

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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/04.28.16.57-TDI

ANÁLISE DE REFLECTÂNCIA DE DOSSÉIS DE EUCALYPTUS SP. UTILIZANDO O MODELO 4SAIL E DADOS ORBITAIS

José Guilherme Fronza

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Flávio Jorge Ponzoni, e Guerric Le Maire, aprovada em 10 de abril de 2017.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NQ5M92>

> 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/2017/04.28.16.57-TDI

ANÁLISE DE REFLECTÂNCIA DE DOSSÉIS DE EUCALYPTUS SP. UTILIZANDO O MODELO 4SAIL E DADOS ORBITAIS

José Guilherme Fronza

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Flávio Jorge Ponzoni, e Guerric Le Maire, aprovada em 10 de abril de 2017.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NQ5M92>

> INPE São José dos Campos 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Fronza, José Guilherme.

F928a Análise de reflectância de dosséis de eucalyptus SP. utilizando o modelo 4sail e dados orbitais / José Guilherme Fronza. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xviii + 85 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/04.28.16.57-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017. Orientadores : Drs. Flávio Jorge Ponzoni, e Guerric Le Maire.

1. SAIL. 2. Eucalipto. 3. Modelagem direta. 4. Modelo de transferência radiativa. 5. Worldview-3. I.Título.

CDU 528.8:582.776



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): José Guilherme Fronza "ANÁLISE DE REFLECTÂNCIA DE DOSSÉIS DE EUCALYPTUS SP. UTILIZANDO MODELO 4SAIL E DADOS ORBITAIS".

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

Sensoriamento Remoto

Dra. Elisabete Caria Moraes

82.4

Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Flávio Jorge Ponzoni

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. **Guerric Le Maire**

Dr.

Orientador(a) / Cirad / Montpellier - FR

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro

Yann Nouvellon

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

Convidado(a) / Cirad / Montpellier - FR

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

) unanimidado

"Tanto em luta quanto na vida cotidiana, esforce-se para permanecer calmo. Aborde a situação sem ficar tenso, porém sempre alerta, e com o espírito apaziguado e imparcial. Mesmo que o espírito esteja calmo, não deixe o corpo relaxar: mas quando o corpo estiver relaxado, não amoleça o espírito. Não deixe o espírito ser influenciado pelo corpo ou vice-versa. Controle os ânimos: não se permita extremos. Tanto em êxtase quanto na profunda tristeza, o espírito enfraquece. Evite os extremos."

SHINMEN MIYAMOTO MUSASHI

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente com o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador Dr. Flávio Jorge Ponzoni pelos ensinamentos, parceria, paciência e conversas que tivemos durante estes dois anos. À Dra. Elisabete Caria Moraes por todo o apoio, suporte e acolhimento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro. Ao projeto EUCFLUX, cujos dados foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus sete grandes amigos que me acompanham faz muito tempo e que considero minha família: Tchaionny, Cássio Lisboa, Gustavo Ramos, Luiz Carlos, Claus Lange, Gabriel Fiorelli e Felipe Becker.

Agradeço também aos Felipe Smozinski e Paulo Vitor Ferreira da Silva pela amizade e irmandade ao longo dos anos.

A meus pais de coração Ilsili e Fritz por me acompanharem e me acolherem como um filho durante esse tempo todo. Agradeço também aos grandes amigos que fiz aqui: Filipe Temporim, Anderson Reis, Jean Farhat, Danielle Goltz, David Guimarães, Sacha Siani, Ercília, Sandra e Cristiane.

E por fim gostaria de agradecer a uma pessoa em especial pelo carinho, amizade, lealdade, parceria e por ter me iluminado com tanto amor. Muito obrigado Joice.

vii

RESUMO

Os modelos de transferência radiativa aplicados ao estudo da vegetação auxiliam no entendimento do processo de interceptação e de interação da radiação eletromagnética com dosséis vegetais levando em conta suas características biofísicas e bioquímicas. Eles fornecem conexão lógica entre os parâmetros biofísicos da vegetação e as suas propriedades espectrais (GOEL, 1988). Este trabalho fundamentou-se na utilização da versão 4SAIL do modelo SAIL - Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves para simular espectros de reflectância de superfície de plantios de Eucalipto situados nas proximidades da Estação Experimental de Itatinga/SP. Estes dados foram posteriormente comparados com dados radiométricos extraídos de imagem orbital Worldview-3 que teve seus números digitais convertidos para valores de reflectância de superfície adquiridos sobre os mesmos plantios de eucalipto.. Em termos absolutos, valores de reflectância dos dosséis simulados pelo modelo não apresentaram boa aderência com aqueles extraídos das imagens WorldView 3. As melhores correlações entre as duas séries de dados foram obtidas para a região do infravermelho próximo.

Palavras-chave: SAIL. Eucalipto. Modelagem direta. Modelo de transferência radiativa. Worldview-3.

EUCALYPTUS SP. CANOPY REFLECTANCE ANALYSIS USING THE MODEL 4SAIL AND ORBITAL DATA

ABSTRACT

Physical models based on the radiative transfer theory applied to vegetation studies have helped the understanding of the electromagnetic radiation and vegetation canopies interaction process taking into account their biophysical and biochemical characteristics. They provide a logical link between the biophysical parameters of the vegetation and their respective spectral properties (GOEL, 1988). A SAIL (Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves) model version called 4SAIL was applied to calculate reflectance spectra from Eucalyptus plantations located near the Estação Experimental of Itatinga/SP, Brazil. The 4SAIL simulated canopy reflectance values were compared to the reflectance values extracted from WorldView-3 orbital images...In absolute terms canopy reflectance values simulated from the 4SAIL model did not presented satisfactory adherence with those reflectância values extracted from the WorldView 3 images. The best correlations between the two data sets were observed in the NIR spectral region.

Keywords: 4SAIL. Forward modelling. Radiative Transfer Model. Worldview-3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Fluxograma das etapas metodológicas do trabalho15
Figura 3.2. Localização da área de estudo no estado de São Paulo/Brasil 17
Figura 3.3. Distribuição espacial dos conjuntos de parcelas na área
experimental plotada em imagem de satélite WorldView-3 adquirida sobre a
área de estudo 18
Figura 3.4. Espectros de reflectância obtidos com o Contact Probe da
serrapilheira do clone 3 22
Figura 3.5. Exemplo de espectros de entrada no modelo 4SAIL (reflectância e
transmitância de folhas e reflectância de serapilheira)25
Figura 3.6. Função filtro para as bandas utilizadas neste trabalho para simular a
reflectância das folhas isoladas para as bandas do Worldview-3
Figura 4.1. Espectros de reflectância de folha do Clone 3 em diferentes níveis
de copa: superior, intermediário e inferior
Figura 4.2. Resultados das simulações com diferentes valores de IAF para o
nível de copa superior
Figura 4.3. Resultados das simulações com diferentes valores de IAF para o
nível de copa intermediário43
Figura 4.4. Resultados das simulações com diferentes valores de IAF para o
nível de copa inferior
Figura 4.5. Resultados das simulações com diferentes valores de DAF para o
nível de copa superior43
Figura 4.6. Resultados das simulações com diferentes valores de DAF para o
nível de copa intermediário44
Figura 4.7. Resultados das simulações com diferentes valores de DAF para o
nível de copa inferior
Figura 4.8. Espectros dos objetos terrestres extraídos da imagem com os
efeitos atmosféricos corrigidos53

Figura 4.9. Espectros com a média aritmética das repetições, extraídos dos
dados orbitais62
Figura 4.10. Gráfico boxplot da reflectância dos clones para as bandas do
visível utilizadas neste estudo50
Figura 4.11. Gráfico boxplot da reflectância dos clones para as bandas do
infravermelho próximo utilizadas neste estudo51
Figura 4.12. Espectros de reflectância gerados pelo modelo 4SAIL, extraídos
dos dados orbitais e das folhas para o clone 7 considerando os três níveis de
copa
Figura 4.13. Espectros de reflectância gerados pelo modelo 4SAIL, extraídos
dos dados orbitais e das folhas para o clone 11 considerando os três níveis de
copa
Figura 4.14. Espectros de reflectância gerados pelo modelo 4SAIL, extraídos
dos dados orbitais e das folhas para o clone 14 considerando os três níveis de
copa
Figura 4.15. Gráficos de correlação para as bandas do visível nos três níveis de
copa avaliados
Figura 4.16. Gráficos de correlação para as bandas do infravermelho próximo
nos três níveis de copa avaliados

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Parâmetros de entrada necessários para executar o modelo 4SAIL
no modo direto
Tabela 3.1. Parâmetros dinâmicos utilizados para realizar a avaliação de suas
influências na reflectância de superfície gerada pelo modelo 4SAIL
Tabela 3.2. Valores de IAF e DAF dos clones para inserção no modelo 4SAIL
Tabela 3.3. Geometria de iluminação e observação informada para o modelo
4SAIL
Tabela 3.4. Valores inseridos no módulo SENSOR do ARTMO para as bandas
de interesse do WV-3 em nanômetros 277
Tabela 4.1. Tabela com os resultados de correlação para os dados simulados
pelo 4SAIL e os dados orbitais extraídos de imagem do WorldView-3 61

SUMÁRIO

<u>Pág</u>.

1	INTRODUÇÃO1				
1.1.	Hipótese de estudo 3				
1.2.	Objetivo geral4				
1.3.	Objetivos específicos 5				
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA5				
2.1.	Modelos fundamentados na teoria da transferência radiativa5				
2.2.	O modelo 4SAIL				
2.3.	Caracterização estrutural para modelos de reflectância de dosséis 11				
3	MATERIAL E MÉTODOS 15				
3.1.	Caracterização da área de estudo e definição das parcelas amostrais 16				
3.2.	Obtenção dos dados de campo 19				
3.3.	Análise de sensibilidade do modelo 4SAIL aos parâmetros IAF e DAF nas				
simu	lações de reflectância 22				
3.4.	Aplicação do modelo 4SAIL				
3.5.	Dados orbitais				
3.6.	Análise visual e estatística dos resultados32				
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO				
4.1.	Resultados da avaliação de sensibilidade de IAF e DAF sobre a				
reflee	ctância bidirecional com simulações no 4SAIL				
4.1.1	. Índice de área foliar				
4.1.2	2. Distribuição angular de folhas 42				
4.2.	Dados orbitais				
4.3.	Análise visual dos espectros52				
4.4.	Correlação dos resultados 59				
5	CONCLUSÕES				
REF	ERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS71				
APÊ	NDICE A – SCRIPT EM R DE EXTRAÇÃO DOS DADOS ORBITAIS 79				

APÊNDICE B – SCRIPT	EM R DE	CORRELAÇÃO	DADOS	SIMULADOS E
DADOS ORBITAIS				

1 INTRODUÇÃO

Os modelos de transferência radiativa aplicados ao estudo da vegetação auxiliam no entendimento do processo de interceptação e de interação da radiação eletromagnética com dosséis vegetais levando em conta suas características biofísicas e bioquímicas. Fornecem conexão lógica entre os parâmetros biofísicos da vegetação e as suas propriedades espectrais (GOEL, 1988). Fundamentalmente, dados de entrada desses modelos são parâmetros biofísicos, geométricos e espectrais dos elementos que compõem o dossel vegetal e das geometrias de iluminação e de visada (parâmetros de *input*) e como resultado de seus processamentos comumente são estimados valores de reflectância do dossel (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Os modelos baseados em transferência radiativa representam avanço sobre os modelos empíricos, designados assim por basearem-se em relações estatísticas estabelecidas entre variáveis obtidas por medições *in situ* e dados detectados remotamente. Os modelos empíricos são mais simplificados e restritos a certo conjunto de dados e às áreas geográficas para as quais foram gerados e não exploram adequadamente relações de causa e efeito (SCHLERF et al., 2005, LIANG, 2004). Na utilização de técnicas de sensoriamento remoto no estudo da vegetação nem todas as variáveis que influenciam o processo de interação entre a radiação eletromagnética e o dossel vegetal são consideradas no estabelecimento de tais relações (PACHECO, 2010; SCHLERF; ATZBERGER, 2006). Apesar destas limitações, tais modelos ainda são utilizados por diversos autores na extração de informações quantitativas de dosséis vegetais a partir de dados de sensoriamento remoto.

Os modelos baseados na teoria da transferência radiativa possibilitam realizar análises considerando o inter-relacionamento das variáveis representativas do alvo e da geometria de aquisição de dados (iluminação e visada). Segundo Goel (1988), existem duas abordagens para estes modelos. A modelagem no sentido direto, na qual os modelos são aplicados com o objetivo de estimar a

reflectância do dossel a partir de um conjunto de dados espectrais, geométricos e biofísicos que constituem as variáveis de entrada no modelo; e a modelagem no sentido inverso, quando se faz a estimativa de parâmetros biofísicos e/ou bioquímicos da cobertura vegetal a partir de valores de reflectância dos dosséis extraídos de produtos como imagens geradas por sensores aerotransportados ou orbitais.

Na inversão do modelo, os dados radiométricos (gerados a partir de dados obtidos por sensores remotos) são utilizados como dados de entrada para estimar/acessar as propriedades biofísicas e/ou bioquímicas dos dosséis vegetais tais como: o índice de área foliar, o conteúdo de água nas folhas, o conteúdo de clorofila, etc. (SCHLERF; ATZBERGER, 2006; LIANG et al., 2015; PEDDLE et al., 2004; BREUNIG, 2011; MERONI et al., 2004; ZARCO-TEJADA et al., 2003).

No Brasil, a utilização de modelos de vegetação baseados na teoria de transferência radiativa foi iniciada com Ponzoni (1993) utilizando o SAIL para simular dosséis de Eucalyptus *sp.*, seguida do trabalho de Piromal (2006), utilizando o modelo 5-SCALE simulando a reflectância de Unidades de Paisagem da Floresta Nacional do Tapajós e Campos (2008), que desenvolveu o GRART, modelo de transferência radiativa para dosséis descontínuos, aplicando-o em plantios de café. Este trabalho busca retomar os esforços de pesquisa nesta área do conhecimento, viabilizando novos esforços e discussões.

Atualmente as agências fornecedoras de dados orbitais têm se preocupado em fornecer imagens já convertidas para valores de reflectância de superfície, abrindo uma grande área de exploração desses dados através dos modelos de transferência radiativa para estimar atributos biofísicos e/ou bioquímicos de dosséis. Porém, cabe ressaltar a necessidade de que o modelo seja corretamente parametrizado para os dosséis que se almeja estimar os parâmetros biofísicos de interesse, sendo necessária a validação do modelo no sentido direto, ou seja, capaz de descrever a relação entre as características

do dossel e sua reflectância, proposição esta anterior aos procedimentos de inversão do modelo e obtenção dos atributos biofísicos e bioquímicos da vegetação. Também é importante ressaltar que as características dos produtos orbitais utilizados para realizar a comparação com dados simulados por modelos exercem influência sobre os resultados. Assim, a conclusão sobre o desempenho deste ou daquele modelo aplicado sobre o estudo de diferentes coberturas vegetais não depende apenas da concepção física adotada por ele ou da sua parametrização, mas também da natureza do dado que servirá como objeto de comparação.

Segundo Sellers (1987), a escolha de utilização de modelos de transferência radiativa se baseia na busca de resultados fisicamente coerentes e passíveis de generalização entre várias escalas.

O modelo SAIL - Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves, modelo de reflectância bidirecional de dosséis vegetais fundamentado na teoria de transferência radiativa, tem sido utilizado em estudos que exploram a interação da radiação eletromagnética com a vegetação. Ele foi desenvolvido no inicio dos anos 80 como refinamento do modelo Suits (VERHOEF et al., 2007), sendo posteriormente atualizado para a versão *4SAIL*. Esta última versão permite derivar a função de distribuição de reflectância bidirecional (FDRB) de acordo com a geometria de iluminação e de observação e considera dois fluxos difusos (hemisférico ascendente e descendente) para modelar o múltiplo espalhamento do fluxo radiante pelos elementos da vegetação. Estes fluxos são adicionados ao fluxo direto vindo da fonte de iluminação e são utilizados para derivar a reflectância direcional na direção do observador (KALLEL et al., 2008).

1.1. Hipótese de estudo

Valores de reflectância gerados a partir da parametrização do modelo 4SAIL especificamente para plantios de *Eucalyptus* sp., apresentam aderência com

valores de reflectância extraídos de imagens *Worldview-3* destes mesmo plantios. Uma forte correlação entre essas duas séries de dados é pré-requisito para a futura inversão do modelo.

1.2. Objetivo geral

Simular a reflectância de dosséis utilizando o modelo baseado em transferência radiativa 4SAIL buscando relações estatísticas significativas entre a reflectância de superfície simulada e reflectância de superfície extraída de dados orbitais, assim possivelmente realizando a inversão deste modelo.

1.3. Objetivos específicos

Caracterizar espectralmente os dosséis de eucalipto a partir de dados radiométricos extraídos das imagens geradas por sensores orbitais.

Caracterizar espectralmente os dosséis de eucalipto a partir de dados radiométricos simulados pelo modelo 4SAIL.

Comparar valores de reflectância de superfície simulados pelo modelo 4SAIL para dosséis de *Eucalyptus* sp. com valores de reflectância de superfície obtidos por sensores orbitais nas mesmas condições geométricas de aquisição de dados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Modelos fundamentados na teoria da transferência radiativa

A abordagem física na estimativa da reflectância de dosséis difere consideravelmente da abordagem empírica por permitir descrever a trajetória da radiação incidente dentro de um dossel, levando em consideração aspectos espectrais e estruturais dos elementos que compõem o dossel, bem como por outros parâmetros relacionados à geometria de iluminação e de visada (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; PACHECO, 2010; JAROCIŃSKA, 2014).

Goel (1988) basicamente agrupou os modelos baseados na transferência radiativa em quatro tipos: geométricos, de meio túrbido, híbridos e modelos simulados computacionalmente, que serão brevemente descritos a seguir.

Os modelos geométricos simulam o dossel vegetal como uma superfície com propriedades refletivas conhecidas, com formas geométricas definidas (cones, cilindros, esferas, elipsoides, etc.) e propriedades ópticas conhecidas (reflectância, transmitância e absortância) para modelar a porção do dossel iluminada e a porção sombreada, distribuídas de forma orientada ou aleatória (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). Os modelos geométricos conseguem representar bem dosséis esparsos.

Os modelos de meio túrbido consideram os elementos da vegetação como pequenas partículas que absorvem e espalham a radiação incidente e se distribuem em camadas horizontais contínuas, uniformes e homogêneas para caracterizar os dosséis (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). O dossel neste caso assume comportamento horizontalmente uniforme onde a trajetória da REM incidente depende da sua espessura e não da sua extensão horizontal. A arquitetura do dossel é caracterizada pelo **IAF** (índice de área foliar) e pela **DAF** (distribuição angular de folhas). O modelo de meio túrbido mais conhecido é o *SAIL*, proposto por Verhoef (1984).

Os modelos híbridos correspondem à integração dos modelos geométricos com os modelos de meio túrbido. Esses modelos tratam a estrutura geral do

dossel como formas geométricas (cones, cilindros, esferas) e o dossel como um meio túrbido por onde trafega a REM incidente. Estes modelos são mais adaptáveis para descrever a interação da REM com dosséis esparsos. O modelo de transferência radiativa para dosséis descontínuos regulares *GRART* é um exemplo de modelo híbrido (CAMPOS, 2008), pois integra as características estruturais do dossel (por exemplo, IAF e DAF) com a interação da REM no interior das folhas. Cabe também citar o *PROSAIL*, (JACQUEMOUD et al., 2009) que realiza a integração do modelo de transferência radiativa de folhas, *PROSPECT*, (JACQUEMOUD; BARET, 1990) com o modelo *SAIL* (VERHOEF, 1984).

Por fim os modelos de simulação computacional tratam o arranjo e a orientação dos elementos da vegetação, tais como: folhas, galhos, ramos, frutos, flores, etc., mediante a aplicação de algoritmos computacionais. Cada um destes elementos é dividido em números finitos de áreas. Estes modelos são computacionalmente intensivos, mas têm a vantagem de seguir simulação realista do regime de radiação dentro do dossel. Por meio de simulações é construído o dossel hipotético em que seus elementos estejam distribuídos de forma aleatória sobre uma superfície. Dessa forma, números aleatórios são gerados para descrever a trajetória da radiação ou seu retorno para o sensor (GOEL, 1988).

Nas últimas décadas muitos modelos de transferência radiativa foram desenvolvidos, operando em diferentes graus de sofisticação e são capazes de representar efeitos unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais a custos computacionais bem diferenciados (PINTY et al. 2004).

Existem atualmente muitos modelos disponíveis para realizar estas simulações, tais como: 5-SCALE, PROSAIL, Discrete Anisotropic Radiative Transfer -DART, Invertible Forest Reflectance Model - INFORM, Soil-Leaf-Canopy - SLC, Forest Reflectance and Transmittance - FRT, GeoSAIL, Soil-Canopy Observation of Photosynthesis and Energy - SCOPE, etc. e cabe ao usuário

definir qual seu interesse e qual o modelo mais adequado para sua aplicação e objetivos.

Zhou et al. (2013) em seu trabalho, indicaram que a aplicação de modelos 3D, tais como o *DART*, para simular imagens 3D realistas é um método muito conveniente para desenvolver e testar a robustez de métodos de sensoriamento remoto aplicados para imagens de alta resolução espacial.

O modelo *PROSAIL* vem sendo aplicado satisfatoriamente nas áreas de agricultura, de fisiologia de plantas e de ecologia em diferentes escalas (JACQUEMOUD; BARET, 1990; VERHOEF, 1984; JACQUEMOUD et al., 2009).

O PROSPECT sofreu vários melhoramentos ao longo dos anos e atualmente encontra-se na quinta versão e simula a reflectância e a transmitância hemisférica direcional ao longo da faixa espectral compreendida de 400 até 2500 nm (FÉRET et al., 2008).

Richter et al. (2011) indicaram que para dosséis estruturados homogeneamente o SAILH+PROSPECT (versão SAILH muito semelhante ao 4SAIL) podem ser suficientes, porém para culturas com linhas de plantio, modelos mais complexos devem ser utilizados, indicando que talvez a utilização de modelos de transferência radiativa mais complexos seja necessária.

Jacquemoud et al. (1996) estudaram propriedades biofísicas e bioquímicas de 63 folhas frescas e 58 folhas secas no intuito de investigar o potencial do sensoriamento remoto para estimar parâmetros bioquímicos de folhas a partir de dados orbitais utilizando o *PROSPECT*. Este experimento também auxiliou o desenvolvimento do modelo e o poder preditivo do modelo foi avaliado para as folhas, variando de acordo com a variável química considerada, de acordo com os comprimentos de onda e se as folhas estavam frescas ou secas, obtendo resultados animadores.

Jarocínska (2014) utilizou o *PROSAIL* no intuito de simular a reflectância da vegetação de tipo prado na Polônia considerada bastante complexa e heterogênea, através da coleta de variáveis de *input* do modelo e espectros de referência em campanha de campo. A autora gerou duas séries de dados, sendo a primeira utilizada considerando apenas os dados de campo e a segunda série levou em conta os dados de campo e três parâmetros a mais (conteúdo de água, IAF e biomassa), com o objetivo de minimizar a diferença entre os espectros medidos e os simulados. Os resultados obtidos foram considerados bons, obtendo RMSE médio (obtido a partir da comparação de reflectância simulada com reflectância obtida em campo) para a primeira série de 0,1058 e para a segunda, 0,0362, sendo que o modelo conseguiu simular melhor prados com maiores valores de biomassa, maiores valores de IAF e com baixo conteúdo de água nas folhas.

Le Maire et al. (2011) utilizaram a versão aprimorada do modelo 4SAIL, o 4SAIL2, que considera os efeitos das linhas de plantio na simulação dos dosséis. Cabe ressaltar a natureza bidimensional do modelo, portanto, simula o dossel como uma camada homogênea de vegetação, não inserindo o contexto do sombreamento de folhas umas nas outras de acordo com a orientação e dimensão dos elementos internos (troncos e galhos).

2.2. O modelo 4SAIL

Verhoef (1984) desenvolveu o modelo *SAIL* sendo considerado um modelo de reflectância bidirecional de meio túrbido homogêneo em que as folhas são dispostas de forma aleatória. O *SAIL* atualmente simula quatro propriedades ópticas de fluxo, ou seja, simula a interação do dossel com o fluxo solar incidente, os dois fluxos difusos (fluxos hemisféricos ascendente e descendente) e a radiância na direção de observação. No *SAIL*, os múltiplos fluxos espalhados são considerados como semi-isotrópicos. É um modelo unidimensional, ou seja, não é capaz de simular coberturas descontínuas nem

é capaz de simular sombras de objetos considerando diferenças de altura, que normalmente existiriam em dosséis reais. O modelo permite a variação dos valores de IAF e utiliza diferentes modelos que buscam representar a DAF do dossel que está sendo simulado. Além disso, outros parâmetros de entrada são a proporção de radiação solar difusa/direta (SKYL), Efeito Hot Spot, ângulo azimutal relativo, ângulo zenital de visada e ângulo zenital solar.

Uma síntese dos parâmetros de entrada que são necessários nas simulações é apresentada na Tabela 2.1

Tabela 2.1. Parâmetros de entrada necessários para executar o modelo *4SAIL* no modo direto.

Variável	Descrição sucinta
Fração solar difusa/direta (SKYL)	Corresponde a fração de REM que entra no dossel como energia direta do Sol. Valores podem variar de zero a 100
Efeito Hot Spot	Ocorre na situação em que a fonte de iluminação é posicionada exatamente atrás do observador, gerando um pico de reflectância. Valores podem variar de 0 até 1.
Azimute relativo	O azimute relativo é a diferença entre o azimute solar e o azimute do observador. Os valores podem variar de 0 até 180 graus.
Ângulo de visada zenital (sensor)	Direção angular de visada em relação ao zênite
Ângulo solar zenital	Direção angular de iluminação em relação ao zênite
Índice de Área Foliar	É o total de área de um lado de todas as folhas por dada unidade de área do terreno. Pode variar de 1 a 10. Adimensional
Ângulo foliar médio	Ângulo de orientação médio para uma distribuição elipsoidal das folhas no dossel. 0° representa as planófilas e 90° às erectófilas. Valores variam de 0 a 90 graus.
Reflectância e transmitância das folhas	Espectros de reflectância e transmitância das folhas medidos em campo.
Reflectância de fundo	Reflectância do solo/material existente abaixo do dossel

Fonte: Produção do autor.

Os dados radiométricos de entrada são as propriedades ópticas das folhas (**reflectância e transmitância**) e também a **reflectância de fundo**, caracterizando a contribuição do *background* (solo ou serapilheira) para a reflectância do dossel. Os dados gerados como *output* do modelo são

indicados em percentagem de reflectância de 1 em 1nm, dentro do intervalo espectral compreendido de 400 até 2500nm.

Huemmrich e Goward (1997) utilizaram o modelo SAIL com o objetivo de relacionar o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) com a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida - FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) para dez espécies arbóreas distintas e diversas medições em campo foram realizadas (reflectância e transmitância de folhas, reflectância de galhos e reflectância de fundo). As simulações indicaram que com baixos valores de IAF, o efeito da reflectância de fundo é significativo para a reflectância do dossel e pouco significativo para a absorção da radiação fotossinteticamente ativa – PAR (Photosynthetically Active Radiation). Com valores elevados de IAF, as propriedades ópticas das folhas predominam sobre a reflectância do dossel como um todo e, consequentemente, em maiores valores de NDVI.

Vescovo et al. (2012) utilizando o SAIL estudaram novos índices espectrais de vegetação (índice de declividade do infravermelho – ISI, índice da diferença normalizada do infravermelho – *NIDI* e índice da diferença estrutural normalizada – *NDSI*), baseados no patamar do infravermelho próximo para detecção de fitomassa de campos naturais através de sensoriamento remoto num contexto temporal. Medições de campo com espectrorradiômetro *Fieldspec Handheld* foram realizadas em 6 sítios de campos naturais na Itália e Áustria. Os autores estabeleceram correlação linear significativa e elevada entre a fitomassa dos campos naturais e os índices *ISI* e *NDSI*. As simulações utilizando o *SAIL* indicaram que isto se deve principalmente pela composição de espécies dos campos naturais e pela reflectância de fundo. Neste trabalho o *SAIL* serviu, principalmente, como ferramenta para analisar a função das características do dossel de interesse (composição de espécies, orientação das folhas, reflectância de fundo) e analisar a relação entre os índices estudados e a fitomassa.

A versão do modelo que será explorada neste trabalho é o *4SAIL*, desenvolvida por Verhoef et al. (2007). O *4SAIL* é uma versão numericamente robusta e com a velocidade otimizada do *SAIL*, disponibilizada em um pacote de aplicações, denominado *ARTMO* (*Automated Radiative Transfer Models Operator*), disponível em *MATLAB*, que tem por objetivo fornecer ferramentas essenciais para executar e inverter uma série de modelos de transferência radiativa (*PROSPECT-4, PROSPECT-5, DLM, LIBERTY*, etc.) para vegetação em nível foliar e em nível de dossel. O ARTMO pode ser obtido através do endereço eletrônico http://ipl.uv.es/artmo/

2.3. Caracterização estrutural para modelos de reflectância de dosséis

A estrutura do dossel, também chamada de arquitetura do dossel, é caracterizada pela posição, pela orientação, pelo tamanho e pela forma dos elementos da vegetação (ROSS, 1981). A descrição estrutural completa do dossel vegetal pode ser considerada um mapa ou um diagrama do tamanho, da forma, do arranjo espacial e das orientações de todos os elementos da vegetação, incluindo galhos, hastes, brotos, folhas, frutas, etc. (WELLES; COHEN, 1996).

Na prática, descrições estruturais dos dosséis são reduzidas para uma pequena quantidade de variáveis, comumente variáveis quantitativas relativamente fáceis de mensurar, tais como, altura do dossel, espaçamento das linhas, densidade da planta, etc., e outros não tão fáceis de medir, tais como, o total de folhas de um dossel e como elas estão orientadas espacialmente (WELLES; COHEN, 1996).

Segundo Campbell e Norman (1989) as descrições da estrutura de dosséis são essenciais para o entendimento dos processos de troca entre a planta e a atmosfera e também podem revelar estratégias da planta no seu processo evolutivo, como adaptações físico-químicas. Infelizmente, as descrições quantitativas das características geométricas do dossel, das plantas ou dos

organismos individuais são complexas, pois os dosséis variam tanto espacial quanto temporalmente (sazonalmente e idade) (XAVIER et al., 2002). Cabe lembrar que nos plantios florestais a distribuição espacial dos elementos é dependente de características relacionadas à maneira como as sementes são distribuídas na área, do tipo de vegetação e do estágio de desenvolvimento destas plantas (NORMAN; WELLES, 1983).

Considerando as características estruturais de dosséis vegetais, a reflectância das folhas é considerada o principal contribuinte na reflectância do dossel, pois comumente o tamanho das folhas é grande comparado com os comprimentos de onda na região denominada como óptica, porém seria muito simplista considerar a reflectância do dossel apenas como uma grande e espessa folha (DANSON, 1998). Devemos utilizar variáveis nos modelos que levem em consideração a contribuição de outros elementos da estrutura do dossel e do solo (fundo) em suas simulações. As potencialidades e capacidades de simulação de diferentes modelos também são avaliadas desta forma. Neste item iremos nos ater aos parâmetros que serão explorados neste trabalho que são utilizados pelo modelo *4SAIL*, quais sejam o IAF e a DAF.

O IAF é um parâmetro relacionado à área das folhas nos dosséis e é adimensional. O IAF é definido pela razão da área total de uma das faces (ou limbo) das folhas por área no terreno. Sua determinação manual ou através de equipamentos específicos é muito cara quando se deseja um razoável nível de exatidão (PONZONI, 1993).

Outro parâmetro importante na caracterização da estrutura de um dossel é a distribuição angular de folhas (DAF) que é definida por uma função densidade de distribuição das folhas dentro do dossel, sendo inclinadas numa variedade de ângulos dada por esta função. A DAF varia muito para os diversos tipos de vegetação e se considera como seis o número de tipos de DAF usadas na descrição dos dosséis: planófila, erectófila, extremófila, plagiófila, uniforme e esférica. BUNNIK (1978) apresentou detalhadamente a representação gráfica destes tipos de função de distribuição em seu trabalho. Atualmente a maioria

dos modelos de reflectância de dosséis, aceita que se insira além das seis distribuições citadas anteriormente, a distribuição angular de folhas definida pelo usuário (DANSON, 1998).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 3.1 ilustra a síntese das atividades realizadas no decorrer desta pesquisa.



Figura 3.1. Fluxograma das etapas metodológicas do trabalho.

Esta pesquisa se fundamenta na utilização de dados coletados em campo e de dados radiométricos extraídos de imagens orbitais de plantios de *Eucalyptus* sp. (de agora em diante sendo chamados somente de eucalipto) em desenvolvimento em área experimental localizada ao norte do município de ltatinga/SP, sendo alvo de diversas pesquisas que têm como foco o monitoramento e as melhorias no crescimento de árvores de eucalipto (LE MAIRE et al., 2011a; LE MAIRE et al., 2011b).

Os dados provenientes das coletas em campo e os dados radiométricos foram utilizados como variáveis de entrada para as simulações de reflectância de superfície dos dosséis de eucalipto através do modelo *4SAIL*.

Os valores de reflectância de superfície oriundos do processamento do modelo foram posteriormente comparados com valores de reflectância de superfície extraídos de imagem orbital geradas pelo satélite *WorldView-3*, com a data de

Fonte: Produção do autor.

obtenção próxima à realização dos trabalhos de coleta de dados em campo. Os dois conjuntos de dados foram analisados visualmente e também correlacionados estatisticamente com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo na simulação dos valores de reflectância de superfície dos dosséis de eucalipto em questão.

3.1. Caracterização da área de estudo e definição das parcelas amostrais

Foram utilizados plantios de eucalipto próximos à Estação Experimental de Monitoramento de Itatinga/SP, no estado de São Paulo, Brasil (ESALQ/USP). A área de estudo é administrada pela empresa DURATEX e está instalada ao norte do município de Itatinga/SP, servindo para vários experimentos, dentre eles o projeto EUCFLUX (disponível em http://www.ipef.br/eucflux/en/), realizado em parceria entre ESALQ/USP, IPEF, várias empresas do setor florestal e *CIRAD* (*Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement*). Sua localização pode ser observada na Figura 3.2.


Figura 3.2. Localização da área de estudo no estado de São Paulo/Brasil.

Fonte: Produção do autor.

O experimento considerou a existência de 16 genótipos de Eucalyptus sp os quais foram plantados em conjuntos de 4 x 4 parcelas amostrais, cada uma medindo 36 x 32m, dentro das quais foram plantados 12 x 16 indivíduos de um mesmo genótipo. A Figura 3.3 ilustra a distribuição espacial destes 9 conjuntos de parcelas amostrais na área experimental, denominados a partir de agora de repetições.





Fonte: Produção do autor.

Foram utilizados genótipos de eucalipto disponibilizados pelas empresas participantes do projeto EUCFLUX nesse experimento. O ciclo de desenvolvimento e de supressão é de aproximadamente seis ou sete anos, sendo que os plantios foram realizados em novembro de 2009, portanto, possuíam seis anos de idade durante o trabalho de campo (outubro/2015). Os plantios de eucalipto tinham idades similares, porém com níveis de produtividade distintos e geneticamente similares.

É importante ressaltar a presença de vento no momento de obtenção da imagem pelo satélite *Worldview-3*, com efeitos sobre a reflectância do dossel, modificando a porção dos elementos da vegetação e porção de solo imageados pelo sensor orbital.

Segundo o Mapeamento Pedológico do Estado de São Paulo (OLIVEIRA, 1999), o solo predominante na região de estudo é o Latossolo vermelho

eutroférrico e distroférico nos relevos classificados como plano e suave ondulado. Ocorrem associados aos latossolos, nitossolos vermelhos eutroférricos nos relevos classificados como suave ondulado e ondulados. Ambos estes solos possuem horizonte A moderado e chernozêmico, com textura argilosa.

Além da variabilidade de solos, outros fatores contribuem para a variabilidade espaço-espectral do substrato. Em plantios florestais de eucalipto o solo se apresenta coberto por: "serapilheira" (composta por folhas galhos e cascas das árvores), quase nenhum sub-bosque e pouca vegetação rasteira, que naturalmente protegem o solo da irradiação solar ou de erosão por chuvas torrenciais (PACHECO, 2010).

O clima da região, segundo a classificação climática de *Koppen-Ginger*, é Cfa, considerado um clima subtropical, úmido, com verão quente. As temperaturas são normalmente superiores a 22°C no verão e com mais de 30 mm de chuva no mês mais seco, sem existência de uma estação seca bem definida.

3.2. Obtenção dos dados de campo

Os dados de campo utilizados neste trabalho foram obtidos através da realização de inventário florestal no período de 19 a 23 de outubro de 2015 em uma das repetições da área de estudo (Repetição 2).

As medições da disposição dos ângulos das folhas presentes no dossel foram obtidas para cada genótipo em árvores (de 6 a 10 árvores) que foram cortadas, escolhidas em função do tamanho da árvore (DAP – diâmetro à altura do peito) para caracterizar adequadamente os tamanhos presentes nas parcelas. Doze galhos auxiliares (quatro da parte superior, quatro da parte intermediária e quatro da parte mais baixa da copa) foram selecionados arbitrariamente em cada árvore. Os ângulos de inclinação das folhas foram medidos utilizando um clinômetro digital em seis folhas por galho (72 folhas por árvore). A distribuição de ângulos das folhas foi posteriormente agrupada em nove classes de

inclinação (de 0 até 90°). No *4SAIL* a distribuição angular das folhas é simulada como uma distribuição elipsoidal, considerando obrigatoriamente apenas o ângulo foliar médio como parâmetro desse modelo de distribuição, ou seja, a média aritmética dos ângulos para cada clone foi calculada (JACQUEMOUD, 1993, JACQUEMOUD et al., 2009).

O IAF foi obtido através de utilização de relação alométrica. Para realizar a calibração da relação alométrica, entre 6 a 10 árvores de tamanhos diferentes foram cortadas (as mesmas árvores cortadas para obter a DAF), tendo suas copas divididas em três níveis de mesmo tamanho. Todas as folhas de cada nível foram retiradas e pesadas (peso fresco). Esse peso fresco foi convertido em superfície usando o percentual de água e a área foliar específica (SLA, do inglês, *Specific Leaf Area*) em cada um desses níveis. O percentual de água e o SLA foram estimados para cada nível com a seleção aleatória de aproximadamente 20 folhas que foram pesadas, digitalizadas para obter sua área, secadas e pesadas novamente. A área total de folha da árvore foi calculada com a soma da área dos três níveis de copa.

Relação alométrica específica foi estabelecida entre área foliar e o tamanho do indivíduo arbóreo (parâmetros CAP – circunferência à altura do peito, convertido em DAP, e altura – H obtidos durante o inventário florestal) e então aplicada para estimar a área foliar de todas as árvores da parcela (32m x 36m cada), utilizando os dados do inventário (CHRISTINA et al., 2015, LE MAIRE et al., 2013).

A área foliar da árvore (A, m^2) foi predita utilizando a equação:

$$A = e * (DAP2 * H)f$$
(3.1)

Em que:

 $e \in f = s$ ão os parâmetros ajustados.

H = altura da árvore (m)

 $DAP = \acute{e} o diâmetro do tronco na altura do peito (m).$

Também foram obtidos durante o trabalho de campo dados radiométricos: transmitância e reflectância das faces ventrais de quatro folhas e reflectância da serapilheira para os níveis de copa superior, intermediário e inferior. As medições radiométricas das amostras de folhas foram realizadas durante a campanha de campo (entre 19/10 e 23/10/2015) para inserir como entrada de dados no modelo. Para cada nível de copa, como entrada, foi calculada a média aritmética das reflectâncias e transmitâncias das quatro folhas medidas.

A reflectância das folhas foi medida com uma esfera integradora *LICOR* acoplada ao espectrorradiômetro ASD *FieldSpec 4*, que permitiu a determinação dos Fatores de Reflectância Direcional Hemisférico (FRDH) e dos Fatores de Transmitância Direcional Hemisférica (FTDH) das faces ventrais das folhas no intervalo espectral compreendido de 350 a 2500nm, sendo que a caracterização espectral das folhas isoladas foi realizada no intervalo espectral compreendido entre 350 e 2300nm.

Para os espectros de serapilheira, foi selecionado o espectro que apresentava os valores médios de fator de reflectância. Os dados espectrais oriundos das amostras de serapilheira que serviram de entrada para o modelo, foram obtidos considerando os dois primeiros centímetros da camada inicial do solo, buscando caracterizar efetivamente o que o sensor orbital registraria.

Em laboratório, a reflectância da serapilheira, formada em sua maioria por folhas e galhos secos dispostos de forma aleatória no solo, foi obtida no intuito de caracterizar e inserir os espectros de reflectância como espectro de solo para o modelo 4SAIL, conforme Figura 3.4. As medições foram realizadas utilizando o *ASD Contact Probe* que utiliza fonte de iluminação interna. As amostras foram devidamente preparadas para serem medidas utilizando caixas plásticas de 50x30x10 cm, dispersando o material na caixa e obtendo os espectros aleatoriamente apontando o *Contact Probe* para o alvo. De cada amostra foram feitas no mínimo 3 medições radiométricas com a média de 30 espectros cada.



Figura 3.4. Espectros de reflectância obtidos com o Contact Probe da serrapilheira do clone 3.

Fonte: Produção do autor.

Antes de realizar as simulações com o *4SAIL*, houve a necessidade de avaliar a sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada. Os principais parâmetros utilizados no *4SAIL*, depois dos espectros de reflectância e transmitância das folhas, foram IAF e DAF, sendo estes dois avaliados pela análise de sensibilidade. O item abaixo descreve a metodologia adotada para analisar a influência da alteração dos valores destes parâmetros na reflectância de superfície para os dosséis simulados.

3.3. Análise de sensibilidade do modelo 4SAIL aos parâmetros IAF e DAF nas simulações de reflectância

A análise de sensibilidade foi proposta neste trabalho para avaliar a influência de IAF e DAF no processo de simulação de reflectância pelo *4SAIL*. Esta avaliação foi conduzida para o clone 3 do sítio experimental (principal genótipo

do projeto EUCFLUX), partindo do pressuposto que há semelhança entre todos os genótipos e que os resultados podem ser generalizados.

Para efetuar esta análise o modelo *4SAIL* foi ajustado para manter alguns parâmetros do dossel constantes ao longo do processamento e outros parâmetros variando dinamicamente, sendo eles: IAF, DAF, permitindo assim a interpretação da influência de cada parâmetro isoladamente.

Tabela 3.1. Parâmetros dinâmicos utilizados para realizar a avaliação de suas influências na reflectância de superfície gerada pelo modelo *4SAIL*.

Parâmetros	Parâmetro	Passo	Valores iniciais e finais utilizados			
IAF	Índice de Área Foliar	0,5	0,5-5,5			
DAF	Distribuição Angular de Folhas	10 graus	25-65			
Fonte: Produção do autor.						

Os parâmetros apresentados na Tabela 3.1 referem-se aos valores que foram alterados para avaliar a influência dos parâmetros do dossel (IAF e DAF) nos espectros de reflectância. Assim, para avaliar o efeito do IAF, os valores foram modificados dinamicamente de 0,5 até 5,5 e o valor de DAF foi fixado conforme os dados obtidos em campo, gerando espectros de reflectância para cada situação. Os outros parâmetros necessários para o modelo foram fixados de acordo com as informações obtidas na imagem de satélite adquirida.

Para avaliar os efeitos de DAF, o IAF foi mantido fixo conforme os dados obtidos em campo e os valores de DAF utilizados foram de 25°, 35°, 45°, 55° e 65° buscando avaliar o impacto destes valores nos espectros de reflectância resultantes.

3.4. Aplicação do modelo 4SAIL

Para a aplicação do modelo *4SAIL* na simulação dos valores de reflectância de superfície para os plantios de eucalipto foram obtidos os conjuntos de dados de campo (IAF e DAF), dados radiométricos (transmitância e reflectância de folhas e reflectância da serapilheira), e os parâmetros relacionados à geometria de iluminação e de observação, oriundos da passagem do satélite *Worldview-3* pela área de estudo. Estes parâmetros de geometria de aquisição têm por objetivo viabilizar a futura comparação entre dados simulados pelo modelo e aqueles extraídos dessa imagem orbital.

A Figura 3.5 apresenta os dados radiométricos que foram inseridos no modelo para cada processamento por clone. Neste exemplo temos o clone 3 e seus respectivos espectros de reflectância e de transmitância médios para cada nível de copa (superior, intermediário e inferior), além do espectro de reflectância da serapilheira.

Foram utilizados neste trabalho diferentes níveis de copa (superior, intermediário e inferior) no intuito de explorar as diferenças espectrais, tanto em relação aos dados simulados, quanto na análise de comparação dos dados simulados com os dados orbitais.



Figura 3.5. Exemplo de espectros de entrada no modelo 4SAIL (reflectância e transmitância de folhas e reflectância de serapilheira).

Fonte: Produção do autor.

Os dados de IAF e DAF foram agrupados com a média aritmética para cada clone e são apresentados na Tabela 3.2. Estes valores foram inseridos no modelo para cada clone separadamente.

Clones	IAF	DAF
Clone 1	3,63	48,02
Clone 2	3,08	51,94
Clone 3	3,35	35,18
Clone 4	3,69	40,36
Clone 5	3,85	44,26
Clone 6	4,59	28,72
Clone 7	2,34	50,41
Clone 8	3,14	33,42
Clone 9	3,47	43,64
Clone 10	4,00	38,14
Clone 11	4,06	34,09
Clone 12	3,24	34,41
Clone 13	3,76	36,24
Clone 14	2,29	45,74
Clone 15	3,85	40,52
Clone 16	2,68	56,77

Tabela 3.2. Valores de IAF e DAF dos clones para inserção no modelo 4SAIL.

Fonte: Produção do autor.

Os parâmetros relacionados às geometrias de iluminação e de observação foram obtidos nos metadados de aquisição dos dados orbitais, no intuito de possibilitar a comparação dos valores de reflectância de superfície processados pelo *4SAIL* com os dados de reflectância de superfície extraídos dos dados orbitais, ou seja, a geometria de observação e iluminação referente ao horário e dia de passagem da imagem adquirida do *Worldview-3* (08/10/2015, 13h41min UTC).

Tabela 3.3. Geometria de iluminação e observação informada para o modelo 4SAIL.

Descrição	Valor		
Data e horário de geração da	08/10/2015, 13:41		
imagem pelo WV-3	UTC		
Ângulo Solar Zenital	25.9°		
Angulo Zenital do Sensor	13.5°		
Azimute Relativo	162.5°		
Eanto: Droduaão do outor			

Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 3.3 encontram-se os valores fixos utilizados no modelo para o ângulo solar zenital, ângulo zenital do sensor e azimute relativo.

Para o parâmetro fração solar difusa, o valor escolhido foi de 20%, considerando que normalmente em um dia sem nuvens, temos 20% de radiação difusa e 80% de radiação direta. Segundo Chen e Leblanc (1997), o efeito *Hot Spot* ocorre comumente quando as direções de observação e de iluminação coincidem. O valor pode variar de 0 até 1 e o valor utilizado foi de 0,01, considerado o valor padrão para uma condição geométrica sem influência de *Hot Spot*.

Para este trabalho, o ângulo zenital do Sol é de 25,9° e o do sensor é de 13,5° no momento de passagem do satélite. Para que houvesse efeito *Hot Spot*, o azimute relativo deveria ser 0, sendo que para o momento de aquisição da imagem, o azimute relativo é de 162,5°, portanto, Sol e sensor quase que em direções exatamente opostas (180°) e também que a fonte e o sensor estivessem na mesma direção. Alguns autores (CLEVERS; VERHOEF 1993;

RICHTER et al. 2011) indicam que para a reflectância de dosséis, este parâmetro possui pequena influência.

Atualmente existe disponível um módulo chamado *SENSOR* (disponível em *http://ipl.uv.es/artmo/index.php/tools*) que basicamente permite a entrada e importação de configurações das bandas de sensores orbitais ópticos. Esta operação é necessária uma vez que o modelo apresenta os seus resultados com a resolução espectral de entrada dos dados, ou seja, 1nm, e devemos converter os dados em bandas espectrais do sensor orbital utilizado. O *SENSOR* está disponível dentro da plataforma *ARTMO*.

Os espectros gerados pelo modelo em resolução de 1nm foram modificados de forma a simular espectros de reflectância para as bandas do *Worldview-3* utilizando o módulo *SENSOR*. A simulação espectral dos dados foi realizada inserindo as configurações espectrais do sensor no módulo (Tabela 3.4), para que os espectros fossem gerados de acordo com as bandas utilizadas.

Tabela 3.4 Valores inseridos no módulo SENSOR do ARTMO para as bandas de interesse do WV-3 em nanômetros.

Banda	Mínimo	Máximo	Centro	FWHM
Blue	445	517	481	72
Green	507	586	547	79
Yellow	580	629	605	49
Red	626	696	661	70
Red Edge	698	749	724	51
NIR1	765	899	832	134
NIR2	857	1039	948	182

Fonte: Produção do autor.

No intuito de avaliar os resultados das simulações de acordo com as características espectrais de cada clone e para cada nível de copa, os espectros de reflectância das folhas também foram simulados para as bandas do satélite *Worldview-3*, através da resposta espectral relativa de cada banda, dados que são fornecidos pelo fabricante do satélite (*Digital Globe*), conforme

apresentado na Figura 3.6. Este processamento foi realizado utilizando o aplicativo *ENVI* através das ferramentas *Spectral Library Builder* e *Spectral Resample*. A ferramenta *Spectral Library Builder* permitiu que os espectros com resolução de 1 nanômetro das folhas, obtidos com o *FieldSpec* e esfera integradora fossem inseridos no aplicativo *ENVI* e a ferramenta *Spectral Resample* permitiu que os dados fossem simulados para as bandas do satélite *Worldview-3*.



Figura 3.6. Função de resposta espectral para as bandas utilizadas neste trabalho para simular a reflectância das folhas isoladas para as bandas do *Worldview-3*.

Fonte: Digital Globe (2014).

3.5. Dados orbitais

A fim de avaliar a correlação entre valores de reflectância gerados pelo *4SAIL* e os valores de reflectância de superfície extraídos das imagens orbitais, foi utilizada a imagem do sensor *Worldview-3*, gerada no dia 08/10/2015, sem cobertura de nuvens na área de estudo.

O satélite *Worldview-3* possui no seu modo padrão, 8 bandas espectrais com resolução espacial de 2m e 1 banda pancromática (450-800nm) com resolução espacial de 50cm, configuração coincidente com seu antecessor *WorldView-2*. Seu avanço em relação ao *Worldview-2* está vinculado à existência de novas 20 bandas (8 associadas ao infravermelho médio e 12 associadas as bandas de correção atmosférica). Opera numa altitude aproximada de 617 km, com órbita semicircular heliossíncrona com um período orbital de 97 minutos. Fornece dados com a resolução radiométrica de 11 bits para as 8 bandas que serão utilizadas neste trabalho. As 8 bandas multiespectrais são: Costeira: 400 - 450 nm, Azul: 450 - 510 nm, Verde: 510 - 580 nm, Vermelho: 630 - 690 nm, *Red Edge*: 705 - 745 nm (traduzido neste trabalho como Vermelho Limítrofe), Infravermelho Próximo 1: 770 - 895 nm, Infravermelho Próximo 2: 860 - 1040 nm.

O resultado da aplicação da correção atmosférica será avaliado em um primeiro momento de forma subjetiva através da inspeção visual das formas das curvas de reflectância de superfície de diferentes objetos existentes na área de estudo, procurando identificar consistências em relação às diferenças biofísicas entre dosséis vegetais e outros objetos.

A imagem foi disponibilizada em valores de ND (níveis de cinza), que posteriormente foram convertidos para valores de radiância no topo da atmosfera (TOA). Para realizar o processo de conversão de ND para radiância no topo da atmosfera (TOA) a equação utilizada é descrita abaixo (Equação 3.2). As operações desta fase foram executadas no aplicativo *ENVI* (*Environment for Visualizing Images*).

$$L_{\lambda \text{ pixel, banda}} = \frac{K_{\text{banda}} * q_{\text{pixel, banda}}}{\Delta \lambda_{\text{banda}}}$$
(3.2)

Em que:

 $L_{\lambda pixel, banda}$ = radiância espectral no topo de atmosfera para os pixels da imagem de cada banda (W/m²/sr/µm)

K_{banda} = fator de calibração radiométrica absoluta de cada banda (W/m²/sr/contador)

 $q_{pixel,banda} = ND$ do pixel da imagem

 $\Delta \lambda_{banda}$ = largura de banda efetiva de cada banda (µm)

O fator de calibração e a largura de banda efetiva estão disponíveis no metadados do arquivo da imagem. Para efetuar a correção atmosférica é necessário conhecer a função de resposta espectral de cada banda do sensor a bordo do satélite em questão, dados estes que são normalmente disponibilizados pelo fabricante do satélite e já disponíveis na versão utilizada do aplicativo *ENVI* (versão 5.3).

O procedimento de correção atmosférica foi realizado através do modelo atmosférico *MODTRAN* (*MODerate spectral resolution atmospheric TRAN*smittance algorithm and computer model) que está disponível na função *FLAASH* (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) do aplicativo *ENVI*.

O processo de correção atmosférica dos dados orbitais é considerado crucial para a execução deste trabalho e, portanto, diversos testes e avaliações foram realizados nesta etapa, com o objetivo de obter valores coerentes (não negativos e semelhantes espectralmente aos presentes na literatura) de reflectância de superfície na imagem adquirida. Estes testes e avaliações consistiram na alteração dos parâmetros de entrada necessários para o modelo de correção atmosférica.

Para realizar esta análise, foram obtidos espectros de alvos na imagem já convertida para reflectância de superfície buscando avaliar a existência de valores negativos de reflectância e se os espectros resultantes da imagem corrigida apresentavam coerência com as características biofísicas e bioquímicas dos alvos analisados.

Os parâmetros da imagem necessários foram obtidos pelo software *ENVI* através do módulo *FLAASH* de forma automática, informando a localização do arquivo contendo a imagem e seu respectivo arquivo de metadados. Os campos solicitados para que o usuário defina as opções são os abaixo descritos.

No campo "*Atmospheric Model*" a opção escolhida foi "*Mid-Latitude Summer*" (MLS), pois de acordo com a documentação do módulo FLAASH, após setembro para latitude de -20 até -30, esta é a opção a ser utilizada. A opção de "*Water Retrieval*" foi desabilitada, pois se optou por não utilizar a banda do *Coastal* para a correção atmosférica, sendo inserida na "*bad band list*" do software, ou seja, não entrou no modelo e consequentemente não foi corrigida nem utilizada. Na opção de "*Initial Visibility*" (visibilidade inicial, considerada vertical), o valor definido foi de 80 km, considerado para tempo aberto (*clear*). A opção selecionada para o "*Aerosol Retrieval*" foi *NO* (não), para que o modelo utilize o valor especificado em "*Initial Visibility*".

Após a geração da imagem de reflectância de superfície, foram selecionadas as unidades amostrais e foram extraídas as médias aritméticas de aproximadamente 130 pixels contidos nestes polígonos em formato *shapefile*.

Para realizar a extração da média aritmética dos valores de reflectância de superfície obtidos nos pixels da imagem, cada parcela foi considerada como um polígono isolado com sua respectiva identificação na tabela de atributos do arquivo *shapefile*. O sensor que registra as imagens multiespectrais utilizadas possui resolução espacial de 2 metros, ou seja, a média aritmética é computada baseada em cerca de 120 pixels contidos em cada unidade amostral.

Devido ao grande volume de dados, o processamento para as 144 unidades amostrais foi realizada através de um *script* elaborado em *R*, disponível em *http://www.r-project.org*, apropriada para computação estatística. Através deste *script* foi possível extrair os valores de reflectância médio para cada banda de cada unidade amostral, viabilizando a posterior correlação dos dados orbitais

com os dados simulados pelo modelo. O *script* elaborado pelo autor está presente no APÊNDICE A.

3.6. Análise visual e estatística dos resultados

Os espectros simulados e os espectros extraídos da imagem gerada pelo *Worldview-3* foram analisados de duas maneiras: por meio da análise visual, ou seja, analisando a forma das curvas de reflectância dos alvos obtidas pelo modelo (em termos absolutos), pelos dados orbitais e pelos espectros das folhas obtidos em campo e, posteriormente, pela análise estatística dos dados (termos relativos).

Após a realização da análise visual dos espectros simulados pelo modelo *4SAIL* e dos dados extraídos da imagem, com o objetivo de extrair mais informação, a análise estatística foi realizada. Este processo foi efetuado mediante a aplicação de testes de significância através de um modelo de regressão linear simples (MRLS) (Equação 3.4).

O modelo linear de regressão simples avalia o relacionamento entre duas variáveis sendo uma variável dependente e outra independente. O relacionamento entre elas é representando por um modelo matemático que associa a variável dependente à variável independente a partir de uma equação linear. O método requer que existam dados pareados X e Y a partir dos quais se constrói uma "nuvem de pontos" chamada diagrama de dispersão (NETER; WASSERMAN, 1974; KUTNER et al., 2005). Os testes estatísticos permitem verificar se existe ou não relacionamento entre as variáveis e o grau desse relacionamento. Este tipo de abordagem é adequado neste caso, em que a comparação envolve amostras pareadas, cujas médias em termos absolutos não poderiam ser comparadas entre si. Assim, mais importante do que avaliar diferenças significativas entre valores médios dos parâmetros resultantes, seria mais interessante avaliar a aderência das estimativas em

cada ponto e o comportamento dessas estimativas. A equação 3.3 apresenta este modelo matemático de regressão linear simples:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + E \tag{3.3}$$

Em que: Y é a variável dependente, cuja alteração deve ser explicada através do comportamento da variável X. Os valores de $\beta_0 e \beta_1$ são os coeficientes da regressão, em que β_0 representa o ponto de interceptação da reta nos eixos X e Y. O valor de β_1 representa a inclinação da reta, ou seja, estima à mudança esperada na variável dependente Y em função de cada unidade de mudança de X, sendo que seu sinal indica se a correlação é positiva (reta ascendente) ou negativa (reta descendente).

Logo, consideraram-se as hipóteses de $\beta_0=0$ e $\beta_1=1$, ou seja, no estabelecimento da regressão linear entre os valores de dois métodos, se $\beta_0=0$ e $\beta_1=1$, os valores observados em cada parcela seriam exatamente os mesmos, pois a reta resultante passaria pela origem dos eixos X e Y e sua inclinação seria de 45° (tangente de 45° = 1).

A análise de variância (ANOVA) testou a significância da regressão, ou seja, se β_1 seria diferente de 0. A ANOVA avalia a variação dos valores observados em Y (reflectância orbital) em torno de sua média \overline{Y} e que são explicadas pela reta \hat{Y} obtida por meio da regressão. Destaca-se que, normalmente, a variação de Y não é totalmente explicada pela variação de X e a esta diferença chamamos de erro ou resíduo (E). O resíduo é dado pela distância ou diferença entre as estimativas de \hat{Y} obtida pela projeção de X sobre a reta e seu valor correspondente no eixo Y (E = Y - \hat{Y}).

Para isso considera a Soma de Quadrados da Regressão (SQR) (Equação 3.4) e a diferença entre os valores de Y observados (neste caso, a reflectância gerada pelo modelo) e \hat{Y} preditos (valores de reflectância extraída dos dados orbitais), referida como a Soma de Quadrados do Erro (SQE) (Equação 3.5).

Soma dos Quadrados da Regressão (SQR) =
$$\sum_{i=1}^{n} (\widehat{Y}i \cdot \overline{y}i)^2$$
 (3.4)

Erro Médio Quadrático (EQM) =
$$\frac{\text{SomaQuadErros}}{\text{GrausLiberdade}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{Y}_{i} \cdot \bar{y}_{i})^{2}}{n-2}$$
 (3.5)

Para examinar a significância da regressão, foi empregada a distribuição F de *Fischer-Snedecor*. O valor F foi calculado a partir da razão entre o SQR (Equação 3.5) e o Erro Quadrático Médio (EQM), sendo o último obtido pela divisão da SQE por seus graus de liberdade. Uma vez que o F calculado é maior que o F tabelado, rejeita-se H0 (β 1=0) e se aceita H1 (β 1≠0), concluindo-se que a regressão é significativa.

Nesta análise consideramos como variável independente (X) a reflectância simulada pelo modelo e como variável dependente (Y) foi utilizada a reflectância orbital, extraída dos dados radiométricos provenientes das imagens dos sensores orbitais.

Para realizar o cruzamento das informações objetivando a correlação, foi criado um *script* em *R* que permitiu realizar o cruzamento das bandas originadas pelo modelo em seus três níveis de copa (topo, intermediário e inferior) com as bandas das 144 unidades amostrais extraídas da imagem orbital. O *script* é apresentado no APÊNDICE B.

4 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

4.1. Análise de sensibilidade de IAF e DAF sobre a reflectância bidirecional com simulações no 4SAIL

A Figura 4.1 apresenta os espectros de reflectância de folhas para os três níveis de copa a título de exemplo, referentes ao Clone 3. Foi possível observar que os espectros de reflectância das folhas obtidos nos três distintos níveis são visualmente similares. Isto não ocorreu para todos os demais clones, sendo possível observar diferenças entre as curvas de reflectância das folhas oriundas dos demais clones.



Figura 4.1. Espectros de reflectância de folha do Clone 3 em diferentes níveis de copa: superior, intermediário e inferior.

Fonte: Produção do autor.

Nos dois itens a seguir, serão apresentados os resultados do efeito das variações de IAF e DAF sobre a reflectância simulada pelo 4SAIL, considerando os espectros de reflectância obtidos em laboratório como referência.

4.1.1. Índice de área foliar

A influência do índice de área foliar nos espectros simulados de reflectância de superfície foi avaliada inserindo os valores de 0,5 até 5,5 em passos de 0,5 no modelo *4SAIL*. Os demais parâmetros foram fixados de acordo com os dados para o clone 3 e dados orbitais.

As Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4 consideram estes resultados divididos nas regiões espectrais do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio. A análise considerou os três níveis de dossel, buscando também identificar se as diferenças ocorriam em maior ou menor proporção considerando algum nível específico da copa.



Figura 4.2. Resultados das simulações com diferentes valores de IAF para o nível de copa superior.

Fonte: Produção do autor.



Figura 4.3. Resultados das simulações com diferentes valores de IAF para o nível de copa intermediário.

Fonte: Produção do autor.



Figura 4.4. Resultados das simulações com diferentes valores de IAF para o nível de copa inferior.

Fonte: Produção do autor.

Foi possível perceber que para todos os níveis de copa, o aumento do IAF acarretou diminuição dos valores de reflectância para a região do visível especialmente nas bandas do azul e vermelho, provavelmente devido ao funcionamento do modelo que preveria aumento da quantidade de pigmentos no dossel. Ainda nessa região espectral a reflectância do dossel saturou com o IAF de aproximadamente 2,0, corroborando com os resultados de Kumar (1974), Tucker e Garat (1977) e Ponzoni (1993).

Já para a região espectral do infravermelho próximo o comportamento espectral foi inverso, ou seja, conforme os valores de IAF aumentaram a reflectância também aumentou. O comportamento do IAF analisado apresentou tendência assintótica sem modificações expressivas com o IAF aproximado de 5,0.

Na região espectral do infravermelho médio os valores de reflectância decresceram conforme aumentaram os valores de IAF, saturando aproximadamente em 2,0. Este efeito ocorre devido à maior participação da água presente na estrutura interna das folhas nas bandas de absorção (1450nm e 1900nm). A reflectância média na faixa espectral de 1500 à 1850nm foi de 25% para 0,5 de IAF e 17% com o IAF já saturado em 2,0. Na faixa espectral de 1950 a 2300nm a reflectância média foi de 15% com IAF de 0,5 e de 7% com o IAF já saturado em 2,0.

O comportamento do modelo para as variações de IAF corroborou com a análise de sensibilidade proposta por BREUNIG (2011). KUMAR (1974) relatou que em termos médios quando o IAF atinge valores próximos a 2,0 ou 3,0 para a região espectral do visível, muita radiação é interceptada e absorvida pelas folhas e sucessivos aumentos nos valores do IAF, acima dos níveis mencionados, não acarretam alterações na reflectância do dossel. Na região do infravermelho próximo, onde a absorção é mínima, o aumento do IAF implica no aumento do espalhamento do fluxo radiante e consequentemente, no aumento da reflectância do dossel, aqui também quase que

exponencialmente, até que, em termos também médios, o IAF atinja valores compreendidos entre 6,0 e 8,0 (KUMAR, 1974).

Em termos gerais, os espectros foram muito semelhantes nos três níveis de copa. Cabe considerar que a dinâmica aqui explorada não considerou alterações na DAF do dossel, pois explorou as modificações nos valores de IAF isoladamente.

4.1.2. Distribuição angular de folhas

A influência das variações da DAF também foi analisada independente da variação dos outros parâmetros de entrada no modelo, inserindo valores de 25^o até 65^o, em passos de 10^o. Os demais parâmetros foram fixados de acordo com os dados para o clone 3 e dados orbitais.

Os espectros de reflectância para cada nível de copa constam nas Figura 4., Figura 4.6 e Figura 4.7, subdivididos nas regiões espectrais do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio.



Figura 4.5. Resultados das simulações com diferentes valores de DAF para o nível de copa superior.

Fonte: Produção do autor.



Figura 4.6. Resultados das simulações com diferentes valores de DAF para o nível de copa intermediário.

Fonte: Produção do autor.



Figura 4.7. Resultados das simulações com diferentes valores de DAF para o nível de copa inferior.

Foi possível perceber que para a região do visível, conforme os valores de DAF aumentaram, ou seja, o dossel vai se tornando mais erectófilo, os valores de reflectância diminuiram, com maior efeito de amplitude na região espectral do azul, depois no verde e menos no vermelho. Os espectros são muito próximos e a reflectância decresce cerca de 2% nesta região espectral. Isto ocorreu, pois conforme o dossel vai se tornando mais erectófilo, a REM penetra em seu interior e é menos refletida, acarretando a diminuição da reflectância nesta região espectral (PONZONI, 1993). A reflectância é maior quanto mais horizontalmente estão dispostas estas folhas componentes do dossel (KIMES, 1984).

Para a região do infravermelho próximo o comportamento foi o mesmo que para a região espectral do visível, ou seja, com o aumento da DAF, a reflectância de superfície diminuiu, sendo que com DAF de 25° a média dos valores de reflectância foi de aproximadamente 50% e com o DAF de 65° a média dos valores de reflectância foi de 35%, sendo a região espectral que sofreu maior modificação na reflectância com a variação da DAF. Este comportamento pode ter sido ocasionado pelo efeito de sombreamento, que é causado pela disposição angular das folhas componentes do dossel, onde a reflectância é maior, quanto mais horizontalmente estão dispostas estas folhas componentes do dossel.

Para o infravermelho médio, com o aumento da DAF se verificou a diminuição dos valores de reflectância, com as bandas de absorção de água apresentando valores similares de reflectância entre si e as maiores variações registradas de 1450 a 1850nm, com reflectância média de 20% para o DAF de 25° e de 15% para o DAF de 65°.

Novamente, este comportamento, pode ter sido ocasionado pelo efeito de sombreamento, que é causado pela disposição angular das folhas que compõem o dossel, onde a reflectância é maior, quanto mais horizontalmente estão dispostas estas folhas componentes do dossel. Segundo KIMES (1984) e Wanjura e Hatfield (1988), dosséis constituídos por folhas posicionadas

próximas à horizontal apresentam uma variação menor na reflectância como função dos ângulos de incidência e de visada, mas apresentam os valores de reflectância mais elevados comparando com outras distribuições.

Para as simulações nesta avaliação de sensibilidade foi utilizado o valor de IAF de 3,35, correspondente ao IAF obtido em campo (outubro/2015) para o clone 3, possivelmente colaborando com o resultado de DAF mais do que os outros parâmetros para as variações de DAF.

Os resultados obtidos na análise de sensibilidade estão coerentes, pois conforme o dossel vai se tornando menos plano, a radiação eletromagnética penetra mais em seu interior e, consequentemente, é menos refletida, acarretando a diminuição da reflectância em ambas as regiões espectrais (visível e infravermelho) (PONZONI, 1993). Os espectros resultantes dos testes realizados modificando a DAF foram muito semelhantes entre si para os três níveis de copa.

4.2. Dados orbitais

Conforme mencionado no item 3.5, após a conversão dos números digitais das imagens *WordView-3* em valores de reflectância de superfície, foram observados visualmente espectros de objetos terrestres nas imagens buscando comparar as curvas resultantes com as assinaturas espectrais típicas destes alvos. Foram eles: dois espectros de solo exposto, dois de água (lagoas rurais), dois dos plantios de eucalipto fora da área de estudo e três de floresta ombrófila densa, totalizando 9 espectros. Essas comparações tiveram como objetivo decidir sobre o resultado da aplicação da correção atmosférica das imagens. Caso as curvas resultantes apresentassem formato muito diferenciado daquele esperado para as assinaturas típicas dos diferentes objetos, a correção atmosférica seria refeita.

A Figura 4. apresenta os espectros de reflectância de superfície obtidos após a realização do procedimento de correção atmosférica da imagem de radiância

no topo da atmosfera, seleção e extração dos espectros de reflectância dos objetos terrestres, indicando similaridade com a caracterização espectral típica destes objetos.



Figura 4.8. Espectros dos objetos terrestres extraídos da imagem com os efeitos atmosféricos corrigidos.

Fonte: Produção do autor.

O espectro de água está coerente, apresentando baixos valores de reflectância em todas as bandas espectrais avaliadas. Segundo Meneses e Netto (2001), a reflectância da água é pequena, em torno de 4% de reflectância, com o sinal de retorno para o sensor baixo. O espectro de solo também está coerente, com a reflectância aumentando gradativamente ao longo das bandas do visível e atingindo valores superiores nas bandas do Vermelho Limítrofe, IVP1 e IVP2. Os espectros de vegetação (mata de galeria, fora do polígono do experimento) se apresentaram similares espectralmente aos espectros de plantios de eucalipto, indicando a coerência de espectros para vegetação verde e sadia. Meneses et al. (2001), descrevem os processos dominantes na região espectral do visível e na região do infravermelho próximo. Para a região espectral do visível os pigmentos existentes na folha dominam a reflectância espectral (clorofila, carotenos e xantofilas). Para a região do infravermelho próximo ocorreu considerável espalhamento interno da REM na folha, com baixa influência da absorção de água nesta região espectral e reflectância quase constante ao longo dos comprimentos de onda que compõem esse intervalo espectral.

Após a avaliação da consistência da imagem corrigida dos efeitos atmosféricos, o *script* elaborado para extrair a média aritmética das 144 unidades amostrais presentes na imagem foi executado, extraindo os espectros referentes a cada repetição para cada banda. São 9 repetições do experimento na área, associados aos 16 clones. A Figura 4. apresenta os espectros com a média aritmética das repetições para cada clone, o que efetivamente foi alvo de análise no item 4.3. Análise visual dos espectros.



Figura 4.9. Espectros com a média aritmética das repetições, extraídos dos dados orbitais.

A fim de explorar a variabilidade espectral destas repetições, a Figura 4. e a Figura 4.11 apresentam dois gráficos *boxplot* para todos os clones na região espectral do visível e na região espectral do infravermelho próximo, respectivamente. O *boxplot* é utilizado para avaliar a distribuição empírica dos dados. O gráfico é formado pelo primeiro e terceiro quartil e pela mediana. As

Fonte: Produção do autor.

hastes inferiores e superiores se estendem, respectivamente, do quartil inferior até o menor valor não inferior ao limite inferior e do quartil superior até o maior valor não superior ao limite superior. Os pontos vermelhos representam os *outliers* da distribuição e a média é representada pelo triângulo preto.



Figura 4.10. Gráfico *boxplot* da reflectância dos clones para as bandas do visível utilizadas neste estudo.

Fonte: Produção do autor.



Figura 4.11. Gráfico boxplot da reflectância dos clones para as bandas do infravermelho próximo utilizadas neste estudo.

Para as bandas da região espectral do visível, os valores de reflectância para cada banda estão agrupados em uma área com pouca variação, ou seja, nestas bandas os clones apresentam valores muito próximos de reflectância entre si, porém com a presença considerável de *outliers*, indicando que existem valores distantes do agrupamento formado pelo primeiro e terceiro quartil, que é pequeno em termos de amplitude e a inexistência de dados na distribuição caudal. Os valores de reflectância de superfície extraídos das imagens na região espectral do visível foram compactados em pequenas faixas de valores de reflectância, representadas no *boxplot (*Figura 4.10). Estes resultados indicaram pouca variação espectral, com a presença de *outliers* indicando que estes valores estão fora do limite das distribuições simétricas observadas nas bandas do visível. Na região do infravermelho próximo os valores de reflectância para os clones apresentaram maior variação e sem a presença de *outliers*, distribuições simétricas (mediana centrada no retângulo), conforme observado na Figura 4.. O comprimento das hastes fora do retângulo (que

Fonte: Produção do autor.

contém 50% dos dados) indicam a cauda da distribuição, maior para as bandas do IVP1 e IVP2 do que para a banda do Vermelho Limítrofe. Em termos de variação de valores de reflectância de superfície para distinguir diferenças sutis entre os clones, as variações para as bandas estão em aproximadamente 5%.

4.3. Análise visual dos espectros

Após o processamento dos dados simulados pelo modelo e da extração dos valores de reflectância da imagem orbital, foi realizada a comparação visual entre os dados separando os resultados por nível de copa. Os dados dos espectros de reflectância de folha transformados para as bandas do *WorldView-3* também foram considerados nesta análise, possibilitando com isso identificar diferenças entre as caracterizações espectrais dos dosséis oriundas dos dados orbitais e dos dados simulados pelo *4SAIL*. Devido à grande massa de dados gerados pelos dados orbitais (144 unidades amostrais) foi calculada a média aritmética para cada clone, considerando suas 9 repetições.

A Figura 4., Figura 4.13 e Figura 4.14 apresentam os dados simulados pelo *4SAIL* para cada um dos três níveis de copa, contendo os espectros de reflectância de folhas para os três níveis de copa e os dados orbitais, para os clones 7, 11 e 14 por apresentarem os três padrões observados ao analisar os dados.

Na análise, os espectros de reflectância dos clones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 15 e 16 não foram exibidos, pois são similares aos clones 7, 11 e 14 que serão apresentados.

Os clones 1 e 16 apresentam curvas de reflectância similares as do clone 7, exibido na Figura 4.12. Como pode ser observada, em cada nível de copa, a reflectância das folhas apresentou os maiores valores ao longo de todo o espectro eletromagnético analisado (bandas espectrais do *WorldView-3*). A reflectância calculada pelo 4SAIL apresenta valores intermediários entre os
valores de reflectância das folhas obtido em laboratório e a reflectância extraída das imagens *WorldView-3*.



Figura 4.12. Espectros de reflectância gerados pelo modelo 4SAIL, extraídos dos dados orbitais e das folhas para o clone 7 considerando os três níveis de copa.



Figura 4.13. Espectros de reflectância gerados pelo modelo 4SAIL, extraídos dos dados orbitais e das folhas para o clone 11 considerando os três níveis de copa.

Fonte: Produção do autor.



Figura 4.14. Espectros de reflectância gerados pelo modelo 4SAIL, extraídos dos dados orbitais e das folhas para o clone 14 considerando os três níveis de copa.

Fonte: Produção do autor.

Comparando a reflectância oriunda das folhas com os dados simulados para o clone 7, é possível afirmar que o *4SAIL* produziu resultados coerentes, corroborando com os trabalhos de Kumar (1974) ou Goel (1988), que indicam que a reflectância de dosséis são frequentemente inferiores que a reflectância de uma folha isolada, devido ao efeito de sombreamento e múltiplas reflexões. Se assumirmos os dados do *WorldView-3* como referência ou "verdade de campo", os efeitos de sombreamento e múltiplas reflexões não estão sendo representados no modelo *4SAIL*.

Os valores de reflectância para o clone 11 apresentados na Figura 4.13, se repetem para os clones 3, 4, 5, 6, 8, 13 e 15. Na região espectral do visível, a reflectância oriunda das três fontes (folhas, *4SAIL* e *WorldView-3*) apresentaram posicionamento similar, conforme já descrito para o clone 7, porém na região espectral do IVP, os dados simulados pelo *4SAIL* parecem não levar em consideração o sombreamento oriundo do dossel, superestimando o efeito de múltiplas reflexões das folhas, visto que a reflectância simulada pelo *4SAIL* nas bandas espectrais do IVP1 e IVP2 apresentaram valores superiores.

Finalmente, os clones 2, 9, 10 e 12, apresentaram padrões de reflectância simulados ao espectro do clone 14, apresentado na 4.14. Na região espectral do visível não existem diferenças comparando com os padrões previamente analisados (clones 7 e 11). Em geral, na região espectral do IVP1 destaca-se que os resultados foram similares (4SAIL e folhas), enquanto no IVP2 o modelo superestimou a reflectância para os níveis superior e inferior, subestimando no nível intermediário do dossel. Conforme ambos os casos anteriores, os dados extraídos da imagem *WorldView-3* apresenta o menor valor de reflectância no gráfico.

De forma geral, percebe-se que houve discordâncias entre os espectros simulados pelo *4SAIL*, os espectros das folhas e os espectros extraídos dos dados orbitais em termos de valores absolutos, tanto para a região do visível quanto para a região espectral do infravermelho próximo. Para a região do

visível foi possível observar que a reflectância para uma folha isolada é menor a reflectância do dossel (considerando a simulação dos dados com 4SAIL), resultado coerente com o exposto por PONZONI, SHIMABUKURO; KUPLICH (2012).

Os espectros das folhas na região do visível apareceram com valores superiores aos dados simulados e dados orbitais para todos os clones, em todos os níveis de copa. Para esta mesma região espectral, o modelo 4SAIL também superestima os valores de reflectância de superfície quando comparado com os dados orbitais, em todos os casos avaliados.

Na região espectral do infravermelho próximo, os espectros de folhas, dados orbitais e dados simulados pelo 4SAIL apresentam variações na forma da curva espectral e diferentes valores de reflectância em termos absolutos, para as duas regiões espectrais (visível e infravermelho próximo), através da comparação visual entre os dados, não foi possível determinar se o padrão espectral do dossel (dados simulados) correspondeu aos espectros de reflectância de folhas linearmente. Isto se deve por estas relações entre reflectância de folhas e de dosséis não serem lineares, ou seja, valores elevados de reflectância da folha não se traduzem proporcionalmente em valores elevados de reflectância para o dossel (PONZONI, SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012) e pela dinâmica da alteração de valores de DAF e IAF, onde as simulações de dossel consideraram os valores obtidos em campo para cada clone separadamente, conforme Tabela 3.2. Todos os outros parâmetros das simulações (ângulo azimutal solar, ângulo zenital do sensor, azimute relativo, fração solar difusa/direta e efeito Hot Spot foram mantidos os mesmos para os 16 clones.

Os resultados obtidos nesta análise de comparação em termos absolutos indicaram que as simulações não consideraram efetivamente o efeito de sombreamento existente no dossel, apresentando valores de reflectância de superfície sempre superiores em comparação aos dados orbitais tanto na região espectral do visível, quanto na região espectral do infravermelho

próximo. O sombreamento inferior do dossel e partes iluminadas e não iluminadas na serapilheira, interferem na reflectância do dossel não homogeneamente. Esta dinâmica seria abordada com a utilização de modelos mais complexos (tridimensionais, como por exemplo, o *DART*), sendo consideradas as características estruturais dos dosséis vegetais com maior complexidade, possibilitando que relações entre REM e vegetação que o *4SAIL* não é capaz de abordar, sejam consideradas.

MAJOR et al. (1992) utilizaram três variações do SAIL (unidimensional, bidimensional que levou em conta as linhas de plantio e uma terceira também bidimensional que considerou o sombreamento causado pelas linhas de plantio e altura das árvores) para avaliar a reflectância bidirecional de seis genótipos de milho, obtendo resultados que indicaram que a utilização da versão mais completa (que levava em conta o sombreamento) não melhorou os resultados suficientemente para justificar a maior complexidade inserida. Neste contexto, é possível também avaliar que ao inserirmos maior complexidade nas simulações, não significa necessariamente que o esforço trará grande melhoria nos resultados. Cabe lembrar que estamos falando de um dossel de eucalipto praticamente em idade de corte, completamente composto por folhas (IAF já saturado), portanto as diferenças estruturais não são observadas pelos dados orbitais, mesmo com alta resolução espacial. Estes resultados foram obtidos considerando simulações unidimensionais e bidimensionais, sendo os modelos tridimensionais de transferência radiativa possivelmente seriam capazes de representar adequadamente a complexidade da arquitetura de dosséis de eucalipto (OLIVEIRA et al., no prelo).

Um aspecto relevante para a discussão é a resolução espacial das bandas multiespectrais do *Worldview-3* que apresentam 2 metros de resolução espacial, possibilitando que características da arquitetura do dossel, sombreamento e sobreposição de copas sejam "vistas" pelo sensor, impactando os resultados da análise dos espectros e também na correlação, pois a influência destas características na reflectância de superfície não é

considerada pelas simulações no *4SAIL*. Cabe salientar neste contexto, que com a utilização da média aritmética dos pixels por parcela, os dados espectrais são homogeneizados espacialmente e, portanto, há perda desta capacidade de ver características do dossel.

Com a utilização de um sensor de resolução espacial não tão fina quanto à do *Worldview-3* para os dados multiespectrais, para um alvo considerado homogêneo como plantios de eucalipto utilizados neste estudo, o resultados observados poderiam ter sido superiores.

Outra questão a ser discutida é a correção atmosférica, considerada crucial neste trabalho para podermos comparar valores de reflectância de superfície simulados pelo modelo 4SAIL com os valores de superfície extraídos da imagem WorldView-3. A correção atmosférica teve como objetivo corrigir os efeitos de espalhamento e absorção atmosférica, mas pode ter "escurecido" demais a imagem no visível, ou seja, sendo muito severa e reduzindo muito os valores de reflectância na região espectral do visível e não adicionando reflectância suficiente que foi absorvida pela atmosfera, na região espectral do infravermelho próximo, interferindo diretamente na comparação dos valores de reflectância de superfície extraídos da imagem com os dados simulados pelo 4SAIL. Outro aspecto importante sobre a correção atmosférica está relacionado aos parâmetros necessários no modelo utilizado. A utilização de uma atmosfera "Mid Latitude Summer" ao invés de uma atmosfera "Tropical" pode ter influenciado nos resultados da correção atmosférica, além dos outros parâmetros que possuem várias opções e interferem nos valores de reflectância de superfície da imagem.

4.4. Correlação dos resultados

Através da análise visual dos espectros de reflectância de superfície foi possível verificar que os dados simulados e os orbitais não apresentaram os mesmos valores e as mesmas tendências em termos absolutos. A avaliação

estatística permite explorar e quantificar a aderência existente entre os dados. Inicialmente o processo consistiu na elaboração de um *script* em *R* com o objetivo de realizar correlação entre os dados, considerando a média aritmética dos 16 clones em suas 9 repetições e os resultados dos três níveis de copa gerados pelo modelo *4SAIL*.

A Tabela 4.1 corresponde aos testes de significância realizados para os valores de reflectância de superfície dos 16 clones simulados pelo 4SAIL com os valores de reflectância de superfície oriundos dos dados orbitais, para cada banda. A tabela apresenta três resultados dos testes de hipótese para cada nível de copa, disponível nas colunas da tabela, para cada banda. O primeiro resultado representa o teste de distribuição F de Fisher-Snedecor, em que o limiar valor-P utilizado para que o teste passe para a próxima etapa é de 0,05, ou seja, se o valor-P foi menor do que 5%, conclui-se que a regressão é significativa. Esta hipótese basicamente nos diz se β_1 é diferente de zero, ou seja, a reta de correlação entre as duas fontes pode ter inclinação de 45 graus. O segundo resultado, intitulado de coefB, avalia a situação do valor-P maior que 5%, em que o β_0 , pode ser zero, ou seja, o intercepto pode passar pela origem. O terceiro resultado, nomeado como H1 BO<>1 na tabela, avalia a situação para o valor-P maior do que 5%, em que β_1 pode ser 1, ou seja, a reta pode ter inclinação de 45 graus. As células marcadas em vermelho foram as que não passaram nos respectivos testes, ou seja, não atingiram as condições indicadas acima, não sendo resultados significativos estatisticamente.

Tabela 4.1. Tabela com os resultados de correlação para os dados simulados pelo *4SAIL* e os dados orbitais extraídos de imagem do *WorldView-3*.

TESTES	AZUL	VERDE	AMARELO	VERMELHO	VERM. LIMÍTROFE	IVP1	IVP2
SUP pvalue	8,42E-01	1,47E-01	1,06E-01	8,99E-01	3,25E-16	4,65E-04	7,21E-04
SUP coefB0	8,43E-03	3,86E-02	5,06E-01	1,73E-01	2,68E-02	9,92E-01	8,97E-01
SUP H1_B0<>1	8,61E-01	9,16E-01	2,66E-01	4,01E-01	8,32E-09	7,45E-02	9,88E-02
INT pvalue	8,53E-01	2,97E-02	1,51E-01	9,48E-01	1,49E-02	3,29E-03	3,48E-03
INT coefB0	5,63E-03	2,50E-01	6,34E-01	1,13E-01	6,35E-01	5,98E-01	6,28E-01
INT H1_B0<>1	8,19E-01	7,41E-02	3,63E-01	2,78E-01	2,03E-01	2,55E-01	2,96E-01
INF pvalue	9,26E-01	7,14E-02	2,31E-01	9,86E-01	5,50E-02	5,71E-04	6,17E-04
INF coefB0	7,87E-03	4,10E-01	7,63E-01	1,59E-01	9,83E-01	7,54E-01	7,22E-01
INF H1_B0<>1	7,76E-01	1,50E-01	4,73E-01	3,59E-01	4,53E-01	1,24E-01	1,66E-01

Fonte: Produção do autor.

Através da análise dos valores presentes na Tabela 4.1 foi possível constatar que os resultados positivos para os testes de significância ocorreram nas bandas do IVP1 e IVP2, independente do nível de copa. Tanto a banda do verde quanto a banda do Vermelho Limítrofe no nível de copa intermediário, apresentaram significância para os três testes de hipótese. Os resultados para as outras bandas do visível não foram satisfatórios, em nenhum nível de copa.



Figura 4.4. Gráficos de correlação para as bandas do visível nos três níveis de copa avaliados.

Fonte: Produção do autor.

Através da análise das regressões realizadas para a região do visível apresentadas na Figura 4.4, foi possível observar de forma mais detalhada a significância das relações entre os valores de superfície simulados pelo *4SAIL* por nível de copa e os valores de reflectância de superfície oriundos dos dados orbitais, com todos os resultados apresentando R² (coeficiente de correlação) muito baixos, todos os resultados com baixo poder explicativo mesmo com os testes de hipóteses sendo positivos para a banda do verde e vermelho limítrofe (nível intermediário) e IVP1 e IVP2 (todos os níveis de copa).



Figura 4.5. Gráficos de correlação para as bandas do infravermelho próximo nos três níveis de copa avaliados.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.5 apresentou as regressões para as bandas do Vermelho Limítrofe, IVP1 e IVP2 nos três níveis de copa. Conforme a Tabela 4.1, a maioria dos resultados nesta região espectral foram significativos considerando os três testes de hipótese realizados. É possível perceber através da figura que quase todos os resultados tiveram pouco poder explicativo em termos de coeficiente de correlação, porém atenderam os testes de hipótese propostos. Estes resultados indicaram aderência existente, em termos relativos, entre a reflectância de superfície oriunda das duas fontes de dados, sendo passíveis de serem utilizados para posterior inversão do modelo na região espectral do IVP (IVP1 e IVP2).

Também não houve diferenças entre os resultados considerando os diferentes níveis de copa, salvo a camada intermediária do dossel que apresentou significância para os três testes de hipótese para a banda do verde, não sendo possível inferir se houve maior aderência para o nível de copa superior, intermediário ou inferior do dossel de forma contundente. Este resultado indicou que não há melhorias expressivas ao utilizarmos diferentes níveis de copa ao simular os espectros de dossel de eucalipto no 4SAIL, pois as diferenças sutis em relação aos espectros de folhas dos três níveis não são consideradas ao efetuar a simulação, onde possivelmente parâmetros como IAF e DAF são mais relevantes para a reflectância bidirecional dos dosséis de eucalipto simulados neste trabalho, que as folhas oriundas dos diferentes níveis de copa avaliados. Asner (1998) corrobora com esta afirmação, indicando que o IAF e DAF são dominantes para a reflectância de dosséis com exceção da reflectância do solo e cobertura da vegetação para dosséis esparsos na região do IVP.

Um fator relevante que pode ter influenciado nos resultados de correlação foi à desvantagem da utilização deste tipo de modelo (que leva em consideração uma abordagem física) em relação à sua sensibilidade às bandas corrompidas ou mal modeladas (MERONI et al., 2004). Outro aspecto relevante e conhecido é que as superfícies naturais tem comportamento não lambertiano e tendem a variar os valores de reflectância de superfície em razão de sua anisotropia, portanto influenciando nos resultados (BARMAN et al., 2010, NOVO, 1992)

Pacheco (2010) aplicou o modelo GRART (Geometrically Arbitrary Radiative Transfer) no método direto para a estimativa de FRB espectral também de dosséis de eucalipto a fim de analisar se os valores simulados pelo modelo representariam a dinâmica espectral deste alvo quando comparados com os

dados radiométricos extraídos de imagens *Landsat* de duas datas distintas. Os resultados de correlação obtidos pela autora foram semelhantes aos encontrados neste trabalho, sendo as maiores relações entre a reflectância simulada pelo GRART e os valores reflectância extraídos das imagens ocorreram na faixa do infravermelho próximo, obtendo resultados não significativos estatisticamente para o visível. O modelo e sua parametrização foram considerados insatisfatórios, impossibilitando a inversão e consequente estimativa de parâmetros de dosséis de eucalipto (PACHECO, 2010).

Cabe ressaltar que atualmente existem modelos tridimensionais, tais como o *DART* (GASTELLU-ETCHEGORRY et al., 2004), o *PARCINOPY* (Chelle, 1997), capazes de modelar de forma bastante complexa o processo de interação entre a REM e a vegetação (inclusive as condições atmosféricas, pois apresenta o modelo de correção atmosférica *6S* acoplado), obtendo melhores resultados ao comparar dados orbitais com dados simulados (OLIVEIRA et al., no prelo). Porém os esforços de parametrização são maiores, principalmente em relação aos parâmetros geométricos do dossel, aspecto que o *4SAIL* negligencia ao não considerar diferenças estruturais dos dosséis vegetais, ignorando questões como diferença na altura das árvores, sobreposição entre copas e sombreamento que interferem diretamente na interação da REM com o alvo e consequentemente nos valores de reflectância de superfície.

Neste trabalho, não foram considerados os erros oriundos das medições de campo para a simulação no modo direto, ou seja, não foram utilizadas técnicas que avaliem e busquem corrigir os erros provenientes das medições. Atzberger et al. (2013) apresentaram duas diferentes técnicas que levam em consideração os erros provenientes das medições de campo, indicando que o *PROSAIL* (versão bastante similar ao *4SAIL* no que concerne simulação de dossel) é bem ajustado para estudos de pastagens envolvendo dados hiperespectrais (de 400 até 2500nm).

Com a utilização de um sensor de resolução espacial não tão alta quanto às do Worldview-3 (2 metros para as bandas multiespectrais) e levando em consideração a natureza relativamente homogênea em termos espectrais do alvo em comparação às florestas em diferentes estágios sucessionais, o resultado da correlação poderia ser melhor para as bandas do visível e infravermelho próximo. Ao utilizarmos resoluções espaciais mais refinadas, ocorrem diferenças espectrais ao avaliarmos exatamente o mesmo alvo com outra resolução espacial. O trabalho de Vincini, Calegari e Casa (2016) corrobora com esta afirmação, indicando que os índices espectrais que utilizou (CVI - Chlorophyll Vegetation Index, TCI/OSAVI -Triangular Chlorophyll Index/Optimized Soil Adjusted Vegetation Index e MTCI - MERIS Terrestrial Chlorophyll Index) oriundos de resolução espacial de 20 metros apresentaram melhores resultados que os mesmos índices obtidos com resolução espacial de 10 metros para simulações realizadas baseadas nas características espectrais do satélite Sentinel-2. Cabe ressaltar que ao utilizar a média dos pixels presentes nas parcelas de eucalipto neste trabalho, a reflectância é agrupada em um valor só, sendo homogeneizada e interferindo nos resultados apresentados.

O modelo utilizado neste trabalho buscou simular a reflectância de dosséis e realizando a inversão deste modelo para as bandas do IVP (IVP1 e IVP2), seria possível encontrar relações estatísticas significativas entre a reflectância de superfície simulada para o dossel e parâmetros bioquímicos e/ou biofísicos de interesse, indicando que os resultados não são totalmente descartáveis.

O modelo *PROSAILH* (versão do *SAIL* muito similar a do *4SAIL*) é largamente utilizado e validado, produzindo resultados realistas para espectros de reflectância bidirecional de diferentes culturas como reportaram diversos estudos, tais como Jacquemoud et al., (2000), Andrieu et al., (1997), Jacquemoud et al., (2006) e Richter et al (2011). Por este motivo, é preferido entre outros modelos de transferência radiativa em que os algoritmos onde o dossel é descrito, são mais complexos. Estes modelos mais complexos podem

ser mais acurados, porém requerem maiores esforços na sua parametrização (BARET e BUIS, 2008 e DORIGO et al, 2007). Em particular, informações geométricas sobre a arquitetura específica do dossel em questão de diferentes tipos de plantios é necessária, tornando estes modelos menos adequados para aplicações operacionais em grandes áreas heterogêneas (RICHTER et al., 2011).

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi aplicado o modelo de reflectância bidirecional de dosséis vegetais *4SAIL*, no modo direto, simulando espectros de reflectância de plantios de eucalipto que, posteriormente, foram correlacionados com os valores de reflectância de superfície extraídos de imagem orbital do satélite *Worldview-3*.

Os resultados deste trabalho indicaram que o modelo 4SAIL necessita de poucos parâmetros para efetuar as simulações, porém não permitiu calcular valores de reflectância dos dosséis de eucalipto similares, em termos absolutos, aos valores de reflectância de superfície obtidos a partir das imagens *Worldview-3*.

Na avaliação das correlações para todas as bandas, não foram obtidos bons resultados, obtendo coeficientes de correlação baixos para todos os casos avaliados. Os testes de hipótese para a região espectral do infravermelho próximo foram positivos, mas não foram considerados bons para as bandas do visível, sugerindo limitações com vistas à inversão do modelo.

A não aderência entre os dados em todas as bandas pode ter ocorrido pelo modelo não ter sido capaz de representar coerentemente os processos radiativos que ocorrem nos plantios de eucalipto analisados ou pela incapacidade do produto orbital de representar diferenças tão sutis em termos espectrais dos plantios de eucalipto para a área de estudo. Ao propor a inversão do modelo utilizando estes dados, apenas as bandas do infravermelho próximo poderiam ser utilizadas, pois não houve aderência nas bandas do visível.

Seria adequado considerar a utilização de outros sensores para verificar a confiabilidade do modelo com outras resoluções espaciais e realizar comparações com os dados das simulações, no intuito de verificar se os resultados seriam melhores. Características estruturais mais finas, tais como sombreamento pela diferença de altura entre as árvores componentes do

dossel e sombreamento não são consideradas pelo *4SAIL*, o que provavelmente interferiu nos resultados de correlação.

Como orientação para futuros trabalhos, sugere-se a utilização de um modelo mais robusto em termos de caracterização geométrica do dossel (tridimensionais, por exemplo) e também a utilização de outros sensores e resoluções espaciais para avaliar a aderência dos dados orbitais com os dados simulados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIEU, B.; BARET, F.; JACQUEMOUD, S.; MALTHUS, T.; STEVEN, M. Evaluation of an improved version model for simulating bidirectional of sugar beet canopies. **Remote Sensing of Environment**, v. 60, p. 247-257, 1997.

ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, p. 234–253, 1998.

ATZBERGER, C.; DARVISHZADEH, R.; SCHLERF, M.; LE MAIRE, G. Suitability and adaptation of PROSAIL radiative transfer model for hyperspectral grassland studies. **Remote Sensing Letters**, v. 4, 1, p. 55-64, 2013.

BARET, F.; BUIS, S. Estimating canopy characteristics from remote sensing observations: review of methods and associated problems. In: LIANG. S. (ed.). **Advances in land remote sensing**. Ed. Springer, 2008. p.173-201.

BARMAN, D.; SEHGAL, V. K.; SAHOO, R. N.; NAGARAJAN, S. Relationship of bidirectional reflectance of wheat with biophysical parameters and its radiative transfer modeling using prosail. **J. Indian Soc. Remote Sens.,** v. 38, p. 35–44, March 2010.

BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. Directional effects on NDVI and LAI retrievals from MODIS: a case study in Brazil with soybean. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 13, n. 1, p. 34-42, 2011.

BUNNIK, N.J.J. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in reaction with their morphological and optical properties. 1978. 175p. PhD Thesis (Medelinguen Land Bouwhogeschool) - Wageningen, 1978.

CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. The description and measurement of plant canopy structure. In: RUSSELL, G.; MARSHALL, B.; JARVIS, P. J. (eds.). **Plant canopies:** their growth, form and function. Cambridge: University Press, 1989. P. 1-19.

CAMPOS, R.C. **GRART:** modelo de transferência radiativa para dosséis agrícolas esparsos. 2008. 146p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008. Disponível em: http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/34MSUL8. Acesso em: 10 de agosto de 2016.

CHELLE, M. **Developpement d'un modèle de radiosité mixte pour simuler la distribution du rayonnement dans les couverts végétaux**. 1997. 161p. PhD thesis, Université de Rennes, 1997. CHEN, J.M.; LEBLANC, S. G. A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture. **IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,** v. 35, p. 1316-1337, 1997.

CHRISTINA, M.; LE MAIRE, G.; BATTIE-LACLAU, P.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J. P.; JOURDAN, C.; LACLAU, J. P. Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in Eucalyptus grandis plantations. **Global change biology**, v. 21, n. 5, p. 2022-2039, 2015.

CLEVERS, J. G. P. W.; VERHOEF, W. LAI estimation by means of the WDVI: a sensitivity analysis with a combined PROSPECT-SAIL model, **Remote Sensing** of Environment, Rev. v. 7, p. 43-64, 1993.

DANSON, F. M. Teaching the physical principles of vegetation canopy reflectance using the SAIL model. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 64, n. 8, Augp. 809-812, 1998.

DORIGO, W.A.; ZURITA-MILLA, R.; DE WIT, A.J.W.; BRAZILE, J.; SINGH, R.; SCHAEPMAN, M.E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.9, p.165-193, 2007.

FÉRET, J.B.; FRANÇOIS, C.; ASNER, G.P.; GITELSON, A.A.; MARTIN, R.E.; BIDEL, L.P.R.; USTIN, S.L.; LE MAIRE, G.; JACQUEMOUD, S. PROSPECT-4 and 5: advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 3030-3043, jul. 2008.

FERREIRA, M. P. Modelagem de transferência radiativa para extração de atributos bioquímicos de dosséis florestais. Proposta de Qualificação como parte dos requisitos exigidos pelo curso de Doutorado em Sensoriamento Remoto. INPE, 2014.

GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P.; MARTIN, E.; GASCON, F. DART: a 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 1, 2004.

GOEL, N. S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, v. 4, n. 1, p. 1-212, 1988.

HUEMMRICH, K. F.; GOWARD, S. N. Vegetation canopy PAR absorptance and NDVI: an assessment for ten tree species with the SAIL model. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 2, p. 254-269, 1997. JACQUEMOUD, S. Inversion of the PROSPECT+SAIL canopy reflectance model from AVIRIS equivalent spectra: Theoretical study, **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n. 2-3, p. 281-292, 1993.

JACQUEMOUD, S.; BACOUR, C.; POILVÉ, H.; FRANGI, J. P. Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance - Direct and inverse mode. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, p. 471–481, 2000.

JACQUEMOUD, S.; USTIN, S. L.; VERDEBOUT, J.; SCHMUCK, G.; ANDREOLI, G.; HOSGOOD, B. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. **Remote sensing of environment**, v. 56, n. 3, p. 194-202,1996.

JACQUEMOUD, S.; VERHOEF, W.; BARET, F.; BACOUR, C.; ZARCO-TEJADA, P. J.; ASNER, G. P.; FRANÇOIS, C.; USTIN, S. L. PROSPECT+SAIL models: a review of use for vegetation characterization. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. supplement 1, p. S56-S66, set. 2009.

JACQUEMOUD, S.; VERHOEF, W.; BARET, F; ZARCO-TEJADA, P. J.; ASNER, G. P.; FRANÇOIS, C.; USTIN, S. L. PROSPECT+SAIL: 15 years of use for land surface characterization. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, (IGARSS 2006), 2006, Denver, CO. **Proceedings...** IEEE, 2006. p. 1992-1995.

JACQUEMOUD, S; BARET, F. PROSPECT: a model to leaf optical properties spectra. **Remote Sensing of Environment**, v. 34, p. 74-91, 1990.

JAROCIŃSKA, A. M. Radiative transfer model parametrization for simulating the reflectance of meadow vegetation. **Miscellanea Geographica**, v. 18, n. 2, p. 5-9, 2014.

KALLEL, A.; VERHOEF, W.; LE HÉGARAT-MASCLE, S.; OTTLÉ, C.; HUBERT-MOY, L. Canopy bidirectional reflectance calculation based on Adding method and SAIL formalism: AddingS/AddingSD. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n. 9, p. 3639-3655, 2008.

KIMES D. S. Modeling the directional reflectance from complete homogeneous vegetation canopies with various leaf-orientation distributions. **Journal Optical Society of America.** v. 1, n. 7- July,1984.

KUMAR, R. **Radiation from plants -** reflection and emission: a review – research 145 project n° 5543, Lafayette, Indiana: School of Aeronautics, Astronautics and Engineering Sciences, Purdue Research Foundation, 1972. 87 p.

KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; NETER, J.; LI, W. **Applied linear** statistical models. New York, USA: McGraw-Hill, 2005. 1396 p.

LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; VERHOEF, W.; PONZONI, F. J.; LO SEENB, D.;BÉGUÉB, À.; STAPEE, J. L.; NOUVELLON, Y. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 2, p. 586–599, fev. 2011a.

LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y.; GRINAND, C.; HAKAMADA, R.; STAPE, J.-L.; LACLAU, J.-P. MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. **Remote Sensing of Environment**, v.115, p. 2613–2625, 2011b.

LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y.; STAPE, J. L.; PONZONI, F. J. Calibration of a Species-specific spectral vegetation index for Leaf Area Index (LAI) monitoring: example with MODIS reflectance time-series on eucalyptus plantations. **Remote Sensing**, v. 4, n. 12, p. 3766-3780, 2012.

LE MAIRE, G.; NOUVELLON, Y.; CHRISTINA, M.; PONZONI, F. J.; GONÇALVES, J. L. M.; BOUILLET, J. P.; LACLAU, J. P. Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single-and mixed-species Eucalyptus grandis and Acacia mangium plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 288, p. 31-42, 2013.

<u>LIANG, S. Canopy reflectance modeling</u>. In: Hoboken, NJ: John Wiley & Sons: Quantitative remote sensing of land surfaces. **Wiley Series in Remote Sensing**, 2004.

LIANG, L.; DI, L.; ZHANG, L.; DENG, M.; QIN, Z.; ZHAO, S.; LIN, H. Estimation of crop LAI using hyperspectral vegetation indices and a hybrid inversion method. **Remote Sensing of Environment**, v. 165, p.123-134, 2015.

MAJOR, D. J.; SCHAALJE, G. B.; WIEGAND, C.; BLAD, B. L. Accuracy and sensitivity analyses of SAIL model-predicted reflectance of Maize. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, p. 61-70,1992.

MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. **Sensoriamento remoto:** reflectância dos alvos naturais. Brasília: UnB, 2001. Cap. 4, p. 127-154.

MERONI, M.; COLOMBO, R.; PANIGADA, C. Inversion of a radiative transfer model with hyperspectral observations for LAI mapping in poplar plantations. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n. 2, p.195-206, 2004.

NETER, J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models:** regression, analysis of variance and experimental designs. Illinois: Irwin-Dorsey Ltd., Inc., 1974. 842 p.

NORMAN, J. M.; WELLES, J.M. Radiative transfer in an array of canopies. **Agronomy Journal**, v.75, p.481–488, 1983.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto:** princípios e aplicações. São Paulo: Editora Blucher, 1992.

OLIVEIRA, J.B.O.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo:** legenda expandida. Campinas: Instituto Agronômico - EMBRAPA Solos, 1999. 64 p.

PACHECO, L. R. F. P. **Caracterização estrutural a partir de modelos empíricos e avaliação do modelo GRART na caracterização espectral de dosséis de** *Eucalyptus* **spp.** 2010. 167p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em < http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37EJB4P >. Acesso em: 10 de agosto de 2016.

PEDDLE, D. R.; JOHNSON, R. L.; CIHLAR, J.; LATIFOVIC, R. Large area forest classification and biophysical parameter estimation using the 5-Scale canopy reflectance model in Multiple-Forward-Mode. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 2, p. 252-263, 2004.

PINTY, B.; WIDLOWSKI, J. L.; TABERNER, M.; GOBRON, N.; VERSTRAETE, M. M.; DISNEY, M.; GASCON, F.; GASTELLU, J-P.; JIANG, L.; KUUSK, A.; LEWIS, P.; LI, X.; NI-MEISTER, W.; NILSON, T.; NORTH, P.; QIN, W.; SU, L.; TANG, S.; THOMPSONS, R.; VERHOEF W.; WANG, H.; WANG, J.; YAN, G; ZANG, H. Radiation Transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: results from the second phase. Journal of Geophysical Research, v.109, p.1-19, 2004.

PIROMAL, R. A. S. **Avaliação do modelo 5-SCALE para simular valores de reflectância de unidades da paisagem da Floresta Nacional do Tapajós**. 2006. 151p. (INPE-14645-TDI/1205). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos. 2006. Disponível em: http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/07.14.17.14>.

PONZONI, F. J. Aplicação do modelo SAIL no estudo da reflectância espectral de dosséis de mudas de Eucalyptus sp. e de Aspidosperma sp. 1993. 206 p. (INPE-6650-TAE/31). Tese de Doutorado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1993.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação. São José dos Campos: Parêntese. 135 p, 2007.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação.** São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, 2012. 176 p.

RICHTER, K.; ATZBERGER, C.; VUOLO, F.; D'URSO, G. Evaluation of Sentinel-2 Spectral Sampling for Radiative Transfer Model Based LAI Estimation of Wheat, Sugar Beet, and Maize. **IEEE Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 4, n. 2, June, 2011.

ROSS, J. **The radiation regime and architecture of plant stands**. London: Junk, 1981. 391 p.

SCHLERF, M.; ATZBERGER, C.; HILL, J. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data. **Remote sensing of Environment**, n. 95, p. 177-194, 2005.

SCHLERF, M.; ATZBERGER, C. Inversion of a forest reflectance model to estimate structural canopy variables from hyperspectral remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 281-294, 2006.

SELLERS, P. J. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration, II. the role of biophysics in the linearity of their interdependence. **Remote Sensing of Environment**, v. 21, n. 2, p. 143-183, 1987.

TUCKER, C.J.; GARRAT, M.W. Leaf optical system modeled as an stochastic process. **Applied Optics**, v.16, p. 635-642, 1977.

VERHOEF, W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. **Remote Sensing of Environment**, v.16, p. 125–141, 1984.

VERHOEF, W.; JIA, L.; XIAO, Q.; SU, Z. Unified optical-thermal four-stream radiative transfer theory for homogeneous vegetation canopies. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,** v. 45, n. 6, June, 2007

VESCOVO, L.; WOHLFAHRT, G.; BALZAROLO, M.; PILLONI, S.; SOTTOCORNOLA, M.; RODEGHIERO, M.; GIANELLE, D. New spectral vegetation indices based on the near-infrared shoulder wavelengths for remote detection of grassland phytomass. **International Journal Of Remote Sensing**, v. 33, n. 7, p. 2178-2195, 2012.

VINCINI, M.; CALEGARI, F.; CASA, R. Sensitivity of leaf chlorophyll empirical estimators obtained at Sentinel-2 spectral resolution for different canopy structures. **Precision Agric.** v.17, p. 313–331, 2016.

WANJURA, D.F.; HATFIELD, J.L. Vegetative and optical characteristics of fourrow crop canopies. **International Journal of Remate Sensing**. v.9, n. 2, p. 249-258, 1988.

WELLES, J.M.; COHEN, S. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, n. 9, p. 1335-1342, 1996.

XAVIER, A. C.; SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C. Variação do índice de área foliar em clones de Eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, v.26, n.4, p.421-427, 2002.

ZARCO-TEJADA, P. J.; RUEDA, C. A.; USTIN, S. L. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. **Remote Sensing of Environment**, v. 85, n. 1, p. 109-124, 2003.

ZHOU, J.; PROISY, C.; DESCOMBES, X.; LE MAIRE, G.; NOUVELLON, Y.; STAPE, J. L. ; VIENNOIS, G. ; ZERUBIA, J. ; COUTERON, P. Mapping local density of young Eucalyptus plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images. **Forest Ecology and Management.** v. 301,p. 129–141, 2013.

APÊNDICE A – SCRIPT EM R DE EXTRAÇÃO DOS DADOS ORBITAIS

install.packages("maptools") install.packages("rgdal") require(raster) require(rgdal) require(maptools)

itatinga_clones<readOGR(dsn="C:/Users/LTID/Dropbox/Mestrado/Processamento/Dados_Ponz oni_05_04_2016_CONVERSALENIO/shp",layer="Repeticoes_Itatinga", verbose = TRUE) img<brick("C:/Users/LTID/Dropbox/Mestrado/Processamento/Dados_Ponzoni_05_0 4_2016_CONVERSALENIO/output/img1_.tif")

img <- img/10000
itatinga_clones <- spTransform(itatinga_clones, crs(img))
img_crop <- crop(img, itatinga_clones)
extr <- extract(img, itatinga_clones, fun = mean, na.rm = TRUE)
for (i in seq_len(ncol(extr))) itatinga_clones[[colnames(extr)[i]]] <- extr[,i]
itatinga_clones@data\$ID=paste(itatinga_clones@data\$Field_1, 'r',
itatinga_clones@data\$Field_2,'c', sep =")
extr = data.frame(extr)
extr\$ID = ""
extr\$ID = itatinga_clones@data\$ID
#View(extr)
write.table(extr, file = "r_output_imagery_WV3.csv", sep = ",", col.names = NA,
qmethod = "double")</pre>

APÊNDICE B – SCRIPT EM R DE CORRELACÃO DADOS SIMULADOS E DADOS ORBITAIS

```
#libraries
# LINHAS A SEREM MODIFICADAS PARA ALTERAR A REPETIÇÃO - LINHA
34 E LINHA 172
library(gdata)
library(plyr)
require(broom)
#functions
Imp <- function (modelobject) {
 if (class(modelobject) != "lm") stop("Not an object of class 'lm' ")
 f <- summary(modelobject)$fstatistic
 p \le pf(f[1],f[2],f[3],lower.tail=F)
 attributes(p) <- NULL
 return(p)
#leitura dados
dados orbitais
read.xls("C:/Users/LTID/Dropbox/Mestrado/Processamento/Resultados/IMG_R
FS_WV3/INPUT_Resposta_por_clones.xlsx",
```

perl = "C:/Perl64/bin/perl.exe") # Lê a planilha com os dados orbitais gerados pelo modelo e armazena em uma variável HM <-

<-

<-

read.xls("C:/Users/LTID/Dropbox/Mestrado/Processamento/Resultados/MODEL O OUTPUT/HM.xlsx",

perl = "C:/Perl64/bin/perl.exe")

Μ

}

```
read.xls("C:/Users/LTID/Dropbox/Mestrado/Processamento/Resultados/MODEL
O OUTPUT/M.xlsx",
```

perl = "C:/Perl64/bin/perl.exe")

В

```
<-
read.xls("C:/Users/LTID/Dropbox/Mestrado/Processamento/Resultados/MODEL
O OUTPUT/B.xlsx",
        perl = "C:/Perl64/bin/perl.exe")
dados_orbitais$CLONE <- NULL
HM$ID <- NULL
HM$CLONE <- NULL
M$ID <- NULL
M$CLONE <- NULL
B$ID <- NULL
B$CLONE <- NULL
```

```
dados_orbitais_rep <- subset(dados_orbitais, dados_orbitais$REP == '1') #
MUDAR A REPETIÇÃO AQUI
dados_orbitais_rep$REP <- NULL
```

#inicio codigo

##HM

n <-7

```
mycoefsHM<-
                   sapply(1:n,
                                   function(x)
                                                   summary(Im(HM[,x]
dados_orbitais_rep[,x])))
pvalueHM <- data.frame(t(data.frame(sapply(1:n, function(x) Imp(Im(HM[,x] \sim
dados orbitais rep[,x])))))
mycoefsHM<- subset(mycoefsHM, row.names(mycoefsHM) == 'coefficients')
tabela_coef1HM<- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1))
 tabela_coef1HM[i] <- as.numeric(mycoefsHM[[i]][7])
}
tabela_coef1HM<- data.frame(tabela_coef1HM)
tabela coef2HM<- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1))
 tabela coef2HM[i] <- as.numeric(mycoefsHM[[i]][8])
}
tabela_coef2HM<- data.frame(tabela_coef2HM)
tabela_incretaHM <- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1))
 tabela_incretaHM[i] <- as.numeric(mycoefsHM[[i]][2])
}
tabela incretaHM<- data.frame(tabela incretaHM)
tabela_errpadHM <- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1)){
 tabela_errpadHM[i] <- as.numeric(mycoefsHM[[i]][4])
}
tabela_errpadHM<- data.frame(tabela_errpadHM)
tabela_tHM <- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1))
 tabela_tHM[i] <- as.numeric(abs((tabela_incretaHM[i]-1)/tabela_errpadHM[i]))
}
```

```
tabela tHM <- t(data.frame(as.numeric(tabela tHM)))
tabela_pHM <- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1))
 tabela_pHM[i] <- pt(tabela_tHM[[i]], 14, lower.tail = FALSE)
tabela_pHM <- data.frame(tabela_pHM*2)
## M
n <-7
mycoefsM<-
                  sapply(1:n,
                                    function(x)
                                                     summary(Im(M[,x]
dados_orbitais_rep[,x])))
pvalueM <- data.frame(t(data.frame(sapply(1:n, function(x) Imp(Im(M[,x] \sim
dados orbitais rep[,x])))))
mycoefsM<- subset(mycoefsM, row.names(mycoefsM) == 'coefficients')
tabela_coef1M<- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1)){
 tabela_coef1M[i] <- as.numeric(mycoefsM[[i]][7])
}
tabela coef1M<- data.frame(tabela coef1M)
tabela_coef2M<- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1)){
 tabela_coef2M[i] <- as.numeric(mycoefsM[[i]][8])
}
tabela_coef2M<- data.frame(tabela_coef2M)
tabela incretaM <- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1))
 tabela_incretaM[i] <- as.numeric(mycoefsM[[i]][2])
}
tabela_incretaM<- data.frame(tabela_incretaM)
tabela_errpadM <- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1))
 tabela_errpadM[i] <- as.numeric(mycoefsM[[i]][4])
}
tabela_errpadM<- data.frame(tabela_errpadM)
tabela_tM <- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1)){
 tabela_tM[i] <- as.numeric(abs((tabela_incretaM[i]-1)/tabela_errpadM[i]))
}
tabela_tM <- t(data.frame(as.numeric(tabela_tM)))
tabela_pM <- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1))
```

```
tabela_pM[i] <- pt(tabela_tM[[i]], 14, lower.tail = FALSE)
}
tabela_pM <- data.frame(tabela_pM*2)
##B
n <-7
                  sapply(1:n,
mycoefsB<-
                                    function(x)
                                                      summary(Im(B[,x]
dados orbitais rep[,x])))
pvalueB <- data.frame(t(data.frame(sapply(1:n, function(x) Imp(Im(B[,x] \sim
dados_orbitais_rep[,x])))))
mycoefsB<- subset(mycoefsB, row.names(mycoefsB) == 'coefficients')
tabela coef1B<- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1))
 tabela_coef1B[i] <- as.numeric(mycoefsB[[i]][7])
ł
tabela_coef1B<- data.frame(tabela_coef1B)
tabela_coef2B<- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1))
 tabela_coef2B[i] <- as.numeric(mycoefsB[[i]][8])
}
tabela_coef2B<- data.frame(tabela_coef2B)
tabela_incretaB <- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1)){
 tabela incretaB[i] <- as.numeric(mycoefsB[[i]][2])
}
tabela_incretaB<- data.frame(tabela_incretaB)
tabela_errpadB <- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1))
 tabela_errpadB[i] <- as.numeric(mycoefsB[[i]][4])
}
tabela errpadB<- data.frame(tabela errpadB)
tabela_tB <- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1)){
 tabela_tB[i] <- as.numeric(abs((tabela_incretaB[i]-1)/tabela_errpadB[i]))
}
tabela_tB <- t(data.frame(as.numeric(tabela_tB)))
tabela_pB <- matrix(NA, nrow=1, ncol=7)
for(i in seq(1,7,1))
 tabela_pB[i] <- pt(tabela_tB[[i]], 14, lower.tail = FALSE)
}
tabela_pB <- data.frame(tabela_pB*2)
```

organiza e exporta os dados

tabela_rep <- rbind(pvalueHM, tabela_coef1HM, tabela_pHM, pvalueM, tabela_coef1M, tabela_pM, pvalueB, tabela_coef1B, tabela_pB)

row.names(tabela_rep) <- c('HM pvalue REP', 'HM coefB0', 'HM H1_B0<>1', 'M pvalue REP', 'M coefB0','M H1_B0<>1', 'B pvalue REP', 'B coefB0', 'B H1_B0<>1') names(tabela_rep) <- c('BLUE', 'GREEN', 'YELLOW', 'RED', 'RED.EDGE', 'NIR1','NIR2') write.table(tabela_rep,

"C:/Users/LTID/Dropbox/Mestrado/Processamento/Resultados/REP1.txt", sep = "\t") # MUDAR O OUTPUT DA REPETIÇÃO AQUI