descritas na Seção 3.2.1.2, um dos equipamentos (lâmpada ou espectrorradiômetro) eram ligados e deixados por aquecer por pelo menos 1,5 h. Depois deste tempo, o segundo equipamento era ligado e deixado aquecer por 30 minutos. Em seguida eram iniciadas as medições, de radiância espectral da placa de Spectralon, a cada 30 segundos por 2 h.

Os resultados dos testes individuais são apresentados na Figura 4.3, para o comprimento de onda de 930 nm, um dos quais apresentou maior variação no teste de aquecimento global.

Figura 4.3 – Na curva em vermelho (FieldSpec), a lâmpada foi ligada e aquecida por mais de 1,5 h antes das medições. Na Curva em azul (Lâmpada), o espectrorradiômetro foi ligado e aquecido por mais de 1,5 h antes das medições.



Os gráficos da Figura 4.3 indicam que as alterações observadas nas curvas da radiância espectral estão mais relacionadas às alterações no funcionamento do espectrorradiômetro Fieldspec do que da lâmpada. Por exemplo, no comprimento de onda de 930 nm, a variação (aumento) absoluta da radiância no caso do Fieldspec foi de aproximadamente 1,7%, em relação ao valor médio, enquanto no caso da lâmpada, pode-se dizer que teve uma "dispersão" em torno de um valor médio.

Estes resultados mostraram que o aquecimento do espectrorradiômetro é o fator mais significativo na variação dos dados radiométricos, em determinados comprimentos de onda.

Com isso, os resultados das medições exploratórias permitiram assim estabelecer uma rotina padrão de aquecimento dos equipamentos, a qual compreende 2 h de aquecimento

do espectrorradiômetro e 0,5 h da lâmpada, antes que tenham início os ciclos de medições espectrorradiométricas (TEIXEIRA Jr. et al., 2017). Essa rotina teve como objetivo assegurar menores incertezas nas medições de longa duração, tais como as medições que compõem os ciclos de medições, adotados nesse trabalho, usados para caracterizar a BRDF das superfícies de gesso.

4.2 Espectro de reflectância espectral do gesso

Para as demais etapas do trabalho foi necessário realizar medições do FR espectral do gesso e analisar o seu comportamento espectral. Segundo Howari et al. (2002) o gesso é um mineral, composto principalmente por sulfato de cálcio hidratado, com a fórmula CaSO₄·2H₂O. Assim, segundo Zhao et al. (2015), o gesso apresenta três "bandas" consecutivas de absorção de água a 1449, 1490 e 1535 nm, uma banda característica de sulfato em 1750 nm e uma banda de absorção de água muito forte a 1950 nm.

Um exemplo do comportamento do FR da superfície lisa de gesso obtido neste trabalho é apresentado na Figura 4.4. Os dados foram obtidos na seguinte geometria: a) sensor apontado ao nadir; b) fonte posicionada a 0° em azimute e 15° em zênite; c) suporte de amostras em 0° em azimute.





Como pode ser observado, o gesso apresenta FR alto e aproximadamente constante no intervalo de 550 a 1150 nm, formando um patamar, a partir do qual a curva passa a apresentar comportamento decrescente, com algumas bandas de absorção, como as localizadas em torno de 1450-1550 nm, 1750 nm e de 1950 nm, conforme indicado por Zhao et al (2015).

4.3 Incertezas

As incertezas das medições foram obtidas por meio dos testes de repetitividade e de reprodutibilidade, os quais são descritos nas Seções 4.3.1 e 4.3.2, respectivamente, e apresentados a seguir.

4.3.1 Repetitividade

Os resultados obtidos para os testes de repetitividade com a placa de Spectralon são apresentados na Figura 4.5, em que constam os fatores de reflectância em banda ($FR_{\Delta\lambda}$) para cada faixa de comprimentos de onda da Tabela 3.1.

Figura 4.5 – Resultados do teste de repetitividade para a banda de 1 a 9 (de (a) a (g)). Os FR's em função do ângulo zenital (θ) de iluminação são separados em cores.



Ao observamos a Figura 4.5, é interessante ressaltar o comportamento de estreitamento do conjunto dos dados de *FR* ao longo das bandas. Este resultado indica que a superfície observada, neste caso, a superfície da placa de Spectralon, se comporta de maneira mais lambertiana em comprimentos de onda maiores, pois os FR's em diferentes ângulos zenitais tendem a se tornar mais próximos, como pode ser observado pela tendência de aproximação entre os pontos. Também podemos observar, que as bandas 3, 4, 5 e 6 têm comportamento muito semelhante.

As diferenças entre os valores máximos e mínimos de FR variam em torno de 0,07% a 0,36% em relação ao valor médio. A pequena variação é esperada, pelo fato de que as medições foram realizadas em curto intervalo de tempo, sob condições de iluminação e de observação praticamente idênticas.

As incertezas provavelmente estão associadas ao comportamento da relação sinal-ruído do FieldSpec, visto que a radiância incidente proveniente da lâmpada é maior na região espectral de comprimentos de onda próximos a 1000 nm, conforme apresentado na Figura 3.11. Somado a isso, tanto a radiância da placa de Spectralon quanto a radiância do gesso são maiores nesses comprimentos de onda e, consequentemente, o sinal recebido pelo sensor é maior, o que provoca menores incertezas nessa região espectral.

Foi avaliado se, devido às amplitudes das incertezas, podemos considerar o valor de *FR* constante em função do FOV, para um determinado ângulo de iluminação. Para isso, foi realizado o teste do Chi-Quadrado Reduzido, χ^2_{red} , para cada banda espectral. Valores de χ^2_{red} próximos da unidade indicam comportamento constante de *FR*. Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados para o teste do χ^2_{red} para cada banda espectral adotada neste trabalho.

Para os dados apresentados na Figura 4.5, os valores de χ^2_{red} mais próximos da unidade ocorreram para os ângulos de iluminação de 30° na faixa de 450 a 510 nm (banda 2) e de 45° graus nas faixas de 530 a 590 nm, 860 a 1.040 nm e 2.080 a 2.350 nm (bandas 3, 7 e 9). O valor máximo foi encontrado para o ângulo de 30° na faixa de 705 a 745 nm (banda 5) e, o valor mínimo, para o ângulo de 60° na faixa de 530 a 590 nm (banda 3).

Tabela 4.1 – Resultados do teste do Qui-Quadrado reduzido (χ^2_{red}) para o Teste de repetitividade. Os valores do χ^2_{red} e do nível de significância (valor-p) são distribuídos em função do ângulo de iluminação θ para cada banda espectral.

Banda	Ângulo	Fator de Reflectância			2	valor-p
Espectral	da fonte (θ)	FOV 1°	FOV 8°	FOV 25°	Xred	(%)
1	15	0,999	1,000	0,999	0,162	85,011
	30	1,000	1,000	1,001	0,246	78,154
	45	1,001	1,000	1,002	0,569	56,591
	60	1,002	1,001	1,002	0,029	97,144
2	15	0,999	1,000	0,999	2,439	8,728
	30	1,001	1,000	1,001	1,675	18,724
	45	1,001	1,001	1,001	0,015	98,518
	60	1,001	1,001	1,001	0,004	99,577
3	15	0,999	1,000	0,999	6,357	0,173
	30	1,001	1,000	1,001	9,802	0,006
	45	1,001	1,001	1,000	1,478	22,803
	60	1,001	1,001	1,001	0,001	99,927
	15	0,999	1,000	1,000	8,852	0,014
4	30	1,001	1,000	1,001	9,973	0,005
4	45	1,001	1,001	1,000	4,688	0,920
	60	1,001	1,000	1,000	0,183	83,299
5	15	0,999	1,000	1,000	9,899	0,005
	30	1,001	1,000	1,001	12,295	0,000
	45	1,001	1,001	1,000	10,308	0,003
	60	1,001	1,000	1,000	0,129	87,881
	15	0,999	1,000	1,000	9,634	0,007
6	30	1,001	1,000	1,000	7,959	0,035
0	45	1,001	1,001	1,000	7,367	0,063
	60	1,001	1,000	1,000	0,150	86,102
7	15	1,000	1,000	0,999	3,984	1,862
	30	1,001	1,000	1,000	2,709	6,663
	45	1,001	1,000	1,000	0,951	38,619
	60	1,000	1,000	1,000	0,296	74,367
8	15	0,999	1,000	1,000	6,434	0,161
	30	1,000	1,000	1,000	3,878	2,070
	45	1,000	1,000	1,000	6,498	0,151
	60	1,000	1,000	1,000	0,198	82,072
9	15	1,000	1,001	1,000	0,225	79,875
	30	1,000	1,000	1,000	0,056	94,508
	45	1,000	1,001	1,000	1,646	19,273
	60	1,001	1,000	1,000	0,521	59,368

Conforme se observa a Tabela 4.1, não é possível identificar um padrão de variação nos valores de χ^2_{red} tanto em função do ângulo de iluminação θ , quanto da banda espectral. A não ser pelo ângulo de 60° que mais frequentemente forneceu o menor Qui-quadrado, Portanto, não podemos, a princípio, considerar o fator de reflectância *FR* constante em função do FOV.

Foi também avaliada a homocedasticidade das variâncias dos dados obtidos no teste de repetitividade. Para isso, foi aplicado o teste de Bartlett (RIBOLDI et al., 2014) com nível de significância de 5% para a hipótese nula de que as variâncias são iguais para os diferentes FOV's. O valor-p obtido do teste de Bartlett foi maior que 5% para apenas 18 dos 36 casos. Assim, em 50% do total dos casos, principalmente para os menores ângulos zenitais da fonte (15° e 30°), o valor-p foi menor que 5%, o que indica que não há razões para aceitar a condição de mesma variância entre os *FR* de diferentes FOV's.

Tabela 4.2 – Resultados do teste de Bartlett para o Teste de repetitividade. Os valores do nível de significância (valor-p) são distribuídos em função do ângulo da fonte θ para cada banda espectral.

Banda	Ângulo da	Fat	$\mathbf{V}_{\mathbf{a}}$ and $\mathbf{r}_{\mathbf{a}}$			
Especral	fonte (0)	FOV 1°	FOV 8°	FOV 25°	valor-p (%)	
	15	0,999	1,000	0,999	17,87	
1	30	1,000	1,000	1,001	34,97	
	45	1,001	1,000	1,002	33,15	
	60	1,002	1,001	1,002	16,83	
2	15	0,999	1,000	0,999	0,00	
	30	1,001	1,000	1,001	2,15	
2	45	1,001	1,001	1,001	19,83	
	60	1,001	1,001	1,001	82,22	
	15	0,999	1,000	0,999	0,00	
2	30	1,001	1,000	1,001	0,46	
5	45	1,001	1,001	1,000	0,00	
	60	1,001	1,001	1,001	38,82	
	15	0,999	1,000	1,000	0,00	
4	30	1,001	1,000	1,001	0,40	
4	45	1,001	1,001	1,000	0,00	
	60	1,001	1,000	1,000	59,06	
	15	0,999	1,000	1,000	0,00	
5	30	1,001	1,000	1,000	0,42	
5	45	1,001	1,001	1,000	0,00	
	60	1,001	1,000	1,000	72,26	
	15	0,999	1,000	1,000	0,00	
6	30	1,001	1,000	1,000	0,69	
0	45	1,000	1,001	1,000	0,00	
	60	1,001	1,000	1,000	84,99	
7	15	1,000	1,000	0,999	0,00	
	30	1,001	1,000	1,000	16,52	
/	45	1,001	1,000	1,000	58,27	
	60	1,000	1,000	1,000	69,85	
	15	0,999	1,000	1,000	0,01	
0	30	1,000	1,000	1,000	2,20	
0	45	1,000	1,000	1,000	6,01	
	60	1,000	1,000	1,000	44,62	
	15	1,000	1,001	1,000	50,76	
0	30	1,000	1,000	1,000	71,87	
7	45	1,000	1,001	1,000	0,08	
	60	1,001	1,000	1,000	50,52	

4.3.2 Reprodutibilidade

Os resultados obtidos para os testes de reprodutibilidade, com as superfícies de gesso, para a faixa de comprimentos de onda de 450 a 510 nm (banda 2) são apresentados na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Fator de Reflectância (*FR*) em banda na faixa de comprimentos de onda de 450 a 510 nm (banda 2), em função do FOV, para cada ângulo zenital (θ) da fonte luminosa e para os objetos de superfície: a) lisa (S1), b) regular (S2) e c) irregular (S3).



A partir da Figura 4.6, podemos observar que a variação de *FR* em banda, de acordo com o FOV, não segue o mesmo padrão de variação para todos os ângulos zenitais da fonte.

Para a superfície lisa, S1, o valor de *FR* em banda se mantém pouco variável entre os diferentes ângulos zenitais (θ) da fonte. O mesmo não ocorre para a superfície regular, S2, cujos valores de FR apresentam maior variação em função do ângulo de iluminação θ e, ainda, não apresentam padrão definido de variação em função do FOV. Além disso, para superfície S2 verifica-se um efeito de sombreamento, identificado pelo

comportamento sistemático do FR que diminui com o aumento do ângulo zenital de iluminação. Para a superfície irregular, S3, não se observa padrão na variação de *FR* em banda conforme se varia o ângulo θ , porém, a variação em função do FOV se mostrou significativa quando o ângulo de 1° é comparado aos demais FOV's de 8° e 25°.

Também é possível verificar que, em geral, para um mesmo ângulo zenital da fonte, há maior semelhança entre os valores de *FR* em banda correspondentes aos FOV's de 8° e 25° .

Na Figura 4.7 são apresentados os valores absolutos dos desvios-padrão de FR em banda do teste de reprodutibilidade.



Figura 4.7 – Valores absolutos de desvio-padrão do *FR* na banda 1, para as superfícies: a) S1; b) S2; e c) S3

Para avaliar a homocedasticidade das variâncias, foi aplicado o teste de Bartlett, com nível de significância de 5% para a hipótese nula, a qual assume mesma variância entre os dados. Assim, para resultados que apresentaram valores superiores ao valor-p de 5%, não há razões para discordar que as variâncias são iguais. Dentre os 108 resultados obtidos, conforme apresentado na Tabela A.2 do Apêndice, apenas 24 apresentaram nível de significância maior que 5%, o que corresponde à aceitação da hipótese nula. Isto sugere que, como a maior parte dos resultados (84) indicam que as variâncias são diferentes de acordo com o FOV, os fatores de reflectância em banda apresentam, em

geral, diferentes dispersões em torno da média. Como a variância está relacionada à anisotropia do FR, os resultados indicam que esta pode ser dependente do FOV.

De forma semelhante ao teste de repetitividade, foi realizado o teste do Chi-Quadrado Reduzido para testar a hipótese nula de FR em banda constante em função do FOV, para cada superfície, banda espectral e ângulo de iluminação. Dessa forma, caso o valor obtido para o valor-p seja maior que 5%, aceita-se a hipótese de que a mudança do FOV não influencia o FR em banda, ou seja, a anisotropia do FR não é influenciada pela mudança da escala de observação. Na Tabela A.1 do Apêndice, são apresentados todos os valores encontrados para o χ^2_{red} e valor-p (nível de significância do teste).

De forma geral, os valores de χ^2_{red} foram pequenos em todas as bandas e ângulos de iluminação, o que indica aceitação da hipótese nula. Exceção ocorreu para a superfície S3, nos ângulos de 45° e de 60° nas bandas 1, 2, 3 e 4, em que foram observados valores mais altos de χ^2_{red} . Os valores altos de nível de significância podem ainda indicar que as incertezas foram subestimadas.

4.4 Anisotropia das superfícies

Considerando: a) o número de geometrias adotadas nas medições com o goniômetro (2304); b) os comprimentos de onda (2151) em que foram coletados os FR's; c) o número de superfícies (3); e d) os campos de visada (FOV's) (3) utilizados, torna-se inviável a análise do total de dados (maior que 44 milhões) neste trabalho. Por esse motivo, foram selecionadas algumas geometrias que possibilitassem representar o FR da superfície.

Os dados obtidos da superfície S1 na etapa 1 do ciclo completo de movimentação do goniômetro, descrito na Seção 3.2.2, são apresentados na Figura 4.8.





Cada curva apresentada na Figura 4.8, do total de 24, corresponde a uma posição do suporte de amostras, cuja movimentação resulta na variação do ângulo azimutal da fonte de iluminação, de modo equivalente à movimentação do anel na etapa 2, porém no sentido negativo do sistema de coordenadas fixo à mesa.

A proximidade entre as curvas indica que o FR espectral se manteve praticamente constante com a variação dos ângulos azimutal de iluminação. Para facilitar a análise do comportamento do FR em outros ângulos zenitais de iluminação, os dados podem ser visualizados de modo mais conveniente em espaços tridimensionais, como o que é apresentado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Comportamento do FR, em 830 nm, em função da geometria de iluminação e de observação. Os dados correspondem à superfície S1, obtidos com FOV de 1°.



Os dados da Figura 4.9 foram obtidos com FOV de 1° e se referem ao comprimento de onda de 830 nm. Comprimentos de onda para os quais o FR é alto são convenientes para análise por apresentarem maior relação sinal/ruído. As regiões centrais dos gráficos da Figura 4.9 foram interpoladas, pois são correspondentes ao nadir, posição em que não é possível a aquisição de dados devido ao alinhamento entre a fonte e o sensor. Esses dados foram obtidos da combinação das etapas 1 e 3. Essa combinação foi escolhida por facilitar a visualização dos dados ao evitar a ocorrência de sombras. Caso fossem utilizados os dados referentes à variação azimutal da fonte pela movimentação do anel (etapa 2), a ocorrência de sombras seria maior.

Como pode ser observado, o FR se manteve praticamente constante em função dos ângulos zenitais e azimutais de iluminação, o que caracteriza comportamento semelhante ao de uma superfície lambertiana. Este comportamento se manteve praticamente idêntico para os outros FOV's, de 8° e de 25°, e para os demais comprimentos de onda.

Por outro lado, para as superfícies S2 e S3, foram identificados comportamentos diferenciados. Os dados referentes à superfície S2, para o mesmo comprimento de onda de 830 nm, são apresentados na Figura 4.10.

1,0 FR 0,5 0,0 -60 60 40 -40 ^{ângulo} ≥enital da fonte angulo zenital da fonte 40 -40 60 -60 (a) 1,0 FR 0,5 0,0 -60 -40 -20 60 40 ^{ângul}o ≥enital da fonte angulo zenital da fonte 40 -40 60 -60 (b) 1,0 FR 0,5 0,0 -60 60 -40 40 angulo zenital da fonte ^{ângulo} ≥enital da fonte 40 -40 60 -60

Figura 4.10 – Comportamento do FR da superfície S2 em 830 nm, utilizando os FOV's de (a) 1°, (b) 8° e (c) 25°.

(c)

Diferentemente da superfície S1, o FR da superfície S2 apresentou variações em função dos ângulos de iluminação, tendendo a diminuir de acordo com o aumento do ângulo zenital, tanto no sentido positivo quanto negativo do sistema de coordenadas, e formando comportamento periódico em função do ângulo azimutal. Tal comportamento foi mais facilmente identificado nos gráficos da Figura 4.12 (b). Comportamento praticamente idêntico foi verificado para os demais comprimentos de onda. Este comportamento pode ser explicado pelo padrão geométrico das ranhuras na superfície da superfície S2. Quando as linhas das ranhuras estão dispostas perpendicularmente ao plano formado pela fonte e o pelo sensor, são formadas regiões de sombra mais intensas nos pontos mais baixos da superfície, interiores às ranhuras. Por outro lado, quando as linhas estão dispostas paralelamente a este mesmo plano, tanto os pontos mais altos quando os mais baixos são semelhantemente iluminados, não favorecendo formação de sombra. Essa variação de brilho e sombra ocorre, portanto, de maneira periódica, resultando o formato dos gráficos da Figura 4.10 e da Figura 4.12.

Para a superfície S3, o comportamento do FR em 830 nm pode ser visualizado na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Comportamento do FR da superfície S3 em 830 nm, utilizando os FOV's de (a) 1°, (b) 8° e (c) 25°.



Enquanto que para as superfícies S1 e S2 o comportamento do FR foi semelhante entre os FOV's, para a superfície S3, apenas os FOV's de 8° e 25° foi observado o mesmo padrão de variação do FR. Para o FOV de 1°, o aspecto do gráfico tridimensional indica um caráter anisotrópico do FR, com variações de maior amplitude, tendendo a aumentar com o aumento do ângulo zenital de iluminação em uma direção específica.

Para facilitar a visualização do comportamento do FR em função do ângulo azimutal de iluminação, foram selecionados dados em alguns comprimentos de onda, separados por superfície, ângulo zenital de iluminação e posição inicial do objeto no suporte, o que corresponde aos dados da etapa 1 do ciclo completo de medições. A movimentação do goniômetro nessa etapa, conforme esquematizado na Figura 3.8, cria diferentes

geometrias definidas pela posição relativa do conjunto fonte - superfície - sensor. Isto permite compreender, ainda que de modo restrito a apenas uma variação em ângulo azimutal, o comportamento da BRDF das superfícies sob determinado ângulo zenital de iluminação.

Na Figura 4.12 são apresentados os resultados no comprimento de onda de 655 nm para as três superfícies, obtidos com a fonte de iluminação fixa nos ângulos de 0° em azimute e de 30° em zênite e fazendo-se girar o suporte de amostras. Tais geometrias são livres de projeções de sombra, por parte dos componentes do goniômetro, sobre a superfície.



Figura 4.12 – Variação do FR em função da variação dos 24 ângulos azimutais de iluminação, para as superfícies: a) S1; b) S2 e; c) S3.

⁽b)



No caso da superfície S1, com superfície lisa, Figura 4.12 (a), os valores de FR se mantiveram praticamente constantes ao longo da variação azimutal independentemente do ângulo do FOV. Para a superfície S2, a variação periódica do FR em forma de onda, indicando regiões de sombra e brilho, surge como efeito do posicionamento relativo entre a direção formada pelas irregularidades da superfície e o plano formado pela fonte e o sensor. É interessante observar a proximidade entre as curvas correspondentes aos FOV's de 8° e 25°. A curva referente ao FOV de 1°, por outro lado, apesar de não ser próxima às anteriores, apresentou o mesmo formato, porém com amplitude diferente. As curvas da superfície S3, de relevo irregular, referentes aos FOV's de 8° e 25°, apresentaram novamente alta proximidade, além de se manterem aproximadamente constantes ao longo da variação azimutal, enquanto a curva referente ao FOV de 1° apresentou variações significativas.

De modo geral, pode-se verificar nas três superfícies que os valores correspondentes de FR entre FOV's de 8° e 25° foram iguais, considerando a incerteza das medições.

Os comportamentos dos FOV's em função da superfície podem ser justificados pelas porções de objetos observados na superfície, conforme é discutido adiante.

Considerando as dimensões das rugosidades de cada superfície, cada FOV pode abranger, de modo particular, diferentes tipos de objetos e, dependendo da interação destes com a radiação incidente, diferentes efeitos podem ser discriminados e então registrados pelo sensor.

No caso da superfície lisa, o comportamento das curvas é o mesmo para todos os FOV's, o que indica que a mudança de escala de observação não influencia a anisotropia da reflectância da superfície. Como as dimensões das imperfeições na superfície, tais como pequenos orifícios e saliências do gesso, são da ordem de milímetro, a textura observada é a mesma para todos os FOV's.

Conforme mencionado na Seção 3.1.1 as dimensões das ranhuras na superfície S2 são de aproximadamente 1,5 cm de espaçamento e 1,0 cm de profundidade. Desta forma, no caso do FOV de 1°, é possível que áreas de apenas um tipo de relevo (alto ou baixo) sejam privilegiadas, considerando a proporção entre as dimensões das estruturas superficiais e a projeção do FOV. Como efeito, dependendo do relevo observado em maior proporção, a variação da reflectância, ou seja, a anisotropia da área observada pode ser ou maior ou menor do que a anisotropia da superfície como um todo. Da Figura 4.12 (b), pode ser verificada maior variação na curva de 1° em relação às de 8° e de 25°, o que sugere que o FOV foi projetado preferencialmente sobre uma área de baixo relevo, mais propícia à formação de sombras mais intensas. Os FOV's de 8° e 25° abrangem os dois tipos de estruturas praticamente na mesma proporção, ou seja, na média, regiões de alto e de baixo relevo cobrem a mesma extensão dentro do FOV. Como resultado, as curvas referentes a esses FOV's se assemelham não somente em forma, mas também em amplitude.

Na superfície S3, as ranhuras não possuem padrão de arranjo, podendo haver deformações que variam desde a ordem de fração até a ordem de unidades de centímetro. Por esse motivo, a projeção do FOV de 1° pode privilegiar um tipo de relevo, a despeito de outros, de modo que a área observada não seja representativa de toda a superfície. Por esta razão, o comportamento diferenciado da curva de 1° em relação aos de 8° e 25° na Figura 4.12 (c) pode ser justificado ao se admitir que a

projeção do FOV de 1° possivelmente cobriu áreas cujo relevo favorece produção de sombra em uma direção preferencial. Por outro lado, os FOV's de 8° e 25° parecem ser suficientemente extensos para abranger maior diversidade de objetos, de modo que as áreas observadas através destes dois FOV's sejam semelhantes entre si, no que se refere à textura da superfície. Além disso, essa diversidade combinada à aleatoriedade do relevo da superfície não prioriza a formação de sombra em uma única direção. Com o sensor sempre ao nadir e com o ângulo zenital de iluminação fixo, a variação azimutal do suporte de amostras produz regiões de sombra sob proporção constante, o que pode justificar o comportamento das curvas de 8° e 25°.

De modo geral, as curvas de 8° e 25° se mantêm muito próximas, enquanto a curva de 1° se assemelha às demais apenas no caso da superfície S1. No caso da superfície S2, a curva de 1° mantém mesmo formato, variando apenas em amplitude, enquanto no caso da superfície S3 difere significativamente das demais curvas.

A correlação entre os dados das curvas da Figura 4.12 foi avaliada com base nos coeficientes de correlação de Pearson (*r*). Na Figura 4.13, são apresentados os gráficos que relacionam, aos pares, os dados da Figura 4.12.

4.5 Testes de correlação

O teste de correlação de Pearson foi aplicado aos dados em pares, ou seja, dos 9 comprimentos de onda selecionados, foram comparados, dois a dois, os FR's referentes a cada FOV. Os dados obtidos em regiões de sombra não foram incluídos.

Na Figura 4.13 são apresentados gráficos que relacionam alguns desses conjuntos de dados, obtidos para a superfície S3, como ângulo zenital de iluminação fixo em 30° em zênite.

Figura 4.13 – Correlação entre os FR obtidos com diferentes FOV's. Os dados foram comparados aos pares de FOV's: a) 1° e 8°; b) 1° e 25° e; c) 8° e 25°.



Os gráficos apresentados na Figura 4.13 relacionam os FR's no comprimento de onda de 655 nm obtidos com cada FOV e comparados entre si aos pares. Os 24 pontos marcados em cada gráfico correspondem aos 24 FR's obtidos na etapa 1 contida no ciclo completo de medições, a qual consiste em rotacionar o suporte de amostras em 360° em passos de 15°. Nesses casos, o anel da fonte estava fixo na posição inicial de 0° em azimute.

O coeficiente de correlação obtido para cada par de FOV indica que, quando comparamos os FR's obtidos com diferentes FOV's, aqueles obtidos com 8° e 25° são mais semelhantes entre si, o que entra em acordo com a análise dos gráficos da Figura 4.12.

Os resultados da aplicação do teste para os 9 comprimentos de onda selecionados nesse trabalho e para uma posição fixa do anel da fonte são apresentados na Figura 4.14.



Figura 4.14 – Variação do coeficiente de correlação em função dos comprimentos de onda centrais das 9 bandas espectrais, para cada combinação de FOV (1° e 8°, 1° e 25°, 8° e 25°) de acordo com a superfície observada (S1, S2 e S3).

Os resultados da Figura 4.14 foram obtidos com dados referentes à posição de 0° em azimute do anel da fonte de 0° do suporte de amostras. Como pode ser observado, a correlação entre os FOV's se mantém alta, em geral, para os ângulos zenitais de iluminação maiores que 15°.

Comparando-se os gráficos correspondentes a cada superfície, nota-se alta semelhança entre as superfícies S1 e S2, a não ser para o ângulo zenital de iluminação de 15°. Os valores altos de coeficiente de correlação indicam, para essas superfícies, que a mudança do FOV pouco influencia o comportamento da anisotropia de uma superfície. Essa análise entra em concordância com a análise prévia feita sobre os gráficos da Figura 4.12. Embora sejam obtidos FR's diferentes quando se altera o FOV do sensor, o comportamento anisotrópico do FR se mantém semelhante. Dessa forma, é esperado que seja possível realizar estimativas de FR de determinadas superfícies a partir de dados obtidos em diferentes escalas de observação. Para isso, técnicas comuns como a regressão linear simples poderiam ser utilizadas para se estimar o comportamento de uma superfície observada em outras condições de observação.

Os resultados obtidos para a superfície S3 foram diferentes das demais superfícies. Os coeficientes de correlação se mostraram baixos quando comparados os pares de FOV's 1° x 8° e 1° x 25° . Além disso, conforme se aumenta o ângulo de iluminação, o valor do coeficiente de correlação tende a diminuir para todas bandas, menos para a banda 9, chegando a tornar-se negativo, em algumas bandas, nos ângulos de 45° e 60° .

Por outro lado, o par de FOV's 8° x 25° demonstrou alta correlação no caso da superfície S3, exceto nos comprimentos de onda menores, de 440 nm e 480 nm (bandas 1 e 2, respectivamente). Atentando-se para esse par de FOV's, nota-se que a correlação se manteve alta para qualquer uma das 3 superfícies, em praticamente todos os comprimentos de onda e ângulos zenitais de iluminação.

Além disso, não se observou padrão na variação do coeficiente de correlação em função do comprimento de onda. No entanto, os comprimentos de onda entre 480 nm (banda 2) e 950 nm (banda 7) se mostraram, em geral, mais semelhantes entre si.

A análise do teste de correlação indicou que as influências da variação do FOV no comportamento anisotrópico do FR podem depender do tipo de superfície observada e, ainda, podem variar espectralmente.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, de acordo com as etapas que o compõem, as conclusões podem ser divididas em duas partes. Primeiro, em relação às medições exploratórias realizadas com o goniômetro do LaRaC, com o objetivo de avaliar seu funcionamento e; segundo, em relação à caracterização da BRDF de três superfícies artificiais, quando observadas por meio de diferentes FOV's de um sensor espectrorradiômetro.

Da primeira etapa, os resultados dos testes de aquecimento serviram de base para definir as diretrizes que foram adotadas na metodologia da segunda etapa. Foi verificado que os equipamentos envolvidos no processo de aquisição de dados deveriam ser submetidos a um período de aquecimento para evitar maiores incertezas em medições radiométricas de longa duração. Dessa forma, foi estabelecido um período de 2 h de aquecimento para o sensor ASD FieldSpec e de 0,5 h para a lâmpada halógena, antes de se iniciarem as medições necessárias para se estimar a BRDF das superfícies, realizadas na segunda etapa. Também foi verificado que as pequenas variações dos parâmetros ambientais não influenciam as medições. A análise das incertezas obtidas dos testes de repetitividade e de reprodutibilidade apontaram que as incertezas podem depender de fatores como as características espectrais da fonte de radiação e o tipo de superfície observada.

Em relação à segunda etapa, este trabalho permitiu identificar mudanças no comportamento do fator de reflectância de três diferentes superfícies de mesmo material, quando esta foi observada por meio de diferentes ópticas de um mesmo sistema sensor. A utilização de diferentes FOV's empregados nesta metodologia foi associada à mudança na escala de observação, ao simular a aquisição de dados em diferentes níveis de coleta.

Dependendo das características das superfícies observadas, tais como a textura, a mudança na escala de observação teve efeitos diferentes sobre a caracterização da BRDF. Os resultados indicaram que, conforme a dimensão do IFOV do sensor se aproximou das dimensões das estruturas da superfície, a BRDF começou a sofrer

alterações. Deste modo, não podemos assumir que a BRDF se propaga de modo invariante para todos os níveis de aquisição de dados, sem antes considerar as dimensões relativas entre: as características do sistema sensor, a superfície observada e as distâncias envolvidas neste processo.

Como sugestão, trabalhos futuros podem explorar os efeitos da mudança da escala de observação sobre a caracterização da BRDF de modo mais gradativo. Como exemplo, seria interessante estudar o comportamento da BRDF variando-se, em pequenas quantidades, a distância entre o sensor e as superfícies, ou ainda, comparando-se dados obtidos de sensores operando em diferentes níveis de aquisição, como laboratório, campo, aeroembarcado e orbital. Em estudos de recursos naturais, a metodologia utilizada neste trabalho poderia ser utilizada, por exemplo, em dados de coberturas de vegetação, para verificar os possíveis efeitos de escala em dosséis com diferentes estruturas. Outra possível aplicação seria no tratamento de dados de calibração de sensores aeroembarcados e orbitais, visto que a maior parte das metodologias que envolvem essa prática não leva em consideração os impactos do fator de escala.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES, INC (ASD). **Technical guide**. 3. ed. Boulder, Colorado, USA: Analytical Spectral Devices, 1999. 140 p. 7, 38, 39, 131,132, 133

ARTHUR, A. A. M.; MACLELLAN, C.; MALTHUS, T. J. The implications of nonuniformity in fields-of-view of commonly used field spectroradiometers. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, IGARSS 2007, 2007, Barcelona. **Proceedings...** Piscataway, NJ.: IEEE International, 2007. p. 2890-2893.

ARTHUR, A. M.; MACLELLAN, C. J.; MALTHUS, T. The fields of view and directional response functions of two field spectroradiometers. **Geoscience and Remote Sensing**, IEEE Transactions on, v. 50, n. 10, p. 3892-3907, out. 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) / INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA (INMETRO). **Guia para a expressão da incerteza de medição**: terceira edição brasileira. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO, 2003. 120 p.

BARNES, W. L.; PAGANO, T. S.; SALOMONSON, V. V. Prelaunch characteristics of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1088-1100, 1998.

BEVINGTON, P. R.; ROBINSON, D. K. **Data reduction and error analysis:** for the physical sciences. 3. ed. New York, USA: McGraw-Hill Higher Education, 2003. 320p.

BILIOURIS, D.; VERSTRAETEN, W. W.; DUTRÉ, P.; VAN AARDT, J. A.; MUYS, B.; COPPIN, P. A. Compact laboratory spectro-goniometer (CLabSpeG) to assess the BRDF of materials. Presentation, calibration and implementation on Fagus sylvatica L. leaves. **Sensors**, v. 7, n. 9, p. 1846-1870, 2007.

CAO, C.Y.; LAM, N. Understanding the scale and resolution effects in remote sensing and GIS. In: QUATTROCHI, D.A. GOODCHILD, M.F. Scale in remote sensing and GIS. Boca Raton: Lewis Publishers, 1997. cap. 3, p. 57-72.

CASTRO, R. M.; TEIXEIRA Jr, J. F.; ANDRADE, L L; RUBIATTI, H. T.; MELO, M C; MARINHO, R. S.; LAURIA, P. B.; BUARQUE, B. N. M. C.; Silva, M. M.; MARQUES, K. C. M.; GARAGORRY, A. B.; BARROS, E. A.; SILVA, B. A. Goniômetro para medições de BRDF e emissividade de materiais de interesse em SR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., 2017, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <https://proceedings.galoa.com.br/sbsr/trabalhos/goniometro-para-medicoes-de-brdf-eemissividade-de-materiais-de-interesse-em-sr>. Acesso em: 10 jul. 2017.

DANGEL, S.; VERSTRAETE, M. M.; SCHOPFER, J., KNEUBÜHLER, M.; SCHAEPMAN, M.; ITTEN, K. I. Toward a direct comparison of field and laboratory goniometer measurements. **Geoscience and Remote Sensing**, IEEE Transactions on, v. 43, n. 11, p. 2666-2675, 2005. DI GIROLAMO, L. Generalizing the definition of the bi-directional reflectance distribution function. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, n. 4, p. 479-482, 2003.

DINGUIRARD, M; SLATER, P. N. Calibration of space-multispectral imaging sensors: A review. **Remote Sensing of Environment**, v. 68, n. 3, p. 194-205, 1999.

EISBERG, R.; RESNICK, R. Física quântica. Rio de Janeiro: Campus, RJ, 1979. Cap. 11.

GAMON, J. A.; RAHMAN, A. F.; DUNGAN, J. L.; SCHILDHAUER, M.; HUEMMRICH, K. F. Spectral Network (SpecNet) – What is it and why do we need it?. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 3, p. 227-235, 2006.

GOODCHILD, M.F.; QUATTROCHI, D. A. Introduction: Scale, Multiscaling, Remote Sensing, and GIS. In: QUATTROCHI, D.A. GOODCHILD, M.F. (eds.). Scale in remote sensing and GIS. Boca Raton: Lewis Publishers, 1997. cap. 1, p. 1-12.

HOWARI, F. M.; GOODELL, P. C.; MIYAMOTO, S. Spectral properties of salt crusts formed on saline soils. **Journal of environmental quality**, v. 31, n. 5, p. 1453-1461, 2002.

HUAGUO, Z; DONGLIN, L.; WEIGEN, H. Scale characteristics of remote sensing information: a case of shoreline. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2005. IGARSS'05. **Proceedings...** 2005. IEEE International. IEEE, 2005. p. 5383-5385.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente:** uma perspectiva em recursos terrestres. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

KOECHLER, C.; HOSGOOD, B.; ANDREOLI, G.; SCHMUCK, G.; VERDEBOUT, J.; PEGORARO, A.; HILL, J.; MEHL, W.; ROBERTS, D.; SMITH, M. The European optical goniometric facility: Technical description and first experiments on spectral unmixing. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, IGARSS'94: SURFACE AND ATMOSPHERIC REMOTE SENSING: TECHNOLOGIES, DATA ANALYSIS AND INTERPRETATION, 1994, Pasadena, CA. **Proceedings...** International. IEEE, 1994. p. 2375-2377.

LABSPHERE INC. Calibration certicate. Sutton, New Hampshire, USA: Labsphere. Report Number: 42345-2-1, 2004. xvi, 44, 45

LABSPHERE INC. **Reflectance Materials and Coatings:** Technical Guide. Sutton, New Hampshire, USA: Labsphere, 2017. Disponível em: <http://www.labsphere.com/uploads/technical-guides/a-guide-to-reflectance-materialsand-coatings.pdf. Acesso em: 10 Out. 2017.

LIANG, S.; STRAHLER, A. H.; BARNSLEY, M. J.; BOREL, C. C.; GERSTL, S. A. W.; DINER, D. J.; PRATA, A. J.; WALTHALL, C. L. Multiangle remote sensing: Past, present and future. **Remote Sensing Reviews**, v. 18, n. 2-4, p. 83-102, 2000.
MARTONCHIK, J. V.; BRUEGGE, C. J.; STRAHLER, A. H. A review of reflectance nomenclature used in remote sensing. **Remote Sensing Reviews**, v. 19, n. 1-4, p. 9-20, 2000.

MENDES, A.; ROSÁRIO, P. P. **Metrologia e incerteza de medição**. São Paulo, SP: Editora EPSE, 2005. 128 p. 30, 31, 32, 56

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; ROSA, A. N. C. S.; SANO, E. E.; SOUSA, B. S.; BAPTISTA, G. M. M.; BRITES, R. S. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2012. 276p. Disponível em: http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>. Acesso em: 20 ago. 2017.

MILTON, E. J. Review article principles of field spectroscopy. **Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p. 1807-1827, 1987.

MILTON, E. J., SCHAEPMAN, M. E., ANDERSON, K., KNEUBÜHLE, M., FOX, N. Progress in field spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v.113, n. 1, p. 92-109, 2009.

MÖLLER, W.; NIKOLAUS, K. P.; HÖPE, A. Degradation of the diffuse reflectance of spectralon under low-level irradiation. **Metrologia**, v. 40, n. 1, p. S212-S215, 2003.

MÜLLER, C.; HOSGOOD, B.; ANDREOLI, G. Sensitivity analysis and quality assessment of laboratory BRDF data. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, n. 2, p. 176-191, 1998.

NICODEMUS, F. E., RICHMOND, J. C.; HSIA, J. J.; GINSBERG, I. W.; LIMPERIS, T. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. Washington, DC: National Bureau of Standards, US Department of Commerce, 1977. 52 p. (MBS Monograph, 160)

PEGRUM, H. M.; FOX, N.; MILTON, E.; CHAPMAN, M. Development of the GonioRadiometric Spectrometer System to conduct multi-angular measurements of terrestrial surfaces. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHYSICAL MEASUREMENTS IN REMOTE SENSING (ISPMSRS'07), 10., 2007, Davos, Switzerland. **Proceedings...** ISPRS, 2007. v. 36. n. 7.

PINTO, C. T. Avaliação das incertezas na caracterização de superfícies de referência para calibração absoluta de sensores eletroópticos. 2011. 135 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2011.

RAMACHANDRAN, B; JUSTICE, C. O.; ABRAMS, M. J. (Eds.). Land remote sensing and global environmental change: NASA's Earth observing system and the science of ASTER and MODIS. Springer Science & Business Media, 2010. Remote Sensing and Digital Image Processing Series.

RIBOLDI, J.; BARBIAN, M. H.; KOLOWSKI, A. B. S.: SELAU, L. P. R.; TORMAN, V. B. L. Precisão e poder de testes de homocedasticidade paramétricos e nãoparamétricos avaliados por simulação. **Revista Brasileira de Biomedicina**, v. 32, n. 3, p. 334-344, 2014.

ROMÁN, M. O.; GATEBE, C. K.; SCHAAF, C. B.; POUDYAL, R.; WANG, Z.; KING, M. D. Variability in surface BRDF at different spatial scales (30m–500m) over a mixed agricultural landscape as retrieved from airborne and satellite spectral measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 9, p. 2184-2203, 2011.

ROUJEAN, J. L.; LEROY, M.; DESCHAMPS, P. Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 97, n. D18, p. 20455-20468, 1992.

RUBIATTI H. T.; CASTRO, R. M. Desenvolvimento de sistema para a determinação de parâmetros ambientais. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS,(VI SCTI), 6., 2017, São José dos Campos. **Anais...** Disponível em: http://www.ieav.cta.br/eventos/scti/2017/wp-content/uploads/2017/07/Anais_VI_SCTI_2017.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2017

SANDMEIER S.; MÜLLER, C.; HOSGOOD, B.; ANDREOLI, G.Physical mechanisms in hyperspectral BRDF data of grass and watercress. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, n. 2, p. 222-233, 1998.

SANDMEIER, S. R.; ITTEN, K. I. A field goniometer system (FIGOS) for acquisition of hyperspectral BRDF data. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, v. 37, n. 2, p. 978-986, 1999.

SCHAEPMAN-STRUB, G.; SCHAEPMAN, M. E.; PAINTER, T. H.; DANGEL, S.; MARTONCHIK, J. V. Reflectance quantities in optical remote sensing – Definitions and case studies. **Remote sensing of environment**, v. 103, n. 1, p. 27-42, 2006.

SCHÖNERMARK, M.; GEIGER, B.; RÖSER, H.P. **Reflection properties of vegetation and soil with a BRDF data base.** Berlin: Wissenschaft und TechnikVerlag: 2004. 352p.

SERROT, G.; BODILIS, M.; BRIOTTET, X.; COSNEFROY, H. Presentation of a new BRDF measurement device. In: ATMOSPHERIC PROPAGATION, ADAPTIVE SYSTEMS, AND LIDAR TECHNIQUES FOR REMOTE SENSING II, 1998, Barcelona. **Proceedings...** Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 1998. p. 34-40.

SNYDER, C. Definition and invariance properties of structured surface BRDF. **Geoscience and Remote Sensing**, IEEE Transactions on, v. 40, n. 5, p. 1032-1037, 2002.

TAO S.; GUO Q.; WU F.; LI L.; WANG S.; TANG Z.; XUE B.; LIU J.; FANG J. Spatial scale and pattern dependences of aboveground biomass estimation from satellite

images: a case study of the Sierra National Forest, California. Landscape ecology, v. 31, n. 8, p. 1711-1723, 2016.

TARNAVSKY, E.; GARRIGUES, S.; BROWN, M. E. Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT-VGT, and MODIS global NDVI products. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 2, p. 535-549, 2008.

TEIXEIRA JR. J. F.; CASTO, R. M.; PONZONI F. J. Testes de aquecimento de equipamentos utilizados para medições radiométricas em laboratório. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., 2017, Santos. Anais... São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <

https://proceedings.galoa.com.br/sbsr/trabalhos/testes-de-aquecimento-deequipamentos-utilizados-para-medicoes-radiometricas-em-laboratorio>. Acesso em: 10 jul. 2017.

WALTHALL, C.; ROUJEAN, J.; MORISETTE, J. Field and landscape BRDF optical wavelength measurements: Experience, techniques and the future. **Remote Sensing Reviews**, v. 18, n. 2-4, p. 503-531, 2000.

WOODCOCK, C. E.; STRAHLER, A. H. The factor of scale in remote sensing. **Remote sensing of Environment**, v. 21, n. 3, p. 311-332, 1987.

WU, H; LI, Z. L. Scale issues in remote sensing: A review on analysis, processing and modeling. **Sensors**, v. 9, n. 3, p. 1768-1793, mar. 2009.

YAN, G.; HU, R.; WANG, Y.; REN, H.; SONG, W.; QI, J.; CHEN, L. Scale effect in indirect measurement of leaf area index. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 54, n. 6, p. 3475-3484, 2016.

ZHAO, H.; ZHANG, L.; ZHANG, X.; LIU, J.; WU, T.; WANG, S. Hyperspectral feature extraction based on the reference spectral background removal method. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 6, p. 2832-2844, 2015.

APÊNDICE A

		-		-		-	
Suparfício	Banda	ângulo da	Fator	de Reflec	ctância	··2	valor $\mathbf{n}(0/0)$
Superficie	espectral	fonte (°)	FOV 1°	FOV 8°	FOV 25°	Xred	valor-p (70)
		15	0.86	0.86	0.87	2.66	7.03
	1	30	0.85	0.85	0.85	0.06	93.71
	1	45	0.87	0.87	0.88	2.02	13.26
		60	0.85	0.88	0.87	1.84	15.86
		15	0.88	0.88	0.88	3.12	4.40
	2	30	0.87	0.87	0.87	0.16	85.37
	Z	45	0.88	0.88	0.89	1.23	29.09
		60	0.86	0.89	0.88	1.84	15.87
		15	0.90	0.90	0.90	3.85	2.12
	2	30	0.89	0.89	0.89	0.27	76.60
	5	45	0.90	0.90	0.91	1.03	35.55
		60	0.88	0.90	0.89	1.89	15.10
		15	0.91	0.91	0.91	4.84	0.79
		30	0.90	0.90	0.90	0.43	65.04
	4	45	0.91	0.91	0.92	1.03	35.69
		60	0.89	0.91	0.90	1.97	13.90
	5	15	0.91	0.91	0.92	5.49	0.41
1		30	0.90	0.90	0.91	0.60	54.93
1		45	0.92	0.91	0.92	1.01	36.37
		60	0.90	0.91	0.91	1.99	13.68
		15	0.91	0.91	0.92	6.52	0.15
	6	30	0.91	0.91	0.91	0.83	43.79
	0	45	0.92	0.92	0.92	1.07	34.28
		60	0.90	0.92	0.91	2.03	13.08
		15	0.91	0.91	0.92	7.29	0.07
	7	30	0.90	0.91	0.91	0.86	42.24
	/	45	0.92	0.91	0.92	1.82	16.12
		60	0.90	0.91	0.91	2.08	12.51
		15	0.84	0.84	0.85	12.83	0.00
	0	30	0.83	0.84	0.84	2.03	13.11
	0	45	0.85	0.84	0.85	3.57	2.82
		60	0.83	0.84	0.84	2.47	8.48
		15	0.66	0.67	0.67	37.66	0.00
	0	30	0.66	0.66	0.67	7.03	0.09
	9	45	0.67	0.67	0.68	0.49	61.38
		60	0.66	0.68	0.67	6.76	0.12

Tabela A.1 – Teste Chi-quadrado para o teste de reprodutibilidade

	Randa	ângulo da	Fator	Fator de Reflectância			_	
Superfície	espectral	fonte (°)	FOV 1°	FOV 8°	FOV 25°	χ^2_{red}	valor-p (%)	
	F	15	0.89	0.91	0.89	0.90	40.61	
		30	0.83	0.86	0.86	14.96	0.00	
	1	45	0.76	0.81	0.82	60.57	0.00	
		60	0.75	0.75	0.76	0.90	40.52	
		15	0.91	0.92	0.91	0.96	38.27	
	2	30	0.85	0.87	0.88	15.29	0.00	
	2	45	0.78	0.83	0.83	79.61	0.00	
		60	0.76	0.76	0.78	0.91	40.16	
		15	0.93	0.94	0.93	0.87	41.84	
	2	30	0.87	0.89	0.90	18.12	0.00	
	5	45	0.80	0.85	0.85	77.37	0.00	
		60	0.78	0.78	0.79	0.86	42.27	
		15	0.94	0.95	0.94	1.29	27.62	
	4	30	0.88	0.90	0.91	19.09	0.00	
		45	0.81	0.86	0.86	38.28	0.00	
		60	0.79	0.79	0.80	0.85	42.73	
	5	15	0.94	0.96	0.95	1.94	14.39	
2		30	0.89	0.91	0.91	18.82	0.00	
2		45	0.82	0.86	0.86	37.03	0.00	
		60	0.80	0.80	0.81	0.81	44.58	
		15	0.95	0.96	0.95	2.00	13.56	
	6	30	0.89	0.91	0.92	18.13	0.00	
		45	0.83	0.86	0.87	41.51	0.00	
		60	0.80	0.80	0.81	0.80	45.15	
		15	0.94	0.96	0.95	1.80	16.47	
	7	30	0.89	0.91	0.92	19.75	0.00	
	,	45	0.82	0.86	0.86	46.01	0.00	
		60	0.80	0.80	0.81	0.91	40.44	
		15	0.86	0.86	0.86	0.59	55.36	
	8	30	0.81	0.82	0.83	19.16	0.00	
	Ū	45	0.75	0.77	0.78	13.67	0.00	
		60	0.71	0.72	0.73	1.45	23.57	
		15	0.65	0.65	0.65	2.35	9.55	
	9	30	0.61	0.61	0.62	17.25	0.00	
	,	45	0.56	0.58	0.58	8.60	0.02	
		60	0.52	0.53	0.54	2.96	5.19	

Tabela A.1 – Teste Chi-quadrado para o teste de reprodutibilidade (cont).

	Banda	ângulo da	Fator	· de Reflec	rtância	2		
Superfície	espectral	fonte (°)	FOV 1°	FOV 8°	FOV 25°	χred	valor-p (%)	
		15	0.92	0.87	0.88	36.68	0.00	
		30	0.87	0.86	0.88	0.74	47.50	
	1	45	0.92	0.85	0.86	42.64	0.00	
		60	0.92	0.84	0.85	23.60	0.00	
		15	0.93	0.89	0.89	39.66	0.00	
	2	30	0.89	0.88	0.89	1.19	30.56	
	Z	45	0.94	0.86	0.87	54.34	0.00	
		60	0.95	0.85	0.87	41.35	0.00	
		15	0.95	0.91	0.91	37.86	0.00	
	3	30	0.92	0.90	0.91	2.33	9.77	
	5	45	0.97	0.88	0.89	81.20	0.00	
		60	1.00	0.87	0.89	79.92	0.00	
		15	0.96	0.92	0.92	34.25	0.00	
	4	30	0.93	0.91	0.92	3.83	2.18	
		45	0.98	0.89	0.90	103.56	0.00	
		60	1.03	0.89	0.90	107.42	0.00	
	5	15	0.96	0.92	0.93	31.39	0.00	
3		30	0.94	0.91	0.92	5.02	0.66	
5		45	0.99	0.90	0.90	116.32	0.00	
		60	1.04	0.89	0.90	123.67	0.00	
	6	15	0.96	0.92	0.93	26.62	0.00	
		30	0.95	0.92	0.92	6.44	0.16	
		45	0.99	0.90	0.91	135.88	0.00	
		60	1.05	0.90	0.91	139.47	0.00	
		15	0.95	0.92	0.93	20.35	0.00	
	7	30	0.95	0.91	0.92	9.06	0.01	
	,	45	0.99	0.90	0.91	144.79	0.00	
		60	1.04	0.90	0.91	144.71	0.00	
		15	0.86	0.84	0.85	10.41	0.00	
	8	30	0.86	0.83	0.84	15.38	0.00	
	0	45	0.90	0.82	0.83	130.37	0.00	
		60	0.94	0.82	0.83	143.50	0.00	
		15	0.66	0.65	0.65	9.71	0.01	
	9	30	0.66	0.64	0.64	12.47	0.00	
	7	45	0.69	0.63	0.63	169.40	0.00	
		60	0.72	0.63	0.63	198.09	0.00	

Tabela A.1 – Teste Chi-quadrado para o teste de reprodutibilidade (cont).

C 6	banda	ângulo da	Fato	ator de Reflectância		1.	valor-p
Superficie		fonte	FOV 1°	FOV 8°	FOV 25°	K	(%)
		15	0.914087	0.91455	0.919013	3.390742	18.35
	1	30	0.90815	0.907532	0.909081	8.660391	1.32
	1	45	0.919185	0.917311	0.924939	5.661406	5.9
		60	0.907405	0.923335	0.915755	19.99098	0
		15	0.922596	0.922716	0.927039	5.825642	5.43
	2	30	0.916847	0.915982	0.918279	6.054052	4.85
	2	45	0.927435	0.925218	0.93195	3.957218	13.83
		ângulo da fonte 15 30 45 60 15 30 45 60 15 30 45 60 15 30 45 60 15 30 45 60 15 30 45 60 15 30 45 60 15 30 45 60 15 30 45 60 15 30 45 60 15 30 45 60 15 30 45 60	0.915557	0.930071	0.922893	19.50316	0.01
		15	0.934376	0.934438	0.938613	7.952008	1.88
	2	30	0.928998	0.928127	0.930781	4.826553	8.95
	5	45	0.939266	0.936358	0.942022	3.593356	16.58
		60	0.926645	0.939559	0.933381	18.38881	0.01
		15	0.940833	0.941094	0.945025	9.671126	0.79
	4	30	0.935811	0.93522	0.938072	3.562976	16.84
	4	45	0.945709	0.942397	0.947349	3.963803	13.78
		60	0.932892	0.9445	0.939149	17.71171	0.01
	5	15	0.943577	0.943934	0.947735	10.60638	0.5
1		30	0.938656	0.938351	0.941314	2.720097	25.66
1		45	0.948407	0.944943	0.949451	4.129345	12.69
		60	0.935559	0.946331	0.941453	17.38509	0.02
		15	0.946041	0.946475	0.950169	11.8385	0.27
	6	30	0.94132	0.941334	0.944379	2.05929	35.71
	6	45	0.95097	0.947237	0.951336	4.71912	9.45
		60	0.938016	0.947842	0.943612	16.39212	0.03
		15	0.945257	0.946297	0.949463	13.57799	0.11
	7	30	0.940609	0.941153	0.943881	1.6647	43.5
	/	45	0.950207	0.945747	0.95033	7.317088	2.58
		60	0.937105	0.945995	0.942382	14.63514	0.07
		15	0.899849	0.902924	0.905509	14.62247	0.07
	o	30	0.896805	0.899169	0.901915	1.248485	53.57
	0	45	0.906729	0.902705	0.907963	14.17808	0.08
		60	0.896201	0.90265	0.901133	8.817054	1.22
		15	0.787511	0.792086	0.794646	18.71023	0.01
	0	30	0.785422	0.788255	0.792952	0.320362	85.2
	9	45	0.794859	0.79478	0.797694	6.109113	4.71
		60	0.79033	0.797503	0.796691	8.018117	1.82

Tabela A.2 – Teste de Bartlett para a reprodutibilidade

Superficie	banda	ângulo da	Fato	or de Reflectâ	ncia	ŀ	valor-p
Superficie		fonte	FOV 1°	FOV 8°	FOV 25°	K	(%)
		15	0.932583	0.942272	0.933271	13.07691	0.14
	1	30	0.894911	0.91144	0.915012	0.725345	69.58
	1	45	0.852191	0.882577	0.886147	19.91913	0
		60	0.842793	0.842305	0.851004	10.41367	0.55
		15	0.942421	0.952184	0.943074	11.94144	0.26
	2	30	0.903892	0.920389	0.924261	1.817896	40.29
	2	45	0.860919	0.892029	0.894654	22.22952	0
		60	0.851208	0.851002	0.859704	16.30359	0.03
		15	0.956115	0.965012	0.957023	9.960661	0.69
	3	30	0.916831	0.933703	0.937458	3.064784	21.6
	5	45	0.875092	0.904933	0.906873	22.02875	0
		60	0.863826	0.86336	0.871787	19.31598	0.01
		15	0.961934	0.970939	0.964177	10.52097	0.52
	4	30	0.924839	0.940292	0.944016	3.224969	19.94
		45	0.883719	0.911148	0.912613	15.8171	0.04
		60	0.870273	0.869599	0.87775	18.47944	0.01
	5	15	0.963573	0.972992	0.967098	10.5954	0.5
2		30	0.928201	0.942871	0.946533	4.609821	9.98
2		45	0.887642	0.913497	0.914748	15.97299	0.03
		60	0.873161	0.872106	0.879891	16.79947	0.02
	6	15	0.965653	0.974477	0.969516	9.295256	0.96
		30	0.931579	0.94501	0.948641	5.944729	5.12
	0	45	0.892175	0.915489	0.916366	18.17429	0.01
		60	0.876183	0.874362	0.881923	13.85119	0.1
		15	0.964112	0.972069	0.968229	7.827725	2
	7	30	0.929721	0.942822	0.946894	6.737073	3.44
	,	45	0.889798	0.912289	0.914351	14.31846	0.08
		60	0.872237	0.872463	0.880799	14.07123	0.09
		15	0.912438	0.915173	0.915061	3.138754	20.82
	0	30	0.88053	0.887912	0.893532	12.4575	0.2
	0	45	0.84104	0.858469	0.861791	6.997869	3.02
		60	0.819319	0.822844	0.831633	6.196448	4.51
		15	0.780406	0.781332	0.784321	1.82885	40.07
	0	30	0.756974	0.759052	0.763768	9.919786	0.7
	9	45	0.725611	0.734428	0.73701	13.28611	0.13
		60	0.703081	0.70657	0.713622	1.379745	50.16

Tabela A.2 – Teste de Bartlett para a reprodutibilidade (cont).

S	handa	ângulo da	Fato	or de Reflectâ	ncia	l.	valor-p
Superficie	Danda	fonte	FOV 1°	FOV 8°	FOV 25°	К	(%)
		15	0.951982	0.920812	0.924323	62.5579	0
	1	30	0.919982	0.915397	0.922148	7.37694	2.5
	1	45	0.950107	0.904803	0.910214	24.09015	0
		60	0.947516	0.899018	0.908532	24.4405	0
		15	0.95872	0.929295	0.933065	62.82482	0
	2	30	0.931879	0.924059	0.930733	8.265168	1.6
	2	45	0.963461	0.913937	0.918739	27.62569	0
		60	0.969663	0.908479	0.917797	23.31705	0
		15	0.968189	0.940695	0.944467	58.11567	0
	2	30	0.948334	0.935676	0.941841	9.984989	0.68
	3	45	0.980466	0.926177	0.930443	34.35828	0
		60	0.999624	0.921721	0.929885	24.42783	0
		15	0.972339	0.947208	0.95084	53.81969	0
	4	30	0.95887	0.94237	0.948005	11.74638	0.28
	4	45	0.989296	0.9334	0.937152	41.83189	0
		60	1.016451	0.929885	0.937061	28.57667	0
	5	15	0.97372	0.950128	0.953657	51.54	0
2		30	0.964001	0.945394	0.950669	13.19453	0.14
3		45	0.99312	0.936829	0.940268	46.32844	0
		60	1.024317	0.933954	0.940284	33.33663	0
	6	15	0.974045	0.952255	0.95569	49.00013	0
		30	0.968099	0.947631	0.952604	15.89598	0.04
		45	0.995808	0.939482	0.942662	50.9624	0
		60	1.029775	0.937325	0.943032	38.7595	0
		15	0.970633	0.950618	0.954041	44.14378	0
	7	30	0.9675	0.945977	0.951164	19.16735	0.01
	/	45	0.993045	0.937649	0.941043	53.7918	0
		60	1.02712	0.936483	0.942484	42.36906	0
		15	0.915021	0.901256	0.903801	24.85387	0
		30	0.915498	0.895985	0.900834	22.77999	0
	8	45	0.93603	0.888587	0.891654	48.33657	0
		60	0.963928	0.88984	0.893661	38.14082	0
		15	0.789119	0.779386	0.780823	20.37761	0
	0	30	0.789955	0.773242	0.77531	17.00146	0.02
	9	45	0.805547	0.767313	0.766692	47.08769	0
		60	0.827814	0.767474	0.76733	43.1148	0

Tabela A.2 – Teste de Bartlett para a reprodutibilidade (cont).