

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

**CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

**MAPEAMENTO POR SENSORIAMENTO REMOTO DE ÁREA DE *PINUS* SPP
NO PARQUE NACIONAL DA LAGOA DO PEIXE**

LISANDRO MARCIO SIGNORI

ORIENTADOR: PROF. DR. JORGE RICARDO DUCATI

PORTO ALEGRE, RS

MARÇO DE 2018

LISANDRO MARCIO SIGNORI

**MAPEAMENTO POR SENSORIAMENTO REMOTO DE ÁREA DE *PINUS* SPP
NO PARQUE NACIONAL DA LAGOA DO PEIXE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Ricardo Ducati

PORTO ALEGRE, RS

MARÇO DE 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Signori, Lisandro Marcio

Mapeamento por Sensoriamento Remoto de área de
Pinus spp no Parque Nacional da Lagoa do Peixe /
Lisandro Marcio Signori. -- 2018.

87 f.

Orientador: Jorge Ricardo Ducati.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em
Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-
Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-
RS, 2018.

1. Invasão biológica. 2. Pinus spp. 3. Assinatura
Espectral. 4. Radiometria. 5. Parque Nacional da
Lagoa do Peixe. I. Ducati, Jorge Ricardo, orient.
II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Dedico ao meu pai Agenor, já falecido,
à minha mãe Jurema,
à minha esposa e companheira Caroline,
e ao meu filho Marcos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pela vida e pelo exemplo de vida e de valores.

Ao meu orientador, que conheci ainda na graduação em Física, professor Jorge Ducati, pelo auxílio sempre tranquilo e preciso.

Aos colegas de laboratório Virindiana e Diniz, pelas conversas e dicas valiosas.

Aos colegas de pós-graduação dos laboratórios "vizinhos", Eufrásio, Luis Fernando Ruiz, João Paulo e Tássia também pelas conversas e trocas, e especialmente ao Luis Fernando por dicas importantes nos softwares ENVI e Qgis.

Aos outros colegas que entraram comigo no mestrado, pelas conversas e trocas que ajudaram em diversos momentos.

À todas as pessoas que apoiam e continuarão apoiando a causa da universidade pública, gratuita e de qualidade.

Ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, e ao colega Fernando Weber pelo apoio na obtenção da licença capacitação sem a qual não teria sido possível a conclusão deste mestrado.

À Caroline minha esposa e companheira pelo apoio desde a primeira disciplina da pós-graduação, e ainda antes de ingressar neste mestrado, pelo amor, carinho e cuidados mútuos que muito facilitaram esta empreitada, deixo aqui meu agradecimento que não cabe em palavras. Por fim, agradeço ao meu filho Marcos que trouxe alegria e amor sem fim para nossa caminhada de vida.

RESUMO

A ocupação de áreas naturais por espécies exóticas invasoras é um problema crescente, e segundo contribuinte mais importante para perda de biodiversidade no planeta. Esta problemática tem atingido inclusive áreas protegidas, caso do Parque Nacional da Lagoa do Peixe (PNLP), uma Unidade de Conservação (UC) localizada na planície costeira do Rio Grande do Sul. O crescimento da área ocupada pela exótica invasora *Pinus* spp no Parque chegou a proporções tais que motivou órgãos de controle a intervir e cobrar providências quanto à erradicação e controle do *Pinus* spp no interior e entorno da UC. Esta dissertação teve como objetivo geral estudar a evolução espaço-temporal da área ocupada por invasoras do gênero *Pinus* na parte norte do PNLN através de técnicas de sensoriamento remoto, e apoiadas em um estudo de radiometria dos alvos areia e *Pinus*. Dois artigos científicos foram produzidos, detalhando o processo de invasão na área de estudo e analisando o comportamento espectral de amostras de areia e acículas de *Pinus* spp presentes no local. Utilizaram-se imagens dos satélites Landsat entre os anos 1985 e 2017, e Rapid Eye entre 2011 e 2017, o que possibilitou obter uma série histórica de imagens e compreender o processo de invasão desde seu início. Para identificação dos pixels *Pinus*, empregou-se o classificador *Spectral Angle Mapper*, cujo desempenho na identificação de áreas de *Pinus* teve exatidão acima de 80%. O estudo de radiometria foi realizado a partir de assinaturas espectrais medidas em laboratório e comparadas com assinaturas dos mesmos alvos obtidas por imagens do satélite Landsat. Os resultados confirmaram a capacidade invasora do *Pinus* spp, com crescente ocupação de áreas e uma leve aceleração na taxa de expansão. Verificou-se que o vento foi o principal fator de dispersão de sementes na área de estudo, e que as manchas de *Pinus* spp estão crescendo no sentido do vento NE-SO, que é dominante na região. A invasão nos campos de dunas inicialmente dependeu de sementes vindas de áreas próximas, mas atualmente é alimentada por sementes oriundas de árvores adultas existentes no local, o que agrava o problema. É importante ter ciência de que a presença do *Pinus* seguirá crescendo, com tendência de ocupar todos os espaços existentes na área de estudo, excluindo-se apenas as lagoas permanentes e topos de dunas. Portanto, as ações necessárias à erradicação são urgentes, e o atraso nestas ações vai ocasionar prejuízos ainda maiores à biodiversidade do Parque.

ABSTRACT

The occupation of natural areas by invasive alien species is a growing problem, and second most important contributor to biodiversity loss on the planet. This problem has also reached protected areas, such as the National Park of Lagoa do Peixe (NPLP), a Conservation Unit (CU) located on the coastal plain of Rio Grande do Sul. The growth of the area occupied by the exotic invader *Pinus* spp in the Park has arrived to such proportions that it motivated control agencies to intervene and demand measures regarding the eradication and control of the exotic in and around the Park. This dissertation aimed to study the space-time evolution of the area occupied by the exotic species *Pinus* spp in the northern part of the NPLP through remote sensing techniques, and supported by a study of radiometry of sand and *Pinus* targets. Two scientific articles were produced, detailing the invasion process in the study area and analyzing the spectral behavior of samples of sand and *Pinus* spp needles present at the site. Images from the satellites Landsat were used between 1985 and 2017 and from Rapid Eye between 2011 and 2017, which allowed to obtain a historical series of images and to understand the process of invasion from the beginning. To identify the *Pinus* pixels, the Spectral Angle Mapper classifier was used, whose performance in the identification of *Pinus* areas had an accuracy above 80%. The radiometry study was performed from spectral signatures measured in the laboratory and compared with signatures of the same targets obtained by Landsat satellite images. The results confirmed the invasive capacity of *Pinus* spp, with increasing occupation of areas and a slight acceleration in the rate of expansion. It was verified that the wind was the main seed dispersion factor in the study area, and that *Pinus* spp spots are growing towards the NE-SW wind, which is dominant in the region. The invasion in the dune fields initially depended on seeds coming from nearby areas, but is currently fed by seeds from existing local adult trees, which aggravates the problem. It is important to be aware that the presence of *Pinus* will continue to grow, tending to occupy all spaces in the study area, excluding only lakes and dune tops. Therefore, the actions necessary for the eradication are urgent, and the delay in these actions will cause even greater damages to the biodiversity of the Park.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação assinaturas espectrais por vetores de duas dimensões..	25
Figura 2 - Quadro comparativo entre os diferentes satélites Landsat.....	27
Figura 3 - Localização do PNLP e área de estudo	30
Figura 4 - Diversidade de ambientes do PNLP.....	31
Figura 5 - Secção geológica esquemática transversal na latitude aproximada de Porto Alegre	32
Figura 6 - Ilustração geológica simplificada mostrando parte da Planície Costeira do RS.....	33
Figura 7 - Composição em falsa cor RGB-453 Landsat 5 de 04/05/2005, mostrando a área de estudo	34
Figura 8- Pinus plantado à margem da Lagoa do Pai João, em foto feita antes da colheita.....	35
Figura 9- Frente de dunas avançando sobre a área de Pinus plantado à margem da Lagoa do Pai João, em foto feita após a colheita.....	35
Figura 10 - Pinus disseminado sobre vegetação herbácea no campo de dunas.....	36
Figura 11 - Pinus disseminado sobre vegetação herbácea no campo de dunas.....	36
Figura 12 - Pinus disseminado em alta densidade de plantas.....	37
Figura 13 - Pinus disseminado no entorno de árvore adulta.....	37
Figura 14 - Frente de dunas cobrindo árvores adultas de Pinus no campo de dunas.....	38
Figura 15 - Área do campo de dunas livre da presença do Pinus	38
Figura 16 - Pinus disseminado próximo a linha de praia, formato da copa é mais aberto e acículas são mais amareladas	39

Figuras do PRIMEIRO ARTIGO

Figura 1: Localização do Parque Nacional da Lagoa do Peixe (PNLP) e da área de estudo.....	44
Figura 2: Composição em falsa cor RGB-453 Landsat 5 de 04/05/2005, mostrando a área de estudo	45
Figura 3 - Variação da área de Pinus na margem da lagoa do Pai João a partir da classificação SAM, limiar 0,14.....	50

Figura 4 - Variação da área de Pinus em meio ao campo de dunas a partir da classificação SAM 0,20	51
Figura 5 - Comparação do aumento área de Pinus calculada a partir dos limites angulares 0,14 e 0,24 radianos pelo método SAM	53

Figuras do SEGUNDO ARTIGO

Figura 1 - Gráficos gerado pelo ENVI mostrando a reflectância pixels areia (esquerda) e Pinus (direita) nas seis bandas espectrais Landsat TM	69
Figura 2 - Reflectância espectral de areia seca e molhada, medidas no espectroradiômetro.....	70
Figura 3 - Espectros de areia seca e molhada reamostrados para as bandas L8....	70
Figura 4 - Assinaturas espectrais de amostras de Pinus medidas no espectroradiômetro.....	71
Figura 5 - Bandas Landsat 8 sobrepostas à assinatura espectral médias do Pinus..	72
Figura 6: Assinatura espectral média das amostras de Pinus, reamostrada para as seis bandas do sensor OLI-Landsat 8.....	72
Figura 7: Curvas espectrais da areia (laboratório X satélite Landsat 7)	74
Figura 8: Curvas espectrais da areia (laboratório X satélite Landsat 5)	74
Figura 9: Curvas espectrais da areia (laboratório X satélite Landsat 8)	74
Figura 10: Curvas espectrais Pinus (laboratório X satélite Landsat 7)	76
Figura 11: Curvas espectrais Pinus (laboratório X satélite Landsat 5)	76
Figura 12: Curvas espectrais Pinus (laboratório X satélite Landsat 8)	76
Figura 13 - Assinaturas espectrais em área de mata nativa.....	76
Figura 14 - Assinaturas espectrais em área de Pinus plantado dunas móveis	78
Figura 15 - Assinaturas espectrais em área de Pinus plantado mal-sucedido.....	79
Figura 16 - Assinaturas espectrais em área de bem-sucedido	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Bandas espectrais do satélite Rapid Eye.....	28
---	----

Tabelas do PRIMEIRO ARTIGO

Tabela 1 - Áreas de Pinus na margem da lagoa do Pai João a partir da classificação SAM em diferentes limiares. Valores em hectares.....	50
Tabela 2 - Área de Pinus disseminado em meio ao campo de dunas partir da classificação SAM 0,20 radianos. Valores em hectares.....	51
Tabela 3 - Avaliação da classificação SAM para as diferentes áreas estudadas....	52

Tabelas do SEGUNDO ARTIGO

Tabela 1 - Imagens utilizadas no estudo.....	69
Tabela 2 - Dados espectrais comparativos, areia, imagem 2000 Landsat 7.....	73
Tabela 3 - Dados espectrais comparativos, areia, imagem 2005 Landsat 5.....	73
Tabela 4 - Dados espectrais comparativos, areia, imagem 2014 Landsat 8.....	73
Tabela 5 - Dados espectrais comparativos, Pinus imagem 2000 Landsat 7.....	75
Tabela 6 - Dados espectrais comparativos, Pinus imagem 2005 Landsat 5.....	75
Tabela 7 - Dados espectrais comparativos, Pinus imagem 2014 Landsat 8.....	75

LISTA DE SIGLAS

ACP - Ação Civil Pública

AGEFLOR - Associação Gaúcha de Empresas Florestais

FLOPAL - Florestadora Palmares Ltda

GE - Google Earth

IUCN - International Union for the Conservation of Nature

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

MPF - Ministério Público Federal

MMA - Ministério do Meio Ambiente

PNLP - Parque Nacional da Lagoa do Peixe

ROI - Region Of Interest

RS - Rio Grande do Sul

SAM - Spectral Angle Mapper

SEMA - Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

UC - Unidade de Conservação

USGS - United States Geological Survey

VANT - Veículo aéreo não tripulado

SUMÁRIO

Estrutura da dissertação	13
1. JUSTIFICATIVA	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos específicos	15
3. REVISÃO TEÓRICA	16
3.1 Espécies exóticas invasoras e prejuízos a biodiversidade	16
3.2 O <i>Pinus</i> spp como exótica invasora	17
3.3 O gênero botânico <i>Pinus</i> no Parque Nacional da Lagoa do Peixe, histórico e situação atual	18
3.4 Sensoriamento remoto aplicado em estudos de florestas.....	19
3.5 Estudos de sensoriamento remoto identificando <i>Pinus</i> no Rio Grande do Sul...	20
3.6 Interpretação de imagens orbitais	22
3.7 Métodos de classificação automática de pixels	23
3.8 O método <i>Spectral Angle Mapper</i> (SAM)	24
3.9 Radiometria	26
3.10 Satélites Landsat	26
3.11 Satélites Rapid Eye	28
3.12 Técnicas de correção atmosférica em imagens de satélite	28
4. ÁREA DE ESTUDO.....	29
4.1 Características gerais.....	29
4.2 Vegetação.....	30
4.3 Geomorfologia.....	31
4.4 Clima.....	34
4.4 Fotos da área de estudo.....	34
5. PRIMEIRO ARTIGO Mapeamento espaço-temporal da área ocupada pela espécie exótica invasora <i>Pinus</i> spp na área norte do Parque Nacional da Lagoa do Peixe.....	40
6. SEGUNDO ARTIGO Estudo comparativo entre assinaturas espectrais obtidas através de radiometria de laboratório e sensores orbitais.....	62
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

Estrutura da dissertação

O texto desta dissertação está organizado na forma de uma seção introdutória e dois artigos enviados a revistas científicas qualificadas da área de Geociências. Inicialmente, apresenta-se a justificativa do estudo, introduzindo brevemente o tema das espécies exóticas invasoras e explicando a importância e oportunidade de estudar o problema da disseminação da exótica invasora *Pinus* spp na área norte do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. A seguir, apresentam-se os principais atributos do Parque Nacional da Lagoa do Peixe (PNLP), bem como mapas da área de estudo e fotos mostrando a presença do *Pinus* no interior do Parque. Finalizando, na parte que precede os artigos, é feita uma breve revisão teórica sobre os conceitos necessários à boa compreensão dos mesmos.

No primeiro artigo, utiliza-se técnicas de sensoriamento remoto para mapear duas áreas vizinhas e ocupadas pelo *Pinus* na parte norte do Parque Nacional. Uma área de *Pinus*, plantado as margens da Lagoa do Pai João, foi estudada a partir de uma série de imagens Landsat ao longo de 30 anos. O campo de dunas vizinho à Lagoa, e ocupado por *Pinus* disseminado, foi estudado com uso de imagens dos satélites Rapid Eye e Landsat.

O segundo artigo realizou um estudo de radiometria com foco no estudo da reflectância do *Pinus* e da areia do campo de dunas, analisando as assinaturas espectrais destes alvos de sensoriamento remoto e comparando os espectros coletados a partir de imagens de satélite com espectros dos mesmos alvos, porém obtidos por medidas de laboratório. Após os artigos, segue-se a conclusão da dissertação e as referências bibliográficas.

1. JUSTIFICATIVA

A presente dissertação de mestrado concretizou-se a partir da necessidade de entender melhor a ocupação de crescentes áreas pela espécie exótica invasora *Pinus* spp no Parque Nacional da Lagoa do Peixe (PNLP). Esta necessidade trouxe também a oportunidade de qualificar um servidor público que trabalha no próprio Parque Nacional, através da capacitação nas áreas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, ferramentas fundamentais para dimensionar este problema ambiental e extremamente úteis à gestão de uma Unidade de Conservação.

Em publicação do Ministério do Meio Ambiente (MMA) a crescente ocupação de áreas naturais por espécies exóticas é colocada como segunda maior causa de perda de biodiversidade no planeta, sendo superada somente pela perda e degradação de habitats (BRASIL-MMA, 2009). A atenção para as exóticas invasoras é recente no Brasil, apesar do grande número de espécies já estabelecidas em nosso território. O esforço para listar tais espécies iniciou com o Informe Nacional sobre Espécies Exóticas Invasoras, elaborado nos anos de 2004 e 2005 a partir de iniciativa do MMA. O Informe foi subdividido em cinco áreas temáticas e os relatórios trataram de espécies exóticas invasoras atuais e potenciais, incluindo uma avaliação sobre a estrutura existente no país para a prevenção e o controle de invasões biológicas (ZENNI, DECHOUM e ZILLER, 2016).

O Parque Nacional da Lagoa do Peixe é uma Unidade de Conservação (UC) federal localizada na planície costeira do Rio Grande do Sul (RS) cujo objetivo de criação inclui a proteção do ecossistema litorâneo da região da Lagoa do Peixe. No entanto esta área natural protegida tem sofrido com a presença crescente do Pinus, cuja invasão chegou a níveis tão altos que motivou, no ano de 2006, o Ministério Público Federal (MPF) a ajuizar uma Ação Civil Pública (ACP) contra o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis -IBAMA, que, na época, era o órgão gestor do Parque. Nesta ACP, o Ministério Público solicitou a adoção de medidas de proteção do ecossistema representado pelo Parque Nacional, sobretudo quanto à presença de vegetação exótica no interior e no entorno desta Unidade de Conservação.

Como decorrência da intervenção do MPF, o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), atual órgão gestor do Parque, está executado um plano de erradicação do Pinus, no interior e entorno da UC (ICMBio, 2014). Dentre as diversas ações já implementadas pelo ICMBio, destaca-se a eliminação de uma grande área de silvicultura que havia no entorno da Lagoa do Pai João, parte norte do Parque (ICMBio, 2014). No entanto, ainda não se iniciou a erradicação do Pinus originado por disseminação de sementes, que vem ocupando espaço crescente sobre o campo de dunas da área norte do PNL, justamente a área de estudo deste trabalho.

Frente a esse quadro, a ciência do Sensoriamento Remoto torna-se importante ferramenta para compreender a dinâmica da ocupação do Pinus na área

de estudo, destacando-se a disponibilidade de séries históricas de imagens do satélite Landsat desde 1984, em seis bandas espectrais no espectro óptico e resolução espacial de 30m.

Este trabalho pretende mapear o tamanho atual da área ocupada pelo Pinus na área norte do PNLN, compreender a dinâmica desta ocupação a partir de séries históricas de imagens de satélite, e assim gerar subsídios ao processo de erradicação do Pinus no interior do Parque Nacional.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Esta dissertação tem como objetivo geral estudar a evolução espaço-temporal da área ocupada pela espécie exótica *Pinus* spp na parte norte do PNLN, através de técnicas de sensoriamento remoto, apoiadas em um estudo de radiometria dos alvos areia e Pinus.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos estão distribuídos nos dois artigos.

Artigo 1

a) Mapear a evolução da área ocupada pelo Pinus plantado às margens da Lagoa do Pai João a partir de imagens de satélite no período de 1985 a 2013;

b) Mapear a presença do Pinus que se originou por dispersão de sementes em meio ao campo de dunas a partir de imagens de satélite entre os anos 2011 e 2017, e verificar as tendências de expansão.

Artigo 2

a) Fazer um estudo de radiometria em laboratório, identificando as assinaturas espectrais de *Pinus elliottii* e areia de dunas, a partir de amostras existentes na área norte do PNLN;

b) Realizar um estudo comparativo entre as assinaturas espectrais medidas em laboratório, e assinaturas dos mesmos materiais, obtidas em imagens de satélite;

c) Fazer, a partir da identificação de pixels puros presentes nas imagens de satélite, uma análise temporal de assinaturas espectrais de areia e Pinus.

3. REVISÃO TEÓRICA

3.1 Espécies exóticas invasoras e prejuízos a biodiversidade

Espécie exótica é toda espécie que se encontra fora de sua área de distribuição natural. Espécie exótica invasora, por sua vez, é definida como sendo aquela que tem capacidade de adaptar-se e reproduzir-se em proporções tais que passa a dominar habitats, ocupando o espaço de espécies nativas e tendendo a tornar-se dominantes após determinado período de tempo (ZILLER; GALVÃO, 2002). De acordo com a Convenção sobre Diversidade Biológica, espécies exóticas invasoras são organismos que ao serem introduzidos fora da sua área de distribuição natural, ameaçam ecossistemas, habitats ou outras espécies (BRASIL-MMA, 2009).

Uma análise da Lista Vermelha da União Internacional para Conservação da Natureza (IUNC) mostra que as exóticas invasoras figuram como segunda ameaça mais comum associada a espécies que se tornaram completamente extintas, e são a ameaça mais comum associada a extinções de anfíbios, répteis e mamíferos. Tais espécies também podem gerar mudanças na estrutura e composição dos ecossistemas, levando a impactos prejudiciais significativos para os serviços ecossistêmicos, afetando economias e bem-estar das populações humanas (IUCN, 2018). Segundo Mack et al. (2000) plantas invasoras podem alterar completamente o regime de fogo, a ciclagem de nutrientes, o balanço hidrológico e energético em ecossistemas originais, podendo reduzir dramaticamente a abundância ou sobrevivência das espécies nativas.

Ao contrário de muitos problemas ambientais que têm seus impactos amenizados e absorvidos pelo tempo, as consequências negativas da invasão biológica agravam-se na medida que as plantas exóticas invasoras ocupam o

espaço das nativas. Desta forma, com o passar do tempo, a invasão aumenta a perda de biodiversidade, amplia a alteração dos ciclos naturais do ecossistema atingido, aumenta a mudança na fisionomia da paisagem natural, bem como inibe o processo de sucessão ecológica (ZILLER, 2001).

No Brasil, a falta do manejo de espécies exóticas invasoras em áreas protegidas é o fator de maior preocupação em relação ao avanço das invasões biológicas. Muitas recomendações técnicas ainda se limitam a ações de diagnóstico e monitoramento ao invés de adotar uma abordagem prática e proativa, especialmente quanto à prevenção na introdução de espécies, bem como na detecção e eliminação precoce de populações que estão em processo de estabelecimento e invasão (ZILLER; DECHOUM, 2013).

3.2 O *Pinus* spp como exótica invasora

No Rio Grande do Sul, a SEMA-RS publicou a portaria nº 79 de 31 de outubro de 2013, na qual reconhece a Lista de Espécies Exóticas Invasoras do estado, estabelece normas de controle e dá outras providências sobre o tema. O *Pinus* consta na lista como espécie exótica invasora da Categoria 2, que compreende plantas utilizadas em sistemas produtivos. As exóticas invasoras desta categoria devem ficar limitadas às áreas de produção sem gerar invasão biológica no entorno, e compete aos responsáveis implantar medidas permanentes de controle para evitar impactos ambientais (SEMA-RS, 2016).

A capacidade invasora do *Pinus* no hemisfério sul está associada, entre outros fatores, às seguintes características das plantas: sementes aladas com pequena massa que se dispersam facilmente pelo vento; ao período juvenil curto; alto grau de germinação das sementes; intervalos curtos entre as chuvas de sementes; longo tempo de permanência das árvores; resistência ao fogo de baixa intensidade; e grande dispersão por fatores antrópicos (RICHARDSON; HIGGINS, 1998). Além destes fatores, Bechara (2014) inclui o estoque de sementes sobre a árvore e existência de muitos estróbilos do ano anterior que permanecem nas árvores de *Pinus* spp contendo sementes viáveis. Zilller e Galvão (2002) destacam que a ausência de inimigos naturais, o crescimento rápido e a alelopatia facilitam sua adaptação em novas áreas, de modo que o gênero *Pinus* tem sido registrado como potencial invasor de áreas abertas, sejam elas degradadas ou naturalmente

ocupadas por vegetação herbáceo-arbustiva. Muito embora as invasões sejam na maior parte dos casos incipientes e com árvores esparsas, é preciso considerar que este problema se agrava com o passar do tempo, especialmente na total ausência de medidas de controle (ZILLER; GALVÃO, 2002). Tipologias vegetacionais abertas (não florestais), tais como campos naturais e restingas, são ambientes citados por Bechara (2014) como suscetíveis à invasão por Pinus. Tais ambientes propensos à invasão estão presentes na área norte do PNL, e o potencial de invasão aumenta na medida em que tais áreas são limítrofes de talhões de silvicultura de Pinus.

Ledgard e Langer (1999) consideram que sítios de disseminação são locais a partir dos quais a dispersão de sementes é potencializada em função da posição no relevo e da direção dos ventos predominantes. Em modelo proposto por Richardson e Higgins (1998), o vento é considerado como único vetor de dispersão de sementes do gênero Pinus. Já Ziller e Galvão (2002), em estudo realizado na região leste do Paraná, reportam que o relevo associado à direção dos ventos é fator fundamental na dispersão de sementes de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. Em consonância com os autores acima citados, Portz et al. (2011) também destacam o vento como fator de dispersão de sementes de Pinus no Parque Nacional da Lagoa do Peixe (PNLP), visto que a região da Lagoa do Peixe sofre constante ação de fortes ventos.

3.3 O gênero botânico Pinus no Parque Nacional da Lagoa do Peixe, histórico e situação atual

Os plantios de Pinus no litoral gaúcho tiveram seu início na década de 1970, tendo sido os primeiros cultivos realizados com sementes de *Pinus elliottii* vindas da Geórgia – Estados Unidos. A Florestadora Palmares Ltda (FLOPAL) foi responsável pela maioria dos plantios realizados de forma pioneira no litoral, durante a década de 1970 (AGEFLOR, 2017). Tais plantios florestais receberam incentivos fiscais do governo federal, na época por meio do Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, e desenvolveram-se até meados dos anos 1980. Além dos incentivos fiscais, a implantação destes plantios foi favorecida pela existência de grandes áreas ociosas, consideradas pelos produtores rurais da região como improdutivas ou de baixo rendimento. A utilização de recursos financeiros de incentivos fiscais, minimizaram ou eliminaram os riscos dos empreendimentos com Pinus. Um dos requisitos para análise dos projetos de implantação era o reconhecimento sobre a

posse da terra, não importando se fosse campo de dunas, marismas ou até mesmo dunas marítimas ou lagunares (OLIVEIRA, 2004).

No ano de 1982, a empresa FLOPAL realizou um plantio de *Pinus* na margem leste da lagoa do Pai João, em área que hoje pertence ao Parque Nacional (ICMBio, 2011). Na mesma época, esta empresa realizou também um plantio na faixa litorânea, próximo à linha que hoje demarca o limite leste do PNL. Tais plantios, juntamente com áreas de silvicultura situadas na divisa do Parque, contribuíram para disseminar sementes de *Pinus* na área norte do PNL.

3.4 Sensoriamento remoto aplicado em estudos de florestas plantadas.

Técnicas de sensoriamento remoto têm sido aplicadas no estudo de florestas fornecendo três níveis de informação, sendo o primeiro sobre a extensão espacial da cobertura florestal, o segundo sobre o tipo de florestas e principais espécies presentes, e o terceiro sobre propriedade bioquímicas e biofísicas. A avaliação contínua dessas informações florestais ao longo do tempo permite o monitoramento abrangente dos recursos florestais. A combinação de novas tecnologias de sensoriamento remoto, gerando novos dados e técnicas de análise, com avanços na modelagem de ecossistemas, tem assegurado um papel importante para o sensoriamento remoto no mapeamento, monitoramento e manejo florestal (BOYD; DANSON, 2005).

Em estudos sobre cobertura de florestas, além dos tradicionais mapeamentos que discretizam a vegetação em classes fisionômicas, ênfase tem sido dada à quantificação de parâmetros biofísicos e às relações existentes entre eles. Os parâmetros biofísicos caracterizam a arquitetura de um dossel e incluem o Índice de Área Foliar (IAF) e a biomassa vegetal (SOUSA; PONZONI, 1998). O IAF é um índice que expressa a quantidade em área de folhas por área de terreno, onde valores maiores ou menores de IAF expressam variação na reflectância do dossel florestal. No entanto, há um valor de saturação a partir do qual o aumento do IAF não implica em alteração na reflectância do dossel. Estes valores de IAF são específicos para cada região espectral e são denominados de pontos de saturação (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2011).

Estudos para estimar volume de madeira a partir da reflectância do dossel florestal têm sido efetuados para florestas de *Eucalyptus* (PONZONI e

SHIMABUKURO 1998; BERRA, 2012; ALBA et al 2017) e de Pinus (SOUSA e PONZONI, 1998; ORUÉ, 2002; BERRA, 2013).

Sousa e Ponzoni (1998) concluíram que não foi possível estimar e quantificar o volume de madeira por sensoriamento remoto, em estudo realizado em área de silvicultura de Pinus, mas foi possível identificar áreas que sofreram alterações na biomassa devido a ações de manejo florestal. Orué (2002) examinou a correlação entre variáveis dendrométricas com dados espectrais do satélite Landsat 7 em povoamentos de Pinus, concluindo que a informação espectral não foi suficiente para a discriminação das classes de volume. Neste trabalho a banda 4 teve a melhor correlação com as variáveis número de árvores, área basal e volume, mas o modelo construído através da regressão linear entre o volume e a refletância desta banda explicou somente 43% da variação observada. Berra (2013) investigou a relação de dados espectrais com o volume de madeira em silvicultura de Pinus usando dados dos sensores TM/Landsat-5 e LISS-III/ResourceSat-1. Observou que a sensibilidade dos dados orbitais para medir as variações dos parâmetros biofísicos dos dosséis de Pinus é fortemente dependente do grau de fechamento do dossel e da classe de fundo e que a partir do fechamento do dossel, os dados espectrais perdem gradativamente a sensibilidade às variações dos parâmetros biofísicos, indicando que foi atingido o ponto de saturação.

3.5 Estudos de sensoriamento remoto em áreas de Pinus no Rio Grande do Sul

Ducati et al. (1999) estudaram a cobertura vegetal de 15 municípios na região nordeste do Rio Grande do Sul através de imagens do satélite Landsat 5 e estudos de campo. Estes autores realizaram uma classificação inicial dos alvos de interesse com base em agrupamentos semelhantes de pixels. Dois posteriores trabalhos de campo permitiram localizar e identificar com maior precisão os alvos de cada classe. Esta identificação, combinada com a análise dos níveis de cinza, permitiu refinar a classificação inicial, obtendo a classificação final pelo método da máxima verossimilhança. Assim, foi possível diferenciar espectralmente Pinus, eucalipto e araucária, entre outras classes de vegetação propostas pelo trabalho. Os autores relataram a dificuldade de classificar corretamente pequenas áreas, problema que foi acentuado em regiões mais antropizadas ou muito acidentadas.

Posteriormente, parte desta região foi novamente estudada, utilizando dados de outro satélite. Wagner e Ducati (2005) fizeram um mapeamento do uso do solo no município de Cambará do Sul-RS e entorno, usando dados do sensor ASTER. O método compreendeu uma fase inicial, na qual foi feita uma classificação não-supervisionada que definiu os agrupamentos de pixels com resposta espectral semelhante. Na fase posterior, foi feita localização das classes em campo, através de equipamento GPS, o que permitiu definir amostras de treinamento para posterior classificação supervisionada. As nove bandas espectrais do sensor ASTER foram agrupadas em três conjuntos: VNIR, SWIR e VNIR+SWIR, formando assim três diferentes imagens, e sobre estas imagens foi aplicada a classificação pelo método da máxima verossimilhança gaussiana. Com esta metodologia, o sensor ASTER permitiu uma diferenciação de classes mais acurada do que a obtida no trabalho de Ducati *et al*, em 1999, de modo que foi possível separar as respostas espectrais de Pinus jovem, Pinus adulto e Pinus velho, além de outras classes como eucalipto, mata nativa e solo exposto.

Portz, Guasselli e Correa (2011) analisaram as variações espaciais e temporais do NDVI na Lagoa do Peixe, a fim de auxiliar na compreensão das variáveis ambientais do entorno, bem como fazer uma relação do NDVI com o regime de chuvas. O objetivo do trabalho não foi estudar a presença de Pinus, mas, entre os resultados apresentados, os autores mostraram que o NDVI identificou um aumento considerável na área de silvicultura à margem leste da Lagoa do Peixe entre os anos de 1986 e 2009.

Portz et al. (2011) analisaram uma série temporal de 5 imagens do satélite Landsat 5-TM, datadas de 1986, 1993, 1997, 2007 e 2009, fazendo classificação manual dos pixels e posterior vetorização para identificar áreas de Pinus no interior e entorno do PNLP. A interpretação visual foi feita sob uma composição colorida falsa cor RGB-453 com aplicação de contraste interativo para facilitar a diferenciação entre as classes de pixels. De forma complementar, usaram imagens NDVI, nas quais os maiores valores do índice correspondiam a áreas de silvicultura de Pinus. Os resultados mostraram considerável aumento na área plantada. Ressalta-se que, apesar de ser um trabalho desenvolvido no interior e entorno do PNLP, não houve estudo mais detalhado sobre os campos de dunas entre a Lagoa do Pai João e o Mar, área que é objeto da presente dissertação.

3.6 Interpretação de imagens orbitais

Conforme Florenzano (2011), a interpretação de fotografias ou imagens consiste em identificar e dar significado aos objetos nelas existentes. No caso de imagens orbitais, quanto maior o conhecimento do analista sobre a área interpretada e sobre o sensoriamento remoto aplicado ao caso, maior será o potencial de informação que ele pode extrair da imagem. Neste contexto do mapeamento com uso de imagens orbitais, o trabalho de campo é parte fundamental do processo e traz mais confiabilidade ao resultado da interpretação.

Segundo Jensen (2009), a análise dos dados de sensoriamento remoto busca identificar elementos importantes na cena, que, uma vez identificados, são utilizados na solução e entendimento de questões correlatas. Para fazer interpretação visual de imagens, são considerados elementos como os tons de cinza da imagem, a cor, o tamanho dos objetos, a forma, a textura, a existência de sombras e a localização geográfica dos objetos. Jensen (2009) explica também que cérebro humano é muito eficiente para reconhecer e associar as feições nas imagens, em função da experiência anterior do analista em interpretar fotografias, perfis de feições da Terra e formas dos objetos.

A reflectância de um determinado objeto na paisagem, seja ele um lago, um campo ou uma floresta, indica uma quantidade relativa de radiação eletromagnética que é refletida por este objeto. No caso da vegetação, um dossel vegetal apresenta valores baixos de reflectância na região do visível, valores elevados na região do infravermelho próximo e valores moderados no infravermelho médio (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2011). Desta forma, espera-se que os pixels de vegetação se apresentem escuros em uma imagem feita na região do visível, claros em uma imagem feita na região do infravermelho próximo, e em tons médios de cinza na região do infravermelho médio, permitindo a diferenciação pelo olho humano. No entanto, a análise de imagens em tons de cinza pela visão humana é bastante limitada. Considerando que o olho humano distingue cem vezes mais as cores do que os tons de cinza, a geração de composições coloridas em imagens de satélite é um importante meio de interpretação visual, e pode ser considerada uma forma de realce da imagem (FLORENZANO, 2011).

Porém, o trabalho de interpretação visual pode se tornar bastante demorado, devido ao número de bandas a ser analisado, a extensão muitas vezes grande da

área em estudo, e a necessidade de analisar séries de imagens multitemporais. Neste contexto, surgiram técnicas de classificação computacional, automatizando o processo de extração de informações das imagens digitais e reduzindo a subjetividade da interpretação humana (MENESES; SANO, 2012). Entretanto, de acordo com Jensen (2009), o uso de técnicas computacionais não garante que o processamento digital seja superior à análise visual de imagens, mas apenas indica que, em determinados casos, a abordagem digital será mais adequada ao problema em estudo. Muitas vezes, obtém-se ótimos resultados combinando ambos os métodos, visual e computacional, na análise das imagens. Esta abordagem combinada de análise visual e classificação computacional foi utilizada no presente trabalho, destacando-se que o procedimento de identificação visual favoreceu-se do conhecimento da região e suas fisionomias vegetais pelo fotointérprete, autor desta dissertação, que é analista ambiental do Parque Nacional da Lagoa do Peixe.

3.7 Métodos de classificação automática de pixels

A classificação em imagens multiespectrais é o processo de associar os pixels da imagem a um número limitado de classes individuais que representam os objetos do mundo real com base nos seus valores digitais. Este processo, para ser bem sucedido, exige que os objetos na imagem sejam espectralmente distintos. O resultado final de uma classificação computacional é um mapa de pixels, representando em diferentes cores, os objetos existentes na imagem digital, e caberá ao analista atribuir significado às diversas classes encontradas. Entende-se então que a classificação automática nada mais é do que um reconhecimento de padrões entre os pixels da imagem (MENESES; SANO, 2012).

Os métodos automáticos de classificação dividem-se em três grupos: classificação supervisionada, não supervisionada e orientada ao objeto. Na técnica de classificação supervisionada, as classes são definidas pelo analista, que deve fornecer amostras (áreas de treinamento) das classes de pixels existentes. Após a definição das amostras, um algoritmo irá localizar todos os demais pixels pertencentes às classes definidas, baseando-se em regras estatísticas. Na classificação não supervisionada, o algoritmo decide, também com base em regras estatísticas, quais as classes que serão separadas, bem como os pixels pertencentes a cada uma delas, mas sem o treinamento de amostras feito pelo

analista (FLORENZANO, 2011). Para explorar os dados obtidos por sensores de alta resolução espacial, surgiram novas abordagens além dos métodos supervisionado e não supervisionado, destacando-se a classificação orientada ao objeto. No conceito de objeto, não se considera o valor de cada pixel, mas o valor de cada conjunto de pixels (segmento ou objeto) e as relações entre os objetos. Assim como na interpretação visual, na classificação orientada ao objeto é essencial o conhecimento temático do intérprete sobre a área em estudo para definir as chaves de interpretação da imagem (FLORENZANO, 2011).

3.8 O método *Spectral Angle Mapper* (SAM)

O *Spectral Angle Mapper* (SAM) é um classificador supervisionado, capaz de determinar a similaridade entre assinaturas espectrais, comparando o espectro de cada pixel contido na imagem com um espectro de referência. Ressalta-se aqui que o termo assinatura espectral deve sempre ser empregado referindo-se à forma típica de um objeto refletir a radiação eletromagnética nele incidente (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2011). A assinatura espectral de referência pode ser obtida a partir de medidas feita em laboratório, medidas feitas em campo, ou ser extraída diretamente da imagem de satélite, a partir da seleção de pixels puros para o alvo desejado. Em uma imagem obtida por sensores multiespectrais, cada assinatura espectral pode ser representada como um vetor no espaço N-dimensional, onde N é o número de bandas espectrais utilizadas para construir a curva espectral (PETROPOULOS, 2010).

Cada vetor terá duas características principais, que são: a) um comprimento correspondente a sua magnitude; b) um ângulo em relação aos eixos que definem seu sistema de coordenadas, conforme ilustrado na Figura 1. Ângulos pequenos entre os vetores indicam alta similaridade entre as assinaturas espectrais, e ângulos grandes mostram baixa similaridade. O valor máximo de diferença angular para incluir pixels na classificação é determinado pelo analista, e expressa essencialmente a máxima separação aceitável entre o espectro de referência e o espectro do pixel a ser classificado. Deste modo, todos os pixels cujos vetores associados estejam a uma distância angular maior do que o limite estabelecido não serão classificados na categoria pretendida (KRUSE et al., 1993). Estes autores explicam também que a proximidade angular entre os vetores não depende do

tamanho destes, de modo que o método SAM é insensível a fatores de ganho. Como isso, espectros medidos em laboratório podem ser diretamente comparados com espectros obtidos por sensores remotos, os quais possuem fatores de ganho diversos devidos à variação nas condições de iluminação, topografia e geometria de visada. A principal diferença entre o SAM e outros algoritmos está no fato de que a classificação SAM se fundamenta na assinatura espectral como identidade dos alvos, enquanto os outros classificadores fundamentam-se na curva de distribuição estatística dos valores dos pixels (SOHN, REBELLO; 2002).

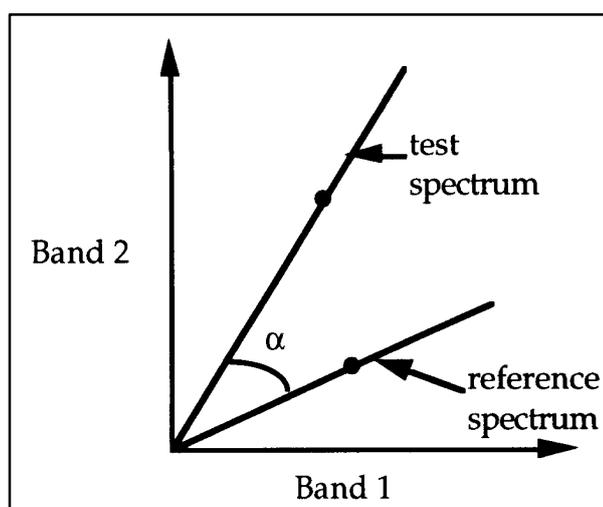


Figura 1- Representação assinaturas espectrais por vetores de duas dimensões

Fonte: Adaptado de Kruse *et al.* (1993)

Girouard *et al.* (2009) observam que a desvantagem principal do método SAM está na mistura espectral, e que um erro comum ao aplicar este método está na suposição errônea de que as assinaturas espectrais (pixels puros) escolhidas para classificar a imagem representam os espectros puros de um material de referência. Freitas, Haertel e Shimabukuro (2008) afirmam que mistura espectral ocorre sempre que um mesmo pixel inclui duas ou mais classes espectrais, e destacam que, em dados de moderada resolução espacial (Terra-MODIS, NOAA-AVHRR, CBERS-WFI), os pixels puros dificilmente estão disponíveis. Percebe-se então que a premissa da pureza espectral dos pixels escolhidos pode não ocorrer, e que a possibilidade de existirem pixels misturados aumenta com o tamanho do pixel.

3.9 Radiometria

A radiometria é a ciência da medição da radiação eletromagnética óptica. O termo radiometria confunde-se, em termos de significado, com o termo espectroscopia, definido por Clarck (1999) como o estudo da luz ou da radiação eletromagnética em geral, como função de seu comprimento de onda que foi emitido, refletido ou espalhado por um sólido, líquido ou gás. O termo espectroscopia é largamente utilizado na Física que estuda as interações entre matéria e energia eletromagnética e seria adequado ao propósito desta dissertação. Contudo, será utilizada a terminologia comum no Sensoriamento Remoto, adotando o termo radiometria.

A medição da quantidade de energia radiante por meio de equipamentos, chamados de radiômetros, necessita detectores com capacidade de converter a radiação eletromagnética em uma forma mais utilizável de energia; estes detectores são também conhecidos por transdutores. A maioria dos transdutores converte a energia da radiação óptica em sinais elétricos que podem ser tratados e armazenados adequadamente. Estes sinais são tratados com técnicas de filtragem, linearização e supressão de ruídos para posterior gravação e manipulação dos dados (PALMER; GRANT, 2010). Jensen (2009), reporta que os sensores orbitais estão equipados com radiômetros específicos para medir a energia recebida em bandas espectrais adequadas ao propósito de cada satélite, de modo que a tecnologia de medição das quantidades de radiação eletromagnética é fundamental no processo de sensoriamento remoto.

Pode-se dizer então que, ao interpretar uma imagem de satélite, se está, em última análise, interpretando dados de radiometria feita a grandes distâncias. No caso dos satélites Landsat, por exemplo, a distância entre o radiômetro e o alvo é de 705 km, e a radiação refletida pelos alvos atravessa esta considerável camada atmosférica antes de atingir os detectores do sensor orbital.

3.10 Os satélites Landsat

Desde 1972, os satélites Landsat têm continuamente adquirido imagens orbitais da Terra, disponibilizando assim dados necessários aos mais variados campos de pesquisa sobre o uso e transformações na superfície do planeta. Tais dados, gratuitamente disponíveis ao público, possuem aplicações no campo da

Silvicultura, Agricultura, Geologia, Planejamento Regional e Educação (USGS, 2016a). O presente estudo utilizou imagens dos satélites Landsat nas versões 5, 7 e 8, brevemente descritos a seguir.

O satélite Landsat 5, equipado com o sensor *Thematic Mapper*, lançado em março de 1984, manteve-se em funcionamento até janeiro de 2013, completando 28 anos e 10 meses de atividade, o mais longo período de operação para um satélite de observação da Terra. O Landsat 7, equipado com o sensor *ETM+*, lançado em abril de 1999, funcionou normalmente até 31 de março de 2003, quando se detectou um defeito que ocasionava a perda de parte dos dados nas imagens geradas. Tal problema persiste até hoje, de modo que o satélite permanece em órbita, porém enviando dados incompletos. O satélite Landsat 8, equipado com o sensor *OLI-Operacional Land Imager*, foi lançado em fevereiro de 2013 e segue em operação dando continuidade à missão Landsat (USGS, 2016a).

Estes satélites orbitam a 705 km de altura, em órbita síncrona solar com inclinação de 98.2°, para obter melhor condição de iluminação solar, possuem período de revisita de 16 dias e pixel de 30m. A Figura 2 apresenta um quadro comparativo mostrando as bandas espectrais das diversas versões já lançadas do satélite Landsat.

Band designations	Landsat band wavelength comparisons									
	All bands 30-meter resolution unless noted									
	L8 OLI/TIRS		L7 ETM+		L4-5 TM		L4-5 MSS*		L1-3 MSS*	
Coastal/Aerosol	Band 1	0.43–0.45	--	--	--	--	--	--	--	--
Blue	Band 2	0.45–0.51	Band 1	0.45–0.52	Band 1	0.45–0.52	--	--	--	--
Green	Band 3	0.53–0.59	Band 2	0.52–0.60	Band 2	0.52–0.60	Band 1	0.5–0.6 *	Band 4	0.5–0.6 *
Panchromatic	Band 8**	0.50–0.68	Band 8 **	0.52–0.90	--	--	--	--	--	--
Red	Band 4	0.64–0.67	Band 3	0.63–0.69	Band 3	0.63–0.69	Band 2	0.6–0.7 *	Band 5	0.6–0.7 *
Near-Infrared	Band 5	0.85–0.88	Band 4	0.77–0.90	Band 4	0.76–0.90	Band 3	0.7–0.8 *	Band 6	0.7–0.8 *
Near-Infrared	--	--	--	--	--	--	Band 4	0.8–1.1 *	Band 7	0.8–1.1*
Cirrus	Band 9	1.36–1.38	--	--	--	--	* Acquired at 79 meters, resampled to 60 meters ** 15-meter (panchromatic) T1 = Thermal (acquired at 100 meters, resampled to 30 meters) T2 = Thermal (acquired at 120 meters, resampled to 30 meters)			
Shortwave Infrared-1	Band 6	1.57–1.65	Band 5	1.55–1.75	Band 5	1.55–1.75				
Shortwave Infrared-2	Band 7	2.11–2.29	Band 7	2.09–2.35	Band 7	2.08–2.35				
Thermal	Band 10 T1	10.60–11.19	Band 6 T2	10.40–12.50	Band 6 T2	10.40–12.50				
Thermal	Band 11 T1	11.50–12.51	--	--	--	--				

Figura 2: Quadro comparativo entre os diferentes satélites Landsat.

Fonte: USGS (2016 a)

3.11 O satélite Rapid Eye

As imagens Rapid Eye são obtidas por uma constelação de cinco satélites movendo-se no mesmo plano orbital, e que contém sensores idênticos e igualmente calibrados entre si. Estes satélites deslocam-se a 630 km de altura, em órbita síncrona solar, possuem período de revisita de 5 dias e pixel de 5m.

A Tabela 1 apresenta as cinco bandas espectrais existentes nos satélites Rapid Eye. Destacam-se duas diferenças em relação ao Landsat: a) a presença da banda *Red Edge*; b) a ausência das bandas *Shortwave Infrared-1* e *Shortwave Infrared-2*.

Tabela 1 - Bandas espectrais do satélite Rapid Eye

Banda	Largura espectral
Blue	440 – 510
Green	520 – 590
Red	630 – 685
Red Edge	690 – 730
NIR	760 – 850

Fonte: (Planet, 2016)

3.12 Técnicas de correção atmosférica em imagens de satélite

A radiação eletromagnética refletida pela superfície terrestre será modificada antes de atingir os sensores orbitais, por espalhamento e absorção, devido aos gases e aerossóis presentes na atmosfera terrestre (SONG et al., 2001). Para minimizar esta interferência atmosférica, as bandas espectrais dos satélites são colocadas em faixas do espectro eletromagnético que sofrem menos influência da camada atmosférica. Tais regiões do espectro, que sofrem pouca absorção pelos gases atmosféricos, são chamadas de janelas espectrais atmosféricas (LATORRE, 2002). Todavia, mesmo sendo posicionadas nas janelas atmosféricas, as bandas utilizadas pelos sensores multiespectrais sofrem certo grau de interferência atmosférica.

Para minimizar tais efeitos, foram desenvolvidos métodos para a correção atmosférica, cujo objetivo é resgatar o valor da reflectância tal qual ela seria se fosse

medida na superfície terrestre, próximo ao alvo (LATORRE, 2002). Existem basicamente duas abordagens para fazer a correção dos efeitos da atmosfera nas imagens orbitais. Uma é baseada em dados obtidos da própria imagem, método que é conhecido como *Dark Object Subtraction*. Outra é baseada em Modelos de Transferência Radioativa, modelos matemáticos que utilizam parâmetros de caracterização da atmosfera presentes na cena, para calcular os valores da correção a ser aplicada (OLIVEIRA; PONZONI; MORAES, 2009). Algumas aplicações de sensoriamento remoto, tais como a correta visualização das assinaturas espectrais e a comparação de índices em séries temporais de imagens, exigem que os dados tenham passado pelo processo de correção atmosférica (JENSEN, 2009).

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1 Características gerais

O Parque Nacional da Lagoa do Peixe (PNLP), cuja localização é mostrada na Figura 3, é uma Unidade de Conservação (UC), pertencente ao Sistema Nacional de Unidades de Conservação e sob gestão do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Criado pelo Decreto Federal Nº 93.546 de 6 de novembro de 1986, possui área de 36.721 hectares e localiza-se na planície costeira do Rio Grande do Sul, abrangendo área dos municípios de Mostardas e Tavares. Seus objetivos de criação incluem proteger amostras dos ecossistemas litorâneos da região da Lagoa do Peixe, especialmente as espécies de aves migratórias que dela dependem para seu ciclo vital (ICMBio, 2017).

A Unidade de Conservação está incluída na lista brasileira de Sítios Ramsar, como zona prioritária para a conservação de áreas úmidas de importância internacional (BRASIL-MMA, 2017), e constitui uma das zonas núcleo da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica no Rio Grande do Sul (FEPAM, 2017).

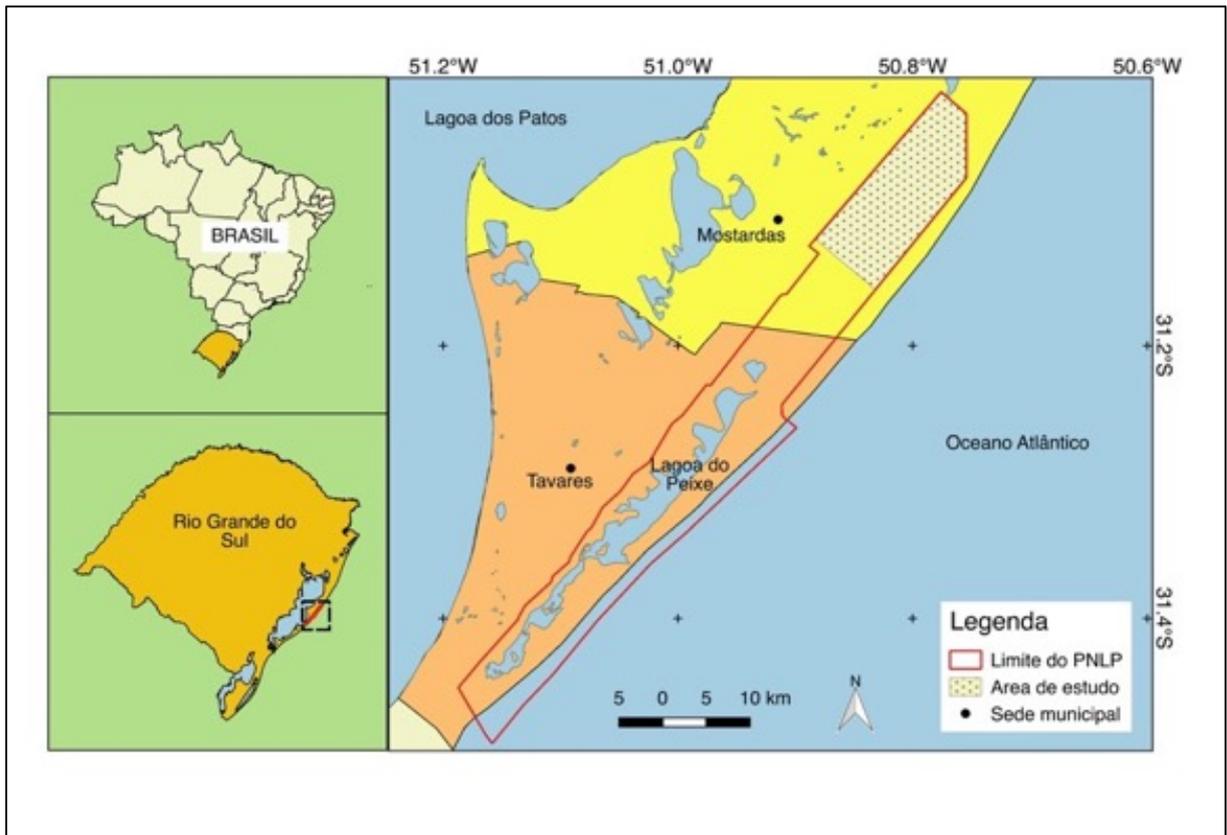


Figura 3 - Localização do Parque Nacional da Lagoa do Peixe e área de estudo.

4.2 Vegetação

O Parque reúne os variados ecossistemas que compõem a chamada Restinga Litorânea, agrupando diversas formações desde herbáceas até arbóreas, compostas por espécies vegetais com características que as permitiram colonizar solos pobres, arenosos, encharcados, com certa salinidade e ambientes com ventos constantes. Assim, desenvolveram-se uma série de ecossistemas diferentes, de acordo com a preponderância de um ou mais fatores ambientais, resultando em formações herbáceas, das dunas, marismas, banhados de diversos tipos, campos inundáveis, campos arenosos, vegetação arbóreo-arbustiva das dunas fixadas, matas arenícolas e matas palustres (KNAK, 1999). A Figura 4 ilustra um pouco das variadas formações que ocorrem no PNL, mostrando em sequência, formações de mata arenícola, campos inundáveis, campos arenosos, dunas, e ao fundo da imagem encontra-se o oceano.



Figura 4 - Diversidade de ambientes do PNLN.

Fonte: Arquivo do autor

Na área ao norte do PNLN destacam-se três tipologias vegetais:

- (a) As Formações Herbáceas das Dunas, compostas por espécies herbáceas adaptadas ao ambiente de solos pobres bem como as áreas baixas e alagadas;
- (b) A Formação Arbórea, aqui chamada de Mata de Restinga ou Mata Arenícola, situa-se à oeste da lagoa do Pai João e compõe-se principalmente por espécies xerófitas de porte baixo devido aos solos arenosos e pobres. Apresenta desenvolvimento reduzido, tortuoso, com árvores ramificadas desde a base e copas irregulares e ralas (DILLEMBURG, 1986 citado por KNAK, 1999);
- (c) A Formação de Mata Palustre situada imediatamente abaixo da Mata de Restinga, que ocorre sob a influência do sistema lagunar em locais onde o solo não é encharcado permanentemente, aparecendo espécies higrófitas tais como *Syagrus romanzoffiana* (jerivá), *Ficus organensis* (figueira), *Erythrina crista-galli* (corticeira), *Sebastiania commersoniana* (branquilho); nas suas bordas aparecem *Psidium cattleianum* (araçazeiro) e *Sesbania punicea* (acácia-do-banhado) (KNAK, 1999).

4.3 Geomorfologia

A Planície Costeira do Rio Grande do Sul evoluiu para leste através da coalescência lateral de quatro sistemas deposicionais do tipo “laguna-barreira”. Cada um destes sistemas registra o pico de uma transgressão, seguida de um evento regressivo. A idade relativa dos diversos sistemas laguna-barreira fica clara em sua disposição espacial: o sistema mais antigo (Laguna-Barreira I) é o mais interiorizado e a idade decresce no sentido do sistema mais externo (Laguna-Barreira IV), conforme mostrado na Figura 5 (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2006).

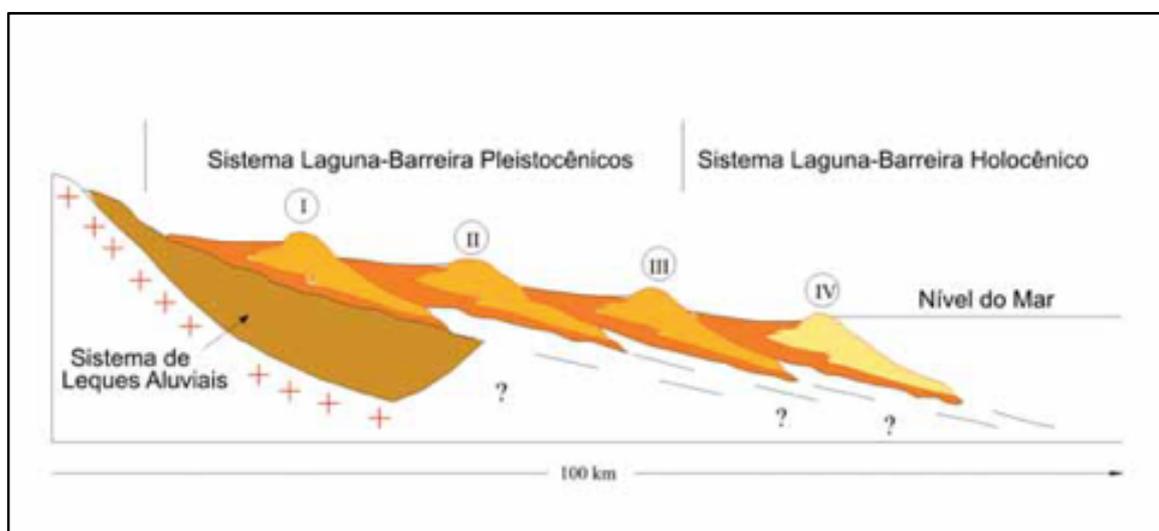


Figura 5 - Secção geológica esquemática transversal na latitude aproximada de Porto Alegre

Fonte: Adaptado de (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2006)

A Barreira IV é o mais recente sistema deposicional do tipo “laguna- barreira” desta planície costeira, e desenvolveu- se durante o Holoceno, como consequência da última grande transgressão pós-glacial. No pico transgressivo holocênico, atingido há cerca de 5000 anos atrás, o nível do mar alcançou, na região costeira em estudo, aproximadamente 5m acima do nível atual e possibilitou a formação de uma barreira constituída essencialmente por areias praias e eólicas. Observa-se na Figura 6 a disposição dos diferentes sistemas laguna-barreira, entre os municípios de Mostardas e Rio Grande.

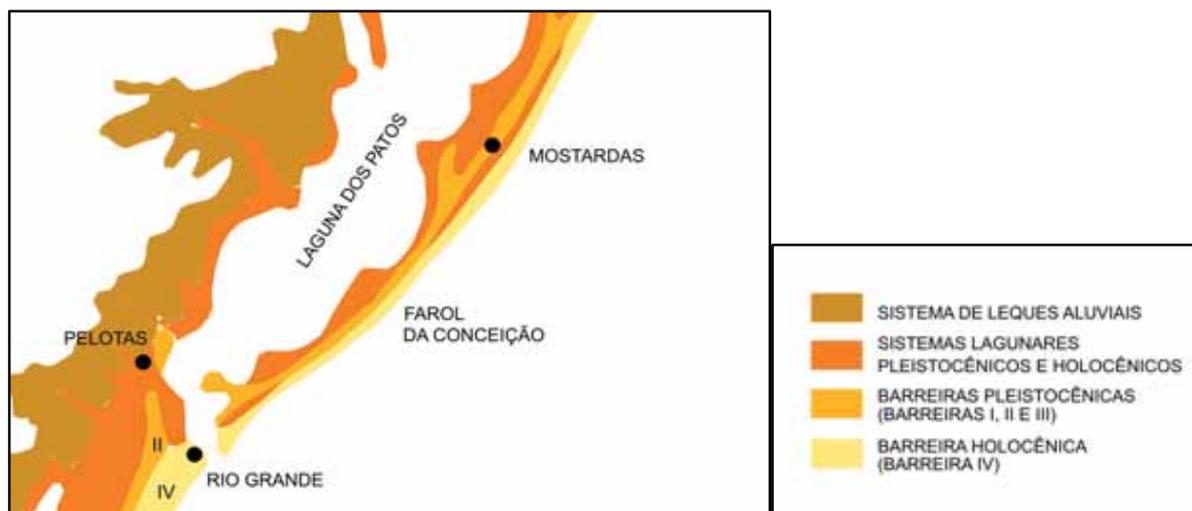


Figura 6 - Ilustração simplificada da geologia de parte da Planície Costeira do RS.

Fonte: Adaptado de Villwock; Tomazelli (2006)

As areias praias da Barreira IV são quartzosas, de granulação fina a muito fina, mostrando uma largura variável entre 2 e 8 km, e se estendendo praticamente ao longo de toda a linha de costa. Em resposta a um regime de vento de alta energia proveniente de NE, as dunas livres, predominantemente do tipo barcanoide, migram no sentido SW, transgredindo terrenos mais antigos e avançando para dentro dos corpos lagunares adjacentes (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2006; TOMAZELLI, 1993).

O espaço de retrobarreira, situado entre a Barreira IV e os sedimentos pleistocênicos da Barreira III, foi ocupado, no pico transgressivo holocênico, por grandes corpos lagunares. Dentro deste conjunto podem ser destacadas a lagoa Mangueira, na região sul da Planície Costeira do RS, a Lagoa do Peixe, na parte média, e o rosário de lagoas interligadas existentes no litoral norte do Estado (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2006). O sistema lagunar pleistocênico da Barreira III, está representado na parte norte do PNLN pelas lagoas do Pai João e da Veiana, mostradas no mapa que apresenta (Figura 7) a área de estudo em uma composição colorida falsa-cor RGB-453 Landsat 5. Neste mapa, a Barreira IV corresponde ao campo de dunas, mostrado na cor branca, que se estende por uma faixa contínua e paralela à linha de praia.

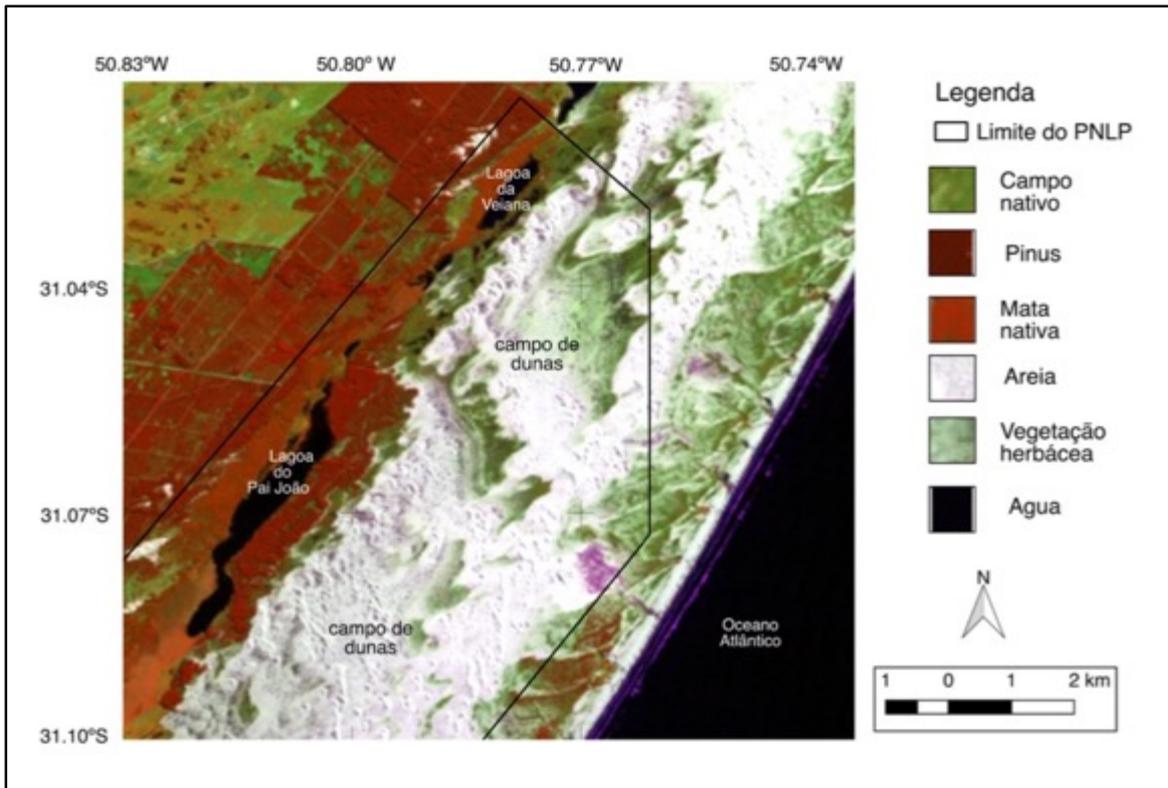


Figura 7 - Composição em falsa cor RGB-453 Landsat 5 de 04/05/2005, mostrando a área de estudo.

4.4 Clima

A restinga da Lagoa dos Patos, como toda a planície costeira sul-riograndense, encontra-se incluída no tipo C (subtropical úmido) na classificação de Köppen, caracterizado por uma temperatura média anual de 17,5 C, tendo janeiro e fevereiro como os meses mais quentes e junho e julho como os mais frios. A precipitação varia entre 1150 e 1450 mm, bem distribuídas ao longo do ano, mas com regime invernal. Os ventos são predominantemente nordeste, seguidos por ventos sudeste com elevado teor de umidade. Tagliani (1995 citado por KNAK, 1999).

4.5 Fotos da área de estudo

A seguir apresentam-se fotos do acervo pessoal do autor mostrando a presença do Pinus em diferentes pontos da área de estudo.



Figura 8- Pinus, plantado à margem da Lagoa do Pai João, em foto feita antes da colheita.

Fonte: Arquivo do autor



Figura 9- Frente de dunas avançando sobre a área de Pinus plantado à margem da Lagoa do Pai João, em foto feita após a colheita.

Fonte: Arquivo do autor



Figura 10 - Pinus disseminado sobre vegetação herbácea no campo de dunas.

Fonte: Arquivo do autor



Figura 11 - Pinus disseminado sobre vegetação herbácea no campo de dunas.

Fonte: Arquivo do autor



Figura 12 - Pinus disseminado em alta densidade de plantas.

Fonte: Arquivo do autor



Figura 13 - Pinus disseminado no entorno de árvore adulta.

Fonte: Arquivo do autor



Figura 14 - Frente de dunas cobrindo árvores adultas de Pinus no campo de dunas.

Fonte: Arquivo do autor



Figura 15- Área do campo de dunas livre da presença do Pinus.

Fonte: Arquivo do autor



Figura 16 - Pinus disseminado próximo a linha de praia, formato da copa é mais aberto e acículas são mais amareladas.

Fonte: Arquivo do autor

PRIMEIRO ARTIGO

MAPEAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL DA EXÓTICA INVASORA *PINUS SPP* NA ÁREA NORTE DO PARQUE NACIONAL DA LAGOA DO PEIXE

RESUMO

Problema de dimensões globais, a ocupação de áreas por espécies exóticas invasoras é estudada neste trabalho com foco na presença crescente de *Pinus spp* no Parque Nacional da Lagoa do Peixe/RS. A partir de imagens de satélite e uso de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, o artigo apresenta um mapeamento espaço-temporal da presença desta exótica invasora na área norte do Parque, desde 1985 até os dias atuais. Mapeou-se áreas de *Pinus* plantado e disseminado através de análise visual e classificação de pixels pelo método *Spectral Angle Mapper* (SAM), utilizando imagens dos satélites Landsat e Rapid Eye. Os resultados encontrados mostram taxa de crescimento constante nas áreas de *Pinus* com pequena aceleração ao final de cada período analisado, confirmando a capacidade invasora do *Pinus spp* e a dispersão de suas sementes pelo vento. Ficou demonstrado o ótimo desempenho do algoritmo SAM na identificação de áreas de *Pinus*, bem como a importância do uso de imagens de satélite na análise da questão.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, *Spectral Angle Mapper*, Landsat.

ABSTRACT

A problem of global dimensions, the occupation of areas by invasive alien species is studied in this work focusing on the increasing presence of *Pinus spp* in the Lagoa do Peixe / RS National Park. From satellite imagery and the use of remote sensing and geoprocessing techniques, the paper presents a space-time mapping of the presence of this exotic invader in the northern area of the Park, from 1985 to the present day. Planted and disseminated areas of *Pinus* were mapped through visual analysis and pixel classification by the *Spectral Angle Mapper* (SAM) method, using images from the Landsat and Rapid Eye satellites. The results show a constant growth rate in the areas of *Pinus* with small acceleration at the end of each analyzed period, confirming the invasive capacity of *Pinus spp* and the dispersion of their seeds by the wind. It was demonstrated the excellent performance of the SAM algorithm in the identification of areas of *Pinus*, as well as the importance of the use of satellite images in the analysis of the question.

Keywords: remote sensing, *Spectral Angle Mapper*, Landsat.

1. INTRODUÇÃO

Espécies exóticas invasoras são atualmente uma das principais causas da perda de biodiversidade no planeta, gerando mudanças na estrutura e composição dos ecossistemas, levando a impactos prejudiciais significativos para os serviços ecossistêmicos, afetando economias e bem-estar das populações humanas (IUCN, 2018). Plantas invasoras podem alterar completamente o regime de fogo, a ciclagem de nutrientes, o balanço hidrológico e energético em ecossistemas originais, podendo reduzir dramaticamente a abundância das espécies nativas (MACK *et al*, 2000).

Em comparação com outras partes do mundo como Austrália, Nova Zelândia e África do Sul, o plantio de coníferas exóticas é relativamente recente na América do Sul, mas registra um rápido crescimento dos problemas gerados pela invasão (RICHARDSON, WILGEN, NUNEZ; 2008). No Brasil o gênero *Pinus* tem sido reportado como potencial invasor de áreas abertas (ZILLER e GALVAO 2002; ZANCHETTA e DINIZ, 2006; ZENNI e ZILLER 2011). Em estudo realizado por Ziller e Dechoum (2013), os autores apontaram a ocorrência de 125 espécies vegetais exóticas invasoras em Unidades de Conservação no Brasil, destacando-se, na região Sul, as espécies do gênero botânico *Pinus*.

Os plantios florestais de *Pinus* no litoral gaúcho tiveram seu início na década de 1970 e foram realizados com sementes de *Pinus elliottii* vindas dos Estados Unidos (AGEFLOR, 2017). Tais plantios receberam incentivos fiscais do governo federal até meados dos anos 1980, além dos incentivos, a implantação da silvicultura de *Pinus* na planície costeira do Rio Grande do Sul foi favorecida pela existência de grandes áreas ociosas, que eram consideradas como improdutivas ou de baixo rendimento (OLIVEIRA, 2004). Neste contexto foram efetuados em meados de 1982 dois plantios de *Pinus* que estão na origem da presença desta exótica invasora na área norte do Parque. Um plantio realizado na margem leste da Lagoa do Pai João e outro plantio feito ao longo da faixa de praia, margeando a linha que hoje constitui o limite leste do Parque Nacional da Lagoa do Peixe (PNLP). A partir destas duas áreas, nas quais foi introduzido por ação humana, a invasão expandiu-se sobre a área norte do PNL.

Ledgard e Langer (1999) consideram que os sítios de disseminação são locais a partir dos quais a dispersão de sementes de *Pinus* é potencializada em função de sua posição no relevo e da direção dos ventos predominantes. Em modelo proposto por Richardson e Higgins (1998) o vento é considerado como único vetor de dispersão de sementes de *Pinus*, e a ocorrência de novos indivíduos decai exponencialmente com a distância da fonte de sementes. Ziller e Galvão (2002) reportam que o relevo associado à direção dos ventos é fator

fundamental na dispersão de sementes de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, Portz et al. (2011) também destacam o vento como fator de dispersão de sementes de Pinus no PNL. A espécie *Pinus elliottii* é predominante na região do Parque, e conforme estudos feitos por Bechara (2002) em Florianópolis e Guedes (2015) em Mostardas, a chuva de sementes atinge seu máximo nos meses de abril e maio.

O regime de ventos da região é controlado por dois sistemas de alta pressão, o Anticiclone do Atlântico Sul é mais ativo durante o verão e gera ventos que sopram do quadrante nordeste, o Anticiclone Migratório Polar é mais influente durante o inverno e gera ventos que sopram do quadrante sudoeste. Ao longo do ano o vetor resultante destes ventos opostos indica que o vento nordeste é dominante (TOMAZZELI, 1993; TOMAZZELI et al., 2008). O período de maior dispersão de sementes situa-se entre os dois picos opostos, mas observações de campo mostraram que a dispersão preponderante ocorre pelo vento nordeste.

O processo de invasão por Pinus apresenta-se em etapas bem definidas: o primeiro estágio gera dispersão densa no entorno do núcleo fonte de sementes e dispersão esparsa de indivíduos isolados na medida em que se afasta do núcleo fonte; o segundo estágio inicia quando as árvores da dispersão esparsa começam a também produzir sementes; a partir deste ponto as chances de um controle bem-sucedido sofrem redução considerável (LANGDON, PAUCHARD, AGUAYO; 2010).

Estudos foram conduzidos no entorno do PNL de modo a avaliar impactos ambientais da presença do Pinus nas áreas úmidas invadidas pela exótica. Comparou-se ambientes naturais ainda não invadidos com áreas próximas invadidas em relação a diversidade e abundância das espécies. Os resultados mostraram que a presença do Pinus reduziu a quantidade e diversidade de Macrófitas (ROLON et al., 2011), Anuros (MACHADO, MOREIRA, MALTCHICK; 2012) e Macroinvertebrados (STERNET et al., 2011). No interior do PNL, Burgeno et al. (2013) estudaram a evolução dos cordões de dunas transgressivas localizados à margem da lagoa do Peixe e sua inter-relação com os plantios de Pinus efetuados ao longo desta. Concluíram que abertura de canais de drenagem associada a presença da silvicultura modificaram o ambiente provocando alterações no transporte de areia e resultando em aceleração no processo de assoreamento da lagoa do Peixe.

No enfrentamento do problema da invasão por espécies exóticas, a criação de sistemas de detecção precoce é uma medida importante para viabilizar soluções possíveis, associando conhecimento científico as medidas de controle. (ZILLER; DECHOUM, 2013). Desta forma, além da técnica tradicional de detecção de plantas invasoras por métodos visuais associados a

expedições de campo, o uso de sensoriamento remoto tem sido crescente como meio de monitoramento de vegetação exótica invasora através de mapeamentos que auxiliam a detecção e avaliação do grau das invasões (SHAW, 2005; BRADLEY, 2013; ROCCHINI, 2015).

Estudos para identificação de florestas no Rio Grande do Sul, com uso de sensoriamento remoto foram realizados a partir de imagens do sensor Landsat (DUCATI et al., 1999) e Aster (WAGNER e DUCATI, 2005). No interior do PNLP Portz, Guasselli e Correa (2011) identificaram áreas de *Pinus* a partir do índice NDVI, e Portz et al. (2011) identificaram áreas de *Pinus* no interior e entorno do Parque a partir de classificação de pixels e imagens NDVI.

Ressalta-se que não se encontrou estudo de sensoriamento remoto com foco na presença de *Pinus* nos campos de dunas localizados entre a Lagoa do Pai João e o Oceano, a área de estudo do presente artigo submetida a importante e extenso processo de invasão por *Pinus* spp. Assim, diante desta lacuna e da possibilidade de trazer subsídios às ações de manejo necessárias à erradicação do *Pinus* na área estudada, o presente estudo tem por objetivos:

1) Mapear a evolução da área ocupada por *Pinus* spp plantado às margens da Lagoa do Pai João, com uso de imagens de satélite do período de 1985 a 2013, descrevendo a dinâmica de expansão da exótica;

2) Mapear a presença do *Pinus* spp que se originou por dispersão espontânea de sementes em meio ao campo de dunas, com uso de imagens de satélite entre os anos 2011 e 2017, e verificar a dinâmica e tendências da expansão.

1.2 Área de estudo

O Parque Nacional da Lagoa do Peixe é uma Unidade de Conservação, pertencente ao Sistema Nacional de Unidades de Conservação e sob gestão do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Criado pelo Decreto Federal Nº 93.546 de 6 de novembro de 1986, possui área de 36.721 hectares e localiza-se na planície costeira do Rio Grande do Sul abrangendo área dos municípios de Mostardas e Tavares. Seus objetivos de criação incluem proteger amostras dos ecossistemas litorâneos da região da lagoa do Peixe, especialmente as espécies de aves migratórias que dela dependem (ICMBio, 2017).

O Parque (Figura 1) está incluído na lista brasileira de Sítios Ramsar como zona prioritária para a conservação de áreas úmidas de importância internacional (BRASIL-MMA,

2017), e constitui uma das zonas núcleo da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica no Rio Grande do Sul (FEPAM, 2017).

A área de estudo localiza-se na porção norte do PNL, majoritariamente ocupada pelo campo de dunas existente entre o cordão de lagoas e a linha de praia. Este campo de dunas situa-se exatamente sobre a chamada Barreira IV, que é o mais recente dos sistemas tipo "laguna-barreira" formado durante a época geológica do Holoceno (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2006). No pico transgressivo holocênico, ocorrido há cerca de 5000 anos, o nível do mar alcançou cota aproximadamente 5m acima do nível atual na região costeira aqui mostrada, e possibilitou a formação de uma barreira constituída essencialmente por areias praias e eólicas. As areias praias da Barreira IV são quartzosas, de granulação fina a muito fina, e seu campo de dunas eólicas é bem desenvolvido, mostrando uma largura variável entre 2 e 8km e se estendendo praticamente ao longo de toda a linha de costa. Em resposta a um regime de vento de alta energia proveniente de NE, as dunas livres migram no sentido SW, transgredindo terrenos mais antigos e avançando para dentro dos corpos lagunares adjacentes (VILLWOCK; TOMAZELLI, 2006; TOMAZELLI, 1993).

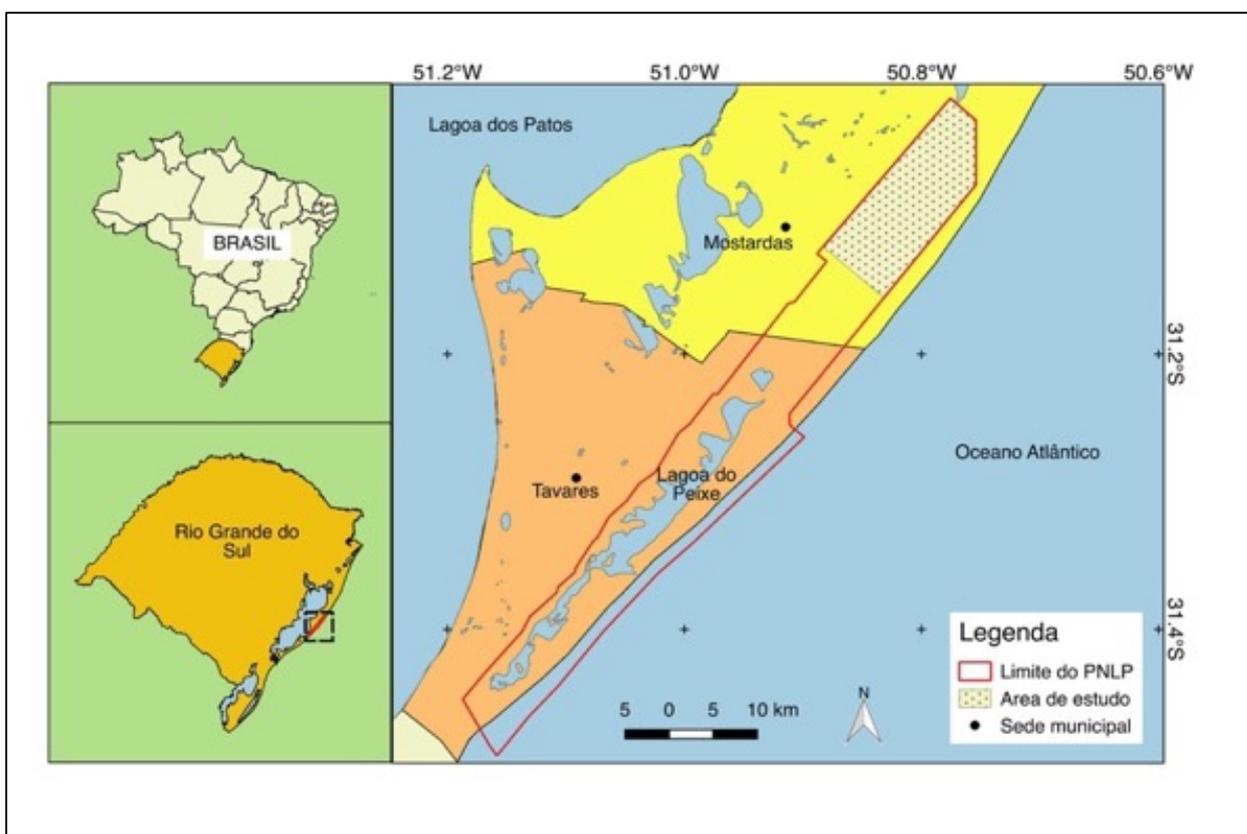


Figura 1: Localização do Parque Nacional da Lagoa do Peixe (PNLP) e da área de estudo.

Na Figura 2, apresenta-se um mapa da área de estudo em escala mais detalhada, indicando os principais elementos da paisagem e mostrando a legenda para a interpretação da composição colorida utilizada nas imagens Landsat. A Barreira IV, aqui representada pelo campo de dunas, separa-se da Barreira III por um cordão de lagoas no qual destacamos as lagoas da Veiana e Pai João, indicadas no mapa.

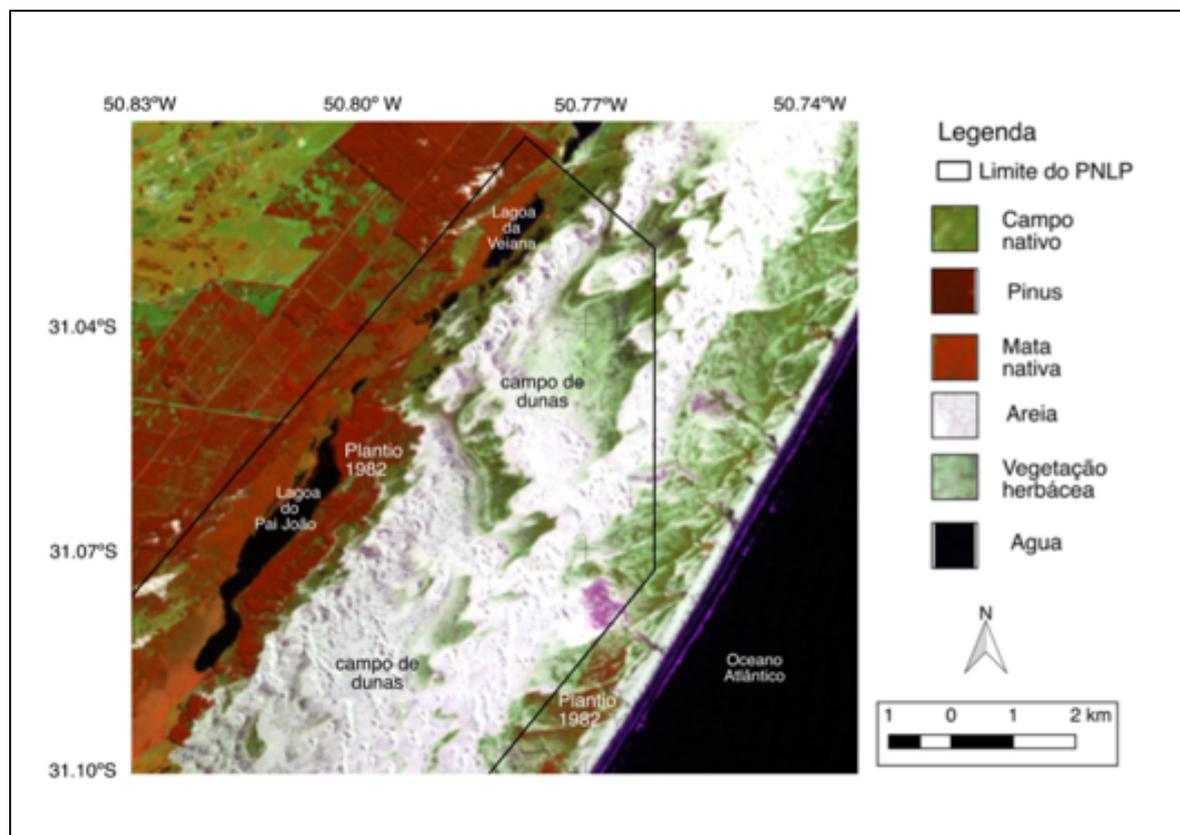


Figura 2: Composição em falsa cor RGB-453 Landsat 5 de 04/05/2005, mostrando a área de estudo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo utilizou imagens Landsat 5, 7 e 8 entre os anos 1985 e 2017, e imagens Rapid Eye entre os anos de 2010 e 2017. Conferiu-se o registro das cenas em ambiente SIG e efetuou-se o georreferenciamento das imagens cujo registro apresentou diferença superior a 0,5 pixel.

Optou-se por imagens Landsat da coleção Nível 1, as quais são radiometricamente calibradas entre os diferentes sensores e também ortorretificadas, são imagens consideradas adequadas para análise de séries temporais pixel a pixel (USGS, 2017A). As cenas utilizadas foram também submetidas ao procedimento de correção atmosférica por meio de processamento realizado pelo *United States Geological Service* (USGS). O produto

denominado de *Landsat Surface Reflectance* constitui-se de imagens de Nível 1, com o acréscimo do processamento de correção atmosférica (USGS, 2017C).

Considerando que após períodos muito chuvosos as cenas estarão mais escuras devido a absorção de radiação pela água presente nos solos molhados (JENSEN, 2009), procurou-se imagens sem tais manchas escuras características. Por outro critério buscou-se imagens com proximidade na data anual de aquisição a fim de obter ângulos de incidência solar semelhantes. Selecionaram-se então cenas Landsat das seguintes datas: 06/12/1985, 19/04/1988, 19/12/1995, 24/02/2000, 04/05/2005, 31/03/2010, 04/12 /2013, 07/12 /2014, 15/12 /2017.

As imagens Rapid Eye são obtidas por uma constelação de cinco satélites que contém sensores idênticos e igualmente calibrados entre si. As cenas utilizadas neste trabalho são do nível 3A - *RapidEye Ortho Product*, cujos dados são entregues com correção geométrica e radiométrica, mas sem correção atmosférica (PLANET, 2016). Fez-se uma seleção de acordo com os mesmos critérios utilizados para as imagens Landsat, restando selecionadas as cenas das seguintes datas: 17/03/2011, 13/11/2013, 03/03/2015, 23/08/2017.

2.1 Procedimentos de análise visual e classificação automática de pixels, o método *Spectral Angle Mapper*.

Para todas as cenas Landsat, gerou-se uma pilha de camadas com as bandas *Blue*, *Green*, *Red*, *NIR*, *SWIR 1* e *SWIR 2*, nesta ordem. Diversas composições coloridas foram testadas para obter a melhor separação visual entre os pixes Pinus e outras classes presentes. Optou-se pela composição em falsa cor RGB-453 Landsat 5, na qual o canal R recebe a banda *NIR*, o canal G recebe a banda *SWIR 1* e o canal B recebe a banda *Red*. As cenas Rapid Eye foram empilhadas com as bandas *Blue*, *Green*, *Red*, *Red Edge* e *NIR* nesta ordem, e foi feita uma composição em falsa cor RGB na qual o canal R recebe a banda *NIR*, o canal G recebe a banda *Red Edge*, e o canal B recebe a banda *Green*.

A análise visual identificou as fisionomias vegetais existentes na paisagem, suas áreas de abrangência e variação ao longo do tempo. Após esta análise prévia, e testes com os algoritmos K-Médias e MAXVER, cujos resultados não foram satisfatórios, refinou-se a interpretação visual através da classificação automática pelo método *Spectral Angle Mapper* (SAM). O algoritmo SAM é um classificador de pixels capaz de determinar a similaridade entre assinaturas espectrais comparando o espectro de cada pixel contido na imagem com um espectro de referência. A assinatura espectral de referência pode ser obtida a partir de medidas

feita em laboratório, medidas feitas em campo, ou ser extraída diretamente da imagem de satélite a partir da seleção de pixels puros para o alvo desejado (PETROPOULOS et al., 2010). O termo assinatura espectral refere-se à maneira típica de um objeto refletir a radiação eletromagnética, caracteriza-se por fatores de reflectância particulares do próprio objeto e trata-se então de uma reflectância particular do momento de aquisição da imagem (PONZONI, SHIMABUKURO, KUPLICH; 2011).

Em uma imagem obtida por sensores multiespectrais, cada assinatura pode ser representada como um vetor no espaço N-dimensional, onde N é o número de bandas utilizadas para construir a curva espectral. Cada vetor terá duas características principais, um comprimento correspondente a sua magnitude e um ângulo em relação aos eixos que definem seu sistema de coordenadas. Ângulos pequenos entre os vetores espectrais indicam alta similaridade entre as assinaturas espectrais, e ângulos grandes mostram baixa similaridade (KRUSE et al. 1993). O limite angular definido pelo analista expressa a máxima separação aceitável entre o espectro de referência e o espectro do pixel a ser classificado, de modo que todos os pixels cujos vetores associados estejam a uma distância angular maior do que o limite estabelecido, não serão classificados na categoria pretendida (PETROPOULOS et al., 2010).

Girouard et al. (2009) observam que a limitação principal do método SAM relaciona-se com a ocorrência da mistura espectral, e que um erro comum ao aplicar este método está na suposição errônea de que pixels puros escolhidos para classificar a imagem representam os espectros puros de um material de referência. Freitas, Haertel e Shimabukuro (2008) afirmam que mistura espectral ocorre sempre que um mesmo pixel inclui duas ou mais classes espectrais, e destacam que em dados de moderada resolução espacial (Terra-MODIS, NOAA-AVHRR, CBERS-WFI) os pixels puros dificilmente estão disponíveis. Shultz e Silva (2013), utilizando o Modelo Linear de Mistura Espectral mostraram que o manejo florestal em talhões de Pinus alterou a proporção das frações solo, sombra e vegetação em imagens Landsat TM, alterando portanto as assinaturas espectrais. Percebe-se então que a premissa da pureza espectral dos pixels escolhidos pode não ocorrer, e que a possibilidade de existirem pixels misturados aumenta com o tamanho do pixel.

Ao aplicar o algoritmo SAM neste estudo temos dois casos distintos: 1) Pinus plantado na margem da Lagoa do Pai João em talhões de silvicultura com tamanho médio de dez hectares. Com o passar dos anos formou-se dossel florestal fechado, e ainda que nas bordas ocorra mistura espectral com o solo ou outros elementos, no interior dos talhões há

pixels cuja resposta espectral se deve apenas a reflectância do dossel florestal, portanto podem ser considerados pixels puros. 2) Pinus disseminado em meio ao campo de dunas, neste caso existem pequenas manchas dispersas de tamanhos variados e até menores que um hectare, o que torna o problema da mistura espectral mais acentuado.

2.2 Cálculo da área de Pinus plantado na margem da Lagoa do Pai João

Mediu-se a variação da área de Pinus utilizando imagens Landsat dos anos 1988, 1995, 2000, 2005, 2010 e 2013, que foram classificadas pelo método SAM selecionando somente os pixels Pinus. A medição considerou imagens somente até 2013 pois em dezembro deste ano iniciou o corte do Pinus desta área, finalizado em 2016 (ICMBio, 2013). Entre 1988 e 2013, a área já pertencia ao PNLN e em diversas vistorias realizadas pela equipe do Parque, não se registrou qualquer evidência de que tenha ocorrido intervenção humana no Pinus plantado, que se desenvolveu sem modificações de origem antrópica.

Os pixels puros foram selecionados no interior dos talhões de Pinus para representar a assinatura espectral de referência. De forma semelhante ao realizado pelos autores Yi, Shimabukuro e Quintanilha (2007) testou-se diferentes valores para a distância angular máxima aplicada ao classificador SAM e observou-se os resultados por análise visual, avaliando a correta identificação dos pixels classificados. Após testes com diversos limites angulares optou-se por fazer duas classificações com limites de 0,14 radianos e 0,24 radianos. A primeira buscando encontrar os pixels mais puros próximos ao padrão espectral de um dossel florestal fechado, e a segunda abrangendo também pixels em áreas com menor densidade de Pinus.

2.3 Cálculo da área de Pinus disseminado em meio ao campo de dunas

A partir do ano de 2010 a inspeção visual nas imagens Landsat mostrou a presença crescente de pixels Pinus em meio ao campo de dunas. Verificações de campo confirmaram a análise visual e mostraram que este Pinus estava se desenvolvendo em áreas baixas, portanto mais úmidas e com alguma cobertura de vegetação herbácea já existente. A presença de matéria orgânica faz com que tais áreas, além de conter mais nutrientes, possuam maior capacidade de reter umidade, portanto, um substrato mais propício à germinação e desenvolvimento do Pinus.

Para reduzir a mistura espectral que tende a ser mais acentuada nesta área, utilizou-se imagens do satélite Rapid Eye com resolução espacial de 5 m. De modo semelhante ao caso anterior, selecionou-se pixels puros representando a assinatura espectral de referência. Testou-se diferentes valores para a distância angular máxima e após análise visual dos resultados, decidiu-se por usar o limite angular de 0,20 radianos que mostrou uma boa separação dos pixels Pinus em meio ao campo de dunas.

2.4 Validação da classificação

A validação da área de Pinus a margem da lagoa do Pai João foi feita utilizando imagens Google Earth (GE) como verdade de campo. A classificação feita para a cena Landsat de 04/05/2005 foi validada com imagens GE de 19/10/2005 e 13/08/2005 e, para a cena Landsat de 27/06/2013 usou-se uma imagem GE de 07/12/2014. O processo de validação foi feito apenas para a classificação SAM com limite angular de 0,14 radianos, ou seja, pixels de dossel florestal fechado e que são mais facilmente identificáveis nas imagens do GE. Gerou-se 100 pontos aleatórios sobre a área de pixels Pinus para avaliar os erros de comissão e mais 100 pontos sobre o entorno da área classificada para avaliar os erros de omissão.

A validação da classificação no campo de dunas foi feita somente para a cena de 2017 a partir de uma verdade de campo real e coleta de pontos utilizando um GPS de navegação marca Garmin modelo 60CSx. Foi realizada uma validação para as regiões A e B (interior do campo de dunas) e outra para a região C (próximo a linha de praia). Para cada validação gerou-se 50 pontos aleatórios no interior dos polígonos da classe Pinus para avaliar os erros de comissão, e 50 pontos aleatórios no entorno dos polígonos para avaliar os erros de omissão. A partir da média entre erros de comissão e omissão calculou-se a exatidão global da classificação.

3. RESULTADOS

3.1 Variação da área de Pinus plantado às margens da Lagoa do Pai João

Durante o período de 25 anos analisado, a mancha de Pinus denso (Figura 3) aumentou 362% passando de 68,81 ha para 317,97 ha, conforme dados da Tabela 1.

Tabela 1 - Áreas de Pinus na margem da lagoa do Pai João a partir da classificação SAM em diferentes limites angulares. Valores em hectares.

Data da imagem	SAM 0,14	Aumento anual	SAM 0,24	Aumento anual
19/04/1988	68,81		91,98	
19/12/1995	102,15	5,0	145,08	6,93
24/02/2000	133,92	7,6	184,77	9,51
04/05/2005	170,46	7,0	252,36	13,03
31/03/2010	235,25	13,2	327,96	15,41
27/06/2013	317,97	25,5	398,88	21,88

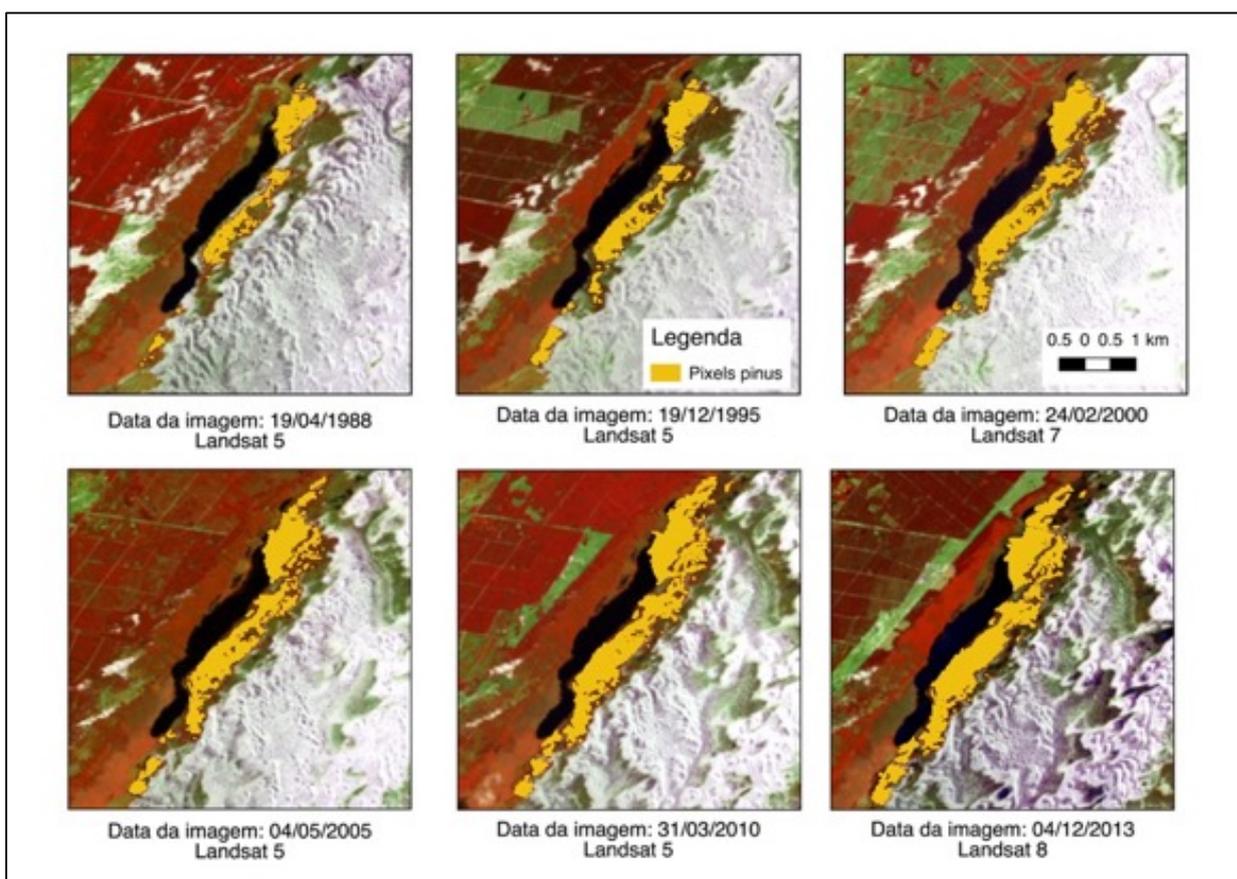


Figura 3 - Áreas de Pinus na margem da lagoa do Pai João a partir da classificação SAM 0,14. A tonalidade rosa na cena do ano 2013 deve-se ao maior teor de umidade no solo. Cenas Landsat em composição falsa cor RBG-453

3.2 Variação da área de Pinus disseminado em meio ao campo de dunas

Para apresentação dos resultados as áreas de Pinus disseminado foram separadas em três regiões A, B e C. Os resultados (Tabela 2) mostram que houve diferenças significativas na evolução da área ocupada pela exótica.

Tabela 2 - Área de Pinus disseminado em meio ao campo de dunas partir da classificação SAM 0,20.

Valores em hectares.

Data da imagem	17/03/2011	13/11/2013	03/03/2015	19/11/2017
Área A	2,76	2,56	5,14	10,02
Área B	1,5	1,35	2,65	3,36
Área C	2,41	0,14	0,43	1,49

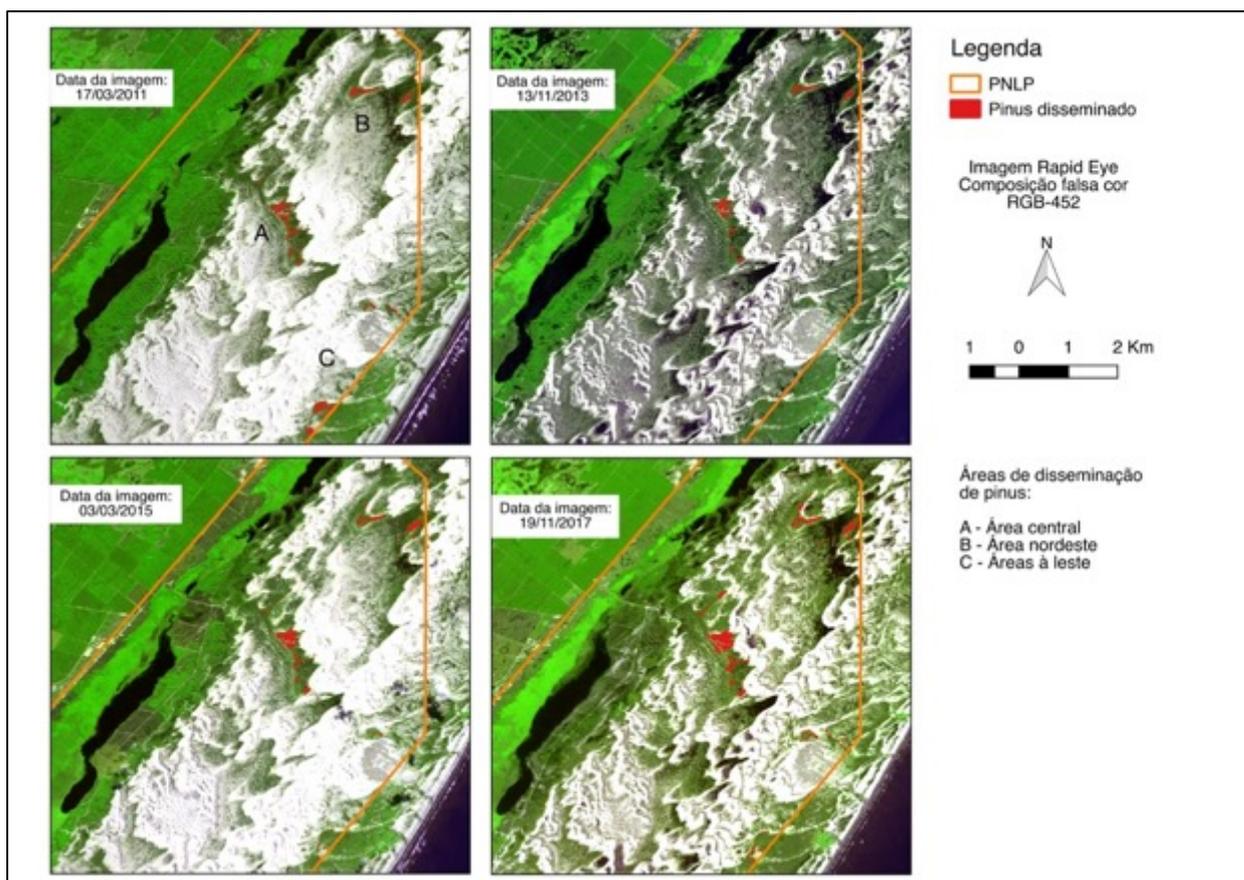


Figura 4 - Variação da área de Pinus em meio ao campo de dunas a partir da classificação SAM 0,20.

A tonalidade mais escura na cena do ano 2013 deve-se ao maior teor de umidade no solo.

3.3 Resultados da validação da classificação

As imagens Landsat 2005 e 2013 referem-se a área à margem da Lagoa do Pai João, e a imagem Rapid Eye refere-se ao campo de dunas.

Tabela 3 - Avaliação da classificação SAM para as diferentes áreas estudadas.

Imagem/erros de classificação	Landsat 2005	Landsat 2013	Rapid Eye 2017 AB	Rapid Eye 2017 C
Erros comissão	11%	12%	4%	0%
Erros omissão	9%	16%	18%	44%
Exatidão global	90%	86%	89%	78%

4. DISCUSSÕES

Dentre as limitações existentes no processo de classificação automática de pixels, destacam-se dois pontos importantes: os alvos de interesse em sensoriamento remoto podem não ser espectralmente distintos nas bandas disponíveis na imagem, e a resolução espacial utilizada pode apresentar pixels com mistura espectral (MENESES; SANO, 2012; LU; WENG, 2007).

Durante o processo de classificação realizado neste estudo, observou-se tendências de confusão espectral entre a classe Pinus e as classes de vegetação mata nativa e campo nativo. Essa confusão espectral ocorreu à medida em que aumentava o limite angular do classificador SAM. No entanto, na margem leste da Lagoa do Pai João, o Pinus era a única forma vigorosa de vegetação, fato que reduziu esta confusão espectral.

A partir da inclinação das linhas da Figura 5, construída com os valores da Tabela 1, percebe-se uma taxa de crescimento semelhante em ambas áreas, Pinus denso (SAM 0,14) e Pinus denso acrescido de Pinus esparso (SAM 0,24). Também ocorreu uma aceleração no crescimento de ambas áreas a partir do ano 2000. É importante mencionar que a lagoa funcionou como uma contenção à expansão do Pinus no sentido oeste, e algumas frentes de dunas funcionaram como obstáculos à expansão do Pinus no sentido leste. Tais dunas foram observadas nas imagens de satélite e confirmadas em campo.

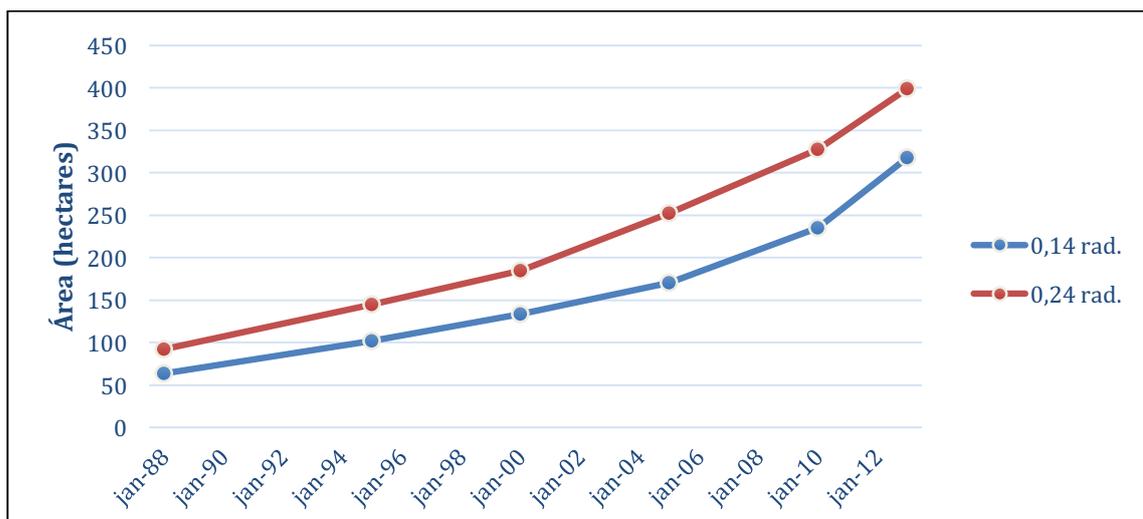


Figura 5 - Comparação do aumento área de Pinus calculada a partir dos limites angulares 0,14 e 0,24 radianos pelo método SAM.

A validação desta classificação, feita somente para as áreas de Pinus denso (SAM 0,14), apresentou exatidão global de 90% para a imagem Landsat 2005 e exatidão global de 86% para a imagem Landsat 2013. Este valor ligeiramente menor pode ser explicado pela maior umidade da cena 2013, o que interfere na classificação. Jensen (2009) destaca que, além das absorções características da molécula de água, também ocorrem absorções em comprimentos de onda adjacentes reduzindo de modo amplo a resposta espectral das superfícies molhadas. Na fase de testes da classificação, comparou-se cenas úmidas e secas em datas próximas e verificou-se que a umidade da cena invariavelmente reduziu a área da classe Pinus, fato que pode ser explicado pela alteração nas assinaturas espectrais, decorrente do excesso de água na cena.

A interferência da umidade na classificação foi mais evidente no campo de dunas, onde os polígonos de Pinus são menores e, por isso, mais sujeitos à mistura espectral. O visível e alto grau de umidade da cena de 2013 gerou uma redução no número de pixels Pinus em todo campo de dunas. Para melhor análise dos resultados, as manchas de Pinus foram divididas em três regiões, A, B e C, mostradas na Figura 4 (imagem de 17/03/2011). As regiões A e B localizam-se no interior do campo de dunas a uma distância média de 3800 m da linha de praia, enquanto a região C encontra-se a distância média de 1300 m.

A área da classe Pinus nas regiões A e B teve pequena queda de 7% e 10% no ano de 2013, mas apresentou crescimento continuado nos anos 2015 e 2017. Observando todo o período analisado, a classe Pinus teve aumento de 363% na região A e 140% na a região B. Tais regiões foram as primeiras áreas no campo de dunas a receber sementes oriundas dos

plantios vizinhos, sobretudo pelo vento. Após o estabelecimento das primeiras árvores adultas, as regiões A e B funcionaram como núcleos fonte de sementes gerando disseminação preferencial no sentido nordeste, que é a orientação do vento dominante. A partir dos mapas gerados e observações de campo, constatou-se que a ocorrência de novos indivíduos nas regiões A e B decaiu exponencialmente com a distância dos núcleos fontes de sementes, conforme modelado por Richardson e Higgins (1998).

A validação nas regiões A e B mostrou um índice de 4% de erros de comissão, mostrando que algumas áreas onde não havia Pinus foram erroneamente apontadas pelo classificador. O percentual de erros de omissão foi de 18%, indicando que poderia se aumentar levemente o limite angular do classificador SAM. No entanto, um limite angular maior tenderia a aumentar o índice de erros de comissão, agrupando áreas de gramíneas mais vigorosas na classe Pinus, e aumentando os erros de comissão.

A avaliação dos erros de omissão diretamente em campo apresentou uma dificuldade adicional. Como regra, considerou-se que áreas iguais ou maiores que um pixel Rapid Eye (25m^2) deveriam ter sido detectadas pela classificação SAM. Entretanto, em campo, observou-se que não existe padrão na quantificação e tampouco na densidade dos Pinus esparsos, de modo que manchas irregulares de diversos tamanhos espalham-se na área de estudo, gerando pixels com graus diversos de mistura espectral. Assim, diante de pequenos agrupamentos irregulares com área igual ou superior a 25m^2 , foi preciso tomar uma decisão arbitrária para definir se houve ou não um erro de omissão dentro do limite angular de 0,20 radianos utilizado pelo classificador SAM. Uma validação mais exata pode ser feita a partir do uso de imagens de altíssima resolução espacial obtidas por veículos aéreos não tripulados (VANT). De modo geral, considerou-se que os resultados nas regiões A e B foram coerentes com a expansão esperada.

Na região C, o resultado da classificação apresentou uma aparente anomalia: a área da classe Pinus, partindo de 2011 (ano da imagem mais seca) para 2013 (ano da imagem mais úmida), sofreu queda de 94%. Somente a maior umidade da imagem de 2013 não é capaz de explicar esta queda tão acentuada, que foi muito superior à queda ocorrida nas regiões A e B neste mesmo ano por conta da imagem mais úmida. Posteriormente, nos anos 2015 e 2017 a área de pixels Pinus na região C cresceu, mas atinge em 2017 apenas 62% do valor inicial que havia em 2011. O resultado indica que houve uma perda de área, ou uma perda de brilho nas manchas de Pinus da região C, mas as observações de campo mostraram que não houve corte de Pinus, portanto não houve perda de área.

O processo de validação mostrou um índice de erros de omissão de 44% nesta região. Observações no local ajudaram a compreender este alto índice de pixels Pinus que foram omitidos pelo classificador. Constatou-se que os Pinus desta região mais próxima ao oceano, apresentam alterações significativas em relação aos Pinus do interior do campo de dunas. Ao aproximar da praia as acículas vão ganhando coloração mais clara com ocorrência de tons amarelos e marrons, e as árvores vão se tornando de menor porte com copas mais abertas, e inclusive muitas assumiram um formato arredondado típico de vegetação arbustiva.

A maior abertura das copas aumenta a reflectância de tronco, galhos e classe de fundo, e a presença de acículas amarelas e marrons altera a reflectância do dossel. Em consequência a assinatura espectral de um pixel Pinus nestas condições estará mais distante da assinatura espectral de referência aumentando a distância espectral que é utilizada pelo algoritmo SAM. Ressalte-se aqui que os pixels puros representando a assinatura de referência foram escolhidos por análise visual em área de dossel fechado próximo a Lagoa do Pai João, portanto longe da influência marinha, em dosséis mais fechados e com coloração verde. Estes fatores explicam o maior número de erros de omissão na região C, mas não permitem explicar a redução de brilho ocorrida nas imagens após 2011, pois os ventos mais intensos e maior influência da maresia, responsáveis pelas alterações descritas, ocorrem permanentemente.

Para entender melhor esta questão, foi feita análise visual e classificação pelo método SAM em três datas de imagens Landsat: 31/03/2010, 07/12/2014 e 24/07/2017. O resultado foi coerente com o já obtido a partir das imagens Rapid Eye. A área da classe Pinus teve um valor maior em 2010, redução em 2014 e crescimento em 2017, ou seja, repetiu-se a conclusão de que a área classificada em 2011 sofreu uma redução de brilho.

A redução de brilho está diretamente relacionada com as alterações já mencionadas nas acículas, galhos e tronco dos Pinus, que resultam em um dossel mais aberto e com reflectância modificada. Tais alterações que ocorreram de forma mensurável apenas nas áreas próximas a praia podem ter sido ocasionadas por algum evento climático, uma melhor elucidation deste caso necessita de maiores estudos.

5. CONCLUSÕES

A capacidade invasora do *Pinus* spp já descrita nos trabalhos citados foi também observada e quantificada na medida em que novas áreas foram progressivamente ocupadas pela exótica, tanto à margem da lagoa do Pai João como no campo de dunas onde o Pinus

surgiu em distâncias superiores a 2 km das áreas plantadas. A análise da série histórica de imagens indicou que não houve plantio de Pinus em meio ao campo de dunas, e observações de campo mostraram que há uma distribuição aleatória na posição e no tamanho dos indivíduos, o que é incompatível com as feições de um plantio. Tais fatores confirmam o vento como principal fator de dispersão de sementes na área de estudo.

Observou-se leve aceleração na expansão da área de Pinus no campo de dunas, que pode ser explicada pela presença atual de árvores adultas disseminando sementes. Inicialmente a invasão nesta área foi alimentada por sementes vindas de árvores adultas existentes nas proximidades, mas com o passar dos anos um número crescente de árvores nascidas na área invadida atingiu a idade de produção de sementes gerando um aumento exponencial na disseminação. Os focos iniciais detectados por análise visual, a partir de 2005 nas imagens Landsat, foram confirmados e estão crescendo continuamente, espalhando a mancha de Pinus no sentido do vento dominante NE-SO. A permanecer a tendência verificada neste trabalho, a área de Pinus no campo de dunas seguirá crescendo e ocupando progressivamente todos espaços disponíveis e aptos à sobrevivência da espécie. Ou seja, a tendência é de ocupação de todos os espaços existentes, excluindo-se apenas as áreas permanentemente alagadas e topos de dunas.

A respeito da influência das dunas, verificou-se no local que dunas móveis migrando no sentido NE-SO estão recobrando árvores adultas de Pinus em um movimento que também foi observado nas imagens de satélite. Para o Pinus plantado à margem da Lagoa do Pai João, observou-se que a expansão em direção ao campo de dunas, sentido O-L, foi parcialmente contida pelo avanço de frentes de dunas que se movem no sentido contrário, L-O.

O classificador SAM apresentou exatidão mais alta na identificação das áreas de Pinus que ocorrem em manchas grandes (beira da lagoa) e exatidão mais baixa nas manchas menores e mais espalhadas (campo de dunas). Confirmou-se que a acurácia da classificação depende da adequada definição do limite angular, que por sua vez depende de verificações efetuadas através da verdade de campo, para conferir se o limite angular escolhido traz os resultados mais fidedignos.

Por fim, a ciência do Sensoriamento Remoto mostrou-se fundamental para a análise da invasão de Pinus na área norte do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, permitindo compreender e mapear desde o início a dinâmica deste processo.

Como recomendações ao manejo da área, é importante ter ciência de que a presença do Pinus tende a seguir crescente, portanto as ações necessárias à erradicação são urgentes, e o atraso nestas ações vai inequivocamente ocasionar prejuízos maiores. Sugere-se concentrar esforços em eliminar os focos mais antigos surgidos no campo de dunas, que contém justamente as árvores mais velhas e que estão dispersando sementes, na impossibilidade de cortar tais árvores sugere-se utilizar a técnica do anelamento. É fundamental ainda verificar possíveis focos dispersores de sementes no entorno do Parque, principalmente próximo ao limite nordeste em função dos ventos dominantes NE-SO. É urgente também, eliminar os focos localizados próximos ao limite leste, no interior do Parque, em área crescente e que está dispersando sementes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS. **Dados e fatos**. Disponível em: <<http://www.ageflor.com.br/dados>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

BECHARA, F. C. **Restauração ecológica de restingas contaminadas por pinus no Parque Florestal do Rio Vermelho**. (Dissertação de mestrado em Biologia Vegetal) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Sítios Ramsar** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/instrumentos-de-gestao/sitios-ramsar>>–Acesso em: 20 jan. 2017.

BURGEÑO, L. E. P.; QUADRO, M. S.; BARCELOS, A. A.; SALDO, P. A.; WEBER, F. S.; JUNIOR, M. K.; SOUZA, L. H. Impactos Ambientais de Plantios de *Pinus* sp. em Zonas Úmidas: O Caso do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, RS, Brasil **Biodiversidade Brasileira**, 3(2): 192-206, 2013.

CONGALTON, R. G. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 37, p. 35-46, 1991.

DUCATI, J.R. *et al.* Desenvolvimento de um sistema de zoneamento florestal aplicado ao manejo e planejamento florestal, através da utilização integrada de tecnologia de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica. **Relatório do projeto CEPSSRM/UFRGS/Sindimadeira**, 1999. 56p.

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS. **Programas e projetos - Mata Atlântica.** Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/programas/kfw.asp>> Acesso em: 20 jan. 2017.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**, 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FREITAS, R. M.; HAERTEL, V.; SHIMABUKURO, Y. E. Modelo Linear de Mistura Espectral em imagem de moderada resolução espacial. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 14, no 1, p.55-71, 2008.

GUEDES, L. A. **Dispersão de Sementes de *Pinus elliottii* nas áreas da Florestal Mostardas Ltda.** Relatório técnico feito para empresa Florestal Mostardas, 11p. 2015

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**. 2. ed. São José do Campos: Parêntese Editora, 2009.

GIROUARD, G. *et al.* Validated spectral angle mapper algorithm for geological mapping: Comparative study between Quickbird and Landsat-TM. In: **ISPRS CONGRESS: GEO-IMAGERY BRIDGING CONTINENTS**, **Anais eletrônicos** Istanbul, 2004. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm4/papers/433.pdf>> Acesso em: 05 nov. 2017.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). **Termo de compromisso ambiental assinado com as empresas FLOPAL e Florestal Mostardas**, 2011.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE (IUCN). **Invasive species**. Disponível em: <<https://www.iucn.org/theme/species/our-work/invasive-species>> Acesso em: 20 jan. 2018.

LANGDON, B.; PAUCHARD, A.; AGUAYO, M. *Pinus contorta* invasion in the Chilean Patagonia: local patterns in a global context. **Biological Invasions**. v.12 p. 3961–3971, 2010.

LEDGARD, N. J.; LANGER, E. R. **Wilding prevention: Guidelines for minimising the risk of unwanted wilding spread from new plantings of introduced conifers**. Christchurch: New Zealand Forest Research/Ministry for the Environment, 1999.

LUNETTA, R. S. *et al.* Remote Sensing and Geographic Information System Data Integration: Error Sources and Research Issues. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 57, no 6, p 677-687, 1991.

- LU, D.; WENG, Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance, **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, p 823-870, 2007.
- KRUSE, F. A. *et al.* The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 145-163, 1993.
- MACK, R. N. *et al.* Biological Invasions: Causes, epidemiology, global consequences and control. **Ecological Applications**, v. 10, p 689-710, 2000.
- MACHADO, I.F.; MOREIRA, L.F.B.; MALTCHIK, L. Effects of pine invasion on annurans assemblage in southern Brazil coastal ponds. **Amphibia-Reptilia**, v. 33, p. 227-237, 2012.
- MENESES, P. R; SANO, E. E. Classificação pixel a pixel de imagens. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Orgs.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UnB, p.191-208, 2012.
- OLIVEIRA, A. L. **Levantamento das empresas florestadoras e tecnologia de produção nas áreas do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, entorno e amortecimento**. Relatório técnico produzido para o IBAMA dentro do contrato PNUD 2004/002548. Mostardas, 2006. 51p.
- PORTZ, L.; MANZOLLI, R. P.; SALDANHA, D. L.; CORREA, I. C. S. Dispersão de espécie exótica no Parque Nacional da Lagoa do Peixe e seu entorno. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 1, p. 33-44, 2011.
- PORTZ, L.; GUASSELLI, L. A.; CORRÊA, I. C. S. Variação Espacial e Temporal de NDVI na Lagoa do Peixe, RS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, p. 897-911, 2011.
- PLANET. **Rapid Eye Imagery Product Specifications**. Version 6.1, 2016
- PETROPOULOS, G. P. *et al.* A Comparison of spectral angle mapper and artificial neural network classifiers combined with Landsat TM imagery analysis for obtaining burnt area mapping. **Sensors**, n. 10, p.1967-1985, 2010.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO I. E.; KUPLICH T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- RUDORFF, B. T. F.; SUGAWARA, L. M. Mapeamento da cana-de-acúcar na Região Centro-Sul via imagens de satélites. **Informe Agropecuário**, v. 28, n. 241, 2007.

RICHARDSON, D. M.; HIGGINS, S. I. Pines as invaders in the southern hemisphere. In: RICHARDSON, D. M. (Ed.). **Ecology and biogeography of Pinus**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 450 - 473, 1998.

RICHARDSON, D. M.; WILGEN, B. W.; NUNEZ, M. A. Alien conifer invasions in South America: short fuse burning? **Biological Invasions**, v. 10 p 573–577, 2008.

ROLON, A. S.; ROCHA, O.; MALTCHIK, L. Does pine occurrence influence the macrophyte assemblage in Southern Brazil ponds? **Hydrobiologia**, v. 675, p. 157-165, 2011.

STERNET, C.; BACCA, R. C.; MORAES, A. B.; ÁVILA, A. C.; MALTCHIK, L. Negative effects of exotic pine invasion on macroinvertebrate communities in southern Brazil coastal ponds. **Marine and Freshwater Research**, v. 68, p. 283-292, 2012.

TOMAZELLI, L. J. O regime dos ventos e a taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 20, n. 1, p. 18-26, 1993.

TOMAZELLI, L. J.; DILLENBURG, S. R.; BARBOZA, E. G.; ROSA, M. L. C. C. Geomorfologia e potencial de preservação dos campos de dunas transgressivos de Cidreira e Itapeva, litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil **Pesquisas em Geociências** v. 35, n.2, p.47-55, 2008.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY 2017A. **Landsat collections**. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/landsat-collections>>. Acesso em: 30 ago. 2017.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY 2017C. **Provisional LANDSAT 8 Surface Reflectance Code (LASRC) product: Version 3.5** disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/documents>>. Acesso em: 30 ago. 2017.

VILLWOCK, J. A. & TOMAZELLI, L. J. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: gênese e paisagem atual. In: Ministério do Meio Ambiente (Org.). **Biodiversidade: Regiões da Lagoa do Casamento e dos Butiazais de Tapes, planície costeira do Rio Grande do Sul**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 20-33, 2006.

YI, J. R. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; QUINTANILHA, J. A. Identificação e mapeamento de áreas de milho na região sul do Brasil utilizando imagens MODIS. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.3, p.753-763, 2007.

WAGNER, A. P. L.; DUCATI, J. R. Estudo de florestas de Pinus no nordeste do Estado do Rio Grande do Sul com imagens do sensor ASTER. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, Goiânia. Anais, INPE, p. 4361-4368, 2005.

ZANCHETTA, D.; DINIZ F. V. Estudo da contaminação biológica por *Pinus* spp. em três diferentes áreas na estação ecológica de Itirapina (SP, Brasil). **Revista do Instituto Florestal**, v18, p. 1–14, 2006.

ZENNI, R.D.; ZILLER, S. R. An overview of invasive plants in Brazil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 34(3), p. 431-446, 2011.

ZILLER, S. R.; DECHOUM, M. S. Plantas e vertebrados exóticos invasores em unidades de conservação no Brasil. **Biodiversidade Brasileira**, v. 3, n. 2, p 4-31, 2013.

ZILLER, S. R.; GALVÃO, F. A degradação da estepe gramíneo-lenhosa no Paraná por contaminação biológica de *Pinus elliottii* e *P. taeda*. **Floresta**, v.32, n. 1, p 41-47, 2002.

6. SEGUNDO ARTIGO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ASSINATURAS ESPECTRAIS OBTIDAS ATRAVÉS DE RADIOMETRIA DE LABORATÓRIO E SENSORES ORBITAIS

Lisandro Marcio Signori¹, Jorge Ricardo Ducati²

¹ Mestrando em Sensoriamento Remoto, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Campus do Vale, Caixa-Postal 15001, CEP 91501-970. Porto Alegre - RS – Brasil. Autor correspondente. E-mail: lisandromsg@gmail.com

² Doutor, Pesquisador, Professor do PPGSR. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). E-mail: ducati@ufrgs.br

RESUMO

A radiometria é uma ferramenta fundamental da ciência do Sensoriamento Remoto, na medida em que mensura a resposta espectral dos alvos e permite a obtenção de assinaturas espectrais acuradas para compor bibliotecas espectrais. Os espectros obtidos em laboratório auxiliam na interpretação das imagens de satélite e devem correlacionar-se com os dados orbitais. Este trabalho fez uma avaliação da correlação entre assinaturas espectrais de areia e *Pinus elliottii* obtidas em laboratório, comparando-as com dados orbitais. Amostras de areia e Pinus foram mensuradas em espectraloradiômetro ASD FieldSpec®, que efetua medidas entre 350 e 2500 nm. As assinaturas espectrais assim obtidas foram comparadas com dados extraídos de imagens do satélite Landsat, com correção atmosférica. Os espectros foram normalizados para permitir a correta sobreposição. Avaliou-se a correlação entre as reflectâncias através do coeficiente de Pearson, que foi da ordem de 0,99 na comparação entre espectros de areia e 0,98 entre espectros de Pinus, valores que indicam elevada correlação. Realizou-se também uma análise do comportamento de assinaturas espectrais em uma série temporal de imagens Landsat, verificando variações da curva espectral e sua relação com as mudanças na cobertura do solo. Os resultados mostraram que as mudanças na cobertura do solo implicam a alterações nos espectros dentro de uma linha evolutiva previsível.

Palavras-chave: Landsat, *Pinus elliottii*, sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Radiometry is a fundamental tool in the science of Remote Sensing, in that it measures the spectral response of the targets and allows the obtaining of accurate spectral signatures to compose spectral libraries. The spectra obtained in the laboratory help in the interpretation of the satellite images and must correlate with the orbital data. This work evaluated the correlation between spectral signatures of sand and *Pinus elliottii* obtained in the laboratory, comparing them with orbital data. Sand and Pinus samples were measured on a FieldSpec® ASD spectroradiometer, measuring between 350 and 2500 nm. The spectral signatures thus obtained were compared with data extracted from Landsat satellite images, with atmospheric correction. The spectra were normalized to allow correct overlap. The correlation between the reflectances were evaluated by the Pearson coefficient, which was of the order of 0.99 in the comparison between sand spectra and 0.98 between Pinus spectra, values indicating high correlation was evaluated. An analysis of the behavior of spectral signatures in a time series of Landsat images was also carried out, verifying variations in the spectral curve and its relation with changes in soil cover. The results showed that changes in soil cover were directly related to variations in the shape of the spectral signatures.

Keywords: Landsat, *Pinus elliottii*, remote sensing.

1. INTRODUÇÃO

A radiometria é a ciência da medição da radiação eletromagnética óptica. A medição da energia radiante por meio de equipamentos chamados de radiômetros converte a energia da radiação óptica em sinais elétricos que podem ser tratados, transmitidos e armazenados adequadamente (PALMER; GRANT, 2010). O termo radiometria confunde-se, em termos de significado, com o termo espectroscopia, definido por Clarck (1999) como o estudo da luz ou da radiação eletromagnética em geral, como função de seu comprimento de onda que foi emitido, refletido ou espalhado por um sólido, líquido ou gás. O termo espectroscopia é largamente utilizado na Física que estuda as interações entre matéria e energia eletromagnética e seria adequado ao propósito deste artigo, mas vamos aqui utilizar a terminologia comum no Sensoriamento Remoto, adotando o termo radiometria

O processo de medição da radiação eletromagnética é fundamental no sensoriamento remoto e, no caso de sensoriamento por satélite, os sensores orbitais estão equipados com radiômetros específicos para medir a energia recebida em bandas espectrais adequadas ao propósito de cada satélite (Jensen, 2009). Pode-se dizer então que ao interpretar uma imagem de satélite estamos em última análise interpretando dados de radiometria feita a grandes distâncias. De acordo com Song et al. (2001), antes de chegar no satélite a radiação eletromagnética refletida pela superfície terrestre será modificada por espalhamento e absorção, devido aos gases e aerossóis presentes na atmosfera terrestre. Estudos mediram os valores de absorção da radiação solar para as diversas moléculas presentes na atmosfera. Tais medidas foram compiladas por Allen (1973) e apresentadas nas tabelas de absorção atmosférica do livro *Astrophysical Quantities*.

Estudos de radiometria têm sido realizados efetuando a medição de espectros que vão compor bibliotecas espectrais construídas para os mais diversos tipos de vegetação, solos e outros alvos de sensoriamento remoto (USGS, 2017). Neste contexto Carter et al. (1989) compararam a reflectância de acículas de indivíduos jovens e velhos em *Pinus taeda* submetidos a diferentes condições de competição. Williams (1991) efetuou estudos de radiometria comparando as assinaturas espectrais de diversas espécies de coníferas, a partir de medidas feitas em folhas, galhos e dossel. Técnicas de radiometria de laboratório e orbital foram utilizadas para investigar a diferenciação espectral de solos (NANNI e DEMATTÊ, 2006; FIORIO et al., 2010) e identificação de componentes minerais em solos (VICENTE e FILHO, 2011).

O tema das assinaturas espectrais surge também entre os métodos de classificação automática de pixels, destacamos o algoritmo Spectral Angle Mapper que utiliza a assinatura espectral como critério para a seleção de pixels (KRUSE et al., 1993). No entanto encontramos poucos trabalhos avaliando o grau de concordância existente entre as assinaturas espectrais coletadas pelos satélites e as mesmas assinaturas coletadas por um espectroradiômetro em laboratório.

Este artigo surgiu como parte de um estudo de sensoriamento remoto (Signori, 2018) para identificação de áreas ocupadas pela espécie exótica invasora *Pinus spp* na área norte do Parque Nacional da Lagoa do Peixe (PNLP). O Parque é

uma unidade de conservação federal localizada nos municípios de Mostardas e Tavares, planície litorânea do Rio Grande do Sul. Desta forma, o artigo tem os seguintes objetivos:

1. Fazer um estudo de radiometria em laboratório identificando as assinaturas espectrais de *Pinus elliottii* e areia de dunas, a partir de amostras existentes na área norte do PNLN;

2. Comparar as assinaturas espectrais medidas em laboratório, e assinaturas dos mesmos materiais, porém, obtidas em imagens de satélite;

3. Fazer, a partir da identificação de pixels puros presentes nas imagens de satélite, uma análise temporal de assinaturas espectrais das principais classes de alvos existentes na região.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Pré-processamento das imagens

Para evitar a interferência atmosférica, as bandas espectrais dos sensores orbitais são posicionadas em faixas do espectro eletromagnético que sofrem menos influência da camada atmosférica. Tais faixas são chamadas de janelas espectrais atmosféricas, cujo uso reduz, mas não elimina totalmente as interferências vindas da interação da radiação eletromagnética com a atmosfera (JENSEN, 2009). Para reduzir tais efeitos foram criados métodos de correção cujo objetivo é resgatar o valor da reflectância tal qual ela seria se fosse medida próxima ao alvo (LATORRE, 2002). Para a correta visualização das assinaturas espectrais presentes nas imagens de satélite, é fundamental que os dados tenham passado pelo processo de correção atmosférica (JENSEN, 2009). Após este tratamento efetuado nas imagens, as assinaturas podem então ser comparadas com assinaturas espectrais acuradas que se encontram nas bibliotecas espectrais utilizadas na ciência do Sensoriamento Remoto.

Para este estudo, foram utilizadas imagens com correção atmosférica. Selecionou-se imagens dos satélites Landsat 5, Landsat 7 e Landsat 8, da coleção *Tier 1* (nível 1), as quais são radiometricamente calibradas entre os diferentes

sensores Landsat e ortorretificadas utilizando pontos de controle na superfície do terreno (USGS, 2017a). Tais imagens foram também submetidas ao procedimento de correção atmosférica, através de processamento realizado pelo United States Geological Service (USGS). O produto denominado de *Landsat Surface Reflectance* constitui-se de imagens de nível 1, com o acréscimo do processamento de correção atmosférica. Estas imagens corrigidas podem ser obtidas por usuários cadastrados no site <<https://earthexplorer.usgs.gov>> a partir de uma solicitação de processamento (USGS, 2017c).

2.2 Resposta Espectral Relativa dos Sensores Orbitais (Função de Sensitividade)

Os detectores existentes nos sensores do satélite Landsat não possuem sensibilidade uniforme ao longo das bandas espectrais. Quando falamos que a banda 1 do sensor TM Landsat 5 se estende de 450 a 520 nm, poderia entender-se que o sensor é igualmente sensível a todos os comprimentos de onda contidos neste intervalo, mas na verdade isso não ocorre. A sensibilidade dos detectores varia ao longo dos comprimentos de onda, e varia para os diferentes sensores. Esta variação está descrita para diversos sensores orbitais em tabelas de Resposta Espectral Relativa (RER) disponibilizadas pelo USGS no sítio da internet: <<https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer>>.

Tais tabelas contém um fator de multiplicação para cada comprimento de onda, indicando qual proporção da energia daquele comprimento de onda é efetivamente detectada pelo sensor. Desta forma a função matemática da RER mostra qual a real sensibilidade do sensor orbital naquele intervalo espectral.

2.3 Normalização dos dados

A correta comparação das curvas espectrais exige que se faça a normalização dos dados. A operação de normalização é um procedimento matemático que consiste em fazer com que todas as curvas espectrais colocadas em um mesmo gráfico tenham área unitária. A normalização atua sobre a escala vertical de um espectro não modificando sua forma, portanto permite sobrepor e comparar curvas espectrais obtidas por meios diferentes.

2.6 Comparação entre espectros obtidos em laboratório e por imagens orbitais

Para fazer a comparação entre os espectros são necessários alguns procedimentos. Inicialmente aplicou-se aos dados de laboratório os fatores de correção correspondentes a Resposta Espectral Relativa.

Posteriormente os espectros obtidos em laboratório devem ser reamostrados, transformando o espectro de 2150 bandas (espectroradiômetro) em um espectro de apenas seis bandas (Landsat). Para isso tomou-se a média dos valores correspondentes a cada banda espectral Landsat, gerando um ponto no centro da banda de modo a obter uma "assinatura espectral" com seis pontos. Por fim foi feita a normalização de ambos espectros possibilitando a sobreposição das assinaturas espectrais.

2.4 Obtenção de espectros no laboratório

As medidas de reflectância espectral foram realizadas no Laboratório de Radiometria do Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CEPSRM/UFRGS). Foi utilizado um espectroradiômetro ASD FieldSpec®, equipamento que efetua medidas nos comprimentos de onda do visível até o infravermelho médio (350–2500 nm) com 2150 bandas de largura espectral de 1 nm.

Mediu-se amostras de acículas de Pinus em coletadas em cinco pontos, (quantidade suficiente para cobrir uma área de 10 cm x10 cm) e amostras de areia do campo de dunas coletadas em dois pontos, todos na área norte do PNL. Para cada amostra de Pinus realizou-se três séries de medidas, misturando as acículas entre as séries. Para cada amostra de areia foram feitas seis séries de medidas, misturando as camadas superiores e inferiores da areia entre as séries. Também foi medida a reflectância da mesma amostra de areia, porém, molhada por meio de um borrifador, simulando um evento de chuva. Após a realização de todas as medidas, os dados foram transferidos para o *software* Excel no qual foram calculados os valores médios de reflectância e desenhadas as assinaturas espectrais.

2.5 Obtenção de espectros a partir de imagens orbitais

A assinatura espectral também pode ser obtida por meio de imagens de satélite, caso em que será construída a partir das bandas espectrais disponíveis. Para o satélite Landsat 5-TM a assinatura espectral terá apenas seis pontos correspondendo bandas espectrais *Blue*, *Green*, *Red*, *NIR*, *SWIR-1* e *SWIR-2* (Azul, Verde, Vermelha, IV-próximo, IV-médio-1, e IV-médio-2).

As bandas foram empilhadas em ordem crescente de comprimento de onda através da função *Layer Stack*, e a seguir foi feita a composição colorida RGB-453 válida para imagens Landsat 5 e 7. Nesta composição o canal R recebe a banda *NIR*, o canal G recebe a banda *SWIR-1* e o canal B recebe a banda *Red*. Para o satélite Landsat-8 a combinação correspondente é RGB-564, e esta composição em falsa cor mostrou-se a melhor para diferenciar as áreas de Pinus de outras feições vegetais bem como permitiu boa diferenciação dos campos de dunas.

A boa qualidade da assinatura espectral está intrinsecamente relacionada com a escolha de pixels sem mistura espectral (GIROUARD et al. 2004). Para isso é necessário que o analista tenha bom conhecimento da área evitando locais onde possam ocorrer pixels misturados. Neste estudo, buscou-se pixels puros de Pinus no centro de talhões de silvicultura e pixels puros de areia em áreas já conhecidas em meio ao campo de dunas.

Os pixels puros de areia e Pinus foram selecionados utilizando a ferramenta ROI (*Region of interest*), e a seguir usou-se a função *Stats* para obter os dados estatísticos e valores dos pixels, bem como os gráficos com a assinatura espectral. Para a areia que apresentou menor variância nos valores dos pixels, marcou-se em cada imagem três ROIs com 12 pixels cada. Para o Pinus, no qual observou-se maior variância nos valores dos pixels marcou-se em cada imagem três ROIs cujo tamanho variou entre 20 e 40 pixels cada.

As assinaturas espectrais podem ser visualizadas diretamente no *software* de processamento digital de imagens, neste caso o ENVI 4.5, ou em algum *software* de planilha eletrônica partir da transferência dos dados. O estudo comparativo entre assinaturas espectrais utilizou imagens de três diferentes versões do satélite Landsat, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Imagens utilizadas no estudo comparativo de assinaturas espectrais.

Satélite	Sensor	Data de aquisição
Landsat 7	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	24/02/2000
Landsat 5	Thematic Mapper (TM)	04/05/2005
Landsat 8	Operational Land Imager (OLI)	07/12/2014

As assinaturas espectrais podem ser geradas diretamente nos *softwares* de processamento digital de imagens, como exemplo, a Figura 1 mostra gráficos gerados pelo ENVI para pixels puros de areia e Pinus. Em vermelho, observa-se as curvas de máximo e mínimo, em verde o desvio padrão e em branco o valor médio dos pixels.

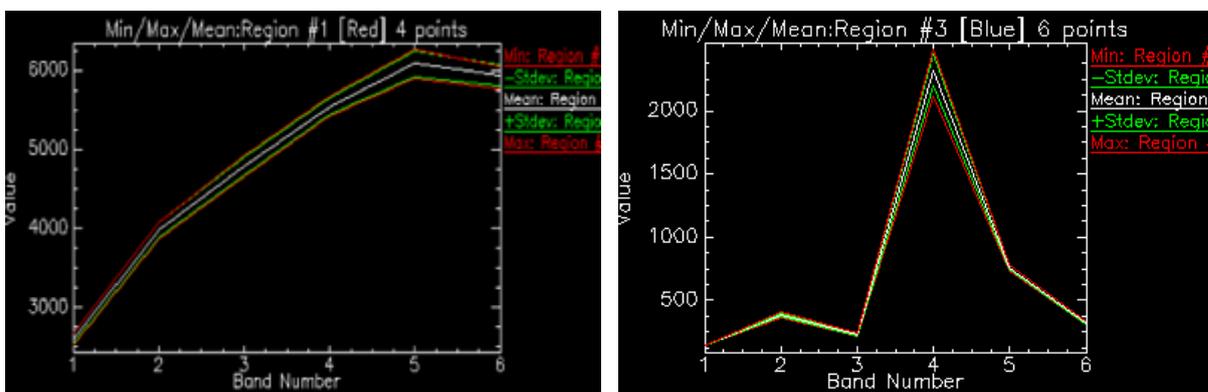


Figura 1: Gráficos gerados pelo ENVI: Reflectância de pixels areia (esquerda) e Pinus (direita) nas seis bandas Landsat TM.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Assinatura espectral da areia obtida em laboratório

A Figura 2 mostra a curva obtida para areia seca, que está de acordo com as previsões de Jensen (2009) segundo o qual o espectro do solo arenoso seco se caracteriza por uma resposta espectral relativamente simples que cresce ao longo da região entre 500 e 2600 nm. Percebe-se nesta assinatura espectral da areia seca, pequenas depressões, sendo a mais visível em 1940nm, uma das bandas de absorção da água, o que indica que a amostra não estava 100% seca.

Para a areia molhada observa-se uma redução considerável na energia refletida ao longo de todo o intervalo de medição, e depressões pronunciadas em 1450 e 1940 nm. Jensen (2009) explica que à medida que aumenta a umidade do solo, a água presente na camada superficial vai absorver significativas quantidades de radiação em comprimentos de onda específicos e também nas regiões espectrais adjacentes, formando típicas depressões na curva espectral. Este autor também relata que as bandas de absorção da molécula de água na região do infravermelho são bastante amplas, com centros em 970, 1190, 1450, 1940 e 2700 nm.

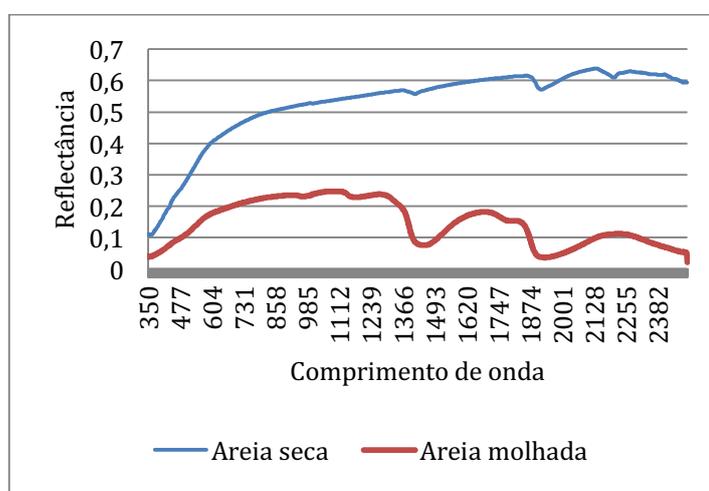


Figura 2: Reflectância espectral de areia seca e molhada, medidas no espectroradiômetro.

As assinaturas espectrais de alta resolução mostradas na Figura 2, foram reamostradas para apenas seis pontos correspondendo às seis bandas existentes no sensor Landsat 8-OLI. O resultado é mostrado na Figura 3.

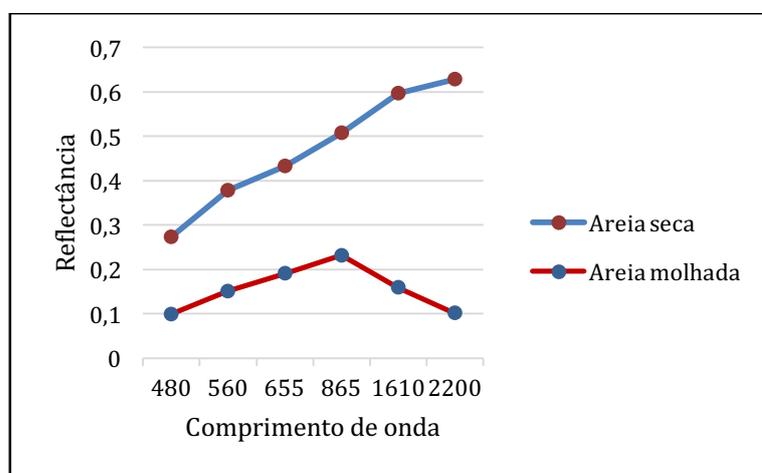


Figura 3: Espectros de areia seca e molhada reamostrados para as bandas Landsat 8.

3.2 Assinatura espectral do *Pinus elliottii* obtida em laboratório

A Figura 4 apresenta os espectros obtidos em laboratório para cinco amostras de acículas de *Pinus elliottii* coletadas em diferentes pontos da área de estudo.

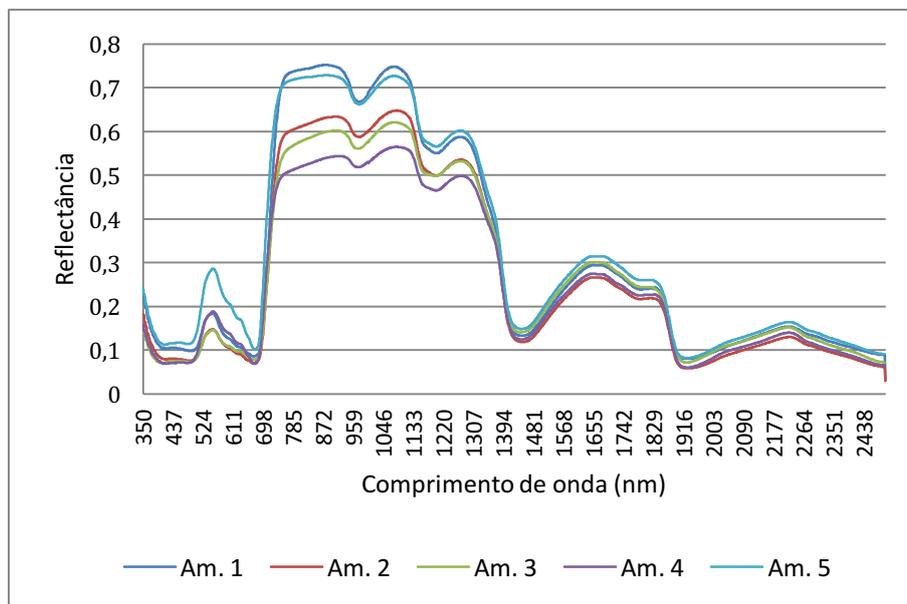


Figura 4: Assinaturas espectrais de amostras de *Pinus elliotti* medidas no espectrorradiômetro.

No faixa do espectro visível, observam-se reflectâncias baixas nas regiões azul e vermelha e um pouco mais altas no verde, o que é comum na vegetação verde saudável e explica-se pela presença de clorofila, que tem fortes picos de absorção nas regiões azul e vermelha (SIMS, GAMON; 2002).

Na faixa do infravermelho próximo que vai de 700 a 1200 nm, observa-se que algumas amostras tiveram reflectâncias mais altas que outras, o que pode ser explicado por diferenças no estado das acículas nos diferentes pontos de coleta. Na proximidade do mar devido ao vento mais intenso, as acículas estavam visivelmente mais ressecadas, com coloração tendendo ao marrom.

Na faixa do infravermelho próximo as absorções estão relacionadas a estrutura celular (PONZONI, SHIMABUKURO, KUPLICH; 2011), destacam-se os picos de absorção em 970 e 1190 nm devidos a molécula de água. Na região do infravermelho médio, 1300 a 2500 nm, o conteúdo de água foliar é o principal responsável pela queda na reflectância pois a água é um forte absorvedor de

energia nesta região do espectro (PONZONI, SHIMABUKURO, KUPLICH; 2011). Destacam-se os picos de absorção em 1450 e 1950 nm diretamente relacionados à molécula de água.

Calculando a média das reflectâncias para as cinco amostras, obtém-se a curva mostrada na Figura 5, sobre a qual se marcou a posição das seis bandas do sensor OLI Landsat-8.

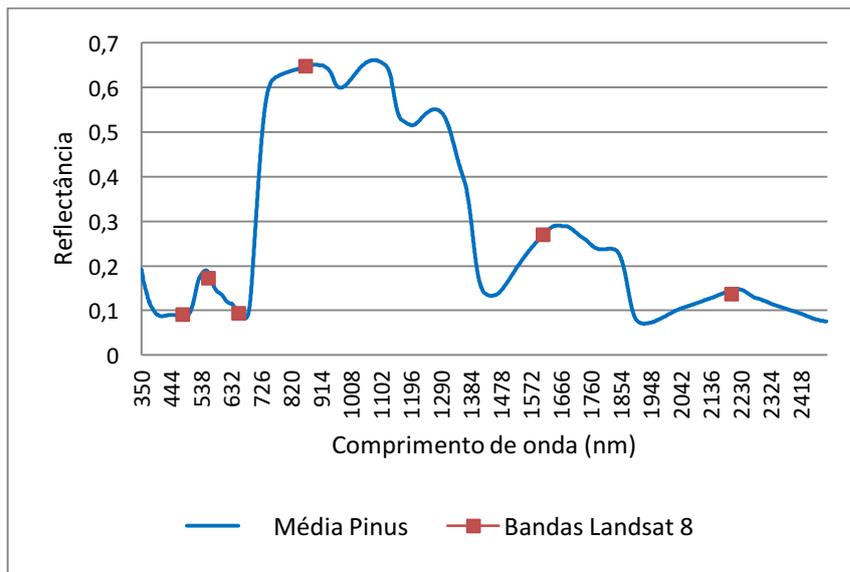


Figura 5: Bandas Landsat 8 sobrepostas à assinatura espectral médias do Pinus.

A Figura 6 apresenta a assinatura espectral média do Pinus, reamostrada para as seis bandas do sensor OLI-Landsat 8.

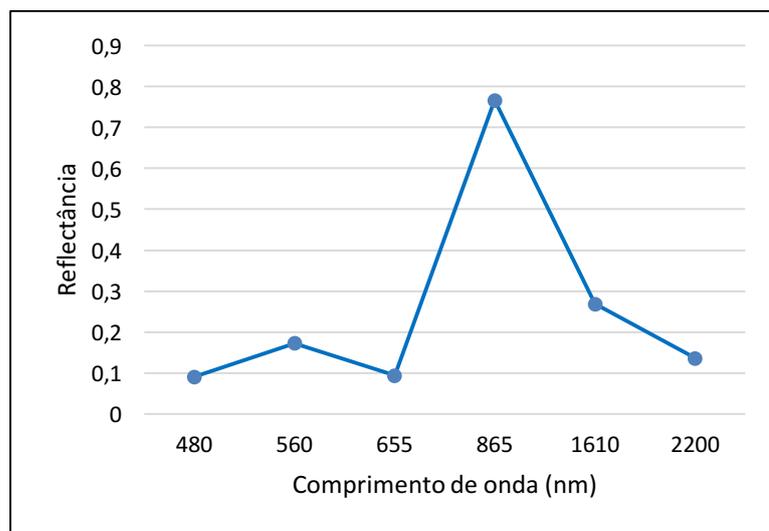


Figura 6: Assinatura espectral média das amostras de Pinus, reamostradas para as seis bandas do sensor OLI-Landsat 8

3.3 Comparação entre assinaturas espectrais de areia. Satélite X Laboratório

As Tabelas 2, 3 e 4 mostram valores normalizados para a reflectância da areia, obtidos a partir do espectroradiômetro e a partir das imagens orbitais (laboratório X satélite). Para comparar tais valores de reflectância, calculou-se a diferença percentual entre eles, e também o Coeficiente de Correlação de Pearson.

Tabela 2: Dados espectrais comparativos, areia, imagem 2000 Landsat 7

Imagem 2000 Landsat 7	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2
Reflectância média pixels puros areia.						
Valor normalizado	0,0915	0,1324	0,1646	0,1840	0,2176	0,2099
Reflectância média areia radiômetro						
Valor normalizado	0,0897	0,1324	0,1629	0,1808	0,2161	0,2181
Diferença percentual	1,916	0,015	1,066	1,704	0,681	-3,880

Coeficiente de correlação de Pearson $r = 0,9969$

Tabela 3: Dados espectrais comparativos, areia, imagem 2005 Landsat 5

Imagem 2005 Landsat 5	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2
Reflectância média pixels puros areia.						
Valor normalizado	0,0952	0,1352	0,1585	0,1865	0,2116	0,2130
Reflectância média areia radiômetro						
Valor normalizado	0,0914	0,1312	0,1570	0,1922	0,2058	0,2224
Diferença percentual	3,991	2,950	1,000	-3,078	2,734	-4,423

Coeficiente de correlação de Pearson $r = 0,99422$

Tabela 4: Dados espectrais comparativos, areia, imagem 2014 Landsat 8

Imagem 2014 Landsat 8	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2
Reflectância média pixels puros areia.						
Valor normalizado	0,0882	0,1322	0,1618	0,1909	0,2139	0,2129
Reflectância média areia radiômetro						
Valor normalizado	0,0914	0,1312	0,1570	0,1922	0,2058	0,2224
Diferença percentual	-3,654	0,803	3,012	-0,692	3,760	-4,431

Coeficiente de correlação de Pearson $r = 0,99221$

A partir das Tabelas 2, 3 e 4, plotou-se os gráficos das Figuras 7, 8 e 9 que permitem visualizar a sobreposição das assinaturas espectrais normalizadas.

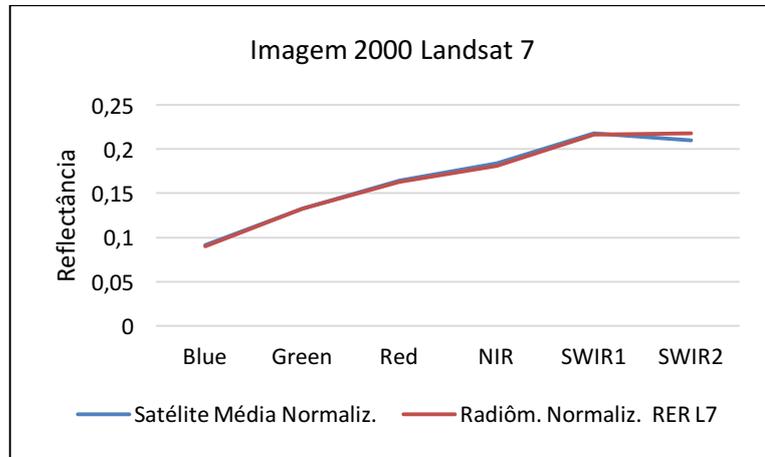


Figura 7: Curvas espectrais da areia (laboratório X satélite Landsat 7).

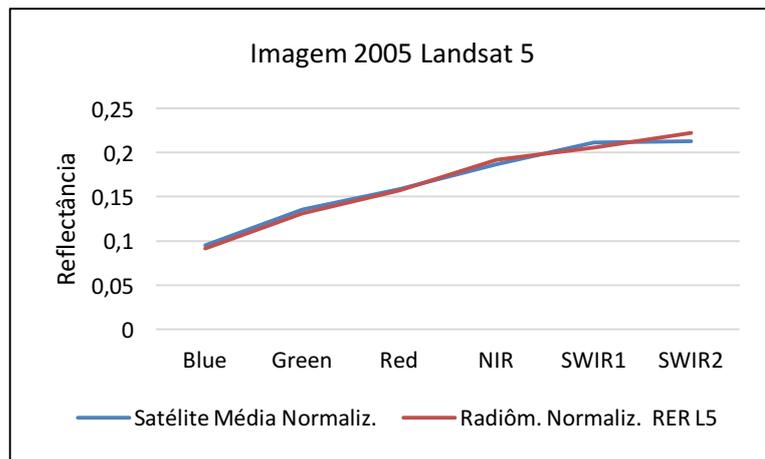


Figura 8: Curvas espectrais da areia (laboratório X satélite Landsat 5).

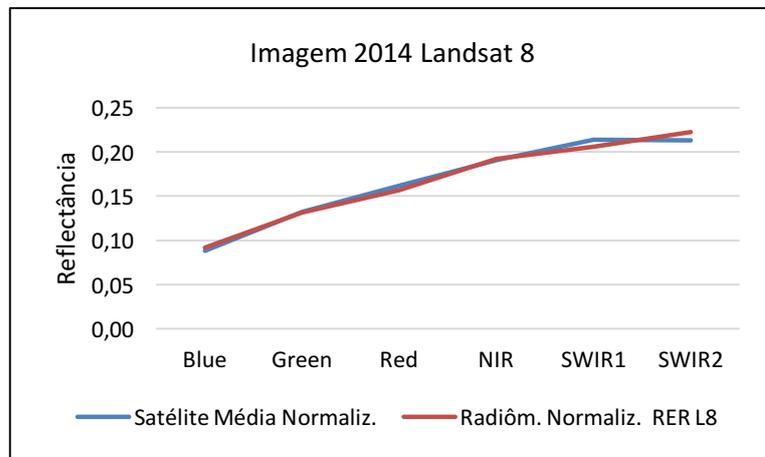


Figura 9: Curvas espectrais da areia (laboratório X satélite Landsat 8).

3.4 Comparação entre assinaturas espectrais de Pinus. Satélite X Laboratório

As Tabelas 5, 6 e 7 mostram valores normalizados para a reflectância do Pinus, obtidos a partir do espectroradiômetro e a partir das imagens orbitais (laboratório X satélite). Para comparar tais valores de reflectância, calculou-se a diferença percentual entre eles, e também o Coeficiente de Correlação de Pearson.

Tabela 5: Dados espectrais comparativos, Pinus imagem 2000 Landsat 7

Imagem 2000 Landsat 7	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2
Reflectância média pixels puros Pinus.						
Valor normalizado	0,0600	0,0993	0,0647	0,5789	0,1451	0,0520
Reflectância média Pinus radiômetro.						
Valor normalizado	0,0344	0,0700	0,0368	0,5907	0,1993	0,0688
Diferença percentual	42,68	29,55	43,09	-2,04	-37,34	-32,28
Coeficiente de correlação de Pearson $r = 0,9887$						

Tabela 6: Dados espectrais comparativos, Pinus imagem 2005 Landsat 5

Imagem 2005 Landsat 5	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2
Reflectância média pixels puros Pinus.						
Valor normalizado	0,0473	0,0865	0,0625	0,6218	0,1396	0,0424
Reflectância média Pinus radiômetro.						
Valor normalizado	0,0363	0,0657	0,0379	0,5720	0,2147	0,0734
Diferença percentual	23,16	23,98	39,37	8,01	-53,82	-73,11
Coeficiente de correlação de Pearson $r = 0,98119$						

Tabela 7: Dados espectrais comparativos, Pinus imagem 2014 Landsat 8

Imagem 2014 Landsat 8	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2
Reflectância média pixels puros Pinus.						
Valor normalizado	0,0354	0,0907	0,0575	0,5497	0,1857	0,0810
Reflectância média Pinus radiômetro.						
Valor normalizado	0,0354	0,0732	0,0353	0,5884	0,1907	0,0770
Diferença percentual	-0,15	19,29	38,68	-7,04	-2,72	5,03
Coeficiente de correlação de Pearson $r = 0,99907$						

A partir das Tabelas 5, 6 e 7, plotou-se os gráficos das Figuras 10, 11 e 12 que permitem visualizar a sobreposição das assinaturas espectrais normalizadas.

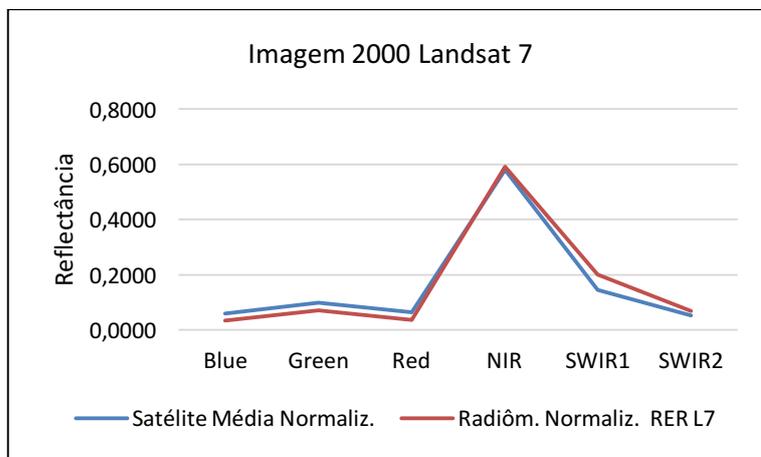


Figura 10: Curvas espectrais Pinus (laboratório X satélite Landsat 7).

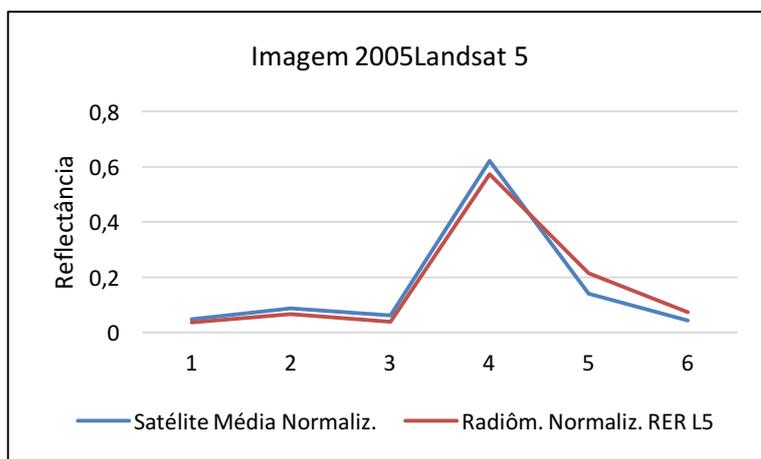


Figura 11: Curvas espectrais Pinus (laboratório X satélite Landsat 5).

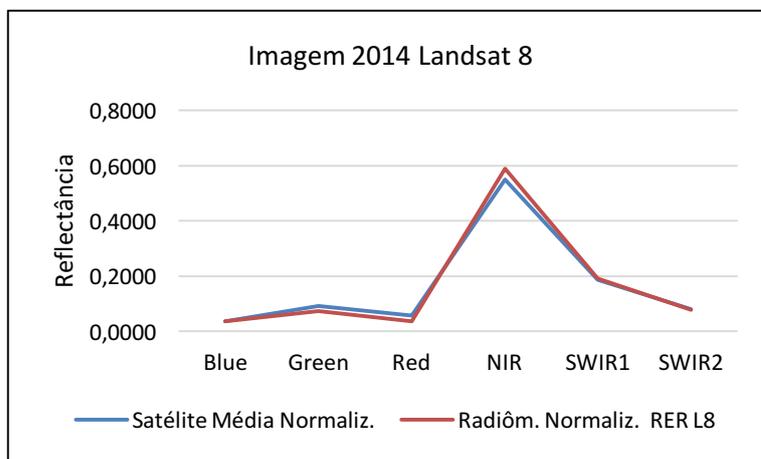


Figura 12: Curvas espectrais Pinus (laboratório X satélite Landsat 8).

3.5 Discussão dos resultados:

Os valores da diferença percentual e da Correlação de Pearson mostram que a concordância entre as assinaturas espectrais é melhor para a areia, com todos os coeficientes r acima de 0,99 que indica muito alta correlação entre as curvas de reflectância obtidas por laboratório X satélite. A homogeneidade de alvos minerais inertes, neste caso a areia, implica em fatores muito estáveis de reflectância espectral o que contribui de modo fundamental para a alta correlação entre os dados analisados. Pode-se também mencionar que contribuiu para este bom resultado, a cuidadosa escolha dos pixels puros e a disponibilidade de imagens secas, garantindo que nas três datas analisadas os pixels estivessem em áreas de areia com mínima interferência de umidade.

No entanto, para o Pinus os valores da diferença percentual foram maiores e o coeficiente de Pearson foi ligeiramente menor, mostrando pequena redução da correlação entre as curvas de reflectância do Pinus obtidas por laboratório X satélite. Ao contrário do alvo areia, que é um material inerte, o Pinus está sujeito a variações fenológicas e sofre alterações em função das condições climáticas e de todos os processos biológicos que podem afetar os vegetais, e alterar suas estruturas internas. É preciso considerar também que a reflectância do dossel florestal, captada pelo satélite, não se deve somente a reflectância das acículas, mas conforme explicado por Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich (2011), existe também a contribuição de galhos e frutos. Já no laboratório, mediu-se a reflectância somente de acículas de Pinus.

4. ANÁLISE TEMPORAL DE ASSINATURAS ESPECTRAIS

Na medida em que ocorrem mudanças na cobertura do solo, tais alterações devem se refletir nas assinaturas espectrais. Para fazer uma verificação na forma das assinaturas espectrais ao longo do tempo, selecionou-se sempre nas mesmas áreas, um conjunto de 12 pixels (1,44 ha) representando os alvos mata nativa, areia, Pinus mal-sucedido e Pinus bem-sucedido. Os pixels foram coletados em imagens Landsat com correção atmosférica, e plotaram-se as assinaturas espectrais destes alvos para os anos 1985, 1988, 1995, 2000 e 2005.

A Figura 13 mostra a resposta espectral de pixels em meio a uma área antiga de mata nativa, verifica-se pouca variação tanto na forma como nos valores de reflectância, indicando que a mata não sofreu alterações significativas ao longo do período analisado. A forma do gráfico é coerente com a curva espectral da vegetação sadia, e a reflectância máxima ocorre na banda NIR, em valores ligeiramente superiores aos do Pinus para esta banda.

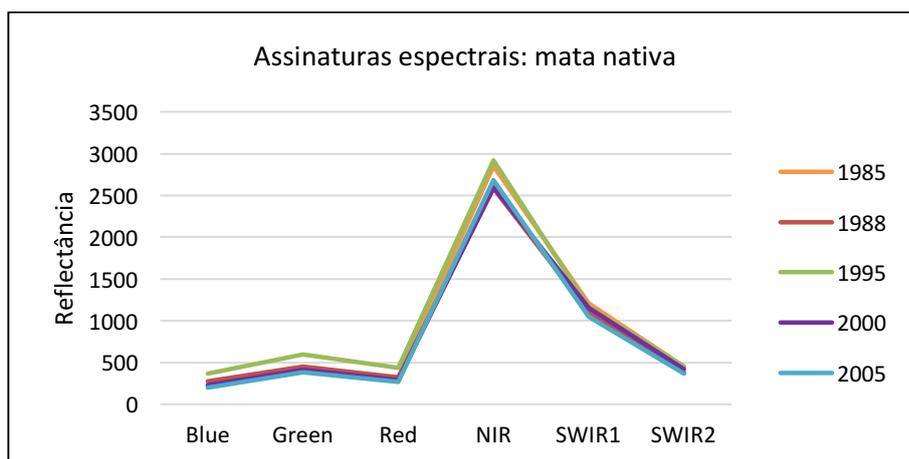


Figura 13 - Assinaturas espectrais em área de mata nativa.

A Figura 14, mostra assinaturas espectrais de areia, cujos pixels foram escolhidos em meio ao campo de dunas. As assinaturas são coerentes com o espectro medido em laboratório para a areia das dunas, e a estabilidade na forma das assinaturas indica que não houve alterações ao longo do período.

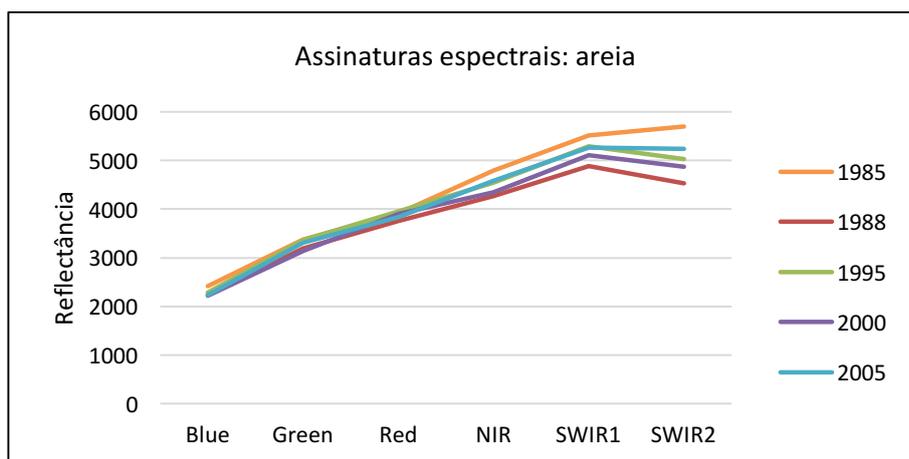


Figura 14 - Assinaturas espectrais em área de dunas móveis

A Figura 15 mostra a resposta espectral de pixels coletados em área de um plantio realizado em 1982, com alto índice de mortalidade das mudas, por isso chamado aqui de Pinus mal-sucedido. Verificam-se mudanças na forma das

assinaturas a medida em que o tempo avança; no ano de 1985 observa-se forte influência da resposta espectral do solo arenoso, e no ano de 2005 a curva espectral assume a forma típica da vegetação. Para entender este processo de mudança na forma das assinaturas, deve-se considerar que a influência da resposta espectral do solo é máxima no momento do plantio, e irá reduzindo-se progressivamente à medida que a vegetação cresce (ROUDEAUX et al., 1996).

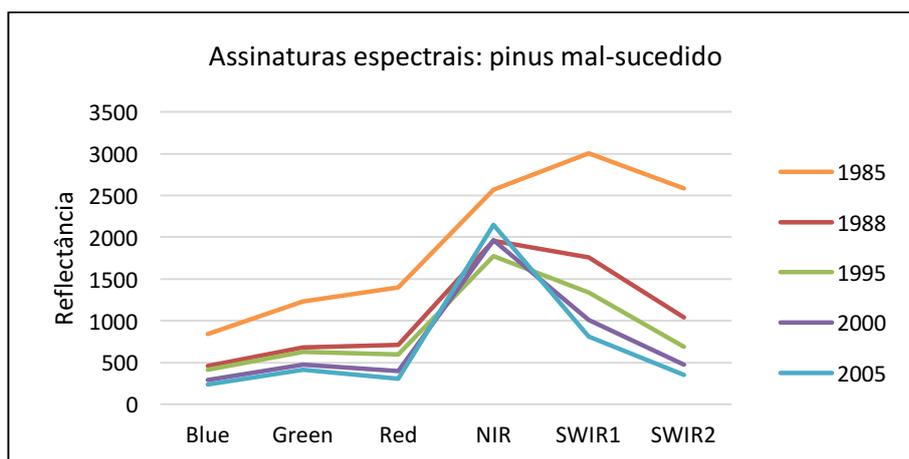


Figura 15 - Assinaturas espectrais em área de Pinus plantado mal-sucedido.

Os pixels que geraram as assinaturas espectrais da Figura 16 foram escolhidos em uma área de plantio bem-sucedido de Pinus, realizado também no ano de 1982. Como neste caso o plantio foi bem-sucedido, o fechamento do dossel florestal ocorreu rapidamente, de modo que já no ano de 1988 a assinatura espectral assume a forma típica da vegetação, mantendo-se assim até o ano de 2005, indicando que a cobertura do solo se manteve estável neste período.

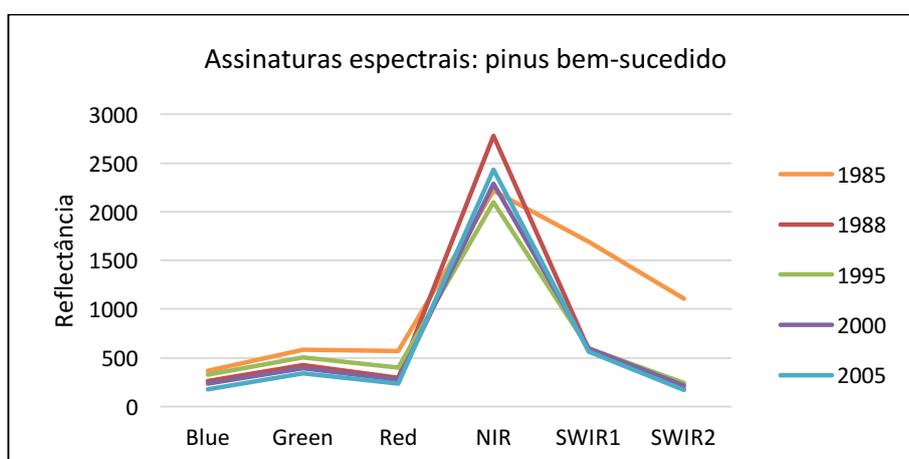


Figura 16 - Assinaturas espectrais em área de Pinus plantado bem-sucedido.

5. CONCLUSÕES

Comparou-se dados obtidos por medições radiométricas realizadas em laboratório sem interferência da atmosfera, com dados obtidos em medições radiométricas efetuadas por sensores orbitais que estão a grandes distâncias dos objetos, e portanto, sujeitas a interferência da atmosfera. Apesar desta considerável diferença nas condições de aquisição dos dados, a comparação entre as curvas espectrais apresentou elevados valores para os coeficientes de Pearson, indicando correlação muito forte. Este resultado indica e confirma que os dados de sensoriamento remoto orbital refletem e confirmam o comportamento espectral intrínseco dos alvos como foi observado em laboratório. Esta percepção indica que as classificações de imagens de satélite tendem efetivamente a espelhar a verdade terrestre.

A análise temporal de assinaturas espectrais confirmou que, no caso analisado, mudanças na cobertura do solo implicam em mudanças na forma das assinaturas espectrais, na proporção dos elementos contribuintes destas alterações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, C. V. **Astrophysical quantities**. 3 ed. London: The Athlone Press, 1973.

CARTER, G. A.; PALIWAL K.; PATHRE, U.; GREEN, R. J. Effect of competition and leaf age on visible and infrared reflectance in pine foliage. **Plant, Cell and Environment** n.12, p.309-315, 1989.

CLARK, R. N. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy, In: RENCZ, A. N. (Ed.). **Manual of remote sensing - volume 3: remote sensing for the earth sciences**. New York: John Wiley and Sons, 1999. cap. 1, p. 3-58.

FIORIO, P. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; NANNI, M. R.; FORMAGGIO, A. R. Diferenciação espectral de solos utilizando dados obtidos em laboratório e por sensor orbital **Bragantia**, vol. 69, n. 2, p. 453-466, 2010.

GIROUARD, G. *et al.* Validated spectral angle mapper algorithm for geological mapping: Comparative study between Quickbird and Landsat-TM. In: ISPRS

CONGRESS: GEO-IMAGERY BRIDGING CONTINENTS, 35, 2004, Istambul. **Anais eletrônicos**. Istambul, 2004. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm4/papers/433.pdf>> Acesso em: 05 nov. 2017.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**. 2. ed. São José do Campos: Parêntese Editora, 2009.

KRUSE, F. A. *et al.* The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 145-163, 1993.

LATORRE, M. *et al.* Correção atmosférica: conceitos e fundamentos. **Espaço & Geografia**, v.5, n. 1, p.153-178, 2002.

NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Comportamento da linha do solo obtida por espectrorradiometria laboratorial para diferentes classes de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 30, n. 6, p. 1031-1038, 2006.

PALMER J. M.; GRANT, B. G. **The art of radiometry**. Bellingham: SPIE Press, 2010.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO I. E.; KUPLICH T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 2, p. 95-107, 1996.

SIMS, D.A.; GAMON, J. A. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: A comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 526-537, 2003.

SIGNORI, L. M. **Mapeamento por sensoriamento remoto de área de Pinus spp no Parque Nacional da Lagoa do Peixe**. Dissertação 87 p. (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2018

SONG, C. *et al.* Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? **Remote Sensing of Environment**, v. 75, p. 230–244, 2001.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY 2017A. **Landsat collections**. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/landsat-collections>>. Acesso em: 30 ago. 2017.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY 2017C. **Provisional LANDSAT 8 Surface Reflectance Code (LASRC) product**: Version 3.5, Março 2017 Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/documents>>. Acesso em: 30 ago. 2017

WILLIAMS D. L. A Comparison of Spectral Reflectance Properties at the Needle, Branch, and Canopy Level for Selected Conifer Species. **Remote Sensing of Environment** n.35, p.79-93, 1991.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação partiu de uma demanda real existente no Parque Nacional da Lagoa do Peixe: a necessidade de erradicar a exótica invasora *Pinus* spp. Para maior e melhor compreensão deste problema, aplicou-se conhecimentos da área de Sensoriamento Remoto, aliando esforços da universidade em prol da qualificação do serviço público, uma vez que os resultados deste estudo terão aplicação direta no Plano de Erradicação da Exótica *Pinus* spp, em curso no Parque Nacional da Lagoa do Peixe.

O primeiro artigo produzido, de caráter aplicado, confirmou a capacidade invasora do *Pinus* na região, determinou a localização dos focos iniciais da invasão no campo de dunas da área norte, avaliou a velocidade da expansão da invasão, previu as direções desta expansão e indicou que o vento foi o único fator de disseminação de sementes na área de estudo. Sugere-se iniciar a supressão do *Pinus* a partir das áreas focos de sementes, onde estão as árvores mais antigas. Na impossibilidade de efetuar o corte das árvores pode ser utilizada a técnica do anelamento. A continuidade do estudo pode incluir monitoramento da invasão com uso de VANTs, em virtude de limitações existentes no sensoriamento remoto orbital, relacionadas com a resolução espacial e a mistura espectral.

O segundo artigo, de caráter metodológico, demonstrou haver forte correlação entre as assinaturas espectrais obtidas em laboratórios e obtidas através de dados orbitais. Confirmou-se também que mudanças na cobertura do solo implicam em alteração na forma das assinaturas espectrais.

Por fim, os conhecimentos de sensoriamento remoto e geoprocessamento adquiridos serão de fundamental importância para a continuidade dos trabalhos de erradicação do *Pinus*, bem como serão úteis em outros processos na gestão da unidade de conservação.

8. BIBLIOGRAFIA

ALBA E.; MARCHESAN J; MELLO, E. P.; TRAMONTINA, J.; SILVA, E. A.; PEREIRA, R. S. Uso de imagens de média resolução espacial para o monitoramento de dosséis de *Eucalyptus grandis*. **REVISTA SCIENTIA AGRARIA** v.18 n.4 p.01-08 Curitiba 2017

ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS. **Dados e fatos**. Disponível em: <<http://www.ageflor.com.br/dados>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

BECHARA, F. C.; REI, A.; TRENTIN, B. E. A invasão biológica *Pinus elliottii* VAR. *elliottii* no Parque Estadual do Rio Vermelho. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 44, n. 1, p. 63-72, 2014.

BERRA, E. F. **Avaliação e comparação de imagens LISS-III/ResourceSAT-1 e TM/LANDSAT 5 para estimar volume de madeira de um plantio de Pinus elliottii**. Dissertação 127 p. (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

BERRA, E. F.; Brandelero, Catize, Soares Pereira, Rudiney, Sebem, Elódio, de Godoy Goergen, Laura Camila, Paim Benedetti, Ana Caroline, Belmonte Lippert, Diogo, Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens de satélite Landsat. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 853-864, 2012.

BOYD, D.S. e DANSON, F. M. Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development **Progress in Physical Geography** v.29 p.1–26, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Espécies exóticas invasoras**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biodiversidade/biosseguranca/especies-exoticas-invasoras>> Acesso em: 20 jan. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Sítios Ramsar**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/instrumentos-de-gestao/sitios-ramsar>> Acesso em: 20 jan. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Estratégia Nacional sobre espécies exóticas invasoras, 2009**. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/biodiversidade/biosseguranca/especies-exoticas-invasoras/estrategia-nacional>> Acesso em: 20 jan. 2017.

CLARK, R. N. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy, In: RENCZ, A. N. (Ed.). **Manual of remote sensing - volume 3: remote sensing for the earth sciences**. New York: John Wiley and Sons, 1999. cap. 1, p. 3-58.

DUCATI, J.R. *et al.* Desenvolvimento de um sistema de zoneamento florestal aplicado ao manejo e planejamento florestal, através da utilização integrada de tecnologia de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica. **Relatório do projeto CEP SRM/UFRGS/Sindimadeira**, 1999. 56p.

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS. **Programas e projetos - Mata Atlântica**. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/programas/kfw.asp>> Acesso em: 20 jan. 2017. FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**, 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FREITAS, R. M.; HAERTEL, V.; SHIMABUKURO, Y. E. Modelo Linear de Mistura Espectral em imagem de moderada resolução espacial. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 14, no 1, p.55-71, 2008.

GIROUARD, G. *et al.* Validated spectral angle mapper algorithm for geological mapping: Comparative study between Quickbird and Landsat-TM. In: ISPRS CONGRESS: GEO-IMAGERY BRIDGING CONTINENTS, 35, 2004, Istambul. **Anais eletrônicos**. Istambul, 2004. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm4/papers/433.pdf>> Acesso em: 05 nov. 2017.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Plano de erradicação da espécie exótica *Pinus sp* no interior e entorno de 300m do Parque Nacional da Lagoa do Peixe**, 2014.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Processo administrativo 02237.000182/2013-01. **Venda de madeira em pé da espécie exótica *Pinus sp***, 2013.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. **Invasive species**. Disponível em: <<https://www.iucn.org/theme/species/our-work/invasive-species>> Acesso em: 20 jan. 2018.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**. 2. ed. São José do Campos: Parêntese Editora, 2009.

KNAK, R. B. (Org). **Plano de Manejo do Parque Nacional da Lagoa do Peixe- Fase 2**. Relatório técnico produzido pelo IBAMA/FNMA/FURG/NEMA/UFPel. Rio Grande: Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 1999. 465p.

KRUSE, F. A. *et al.* The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 145-163, 1993.

LATORRE, M. *et al.* Correção atmosférica: conceitos e fundamentos. **Espaço & Geografia**, v.5, n. 1, p.153-178, 2002.

LEDGARD, N. J.; LANGER, E. R. **Wilding prevention: Guidelines for minimising the risk of unwanted wilding spread from new plantings of introduced conifers**. Christchurch: New Zealand Forest Research/Ministry for the Environment, 1999.

MACK, R. N. *et al.* Biological Invasions: Causes, epidemiology, global consequences and control. **Ecological Applications**, v. 10, p 689-710, 2000.

MENESES, P. R.; SANO, E. E. Classificação pixel a pixel de imagens. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.(Orgs.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UnB, 2012. p.191 -208

OLIVEIRA, A. L. **Levantamento das empresas florestadoras e tecnologia de produção nas áreas do Parque Nacional da Lagoa do Peixe, entorno e amortecimento**. Relatório técnico produzido para o IBAMA dentro do contrato PNUD 2004/002548. Mostardas, 2006. 51p.

OLIVEIRA, L. G. L.; PONZONI F. G.; MORAES, E. C. Conversão de dados radiométricos orbitais por diferentes metodologias. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 1, p. 121-133, 2009.

ORUÉ N. E. **Estimativa de volume de povoamentos de *Pinus* spp. utilizando dados do satélite Landsat 7**. Dissertação 115 p. (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Paraná. 2002.

PALMER J. M.; GRANT, B. G. **The art of radiometry**. Bellingham: SPIE Press, 2010.

PETROPOULOS, G. P. *et al.* A Comparison of spectral angle mapper and artificial neural network classifiers combined with Landsat TM imagery analysis for obtaining burnt area mapping. **Sensors**, n. 10, p.1967-1985, 2010.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO I. E.; KUPLICH T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO Y. E. Relação entre índices de vegetação (NDVI E SAVI) e parâmetros biométricos de plantios de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus cantaldulensis* em Cachoeira do Manteiga (MG). **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.22, n.3, p.357-366, 1998

PORTZ, L. *et al.* Dispersão de espécie exótica no Parque Nacional da Lagoa do Peixe e seu entorno. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 1, p. 33-44, 2011.

PORTZ, L.; GUASSELLI, L. A.; CORRÊA, I. C. S. Variação Espacial e Temporal de NDVI na Lagoa do Peixe, RS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, p. 897-911, 2011.

PLANET. **Rapid Eye Imagery Product Specifications**. Version 6.1, Janeiro 2016

RANDALL, J. M. Protected areas. In: SIMBERLOFF, D.; REJMANEK, M. (Eds.). **Encyclopaedia of biological invasions**. California: University of California Press, 2011. p. 563-567.

RICHARDSON, D. M.; HIGGINS, S. I. Pines as invaders in the southern hemisphere. In: RICHARDSON, D. M. (Ed.). **Ecology and biogeography of Pinus**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p. 450 - 473.

RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 2, p. 95-107, 1996.

SEMA-RS, ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, Projeto RS Biodiversidade. Caderno de resultados II **Estratégias e políticas públicas para o controle das espécies exóticas invasoras**. 1º Edição, 2016.

SEMA-RS, ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **PORTARIA SEMA nº 79 de 31 de outubro de 2013**.

SOUSA, C. L.; PONZONI, F. J. Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/Landsat para a estimativa de volume de madeira em floresta implantada de Pinus spp. **Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Santos, Brasil, 11-18 setembro 1998, INPE, p. 1537-1547.

SOHN, Y.; REBELLO, N. S. Supervised and unsupervised spectral angle classifiers. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 68, n. 12, p. 1271-1280, 2002.

SONG, C. *et al.* Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? **Remote Sensing of Environment**, v. 75, p. 230–244, 2001.

TAGLIANI, P. R. A. **Estratégia de planificação ambiental para o sistema ecológico da Restinga da Lagoa dos Patos-Planície Costeira do Rio Grande do Sul**. (Tese de Doutorado). São Carlos: Universidade de São Carlos. 1995

TOMAZELLI, L. J. O regime dos ventos e a taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 20, n. 1, p. 18-26, 1993.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. 2016 a **Fact Sheet 2015–3081**: Version 1.1, August 2016. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/documents>>. Acesso em: 30 set. 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY 2016 b. **Landsat 8 (L8) data users handbook**: Version 2.0, March 29, 2016. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/documents>>. Acesso em: 20 out. 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY 2017 b. **Landsat 4-7 Climate Data Record (CDR) surface reflectance**: Version 7.3, Março 2017. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/documents>>. Acesso em: 30 ago. 2017.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY 2017 c. **Provisional LANDSAT 8 Surface Reflectance Code (LASRC) product**: Version 3.5, Março 2017 Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/documents>>. Acesso em: 30 ago. 2017.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY 2017 d. **Atmospheric transmittance information**. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/atmospheric-transmittance-information>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

VICENTE, L. E.; FILHO, C. R. S. Identification of mineral components in tropical soils using reflectance spectroscopy and advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. **Remote Sensing of Environment** V.115 P.1824–1836. 2011

VILLWOCK, J. A. & TOMAZELLI, L. J. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: gênese e paisagem atual. In: Ministério do Meio Ambiente (Org.). **Biodiversidade: Regiões da Lagoa do Casamento e dos Butiazais de Tapes, planície costeira do Rio Grande do Sul**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p.20-33.

WAGNER, A. P. L.; DUCATI, J. R. Estudo de florestas de Pinus no nordeste do Estado do Rio Grande do Sul com imagens do sensor ASTER. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 7, 2005, Goiânia. Anais INPE, 2005. p. 4361-4368.

YI, J. R. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; QUINTANILHA, J. A. Identificação e mapeamento de áreas de milho na região sul do Brasil utilizando imagens modis. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.3, p.753-763, 2007.

ZENNI, R.D.; DECHOUM, M. S.; ZILLER, S. R. Dez anos do informe brasileiro sobre espécies exóticas invasoras: avanços, lacunas e direções futuras. **Biotemas**, v.29 p 133-153, 2016.

ZILLER, S. R. Plantas exóticas invasoras: a ameaça da contaminação biológica. **Ciência Hoje**, v. 30, n 178, p 77-79, 2001.

ZILLER, S. R.; DECHOUM, M. S. Plantas e vertebrados exóticos invasores em unidades de conservação no Brasil. **Biodiversidade Brasileira**, v. 3, n. 2, p 4-31, 2013.

ZILLER, S. R.; GALVÃO, F. A degradação da estepe gramíneo-lenhosa no Paraná por contaminação biológica de *Pinus elliotii* e *P. taeda*. **Floresta**, v.32, n. 1, p 41-47, 2002.