

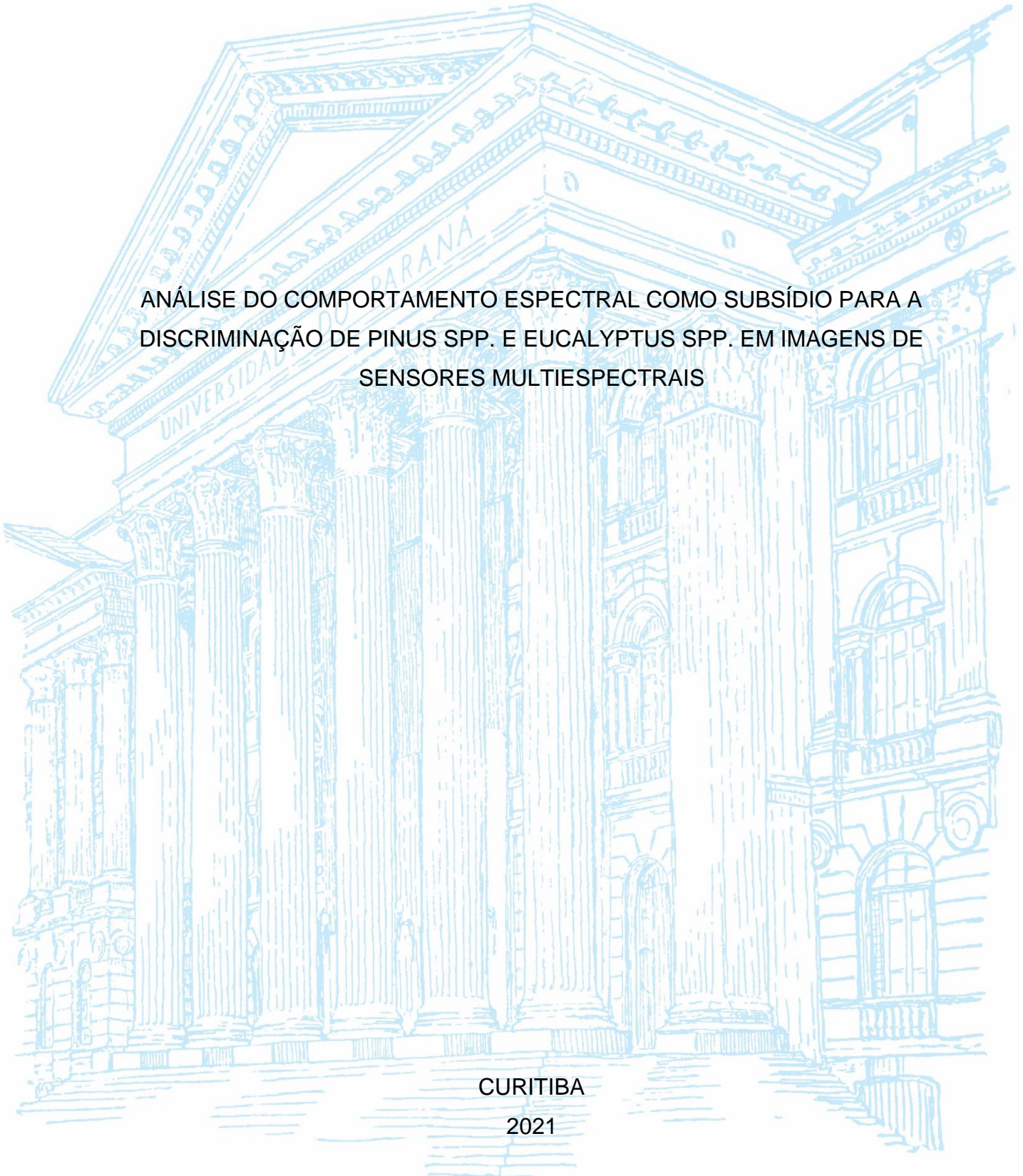
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ISABELA ALVARENGA DE MATTOS LANDIM

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL COMO SUBSÍDIO PARA A
DISCRIMINAÇÃO DE PINUS SPP. E EUCALYPTUS SPP. EM IMAGENS DE
SENSORES MULTIESPECTRAIS

CURITIBA

2021



ISABELA ALVARENGA DE MATTOS LANDIM

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL COMO SUBSÍDIO PARA A
DISCRIMINAÇÃO DE PINUS SPP. E EUCALYPTUS SPP. EM IMAGENS DE
SENSORES MULTIESPECTRAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Orientador: Prof. Dr. Hideo Araki.

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo de Campos Macedo

CURITIBA

2021

TERMO DE APROVAÇÃO

ISABELA ALVARENGA DE MATTOS LANDIM

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL COMO SUBSÍDIO PARA A DISCRIMINAÇÃO DE PINUS SPP. E EUCALYPTUS SPP. EM IMAGENS DE SENSORES MULTIESPECTRAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Prof. Dr. Hideo Araki

Orientador – Departamento de Geomática, UFPR.

Prof. Dr. Rodrigo de Campos Macedo

Coorientador - Departamento de Geomática, UFPR.

Prof^a. Dr^a. Ana Paula Dalla Corte

Departamento de Ciências Florestais, UFPR.

Cidade, 29 de março de 2021.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a Deus, por olhar sempre por mim e por ouvir minhas orações desde o início desta trajetória.

À minha mãe, Márcia, minha orientadora da vida, por todo amor e apoio incondicional, por não ter me deixado desistir tantas vezes e por corrigir, rigorosamente, todo e qualquer texto que redijo.

Para todos os meus familiares, em especial meu pai, Elixandro, meus irmãos, Gabriel e Manuela, e minha madrinha, Ângela, que sempre estiveram por perto. Agradeço por todo apoio, por todos os conselhos e por toda motivação.

Aos meus tios Rubens, Fábria e Déborah, que nos acolheram em Curitiba e proporcionaram a realização deste grande sonho.

Ao meu noivo, Gabriel, que desde a infância acreditou em mim, me apoiou e se dispôs a seguir o sonho da graduação na Universidade Federal do Paraná ao meu lado.

Aos meus colegas de turma e de trabalho, em especial, Eliana Vieira, Larissa Pinto, Juliana Hreczuck, Talles Henrique, Gabriel Bregolin, Victor Medina e Thalita Mascarenhas, por me ensinarem muito e por tornarem a minha jornada muito mais agradável.

Para todos os meus professores, em especial meus orientadores, Hideo Araki e Rodrigo Macedo, com quem pude trabalhar, aprender muito e me apaixonar ainda mais por sensoriamento remoto.

À Klabin, pela disponibilidade e suporte, através do fornecimento da base de dados e de discussões enriquecedoras, que permitiram a realização deste trabalho.

Para toda a equipe da Pöyry consultoria florestal, pela experiência profissional proporcionada, a qual contribuiu para a definição do tema deste trabalho.

Por fim, meus sinceros agradecimentos a esta Universidade que, gratuitamente, acolheu-me e me capacitou, da qual me orgulharei para sempre de ter feito parte.

“O Homem deve elevar-se acima da Terra – ao topo da atmosfera e além – para somente assim entender na totalidade o mundo em que vive”. (Sócrates, 500 A.C.)

RESUMO

Dentre as principais áreas que demandam por informações remotas e utilizam das aplicações de imagens de satélite para a aquisição de dados, destaca-se a atividade de silvicultura, recobrando atualmente 9 milhões de hectares do território nacional (IBÁ 2020). Considerando esta significativa dimensão, formas de identificação de plantios florestais, principalmente dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, vem sendo cada vez mais exploradas, porém, esta atividade é atualmente realizada de forma manual, baseada na experiência do intérprete. Reconhecendo a necessidade de otimizar a tarefa de mapeamento florestal, o presente trabalho tem o objetivo de apoiar o desenvolvimento de metodologias automatizadas, através da técnica de caracterização espectral, procurando diferenciar plantios de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*, localizados na região do município de Telêmaco Borba, no Paraná. O estudo estabeleceu uma abordagem em escala multiespectral, multitemporal e multisensor, caracterizando espectralmente os plantios, a partir da análise de imagens dos sensores OLI (Landsat 8) e MSI (Sentinel-2), avaliando o potencial de discriminação dos povoamentos em estágios de crescimento equivalentes. Como resultado, a aplicação atingiu seu objetivo, caracterizando espectralmente os plantios e identificando uma potencial diferenciação entre talhões jovens e maduros, através da amostragem de valores de reflectância em escala multitemporal, identificando para o comprimento do Infravermelho Médio (MIR e SWIR 1), para plantios jovens de *Pinus spp.*, valores de reflectância média de $0,12 \pm 0,01$, e para plantios jovens de *Eucalyptus spp.* a reflectância média de $0,33 \pm 0,05$, durante os períodos de outono e inverno. Enquanto para plantios maduros os valores médios amostrados corresponderam a $0,10 \pm 0,004$ para *Pinus spp.* e $0,12 \pm 0,01$ para *Eucalyptus spp.*, durante o período da primavera. Apesar do êxito alcançado, se faz necessário o refinamento da metodologia proposta e possivelmente a combinação de técnicas alternativas de aquisição remota de dados, a fim de atingir uma efetiva diferenciação entre os gêneros.

Palavras-chave: Comportamento Espectral. Sensores Multiespectrais. Gêneros Florestais. Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

Among the main areas that demand remote information and use satellite imagery applications for data acquisition, the forestry activity stands out, currently covering 9 million hectares of the national territory (IBÁ 2020). Considering this significant dimension, ways of identifying forest plantations, mainly of the *Pinus* and *Eucalyptus*, has been increasingly explored, however, this activity is currently carried out manually, based on the experience of the interpreter. Recognizing the need to optimize the task of forest mapping, the present study aims to support the development of automated methodologies, through the spectral characterization technique, seeking to differentiate *Pinus spp.* and *Eucalyptus spp.* plantations, maintenance in the region of the municipality of Telêmaco Borba, in Paraná. The study collected an approach on a multispectral, multitemporal and multisensor scale, spectrally characterizing the plantations, from the analysis of images from the OLI (Landsat 8) and MSI (Sentinel-2) sensors, evaluating the potential of discrimination of the stands in growth stages equivalent. As a result, the application reached its goal, specifying the plantations spectral and identifying a potential differentiation between young and mature plots, by sampling reflectance values on a multitemporal scale, identifying for the length of the Medium Infrared (MIR and SWIR 1), for young plantings of *Pinus spp.*, average reflectance values of $0.12 + 0.01$, and for young plantings of *Eucalyptus spp.* the average reflectance of $0.33 + 0.05$, during the autumn and winter periods. While for mature plantings the average values sampled corresponded to $0.10 + 0.004$ for *Pinus spp.* and $0.12 + 0.01$ for *Eucalyptus spp.*, during the spring period. Despite the success achieved, it is necessary to refine the proposed methodology and possibly the combination of alternative techniques for remote data acquisition, in order to achieve an effective differentiation between genre.

Keywords: Spectral Behavior. Multispectral sensors. Forest Genre. Remote sensing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS	15
FIGURA 2 - CURVA DE FATOR DE REFLECTÂNCIA TÍPICA DE UMA FOLHA VERDE.....	16
FIGURA 3 - VALORES DE REFLECTANCIA NA SUPERFÍCIE (FRB) EXTRAÍDOS DAS IMAGENS ETM+ PARA CADA ALVO REPRESENTADO.....	18
FIGURA 4 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	23
FIGURA 5 – ESQUEMA METODOLOGICO	28
FIGURA 6 - COMPARATIVO ENTRE AS FAIXAS ESPECTRAIS IMAGEADAS PELOS SENSORES UTILIZADOS	31
FIGURA 7 - PERFIL ESPECTRAL DOS PLANTIOS (16/09/2019 - SENSOR OLI) ..	35
FIGURA 8 - PERFIL ESPECTRAL DOS PLANTIOS (14/07/2019 - SENSOR OLI) ..	36
FIGURA 9 - PERFIL ESPECTRAL DOS PLANTIOS (24/03/2019 - SENSOR OLI) ..	36
FIGURA 10 - PERFIL ESPECTRAL DOS PLANTIOS (05/10/2019 - SENSOR MSI)	37
FIGURA 11 - PERFIL ESPECTRAL DOS PLANTIOS (27/07/2019 - SENSOR MSI)	38
FIGURA 12 - PERFIL ESPECTRAL DOS PLANTIOS (17/06/2019 - SENSOR MSI)	38
FIGURA 13 - PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA ANUAL NO PARANÁ (2019)	39
FIGURA 14 – COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS PLANTIOS EM VALORES DE REFLECTÂNCIA MÁXIMA, MÍNIMA, MÉDIA E DESVIO PADRÃO (NIR E NARROW NIR).....	41
FIGURA 15 – AMOSTRAS SOBRE TALHÕES DE EUCALYPTUS SPP. AOS 2 ANOS.....	42
FIGURA 16 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS PLANTIOS EM VALORES DE REFLECTÂNCIA MÁXIMA, MÍNIMA, MÉDIA E DESVIO PADRÃO (REGIAO MIR 1)	44

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - LISTA DE FONTE DE DADOS.....	24
TABELA 2 - DISTRIBUIÇÃO DOS TALHÕES POR IDADE DE PLANTIOS NA BASE FORNECIDA	25
TABELA 3 - BANDAS UTILIZADAS NA APLICAÇÃO.....	29
TABELA 4 - MORFOLOGIA DE ALVOS OBSERVADOS (R8/G11/B4 – SENTINEL 2)	33

LISTA DE SIGLAS

<i>DEM</i>	- <i>Digital Elevation Model</i>
<i>DOS</i>	- <i>Dark Object Subtraction</i>
<i>ESA</i>	- <i>European Space Agency</i>
<i>ETM</i>	- <i>Enhanced Thematic Mapper</i>
<i>EVI</i>	- <i>Enhanced Vegetation Index</i>
<i>IBÁ</i>	- <i>Instituto Brasileiro de Árvores</i>
<i>INPE</i>	- <i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
<i>MIR</i>	- <i>Mid-Infrared</i>
<i>MSI</i>	- <i>Multispectral Instrument</i>
<i>NASA</i>	- <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<i>ND</i>	- <i>Níveis Digitais</i>
<i>NDVI</i>	- <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
<i>NIR</i>	- <i>Near-Infrared</i>
<i>OLI</i>	- <i>Operational Land Image</i>
<i>QGIS</i>	- <i>Quantum GIS</i>
<i>REM</i>	- <i>Radiação Eletromagnética</i>
<i>SCP</i>	- <i>Semi-Automatic Classification Plugin</i>
<i>SR</i>	- <i>Reflectância na superfície</i>
<i>SWIR</i>	- <i>Short-wave Infrared</i>
<i>TIRS</i>	- <i>Thermal Infrared Sensor</i>
<i>USGS</i>	- <i>United States Geological Survey</i>
<i>WGS 84</i>	- <i>World Geodetic System (1984)</i>

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 – CONVERSÃO EM VALORES DE REFLECTÂNCIA (TOA).....	18
EQUAÇÃO 2 – CORREÇÃO VALOR DO PIXEL (DOS-1).....	22

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO	15
2.2 CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE PINUS E EUCALYPTUS	17
2.3 TRATAMENTO DE DADOS E CORREÇÕES.....	21
3 MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	23
3.2 DADOS UTILIZADOS.....	24
3.2.1 Arquivos vetoriais	24
3.2.2 Imagens Multiespectrais.....	25
3.2.3 <i>Softwares</i> Utilizados	27
3.3 METODOLOGIA.....	27
3.3.1 Seleção de Imagens.....	28
3.3.2 Pré-Processamento.....	29
3.3.3 Definição da Malha Amostral.....	30
3.3.4 Coleta de Valores e a Caracterização Espectral	34
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	35
4.1 CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DOS PLANTIOS.....	35
4.2 COMPORTAMENTO ESPECTRAL – REGIÃO NIR	40
4.3 COMPORTAMENTO ESPECTRAL – REGIÃO MIR 1	43
5 CONCLUSÃO	46
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A obtenção de informações espaciais por meio de aplicações de sensoriamento remoto ganha destaque a partir do cenário de pandemia vivenciado, pois proporciona compreender previamente as características e as dinâmicas dos fenômenos dispostos sobre a superfície terrestre, sem a necessidade de deslocamento ou contato físico com o alvo observado.

Para o dimensionamento e a compreensão da dinâmica destes fenômenos, a técnica de interpretação de imagens de satélite se destaca em meio as aplicações promovidas pelo sensoriamento remoto, proporcionando a aquisição de dados espaciais através de fontes e ferramentas atualmente acessíveis e de baixo custo.

Aliada a interpretação de imagens satélite estão incorporadas técnicas de processamento de imagens e de caracterização espectral de alvos, que permitem, respectivamente, tratar os efeitos atmosféricos incidentes sobre os dados originais, otimizar a visualização e compreender como determinada informação responde ao processo de imageamento, a partir do valor de Nível Digital (ND) registrado, definindo sua aparência na imagem, conseqüentemente permitindo a distinção dos variados tipos alvos observados.

Dentre as principais áreas que demandam por informações remotas e utilizam das aplicações de imagens de satélite para a aquisição de dados, destaca-se a atividade de silvicultura, que compõem mais de 1% do uso e ocupação do território nacional, totalizando cerca de 9 milhões de hectares, sendo que 77,4% desta área correspondente a plantios de Eucalyptus e 18,2% correspondente a plantios de Pinus (IBÁ, 2020).

Considerando a significativa dimensão das áreas de florestas plantadas no Brasil, a identificação destes alvos vem sendo cada vez mais explorada, principalmente a extração de características específicas dos principais gêneros de plantio, pois promovem a gestão e o monitoramento de florestas com economia de recursos.

Ao longo dos anos, aplicações semi-automatizadas para a identificação de plantios vem sendo desenvolvidas e exploradas, através de técnicas de processamento e classificação automática de imagens. Porém, estes métodos podem gerar erros que, dependendo da sua magnitude, somente a correção manual permite repará-los, baseada na experiência do interprete em diferenciar visualmente os alvos

observados sobre a imagem. Desta forma, destaca-se a necessidade de otimizar a etapa de correção manual e promover o refinamento das técnicas de mapeamento florestal.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Caracterizar espectralmente os gêneros florestais *Pinus* e *Eucalyptus* a partir de imagens multiespectrais de diferentes sensores orbitais, a fim de subsidiar técnicas de diferenciação entre estes gêneros.

1.1.2 Objetivos específicos

- Adquirir imagens multiespectrais do ano de 2019 de diferentes períodos sazonais, que recubram a região de estudo;
- Corrigir as bandas dos efeitos atmosféricos e da geometria de aquisição, tendo em vista o aspecto multitemporal e de múltiplos sensores da aplicação;
- Agrupar as bandas corrigidas e coletar sobre elas os valores de *pixel* representativos de ambos os gêneros florestais, com o auxílio de arquivos vetoriais de talhões georreferenciados;
- Definir o perfil espectral dos plantios;
- Analisar os resultados obtidos quanto às características espectrais evidenciadas, buscando diferenciar os diferentes gêneros florestais.

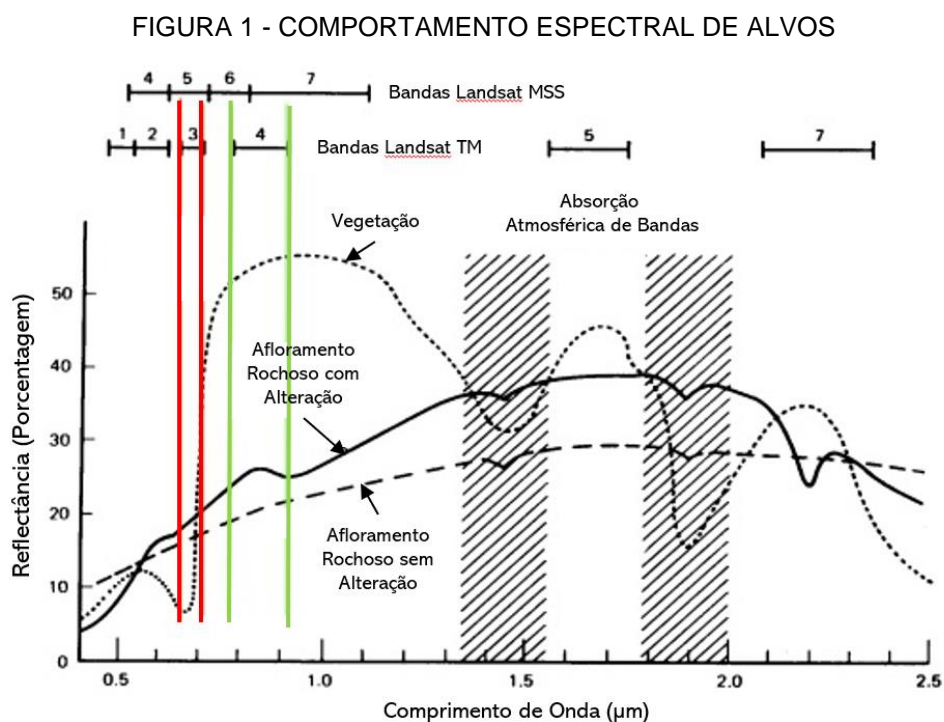
2 REVISÃO DE LITERATURA

Para compreender as alternativas de metodologias já existentes para discriminação dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* por meio de técnicas de sensoriamento remoto, como também para definir a metodologia aplicada neste trabalho, as seguintes seções apresentam os conhecimentos técnicos essenciais para que os objetivos deste estudo fossem alcançados.

2.1 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO

Por conta das diferentes composições físico-químicas presentes nas feições terrestres, assim como as diferentes texturas, densidades destes objetos e posição no momento da aquisição, cada “alvo” apresenta suas próprias características quanto ao comportamento espectral (FIGUEIREDO, 2005).

Segundo Figueiredo (2005), os sistemas de sensores acoplados aos satélites são capazes de detectar essas respostas espectrais, ou seja, as diferenças no comportamento espectral de cada alvo observado. A FIGURA 1 ilustra a reflectância que pode ser observada em diferentes alvos dispostos na superfície terrestre, ilustrando também as diferentes bandas de alguns sensores responsáveis por detectar estas respostas.

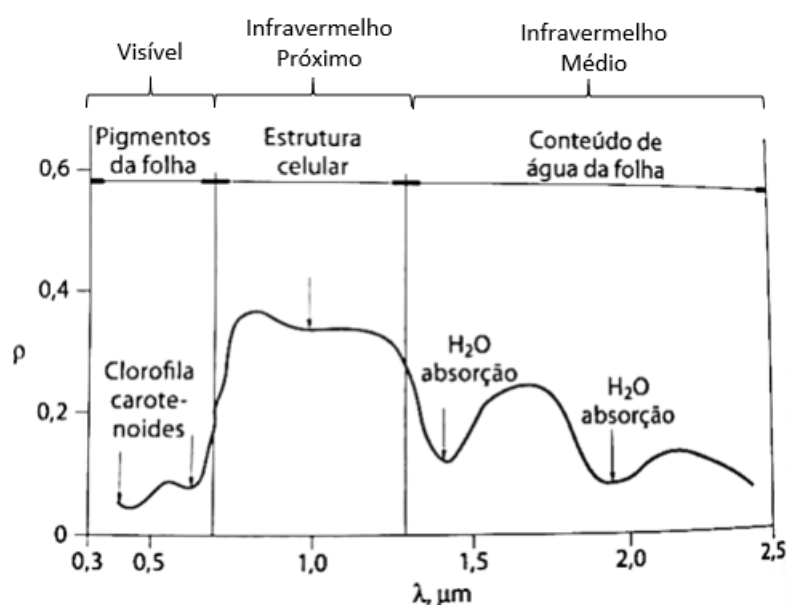


FONTE: Adaptado de Figueiredo (2005).

A fotossíntese é o principal processo na interação com a Radiação Eletromagnética (REM), que diferencia a vegetação de outros materiais. Os pigmentos fotossintetizantes como clorofila, xantofila e o caroteno são os agentes responsáveis pela absorção do espectro, principalmente na região do visível (PONZONI, 2012).

Analisando o fenômeno da reflectância, propriedade que relaciona a intensidade da radiação refletida por um objeto com a intensidade de radiação incidente em determinada região espectral, a FIGURA 2 a seguir representa a reflectância típica de uma folha verde sadia (PONZONI, 2012).

FIGURA 2 - CURVA DE FATOR DE REFLECTÂNCIA TÍPICA DE UMA FOLHA VERDE



FONTE: Adaptado de Ponzoni (2012, p. 24).

Na figura acima, é possível observar que, de todo o espectro analisado, a reflectância da REM é menor na faixa do visível, tendo em vista a ocorrência de maior absorção da radiação nessa região por meio dos pigmentos foliares. Ponzoni (2012, p. 25) descreve que os pigmentos predominantes na estrutura da folha absorvem radiação principalmente na região do azul (próximo a 0,45 μm), mas somente a clorofila absorve na região do vermelho (0,65 μm).

É possível observar que na região do infravermelho próximo (0,72 – 1,1 μm) ocorre a menor absorção da radiação, resultando nos elevados valores de reflectância observados neste comprimento, ocasionados pela interação da energia incidente com a estrutura interna da folha. Quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno incidente e, conseqüentemente, maiores serão os

valores dos fatores de reflectância (PONZONI, 2012). É importante considerar que fatores externos à folha podem contribuir nestes valores, como por exemplo, a disponibilidade de água, justificando as aplicações de sensoriamento remoto nesta região do espectro para identificar se a vegetação observada é saudável ou não.

Na região do infravermelho médio, é possível observar que, apesar dos consideráveis valores de reflectância representados na curva, a absorção de água na sua forma líquida afeta a reflectância da radiação das folhas. A água em sua forma líquida absorve consideravelmente a radiação incidente na região do espectro compreendida entre 1,3 μm e 2 μm , o que justifica o comportamento do fator de reflectância nesta região, apresentado na FIGURA 2 anteriormente exemplificada (PONZONI, 2012).

Apesar de se esperar que o comportamento espectral de um dossel seja idêntico ao de uma folha isolada, isto não ocorre, pois existe a atuação de subsistemas constituídos por frações de informação que interferem no comportamento da vegetação observada, como por exemplo, a fonte de radiação, a atmosfera, o solo, o relevo da região e o detetor do sensor imageador, além das próprias características químicas, morfológicas, fisiológicas e de umidade interna das folhas (PONZONI, 2012, p. 40).

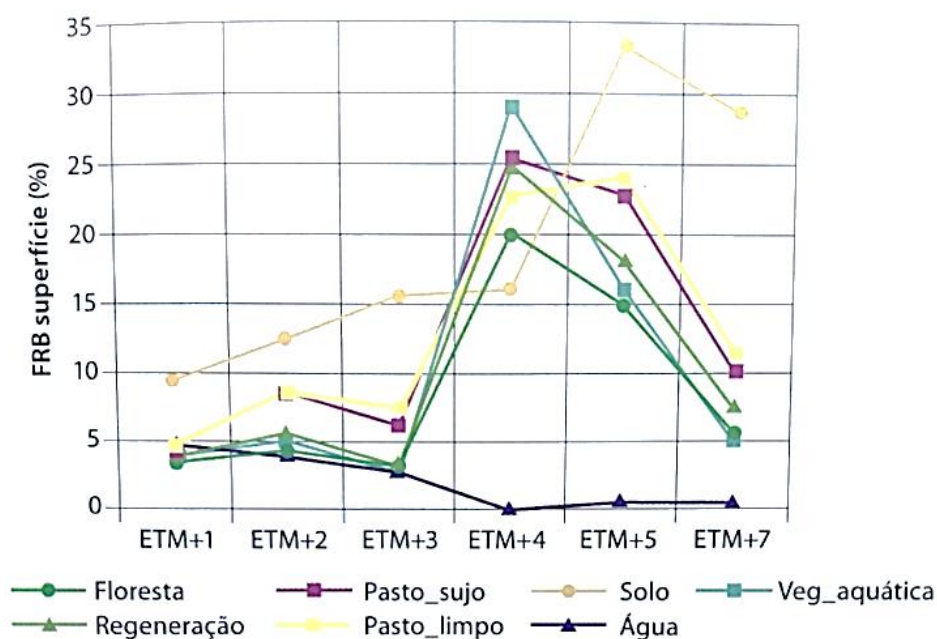
Curran (1993) destaca que a estrutura dos talhões como um todo, ou seja, a geometria do dossel, também pode determinar sua radiância, pois está diretamente correlacionada com a densidade, o diâmetro e a altura média das árvores. Novo (2010) descreve que o comportamento espectral da vegetação se modifica ao longo do ciclo vegetativo, sendo que as alterações fisiológicas e morfológicas se manifestam de modo diferenciado conforme a região do espectro, os tipos de cultura, inclusive os tipos de substrato.

2.2 CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE PINUS E EUCALYPTUS

O processo de caracterização espectral é responsável por identificar e compreender o comportamento espectral de alvos, por meio de valores de *pixel*. A partir da coleta deste valor, é possível definir o intervalo de valores NDs que representam cada classe de informação, possibilitando a busca por *pixels* na imagem que apresentem os mesmos significados ou mesmas características do alvo observado, de acordo com este intervalo.

A FIGURA 3 a seguir exemplifica a determinação do comportamento espectral de diferentes alvos sobre uma imagem do satélite Landsat 7, sensor ETM+, possibilitando definir o intervalo de valores de *pixel* que caracteriza cada uma das classes do mapeamento, de acordo com a faixa ou banda do espectro imageada (Bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7).

FIGURA 3 - VALORES DE REFLECTANCIA NA SUPERFÍCIE (FRB) EXTRAÍDOS DAS IMAGENS ETM+ PARA CADA ALVO REPRESENTADO.



FONTE: Ponzoni (2012, p. 140)

De acordo com PONZONI (2012, p.138), para caracterizar espectralmente os objetos existentes na superfície terrestre, faz-se necessário converter os NDs presentes nas imagens para valores de significado físico, como por exemplo, em valores de reflectância. Na FIGURA 3 anterior, o autor faz uso da conversão dos valores de NDs para reflectância na superfície (SR), tendo em vista inúmeros fatores extrínsecos aos sensores imageadores que modificam o real valor de ND de um objeto, como por exemplo, ângulo de incidência solar e geometria de visada do sensor no momento da aquisição da imagem, temperatura, umidade e espalhamento atmosférico.

A reflectância, portanto, é a capacidade de determinado objeto em refletir a radiação eletromagnética incidente sobre ele e é expressa por meio dos fatores de reflectância (ρ), fatores que representam não somente as características espectrais

definidas pelos aspectos físico-químicos que compõem o objeto observado, como também as características geométricas específicas da incidência da radiação, tendo em vista as diferentes geometrias dos objetos observados.

A conversão de valores de NDs em valores de reflectância implica em conhecer os fatores extrínsecos aos sensores no momento da aquisição da imagem. A EQUAÇÃO 1 a seguir exemplifica a conversão dos valores de NDs em valores de reflectância (ρ).

EQUAÇÃO 1 – CONVERSÃO EM VALORES DE REFLECTÂNCIA (TOA)

$$\rho = \frac{(\pi * L\lambda * d^2)}{(ESUN\lambda * \cos\theta_s)}$$

FONTE: SCP Documentation, 2021.

Em que ρ é a reflectância no topo da atmosfera (TOA) no momento da aquisição da imagem, caracterizada pela radiância espectral na abertura do sensor (radiância do satélite - $L\lambda$), a distância Terra-Sol (d) em unidades astronômicas, a irradiância solar média ($ESUN\lambda$), e ângulo de elevação solar (θ_s).

De acordo com Ponzoni (2012, p.23), a reflectância é parâmetro fundamental no estudo do comportamento espectral de alvos, conceito importante não somente para aqueles que pretendem compreender as técnicas de sensoriamento remoto, como também para aqueles que pretendem utilizar os produtos gerados a partir delas.

Para realizar a caracterização espectral de objetos se faz necessário compreender também a natureza morfológica dos alvos, de forma que, a partir deste conhecimento, torna-se possível determinar o comportamento espectral esperado do alvo sobre a imagem.

Ponzoni (2012, p. 138) também destaca que a resolução espacial da imagem utilizada no processo de caracterização espectral é um parâmetro importante, uma vez que o tamanho do pixel, aliado às dimensões dos objetos que se pretende caracterizar, define o grau de confiabilidade da caracterização.

Tendo em vista o objetivo deste trabalho de caracterizar não somente a vegetação, mas sim os gêneros florestais *Pinus* e *Eucalyptus*, foram elencados os estudos existentes que contemplaram a compreensão do comportamento espectral

destes alvos em sua metodologia, auxiliando na elaboração da metodologia deste trabalho.

Na tentativa de obter a informação de volume disponível em plantios comerciais por meio do sensoriamento remoto, o estudo de Alba (2016) propôs a identificação dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, realizando primeiramente uma caracterização espectral das espécies, posteriormente realizando uma análise de correlação entre índices espectrais e a variável biofísica volume.

Alba (2016) não obteve sucesso quanto à determinação de uma correlação existente entre os índices espectrais definidos nas imagens e o volume de madeira nos plantios, porém descreveu uma série de considerações relevantes para a realização da caracterização espectral de *Pinus elliotti* e *Eucalyptus grandis*. Seus resultados ressaltaram a possibilidade de diferenciar essas espécies a partir de imagens multiespectrais.

Em seu estudo foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8, sensor OLI. Alba (2016) evidenciou que as espécies folhosas (*Eucalyptus*) apresentam maior refletância se comparada a espécies coníferas (*Pinus*), tornando possível a sua diferenciação. A autora também evidencia que a resposta espectral dos povoamentos é sensível ao estágio de desenvolvimento dos indivíduos.

Em sua aplicação estabeleceu-se a relação entre a resposta espectral dos povoamentos de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliotti* em diferentes idades utilizando as bandas do infravermelho próximo (B5) e a do vermelho (B4), buscando a diferenciação dos estágios de crescimento de acordo com cada espécie.

A partir deste objetivo, os resultados da caracterização espectral evidenciaram que, para o povoamento de *Eucalyptus grandis* (com idades de 4, 18 e 23 anos), o aumento da idade proporcionou a diminuição da refletância na B5 e a redução da absorção na B4, enquanto para o povoamento de *Pinus elliotti* (com idades de 9 e 10 anos) apresentou o comportamento contrário, o aumento da idade proporcionou um acréscimo a refletância observada na B5 e maior absorção na B4.

Em outro estudo sobre a caracterização da dinâmica de índices de vegetação (NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; e EVI – Índice de Vegetação Melhorado) em plantações de *Pinus* no Brasil, Alvarez *et al.* (2013) encontraram um padrão similar ao observado no estudo de Alba (2016) para a banda do vermelho (B4). Sendo esses índices construídos a partir da normalização das bandas B4 e B5 do sensor MODIS, foi observado um decréscimo nos valores dos índices conforme o

envelhecimento do plantio. Segundo os autores, os valores de NDVI e EVI atingiram os maiores patamares entre 5 e 10 anos e após 11 e 12 anos os valores começaram a decrescer.

Carmello *et al.* (2015) utilizaram a técnica remota da construção de índices de vegetação para a discriminação de classes de idade e manejo de *Pinus taeda*, com o objetivo de identificar não somente a idade dos talhões, como também o regime de manejo das áreas plantadas por meio da indicação de desbastes, considerando duas principais situações: “não desbastado” e “com desbaste”. Para este estudo, foram utilizadas imagens do sensor *RapidEye* e dentre todos os índices de vegetação testados, houve destaque para o NDVI-RE (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada na Borda Vermelha), que permitiu diferenciar as três classes de plantio nas idades de 6, 10 e 14 anos. Para esse índice, também foi observado que para o *Pinus* jovem os valores de refletância são maiores, enquanto para o *Pinus* adulto ocorre a diminuição dos valores, por conta da maior absorção da REM.

O estudo proposto por Wagner (2005) utilizou imagens multiespectrais do sensor ASTER com a identificação de florestas de *Pinus* aplicada ao método de classificação por Máxima Verossimilhança, destacando que dentre as três combinações de bandas utilizadas, a melhor classificação obtida para diferenciação entre os diferentes tipos de vegetação (dentre elas os gêneros *Pinus*, em diferentes fases de crescimento, *Eucalyptus* e Araucária) foi a combinação NIR e SWIR (Infravermelho Próximo e Infravermelho de Ondas Curtas).

2.3 TRATAMENTO DE DADOS E CORREÇÕES

O método de correção atmosférica *Dark Object Substration* (DOS) proposto por Chavez (1996) tem como objetivo corrigir os efeitos atmosféricos incidentes sobre as imagens (espalhamento), a partir dos níveis digitais, sem a necessidade de obter dados sobre as condições atmosféricas da região imageada no momento da aquisição (SANCHES *et al.*, 2011), modelando também os efeitos de sombra ocasionados pela geometria de aquisição do sensor.

Assume-se que há uma grande probabilidade de existir *pixels* escuros nas imagens, originados pelas sombras geradas a partir da topografia da região imageada e do posicionamento do sensor com relação ao Sol no momento da aquisição (SANCHES *et al.*, 2011).

De acordo com Gomes *et al.* (2011), no método de correção atmosférica DOS-1 são considerados parâmetros como: Níveis digitais e frequência da banda de referência escolhida, posicionamento do satélite no momento da aquisição da imagem (j) e o espalhamento atmosférico incidente na imagem. A correção é aplicada *pixel a pixel* com base na seguinte equação (EQUAÇÃO 2):

EQUAÇÃO 2 – CORREÇÃO VALOR DO PIXEL (DOS-1)

$$Lp = Lmin - LDO1\%$$

FONTE: SCP Documentation, 2021.

Em que o valor do pixel corrigido (Lp) é obtido por meio do valor mínimo de contagem digital ($Lmin$) e o valor do brilho do objeto escuro, assumido como 0,01% do valor de contagem de todos os pixels da imagem considerada.

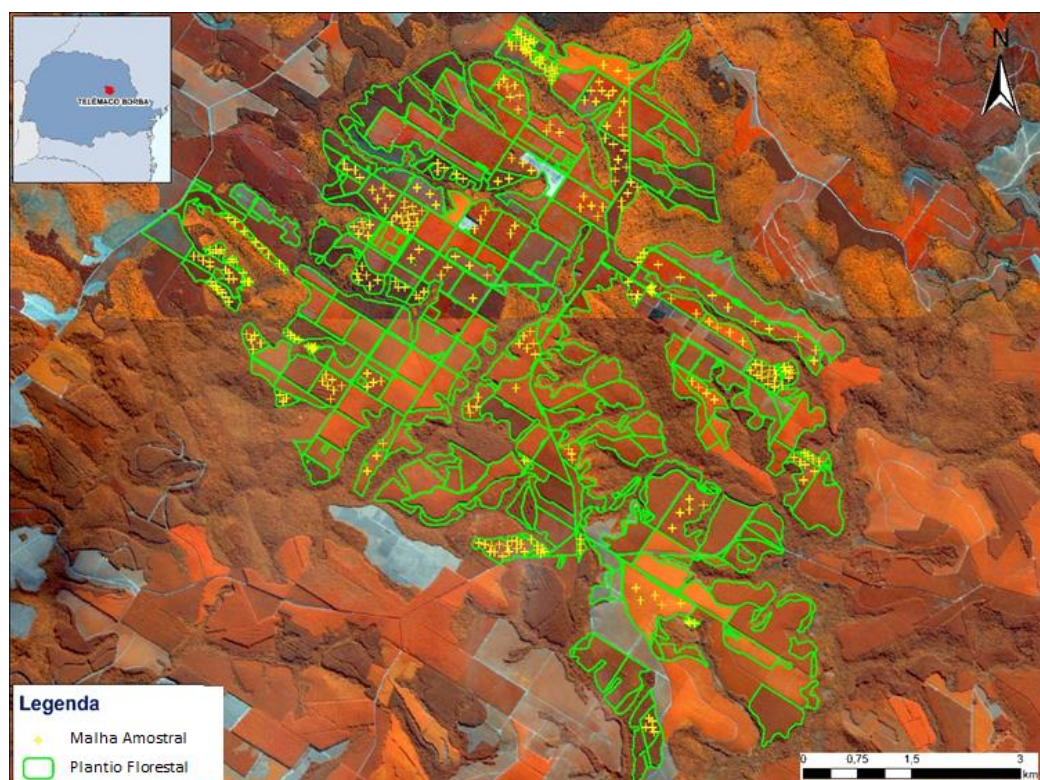
3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido com base nos materiais e na metodologia descrita nas sessões a seguir.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O desenvolvimento da caracterização espectral dos plantios de *Pinus* e *Eucalyptus* foi realizado considerando uma parcela de plantios florestais localizados na região do município de Telêmaco Borba, interior do estado do Paraná (FIGURA 4).

FIGURA 4 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A Autora (2021).

A delimitação dos plantios florestais localizados sobre a região de estudo apresentada foi disponibilizada em formato vetorial pela Klabin, que para a finalidade deste trabalho, apresentou as características detalhadas no tópico 3.2 a seguir.

3.2 DADOS UTILIZADOS

Para a realização deste trabalho foram utilizados os dados apresentados na tabela síntese a abaixo (TABELA 1).

TABELA 1 - LISTA DE FONTE DE DADOS

<i>Dado</i>	<i>Orbita Ponto</i>	<i>Data</i>	<i>Fonte</i>	<i>Link de acesso</i>
Imagens Landsat 8 (Sensor OLI)	221077	16/09/2019	USGS, INPE	https://earthexplorer.usgs.gov/ http://www.dgi.inpe.br/CDSR/
	221077	14/07/2019		
	221077	24/03/2019		
Imagens Sentinel-2 (Sensor MSI)	T22KEU A022386	05/10/2019	ESA, INPE	https://scihub.copernicus.eu/ http://www.dgi.inpe.br/CDSR/
	T22KEU A021385	27/07/2019		
	T22JET A019955	17/06/2019		
Limite de talhões (Arquivo Vetorial)	-	Fev/2020	Klabin	Dado privado

FONTE: A Autora (2021).

Com exceção da informação vetorial do limite de talhões fornecidos pela Klabin, os demais dados utilizados podem ser encontrados em mais de uma fonte, sendo o detalhamento de cada um deles descrito nas seções a seguir.

3.2.1 Arquivos vetoriais

A etapa de caracterização espectral dos plantios de *Pinus* e *Eucalyptus* contou com o apoio de arquivos vetoriais de uma fração de área plantada disponibilizados pela Klabin, localizada na região do município de Telêmaco Borba, conforme apresentado na FIGURA 4 anterior.

Em conjunto aos arquivos vetoriais fornecidos também foram disponibilizadas informações específicas dos talhões, como por exemplo, identificação de gênero, de espécie, de ano de plantio, de insumos aplicados, entre outras características particulares. A TABELA 2 a seguir apresenta um panorama da distribuição da informação fornecida no aspecto mais relevante para este trabalho: idade dos talhões.

TABELA 2 - DISTRIBUIÇÃO DOS TALHÕES POR IDADE DE PLANTIOS NA BASE FORNECIDA

Gênero	Idade	Representatividade na base (ha)	Representatividade na base (ha)
<i>Pinus spp.</i>	1 ano	290	1%
	2 anos	135	0%
	3 anos	1.882	5%
	4 anos	150	0%
	12 anos	2.894	8%
	14 anos	3.177	9%
	15 anos	3.744	10%
	16 anos	1.883	5%
	29 anos	1.883	5%
<i>Eucalyptus spp.</i>	1 ano	315	1%
	2 anos	358	1%
	3 anos	7.542	21%
	4 anos	2.477	7%
	5 anos	248	1%
	7 anos	195	1%
	8 anos	7.220	20%
	9 anos	378	1%
	11 anos	913	3%
	12 anos	165	0%
	29 anos	49	0%
	Total		35.901

FONTE: A Autora (2021).

As características da base vetorial fornecida permitem identificar que grande parte dos talhões de *Eucalyptus spp.* correspondem as idades de 3, 4 e 8 anos, possibilitando uma melhor distribuição de amostras nessas idades, ao longo do processo de coleta de valores de *pixel*. Já para as demais idades de plantio, principalmente para os talhões de 5, 12, 29 anos, existe restrições com relação ao número de amostras coletadas, por conta da menor disponibilidade de área de talhões. Para os plantios de *Pinus spp.* a figura indica que grande parte dos talhões disponíveis correspondem as idades de 12, 14 e 15 anos, enquanto os talhões de 1, 4 e 29 anos apresentam maiores restrições em relação a coleta.

3.2.2 Imagens Multiespectrais

Para atingir o objetivo de caracterização espectral proposto neste trabalho, foram adquiridas imagens de dois diferentes sensores, a fim de avaliar o potencial de diferenciação dos plantios. Os sensores escolhidos para o desenvolvimento foram: sensor OLI (*Operational Land Imager*), referente ao satélite Landsat 8, e o sensor MSI

(*Multispectral Instrument*), referente ao satélite Sentinel-2, sendo suas principais características descritas nos tópicos a seguir.

3.2.2.1 Programa Landsat

O programa americano Landsat é composto por uma série de 8 satélites desenvolvidos pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA) e seus dados (Imagens) apresentam o mais completo registro da superfície da Terra, destacando-se na escala multitemporal de informações, apresentando aquisições de imagens da superfície desde 1972, característica de grande valor para estudos de monitoramento em todo o globo (USGS, 2020).

As imagens Landsat estão disponíveis gratuitamente no catálogo de imagens do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e no catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esses dados são direcionados a aplicações de sensoriamento remoto e disponibilizados com níveis de processamento. A coleção de imagens disponíveis a Nível 1 TP, que será utilizada neste trabalho, apresenta correções relacionadas a calibração radiométrica e geométrica (ortorretificadas a partir de dados de modelo digital de elevação – DEM).

Lançado em 2013, o satélite Landsat 8 é um satélite que possui dois sensores imageadores, sendo eles o OLI e o TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), capazes de imagear os alvos sobre as faixas do espectro em diferentes níveis de resolução espacial: Banda Pancromática (15 metros), Multiespectral (30 metros) e Termal (100 metros, reamostrada para 30 metros).

3.2.2.2 Programa Copernicus (Sentinel-2)

A missão Sentinel-2 é composta por uma constelação de dois satélites em órbita polar, posicionados em órbita sincronizada com o Sol. Tem como principal objetivo monitorar as variações das condições da superfície terrestre, desta forma apresenta um curto período de revisita de 5 dias, com dois satélites (ESA, 2020).

As imagens Sentinel-2 estão disponíveis também gratuitamente no catálogo de imagens do INPE e no catálogo da Agência Espacial Europeia (ESA). Esses dados apresentam alta resolução espacial: 10 metros no comprimento do visível e Infravermelho Próximo (NIR), 20 metros nos comprimentos do *Narrow NIR*

(Infravermelho “Estreito”) e do SWIR (Infravermelho de Ondas Curtas), e 60 metros nas bandas Aerossol, Vapor D’água e Nuvem.

Os produtos do programa estão disponíveis também acrescidos de níveis de correção, sendo as imagens utilizadas neste trabalho referentes ao nível de correção 1B, composto por imagens que também apresentam calibrações radiométricas e geométricas.

3.2.3 Softwares Utilizados

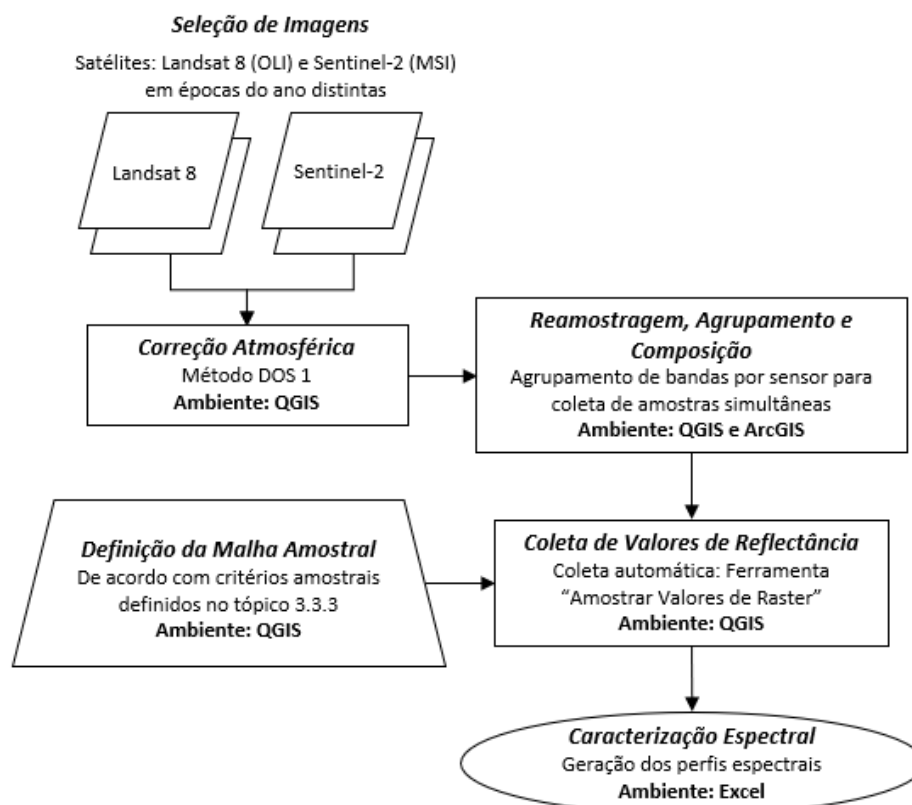
- QGIS, versão 3.14, utilizado para manipulação e tratamento das imagens orbitais, como também para manipulação de arquivos vetoriais na determinação da malha de amostras e para a coleta dos valores de *pixel* sobre as imagens.

- Excel, utilizado para definição e análises do comportamento espectral dos gêneros florestais.

3.3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi desenvolvida através das etapas apresentadas na FIGURA 5 abaixo, seguida pelo detalhamento dos procedimentos descritos nas sessões a seguir.

FIGURA 5 – ESQUEMA METODOLOGICO



FONTE: A Autora (2021)

Conforme apresentado no fluxograma, a metodologia deste trabalho foi desenvolvida em seis etapas principais, partindo desde a seleção das imagens adquiridas pelos sensores escolhidos, obtidas em pelo menos duas épocas do ano distintas, até o processo de correção, agrupamento e composição de bandas utilizadas. Paralelamente ao tratamento das imagens, foi definida uma malha vetorial de amostras que apoiou o processo de coleta dos valores de *pixel* de forma automatizada, a fim de que, a partir dos valores coletados, fosse possível obter a caracterização espectral dos plantios de *Pinus* e *Eucalyptus*.

3.3.1 Seleção de Imagens

As imagens multiespectrais dos sensores selecionados foram adquiridas gratuitamente no acervo do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e no ambiente *Copernicus Open Access Hub* (ESA). Com o objetivo de abranger épocas do ano distintas, o presente trabalho estabeleceu como principal critério a seleção das

melhores imagens que representassem os períodos de primavera, inverno e períodos intermediários, referentes ao último ano com recobrimento completo disponível. Esta seleção seguiu também os critérios de menor cobertura de nuvens disponíveis no catálogo e a melhor proximidade entre as datas de aquisição dos sensores, para imagens de um mesmo período.

3.3.2 Pré-Processamento

Considerando a realização deste estudo a partir de imagens de diferentes sensores, contribuindo para diferentes posicionamentos do sensor no momento da aquisição, além das diferentes épocas do ano consideradas, o tratamento das imagens para modelagem da interferência atmosférica sobre os alvos imageados é uma etapa essencial. Desta forma, todas as bandas das imagens Sentinel-2 e Landsat 8 foram pré-processadas, aplicando sobre elas o método DOS 1 no ambiente do *software* QGIS (versão 3.14), tendo seus valores de NDs convertidos para reflectância no topo da atmosfera (TOA), tornando possível realizar o comparativo entre as bandas nas diferentes épocas do ano e dos diferentes sensores.

Após essa operação, as bandas corrigidas foram agrupadas em um único arquivo referente ao satélite de origem. Esse agrupamento foi realizado no ambiente do *software* ArcGIS (versão 10.2), que permitiu agrupar bandas de diferentes resoluções espaciais por meio de um processo de reamostragem, aplicada ao método “Vizinho mais Próximo”, tornando possível iniciar a etapa de coleta de amostras em todas as bandas simultaneamente.

Para a coleta de amostras sobre as imagens, a TABELA 3 a seguir, exemplifica com maior detalhamento as bandas utilizadas para o processo de caracterização espectral em cada um dos sensores.

TABELA 3 - BANDAS UTILIZADAS NA APLICAÇÃO

<i>Satélite</i>	<i>Bandas Utilizadas</i>
<i>Landsat 8 (Sensor OLI)</i>	<i>B2, B3 e B4 (Visível) B5 (NIR) B6 e B7 (MIR)</i>
<i>Sentinel-2 (Sensor MSI)</i>	<i>B2, B3 e B4 (Visível)</i>

B8 (NIR)
B5, B6, B7
(Red Edge)
B8A (Narrow NIR)
11 e 12 (SWIR 1 e 2)

FONTE: A Autora (2021).

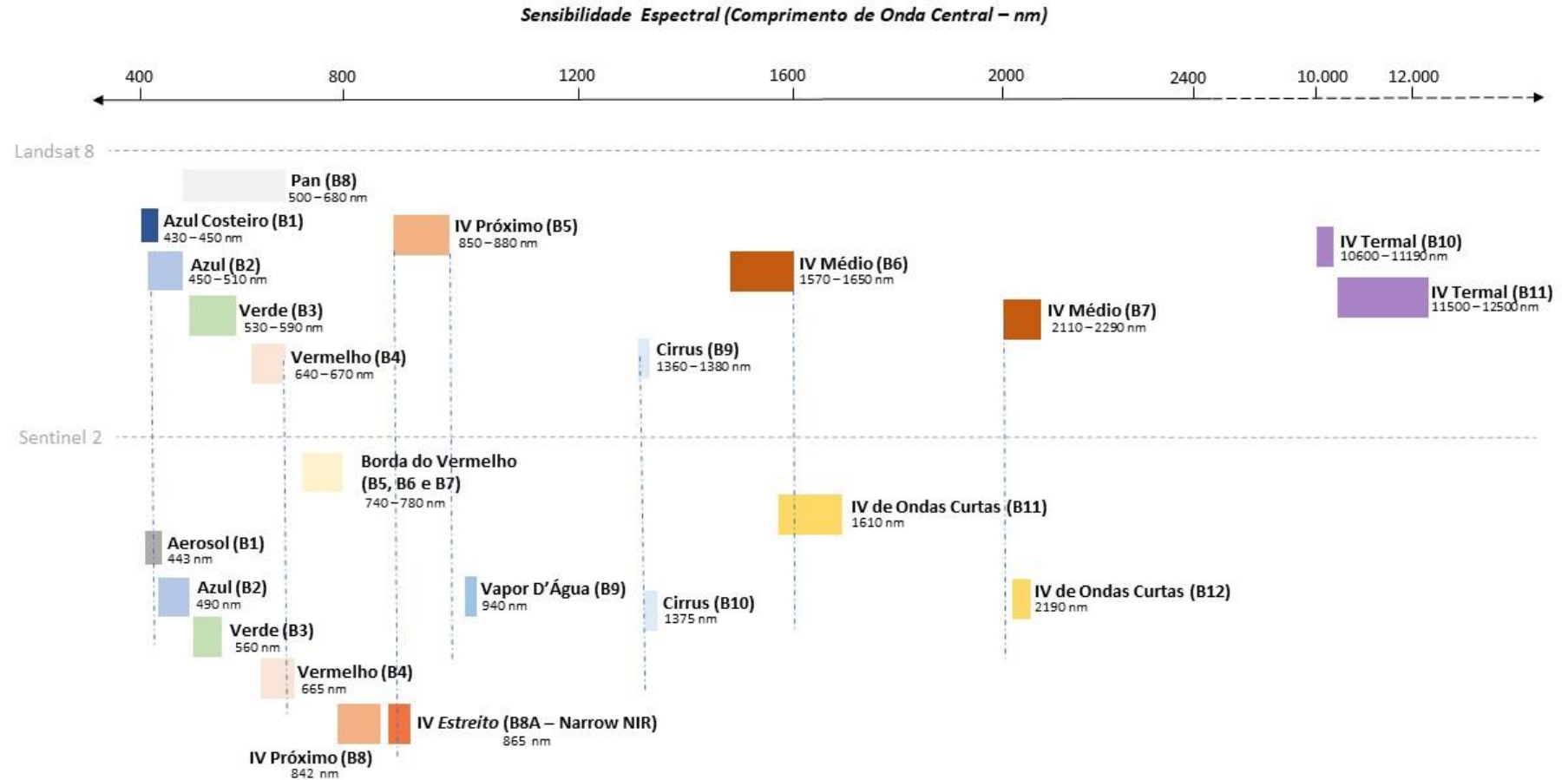
Conforme apresentado na tabela anterior, foram consideradas todas as bandas disponíveis pelos sensores, com exceção dos comprimentos irrelevantes para esta análise, como por exemplo: aerossol, azul costeiro, cobertura de nuvens e vapor d'água.

3.3.3 Definição da Malha Amostral

Para a determinação da malha amostral foram adotadas as composições de bandas que proporcionaram melhor distinção entre floresta nativa e floresta plantada, entre as composições disponíveis: R:B5/G:B6/B:B4, para os conjuntos de imagens referentes ao satélite Landsat 8, e R:B8/G:B11/B:B4 para os conjuntos referentes ao satélite Sentinel-2.

É importante destacar que os sensores apresentam larguras de bandas e realizam o imageamento de frações do espectro distintas. A FIGURA 6 a seguir apresenta as diferentes amplitudes do comprimento espectral entre os satélites Landsat 8 e Sentinel-2, reforçando a importância de realizar este estudo baseado em diferentes sensores para esta abordagem exploratória.

FIGURA 6 - COMPARATIVO ENTRE AS FAIXAS ESPECTRAIS IMAGEADAS PELOS SENSORES UTILIZADOS



FONTE: A Autora (2021).

Na FIGURA 6 é possível observar que as faixas do espectro passíveis de comparação entre os sensores são: as faixas do visível (*Blue, Red e Green*); entre o Infravermelho próximo (NIR – Landsat 8) e o Infravermelho Estreito (*Narrow NIR – Sentinel-2*); e entre o Infravermelho Médio (MIR – Landsat 8) e o Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR – Sentinel-2). Ainda assim, espera-se evidenciar diferentes valores de reflectância amostrados pelos comprimentos de ondas similares, por conta das diferentes larguras e das diferentes localizações delas no espectro eletromagnético.

Para facilitar as discussões descritas nos resultados apresentados neste trabalho, será adotada a nomenclatura “MIR” tanto para as bandas do Infravermelho Médio do satélite Landsat 8, quanto para as bandas do Infravermelho de Ondas Curtas do satélite Sentinel-2, por conta da similaridade espectral entre as informações.

Anteriormente à definição das amostras, também foi verificado o posicionamento entre as imagens dos sensores, de acordo com o referencial original das imagens adquiridas (WGS 84). Na verificação visual, foi observado que as imagens Landsat 8 e Sentinel-2, em seu posicionamento original, apresentaram um deslocamento visual entre as feições de aproximadamente 0,5 pixel, deslocamento considerado aceitável para o desenvolvimento desta aplicação, descartando a necessidade de registro entre as imagens.

A base vetorial de área plantada disponibilizada pela Klabin para o desenvolvimento deste trabalho contou com o detalhamento de 8 (oito) espécies florestais distintas identificadas em campo, referentes aos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. Para simplificação das análises espectrais e atendimento do principal objetivo deste trabalho (diferenciação entre gêneros), as diferentes espécies disponíveis foram agrupadas em duas classes principais: *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*


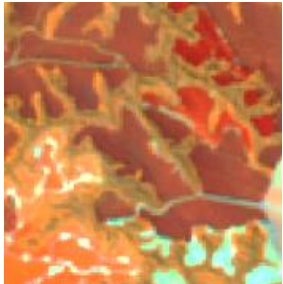
O principal critério considerado para realização da coleta de amostras foi a identificação de *pixels* com distribuição centralizada sobre a região dos talhões vetorizados, evitando o posicionamento das amostras em regiões de borda, a fim de se coletar valores de reflectância que representassem ao máximo as características puras do plantio na imagem. A FIGURA 4 anteriormente apresentada exemplifica parte da definição da malha de amostras (símbolos pontuais em amarelo) utilizadas como base para a coleta de valores de reflectância nas imagens.

O conhecimento da morfologia dos alvos observados, compreendendo como as feições de floresta plantada se apresentam nas imagens de satélite, apoiou o

procedimento de coleta de amostras de *pixel*, utilizadas para definir o comportamento espectral dos plantios.

A TABELA 4 a seguir apresenta as características morfológicas referentes a feições presentes em uma imagem do satélite Sentinel-2, na composição espectral R:B8/G:B11/B:B4 (*Red Edge*, *SWIR* e *Red*), composição falsa cor que possibilitou diferenciar principalmente feições de floresta nativa de feições de floresta plantada.

TABELA 4 - MORFOLOGIA DE ALVOS OBSERVADOS (R8/G11/B4 – SENTINEL 2)

<i>Alvo</i>	<i>Exemplo</i>	<i>Descrição</i>
<i>Floresta Nativa</i>		Feições com característica de superfície difusa ou rugosa e geometria irregular. Coloração heterogênea laranja escuro/marrom.
<i>Floresta Plantada</i>		Feições com característica de superfície difusa ou rugosa e geometria regular. Coloração homogênea avermelhada (escura) ou alaranjada (vibrante).

FONTE: A Autora (2021).

O processo de amostragem definido procurou agrupar, em conjuntos de 20 (vinte) amostras, cada uma das idades de plantio disponível na base, sendo definidos 11 conjuntos para as diferentes idades de plantio de *Eucalyptus spp.* e 9 conjuntos para as diferentes idades de plantio de *Pinus spp.* Desta forma, o arquivo vetorial resultante desta definição contemplou uma malha composta por 395 amostras, definida por uma distribuição irregular, por conta das diferentes restrições de coleta e disponibilidade de talhões (em área) nas diferentes idades.

3.3.4 Coleta de Valores e a Caracterização Espectral

Com a definição da malha amostral, tornou-se possível extrair, a partir de cada posicionamento definido, a informação de valor de reflectância do *pixel* imageado, principal elemento para a realização da caracterização espectral dos plantios de *Pinus* e *Eucalyptus* nas diferentes épocas do ano, considerando o fator de desenvolvimento dos talhões (idade de plantio).

Para uma tarefa de coleta otimizada, este processo foi realizado no ambiente no *software* QGIS, por meio da ferramenta de amostragem automática de valores na imagem (ferramenta: *Amostrar Valores de Raster*), que permitiu armazenar, na tabela de atributos do *shapefile* referente à malha de amostras, o valor de *pixel* sobreposto aos pontos posicionados, para as diferentes épocas do ano, simultaneamente.

Após a coleta dos valores de *pixel* sobre as amostras pré-definidas, foi realizada a definição do comportamento espectral referente aos gêneros florestais no ambiente do Excel, na tentativa de analisar e identificar possíveis características de diferenciação entre os plantios.

A fim de proporcionar um melhor comparativo entre os plantios, a análise da possibilidade de diferenciação entre os talhões foi desenvolvida também sobre talhões de ambos os gêneros em idades com taxas de crescimento equivalentes, tendo em vista os diferentes níveis de desenvolvimento dos plantios de *Pinus* e *Eucalyptus* ao longo dos anos.

A partir das informações de idade de corte das árvores na região de estudo fornecidas pela Klabin, foram considerados, para este conjunto específico de dados, que os plantios de *Pinus* possuem taxas de crescimento equivalente aos talhões de *Eucalyptus* quando apresentam o dobro da idade. Desta forma, com base na disponibilidade de dados fornecidos, os talhões passíveis de comparação se deram entre: *Eucalyptus* aos 2 anos e *Pinus* aos 4 anos, caracterizando-os como plantios jovens, e talhões de *Eucalyptus* aos 8 anos e *Pinus* aos 16 anos, caracterizando-os como plantios maduros, próximos a idade de corte, para ambos os gêneros analisados.

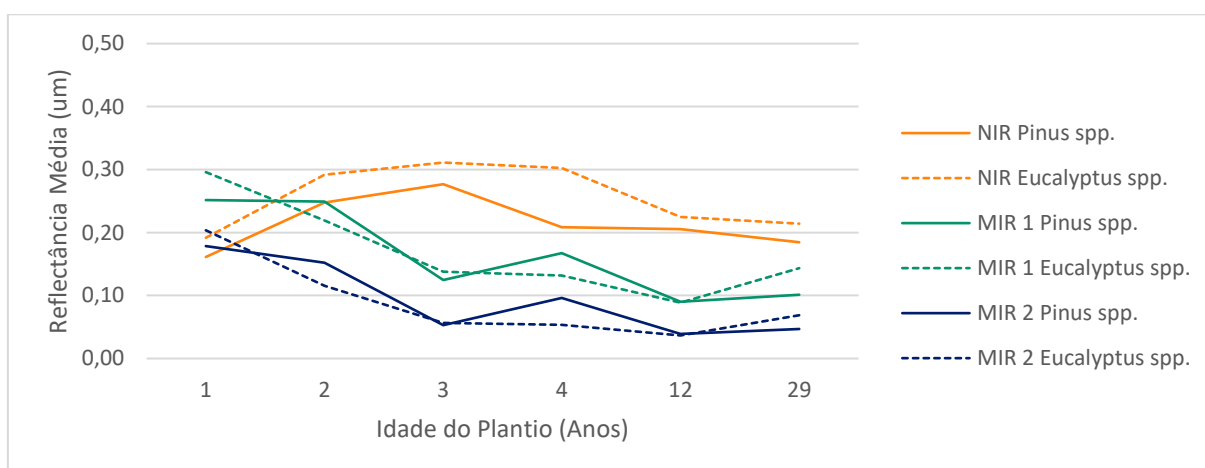
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base na coleta dos valores das amostras definidas, foram obtidos inúmeros resultados relacionados ao comportamento espectral dos plantios, reservando para este capítulo somente os resultados mais relevantes, ou seja, os resultados nas diferentes épocas do ano, sobre as bandas com maior potencial de diferenciação entre os plantios, sendo elas relacionadas aos comprimentos do Infravermelho Próximo e do Infravermelho Médio.

4.1 CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DOS PLANTIOS

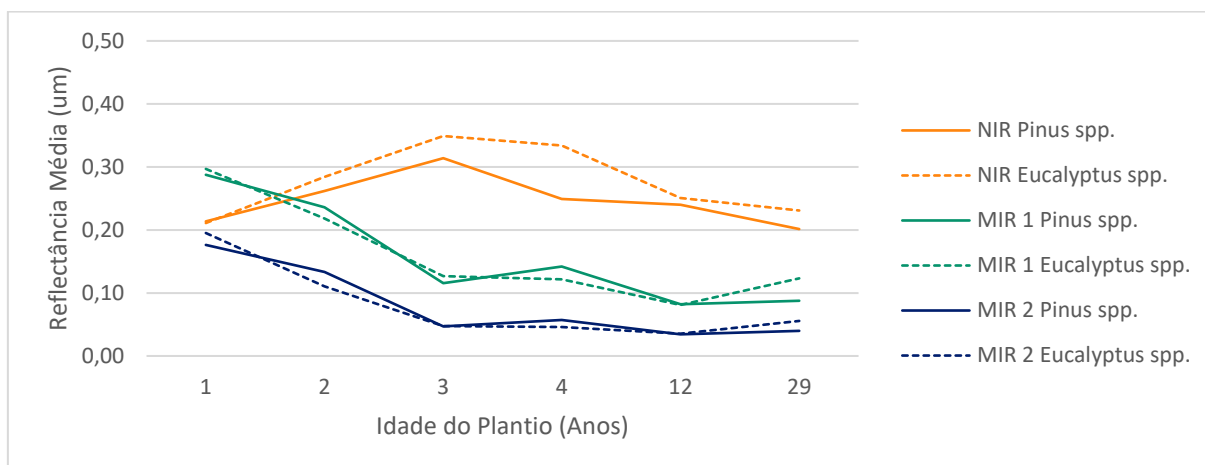
As FIGURAS 8, 9 e 10 a seguir, apresentam o perfil espectral definido pelos plantios de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*, em valores de reflectância média, em micrometros (μm), observados sobre as bandas de maior relevância para a aplicação do sensor OLI. Esses valores estão relacionados a idade dos talhões amostrados sobre *pixels* isolados, em imagens dos meses de setembro, julho e março.

FIGURA 7 - PERFIL ESPECTRAL DOS PLANTIOS (16/09/2019 - SENSOR OLI)



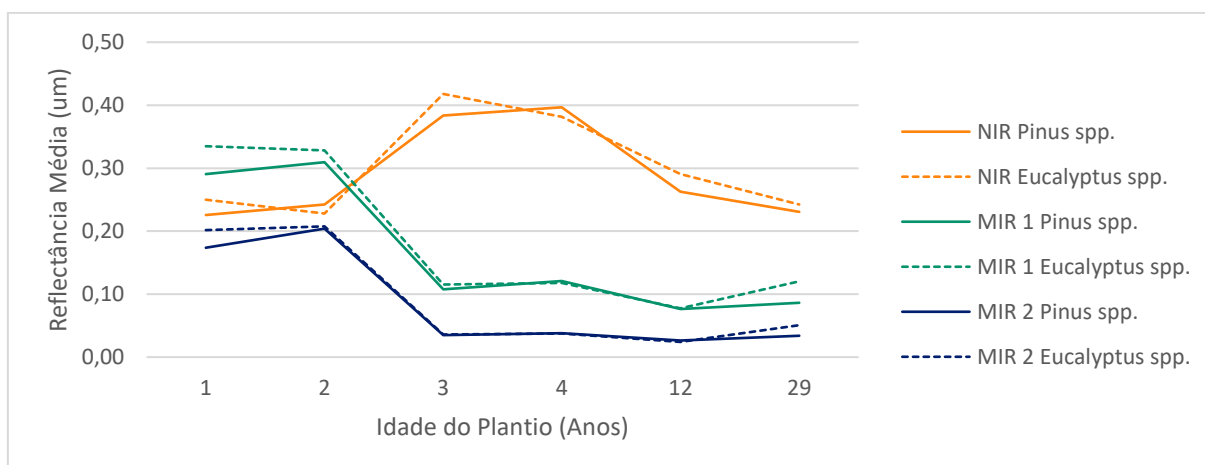
FONTE: A Autora (2021).

FIGURA 8 - PERFIL ESPECTRAL DOS PLANTIOS (14/07/2019 - SENSOR OLI)



FONTE: A Autora (2021).

FIGURA 9 - PERFIL ESPECTRAL DOS PLANTIOS (24/03/2019 - SENSOR OLI)



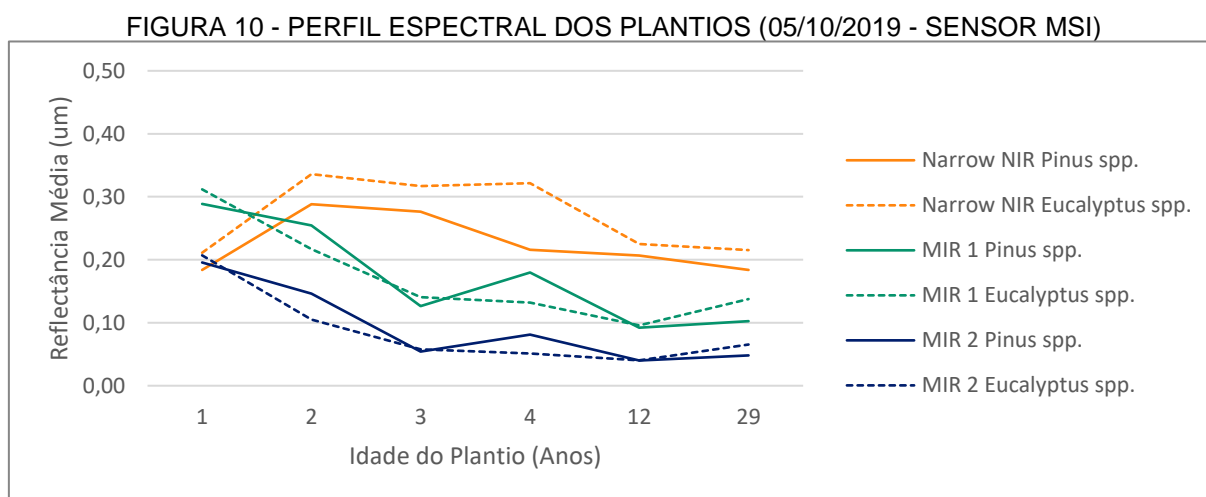
FONTE: A Autora (2021).

Observando os resultados da amostragem sobre as imagens do sensor OLI, foi possível observar que, para todas as épocas do ano, os valores de reflectância amostrados para os plantios mais jovens, de ambos os gêneros, são mais baixos no comprimento NIR, sofrendo um aumento gradativo ao longo do desenvolvimento dos talhões, conforme o envelhecimento das árvores. Este comportamento pode ser justificado pela relação direta do comprimento do NIR com a estrutura foliar da vegetação, de acordo com as referências anteriormente citadas, pois os talhões mais jovens ainda não apresentam a copa das árvores completamente formada, destacando nas imagens feições de solo exposto, que fazem com que os valores de reflectância neste comprimento de onda sejam menores.

No comprimento do MIR (fração 1 e 2) os valores de reflectância são mais altos para os plantios jovens, de forma que, conforme o envelhecimento dos talhões, estes valores de reflectância diminuem. Este comportamento pode ser justificado pela relação direta do comprimento do MIR com a capacidade de absorção de água do alvo observado, ou seja, quanto maior o volume de água encontrado em sua composição, maior a absorção. Desta forma, feições de solo exposto identificadas nos talhões mais jovens refletem mais, enquanto os talhões desenvolvidos o absorvem.

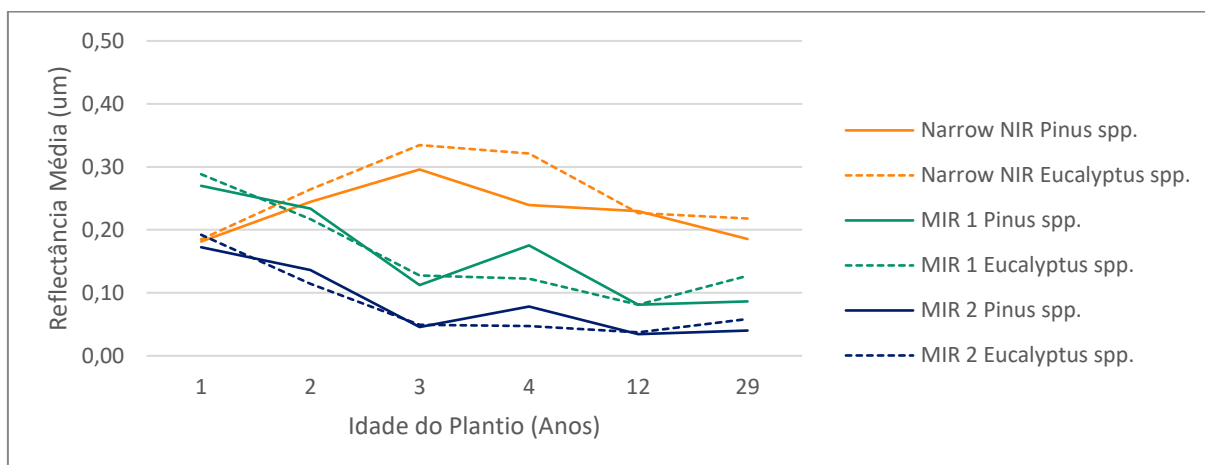
Analisando os valores de reflectância média entre os gêneros é possível identificar que os plantios de *Eucalyptus spp.* apresentam valores de reflectância elevados no comprimento do NIR, enquanto para o comprimento do MIR apresentam valores ligeiramente mais baixos para os plantios desenvolvidos (maduros), se comparados aos plantios de *Pinus spp.*.

As FIGURAS 11, 12 e 13 a seguir, apresentam o perfil espectral definido pelos plantios de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*, em valores de reflectância média, em micrometros (μm), observados sobre as bandas do sensor MSI de maior relevância para a aplicação. Esses valores estão relacionados a idade dos talhões amostrados sobre *pixels* isolados em imagens dos meses de outubro, julho e junho.



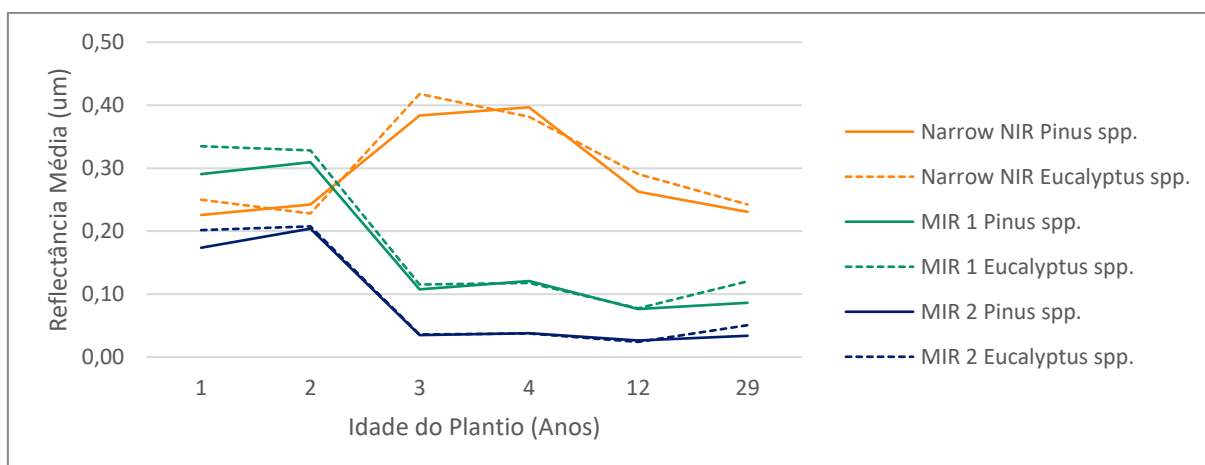
FONTE: A Autora (2021).

FIGURA 11 - PERFIL ESPECTRAL DOS PLANTIOS (27/07/2019 - SENSOR MSI)



FONTE: A Autora (2021).

FIGURA 12 - PERFIL ESPECTRAL DOS PLANTIOS (17/06/2019 - SENSOR MSI)



FONTE: A Autora (2021).

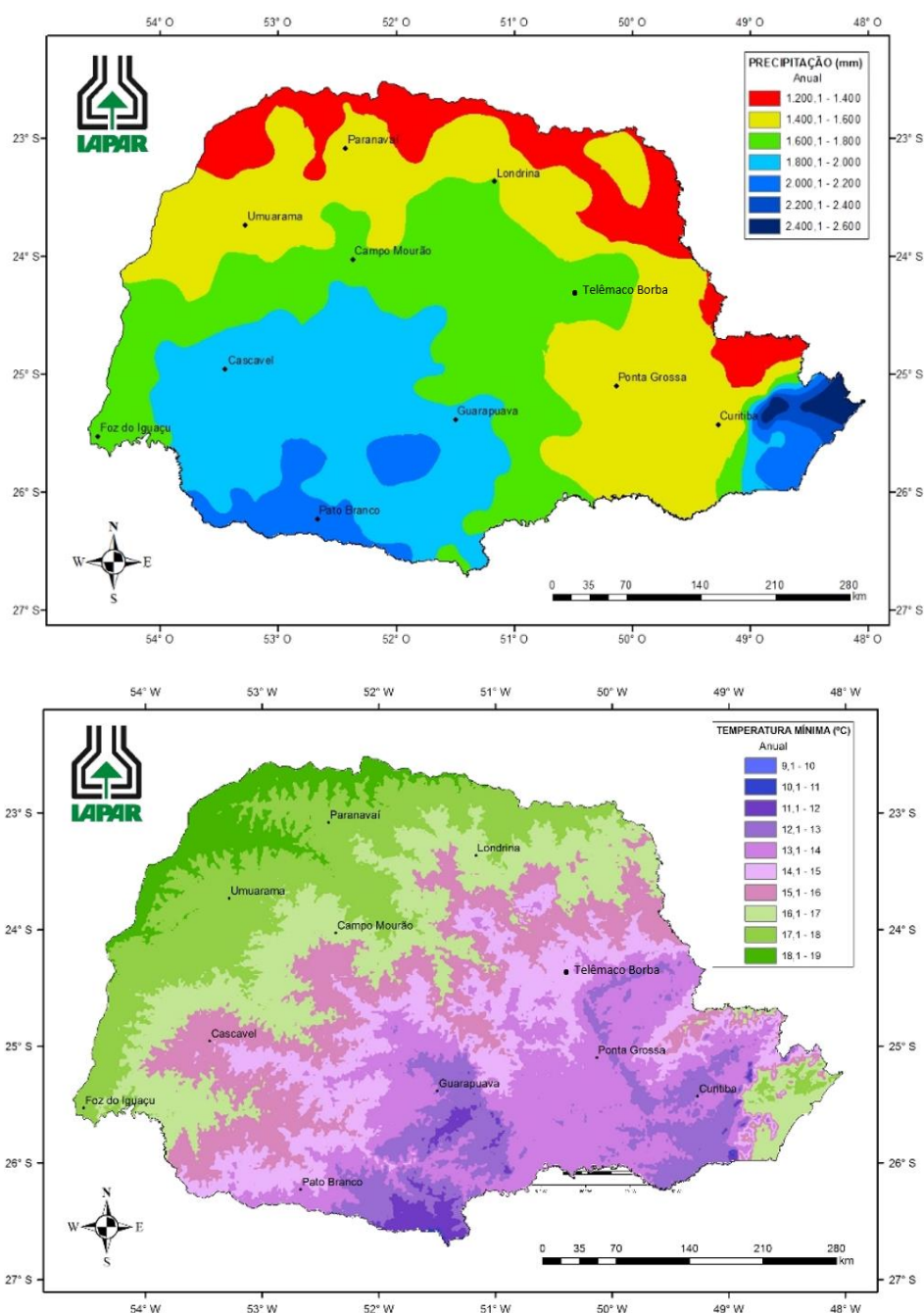
De modo geral, analisando o comportamento espectral obtido nas imagens do sensor MSI, foi possível identificar comportamentos semelhantes aos identificados nas imagens do sensor OLI, com relação as faixas do espectro de maior relevância para a aplicação: NIR e MIR.

Para a imagem do mês de outubro, os valores amostrados na banda *Narrow NIR* do sensor MSI possibilitou uma melhor diferenciação entre os plantios, de forma que, os valores de reflectância média identificados para os plantios desenvolvidos de *Eucalyptus spp.*, sobre esta banda são mais altos, se comparados aos valores amostrados na banda NIR do sensor OLI na imagem de setembro.

As imagens referentes aos períodos intermediários, do mês de março para o sensor OLI e do mês de julho para o sensor MSI, apresentaram alta sobreposição

entre os perfis espectrais dos plantios, principalmente para as bandas relacionadas ao comprimento do MIR. Acredita-se que este comportamento de proximidade possa ser explicado através do regime hídrico da região, que apresenta um cenário favorável ao desenvolvimento dos plantios quanto a precipitação e temperatura (FIGURA 13), mesmo em períodos considerados de estiagem (Outono e Inverno).

FIGURA 13 - PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA ANUAL NO PARANÁ (2019)



FONTE: Adaptado de AIPAR (2021).

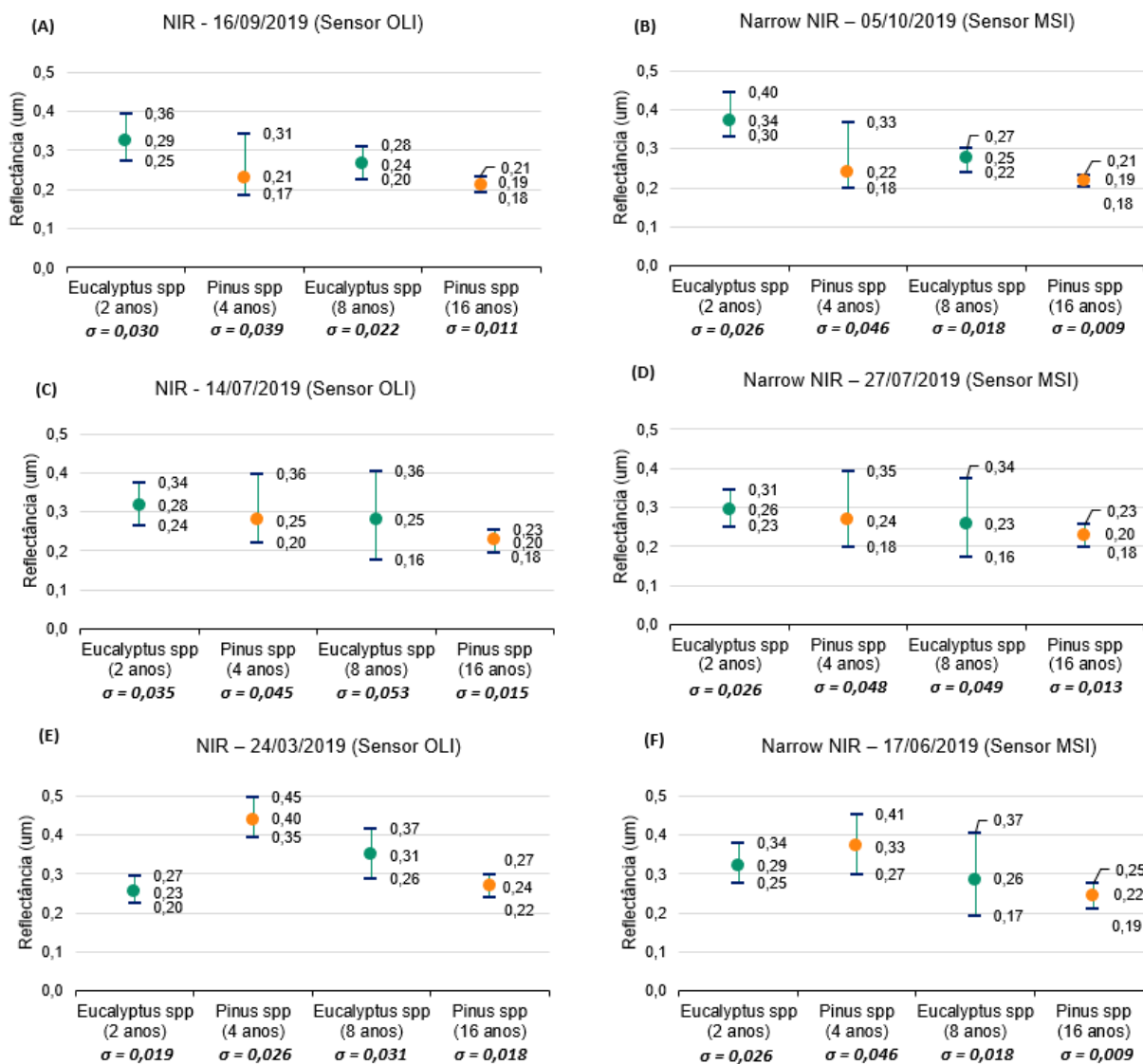
A característica de estabilidade do regime hídrico na região do município de Telêmaco Borba, aliada as características de manejo dos talhões disponibilizados, pode refletir na proximidade do conteúdo de água presente nos plantios de ambos os gêneros, conseqüentemente aproximando o comportamento espectral identificado na região do MIR, região do espectro diretamente relacionada a este aspecto.

4.2 COMPORTAMENTO ESPECTRAL – REGIÃO NIR

A análise comparativa entre os plantios de *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp. em idades com taxas de crescimento equivalentes, permitiu o refinamento da diferenciação entre os gêneros, considerando uma maior proximidade entre o desenvolvimento das árvores, principalmente quanto a sua dimensão.

A FIGURA 14 a seguir apresenta os resultados da resposta espectral obtida através das imagens de ambos os sensores, em diferentes épocas do ano, correspondentes a faixa do espectro do NIR (Sensor OLI) e do *Narrow* NIR (Sensor MSI).

FIGURA 14 – COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS PLANTIOS EM VALORES DE REFLECTÂNCIA MÁXIMA, MÍNIMA, MÉDIA E DESVIO PADRÃO (NIR E NARROW NIR)



Fonte: A Autora (2021).

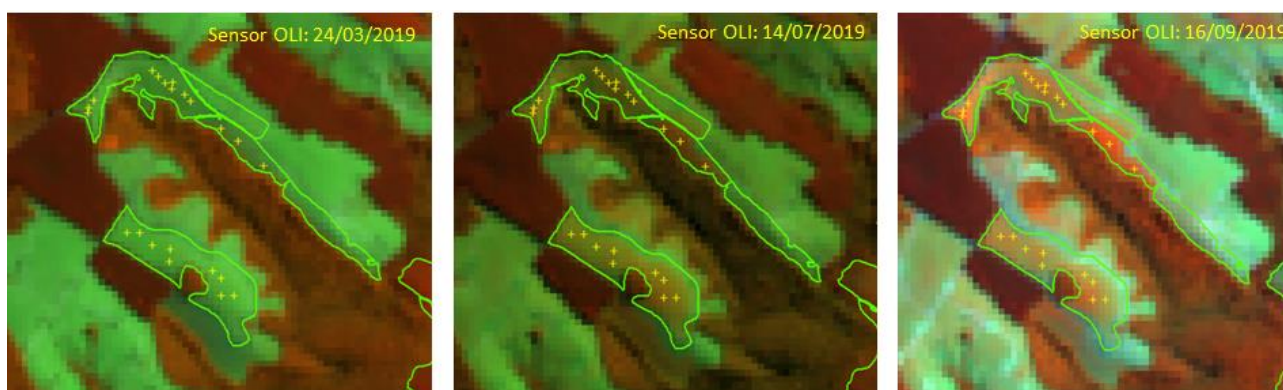
Analisando os valores de reflectância que definem o comportamento espectral dos plantios de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.* em idades equivalentes, para o comprimento do NIR, a imagem que demonstrou o melhor potencial de diferenciação entre os gêneros foi a de 24 de março de 2019 (Cenário E), adquirida pelo sensor OLI, do satélite Landsat 8.

Os valores de reflectância amostrados no cenário (E) permitiram uma melhor diferenciação entre os plantios, de forma que, no grupo dos plantios jovens, os valores de reflectância média apresentam significativa distinção, distanciamento também observado entre os valores de amplitude (máximos e mínimos).

Para os plantios mais velhos, os valores de reflectância média apresentaram um positivo distanciamento e seus valores de amplitude (máximos e mínimos) são complementares, de forma que, o valor de reflectância mínima encontrada para os plantios de *Eucalyptus spp.*, aos 8 anos, se aproxima ao valor de reflectância máxima encontrada para os plantios de *Pinus spp.*, aos 16 anos.

Ainda analisando o cenário (E), mesmo apresentando o melhor potencial de diferenciação nesta faixa do espectro, foi possível observar que existe sobreposição entre os valores de reflectância encontrados para os plantios de *Eucalyptus spp.* mais jovens (2 anos) e os plantios de *Pinus spp.* mais velhos (16 anos). Esta alteração pode ser justificada pela incidência da reflectância de subsistemas, principalmente da informação de solo exposto observada na imagem (FIGURA 15) amostrada para os talhões de *Eucalyptus spp.* mais jovens.

FIGURA 15 – AMOSTRAS SOBRE TALHÕES DE EUCALYPTUS SPP. AOS 2 ANOS



Fonte: A Autora (2021).

A incidência de solo exposto, para esta região do espectro, contribui para valores baixos de reflectância, considerando a maior absorção do comprimento do NIR pela fração solo, se comparada a absorção realizada pela vegetação efetivamente desenvolvida. Através desta análise, compreende-se que a informação espectral amostrada para este conjunto de talhões (*Eucalyptus spp.* aos 2 anos), não pode ser associada ao comportamento de um *pixel* puro de plantio.

Para as imagens adquiridas nas demais datas amostradas, no comprimento do NIR, de modo geral, ocorreu uma alta sobreposição de informações. Evidenciando a dificuldade de diferenciação entre os gêneros, principalmente quando observados plantios de *Pinus spp.* em idades mais jovens (4 anos) e *Eucalyptus spp.* em idades mais avançadas (8 anos).

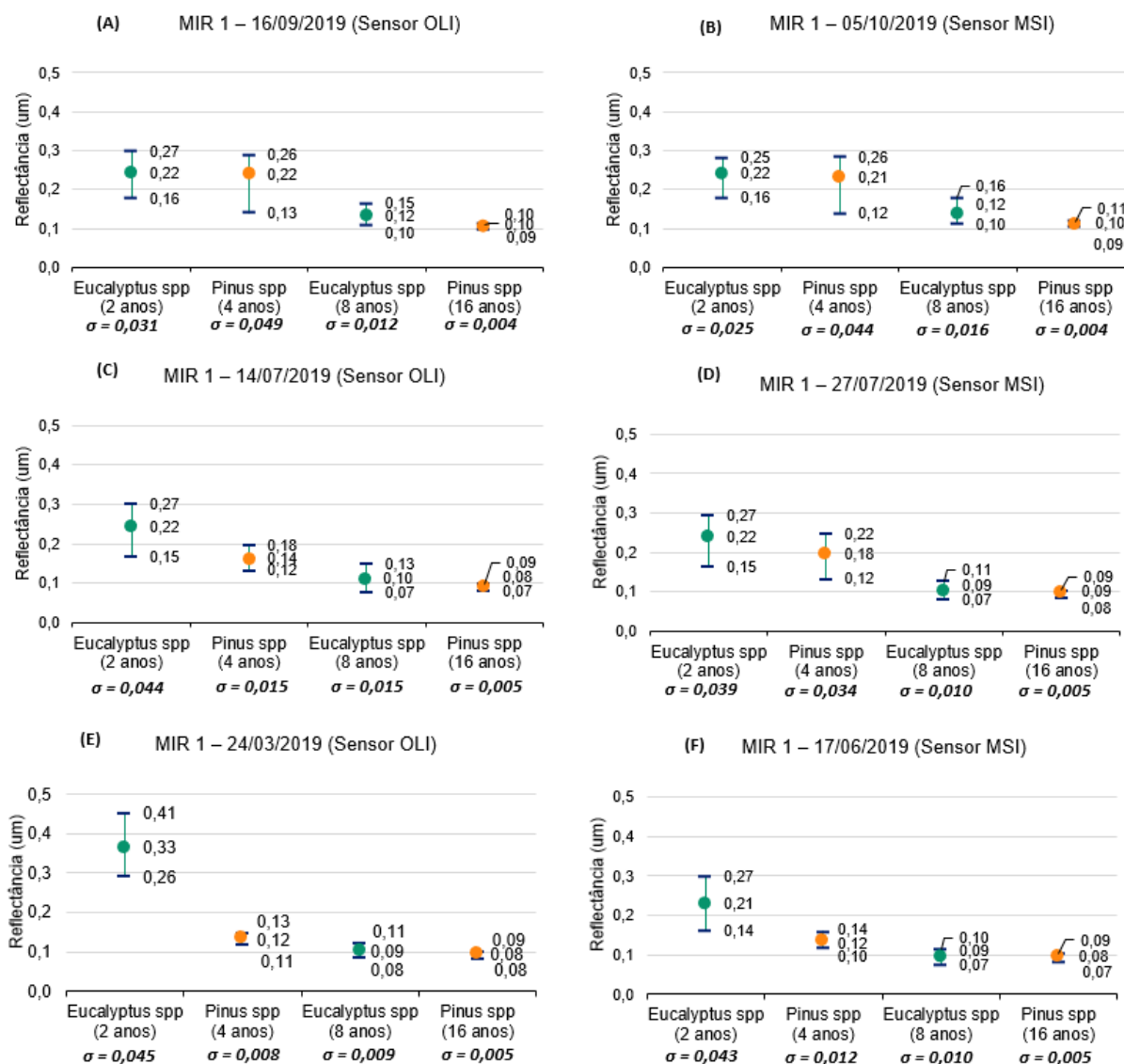
Apesar da sobreposição, o cenário (B), originado das observações realizadas sobre a imagem do sensor MSI, também se mostrou promissor. Neste cenário, os valores de reflectância média apresentam um certo distanciamento entre os plantios, de forma que, através do refinamento dos valores de amplitude, os valores de média possivelmente poderiam subsidiar uma diferenciação entre os gêneros.

Neste comprimento de onda, sobre as imagens de ambos os sensores, os plantios de *Eucalyptus spp.* apresentaram maiores valores de reflectância, se comparados aos valores encontrados para os plantios de *Pinus spp.* Analisando os resultados em escala temporal, os plantios de *Pinus spp.*, aos 16 anos, se destacaram pela estabilidade da amplitude da reflectância amostrada, enquanto os plantios de *Eucalyptus spp.*, aos 8 anos, apresentaram uma alteração significativa na amplitude dos valores, durante a transição das épocas do ano, considerando as observações nos meses de setembro e outubro, e no mês de julho.

4.3 COMPORTAMENTO ESPECTRAL – REGIÃO MIR 1

A FIGURA 16 a seguir apresenta os resultados da resposta espectral obtida através das imagens de ambos os sensores, em diferentes épocas do ano, correspondentes a faixa do espectro do MIR 1 (Sensor OLI e MSI).

FIGURA 16 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS PLANTIOS EM VALORES DE REFLECTÂNCIA MÁXIMA, MÍNIMA, MÉDIA E DESVIO PADRÃO (REGIAO MIR 1)



Fonte: A Autora (2021).

Analisando os valores de reflectância que definem o comportamento espectral dos plantios de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*, observados na amostragem das bandas do MIR 1, foram identificadas diferentes imagens com potencial de discriminação entre os gêneros, de acordo as diferentes taxas de crescimento dos talhões.

Para os plantios mais jovens, a melhor diferenciação foi observada nos cenários (E) e (F), alcançada pelas imagens datadas de 24 de março de 2019 (Sensor OLI) e 17 de junho de 2019 (Sensor MSI). Para os plantios mais velhos, a melhor diferenciação foi observada nos cenários (A) e (B), alcançada pelas imagens datadas de 16 de setembro de 2019 (Sensor OLI) e 05 de outubro de 2019 (Sensor MSI).

Nos cenários (E) e (F) a reflectância média amostrada para os plantios de *Eucalyptus spp.*, aos 2 anos, apresentaram um significativo distanciamento do valor observado para os plantios de *Pinus spp.*, aos 4 anos, apresentando um potencial de diferenciação. A expressiva diferença entre as amplitudes dos valores amostrados nessas idades também é um indicador.

Nos cenários (A) e (B) os valores de reflectância amostrados apresentaram um melhor potencial de diferenciação para os plantios maduros, tendo em vista que, o valor de reflectância mínima encontrado para os plantios de *Eucalyptus spp.*, aos 8 anos, é complementar ao valor de reflectância máxima observado na amostragem dos plantios de *Pinus spp.*, aos 16 anos, possivelmente proporcionando a separabilidade entre os gêneros.

Nos comprimentos de onda referentes ao MIR 1, sobre as imagens de ambos os sensores, os plantios mais jovens de *Eucalyptus spp.* apresentaram os maiores valores de reflectância, se comparados aos valores encontrados para os plantios jovens de *Pinus spp.*

O comportamento espectral observado para os plantios de *Pinus spp.*, aos 16 anos, nessa faixa do espectro, permanece com a maior estabilidade de valores, assim como observado para a faixa do NIR. Já os plantios maduros de *Eucalyptus spp.*, que anteriormente não apresentavam uma maior estabilidade de valores, no comprimento do MIR apresentam valores de reflectância inferiores e mais estáveis ao longo do tempo. Acredita-se que através da boa estabilidade do regime hídrico na região de estudo, tanto os plantios de *Pinus spp.*, como os plantios de *Eucalyptus spp.*, não sofreram com períodos considerados de maior estiagem (Inverno).

Analisando os resultados em escala temporal, os plantios mais jovens de *Pinus spp.* (4 anos) apresentaram alterações quanto a mudança de estação do ano, sendo possível observar a diminuição das amplitudes e dos valores de reflectância máxima e mínima nas imagens referentes ao mês de julho (Inverno), se comparado aos valores observados anteriormente nas imagens dos meses de setembro e outubro, principalmente para a banda imageada pelo sensor OLI (Landsat 8).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou analisar as características espectrais dos plantios de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*, buscando diferenciá-los, atingindo este principal objetivo através dos perfis espectrais gerados e do comportamento espectral evidenciado para os talhões em idades de crescimento equivalentes.

A aquisição das imagens de diferentes períodos sazonais, a conversão dos valores de NDs para valores de reflectância, o agrupamento de bandas e a coleta de valores de *pixel* sobre elas, foram realizados com êxito por parte das metodologias automatizadas, disponibilizadas pelos *softwares* utilizados.

Ainda assim, algumas dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento deste trabalho precisam ser modeladas, como por exemplo: a distribuição irregular da malha amostral, que variou em número de amostras por intervalo de idade, coletando mais ou menos amostras, por conta da disponibilidade de área de talhões na base de apoio; assim como o pré-processamento aplicado, que foi restringido a uma modelagem atmosférica, deixando de modelar a incidência de sombras do relevo e da hidrografia, por exemplo, influenciando negativamente na amostragem dos valores de reflectância em algumas regiões.

Dentre os resultados obtidos, destaca-se a amostragem sobre a região do espectro do MIR 1, que permitiu a melhor discriminação entre os gêneros dentro dos agrupamentos de plantios jovens e maduros. A utilização do *shapefile* dos plantios georreferenciados apresentou grande importância no apoio para análise, acrescentando a confiabilidade dos resultados através da verdade de campo.

A aplicação em escala multitemporal possibilitou avaliar as possibilidades de diferenciação de maneira mais ampla, tendo em vista que os melhores resultados da discriminação se deram em diferentes épocas do ano, como por exemplo, no comprimento do MIR 1, em que as imagens dos meses de setembro e outubro foram mais eficientes ao diferenciar plantios maduros, enquanto imagens dos meses de março e junho foram mais eficientes ao diferenciar os plantios mais jovens.

A análise da amplitude dos valores de reflectância identificados ao longo do tempo também apresenta potencial para a diferenciação entre plantios jovens e plantios maduros, de forma que, talhões mais velhos apresentam menores amplitudes de reflectância, se comparados a talhões mais jovens. Este aspecto reforça o potencial das análises em escala multitemporal para uma possível diferenciação

automática de plantios, resultados que não poderiam ter sido obtidos se analisados a partir de uma única imagem, em determinada época do ano isolada.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A continuidade desta abordagem exploratória poderá retomar a aplicação sobre as bandas indicadas com maior potencial de discriminação entre os gêneros por este trabalho. O diferencial da informação multitemporal poderia ser explorado através da análise de imagens em intervalos curtos de tempo, em uma maior quantidade de imagens em um único ano.

Além da necessidade de melhorias quanto a modelagem dos efeitos tais como os produzidos pelo relevo e pela hidrografia na região, para validação dos resultados obtidos seria interessante a realização da caracterização espectral de plantios em diferentes áreas de estudo, tendo em vista as diferentes dinâmicas, manejo e características das florestas plantadas no país.

Trabalhos futuros também poderiam explorar a definição do comportamento espectral dos plantios a partir de índices de vegetação ou outra aplicação de tratamento nas imagens, não somente a análise dos valores de reflectância. A definição do comportamento de plantios dos diferentes gêneros também poderia ser desenvolvida a partir de imagens originadas de outros sensores não explorados neste trabalho, assim como, combinando imagens de satélite com outros dados remotos, como por exemplo, imagens radar, tendo em vista o grande número de referências existentes que apontam a eficiência dessa tecnologia na diferenciação de espécies de vegetação.

REFERÊNCIAS

ALBA, E. **Caracterização Espectral dos Dosséis e Estimativa de Variável Biofísica em Plantios de Eucalyptus grandis e Pinus elliotti a partir de Imagens LANDSAT 8/OLI**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade de Santa Maria, Santa Maria (RS), 2016.

CARMELLO, I. D.; BOLFE E. L.; GOMES P. B.; OSHIRO O. T.; CARDOSO D. J. Índices de Vegetação Aplicados na Discriminação de Classes de Idade e Manejo de Pinus. **9º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica**, Campinas, São Paulo, 2015.

CURRAN, P.J.; DUNGAN, J.L.; GHOLZ, H.L. Seasonal LAI in Slash Pine Estimated with Landsat TM. **Remote Sensing of Environment**, v. 39, n. 1, p. 3 -13, 1993.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA).Copernicus Open Access Hub. **Imagem de satélite**. Sentinel-2- T22KEU A022386, 05 de out. 2019.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA).Copernicus Open Access Hub. **Imagem de satélite**. Sentinel-2- T22KEU A021385, 27 de jul. 2019.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA).Copernicus Open Access Hub. **Imagem de satélite**. Sentinel-2- T22JET A019955, 17 de jun. 2019.

ESA Applications. Europe's Copernicus programme. Disponível em: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview3. Acesso em: 28 de mar. 2020.

FIGUEIREDO, Divino. Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto, 2005.

GOEL, N. S. Models of Vegetation Canopy Reflectance and their use in Estimation of Biophysical Parameters from Reflectance Data. **Remote Sensing Reviews**, v. 4, p. 1-21, 1998.

GOMES, D.; VICENTE, L. E; Carvalho, S.; VICTORIA, D.; ANDRADE, R. G.; AGNESE, M. L., SILVA, R. F. B. Avaliação comparativa de correção atmosférica de imagens Landsat utilizando MODTRAN e Dark Object Subtraction. In: EMBRAPA, Campinas, **Anais e Publicações**. Campinas: UNICAMP, 2011.

IAPAR, Atlas Climatológico. Disponível em: <http://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Atlas-Climatico>. Acesso em: 28 de mar. 2021.

IBÁ, Instituto Brasileiro de Arvores. Relatório Anual 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 23 de jan. 2020.

MACHADO, A. S. Claudia e QUINTANILHA, A. José. Sistemas de Informações Geográficas e Geoposicionamento: Uma Aplicação Urbana, USP, 2008.

NOVO, E. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4. Ed. São Paulo: Blucher, 2010. p. 388.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**, 2. Ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SANCHES, I. D. A.; ANDRADE, R. G.; QUARTAROLI, C. F.; RODRIGUES, C. A. G. Análise comparativa de três métodos de correção atmosférica de imagens Landsat 5 TM para obtenção da reflectância de superfície e NDVI. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, p. 7564, Curitiba, 2011.

SCP, Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Quantum GIS 3.4. Disponível em: <https://readthedocs.org/projects/semiautomaticclassificationmanual-pt/downloads/pdf/latest/> . Acesso em: 01 de mar. 2021.

UNITED STATES GEOLOGICAL SUVERY (USGS). Earth Explorer. **Imagem de satélite**. Landsat 8 – 221077, 16 de set. 2019.

UNITED STATES GEOLOGICAL SUVERY (USGS). Earth Explorer. **Imagem de satélite**. Landsat 8 – 221077, 14 de jul. 2019.

UNITED STATES GEOLOGICAL SUVERY (USGS). Earth Explorer. **Imagem de satélite**. Landsat 8 – 221077, 24 de mar. 2019.

USGS, United States Geological Suvery. Landsat Level-1 Processing Details. Disponível em: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-level-1-processing-details>. Acesso em: 28 mar. 2020.

WAGNER, A. P. L; DUCATI J.R. Estudo de Pinus no Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul com Imagens do Sensor ASTER. **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, p. 4361-4366, Goiânia, 2005.