

THAYSE CRISTIANE SEVERO DO PRADO

**ESPÉCIE EXÓTICA INVASORA CAPIM ANNONI  
(Eragrostis Plana) E SUA EXPANSÃO NO BIOMA  
PAMPA EXISTENTE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIO IBIRAPUITÃ –RS: Uma análise por meio do  
Sensoriamento Remoto**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutora em Geografia: Área de Concentração: Utilização e Conservação dos Recursos Naturais.  
Orientador: Prof Dr.  
Carlos Antônio Oliveira Vieira

Florianópolis  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Prado, Thayse Cristiane Severo  
Espécie exótica invasora Capim Annoni (*Eragrostis Plana*) e sua expansão no bioma Pampa existente na Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã - RS: Uma análise por meio do Sensoriamento Remoto / Thayse Cristiane Severo Prado ; orientador, Carlos Antonio Oliveira Vieira, 2018.  
225 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

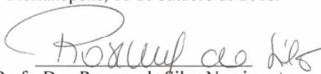
1. Geografia. 2. Capim Annoni. 3. Sensoriamento remoto. 4. Índices de vegetação. 5. Detecção de mudança. I. Vieira, Carlos Antonio Oliveira. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

**Thayse Cristiane Severo do Prado**

**Espécie exótica invasora Capim Annoni (*Eragrostis plana*) e sua expansão no bioma pampa existente na bacia hidrográfica do do rio Ibirapuitã - RS: uma análise por meio do Sensoriamento Remoto**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor em Geografia”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Geografia.

Florianópolis, 10 de outubro de 2018.



Profa. Dra. Rosemy da Silva Nascimento  
Coordenadora do PPGG/UFSC

**Banca Examinadora:**



Prof. Dr. Carlos Antonio Oliveira Vieira  
Universidade Federal de Santa Catarina



Profa. Dra. Rosemy da Silva Nascimento  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Everton da Silva  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. José Américo de Mello Filho  
Universidade Federal de Santa Maria



**“Eu trago versos do campo,  
Pra lembrar meu passado,  
Meu rude chão tão amado,  
Hoje não tem muita força,  
mas enquanto alguém me ouça  
hei de continuar minha sina,  
o jeito do campo me fascina,  
tem o cheiro que gosto tanto  
e o campo não morre enquanto,  
minha voz não se termina!”**

**Evandro Pereira**



## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, pela oportunidade que me foi dada de elaborar esta pesquisa.

Ao meu orientador professor Dr. Carlos Antônio Oliveira Vieira, pela confiança e dedicação em sua orientação e que, mesmo que a distância, esteve sempre à disposição para dirimir minhas dúvidas.

Ao Professor Dr Rudney Soares Pereira do Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Santa Maria - RS, por me auxiliar nas análises obtidas em campo.

Ao Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, pelo apoio durante esta trajetória.

À professora Dr<sup>a</sup> Lilian Hahn Mariano da Rocha, exemplo de profissional e pessoa, amiga dedicada e sempre presente, sem você não teria chegado onde estou. Como sempre, o meu muito obrigada!

Foi com um enorme esforço e contando sempre com o suporte de pessoas maravilhosas que hoje consigo apresentar esta tese nestas condições. Estas pessoas me ajudaram, sejam com suas palavras de incentivo ou com suas broncas para que eu não desistisse deste processo no meio do caminho, que me ajudaram a galgar este longo caminho que finalmente chega ao fim.

Mas não teria conseguido nada disso sem o apoio principalmente de minha família, que entendeu cada momento que não pude estar junto a eles, que entendeu o fato de ter perdido momentos em família e parte do crescimento de meus queridos sobrinhos, que estiveram comigo quando minha saúde me pregava uma peça e assustava a todos, que curaram minhas feridas emocionais e físicas e ainda me deram forças para continuar.

Minha mãe Fatima, que amo infinitamente, que me ajudou da maneira que pode, seja abastecendo meu congelador de comidinhas caseiras para que eu fizesse a manutenção da minha saúde, seja apenas me amando. Meu querido pai Miguel, que tanto amo e que me incentivou a focar e dar o melhor de mim, aos meus irmãos Thiago e Augusto, que em parte desta trajetória chegaram a ser meus maiores alicerces, me mostrando que apesar de tudo que acontecia em nossas vidas, no fim tudo daria certo. Aos meus sobrinhos (Matheus, Rafaela e João Miguel) e minhas cunhadas (Amanda e Fabiana) que pelo simples fato de estarem em minha vida, trouxeram luz nos momentos escuros e mostraram que a vida é muito mais do que as quatro paredes de minha

tese e do meu trabalho. Por fim, mas não menos importante, a Petit, meu anjo de quatro patas, minha companheira, minha filha, meu antidepressivo e ansiolítico, meu remédio para baixa imunidade e minha alegria das madrugadas, que me obrigou a pegar sol e chuva em seus longos passeios e que sem saber recarregou minhas baterias, deixou minha vida mais leve e se tornou meu escudo emocional por tantas vezes, mostrando que o cachorro pode ser muito mais que o melhor amigo do homem.

## RESUMO

O Capim Annoni é uma invasora que agride o ambiente, rompe o equilíbrio e torna-se dominante, modificando o Bioma Pampa e altera a paisagem característica dos campos naturais. Dados de sensoriamento remoto vêm sendo amplamente utilizados em análises de detecção de mudança (Change detection analysis) para mitigar os efeitos desta invasão que ocorre nas pastagens naturais e ainda elaborar medidas preventivas de sua disseminação. Nesse contexto, tem-se como hipótese que a invasora Capim Annoni está disseminando-se sob a área de Bioma Pampa, na bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã, e que, se não for controlada, continuará expandindo-se sob as pastagens naturais. Assim, esta tese visa verificar a magnitude da existência do Capim Annoni (*Eragrostis plana*) e a análise de mudança de coberturas vegetais (Change Detection) nas áreas de abrangência do Bioma Pampa, na bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã, utilizando técnicas do sensoriamento remoto. Para tanto, foi elaborada a caracterização espectral de amostras das espécies das gramíneas encontradas na Bacia utilizando o espectrorradiômetro FieldSpec@3. Com estes dados, elaborou-se o cômputo de índices de vegetação identificando as áreas de ocorrência desta exótica invasora por meio da definição de limiares obtidos com base nas áreas amostrais. Por fim, foi gerada a análise de mudanças de coberturas vegetais - perdas e ganhos - (Change Detection Analysis) e o cenário da ocorrência do Capim Annoni para os próximos 30 anos utilizando o modelo Land Change Modeler (LCM). Assim constatou-se que o Capim Annoni vem expandindo-se em sua forma mais agressiva sob a região norte da bacia, gerando extensos campos cobertos. Além disso, as áreas de campo em que quase não havia a ocorrência de Capim Annoni estão diminuindo, quando comparado com o ano de 2013. Atualmente, aproximadamente 27% da bacia ainda possui remanescentes de campos naturais e cerca de 73% está coberta com esta planta exótica. Ademais, de acordo com as projeções para 2047, a mesma aumentará para aproximadamente 77%.

Palavras chaves: Capim Annoni. Sensoriamento remoto. Índices de vegetação. Detecção de mudança. Land Change Modeler (LCM).



## ABSTRACT

The love grass is an invasive species that attack the environment, breaking the balance and becoming dominant, modifying the Pampa Biome and altering the landscape characterised by native fields. Remote sensing data have been widely used in change detection analysis to mitigate the effects of this invasion that occurs in the natural fields and to elaborate preventive means of their dissemination. In this context, it is hypothesised that the invasive lovegrass is spread under the area of the Pampa Biome subsisting in the Ibirapuitã River basin and that if not controlled will continue to grow under the natural pastures. Therefore, this thesis aims to verify the magnitude of the presence of the lovegrass (*Eragrostis plana*) and the vegetation cover changes in the areas of Pampa Biome in the Ibirapuitã River basin, using remote sensing techniques and change detection analysis. For this purpose, the spectral characterisation of the grass samples found in the Basin was performed using the FieldSpec®3 spectroradiometer. With these data, the estimate of vegetation records was elaborated identifying the occurrence areas of this exotic invader employing the definition of thresholds obtained based on the sample areas. Lastly, the change detection analysis of the vegetation cover (increase and decreases) and the scenario of the occurrence of the lovegrass for the next 30 years using the Land Change Modeler (LCM) model. Consequently, it was observed that the lovegrass has expanded in its most aggressive form under the northern part of the basin forming broad covered fields. Additionally, the field areas in which there was almost no occurrence of this plant are decreasing when compared to the year 2013. Currently, approximately 27% of the basin still has remnants of natural fields and about 73% is covered with this exotic plant. Furthermore, according to projections for 2047, this will increase to approximately 77%.

Keywords: Lovegrass. Remote sensing. Vegetation indices. Change detection. Land Change Modeler (LCM).



## RÉSUMÉ

L'Eragrostis d'Afrique du Sud est une espèce envahissante qui attaque l'environnement, brise l'équilibre et devient dominant, modifiant le biome de la pampa et modifiant le paysage caractérisé par des champs naturels. Les données de télédétection ont été largement utilisées dans les analyses de détection des changements pour atténuer les effets de cette invasion qui se produit dans les champs naturels et pour élaborer des moyens de prévention de leur dissémination. Dans ce contexte, on suppose que l'Eragrostis d'Afrique du Sud envahissante est répandue dans la zone du biome de Pampa qui subsiste dans le bassin de la rivière Ibirapuitã et qui, s'il n'est pas contrôlée, continuera à pousser sous les pâturages naturels. Par conséquent, cette thèse a pour but de vérifier l'ampleur de la présence de l'Eragrostis d'Afrique du Sud (*Eragrostis plana*) dans les zones de couverture du biome de Pampa dans le bassin du rivièrre Ibirapuitã, en utilisant des techniques de télédétection et des analyses de détection des changements de la couverture végétale (*Change Detection Analysis*). A cette fin, la caractérisation spectrale des échantillons de graminées trouvés dans le bassin a été réalisée à l'aide du spectroradiomètre *FieldSpec*®3. Avec ces données, l'estimation des enregistrements de végétation a été élaborée en identifiant les zones d'occurrence de cet envahisseur exotique en utilisant la définition des seuils obtenus en fonction des zones d'échantillonnage. Enfin, l'analyse de détection des changements de la couverture végétale - augmentation et diminution - (*Change Detection Analysis*) et le scénario d'apparition de l'Eragrostis d'Afrique du Sud au cours des 30 prochaines années à l'aide du modèle LCM (*Land Change Modeler*). En conséquence, il a été observé que l'Eragrostis d'Afrique du Sud s'est développée sous sa forme la plus agressive sous la partie nord du bassin formant de vastes champs couverts. En outre, les superficies dans lesquelles la présence de cette plante était quasi nulle diminuent par rapport à l'année 2013. Actuellement, environ 27% du bassin renferment encore des restes de champs naturels et environ 73% sont recouverts de cette plante exotique. De plus, selon les projections pour 2047, ce chiffre passera à environ 77%.

Mots-clés: L'Eragrostis d'Afrique du Sud. Télédétection. Indices de végétation. Détection de changement. Land Change Modeler (LCM).



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Capim Anonni registrado no Município de Alegrete – RS: Fotos retiradas em setembro de 2014. Neste período a planta começa a perder vigor, isto justifica a tonalidade marrom (aspecto de queimado) das folhas.....	8
<b>Figura 2</b> - Espectro de reflectância de uma folha verde e sadia. ....	19
<b>Figura 3</b> - Reflectância bicônica.....	25
<b>Figura 4</b> - Processo de Classificação: atribuir cada classe da imagem a uma classe espectral em função do vetor de <i>pixels</i> representativos de cada material da superfície.....	35
<b>Figura 5</b> - Classes de informação por conjuntos de classes espectrais.	36
<b>Figura 6</b> - Classes espectrais plotadas em um espaço bi-dimensional	38
<b>Figura 7</b> - Condição em que <i>pixels</i> serão pobremente classificados quando se situam nas extremidades da curva de distribuição de probabilidade.....	45
<b>Figura 8</b> - Redes Neurais Artificiais.....	48
<b>Figura 9</b> - Estrutura de funcionamento do LCM para mudança na previsão de cobertura do solo.....	52
<b>Figura 10</b> - Unidade de Planejamento e Gestão (UPG)- Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí -RS.....	58
<b>Figura 11</b> - Municípios inseridos na UPG Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí -RS.....	59
<b>Figura 12</b> - Mapa de Classes de Cobertura do Solo.....	61
<b>Figura 13</b> - Bioma Pampa + Classe campo de uso do solo. ....	63
<b>Figura 14</b> - Unidade de Conservação APA do Ibirapuitã na Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã-RS.....	64
<b>Figura 15</b> - Unidade de Planejamento e Gestão Ibirapuitã da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí.....	67
<b>Figura 16</b> - Unidade de Planejamento e Gestão Ibirapuitã Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã: situações de campo.....	81
<b>Figura 17</b> - Exicatas das espécies de Gramíneas.....	89
<b>Figura 18</b> - a) Uso e ocupação do solo; b) Uso e ocupação do solo com a área de Preservação Ambiental do Ibirapuitã e Parque Estadual do Espinilho.....	92
<b>Figura 19</b> - Classe Campo do Uso e Cobertura do Solo.....	94
<b>Figura 20</b> - Reclassificação do TVI com base nos limiares definidos	99
<b>Figura 21</b> - TVI reclassificado para junho de 2013 e junho de 2017	113
<b>Figura 22</b> - Comparação das classes de campo entre os anos de 2013 e 2017.....	117

<b>Figura 23</b> - Comparação da classe campo com distribuição homogênea e concentrada do Capim Annoni na para os anos de 2013 e 2017 na APA do Ibirapuitã .....	119
<b>Figura 24</b> - Mudança de classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni para demais classe.....	132
<b>Figura 25</b> - Mudança de classe de campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada para demais classes.....	134
<b>Figura 26</b> - Mudança de classe de campo com Capim Annoni pastejado/manejado para demais classes.....	136
<b>Figura 27</b> - Mudança de classe de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies para demais classes .....	138
<b>Figura 28</b> - Áreas de persistência e mudança da classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni .....	141
<b>Figura 29</b> - Áreas de persistência e mudança da classe de campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada .....	142
<b>Figura 30</b> - Áreas de persistência e mudança da classe de campo com Capim Annoni pastejado/manejado .....	143
<b>Figura 31</b> - Áreas de persistência e mudança da classe de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies .....	144
<b>Figura 32</b> - Projeção das classes temáticas de campo para o ano de 2047 com base no modelo de Cadeia de Markov, na bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã-RS.....	145

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico1</b> - Área das classes de Uso e cobertura do solo.....	62
<b>Gráfico 2</b> - Resposta espectral das gramíneas com comprimento de onda entre 350nm a 2500 nm.....	69
<b>Gráfico3</b> - Resposta espectral com comprimento de onda entre 350nm a 2500 nm, resultante da subtração dos valores de reflectância do Capim Annoni em relação às demais espécies de gramíneas.....	70
<b>Gráfico4</b> - Diagrama de Caixa: Teste de Tukey para o comprimento de onda entre 350nm a 2500 nm nas gramíneas.....	72
<b>Gráfico5</b> - Diagrama de Caixa: Teste de Tukey para os intervalos de comprimento de onda:.....	74
<b>Gráfico6</b> - Resposta espectral obtida com a média das curvas espectrais de cada espécie para os intervalos de comprimento de onda: .....	75
<b>Gráfico7</b> - Área total da bacia e percentual representativo das amostras de treinamento para cada classe de uso e cobertura .....	85
<b>Gráfico8</b> - Diferenças dos valores dos índices de vegetação das demais espécies encontradas em análises de campo em relação ao Capim Annoni.....	87
<b>Gráfico 9.</b> Área das classes obtidas pelo classificador MAXVER em percentual .....	91
<b>Gráfico10</b> - Área total da bacia e percentual representativo das amostras de treinamento para cada classe de uso e cobertura .....	96
<b>Gráfico11</b> - Climograma para a cidade de alegrete no período de 1960 a 1990.....	96
<b>Gráfico12</b> - Série temporal com os valores médios de TVI encontrados para cada situação em que o Capim Annoni aparece. ....	110
<b>Gráfico13</b> - Climograma para a cidade de Alegrete no período do mês de maio ao mês de agosto do ano de 2013 ao ano de 2017 .....	110
<b>Gráfico14</b> - Série temporal com os valores médios de TVI para os meses de maio a agosto de 2013 e 2017.....	111
<b>Gráfico15</b> - Ocorrência em percentual das classes de campo para os anos de 2013 e 2017 .....	114
<b>Gráfico16</b> - Perdas e Ganhos de área entre 2013 e 2017.....	130
<b>Gráfico17</b> - Mudança de classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni para demais classes (área%).....	131
<b>Gráfico18</b> - A mudança de classe de campo com capim Annoni distribuído de forma concentrada para demais classes (área%) .....	133
<b>Gráfico19</b> - A mudança de classe de campo com Capim Annoni pastejado/manejado para demais classes (área%) .....	135

<b>Gráfico 20</b> - A mudança de classe de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies para demais classes (área%).....	137
<b>Gráfico 21</b> - Aumento de área (%) das classes de campo de 2017 sob as classes de campo de 2013 .....	139
<b>Gráfico 22</b> - Probabilidade de mudança entre as classes temáticas de campo para o período de 2017 a 2012 (%) .....	140
<b>Gráfico 23</b> - Projeção das classes temáticas de campo para o ano de 2047 (Área-ha).....	146

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Espectrorradiômetros de campo em uso no estudo do comportamento espectral de alvos .....	20
<b>Tabela 2</b> - Espectrorradiômetros de campo em uso no estudo do comportamento espectral de alvos .....	23
<b>Tabela 3</b> - Variação hiperespectral de NDVI .....	29
<b>Tabela 4</b> - Variação hiperespectral de SR .....	32
<b>Tabela 5</b> - Conceito de desempenho do Índice Kappa .....	54
<b>Tabela 6</b> - Análise da Variância (ANOVA) para o comprimento de onda entre 350nm a 2500 nm nas diferentes espécies de gramíneas.....	71
<b>Tabela 8</b> - Índices de vegetação analisados .....	82
<b>Tabela 9</b> - Informações das bandas espectrais do sensor OLI (Landsat 8), utilizadas para gerar a classificação .....	84
<b>Tabela 10</b> - Data das imagens Landsat 8 utilizadas nesta análise.....	86
Tabela 11 - Área das classes obtidas pelo classificador MAXVER..	91
<b>Tabela 12</b> - Matriz de confusão. ....	93
<b>Tabela 13</b> - Limiares definidos para as classes de campo .....	97
<b>Tabela 14</b> - Informações das bandas espectrais do sensor OLI (Landsat 8), utilizadas para calcular o TVI .....	109
<b>Tabela 15</b> - Limiares definidos para as classes de campo para os valores de TVI de junho de 2013 e junho de 2017 .....	112
<b>Tabela 16</b> - Matriz de confusão obtida para a reclassificação do TVI gerado para o ano de 2013.....	128
<b>Tabela 17</b> - Matriz de confusão obtida para a reclassificação do TVI gerado para o ano de 2013.....	129



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REVISÃO TEÓRICA .....	7
2.1	Capim Annoni ( <i>Eragrostis plana</i> ): Origem, morfologia, características e disseminação no Estado do Rio Grande do Sul.....	7
2.2	Sensoriamento remoto: Abordagem conceitual e histórica	13
2.3	Sensoriamento remoto da vegetação .....	16
2.4	Índices de Vegetação.....	27
2.4.1	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....	28
2.4.2	Difference Vegetation Index (DVI) .....	29
2.4.3	Soil-Adjusted Vegetation Index Optimized (OSAVI)	29
2.4.4	Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index (TCARI) 30	
2.4.5	Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (MCARI) 30	
2.4.6	Índice de Vegetação Triangular (TVI).....	31
2.4.7	Simple Ratio (SR -).....	31
2.4.8	Plant Senescence Reflectance Index (SPRI) .....	32
2.4.9	Modified Red Edge Simple Ratio (mSR705).....	33
2.4.10	Modified Normalized Difference 705(mND705) .....	33
2.5	Classificação de Imagens.....	33
2.5.1	Classificação Não-Supervisionada.....	37
2.5.2	Classificação Supervisionada.....	40
2.5.2.1	Classificador estatístico – Máxima Verossimilhança (Maxver – Maximum Likelihood)	
2.5.2.2	Redes Neurais Artificiais	
2.6	Detecção de Mudança de Paisagem.....	50
2.7	Avaliação da Acurácia da Classificação de Coberturas da Terra	54
3.	ÁREA DE ESTUDO: Bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã-RS ...	57
4.	Estudos da Resposta Espectral com vistas a Discriminação da Espécie Exótica Invasora Capim Annoni ( <i>Eragrostis plana</i> ) .....	65

4.1	Metodologia de Trabalho .....	66
4.2	Resultados e Discussão .....	68
4.3	Conclusões .....	76
4.4	Referências.....	76
5.	Estudos dos Índices de vegetação para discriminar a Espécie Exótica Invasora Capim Annoni ( <i>Eragrostis plana</i> ).....	79
5.1	Metodologia de Trabalho .....	80
5.2	Resultados e Discussões.....	87
5.3	Considerações Finais.....	100
5.4	Referências.....	101
6.	Análise multitemporal de imagens TVI para avaliação da ocorrência de Espécie Exótica Invasora Capim Annoni ( <i>Eragrostis plana</i> ) na Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã, Rio Grande do Sul. ....	105
6.1	Metodologia de Trabalho .....	106
6.1.1	Método.....	108
6.1.2	Resultados.....	109
6.1.3	Considerações Finais .....	119
6.2	Referências.....	121
7.	Análise de detecção de mudança ( <i>Change detection analysis</i> ) das áreas de campo com ocorrência da Espécie Exótica Invasora Capim Annoni ( <i>Eragrostis plana</i> ) por meio do índice de Vegetação Triangular (TVI) 125	
7.1	Metodologia de Trabalho .....	126
7.1.1	Método.....	127
7.2	Resultados .....	127
7.3	Considerações .....	146
7.4	Referências.....	149
8.	Considerações Finais.....	151
9.	REFERÊNCIAS.....	153
10.	ANEXO I .....	171
11.	ANEXO B - RELATÓRIO DE CAMPO.....	187

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo dados do IBGE, por ano, o Rio Grande do Sul perde aproximadamente 130 mil hectares de pastagens naturais para, principalmente, pastagens cultivadas e lavouras. (MEDEIROS; FERREIRA, 2011). Nas últimas décadas, o Estado perdeu metade da sua superfície originalmente coberta pelos campos naturais (MEDEIROS *et al.*, 2009; MEDEIROS; FOCTH, 2007). Parte desta perda pode ser atribuída a espécies exóticas introduzidas no Estado, que ao se caracterizarem como espécies invasoras e se disseminarem sem controle, ocasionam perdas ambientais e econômicas. (DUSSEUX *et al.*, 2014).

Conforme definição adotada pela Convenção Internacional sobre Diversidade Biológica (1992) na 6ª Conferência das Partes (CDB COP-6, Decisão VI/23, 2002), entende-se por espécie exótica invasora, aquela espécie introduzida, por ações humanas (voluntárias ou involuntárias), em um local diferente de sua área natural. Uma vez introduzida, esta espécie se adapta e se reproduz, gerando descendentes férteis, que se estabelecem neste novo habitat e invadem os ambientes das espécies nativas, alterando os processos ecológicos naturais, tendendo a se tornar dominante, com reflexos negativos tanto para a economia quanto para a saúde humana. (CDB, 2010).

O processo de disseminação de espécies exóticas ocorreu concomitantemente ao desenvolvimento da navegação, pois, ao se deslocarem em busca de novas terras, ou mesmo a caminho de terras já conhecidas, os navegadores levavam consigo inúmeros organismos, muitos dos quais com um significativo potencial para uma invasão biológica. O progresso econômico dos países também aumentou a necessidade de meios de interligações que facilitem tanto o transporte dos homens quanto de mercadorias, surgindo inúmeras ferrovias, estradas, hidrovias e tecnologias aeroviárias. Neste contexto, facilitando o transporte desenfreado de espécies provenientes de outros ecossistemas, aumentando a introdução acidental de espécies exóticas através da água de lastro de navios, em meio a cargas, solas de sapatos, roda dos veículos e até pelas fezes de animais.

A invasão de espécies exóticas nos ecossistemas naturais ocasiona perda de biodiversidade e altera os ciclos ecológicos, inibindo a recuperação destes ecossistemas. Assim, as espécies nativas são ameaçadas pela concorrência e predação de invasoras, tornando-as vulneráveis e propensas à extinção em decorrência da hibridação com

espécies exóticas e das mudanças causadas no ecossistema natural por estas espécies. (PIMENTEL *et al.*, 2001).

No mundo inteiro, as espécies exóticas representam forte ameaça à biodiversidade, pois inúmeras são as espécies que estão se disseminando sem controle e dominando diferentes ecossistemas, interferindo no equilíbrio destas áreas e modificando inclusive as características naturais da paisagem.

Em março de 1976, o Ministério da Agricultura publicou a portaria Nº 205 que proíbia a comercialização, transporte, importação e exportação de sementes e mudas do vulgo *Capim Annoni*, reconhecendo a agressividade desta vegetação invasora no que se refere à sua rápida disseminação e sua capacidade em se tornar uma espécie dominante. (BRASIL, 1976).

Em 12 de fevereiro de 1998, o governo brasileiro instituiu a Lei Federal de Crimes Ambientais nº 9.605 que, em seu Artigo 61, prevê punição para quem disseminar doença, praga ou espécies que possam causar dano à agricultura, à pecuária, à fauna, à flora ou aos ecossistemas. (BRASIL, 1998).

Assim, visando mitigar os efeitos da inserção e dispersão de espécies exóticas no território brasileiro, bem como atender o disposto no Artigo 8º da Convenção Internacional, sobre Diversidade Biológica, que determina aos países signatários a adoção de medidas preventivas, de erradicação e de controle de espécies exóticas invasoras que ameacem os ecossistemas, habitats ou espécies, são também instituídas a Lei Federal nº 11.428 de 22 de dezembro de 2006 (Artigo 3º inciso VIII, alínea “a”) e Resolução CONAMA nº 369 de 28 de março de 2006 (Artigo 2º, inciso II, alínea “a”) que consideram de interesse social as atividades imprescindíveis à proteção da integridade da vegetação nativa, entre elas a erradicação de espécies exóticas invasoras.

A Resolução CONABIO nº 05, de 21 de outubro de 2009, que instituiu a Estratégia Nacional sobre Espécies Exóticas Invasoras e a Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (Artigo 3º, inciso IX, alínea “a”), destaca como sendo de interesse social as atividades imprescindíveis à proteção da integridade da vegetação nativa, a exemplo cita-se a erradicação de invasoras. (BRASIL, 2006a; BRASIL, 2006b; BRASIL, 2009; BRASIL, 2012; CDB, 2010).

Em 23 de junho de 2009, no Estado do Rio Grande do Sul entra em vigor a Lei Nº 13.187 que instituiu o Programa de Combate do *Capim Annoni* e em outubro de 2013, é publicada a portaria 79 da Secretaria Estadual do Meio Ambiente, que destaca uma lista oficial de espécies exóticas invasoras existentes no Estado e estabelece ainda

normas de controle entre outras providências. Nesta portaria a espécie *Eragrostis plana*, mais conhecida como Capim-annoni, é enquadrada em classe 1, que significa que esta espécie não pode ser produzida, doada ou comercializada. Ainda esclarece que fica proibido o uso desta espécie em projetos e planos de recuperação, reflorestamento e restauração de áreas degradadas e de recomposição de Áreas de Preservação Permanente e Reservas Legais, assim como seu uso paisagístico ou para estabilização de taludes ao longo de rodovias e estradas de qualquer tipo. (RIO GRANDE DO SUL, 2009; RIO GRANDE DO SUL, 2013).

No ano de 2013, por intermédio do Ministério do Meio Ambiente e do Instituto Jardim Botânico do Rio de Janeiro, é publicada a obra intitulada “Livro Vermelho da Flora do Brasil”, que elenca todas as espécies da flora ameaçadas de extinção. Esta obra menciona a espécie exótica invasora *Eragrostis plana* (Capim-Annoni), ressaltando seu alto grau competitivo e sua dominância sobre as espécies existentes nos campos naturais. (MARTINELLI; MORAES, 2013).

Identifica-se no Estado do Rio Grande do Sul a existência do Bioma<sup>1</sup> Mata Atlântica e do Bioma Pampa que garantem a conservação de recursos hídricos, a disponibilidade de polinizadores, e o provimento de recursos genéticos. Cerca de 60% do território do Estado do Rio Grande do Sul está coberto pelo Bioma Pampa, que possui uma biodiversidade significativa. Sua vegetação é composta predominantemente por gramíneas e outras herbáceas, caracterizando-se como pastagens naturais, possuindo propriedades ótimas para a pecuária, além de oferecer beleza cênica com potencial turístico importante. Entretanto, seu potencial forrageiro não tem sido devidamente valorizado e a pecuária tem sido substituída por outras atividades aparentemente mais rentáveis no curto prazo.

Nas últimas décadas, tem-se constatado a intensificação do processo de degradação destes Biomas por diversos fatores, dentre eles a invasão da gramínea Capim Annoni (*Eragrostis plana*). O Capim Annoni é uma invasora que agride o ambiente, rompe o equilíbrio e torna-se dominante. No Estado do Rio Grande do Sul, esta gramínea não possui um nicho ecológico definido e vegeta em todas as regiões e tipos

---

<sup>1</sup> De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, bioma pode ser definido como um conjunto de vida (vegetal e animal) constituído pelo agrupamento de tipos de vegetação contíguos e identificáveis em escala regional, com condições geoclimáticas similares e história compartilhada de mudanças, o que resulta em uma diversidade biológica própria.

de solos existentes. O Estado possui condições climáticas e de solo bastante favoráveis ao desenvolvimento desta espécie invasora, a qual não possui ainda inibidores naturais. Estudos realizados no ano 1978 apontaram que cerca de 20 mil hectares do Estado já continham esta gramínea (REIS; OLIVEIRA, 1978), no ano de 2007 este valor foi estimado em 1,5 milhões de hectares, e que, no ano de 2008, esta área poderia aumentar para 2,2 milhões de hectares. (MEDEIROS; FOCHT, 2007).

Com isto, torna-se evidente a rápida e descontrolada disseminação do Capim Annoni no Estado do Rio Grande do Sul desde a sua introdução. Esta exótica invasora tem modificado o bioma pampa e alterado a paisagem característica dos campos naturais. A detecção e mapeamento desta mudança é um dos requisitos fundamentais para mitigar os efeitos desta invasão que ocorre nas pastagens naturais e ainda elaborar medidas preventivas de sua disseminação. É nesse contexto, que a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto a estudos de vegetação tornam-se imprescindíveis, já que a partir destas aplicações é possível identificar em extensas áreas os ambientes e suas mudanças, de maneira rápida e eficiente, quando comparada com outros métodos, possibilitando ainda detectar mudanças na paisagem. Assim, dados de sensoriamento remoto vem sendo amplamente utilizados em análises de detecção de mudança (*change detection analysis*) da superfície da terra.

O escopo desta pesquisa utiliza como área de estudo a bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã, tendo em vista que o bioma Pampa abrange cerca de 90% da área desta bacia e os municípios nela inseridos foram os primeiros a relatar ocorrência da espécie exótica *Eragrostis Plana*. Inúmeros estudos destacam ainda hoje a problemática existência desta exótica nos municípios que pertencem a esta da bacia. (BARBOSA, 2011; MEDEIROS; FOCHT, 2007; NACHTIGAL *et al.*, 2009).

Nesse contexto, tem-se como hipótese que a invasora Capim Annoni, desde sua chegada acidental, tem avançado sob a área de Bioma Pampa existente na bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã, onde tem encontrado condições favoráveis ao seu estabelecimento e disseminação, e, se não controlada, continuará expandindo-se sob as pastagens naturais, colocando em risco a preservação das mesmas.

Assim, o objetivo principal desta tese é verificar a magnitude da existência problemática do Capim Annoni (*Eragrostis plana*) nas áreas de abrangência do Bioma Pampa na bacia hidrográfica do Rio

Ibirapuitã, utilizando técnicas do sensoriamento remoto e análise de mudança de coberturas vegetais (*Change Detection*).

Entender a interação entre a radiação eletromagnética e os diferentes alvos dos quais se pretende extrair alguma informação é fundamental para as aplicações de técnicas de sensoriamento remoto, principalmente quando o objeto do estudo é a quantificação e ainda extração de informações biofísicas da vegetação. Nesse contexto, para atender ao objetivo geral desta tese, os seguintes objetivos específicos foram adotados:

- a) analisar espectralmente amostras de espécies vegetais forrageiras nativas e exóticas, e da espécie exótica invasora *Eragrostis plana*, com o intuito de diferenciá-las;
- b) definir as áreas de ocorrência da espécie exótica invasora *Eragrostis plana* na bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã, com o auxílio de técnicas de sensoriamento remoto;
- c) apresentar tendências de distribuição, cenários futuros e projeções de mudanças da disseminação da espécie *Eragrostis plana* na bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã, a partir de técnicas de análise de mudanças de coberturas vegetais (*Change detection analysis*).

Esta tese está dividida em nove capítulos onde, neste capítulo introdutório, apresenta-se a caracterização do problema de pesquisa e as motivações para a elaboração deste estudo, ressaltando algumas considerações sobre a temática escolhida bem como apresentando as hipóteses e os objetivos norteadores da pesquisa.

No segundo Capítulo, apresenta-se uma Revisão Bibliográfica com um panorama da temática escolhida, bem como conceitos importantes para o desenvolvimento desta tese.

No terceiro Capítulo, apresenta-se a área de estudo, onde aborda-se as principais questões ambientais que possuem significância no cumprimento do objeto desta tese.

O quarto Capítulo é dedicado a analisar o comportamento espectral da espécie exótica invasora Capim Annoni (*Eragrostis plana*), onde são identificadas faixas do espectro eletromagnético mais significativas para discriminar o Capim Annoni (*Eragrostis plana*) das demais espécies de gramíneas identificadas na área de estudo.

No quinto Capítulo diferencia-se o Capim Annoni de outras espécies encontradas na área de estudo, através de índices de vegetação de base espectral, identificando possíveis padrões no comportamento do

Capim Annoni para o índice de vegetação que apresentou a melhor diferença.

No sexto Capítulo avalia-se a dinâmica da ocorrência do Capim Annoni na Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã através da análise de imagens, através do Índice de Vegetação Triangular (TVI), entre os anos de 2013 e 2017.

No sétimo Capítulo apresentam-se as projeções de mudanças da disseminação desta espécie, sua tendência de distribuição e por fim um cenário para 30 anos de sua expansão sob a área da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã, utilizando um método de detecção de mudanças através do Índice de Vegetação Triangular (TVI).

E, por fim, apresentam-se as principais conclusões obtidas através dos experimentos realizados e abordam-se as limitações desta pesquisa, como também as sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO TEÓRICA

### 2.1 CAPIM ANNONI (*ERAGROSTIS PLANA*): ORIGEM, MORFOLOGIA, CARACTERÍSTICAS E DISSEMINAÇÃO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

O Capim Annoni é uma gramínea perene de estação quente, natural da África do Sul, encontrada em áreas pisoteadas pelo gado e de solo pobre. É considerada uma praga, já que infesta as áreas de pastagens cultivadas.

É uma planta de hábito cespitoso, que forma touceiras fortemente enraizadas, possui cerca de 30 cm de altura podendo chegar a 110 cm quando florescida. Quanto à tenacidade das raízes, Reis (1993), afirma que as touceiras desta planta eram utilizadas na África para amarrar as juntas de bois em áreas com vegetação herbácea devido à sua forte fixação ao solo. (REIS, 1993; REIS; OLIVEIRA, 1978). A Figura 1 apresenta fotos da touceira do Capim Annoni e sua disseminação em uma área de bioma pampa no município de Alegrete-RS.

**Figura 1** - Capim Anonni registrado no Município de Alegrete – RS: Fotos retiradas em setembro de 2014. Neste período a planta começa a perder vigor, isto justifica a tonalidade marrom (aspecto de queimado) das folhas.



Fonte: Departamento de Unidades de Conservação RS (2014).

A *E. plana* desenvolve-se, preferencialmente, em solos secos, compactados, ácidos, moderadamente drenados podendo ainda vegetar em solos mal drenados. Possui alta capacidade de persistência, mesmo em áreas submetidas ao corte e ao pisoteio de gado podendo, nestas áreas, renovar o florescimento a cada 17 a 22 dias. Outra característica que comprova a agressividade desta planta é que, mesmo após a área ser capinada e a planta arrancada, os resíduos da base do colmo e da estrutura radicular permitem que ocorra a rebrota. Estudos comprovam que sementes que se encontram a 20 cm de profundidade da superfície podem manter suas capacidades de germinação por um período de até

20 anos. (FERREIRA *et al.*, 2006; MEDEIROS *et al.*, 2004; REIS, 1993). E mesmo após o término do período de pastejo das espécies cultivadas, as sementes do *Capim Annoni* germinam e se disseminam com mais facilidade, dificultando a germinação de espécies hoje utilizadas como forrageiras no Estado do Rio Grande do Sul. (REIS, 1993).

O processo de florescimento do Capim Annoni inicia-se no final da primavera e estende-se até o início da primeira geada, fazendo com que as sementes entrem em estado de dormência e as folhas inteRNA da planta fiquem verdes apesar de as exteRNA sofrerem com o crestamento. No final de dezembro inicia-se o período de produção de sementes que se estende até o final do mês de março, produzindo em torno de 500 mil sementes (quando não houver competidores), que podem enterrar-se a diferentes profundidades no solo, adiando a germinação e formando assim um banco de sementes no solo. O Capim Annoni produz sementes durante todo o período do verão, mas apenas no inverno, devido ao choque térmico, ocorre a quebra da dormência das sementes que ficam em condições de germinar na primavera. (BARBOSA, 2011; FERREIRA, 2007; OLIVEIRA, 1993; REIS, 1993).

Segundo Reis e Oliveira (1978), a maneira que a gramínea africana *Eragrostis plana* foi introduzida ainda é duvidosa. No entanto, registros revelam ocorrências de sua introdução acidental no Rio Grande do Sul na década de 1950, como impureza em lotes de *Cloris gayana Kunth* (capim rhodes) e *Eragrostis curvula* (capim chorão), também provenientes da África, que eram utilizadas como forrageiras.

Estudos iniciais mostraram que, quando comparada com campos nativos, esta gramínea mostrou ter um bom desempenho como forrageira, no entanto, estes estudos foram desenvolvidos tendo como base de comparação a vegetação campestre de baixo valor nutritivo existente em solos arenosos de baixa fertilidade natural presentes no município de Tupanciretã. (LEAL *et al.*, 1973; NASCIMENTO, 1976; NASCIMENTO; HALL, 1978; SILVA *et al.*, 1973).

Em 1951, o proprietário rural Ernesto José Annoni, notou a presença da *E. plana* em uma de suas propriedades em Sarandi no Rio Grande do Sul. A partir disto, o GRUPO RURAL ANNONI começou a comercializar as sementes desta espécie, não somente no Rio Grande do Sul, mas também nos Estados do Paraná e Santa Catarina, difundindo-a como sendo uma espécie forrageira capaz de aumentar a produção pecuária, com alta resistência a solos pobres e adversidades climáticas. Em decorrência desta forte comercialização e divulgação da espécie *Eragrostis plana* pelo Grupo Rural Annoni, a mesma ficou conhecida

pelo nome popular de Capim Annoni. (REIS, 1993). No entanto, estudos posteriores revelaram que o Capim Annoni é uma planta que possui baixos teor de proteína e valor nutritivo e alto teor de fibras que, por causar desgastes na dentição dos animais e escoriações em sua língua, diminui o tempo de vida dos mesmos. A baixa palatabilidade desta planta, faz com que os animais a rejeitem como fonte de alimento, não servindo assim como uma forrageira alternativa. (FERREIRA, 2007; GUTERRES, 1993; REIS, 1993).

Devido à substancial produção de sementes por um longo período e o pequeno tamanho das mesmas, a capacidade de dispersão do Annoni é elevada. De fácil disseminação, a invasão por esta exótica é considerada no Estado do RS um fenômeno de larga escala, com altos riscos às pastagens naturais existentes no bioma Pampa. A dispersão do Capim Annoni sob as pastagens naturais não é apenas em decorrência da sua alta capacidade de disseminação, mas também devido ao fato de as áreas de pastagens nativas no Rio Grande do Sul possuírem espaços vazios originados pelo pastejo intensivo ou seletivo, uso do fogo e de práticas de cultivo em áreas de campo e ainda à baixa utilização de, por exemplo, nutrientes, água e luz nestes espaços vazios, criando condições favoráveis para que haja a germinação das sementes existentes no banco de sementes. (MEDEIROS *et al.*, 2011). Este recrutamento do banco de sementes favorece tanto a regeneração de espécies endêmicas, como o recrutamento de plântulas de espécies exóticas. Acredita-se que esta é uma das principais causas de invasão do Capim Annoni nas áreas de pastagens nativas do Rio Grande do Sul.

Devido à facilidade de dispersão desta espécie, a *E. plana* tende a se concentrar no entorno das rodovias e ferrovias, estradas, caminhos, poteiros, locais de concentração de animais, locais de feiras de gado, locais de habitação, sopés de taludes, entre outros. Os principais agentes dispersores são os animais, através das fezes, pelos e cascos; os veículos e máquinas agrícolas, ventos, rios, enchentes e irrigação; a disseminação por meio das fezes ocorre em decorrência da florescência da planta adulta ser a parte mais palatável para os animais. (MEDEIROS; FOCHT, 2007).

A ocorrência da *E. plana* também foi constatada nos Estados da Bahia, Minas Gerais, Santa Catarina, e Paraná, no entanto, também foi relatada sua presença, em quantidade menor, em São Paulo, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Tocantins, Pará e Distrito Federal, e em países como Uruguai e Argentina.

Em 1970, apesar de ainda estar sendo amplamente comercializado, pesquisas apontavam que o Capim Annoni apresentava

propriedades inferiores às propriedades existentes nas pastagens naturais, possuindo ainda característica de planta daninha e de uma invasora agressiva com aspecto dominante, de difícil manejo e erradicação, com fácil e rápido estabelecimento através das sementes além de alta capacidade de colonização. Tais fatos representavam prejuízos às propriedades caracterizadas pela produção pecuária, tendo em vista a dificuldade em preparar o solo para os cultivos, principalmente de outras espécies gramíneas utilizadas como forrageiras. (REIS 1993; REIS; COELHO, 2000).

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) tornou-se pioneira nesses estudos, produzindo, a partir da década de 1970, inúmeras publicações e eventos. A exemplo cita-se a Circular Técnica Número 2, publicada em 1978, intitulada “Considerações sobre o Capim Annoni 2”, e a Reunião Regional de Avaliação de Pesquisa com o Capim Annoni 2, em 1993, que objetivou a discussão acerca das propriedades morfológicas, principais ocorrências, disseminação e métodos de controle do Capim Annoni. (REIS, 1993; REIS; OLIVEIRA, 1978). Esses estudos foram de suma importância, pois à medida que surgiam os debates, surgia também a necessidade de mais estudos sobre esta temática despertando assim, o interesse também da comunidade acadêmica científica.

Ainda na década de 1970, iniciam-se estudos visando à identificação da composição química, comparando-a com a pastagem natural e outras gramíneas utilizadas como forrageiras. Estudos que avaliam a influência desta gramínea na alimentação dos animais também começaram a ser feitos, identificando assim, inúmeras deficiências desta gramínea quando comparadas com outras. Também fica evidente o início de uma preocupação na maneira agressiva com que esta gramínea se dissemina e as formas para erradicá-la. (NASCIMENTO; HALL, 1978; REIS; OLIVEIRA, 1978).

Com o decorrer dos anos, iniciam-se diversas análises sobre os efeitos negativos que esta invasora possui no ganho de peso dos animais, bem como os problemas de saúde que ocasionavam uma diminuição da vida dos mesmos. Comprovado isto, no início da década de 1980, aumentam os estudos que visam à aplicação de inúmeras técnicas de controle e erradicação desta gramínea. A partir de tais estudos, foi possível constatar a dificuldade em controlar a disseminação desta espécie, bem como de erradicá-la, sendo possível apenas mitigar sua disseminação e controlar por um período o seu reaparecimento. (COELHO, 1985; MEDEIROS *et al.*, 2012).

Na década de 1990, intensificam os estudos em estações experimentais, como a de Tupanciretã localizada no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, que visam a análise de novos métodos de erradicação da *Eragrostis plana*. Ampliando estudos sobre os aspectos morfológicos da planta, e a preocupação em identificar em que estágio de disseminação encontrava-se esta espécie no Estado do Rio Grande do Sul. (BARBOSA, 1997; COELHO, 1993; GONZAGA; COELHO, 1993; GONZAGA; GONÇALVES, 1999; GUTERRES, 1993; OLIVEIRA, 1993; REIS, 1993).

Nos anos que se seguiram, a invasão do Capim Annoni tornou-se uma temática amplamente discutida. Percebe-se, através de estudos feitos a partir do ano 2000, a forte concentração do Capim Annoni no entorno de rodovias e nos campos sulinos, ocupando as áreas de pastagem natural, tornando visíveis os prejuízos que a mesma ocasiona no processo de preservação do Bioma Pampa. Tais constatações fizeram com que especial atenção fosse dada não apenas a estudos que visassem o controle e erradicação desta planta, mas também do banco de sementes gerado pela mesma. (ABICHEQUER *et al.*, 2009; BOECHAT; LONGHI-WAGNER, 2000; BILENCA; MIÑARRO, 2004; BOLDRINI, 2006; FERREIRA, 2007; FOCHT, 2007; GARCIA, 2007; GOMES *et al.*, 2006; GOULART *et al.*, 2009; MEDEIROS; FOCHT, 2007; MORAES *et al.*, 2008; REIS *et al.*, 2008).

Em 2010, a necessidade de espacializar a ocorrência desta espécie e quantificá-la, torna-se evidente ao poder público, tendo em vista o seu constatado avanço sobre as áreas de domínio do Bioma Pampa e prejuízos causados a diversos setores da agro-economia, em especial ao setor da pecuária. Nesse contexto, surgem estudos que realizam a identificação e quantificação desta espécie em pequenas parcelas de terra e outros que apresentam focos pontuais da presença do Capim Annoni no Estado, que posteriormente foram utilizados para a aplicação de modelos de predição, levando em consideração inúmeros parâmetros considerados propícios ao desenvolvimento desta espécie, quando analisado o seu nicho de origem. Os resultados da aplicação destes modelos, que foram calibrados para analisar a predição especificamente desta espécie na América Latina, no Brasil e Rio Grande do Sul, bem como de estudos que a submetem ao stress hídrico constataram que esta espécie não possui um nicho ecológico definido, podendo vegetar em inúmeras condições de solo, temperatura e regime hídrico. Nesse contexto, Barbosa (2011) ressalva que algumas espécies podem alterar seu nicho ambiental durante o processo de invasão e afirma que a *E. plana* alterou seu nicho climático durante o processo de

invasão na América do Sul, provando assim sua capacidade de adaptação às flutuações climáticas. (BARBOSA, 2011; BAGGIO, 2012; FERREIRA; FILIPPI, 2010; GONÇALVES; 2014; GOULART *et al.*, 2012; MEDEIROS; FERREIRA, 2011; NEVES *et al.*, 2015).

O fato desta invasora exótica não apresentar um nicho ecológico bem definido e vegetar em todas as regiões e tipos de solos existentes no Rio Grande do Sul, pode ser considerado, conforme Reis (1993), um grave desastre ecológico. Principalmente no Rio Grande do Sul esta espécie torna-se dominante devido às condições climáticas e de solo superiores aos de seu habitat original, eliminando a flora natural e como consequência causando prejuízos à fauna natural e provavelmente à microfauna ambiental.

Apesar de todos os estudos, a distribuição do Capim Annoni em extensas e contínuas unidades de mapeamento, sua quantificação e o avanço espacial que a mesma vem tendo sob o território gaúcho, ainda são desconhecidos. Normalmente, para a identificação de espécies de vegetação em extensas unidades de mapeamento, estimativas indiretas são comumente empregadas por meio de técnicas de sensoriamento remoto. No entanto, a identificação de uma espécie, requer não apenas as estimativas indiretas, mas também dados de campo da espécie observada que possibilite caracterizá-la espectralmente. É nesse contexto que a dificuldade em identificar a espécie *Eragrostis plana* está inserida, tendo em vista as inúmeras espécies de gramíneas existentes, principalmente de espécies exóticas hoje utilizadas como forrageiras e a substancial semelhança entre elas.

## 2.2 SENSORIAMENTO REMOTO: ABORDAGEM CONCEITUAL E HISTÓRICA

O termo sensoriamento remoto foi inicialmente empregado em 1960 pela pesquisadora Evelyn L. Pruit e seus colaboradores, e de acordo com Novo (p.30, 2010) “significava simplesmente a aquisição de informação sem contato físico com o objeto”. Desde então esta tem sido uma tecnologia de coleta automática de dados amplamente utilizada e mais bem sucedida para o levantamento e monitoramento dos recursos terrestres em grandes escalas. (FLORENZANO, 2011). No entanto, juntamente com a evolução do sensoriamento remoto, o seu conceito tornou-se mais amplo. Assim, Florenzano (2011, p. 9) define sensoriamento remoto como sendo:

[...] a tecnologia que permite obter imagens – e outros tipos de dados – da superfície terrestre, por

meio da captação e registro da energia refletida ou emitida pela superfície. O termo *sensoriamento* refere-se à obtenção de dados por meio de sensores instalados em plataformas terrestres, aéreas (balões e aeronaves) e orbitais (satélites artificiais). O termo *remoto*, que significa distante, é utilizado porque a obtenção é feita à distância, ou seja, sem o contato físico entre o sensor e objetos na superfície terrestre.... O processamento, análise e interpretação destes dados também integram o sensoriamento remoto [...].

Apesar do termo sensoriamento remoto ter sido utilizado somente em 1960, a origem do sensoriamento remoto está inicialmente vinculada ao surgimento das fotografias aéreas em 1860 e posteriormente, relacionado diretamente a pesquisas espaciais. Assim, o *Manual of Remote Sensing ASP* (1983) periodiza a origem do sensoriamento remoto em dois momentos. Um que se inicia em 1860 com o uso de fotografias aéreas e vai até 1960 e outro que começa por meados de 1960 e vai até os dias atuais, caracterizando-se pela multiplicidade de sistemas sensores.

O avanço do sensoriamento remoto historicamente esteve relacionado a conflitos. No início de 1860, as fotografias aéreas eram tiradas de balões e eram estritamente voltadas para o uso militar, durante a guerra civil americana (1862), já que através das mesmas era possível se fazer a identificação de tropas inimigas. (FLORENZANO, 2011). Durante a Primeira Guerra Mundial (1914 a 1918), aumenta a necessidade de se fazer este tipo de reconhecimento que, desde 1909, já vinha sendo feito por meio de aviões pelos irmãos Wriqth em território italiano. Com o fim da Primeira Guerra, há um desenvolvimento destes sistemas de fotografia voltados para a cartografia de pequena escala. (FLORENZANO, 2011; NOVO, 2010). O filme infravermelho foi desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial (1939 a 1945) com o intuito de diferenciar a vegetação de alvos que estavam camuflados. Este período foi caracterizado por um grande desenvolvimento do sensoriamento remoto, já que, além do filme infravermelho, foram introduzidos novos sensores, como por exemplo, o radar. (FLORENZANO, 2011; NOVO, 2010). Logo após a Segunda Guerra Mundial inicia-se a Guerra Fria (1945 a 1991). Neste período, os episódios de espionagem destacaram-se no cenário mundial iniciando estudos avançados de tecnologias de sensoriamento remoto, com o

intuito de se desenvolver sensores de alta resolução. (FLORENZANO, 2011; NOVO, 2010).

O primeiro levantamento aerofotogramétrico do Brasil foi feito entre os anos de 1942 e 1943 pela Força Aérea dos Estados Unidos e foi utilizado para compilação de cartas na escala de 1:1.000.000, resultando nos primeiros mapas temáticos do Brasil. A partir disto deu-se início às primeiras aplicações de técnicas de sensoriamento remoto, voltada principalmente para questões relacionadas à vegetação. (NOVO, 2010; PONZONI *et al.*, 2012). Em 1958, visando identificar as características da Bacia Terciária do Vale do Rio Paraíba, as primeiras fotografias aéreas foram obtidas na escala de 1:25.000. Tal estudo visava o aproveitamento dos recursos hídricos existente nesta bacia, resultando assim na construção do reservatório hidrelétrico de Paraibuna, situado entre Paraibuna e Jacareí.

A década de 1960 é repleta de acontecimentos históricos que foram de suma importância para o desenvolvimento do sensoriamento remoto, dentre eles cita-se a corrida espacial, que marcou esta década e alavancou os estudos espaciais. Neste período houve significativo desenvolvimento dos foguetes que lançavam os satélites ao espaço, possibilitando assim, o lançamento de inúmeros satélites artificiais para diversas finalidades. Também foi nesta década que o americano foi ao espaço nas missões Mercury, Gemini e Apollo, e obteve as primeiras fotografias orbitais da superfície da terra. Estas missões incentivaram a construção de satélites meteorológicos e recursos terrestres. O primeiro satélite artificial a fazer registros sistemáticos da superfície da terra foi lançado em abril de 1960, pelos Estados Unidos, e se chamava TIROS-1 (*Television IR Operational Satellite*). O TIROS-1 era um satélite meteorológico que mostrava os padrões de coberturas de nuvem e, mesmo com pouca nitidez, algumas feições da superfície da Terra. Em julho de 1972 foi lançado, também pelos Estados Unidos, à cerca de 920 km de altura e com capacidade de imagear uma área de 185 km de largura, o primeiro satélite de recursos terrestres, o ERTS-1, mais tarde denominado LANDSAT 1. (FLORENZANO, 2011; MENESES, 2012). Este foi o primeiro satélite de sensoriamento remoto, com o sensor imageador acoplado a este; era possível obter simultaneamente uma imagem em quatro faixas do espectro, na região do visível e do infravermelho próximo e uma banda no comprimento de ondas na região do termal. (MENESES, 2012; PONZONI *et al.*, 2012).

Inúmeras são as aplicações dos dados fornecidos, de maneira repetitiva e consistente da superfície da terra, pelos sistemas de sensoriamento remoto. Os dados de sensoriamento remoto vêm sendo

amplamente aplicados a estudos de monitoramento atmosférico (temperatura, precipitação, distribuição e tipos de nuvens, velocidade dos ventos, etc.); monitoramento de oceanos (topografia da superfície, temperatura da superfície do mar e rugosidade da superfície); monitoramento da criosfera terrestre (gelo e neve depositados nas regiões polares, e icebergs) e mais amplamente aplicado no monitoramento da superfície da terra (urbanos, agrícolas, florestais, geológicos, ecológicos, hidrológicos, cartográficos, limnológicos etc.). (LORENZZETTI, 2015; NOVO, 2011).

A evolução do sensoriamento remoto deve-se principalmente a um esforço conjunto de diversas áreas do conhecimento, como por exemplo, a Física, Matemática, Físico-Química, Biociências e Geociências, Tecnologias da Computação, entre outras. O surgimento dos sensores orbitais de micro-ondas, os sensores de resolução espacial submétrica, os sensores hiperespectrais e os sensores de alta resolução temporal e espacial resultaram no caminho evolutivo do sensoriamento remoto, marcado pelo surgimento de sensores com alta resolução (espacial e temporal), hiperespectrais, radares, LIDAR, entre outros, altamente confiáveis e com capacidade de identificar temáticas específicas. Atualmente, inúmeros sensores orbitais imageiam a superfície da Terra em diversas faixas espectrais, parâmetros de resolução espacial e temporal, e fornecem informações importantes para as mais variadas pesquisas de diversas áreas do conhecimento. (FERREIRA *et al.*, 2008; MENESES, 2012; NOVO, 2011).

### 2.3 SENSORIAMENTO REMOTO DA VEGETAÇÃO

As rápidas mudanças impressas na paisagem pelas ações da humanidade, principalmente na paisagem rural, em decorrência da inserção de novas tecnologias no campo, fazem surgir novas discussões que envolvem a acelerada ocupação do espaço geográfico, aproveitamento dos recursos naturais disponíveis e degradação desse espaço por sua má utilização. Com essas discussões surgem também demandas de estudos específicos nesta área, que visam identificar causas de alguns problemas e ainda promover ações a fim de mitigá-las, de maneira rápida, eficiente e com possibilidade de baixos custos. É nesse contexto que a aplicação de dados de sensoriamento remoto a estudos da vegetação torna-se hoje indispensável para o planejamento dos recursos naturais e do meio ambiente como um todo.

Inicialmente abordaremos algumas questões importantes referentes ao sensoriamento remoto aplicado aos estudos de vegetação.

Durante o processo de fotossíntese, as plantas absorvem radiação eletromagnética por parte de pigmentos fotossintetizantes como as clorofilas, xantofilas e carotenos. Inúmeros estudos biogeográficos utilizam como variável biofísica fundamental a absorção de clorofila num dossel vegetal para, quando associado a outros dados de sensoriamento remoto, seja possível identificar estresse, produtividade e outras variáveis híbridas da vegetação. Nesse sentido, corriqueiramente estudiosos de sensoriamento remoto dedicam-se ao monitoramento da radiação fotossinteticamente ativa quando ela interage com as folhas individuais e/ou com o dossel vegetal. (JENSEN, 2009; LONGCHAMPS *et al.*, 2010; MOUSIVAND, 2015; PONZONI *et al.*, 2012; YU *et al.*, 2014).

Ponzoni *et al.* (2012) afirmam que as folhas da planta viabilizam a interação com a radiação eletromagnética especificamente na região do visível, já que é nesta região que ocorre a radiação eletromagnética por parte de pigmentos fotossintetizantes. As frações espectrais da radiação incidente que serão refletidas, transmitidas e absorvidas dependerão das características físico-químicas do alvo em questão e do comprimento de onda.

Nesse contexto Ponzoni *et al.* (2012, p. 18) afirmam que:

[...] o processo de interação entre a radiação eletromagnética referente ao espectro óptico de uma folha é dependente de fatores químicos (pigmentos fotossintetizantes e água) e estruturais (organização dos tecidos da folha), e pode ser analisado sob o ponto de vista da absorção, transmissão e da reflexão da radiação. A análise conjunta destes três fenômenos compõem aquilo que denominamos como estudo do *comportamento espectral da vegetação*, que envolve principalmente o estudo dos fatores influentes na reflexão da radiação por folhas isoladas e por dosséis vegetais [...].

Vale ressaltar ainda que os parâmetros que influem sobre a reflectância espectral das folhas diferem dos parâmetros que exercem influência sobre a reflectância espectral dos dosséis<sup>2</sup>. As composições químicas, morfológicas, fisiológicas e umidade interna são os

---

<sup>2</sup>Conforme definição de Ponzoni (2012), dosséis são conjuntos de plantas de uma mesma fisionomia, como por exemplo, o dossel de gramíneas, ou um dossel florestal.

parâmetros que influenciam diretamente na reflectância espectral das folhas. Estes predominam nas regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio. No que se refere aos dosséis, parâmetros como a natureza da geometria (iluminação e visada), espectral (propriedades espectrais dos elementos da vegetação – folhas e solo) e biofísica (Índice de Área Foliar – IAF - e a Distribuição Angular das Folhas - DAF), possuem influência na resposta espectral do dossel.

Um dossel pode ser constituído por diversos elementos da própria vegetação (folhas, galhos, flores, frutos, etc.). No momento em que um fluxo de radiação incide sobre estes, ocorrem os processos de espalhamento (neste pode ocorrer ainda a reflexão e a transmissão através do elemento) e a absorção. Assim, o destino do fluxo de radiação incidente sobre estes elementos depende das características do comprimento de onda, do ângulo de incidência, da polarização e das características físico-químicas destes elementos que caracterizam o fluxo. O uso de espectrômetros imageadores de alta resolução espectral tem demonstrado eficiência na medição das características de absorção e reflectância da radiação fotossinteticamente ativa. (JENSEN, 2009; PONZONI *et al.*, 2014).

Conforme visto anteriormente, o comportamento espectral da vegetação está diretamente relacionado com suas propriedades de reflectância da radiação eletromagnética, e o elemento da vegetação que possui maior significância no que se refere ao sinal detectado por sensores óticos são as folhas, sendo que as suas propriedades espectrais terão variações em decorrência de sua morfologia, condição química e estrutura interna. Para os processos fisiológicos e bioquímicos da planta, a absorção<sup>3</sup> é o componente mais importante, no entanto, para a maioria dos sensores orbitais e suborbitais, a medição da absorção só pode ser feita através de interferências que se baseiam na relação da quantidade de radiação que a vegetação emite e/ou reflete. (MOREIRA, 2007). Nesse contexto, devido ao fato de existirem inúmeros sensores orbitais e suborbitais que atuam nessa faixa do espectro eletromagnético, o componente mais utilizado para a maioria dos sistemas sensoramento remoto é a reflexão. (MOREIRA, 2007).

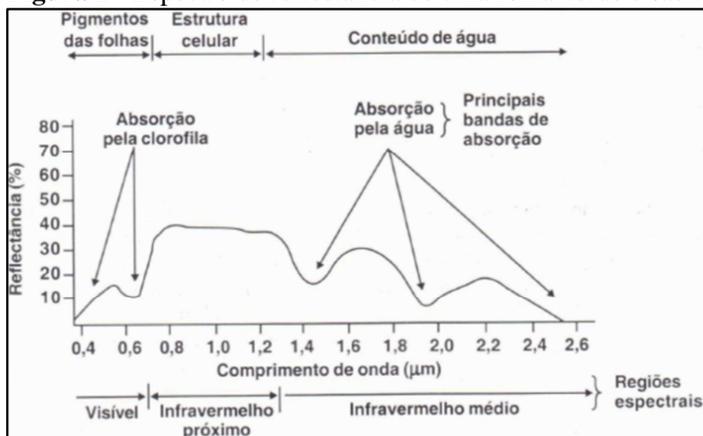
O espectro reflectivo é a radiação eletromagnética que está contida na faixa de comprimento de onda entre 400 nm a 3000 nm (0,4 µm a 3,0 µm) e pode ser dividido nas regiões espectrais do visível e do infravermelho (infravermelho médio e infravermelho próximo).

---

<sup>3</sup>A reflexão, a absorção e a transmissão são os três processos resultantes do fracionamento da radiação incidente sobre o alvo. (MOREIRA, 2007).

(MOREIRA, 2007) (Figura 2). A quantidade de energia eletromagnética que será refletida pela vegetação irá depender de constituintes específicos da planta como: pigmentos, quantidade de água na folha, espaços ocupados pela água e o ar, maturação ou idade da folha, posição nodal, condições de iluminação e estrutura celular da planta. (MOREIRA, 2007). Estes constituintes da folha irão definir a forma que a curva espectral terá em cada uma destas regiões. (PONZONI *et al.*, 2012).

**Figura 2** - Espectro de reflectância de uma folha verde e sadia.



Fonte: Moreira (2007).

A Figura 2 representa a interação da radiação eletromagnética com uma folha verde e sadia. Pode-se observar que na região espectral do visível (0,4 μm a 0,72 μm) a maior parte desta radiação que incide sob o dossel da planta é absorvida pelos pigmentos da folha. (MOREIRA, 2007; PONZONI *et al.*, 2012). Ponzoni *et al.* (2012), destacam que a quantidade de energia absorvida na região de 0,550 μm a 0,670 μm aumentará à medida que a quantidade de clorofila na planta aumenta.

Na região espectral do infravermelho próximo (0,72 μm a 1,1 μm), há pouca absorção da radiação e um significativo espalhamento interno na folha. Normalmente há pouca absorção de água e reflectância quase constante. Ponzoni *et al.* (2012, p.25) mencionam que “quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação incidente e, conseqüentemente, maiores serão os valores dos fatores de reflectância.”

Já na região do infravermelho médio (1,1  $\mu\text{m}$  a 3,2  $\mu\text{m}$ ), principalmente em decorrência da presença de água líquida na folha, há um decréscimo dos valores de energia refletida. Ponzoni *et al.* (2012), destacam os comprimentos de onda que mais absorvem a radiação incidente: 1,1  $\mu\text{m}$ , 1,45  $\mu\text{m}$ , 1,95  $\mu\text{m}$  e 2,7  $\mu\text{m}$ .

Nesse contexto, vale ressaltar que para se utilizar de dados provenientes de sensores orbitais, deve-se antes ter conhecimento do comportamento espectral dos alvos da superfície terrestre, bem como dos fatores que interferem nesse comportamento. Ao se utilizar das informações extraídas de sensores sem se ter o conhecimento do comportamento espectral dos alvos em estudo, corre-se o risco de desprezar faixas espectrais importantes para sua discriminação. (NOVO, 2010).

Para a análise da curva espectral é importante se ter conhecimento das condições de aquisições destes dados que envolvem o conhecimento dos instrumentos utilizados, dos métodos de medição e as condições experimentais em que as medidas foram realizadas. Há uma vasta diversidade de equipamentos utilizados para obter informações do comportamento espectral de um alvo (Tabela 1 e Tabela 2). O comportamento espectral dos alvos, dependendo do equipamento utilizado para obter estas medidas de campo, pode sofrer alterações, principalmente em função da resolução espectral e radiométrica dos espectrorradiômetros. (NOVO, 2010).

**Tabela 1** - Espectrorradiômetros de campo em uso no estudo do comportamento espectral de alvos

	<b>Spectron SE590<sup>TM</sup></b>	<b>ASD PSII<sup>TM</sup></b>	<b>SpectronScan PR-650<sup>TM</sup></b>	<b>ASD FieldSpec UV/VNIR<sup>TM</sup></b>
Data	1984	1989	1992	1994
Janela espectral (nm)	370 – 1.110	350 – 1.050	380 – 780	350 – 1.050
Dispersão (nm)	3	1,4	3	1,4 ou 0,7
Resolução espectral (nm)	11	3	8	3
Resolução radiométrica (bits)	12	12	14	16
Canais	252	512	128	512 ou 1.024

Campo de visada	$1^\circ, 15^\circ, 2\pi$	$1^\circ, 15^\circ, 2\pi$	$1^\circ, 7^\circ, 12,5^\circ, 2\pi$	$1^\circ, 24^\circ, 2\pi$
Tempo de varredura (s)	0,016 – 1,1	0,044 – 5,6	0,010	0,016 – 240
Peso (kg)	4,5	3,5	2,5	8
Características especiais	-	-	-	-
Janela espectral (nm)	300 – 1.110	1.300 – 2.500	1.000 – 2.500	300 – 3.000
Dispersão (nm)	1.5	2 ou 4	2	2- 300 a 1.100 nm 4- 1.000 a 3.000nm
Resolução espectral (nm)	3	7 a 10	10	Igual a Dispersão
Resolução radiométrica (bits)	16	14	16	12 a 15
Canais	512	600 ou 300	750	< 1.000
Campo de visada	$3^\circ \times 1^\circ$	1cm de diâmetro	$25^\circ, 1^\circ, 2\pi$	$6^\circ \times 4^\circ$
Tempo de varredura (s)	0,010	20 a 60	30 a 60	30
Peso (kg)	4	3	8	11
Características especiais	-	Fonte de luz interna	Fonte de luz interna	-

Fonte: Adaptado de Novo (2010).



**Tabela 2** - Espectrorradiômetros de campo em uso no estudo do comportamento espectral de alvos

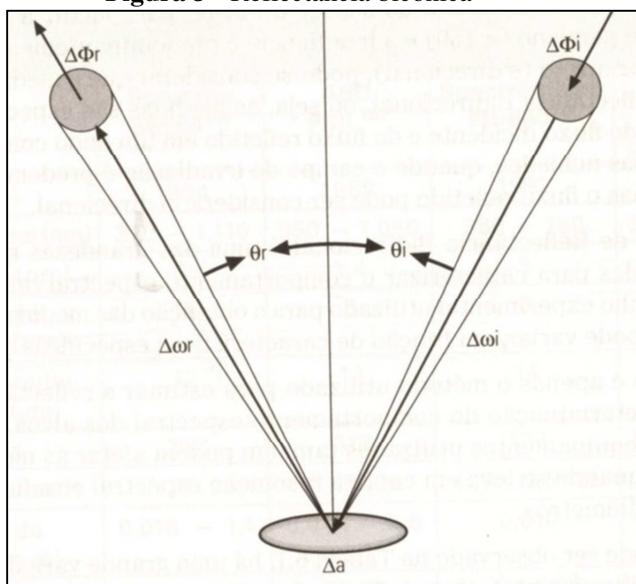
	<b>GER-SIRIS™</b>	<b>ASD FieldSpec-FR™</b>	<b>GER 2100™</b>	<b>GER 2600™</b>	<b>GER 3700™</b>
Data	1988	1994	1994	1994	1994
Janela espectral (nm)	300 – 3.000	350 – 2.500	400 – 2.500	400 – 2.500	400- 2.500
Dispersão (nm)	2- 300 a 1.100 nm 4- 1.000 a 3.000nm	1,4 ou 0,73- 350 a 1.000nm 2- 1.000 a 2.500nm	10- 400 a 1.000 nm 24- 1.000 a 2.500nm 8- 2.000 a 2.500nm	1,5- 400 a 1.000 nm 24- 1.000 a 2.500nm 8- 2.000 a 2.500nm	1,5- 400 a 1.050 nm 4,8- 1.050 a 1.400nm 6,25- 1.400 a 1.800 nm 8- 2.000 a 2.500nm
Resolução espectral (nm)	Igual a Dispersão	3- 350 a 1.000nm 10- 1.000 a 2.500 nm	Igual a Dispersão	3- 400 a 1.000 nm Igual a Dispersão	3- 400 a 1.000 nm Igual a Dispersão
Resolução radiométrica (bits)	12 a 15	16	12 a 15	16	16
Canais	< 1.000	512 ou 1.024 - 350 a 1.000nm 750 - 1.000 a 2.500 nm	140	512 +128 ou 64	512 + 192
Campo de visada	15° × 5°	25°, 1°, 2 π	3° × 5°	3° × 5°	1,4° × 0,3°
Tempo de varredura (s)	30	16 a 240 e 30 a 600	0,3	0,5	0,5
Peso (kg)	11	8	11	11	11
Características especiais	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Novo (2010).



A grandeza radiométrica utilizada para expressar o comportamento espectral dos alvos é uma medida que permite estimar sua reflectância e tem por base a razão entre o fluxo radiante incidente ( $\phi_i$ ) e o fluxo radiante refletido ( $\phi_r$ ), conhecida como reflectância bicônica do elemento de superfície ( $\Delta a$ ) (Figura 3). A Reflectância é a propriedade de um alvo emitir a radiação eletromagnética incidente sobre ele. Quando os ângulos sólidos envolvidos na determinação da reflectância forem pequenos, a razão entre estes fluxos será denominada de reflectância bidirecional. (NOVO, 2010).

**Figura 3 - Reflectância bicônica**



Fonte: Novo (2010).

A reflectância é expressa pelos fatores de reflectância bidirecional (FRB) já que a maioria das superfícies dos recursos naturais não é isotrópica, fazendo com que o fluxo de radiação refletida por um alvo ou superfície contenha além das informações físico-químicas, também características geométricas específicas da incidência e da relação da radiação. Conforme Ponzoni *et al.* (2012, p.23), “o fator de reflectância bidirecional representa então a quantidade relativa da radiação eletromagnética que é refletida por uma dada superfície ou objeto, para uma dada condição geométrica de iluminação e visada”. O

FRB é uma das grandezas radiométricas mais utilizadas para caracterizar o comportamento espectral dos alvos naturais.

A reflectância espectral de dosséis é estimada pela reflectância bidirecional, através do uso de sensores colocados em suportes ou plataformas posicionados a alguns metros acima dos dosséis ou ainda em aeronaves ou satélites. Assim, esta medida possibilita a caracterização do comportamento espectral dos alvos em condições de imageamento semelhantes às dos sensores transportados em aeronaves e plataformas orbitais. (NOVO, 2010; PONZONI *et al.*, 2012).

Algumas considerações devem ser feitas acerca das imagens provenientes de sensores orbitais. Os sensores orbitais registram a intensidade do fluxo refletido por um determinado objeto ou superfície, em diferentes comprimentos de onda, na forma de um número denominado de *número digital* (ND). As imagens provenientes de sensores orbitais são compostas de faixas espectrais ou uma composição de faixas espectrais, que por sua vez são compostas por inúmeros *pixels*. Cada *pixel* possui um número digital que está atrelado a ele e que pode variar de acordo com cada faixa espectral e ainda de acordo com a escala da resolução radiométrica do sensor (8,11,12 ou 16 *bits*). Cada número digital que está atrelado a um *pixel* vai ser o resultado de uma medida radiométrica, que é na verdade a intensidade da REM refletida e/ou emitida pelos objetos imageados na superfície da terra. Assim, pode-se dizer que essas imagens são compostas por um conjunto de dados radiométricos, provenientes da energia refletida/emitida de cada objeto que está sendo imageado na superfície da terra. (PONZONI *et al.*, 2015).

Os números digitais são obtidos através da conversão da radiância aparente para números digitais. A radiância aparente é resultado de um processo complexo de interação entre os alvos imageados, seus vizinhos e a atmosfera, não representando assim somente a intensidade de fluxo refletido por um *pixel* específico. O valor que resulta deste processo é então convertido em um número digital. Os números digitais de um mesmo *pixel* são diferentes quando é observado em diferentes imagens de diferentes regiões espectrais, mesmo que as imagens possuam a mesma resolução radiométrica, por que a conversão de radiação eletromagnética em números digitais é feita por um equipamento e é específica para cada banda espectral que o sensor atua. Mesmo que as imagens possuam a mesma resolução radiométrica, os objetos podem ter uma tradução radiométrica diferente em cada uma das faixas espectrais. Isso porque cada sensor vai ter uma maneira específica de discretizar os valores de radiância que são

medidos em cada faixa espectral. (PONZONI *et al.*, 2012). Assim, se o objetivo da pesquisa é identificarem-se propriedades físico-químicas de alvo e/ou ainda quantificá-lo, torna-se necessário à conversão destes valores para grandezas físicas – reflectância aparente (no topo da atmosfera) e reflectância na superfície - a fim de corrigir essas diferenças radiométricas.

A reflectância aparente é o resultado de uma conversão feita a partir dos valores de radiação aparente (obtidos a partir da conversão dos números digitais). Os valores gerados a partir desta conversão ainda possuem uma série de fatores atmosféricos (espalhamento e absorção). Como estes valores ainda possuem estas interferências considera-se que eles não retratem a realidade espectral dos objetos. Para saber esta realidade espectral do alvo imageado, é necessário que estes efeitos da atmosfera sejam minimizados. A partir do momento que estes efeitos são corrigidos têm-se então os valores referentes à reflectância na superfície. Então, basicamente, a reflectância de superfície retrata a realidade espectral dos objetos. Já a Reflectância aparente possui ainda todas as interferências dos efeitos atmosféricos. Ainda assim, vale ressaltar que a reflectância de superfície é apenas uma representação possível de como o objeto reflete em faixas espectrais específicas. (MOUSIVAND, 2015; PONZONI *et al.*, 2012).

## 2.4 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

As propriedades de vegetação são freqüentemente medidas pela conversão de um espectro de reflectância em um único valor numérico ou Índice de Vegetação (IV). Um índice de vegetação é uma medida quantitativa que está relacionada à biomassa ou ao vigor vegetativo. É geralmente formado a partir de combinações de duas ou três bandas espectrais (sendo as bandas na região do vermelho e do infravermelho próximo os mais comuns), cujos valores são adicionados, divididos ou multiplicados para produzir um único valor (índice) que indica a quantidade ou vigor de vegetação. (MRÓZ; SOBJERAJ, 2014). Nesse contexto, os índices de vegetação realçam o contraste espectral entre a vegetação e o solo, sendo que os dados podem ser obtidos através de imagens de satélite ou por equipamentos próximos ao alvo de interesse, como o espectrorradiômetro. (PONZONI, SHIMABUKURO, 2010).

Os Índices de Vegetação hiperespectrais ou de banda estreita, incluem características de banda mais estreitas ou comprimentos de onda capturados apenas por instrumentos hiperespectrais, como os

espectrorradiômetros. Estes índices possuem a capacidade de medir propriedades de vegetação como: estrutura, bioquímica e fisiologia da planta. (RAHMAN *et al.* 2001; THENKABAIL *et al.*, 2000).

Ao longo dos anos, muitos índices de vegetação foram propostos para determinar o vigor e a saúde da vegetação. Suas fórmulas resultaram de tentativas de criar melhores índices, o que significa que eles levam em conta muitos fatores, como a reflectância do solo, a densidade da vegetação, etc. O objetivo de todas essas melhorias e modificações é obter, por meio de sensoriamento remoto, informações mais confiáveis sobre a vegetação com base em valores (reflectâncias). (PONZONI, SHIMABUKURO, 2010).

#### 2.4.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

O Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) foi proposto por Rouse *et al.* (1973) com o intuito de avaliar as mudanças do vigor vegetativo das plantas, correlacionando-o com outros parâmetros como o índice de área foliar, a biomassa ou a produtividade da vegetação (Equação 1)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (Eq.1)$$

NIR = valor numérico da reflectância de dossel na faixa dos comprimentos de onda do NIR.

RED = valor numérico da reflectância de dossel na faixa dos comprimentos de onda do Vermelho.

Ao se considerar dados hiperespectrais, os valores de NDVI em nanômetros podem variar de acordo com as informações da vegetação que se deseja obter, como por exemplo (Tabela 3):

**Tabela 3 - Variação hiperespectral de NDVI**

<b>Parâmetros da vegetação</b>	<b>Equação</b>	<b>Autor</b>
Concentração de nitrogênio	$(R_{800} - R_{600}) / (R_{800} + R_{600})$ (Eq.2)	Ma et al. (1996)
Concentração de clorofila.a	$(R_{780} - R_{550}) / (R_{780} + R_{550})$ (Eq.3)	Gitelson et al. (1996)
Concentração de clorofila.b	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$ (Eq.4)	Gitelson e Merzlyak (1994)
Concentração de clorofila	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$ (Eq.5)	Vogelmann et al. (1993)
Concentração de clorofila.a	$(R_{850} - R_{710}) / (R_{850} + R_{680})$ (Eq.6)	Datt (1999)
Concentração de clorofila.b	$(R_{780} - R_{710}) / (R_{780} + R_{680})$ (Eq.7)	Datt (1999)

Fonte: Elaborada pela autora.

#### 2.4.2 Difference Vegetation Index (DVI)

O Índice de vegetação de diferença (DVI) para dados hiperespectrais, foi proposto por Jordan (1969), e visa quantificar a concentração de clorofila (Equação 8).

$$DVI = R_{800} - R_{680} \quad (\text{Eq.8})$$

Onde:

R800 = valor numérico da reflectância de dossel, com comprimento de onda de 800 nm (Red-Edge).

R680 = valor numérico da reflectância de dossel, com comprimento de onda de 680 nm.

#### 2.4.3 Soil-Adjusted Vegetation Index Optimized (OSAVI)

O Índice de Vegetação Ajustado Otimizado para Solo (OSAVI), foi proposto por Rondeaux et al. (1996). Este índice é uma variação do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo- SAVI, desenvolvido por Huete em 1988 (HUETE, 1988; RONDEAUX et al., 1996) e, assim como o SAVI, visa minimizar o efeito do solo sobre diferentes densidades de cobertura vegetal. Entendendo também que o aumento da constante L melhora a sensibilidade do índice, propôs que essa variação para a

constante L seja entre 0,1 e 0,2 para densidades médias de cobertura, diferentemente do que entende Huete (1988), que aceita os valores de  $L=0,5$  para essas densidades médias. Com base em seu estudo, Rondeaux et al. (1996) concluiu que o valor ideal para esta constante é de 0,16, com isto o índice SAVI seria otimizado (Equação9).

$$\text{OSAVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R} + 0,16) \quad (\text{Eq.9})$$

Onde, em densidades médias de cobertura  $L=0,16$

#### 2.4.4 Transfomed Chlorophyll Absorption Ratio Index (TCARI)

Desenvolvido por Haboudane *et al.* (2002), o Índice de Absorção de Clorofila Transformada (TCARI) utiliza como indicador de atividades fotossintéticas o conteúdo de clorofila uma variação do Índice de Reflectância Modificado de Absorção de Clorofila (Chlorophyll Absortion in Reflectance Index - MCARI), proposto por Daughtry et al. (2000). Assim, Haboudane *et al.* (2002) propuseram um melhoramento deste índice no que se refere à sua sensibilidade a baixos valores de clorofila. Assim, Haboudane *et al.* (2002) utilizaram a razão ( $R_{700} / R_{670}$ ) como fator multiplicador para a diferença ( $R_{700}-R_{550}$ ) para contrabalançar a influência de fundo, elaborando a seguinte equação (Equação10):

$$\text{TCARI} = 3. [R_{700} - R_{670} - 0,2. R_{700} - R_{550}. (R_{700} + R_{670})] \quad (\text{Eq.10})$$

onde:

$R_{700}$  = valor numérico da reflectância de dossel, com comprimento de onda de 700 nm (Red-Edge).

$R_{670}$  = valor numérico da reflectância de dossel, com comprimento de onda de 670 nm.

$R_{550}$  = valor numérico da reflectância de dossel, com comprimento de onda de 550 nm

#### 2.4.5 Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (MCARI)

O índice de reflectância modificado em absorção de Clorofila (MCARI), proposto por Daughtry *et al.* (2000) é uma variação do Índice de Reflectância da Absorção da Clorofila (Chlorophyll Absortion in

Reflectance Index - CARI) apresentado por Kim *et al.* (1994), que minimiza os efeitos de materiais não fotossintéticos em estimativas espectrais de radiação fotossinteticamente ativa. Assim o MCARI é definido como a profundidade da absorção de clorofila a 670 nm em relação à reflectância a 550 nm e 700 nm (Equação 11).

$$MCARI = [(R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550}) \cdot (R_{700} / R_{670})] \quad (\text{Eq.11})$$

## 2.4.6 Índice de Vegetação Triangular (TVI)

O Índice de Vegetação Triangular (TVI) foi desenvolvido por Broge e Leblanc (2000), com a intenção de caracterizar a energia radiante absorvida pelos pigmentos da folha. Resultante da diferença relativa entre a reflectância vermelha e infravermelha próxima em conjunto com a magnitude da reflectância na região verde, onde a quantidade de energia absorvida aumentará à medida que aumenta a quantidade de clorofila na folha. Nesse contexto, este triângulo é definido como tendo um pico de reflectância no verde, uma reflectância mínima na região do vermelho e uma diminuição da reflectância no infravermelho quando comparado com demais regiões. (BROGE; LEBLANC, 2000; HABOUDANE *et al.*, 2004).

Este é um índice que possui sensibilidade à quantidade de clorofila na folha, que está atrelada ao tamanho do dossel da planta. Assim, quanto maior for a densidade do dossel da planta maior será sua sensibilidade ao conteúdo de clorofila da mesma e, quanto maior for a concentração de clorofila da planta maior será a área do triângulo e aumentará concomitantemente a reflectância no infravermelho próximo. (Equação 12). (BROGE; LEBLANC, 2000; HABOUDANE *et al.*, 2004).

$$TVI = 0.5 |det(AB, AC)| \\ = 0.5(120(R_{NIR} - R_{Green}) - 200(R_{Red} - R_{Green})) \quad (\text{Eq.12})$$

Onde: A= 550 nm ( $R_{Green}$ ), B=670 nm ( $R_{Red}$ ) e C=750 nm ( $R_{NIR}$ ).

## 2.4.7 Simple Ratio (SR -)

O Índice de Vegetação de Razão Simples foi descrito pela primeira vez por Jordan (1969) (Equação 13). Se ambas as bandas RED e NIR tiverem reflectâncias iguais ou semelhantes, o SR é 1 ou próximo de 1. Os

valores SR para solos descobertos geralmente são próximos de 1, à medida que a quantidade de vegetação verde aumenta em um pixel, o SR aumenta. Vale ressaltar que seus valores podem aumentar muito além de 1, comumente acima de 3.

$$SR = NIR / RED \quad (\text{Eq.13})$$

Para adaptar este índice a dados hiperespectrais, diversos autores propuseram variações em seus valores numéricos de comprimento de onda (Tabela 4):

**Tabela 4 - Variação hiperespectral de SR**

Parâmetros da vegetação	Equação	Autor
Concentração de clorofila	$R_{675} / R_{900}$ (Eq.14)	Chappelle et al. (1992)
Concentração de clorofila	$R_{740} / R_{720}$ (Eq.15)	Vogelmann et al. (1993)
Concentração de clorofila	$R_{700} / R_{670}$ (Eq.16)	McMurtrey et al. (1994)
Concentração de clorofila	$R_{800} / R_{550}$ (Eq.17)	Buschman and Nagel (1993)
Concentração de clorofila	$R_{810} / R_{670}$ (Eq.18)	Daughtry et al. (2000)

Fonte: Elaborada pela autora.

#### 2.4.8 Plant Senescence Reflectance Index (SPRI)

O Índice de Reflectância da Senescência de Plantas (SPRI) foi proposto por Merzlyak *et al.* (1999), com o objetivo de verificar o estágio de maturação das folhas e frutos. Merzlyak *et al.* (1999) verificaram que a reflectância das plantas no comprimento de onda entre 680nm e 500nm varia de acordo com o estágio de senescência de folhas e maturação dos frutos, sendo que este índice ainda é utilizado em estudos que abordam questões referentes ao estresse hídrico (Equação19).

$$SPRI = (R_{680} - R_{500}) / R_{750} \quad (\text{Eq.19})$$

### 2.4.9 Modified Red Edge Simple Ratio (mSR705)

O Índice Razão Simples Modificado na Borda Vermelha foi proposto por Sims e Gamon (2002) e é uma variação do índice SR. Este índice é utilizado em estudos referentes a agricultura de precisão, monitoramento de florestas e detecção de estresse na vegetação (Equação 20).

$$mSR705 = (R_{750} - R_{745}) / (R_{705} + R_{445}) \quad (\text{Eq.20})$$

### 2.4.10 Modified Normalized Difference 705 (mND705)

O índice de Vegetação da Diferença Normalizada 705 Modificado é uma variação do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada 705 (ND705), proposta por Sims e Gamon (2002), com o intuito de corrigir a reflectância de alta superfície foliar, que tende a aumentar a reflectância em todo o espectro visível. Para tanto, Sims e Gamon (2002) utilizam o R445 como uma das medidas da reflectância da superfície (Equação 21).

$$mND705 = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} - R_{705} * R_{445}) \quad (\text{Eq.21})$$

## 2.5 CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS

A análise e manipulação de imagens por computadores com o intuito de identificar e extrair suas informações é denominado processamento digital de imagens (PDI). A visão humana consegue diferenciar por volta de 30 tons de cinza e está restrita à faixa do visível do espectro eletromagnético, e processar o elevado volume de dados presentes nas imagens parece ser uma tarefa impossível para os seres humanos. Superar limitações inerentes aos seres humanos e estruturar sistemas para extração de informações a partir da manipulação e interpretação de imagens com o uso de computadores tem sido o principal objetivo do PDI. (SHIMABUKURO, 1996).

Existem inúmeras maneiras de processar imagens digitais de sensoriamento remoto, no entanto elas podem ser divididas em quatro etapas básicas: pré-processamento, realce, transformações e classificação. (GONÇALVES, 2009; LILLESAND *et al.*, 2004).

A etapa de pré-processamento envolve todo o processamento inicial das imagens brutas (correções geométricas, radiométricas e atmosférica), corrigindo as imagens distorcidas e degradadas. (GONÇALVES, 2009; SHIMABUKURO, 1996).

Já as operações de realce objetivam melhorar a qualidade visual das imagens (Análise Qualitativa). As principais técnicas de realce são ampliação de contraste, composição colorida (transformações), razão entre bandas e filtragem espacial.

Existem inúmeros métodos utilizados para efetuar a transformação de dados de imagem de satélite, no entanto, Gonçalves (2009) afirma que o mais usual é o de rotação espectral que realiza transformações lineares nas imagens, conhecido como análise de componentes principais. Basicamente este é um método que envolve a combinação das informações coletadas nas diferentes bandas do sensor. Como resultado, são obtidas novas imagens contendo informações espectrais mais contrastadas do que as das bandas originais.

O principal objetivo dos procedimentos de classificação de imagens (análise quantitativa) é categorizar automaticamente todos os *pixels* existentes em uma imagem em classes de cobertura terrestre ou temas, ou seja, atribuir a cada *pixel* um rótulo em função de suas propriedades espectrais e/ou espaciais. (NOVO, 2010). Geralmente, dados multiespectrais são utilizados para realizar a classificação, onde o padrão espectral presente dentro dos dados de cada *pixel* é utilizado como a base numérica para classificação.

Nesse contexto, a classificação de imagens digitais pode ser denominada como o ato de subdividir a superfície da terra (área de estudo) de acordo com as diferentes respostas espectrais dos alvos imageados. As classificações, normalmente baseiam-se no comportamento espectral identificado para cada classe de cobertura da terra existente na imagem. Assim, a qualidade desta classificação dependerá basicamente da capacidade de distinguir de forma segura estas assinaturas de outros padrões de resposta espectral que possam estar presentes na imagem em análise. (LILLESAND *et al.*, 2004; SHIMABUKURO, 1996).

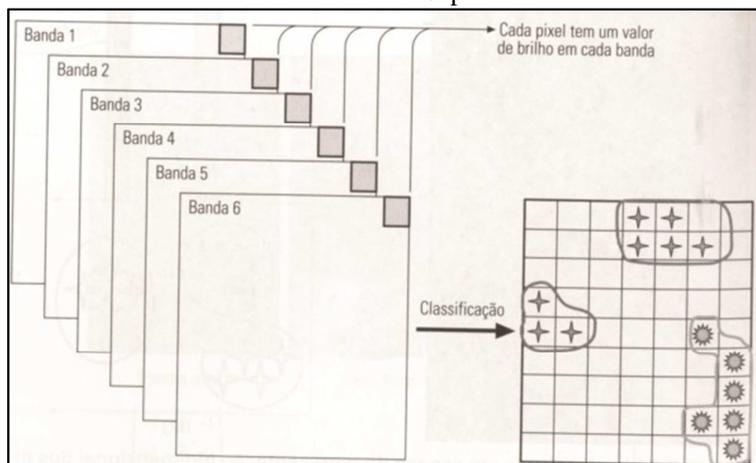
Nos procedimentos de classificação o termo padrão é utilizado para designar um grupo de valores de radiância para cada *pixel* obtido em várias bandas espectrais. (LILLESAND *et al.*, 2004; SHIMABUKURO, 1996). Novo (2010) ressalva ainda que os padrões podem ser classificados como “vetores matemáticos de *pixels*” que possuem conjuntos de valores do pixel organizados no formato de coluna (Equação 22):

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (\text{Eq.22})$$

onde,  $x_1$  a  $x_n$  são os valores do *pixel*  $x$  nas bandas 1 e  $n$  respectivamente.

Nesse contexto Lillesand e Kiefer (2000), Moreira (2004), Novo (2010) e Shimabukuro (1996) afirmam que o processo de classificação também pode ser descrito como reconhecimento de padrões, já que estes processos consistem na identificação do padrão, obtido por meio de técnicas matemáticas, associado a cada *pixel* da imagem, no que se refere às características de objetos em um ponto da superfície terrestre correspondente. Assim, conforme ilustra a Figura 4, para cada *pixel* será atribuída uma classe espectral, tendo como base os dados espectrais disponíveis.

**Figura 4** - Processo de Classificação: atribuir cada classe da imagem a uma classe espectral em função do vetor de *pixels* representativos de cada material da superfície



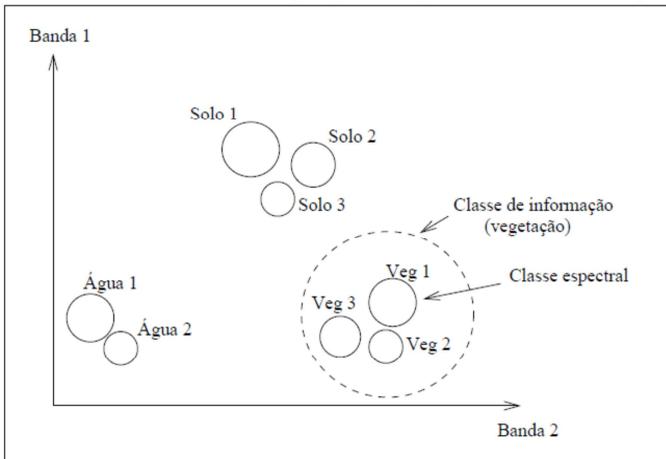
Fonte: Novo (2010).

Comumente as técnicas de classificação envolvem a análise de imagens multiespectrais. Fixar os dados das imagens multiespectrais a um espaço de padrões ou em um espaço multiespectral com dimensão igual ao número de bandas ainda é a melhor maneira de compreender e formular métodos de classificação. Assim, cada *pixel* da imagem é

fixado no espaço como um ponto onde as coordenadas são dadas pelo seu nível de cinza em cada banda espectral.

Gonçalves (2009) afirma que o conjunto de *pixels* formados no espaço multiespectral é denominado classe informacional uma vez que eles são representativos das classes reais de cobertura terrestre existentes na imagem. Dificilmente as classes de informação serão grupos individuais, isso porque o tipo de cobertura terrestre, inevitavelmente irá variar em decorrência de diversos fatores naturais, como teor de umidade, tipo de solo, topografia, período de plantio, etc. Assim, de uma classe informacional identificada como vegetação, podem haver inúmeras subclasses. Nesse contexto, cada classe informacional pode ser composta por várias subclasses que são denominadas classes espectrais, conforme apresenta a Figura 5, neste caso para duas bandas espectrais.

**Figura 5** - Classes de informação por conjuntos de classes espectrais.



Fonte: Gonçalves (2009).

Usualmente métodos de classificação podem ser divididos nas categorias: classificação supervisionada e classificação não-supervisionada. Quando estes dois métodos forem combinados formam classificadores híbridos. (LILLESAND *et al.*, 2004; SHIMABUKURO, 1996).

Estes classificadores podem ser divididos em classificadores *pixel a pixel* e classificadores por região. (PONZONI *et al.*, 2012). Meneses e Sano (2012) afirmam que a maior parte dos classificadores

utiliza uma abordagem de classificação *pixel a pixel*. Os classificadores *pixel a pixel* utilizam as informações espectrais individuais de cada *pixel* com o intuito de classificar regiões homogêneas a partir de medidas de distância ou de probabilidades de um *pixel* pertencer a uma classe. Já a classificação por regiões (ou por objeto) é executada a partir de um agrupamento de *pixels* que é usado como unidade de classificação. (MENESES; SANO, 2012). Ponzoni *et al.* (2012) afirmam ainda que além dos classificadores por regiões utilizarem as informações espectrais de cada *pixel*, utilizam também a informação espacial que envolve a relação com seus vizinhos.

### 2.5.1 Classificação Não-Supervisionada

Este tipo de classificação não requer, por parte do operador, qualquer conhecimento prévio sobre as características das classes informacionais a serem avaliadas, é indicado quando o usuário não possui ou possui poucas informações sobre a cobertura terrestre existente em sua área de estudo. A premissa básica é que os valores de um determinado tipo de cobertura geram *pixels* com valores dos níveis de cinza aproximados no espaço de atributos, enquanto que os dados de diferentes classes, ao serem comparados, apresentam valores distintos e sem proximidades. Dessa maneira, este tipo de classificador reúne os dados da imagem em classes representativas dos grupos naturais presentes na imagem em análise. (GONÇALVES, 2009; LILLESAND *et al.*, 2004; NOVO, 2010; SHIMABUKURO, 1996).

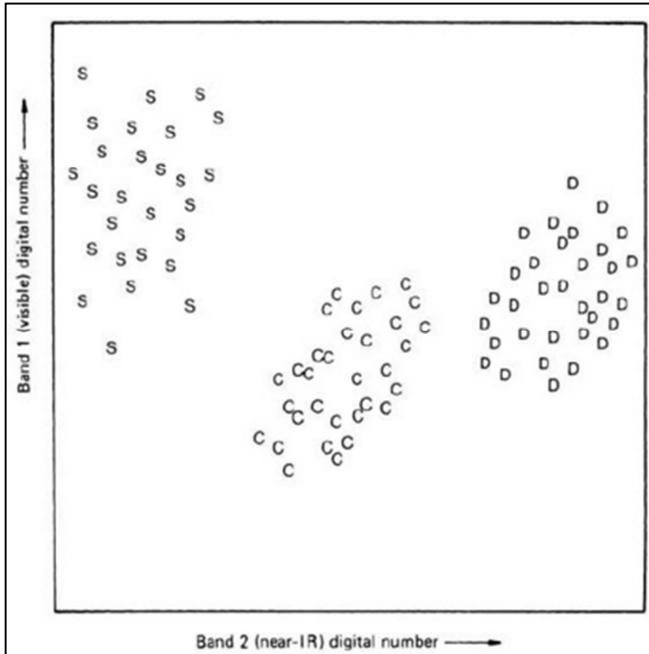
Assim, as classes que resultam de classificação não supervisionada são classes espectrais que são baseadas unicamente nos agrupamentos naturais dos valores existentes na imagem, sendo que a identidade das classes espectrais não é previamente conhecida.

Lillesand *et al.* (2004) ressaltam que os dados provenientes deste tipo de classificação devem ser posteriormente comparados com dados de referência, como imagens de alta resolução, mapas, etc., com a finalidade de determinar a identidade e valor informativo das classes espectrais. Desta maneira, nesta abordagem não supervisionada, inicialmente são determinadas as classes espectrais que são separáveis e logo definidas as categorias de informação consideradas úteis.

A Figura 6 ilustra a abordagem não supervisionada considerando um conjunto de dados em duas bandas. Neste diagrama de dispersão foram plotados os valores de *pixels* adquiridos sobre uma área florestal, tornando evidentes três grupos florestais distintos. Em sua análise, Lillesand *et al.* (2004) puderam constatar, após comparação dos

dados obtidos através da classificação não supervisionada com os dados de referência em terra, que um grupo correspondia a árvores caducifólias, outros a árvores coníferas e outro a árvores caducifólias e coníferas submetidas a algum tipo de estresse.

**Figura 6 -** Classes espectrais plotadas em um espaço bi-dimensional



Fonte: Lillesand *et al.* (2004).

A abordagem da classificação não supervisionada possui algumas vantagens, mencionadas abaixo (CAMPBELL, 2002; GONÇALVES, 2009; LILLESAND *et al.*, 2004):

- a) não é necessário amplo conhecimento prévio da região estudada. Para conduzir classificação não supervisionada, não é necessário que o operador tenha conhecimento total da região estudada, nem que colete amostras de treinamento em campo, no entanto, é necessário que haja um conhecimento básico da região para que seja possível interpretar o significado dos resultados obtidos no processo de classificação;
- b) a possibilidade de um erro humano é menor, já que durante o processo de condução da classificação não-supervisionada, o

operador tem a possibilidade de especificar o número de categorias desejada ou os limites mínimos e máximos para o número de categorias e ainda pode estabelecer o grau de compactação e dispersão dos grupos. A quantidade de decisões tomadas pelo operador neste tipo de classificação é pequena, o que acarreta menores possibilidades de erros;

c) as classes definidas pela classificação não-supervisionada são frequentemente mais uniformes em relação à composição espectral do que são aquelas geradas por classificação supervisionada;

d) durante o processo de classificação supervisionada, algumas áreas pequenas com classes raras ou com baixa probabilidade de ocorrência podem não ser reconhecidas, podendo inadvertidamente ser incorporadas em outras classes, gerando erros e imprecisões em toda a classificação. Na abordagem não supervisionada, estas áreas difíceis de serem reconhecidas são agrupadas separadamente, não sendo incorporadas em outras classes.

Contudo, apesar das vantagens desta abordagem, existem algumas desvantagens e limitações que podem torná-la problemática. São elas: (CAMPBELL, 2002; GONÇALVES, 2009):

a) as classes identificadas na classificação não supervisionada não correspondem necessariamente às categorias informacionais que são de interesse para do operador. Com isto, o operador se depara com o problema de ter que combinar as classes espectrais geradas pelo classificador com as classes de informação que são necessárias para o usuário final da informação;

b) as propriedades espectrais específicas das classes de informação podem variar significativamente ao longo do tempo. Como resultado, as relações existentes entre as classes de informação e as classes espectrais não são constantes, assim, as relações que são definidas para uma imagem não podem ser estendidas para as outras.

Existem diversos algoritmos de agrupamento que podem ser utilizados para determinar os agrupamentos espectrais existentes em um conjunto de dados. O método de agrupamento mais conhecido é o algoritmo K-médias.

O K-médias é um algoritmo de agrupamento iterativo que calcula a média inicial das classes distribuídas homoganeamente nas bandas e visa minimizar a variância interna dos agrupamentos que são formados (minimiza o erro quadrático médio).

A partir desta média, é feito um cálculo de menor distância entre os centroides de cada *pixel* e a média de cada classe. Os valores obtidos para os *pixels* nesta etapa são alocados à classe cuja média seja a mais próxima ao seu valor. A cada repetição do processo (iteração) a média da classe é recalculada e todo o processo se reinicia em relação às novas médias redefinidas. Os *pixels* que após inúmeras iterações não atenderem ao limiar de distância ou desvio padrão que é especificado pelo usuário, não são classificados. (NOVO, 2010). Para a execução deste algoritmo o usuário deve informar o número de classes espectrais prováveis dentro da área de estudo, a distância mínima desejada entre os valores dos níveis digitais desejados entre duas classes e o número de iterações desejadas. (MOREIRA, 2004).

## 2.5.2 Classificação Supervisionada

A classificação Supervisionada utiliza amostras com identidade conhecida, para treinar o classificador e classificar os *pixels* de identidade desconhecida. Assim, diferentemente da classificação não-supervisionada, inicialmente são definidas as categorias úteis para a análise do tema a ser classificado e posteriormente verifica-se sua distinção espectral. Nesse contexto, os métodos de classificação supervisionada necessitam de uma base de informação sobre a área a ser estudada antes de se iniciar o processamento. (CAMPBELL, 2002; LILLESAND *et al.*, 2004). Essas informações são fornecidas pelo usuário durante o processo de treinamento.

As etapas de um processo de classificação supervisionada são resumidas por Gonçalves (2009, p. 41):

1. Determinar o conjunto de tipos de cobertura terrestre sobre o qual a imagem será classificada, ou seja, determinar as classes de informação.
2. Escolher amostras representativas de *pixels* (áreas de treinamento) para cada uma das classes de informação. As amostras são selecionadas por um analista diretamente sobre a imagem. Normalmente, várias amostras são selecionadas para uma mesma classe, para assegurar que os *pixels* a ela pertencentes sejam realmente

representativos para a classe, ou seja, envolvam todos os seus atributos espectrais.

3. Utilizar as amostras das classes de informação para estimar os parâmetros do classificador particular (algoritmo) a ser utilizado.

4. Usando o classificador treinado, classificar todos os *pixels* da imagem dentro de uma das classes de informação desejadas.

5. Produzir mapas temáticos que apresentem sumários dos resultados da classificação

Novo (2010, p. 317) destaca os seguintes procedimentos utilizados na classificação supervisionada para que se possa obter bons resultados:

- 1) a escolha do melhor conjunto de bandas espectrais para o objeto de interesse;
- 2) localização precisa de áreas de ‘treinamento’;
- 3) determinação do relacionamento entre o tipo de objeto e o nível digital das bandas escolhidas;
- 4) a extrapolação deste relacionamento para toda a cena
- 6) a avaliação da precisão da classificação realizada.

Conforme Novo (2010) afirma, existem diversos algoritmos que se baseiam na divergência das assinaturas das classes que serão discriminadas, que podem ser utilizados para identificar o melhor conjunto de bandas espectrais para se utilizar na classificação, sem que a precisão da mesma seja comprometida. Outro método utilizado na seleção deste conjunto de bandas espectrais, que pode ser utilizado para a discriminação do objeto de interesse, é a estimativa da correlação entre as bandas.

Na fase de treinamento, o analista identifica amostras representativas da informação desejada e desenvolve uma descrição numérica das classes espectrais de cada tipo de cobertura de solo de interesse na área de estudo. Logo, cada *pixel* existente no conjunto de dados (imagem) é comparado com esta descrição numérica das classes espectrais e rotulado com o nome daquela a que ele mais se assemelha. (LILLESAND *et al.*, 2004). Vale ressaltar que as amostras deverão ser representativas das características espectrais das classes e homogêneas no que diz respeito à categoria informativa a ser representada. (CAMPBELL, 2002). Nesse contexto, Meneses e Sano (2012) afirmam

que podem ser identificadas inúmeras classes durante o processo de classificação, entretanto, o analista deve atentar durante a seleção das classes para que as mesmas sejam bem distintas, caso contrário poderá ocorrer muita confusão entre elas.

Após o processo de classificação supervisionada é importante empregar métodos de avaliação estatística da exatidão da classificação, com a intenção de determinar a qualidade do resultado da classificação. Estas validações estão diretamente condicionadas à disponibilidade de dados de campo (NOVO, 2010; SHIMABUKURO, 1996). Nesse contexto, Novo (2010) ressalta que a aquisição destes dados, idealmente deveria ser adquirida simultaneamente à aquisição das imagens de satélite, no entanto, este processo de aquisição dificilmente é executado em decorrência dos elevados custos envolvidos. Os custos tornam-se mais elevados principalmente quando o objeto estudado se modifica rapidamente com o tempo, como por exemplo, os corpos hídricos. Contudo, Novo (2010) afirma ainda que, quando o objeto de estudo trata-se de uso da terra, culturas agrícolas ou unidades geológicas, a simultaneidade das informações não é um requisito essencial. Novo (2010, p.320) ainda menciona que “a forma mais utilizada para representar a exatidão de classificação é a comparação do mapa derivado da imagem com um mapa de referência a partir da utilização de uma matriz de erro, também conhecida como matriz de confusão ou tabela de contingência”.

A classificação supervisionada possui algumas vantagens em relação à classificação não supervisionada Campbell (2002) destaca os seguintes pontos:

- a) o operador possui o controle do conjunto de classes de informação selecionado para uma região geográfica específica existente na imagem. Esta qualidade é importante se o interesse do usuário for comparar classificações de imagens de uma mesma área obtidas em épocas diferentes, ou quando há necessidade da classificação ser compatível com as regiões vizinhas;
- b) a classificação supervisionada está ligada a áreas específicas de identidade conhecida, determinada através do processo de seleção de áreas de informação;
- c) o operador não tem o problema de combinar categorias espectrais no mapa final com as categorias de informação de interesse, já que esta tarefa é conduzida durante o processo de seleção de dados de treinamento;

d) o operador pode detectar erros graves na classificação, examinando os dados de treinamento para determinar se eles foram corretamente classificados pelo procedimento.

No entanto, as desvantagens e limitações são inúmeras (CAMPBELL, 2002; GONÇALVES, 2008), em decorrência de:

- a) a estrutura de classificação imposta pelo operador sobre os dados da imagem pode não ser condizente com a realidade das classes reais. As classes definidas pelo operador podem não ser distintas ou bem definidas no espaço multidimensional, dificultando assim o processo de classificação da imagem;
- b) as variações que podem ocorrer nos atributos espectrais das classes, principalmente em decorrência da natureza desta classe ou fatores como sombreamento topográfico e presença de outros materiais, podem contribuir para uma seleção de amostras de treinamento pouco representativas para aquela classe de informação;
- c) para o processo de classificação supervisionada, o operador deve ter conhecimento da área estudada e das classes de interesse. Para tanto, o ideal seria que esta observação de campo fosse efetuada durante a passagem do satélite para posteriormente adquirir a imagem. Entretanto, dados representativos da verdade terrestre são de complexa aquisição, principalmente se a área a ser classificada for grande, complexa e inacessível.
- d) a classificação supervisionada pode não ser capaz de reconhecer e representar categorias especiais ou únicas, possivelmente porque o operador as desconhece ou porque ocupam pequenas áreas sobre a imagem.

Inúmeras abordagens matemáticas para reconhecimento de padrões espectrais foram desenvolvidas para implementar a estratégia básica de classificação supervisionada de imagens de sensoriamento remoto. No entanto, os métodos supervisionados mais empregados são os classificadores estatístico de Máxima Verossimilhança (Maxver) e de Redes Neurais.

### 2.5.2.1 Classificador estatístico – Máxima Verossimilhança (Maxver – Maximum Likelihood)

O classificador por máxima verossimilhança é um dos algoritmos de classificação supervisionada mais utilizado pela comunidade do sensoriamento remoto. Este algoritmo considera a ponderação das distâncias entre as médias dos valores dos *pixels* das classes, utilizando parâmetros estatísticos. O classificador de máxima verossimilhança utiliza os dados de formação, como um meio de estimativa de médias e variâncias das classes, os quais são então utilizados para estimar as probabilidades. (CAMPBELL, 2002).

Este classificador assume que todas as classes nas bandas possuem distribuição normal e calcula a probabilidade de um *pixel* pertencer a um dado conjunto de classes pré-definidas, atribuindo o *pixel* para a classe cuja probabilidade se mostrou mais elevada. (LILLESAND *et al.*, 2004; MENESES; SANO, 2012). Assim, um conjunto de probabilidades é computado para um *pixel* na posição  $x$  do espaço multiespectral, revelando as possibilidades relativas de o *pixel* pertencer a cada classe disponível ( $p(x|\omega_i)$ ). A Equação 23 representa como é realizada a classificação de um ponto  $x$ . (RICHARD; JIA, 2006):

$$x \in \omega_i \text{ se } p(x|\omega_i)p(\omega_i) > p(x|\omega_j)p(\omega_j) \text{ (Eq.23)}$$

Onde:

probabilidade  $p(x|\omega_i)$  dá a possibilidade de  $x$  pertencer à classe ( $\omega_i$ );

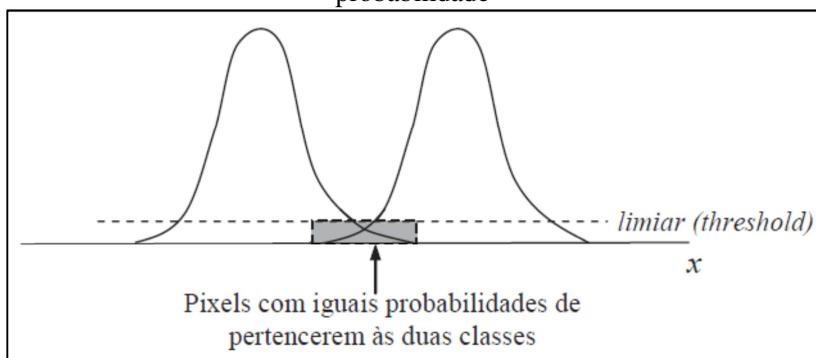
$p(\omega_i)$  probabilidade (conhecida das áreas de treinamento) de a classe ocorrer na imagem.

Neste momento, a menos que seja definido um limiar, todos os *pixels* serão classificados. Conforme Meneses e Sano (2012) afirmam, quando ocorrem situações ruins de classificação, faz-se necessário o uso de um limiar. Meneses e Sano (2012, p.202) afirmam ainda que “essas situações surgem se as classes espectrais se sobrepõem ou se conhecendo que existem outras classes, não há, contudo, suficientes áreas de treinamento para estimar com confiança os parâmetros de suas distribuições”. Assim, para estabelecer um limite para o processo de decisão de separabilidade, o limiar é aplicado. Tem-se então (Equação 24):

$$p(x|\omega_i)p(\omega_i) > p(x|\omega_j)p(\omega_j) \text{ e } p(x|\omega_j)p(\omega_j) > \text{limiar} \text{ (Eq 24)}$$

A sobreposição das classes espectrais ocorre com frequência, já que muitas vezes os usuários tendem a classificar *pixels* que são espectralmente semelhantes e não aqueles que são diferentes o suficiente para serem classificados facilmente e com precisão. No entanto ao aplicar o limiar é possível remover este erro questionável de classificação. Na Figura 7 observam-se duas curvas que representam a distribuição de probabilidade de duas classes. Nota-se ainda a existência de uma sobreposição, que indica que alguns *pixels* têm iguais probabilidades de pertencer às duas classes. Este fato resultaria em uma classificação baixa se o limiar não fosse aplicado. Assim, a porcentagem de *pixels* da distribuição de probabilidade de uma classe que será classificada como pertencente a essa classe, será indicada pelo limiar que é sempre um valor real positivo. Todos os *pixels* que estiverem abaixo deste limiar não serão considerados como pertencentes a uma classe analisada. Como este limiar é estabelecido pelo usuário, o mesmo tem a possibilidade de variar o rigor da classificação, sendo que, quanto menor for o limiar, mais rigorosa será a classificação.

**Figura 7** - Condição em que *pixels* serão pobremente classificados quando se situam nas extremidades da curva de distribuição de probabilidade



Fonte: Meneses e Sano (2012).

É necessário que um número significativo de *pixels* seja utilizado para cada conjunto de treinamento para que a classificação por máxima verossimilhança seja considerada precisa. Para que as estimativas dos elementos vetor média e matriz de covariância,

utilizados para a classificação por máxima verossimilhança, tenham para sua formulação uma base que possa ser considerada confiável, é essencial que este número de *pixels* seja superior a centenas. (GONÇALVES, 2009). Como este é um classificador que se baseia em probabilidade, recomenda-se que os números de *pixels* por classe de amostragem sejam semelhantes e representativos de cada classe. (MENESES; SANO, 2012).

Este classificador pode ser considerado eficiente já que as classes de treinamento são utilizadas para estimar a forma da distribuição dos *pixels* contidos em cada classe no espaço de  $n$  bandas e a localização do centro de cada classe.

A dispersão dos *pixels* em uma classe de treinamento pode representar uma limitação para este algoritmo. Quando isto ocorre, a matriz de covariância irá apresentar valores elevados.

A principal desvantagem de classificação máxima verossimilhança é o elevado número de cálculos necessários para classificar cada *pixel*. Sobretudo quando se utiliza um grande número de bandas espectrais, e ainda, se deseja diferenciar inúmeras classes espectrais, contudo, algumas medidas podem ser tomadas com o intuito de tornar este classificador mais eficiente. (LILLESAND *et al.*, 2004):

- a) antes da implementação da tabela de pesquisa de tais algoritmos, deve-se ter a identidade das categorias para todas as combinações possíveis de valores digitais que ocorrem na imagem, com isto o cômputo estatístico é feito apenas uma vez para cada combinação. A categorização de cada *pixel* da imagem torna-se uma questão de indexar a localização do seu nível de cinza na tabela de consulta;
- b) o uso de técnicas, como análise discriminante canônica, permite a redução da dimensionalidade de dados. Com a redução da dimensão do conjunto de dados utilizado para realizar a classificação reduz também a complexidade dos cálculos necessários para este tipo de classificação;
- c) classificadores em camadas também têm sido utilizados para simplificar os cálculos de classificação e manter sua precisão.

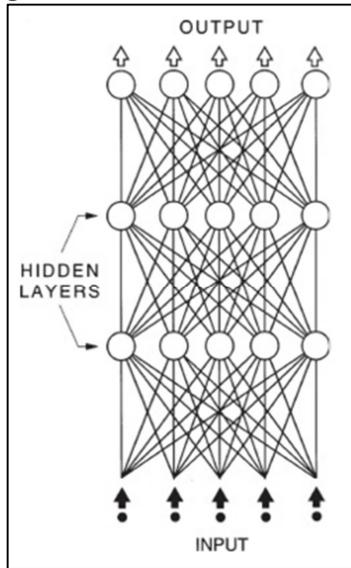
### 2.5.2.2Redes Neurais Artificiais

Redes neurais artificiais (RNA) são programas computacionais projetados para simular processos de aprendizagem

humanos através da criação e reforço das ligações entre os dados de entrada e de saída. São estas ligações, ou caminhos, que formam a analogia com o processo de aprendizagem humana em que as associações repetidas entre entrada e saída no processo de formação reforçam vínculos, ou caminhos, que podem então ser utilizados para conectar-se a entrada e saída na ausência de dados. Assim, RNA apresentam modelos matemáticos que visam à solução de problemas, baseando-se na organização de neurônios. (HAYKIN, 1994).

Normalmente, as redes neurais são dispostas em camadas (Figura 8) que definem sua estrutura topológica ou sua arquitetura. Assim, as RNA podem ser compostas de três tipos de camadas: uma camada de entrada, uma camada oculta e uma camada de saída. (CAMPBELL; WYNNE, 2011; JENSEN, 2009).

- a) os neurônios da camada de entrada podem ser os valores de reflectância multiespectrais dos pixels individuais além de sua textura, rugosidade da superfície, elevação do terreno, etc. As RNA são projetadas para trabalhar com grandes volumes de dados, incluindo muitas bandas e datas de observações multiespectrais, juntamente com dados auxiliares relacionados;
- b) a utilização de neurônios na camada intermediária permite a simulação de padrões não-lineares nos dados de entrada. Estas são consideradas extratoras de características;
- c) um neurônio da camada de saída pode representar um único mapa temático, já que é nesta onde o resultado final é concluído e apresentado. Assim, o valor de saída do neurônio será o resultado da comparação entre o seu valor de ativação e um determinado valor de limiar definido previamente.

**Figura 8 - Redes Neurais Artificiais**

Fonte: Campbell e Wynne (2011).

Os modelos de redes neurais possuem uma etapa de treinamento, onde os pesos são ajustados de acordo com os padrões apresentados. Assim, durante a fase de treinamento, é estabelecida uma associação entre dados de entrada e de saída através do estabelecimento de pesos dentro de uma ou mais camadas intermediárias.

Durante a fase de treinamento da classificação, as características espectrais e auxiliares de cada *pixel* na cena são introduzidas nos neurônios de entrada da rede neural. A rede neural avalia cada *pixel* usando os pesos armazenados nos neurônios da camada intermediária para produzir um valor previsto para cada neurônio das camadas de saída. O valor obtido para cada neurônio de saída é um número entre 0 e 1, e fornece o grau de associação do *pixel* pertencente à classe representada por esse neurônio.

O processo de armazenagem destes valores ocorre através da aprendizagem. Nesta fase a rede neural absorve os dados e a partir destes dados modifica seus parâmetros. Assim, gradativamente a RNA aumenta sua capacidade de resposta para o maior número de situações possíveis, adaptando-se assim às diferentes características de um problema. A capacidade de generalização deste conhecimento adquirido é uma das características mais importantes de uma rede neural, já que,

com isto, ela pode fornecer respostas adequadas a padrões de entrada com as quais não foi treinada. (HAYKIN, 1994; JENSEN, 2009).

Existem inúmeros algoritmos existentes para o treinamento de redes neurais. Sendo que essas redes podem ser distinguidas entre redes neurais de camadas simples (*Perceptron*), onde um grupo de neurônios é arranjado em uma camada e as redes neurais *Perceptrons* de multicamadas (*Feedforward MultiLayer Perceptrons*), formadas por diversas camadas intermediárias ou ainda pela combinação de várias redes de camadas simples.

O processo de aprendizagem das redes neurais *perceptrons* de multicamadas, realizado de maneira supervisionada, baseia-se no ajuste dos pesos sinápticos da rede de neurônios de maneira que estes alcancem uma configuração que seja capaz de efetuar o mapeamento desejado. O algoritmo mais utilizado para calcular os elementos da matriz de pesos, de maneira que o erro médio quadrático gerado pela saída da rede seja minimizado é o *backpropagation*.

A principal característica do modelo obtido a partir da união da rede neural *perceptrons* de multicamadas com algoritmo *backpropagation* é que, com este modelo é possível solucionar problemas de padrão complexos, através de funções que mapeiam valores de entrada com valores de saída da rede. O algoritmo *backpropagation*, também chamado de retro-propagação de erro (*error backpropagation*) baseia-se no processo de aprendizagem e corrige o erro durante o processo de treinamento, permitindo que os pesos sejam ajustados em cada uma das camadas da rede. Para ajustar os pesos da rede, o algoritmo *backpropagation* baseia-se no método do Gradiente, bastante conhecido na teoria de otimização. (DUDA *et al.*, 2000).

A definição de um conjunto de pesos que é atribuído arbitrariamente para as conexões de rede envolve uma fase de propagação e outra de adaptação, onde são fornecidos à rede padrões de entrada e a saída correspondente. Inicialmente, na fase denominada propagação, o primeiro padrão de entrada é propagado através de suas camadas para computar uma saída para cada elemento de processamento. As saídas dos nós da última camada são, então, comparadas com as saídas desejadas e, a partir disso, são calculados os termos de erro. Logo, na fase de adaptação ocorre uma retro-propagação desse erro. Assim é computado na saída um sinal de erro que será transmitido de volta para cada neurônio existente na camada intermediária que contribuiu para a saída obtida. Com isto, cada camada intermediária recebe parte do erro total, de acordo com a contribuição relativa que o neurônio teve na saída gerada. Nesse sentido o

aprendizado deste modelo se baseia na propagação retrógrada do erro para níveis superiores de rede. (DUDA *et al.*, 2000; GALO, 2000; HAYKIN, 1994).

Este processo se repete em todas as camadas, sendo que, quanto maior for o número de iterações, menor será o erro e maior será o tempo de processamento. Nesse contexto, deve-se atentar para alguns problemas inerentes ao modelo de retro-propagação, como: o longo período de treinamento e a paralização da rede em decorrência do ajuste dos pesos em valores elevados (VIEIRA, 2000). Entretanto, uma alternativa a estes problemas chamada “momentum” tem sido amplamente utilizada e mostra-se eficiente em alguns casos. Esta visa a redução do tempo de treinamento assegurando maior grau de estabilidade para a rede por meio da especificação da quantidade do velho peso que será acrescentada para o novo peso (DUDA *et al.* 2000; HAYKIN, 1994).

## 2.6 DETECÇÃO DE MUDANÇA DE PAISAGEM

Os seres humanos estão presentes em todos os ecossistemas da Terra, alterando-os e causando impactos sob a biodiversidade tanto local quanto global, causando mudanças significativas nas condições climáticas locais, perda de diversidade biótica e saúde e funcionamento dos ecossistemas. (VITOUSEK *et al.*, 1997). Nesse contexto, as relações do ser humano com o meio ambiente e os impactos causados nestes ambientes naturais, tem despertado o interesse de estudiosos no que se refere à identificação de padrões de mudanças no uso e cobertura da terra.

A partir de 1970 houve um avanço nestes estudos em decorrência do aumento do desmatamento de florestas tropicais e do impacto disto em níveis globais. Atualmente, o escopo das pesquisas abrange não somente questões referentes ao desmatamento, como também problemáticas direcionadas a perda de biodiversidade, degradação do solo, emissão de gases de efeito estufa, capacidade biológica dos sistemas naturais, expansão urbana, entre outros. (LAMBIN; GEIST, 2006). Com isto, as pesquisas visam não somente o entendimento dos processos dos usos da terra como também a elaboração de modelos preditivos para simular o comportamento dos sistemas ambientais e a partir disto propor medidas para prevenir ou reverter possíveis mudanças.

De maneira geral, os modelos possuem, a partir de generalizações de alguns dados, a capacidade de simular algumas

condições ambientais reais, com o principal intuito de gerar cenários futuros, explorar e avaliar cenários alternativos e ainda indicar a localização ideal para determinadas situações. (FISCHER; SCHOLTEN, 1994; MAANTAY; ZIEGLER, 2006). Sendo assim, estas ferramentas de análises preditivas possuem fundamental importância para o planejamento ambiental e elaboração de políticas públicas que visam mitigar os efeitos da modificação destes ambientes pelas ações humanas.

O Lange Change Modeler (LCM) é uma destas ferramentas amplamente utilizadas para elaborar as análises de mudança de cobertura e ainda elaborar cenários futuros de ocorrência. Esta ferramenta foi desenvolvida pela Clark Labs com o apoio do Andes Center for Biodiversity Conservation da ONG Conservation International, com a finalidade de analisar alterações na paisagem entre duas datas pré-definidas, avaliar as perdas, ganhos e persistências de determinadas categorias de informação, as contribuições de cada tipo de uso do solo para conversão em outra classe e ainda, a partir de dados históricos, modelar e prever as mudanças das categorias de informação. (EASTMAN, 2006).

Nesse contexto, para a análise de previsão de mudança de cobertura do solo inicialmente deve-se utilizar duas imagens classificadas com datas diferentes onde o tempo inicial será o tempo 1 e o tempo final será o 2. A partir disto será possível prever como a cobertura do solo será no futuro, sendo este o tempo de predição 3. Para isto o módulo de programação do LCM divide-se em três etapas: a de Análise de mudança, a do Submodelo de Potencial de Transição e a do Modelo de Previsão de Mudança de Estágio. (EASTMAN, 2006; EASTMAN; TOLEDANO, 2018).

Na análise de mudança, as transições são de um tempo (tempo 1) para outro (tempo 2). Nesta análise são identificadas as transições dominantes que podem ser agrupadas e modeladas, denominadas submodelo. Ainda é possível avaliar o percentual de mudanças de uma classe para outra de um tempo (tempo 1) para outro tempo (Tempo 2), levantando assim as informações de perdas e ganhos de área. Cada grupo ou submodelo de transições pode ser modelado separadamente, entretanto, no final cada submodelo será combinado com todos os submodelos no processo final de previsão de mudanças. (EASTMAN, 2006).

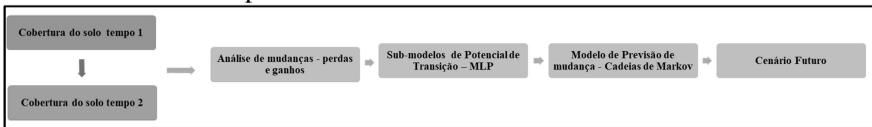
Para gerar os submodelos de potencial de mudança, as transições são modeladas usando uma rede neural perceptron multicamada (MLP), que elabora a probabilidade de transição de uma

classe para outra utilizando o princípio das Redes Neurais, que possibilita a identificação de um padrão de evolução entre o tempo 1 e 2, por meio de amostras das áreas que sofreram transição e áreas que eram passíveis de mudanças e não sofreram transição. Uma vez calibrado, o modelo é usado para prever cenários futuros. (EASTMAN, 2006).

Para a previsão da mudança das classes são utilizadas as taxas históricas de mudança e o modelo de potencial de transição. Assim, o LCM pode prever um cenário futuro para uma data especificada. (EASTMAN, 2006). A quantidade de mudanças que ocorrerão geralmente é determinada com base no processo de predição das Cadeias de Markov. Estas são modelos matemáticos que expressam a probabilidade de se obter um determinado estado num tempo definido, dependendo apenas do estado observado num período de tempo. (PAEGELOW; OLMEDO, 2008).

A Figura 9 apresenta a sequência das etapas para elaboração de cenários futuros de mudanças nas categorias de informação analisadas (coberturas do solo).

**Figura 9** - Estrutura de funcionamento do LCM para mudança na previsão de cobertura do solo



Fonte: Elaborada pela autora.

Assim, são introduzidos na entrada deste modelo dois tempos de um mesmo parâmetro (cobertura do solo no tempo 1 e cobertura do solo no tempo 2), cada qual com suas classes definidas. Ao inserir este parâmetro referente a tempos distintos, há possibilidade de inicialmente se analisar através de gráficos o aumento ou diminuição das classes do mapeamento, bem como a mudança dessas classes para outras ou o seu aumento sob as demais. Após esta análise inicial é possível gerar mapas com esta informação a fim de verificar onde espacialmente ocorreram estas mudanças.

Na sequência são gerados os submodelos de potencial transição, neste momento o modelo apresenta uma relação de todas as possíveis transições de uma classe para outra. Assim, após a análise de perdas e ganhos, o operador pode separar as transições de maior interesse para que ele possa gerar os submodelos com os potenciais de transição

utilizando o “*MLP Neural Network*”. Para isto, as classes de transição que operador deseja analisar devem ser convertidas para um conjunto de variáveis *booleanas*. O operador ainda pode informar ao modelo se estas classes variáveis são estáticas e portanto não possuem mudanças dependentes de outras informações ao longo do tempo ou se são dinâmicas, onde a sua mudança está atrelada a outra informação, como por exemplo a diminuição de áreas de vegetação natural e o aumento da agricultura ou o avanço de determinado tipo de vegetação e as condições climáticas e de solo. Ao se executar este modelo utilizando redes neurais, são extraídas amostras dos dois mapas de cobertura de tempos diferentes das classes que foram submetidas às transições modeladas, gerando os mapas com as potenciais mudanças de uma classe de cobertura para outra.

A partir disto é possível gerar a modelagem de previsão de mudança para estas classes utilizando modelos de transição. O LCM disponibiliza a utilização do modelo de predição baseado nas Cadeias de Markov, que indica a quantidade de mudança (em hectares, metros, quilômetros, entre outras). Este procedimento determina o tamanho da área que uma classe poderia perder/aumentar em relação a outra, bem como onde estas mudanças ocorreriam. Ao gerar este modelo de predição utilizando Cadeias de Markov, tem-se como resultado uma matriz que aponta a probabilidade que cada uma das classes de cobertura da terra possui para mudar para outras classes. Vale ressaltar que a Cadeia de Markov é um processo estocástico onde a situação da mudança de classes futura é dependente apenas da situação atual, entretanto o LCM possibilita que o operador utilize uma variável aleatória e temporal, conhecida como tempo de parada, para gerar os cenários de mudança. (FERRARI; GALVES, 2000).

Vale ressaltar que o LCM ainda disponibiliza uma ferramenta para validação do modelo, para tanto o operador, anteriormente à previsão do cenário, deve gerar o mesmo procedimento para previsão de cenários tendo como tempo final o tempo atual. Assim será possível verificar as falhas do modelo, já que o mesmo indica as áreas em que foram previstas mudanças e as mesmas não ocorreram (*false alarm*) ou o contrário (*misses*), ou ainda as áreas em que o modelo previu mudança e as mesmas de fato ocorreram (*hits*).

## 2.7 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DA CLASSIFICAÇÃO DE COBERTURAS DA TERRA

Existem diversos índices utilizados para verificar a acurácia das classificações de coberturas da terra, entretanto, o índice Kappa foi adotado pela comunidade de sensoriamento remoto como uma medida útil da precisão da classificação e tem sido amplamente utilizado para validar os resultados obtidos por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

A análise Kappa é uma técnica multivariada discreta utilizada na avaliação da precisão de um determinado conjunto de dados, onde estatisticamente é determinado se uma matriz de erro é significativamente diferente da outra (Equação 25). (CONGALTON; GREEN, 2009).

$$\hat{k} = \frac{\sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k (n_{i+} n_{+i})}{n^2 - \sum_{i=1}^k (n_{i+} n_{+i})} \quad (\text{Eq.25})$$

Onde:

- $n_{ii}$  – Número total de amostras corretamente classificadas da classe  $k$ ;
- $n_{i+}$  – Número total de amostras classificadas da classe  $k$ .

Congalton e Green (2009) definem limiares para apontar o desempenho da classificação gerada levando em consideração os valores de Kappa obtidos (Tabela 5).

**Tabela 5 - Conceito de desempenho do Índice Kappa**

Valor do Kappa	Concordância
$K < 0$	Péssimo
$0,0 < K < 0,2$	Ruim
$0,2 < K < 0,4$	Razoável
$0,4 < K < 0,6$	Bom
$0,6 < K < 0,8$	Muito Bom
$0,8 < K < 1,0$	Excelente

Fonte: Congalton e Green (2009).

Analisar a concordância de uma categoria individual dentro da matriz pode ser importante para a avaliação da acurácia da classificação, para tanto, uma variação do índice Kappa, chamado

Kappa Condicional é utilizada. O Kappa Condicional pode ser calculado para cada classe, seja por linha avaliando os erros de comissão (precisão do usuário) (Equação 26) ou por coluna avaliando os erros de omissão (confiabilidade do produtor) (Equação 27). Com isto é possível determinar quais classes foram bem mapeadas e quais não foram. O cômputo do Kappa Condicional é semelhante ao do Kappa geral, entretanto o mesmo é restrito a uma linha ou coluna. (ROSSITER, 2004).

$$\hat{k}_{usuário} = \frac{nn_{ii} - n_i + n_{+i}}{nn_{+i} - n_i + n_{+i}} \quad (\text{Eq.26})$$

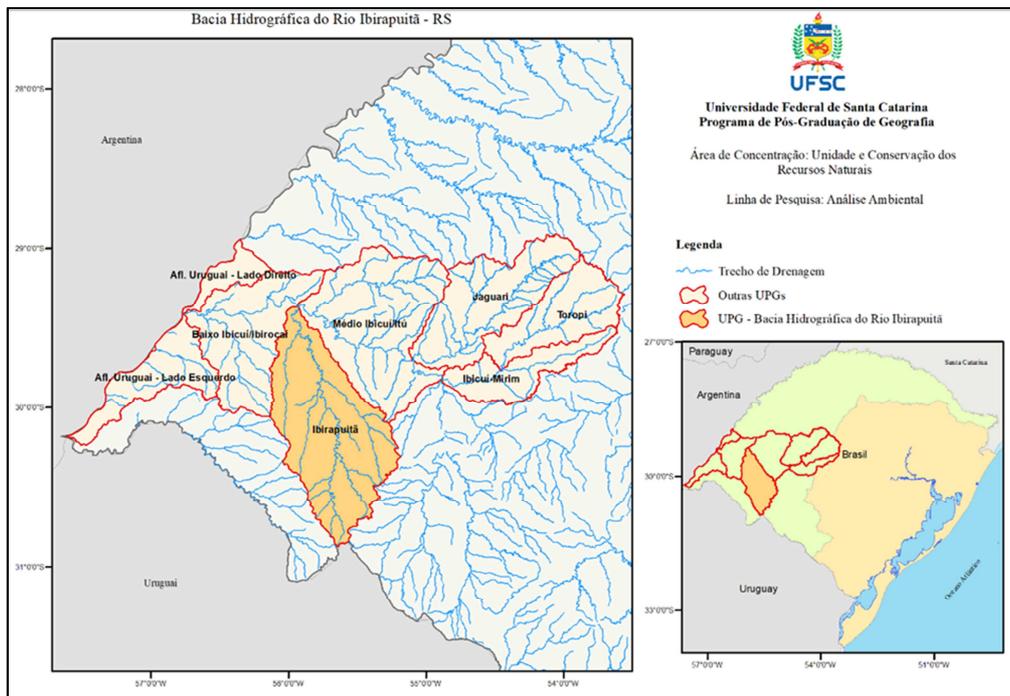
$$\hat{k}_{produtor} = \frac{nn_{ii} - n_i + n_{+i}}{nn_{i+} - n_i + n_{+i}} \quad (\text{Eq.27})$$



### **3. ÁREA DE ESTUDO: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBIRAPUITÃ-RS**

A bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã (Figura 10) é uma Unidade de Planejamento e Gestão (UPG) da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí que está contida na região hidrográfica do Uruguai, situando-se na região Oeste do Estado do Rio Grande do Sul. Localiza-se entre os paralelos 29°17'27" e 30°51'15" de latitude sul e os meridianos 55°07'47" e 56°12'40" de longitude oeste. Possui uma área de drenagem de 7.793 km<sup>2</sup>, sendo que seu principal formador é o rio Ibirapuitã.

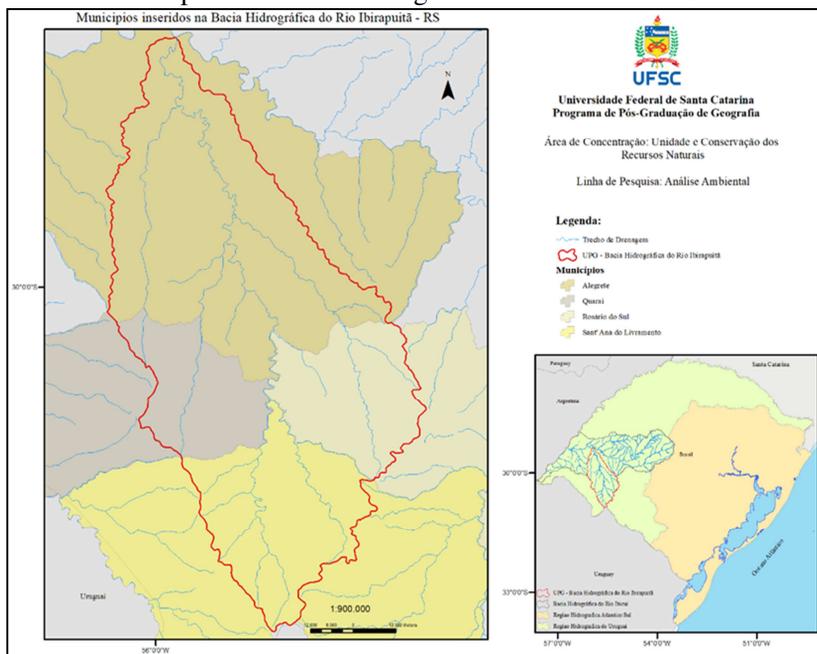
**Figura 10** - Unidade de Planejamento e Gestão (UPG)- Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí -RS



Fonte: Elaborada pela autora.

A Bacia do Rio Ibirapuitã é a maior UPG da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí, representando cerca de 22% de sua área. Esta bacia abrange 4 municípios, sendo eles: Alegrete, Santana do Livramento, Rosário do Sul e Quaraí (Figura 11).

**Figura 11 - Municípios inseridos na UPG Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí -RS**



Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com o Censo Demográfico elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2010, a bacia hidrográfica possuía população de aproximadamente 78 mil habitantes, sendo que destas 89,6% em domicílio urbano (69.611 habitantes) e 10,3% em domicílio rural (8.033 habitantes). O grau de urbanização desta bacia está acima da média estadual (85,1%) e nacional (84,4%). (IBGE, 2010).

Em termos econômicos, a bacia está fortemente condicionada pelo seu histórico de ocupação. A formação regional é produto histórico da sociedade pastoril desde a sua origem, a partir de uma estrutura agrária formada por latifúndios na maior parte dos municípios. A base

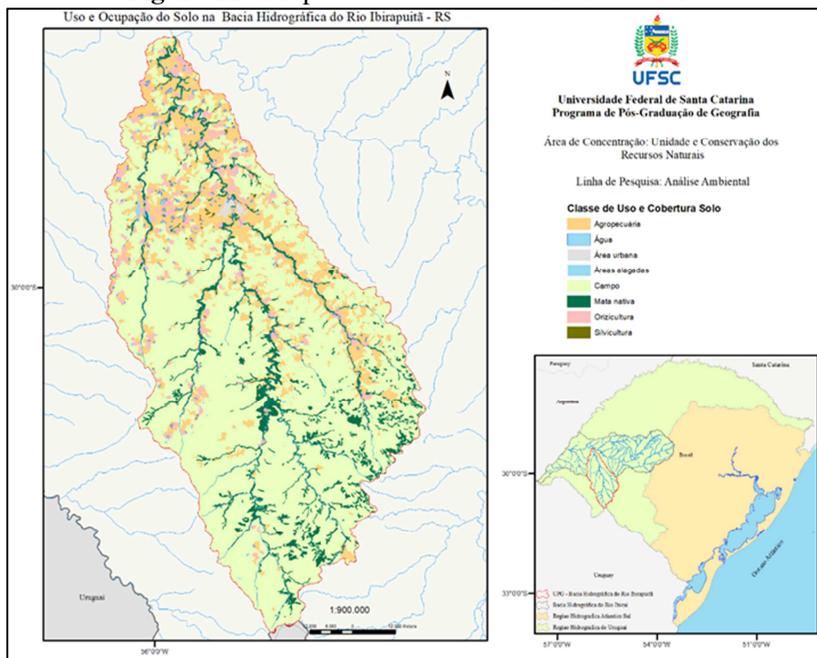
produtiva é constituída, basicamente, por carne e arroz irrigado, fazendo com que o setor agropecuário corresponda a cerca de 85 % da economia da bacia. (PROFIL ENGENHARIA E AMBIENTE, 2012). Na lavoura temporária de cultivo de arroz, o município de Alegrete destaca-se como sendo o 4º maior produtor do Estado com 350 toneladas/ano. Na pecuária a bovinocultura e a ovinocultura se destacam, sendo que em 2016 o município de Alegrete era o maior produtor de bovinos do estado com uma produção e aproximadamente 646 mil cabeças, seguido pelos municípios, Santana do Livramento (137 mil cabeças), e Rosário do Sul (114 mil cabeças). Na ovinocultura os municípios de Alegrete e Santana do Livramento são os maiores produtores de ovelha na bacia hidrográfica.

Em 2012, por intermédio do Departamento de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Sul, a empresa PROFIL Engenharia e Ambiente Ltda., desenvolveu as etapas A e B do Plano de Utilização dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Ibirapuitã. Um dos produtos entregue pela empresa foi o diagnóstico socioambiental da bacia. Neste diagnóstico determinou-se, para o ano do estudo, o uso do solo e a cobertura vegetal. A empresa utilizou como base a Cobertura Vegetal do Bioma Pampa elaborada no ano de 2008 pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) em conjunto com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), na escala 1:250.000. Inicialmente, foram identificadas 48 classes de cobertura do solo que, posteriormente, foram rearranjadas de maneira que os usos ou coberturas vegetais mais significativos fossem evidenciados. Com isto, através do agrupamento das ocorrências, o número de classes reduziu para oito: Agropecuária, Campo, Mata Nativa, Orizicultura, Silvicultura, Lâmina de Água e Terras Úmidas/Áreas Alagáveis (Figura 12). (PROFIL, 2012):

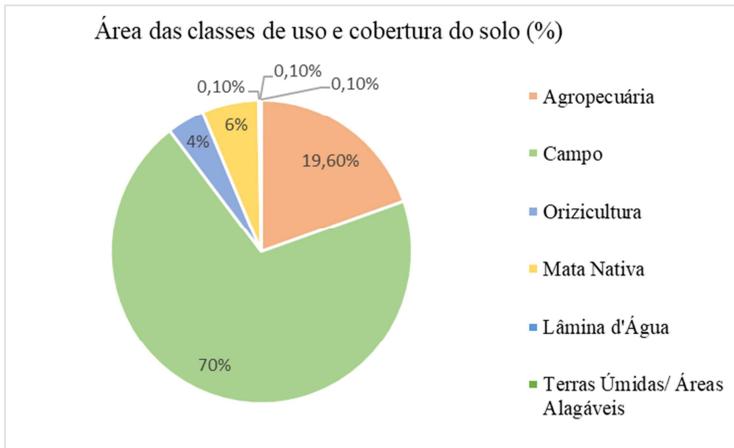
- a) **agropecuária**: inclui as unidades relacionadas à agricultura cíclica e agropecuária em áreas anteriormente cobertas tanto por formações campestres ou florestais.
- b) **campo**: diz respeito às formações predominantemente herbáceas, independente do tipo de unidade fitoecológica (savana, estepe, savana-estépica). As áreas classificadas como campestres apresentam uso antrópico rural em menor escala, a exemplo da pecuária extensiva.
- c) **mata nativa**: predomínio de Cobertura vegetal arbórea, independentemente da unidade fitoecológica e estágio de sucessão.
- d) **silvicultura**: plantio de espécies arbóreas.

- e) **orizicultura**: cultivo de arroz, em áreas irrigadas.  
 f) **lâmina de água**: cursos d'água e corpos d'água (lagos, açudes, barragens). Os açudes considerados têm, no mínimo, 1ha.  
 g) **terras úmidas / áreas alagáveis**: locais em regiões cujo solo é mal drenado, nas proximidades dos cursos d'água. Quanto à cobertura vegetal ocorrente, inclui manchas de hábito herbáceo-arbustivo (em evidência) e arbóreo.

**Figura 12 - Mapa de Classes de Cobertura do Solo**



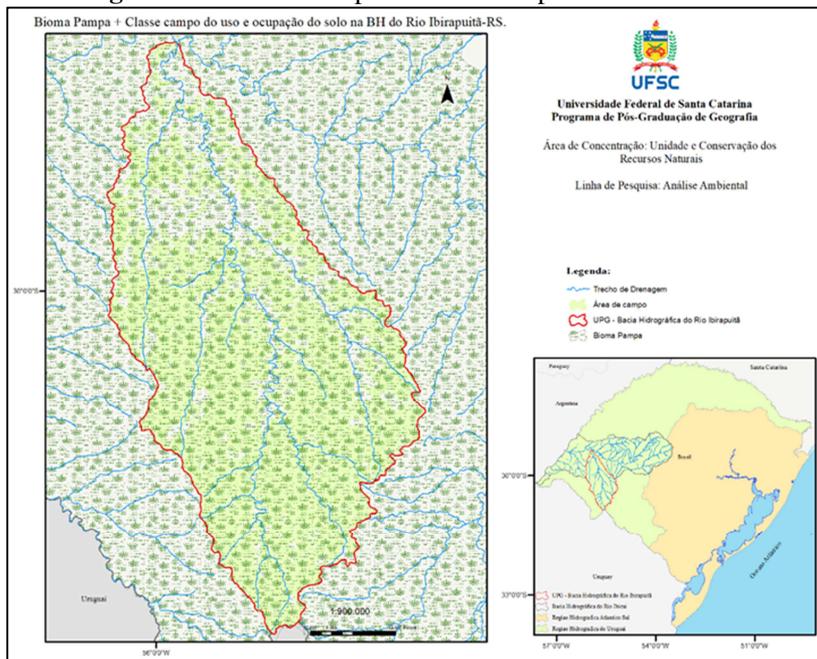
O Gráfico 1, apresenta as áreas ocupadas por cada classe considerada, bem como as suas participações percentuais na área total da Bacia do Rio Ibirapuitã.

**Gráfico1 - Área das classes de Uso e cobertura do solo.**

Fonte: Adaptado de Perfil (2012).

Nota-se que as áreas com agropecuária e campo são predominantes na Bacia (correspondendo juntas a cerca de 90% da área total), sendo que em 70% de sua área encontra-se a classe de campo, tornando-a quase que homogênea. O percentual de mata nativa também é significativo, assim como das áreas ocupadas pelas lavouras de arroz. O Bioma Pampa abrange 100% da área da Bacia, sendo que a classe campo de cobertura do solo é predominante no Bioma (Figura 13).

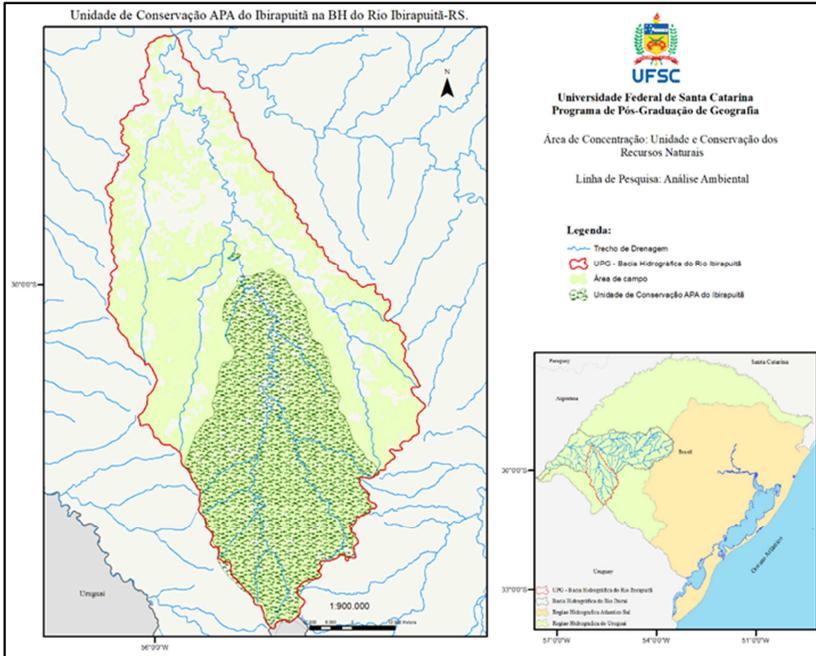
**Figura 13 - Bioma Pampa + Classe campo de uso do solo.**



Vale ressaltar que na classe de campo foram consideradas tanto as pastagens naturais presentes no bioma pampa, quanto as cultivadas, tendo em vistas que ambas servem ao mesmo propósito (pecuária). A Classe de campo, para esta tese, torna-se particularmente interessante já que as áreas mais afetadas pelo Capim Annoni, no Bioma Pampa, são as áreas de campo.

Aproximadamente 40 % da área da bacia é coberta pela Unidade de Conservação Área de Proteção Ambiental Ibirapuitã (Figura 14).

**Figura 14 - Unidade de Conservação APA do Ibirapuitã na Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã-RS**



Fonte: Perfil (2012).

A APA do Ibirapuitã foi criada em 1992, e seu plano de manejo foi instituído em 2012.

#### 4. ESTUDOS DA RESPOSTA ESPECTRAL COM VISTAS A DISCRIMINAÇÃO DA ESPÉCIE EXÓTICA INVASORA CAPIM ANNONI (*ERAGROSTIS PLANA*)

Nas últimas décadas, o Estado do Rio Grande do Sul perdeu metade da sua superfície originalmente coberta pelos campos naturais para outros tipos de cobertura vegetal. (MEDEIROS *et al.*, 2009; MEDEIROS; FOOTH, 2007). Parte desta perda pode ser atribuída a espécies exóticas inseridas no Estado, que ao se caracterizarem espécies exóticas invasoras e se disseminaram sem controle, ocasionam perdas ambientais e econômicas. (DUSSEUX *et al.*, 2014).

Em 23 de junho de 2009, no Estado do Rio Grande do Sul entra em vigor a Lei Nº 13.187 que institui o Programa de Combate do Capim Annoni e, em outubro de 2013, é publicada a portaria 79 da Secretaria Estadual do Meio Ambiente que destaca uma lista oficial de espécies exóticas invasoras existentes no estado. Nesta portaria a espécie *Eragrostis plana*, mais conhecida como Capimannoni, tendo em vista suas características de espécie invasora, é enquadrada em classe 1, que significa que esta espécie não pode ser produzida, doada ou comercializada. (RIO GRANDE DO SUL, 2009; RIO GRANDE DO SUL, 2013).

As rápidas mudanças impressas na paisagem pelas ações da humanidade, principalmente na paisagem rural, fazem surgir novas discussões que envolvem a acelerada ocupação do espaço geográfico, aproveitamento dos recursos naturais disponíveis e degradação desse espaço por sua má utilização. Com estas discussões surgem também demandas de estudos específicos nesta área, que visam identificar causas de alguns problemas e ainda promover ações a fim de mitigá-las de maneira rápida, eficiente e com possibilidade de baixos custos. É nesse contexto que a aplicação de dados de sensoriamento remoto a estudos da vegetação torna-se hoje indispensável para o planejamento dos recursos naturais e do meio ambiente como um todo. (BLASCHK *et al.*, 2007).

O sensoriamento remoto é uma tecnologia de coleta automática de dados amplamente utilizada e bem sucedida para o levantamento e monitoramento dos recursos terrestres em grandes escalas, através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética. (FLORENZANO, 2011).

Para utilizar dados provenientes de sensores orbitais, deve-se antes ter conhecimento do comportamento espectral dos alvos da superfície terrestre, bem como dos fatores que interferem nesse

comportamento. Ao se utilizar das informações extraídas de sensores sem se ter o conhecimento do comportamento espectral dos alvos em estudo, corre-se o risco de desprezar faixas espectrais importantes para sua discriminação. Para tanto, a utilização de espectrômetros de campo é essencial para as análises de sensoriamento remoto, pois os mesmos fornecem a base teórica para o uso de sistemas aerotransportados ou orbitais. (NOVO, 2010).

O uso de espectrômetros imageadores de alta resolução espectral tem demonstrado eficiência na medição das características de absorção e reflectância da radiação fotossinteticamente ativa. (JENSEN, 2009; PONZONI *et al.*, 2014).

Assim, a forma que a curva espectral terá em cada uma destas regiões irá depender dos constituintes da folha (Ponzoni *et al.*, 2012). A quantidade de energia eletromagnética que será refletida pela folha está diretamente relacionada aos constituintes específicos da planta, como: pigmentos, quantidade de água na folha, espaços ocupados pela água e pelo ar, maturação ou idade da folha, posição nodal, condições de iluminação e estrutura celular da planta. (MOREIRA, 2007).

Nesse contexto, o presente capítulo teve como objetivo caracterizar espectralmente amostras da espécie exótica invasora Capim Annoni (*Eragrostis plana*) e de espécies de gramíneas identificadas na área estudada, analisando o comportamento das curvas de reflectância e transmitância, com o intuito de identificar quais faixas do espectro eletromagnético são mais significativas para discriminar o Capim Annoni (*Eragrostis plana*) das demais espécies de gramíneas identificadas.

#### 4.1 METODOLOGIA DE TRABALHO

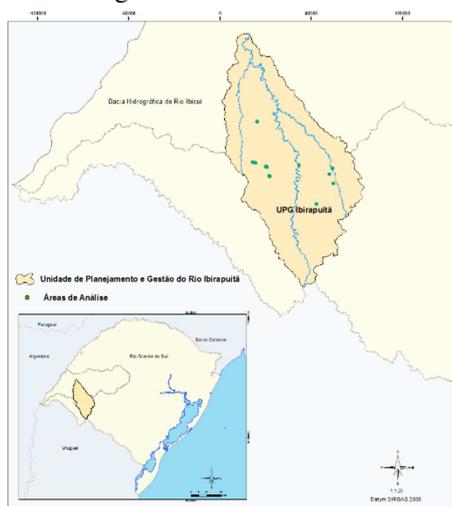
Esta análise tem como área de estudo a Unidade de Planejamento e Gestão Ibirapuitã da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí situada na região Sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 10), entre os paralelos 29°17'27" e 30°51'15" de latitude sul e os meridianos 55°07'47" e 56°12'40" de longitude oeste, possui uma área de drenagem de 7.793 km<sup>2</sup>, sendo que seu principal formador é o rio Ibirapuitã. Esta UPG possui intensa atividade pecuária com 76 % de seu território coberto com campos.

Ao longo da UPG Ibirapuitã foram selecionadas 20 áreas de análise, sendo que para cada uma destas áreas foi definido um raio de 1 km (Figura 15), sendo que o critério de escolha das áreas baseou-se no fato de que em todas as áreas houvesse a existência da gramínea exótica

invasora Capim Annoni (*Eragrostis plana*). Dentro deste perímetro foram identificadas sete espécies de gramíneas: *Andropogon lateralis nees*; *Digitaria ciliaris*; *Digitaria sanguinalis*; *Paspalum notatum*; *Pennisetum setosum*; *Setaria parviflora* e *Sporobolus indicus*.

Vale ressaltar que, de todas as espécies identificadas, somente o Capim Annoni (*Eragrostis plana*), possui características de exótica invasora. As gramíneas foram coletadas no período estival de forma que as plantas apresentam estágios assemelhados de maturação fisiológica e encontram-se sob mesmas condições agronômicas, entretanto crescendo sobre solos diferentes: Solos Litólicos eutróficos, Terra Roxa Estruturada eutrófica, Vertissolo, Planossolo eutrófico e Podzólico Vermelho-Escuro álico.

**Figura 15** - Unidade de Planejamento e Gestão Ibirapuitã da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí



Fonte: Elaborada pela autora.

O fator de reflectância bidirecional (FRB) é uma das grandezas radiométricas mais utilizadas para caracterizar o comportamento espectral dos alvos naturais. Caracteriza-se pela quantidade relativa da radiação eletromagnética que é refletida por um alvo, em determinada condição geométrica de iluminação e visada. (PONZONI *et al.*, 2012).

Assim, foram obtidas as medidas do FRB da face dorsal da folha de cada espécie identificada no interior do perímetro de 1 km das

áreas de análise. Na coleta, foram escolhidas as folhas que ficavam na porção intermediária das touceiras, com o intuito de homogeneizar as amostras quanto aos estágios de desenvolvimento. Vale ressaltar que o fator de reflectância bidirecional das espécies identificadas foi adquirido *in loco*, com as condições reais do ambiente. As folhas foram cuidadosamente posicionadas para que apenas o limbo foliar permanecesse na ponta da pistola do espectrorradiômetro, evitando a nervura central das mesmas. As medidas obtidas constituem um conjunto de arquivos contendo o comprimento de onda na amplitude de 350nm a 2500nm e fator de reflectância correspondente para cada comprimento de onda. Para tanto, utilizou-se o espectrorradiômetro FieldSpec®3 do Laboratório de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Santa Maria-RS (Núcleo de Desenvolvimento de Informações e Geotecnologias).

Para cada espécie de gramínea foram coletadas 30 amostras do fator de reflectância bidirecional que foram utilizadas para gerar as médias das curvas espectrais de cada espécie no software SAMS. A partir dos valores médios de reflectância foram geradas as subtrações da reflectância do Capim Annoni (*Eragrostis plana*) em relação às demais espécies identificadas.

Com o intuito de verificar se houve contrastes consideráveis entre as médias das espécies de gramíneas investigadas e analisar quais foram significativamente diferentes, no software RStudio os resultados das médias foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias foram comparadas pelo teste Tukey, ambos ao nível de significância de 5%.

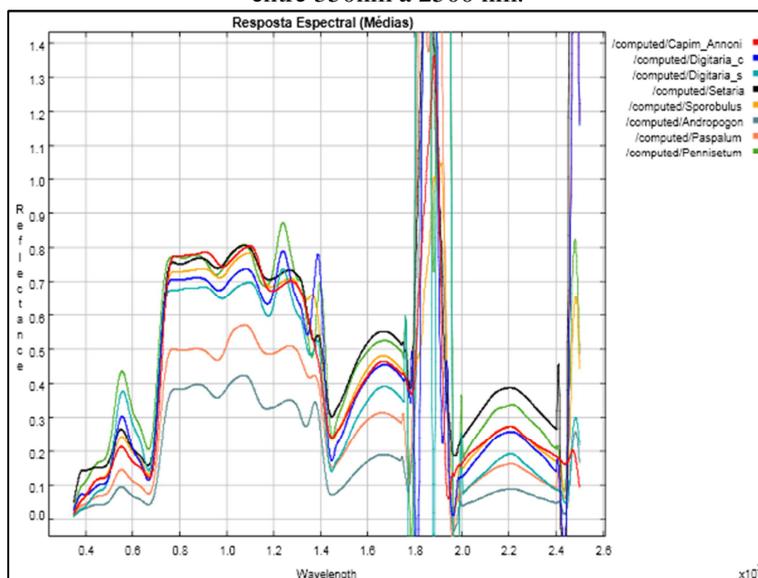
Para tanto, as análises foram elaboradas por regiões do Espectro de reflectância das folhas das espécies analisadas, levando em consideração ainda os intervalos de comprimento de onda de 550nm-680nm e 500nm-900nm, tendo em vista que os mesmos são amplamente utilizados para estudos de vegetação. (PONZONI *et al.*, 2012).

## 4.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando-se a resposta espectral obtida para cada uma das espécies de gramíneas, observa-se que as mesmas apresentam diferenças significativas na região do visível (350nm a 720 nm) e do infravermelho próximo (720nm a 1100nm) (Gráfico 2). Estas regiões indicam o teor de pigmento nas folhas e características relacionadas à sua estrutura celular. Na região espectral do visível nota-se que a maior parte desta radiação que incide sob as folhas das plantas é absorvida pelos seus

pigmentos, ocasionando pequenas variações na quantidade de energia refletida por cada planta. Já na região do infravermelho próximo há pouca absorção da radiação e um significativo espalhamento interno nas folhas e significativa diferença entre as espécies. Ainda, pode-se observar que na região do infravermelho médio (1100nm a 2500nm) ocorre maior reflectância. Observa-se também que a quantidade de energia absorvida na região de 550nm a 670nm é relativamente baixa e não possui moderada diferença entre as espécies. Analisando o comprimento de onda de 500nm a 900nm, utilizado para o cômputo de índices de vegetação, como o NDVI, percebe-se a ocorrência de acentuados valores de energia refletida e que os mesmos se diferem entre as espécies.

**Gráfico 2-** Resposta espectral das gramíneas com comprimento de onda entre 350nm a 2500 nm.

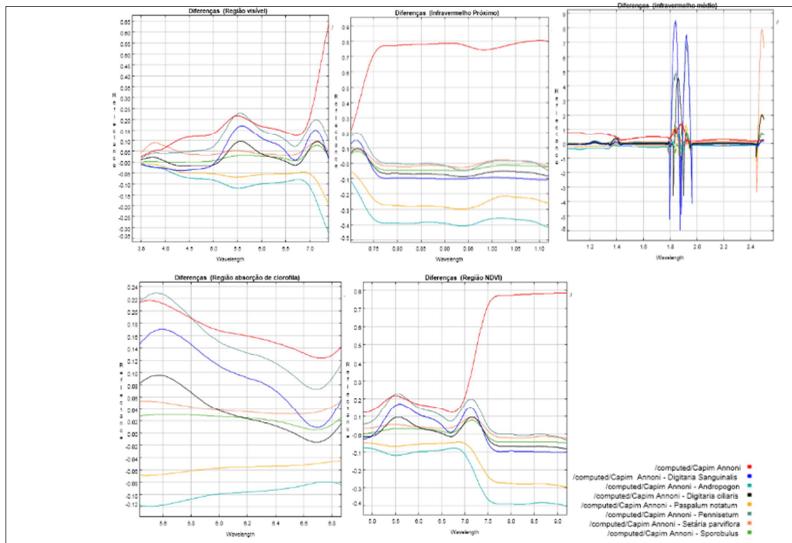


Fonte: Elaborada pela autora.

No que se refere ao Capim Annoni (*Eragrostis plana*), em vermelho no Gráfico 3, estas diferenças tornam-se mais evidentes ao se subtrair os valores de reflectância do Capim Annoni das demais espécies envolvidas na análise. Assim, observa-se que, quando os valores da resposta espectral das demais espécies se aproximam ou coincidem com

0 (Zero), maior é a igualdade entres os valores de reflectância do Capim Annoni.

**Gráfico3** - Resposta espectral com comprimento de onda entre 350nm a 2500 nm, resultante da subtração dos valores de reflectância do Capim Annoni em relação às demais espécies de gramíneas



Fonte: Elaborada pela autora.

As diferenças na resposta espectral de cada espécie são reafirmadas ao se aplicar a análise da variância entre as espécies sob o comprimento de onda entre 350 nm a 2500 nm. De acordo com a Tabela 6, pode-se observar que as médias apresentaram variação significativa entre os valores de reflectância.

**Tabela 6** - Análise da Variância (ANOVA) para o comprimento de onda entre 350nm a 2500 nm nas diferentes espécies de gramíneas.

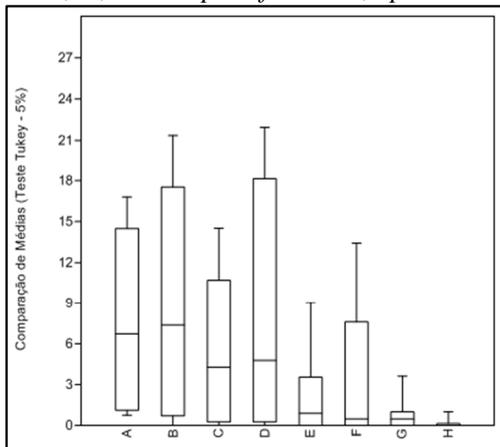
Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Quadrado Médio	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	838,9084	7	119,8440513	26,26913	4,67E-36	2,010121
Dentro dos grupos	78469,2	17200	4,562162756			
Total	79308,11	17207				

Fonte: Elaborada pela autora.

Aplicando o teste de comparação múltipla de médias para o comprimento de onda entre 350nm a 2500 nm, a partir do diagrama de caixas (Gráfico 4), constata-se que todas as espécies possuem diferenças em suas médias bem como variações em seus valores máximos e mínimos de reflectância. Pode-se observar que as espécies que possuem diferenças significativas em relação às demais são: E, *Paspalum notatum flügge*; F, *Pennisetum setosum*; G, *Setaria parviflora* e H, *Sporobolus indicus*. Já as espécies *Digitaria ciliaris* (C) e *Digitaria sanguinalis* (D), apresentaram valores próximos de sua média, que pode ser atribuído ao fato de pertencerem ao mesmo gênero e características semelhantes e o (B) Capim Annoni (*Eragrostis plana*), possui uma média mais elevada que as demais, apresentando portando menor diferença na resposta em sua resposta espectral quando analisado comprimento de onda entre 350nm a 2500 nm.

**Gráfico4** - Diagrama de Caixa: Teste de Tukey para o comprimento de onda entre 350nm a 2500 nm nas gramíneas

- A, *Andropogon lateralis nees*; B, *Capim Annoni (Eragrostis plana)*; C, *Digitaria ciliaris*; D, *Digitaria sanguinalis*; E, *Paspalum notatum*; F, *Pennisetum setosum*; G, *Setaria parviflora* e H, *Sporobolus indicus*.



Fonte: Elaborado pela autora.

As diferenças também são nítidas ao se aplicar a análise da variância para a resposta espectral de cada espécie nos intervalos de comprimentos de onda de 350nm -720nm, 720nm-1100nm, 1100nm-2500nm, 550nm-680nm e 500nm-900nm. (Tabela 7). Com base nesta análise estatística, observa-se que as regiões do visível e do infravermelho próximo são as que apresentam diferenças acentuadas. Esta significativa diferença também é percebida nos intervalos de 550nm-680nm e 500nm-900nm, que estão contidos dentro das faixas do visível e do infravermelho próximo.

**Tabela 7** - Análise da Variância (ANOVA) para intervalos de comprimento de onda entre as diferentes espécies de gramíneas

Comprimento de onda (nm)	F	valor-P	F crítico
350-720	123,81633	5,31E-160	2,012671
720-1100	2903,36912	0,00E+00	2,01259
1100-2500	22,67324	1,01E-30	2,010405
550-680	296,0402362	1,94E-242	2,018368
500-900	65,84212622	5,56E-89	2,01244

Fonte: Elaborado pela autora.

O Gráfico5 apresenta o diagrama de caixa construído a partir dos resultados do teste de comparação múltipla de médias obtidas para a resposta espectral de cada espécie nos mesmos intervalos de comprimentos de onda. Conforme análise de variância, as regiões espectrais do visível e infravermelho próximo apresentaram maiores variações nas médias de reflectância. Comparando as médias do Gráfico5.I, representativa da região do visível, observa-se que com exceção da B, Capim Annoni (*Eragrostis plana*); e C, *Digitaria ciliaris*, todas possuem diferenças significativas em sua média e valores próximos de 0.

Apesar das gramíneas apresentarem maiores diferenças em suas médias na região do infravermelho próximo (Gráfico5.II) com valores próximos a 0 (zero) e significativa diferença entre valores máximos e mínimos, as espécies *Digitaria ciliaris* (C) e *Digitaria sanguinalis* (D) apresentaram médias iguais. Nesta região a resposta espectral da média obtida para a exótica invasora Capim Annoni (B) demonstrou ser significativamente diferente das demais.

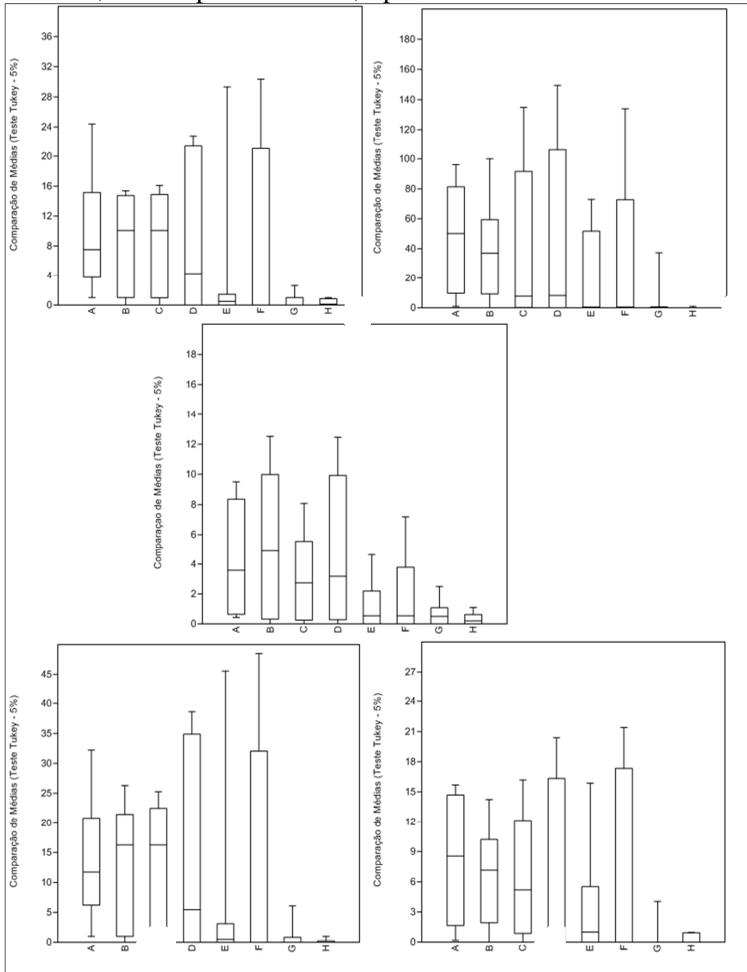
A região do infravermelho médio (Gráfico5.III) possui 4 (quatro) das 8 (oito) espécies analisadas com médias praticamente iguais, são elas: *Paspalum notatum* (E); *Pennisetum setosum* (F); *Setaria parviflora* (G), e *Sporobolus indicus* (H). As espécies *Digitaria ciliaris* (C) e *Digitaria sanguinalis* (D) não possuem diferenças significativas em suas médias. Nesta Região o *Capim Annoni* (B) apresentou média maior que as demais.

O intervalo de 550nm-680nm do comprimento de onda (Gráfico5.IV), apesar de apresentar uma variância significativa, obteve médias altas e iguais para as espécies Capim Annoni (B) e *Digitaria ciliaris* (C), impossibilitando a discriminação entre as mesmas.

Mesmo não apresentando a maior variância em relação aos demais intervalos espectrais, o intervalo 500nm-900nm do comprimento de onda (Gráfico5.V) apresentou acentuada capacidade em discriminar a resposta espectral das espécies, já que a mesma possui valores mais próximos a 0 (zero) com valores de média diferenciado. No que se refere à espécie Capim Annoni (B), constata-se que, por possuir média expressivamente diferente das demais, bem como valor de média baixo, a possibilidade de discriminá-la das demais espécies neste intervalo espectral é significativamente maior.

**Gráfico5** - Diagrama de Caixa: Teste de Tukey para os intervalos de comprimento de onda:

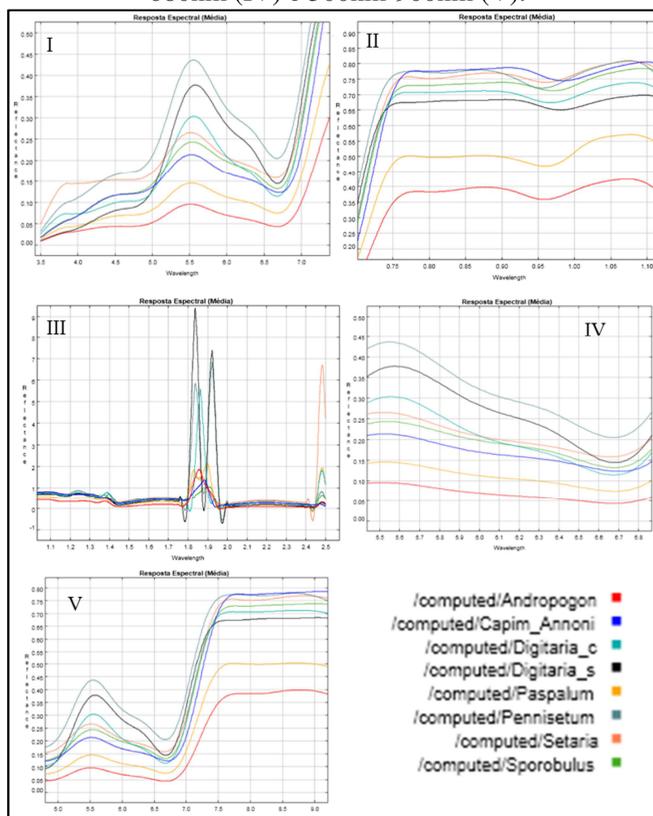
350nm -720nm (I), 720nm-1100nm (II), 1100nm-2500nm (III), 550nm-680nm (IV) e 500nm-900nm (V); nas gramíneas - A, *Andropogon lateralis* nees; B, *Capim Annoni* (*Eragrostis plana*); C, *Digitaria ciliaris*; D, *Digitaria sanguinalis*; E, *Paspalum notatum*; F, *Pennisetum setosum*; G, *Setaria parviflora* e H, *Sporobolus indicus*



Fonte: Elaborado pela autora.

A Gráfico 6 apresenta a média calculada para as respostas espectrais de cada espécie de gramínea. Com base nessa imagem observa-se as nítidas diferenças nas respostas espectrais de cada espécie, evidenciado as baixas probabilidades em se diferenciar as espécies de gramíneas analisadas, em especial o *Capim Annoni*, na região do infravermelho médio. Ao analisar os demais intervalos que compreendem as regiões do visível e do infravermelho próximo percebe-se, no comprimento de onda de 550 nm e 850, significativa diferença na resposta espectral de cada espécie, o que aumenta a possibilidade de discriminar a resposta espectral do *Capim Annoni*.

**Gráfico6** - Resposta espectral obtida com a média das curvas espectrais de cada espécie para os intervalos de comprimento de onda: 350nm -720nm (I), 720nm-1100nm (II), 1100nm-2500nm (III), 550nm-680nm (IV) e 500nm-900nm (V).



Fonte: Elaborado pela autora.

### 4.3 CONCLUSÕES

A partir dos resultados dos métodos estatísticos, constatou-se que as diferenças na resposta espectral de cada espécie evidenciam-se na região do visível e do infravermelho próximo. Estas diferenças estão associadas ao teor de pigmento das folhas e à estrutura celular que variam para cada espécie. Estes constituintes da folha definem a quantidade de energia absorvida e refletida em cada uma destas regiões.

A discriminação espectral das gramíneas estudadas neste trabalho, quando elaborada por meio de instrumentos do sensoriamento, mostrou-se possível ao considerar diferentes intervalos de comprimento de onda. Para tanto, o comprimento de onda no intervalo de 500nm a 900nm, apresentou resultados significativos para diferenciar a gramínea Capim Annoni (*Eragrostis plana*) das demais espécies. Vale ressaltar que este intervalo de comprimento de onda é amplamente utilizado para cálculo de índices de vegetação. Para tanto, sugere-se que em estudos futuros, índices de vegetação sejam aplicados a estas espécies com intuito de identificar diferenças entre as mesmas.

Com isso, é possível concluir que, ao longo do comprimento de onda, existem diferenças na resposta espectral do Capim Annoni quando comparado com as espécies analisadas.

### 4.4 REFERÊNCIAS

BLASCHKE, T.; GLÄSSER, C.; LANG, S. Processamento de imagens num ambiente integrado sig/sensoriamento remoto: tendências e consequências. In: BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento remoto e SIG avançados**: novos sistemas sensores, métodos inovadores. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

DUSSEUX, P. et al. Agricultural practices in grasslands detected by spatial remote sensing. **Environmental Monitoring Assessing**, [S.l.], v. 12, n. 186, p. 8249–8265, Dec. 2014.

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

JESEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução José Carlos Neves Epiphanyo. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

MEDEIROS, R. B.; FOCHT, T. Invasão, prevenção, controle e utilização do capim-Annoni-2 (*Eragrostis plana* Nees) no Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.13, n.1-2, p. 105-114, 2007.

MEDEIROS, R. B.; SAIBRO, J. C.; FOCHT, T. Invasão de capim-annoni (*Eragrostis plana* Nees) no bioma Pampa do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, V. P. et al. (Org.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília, DF: MMA, 2009. p. 317-330.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2007.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. rev. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

PONZONI, F. J. et. al. Local illumination influence on vegetation indices and Plant Area Index (PAI) Relationships. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 6, p. 6266-6282, 2014.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. atual. ampl. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei nº13.187, de 23 de junho de 2009**. Institui o Programa de Combate do Capim Annoni-2 no âmbito do Estado do Rio Grande do Sul, e dá outras providências. 2009. Disponível em: <<http://www.legislacao.sefaz.rs.gov.br/Site/Document.aspx?inpKey=162636&inpCodDispositivo=&inpDsKeywords>>. Acesso em 12 mar. 2015.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Portaria 79, de 31 de outubro de 2013**. Reconhece a lista de espécies exóticas invasoras do estado do Rio Grande do Sul e demais classificações, estabelece normas de controle e dá outras providências. 2013. Disponível em: <[http://www.sema.rs.gov.br/upload/Portaria%20SEMA%20n%C2%BA%2079\\_2013%20reconhece%20a%20lista%20Esp%C3%A9cies%20Ex%C3%B3ticas%20Invasoras%20%20RS%20e%20demais%20classi](http://www.sema.rs.gov.br/upload/Portaria%20SEMA%20n%C2%BA%2079_2013%20reconhece%20a%20lista%20Esp%C3%A9cies%20Ex%C3%B3ticas%20Invasoras%20%20RS%20e%20demais%20classi)>

fica%C3%A7%C3%B5es\_normas%20de%20controle%20e%20outras%20providencias.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2015.

## 5. ESTUDOS DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA DISCRIMINAR A ESPÉCIE EXÓTICA INVASORA CAPIM ANNONI (*ERAGROSTIS PLANA*)

No mundo inteiro, as espécies exóticas representam forte ameaça à biodiversidade, pois inúmeras são as espécies que estão se disseminando sem controle e dominando diferentes ecossistemas, interferindo no equilíbrio destas áreas e modificando inclusive as características naturais da paisagem.

Nas últimas décadas, tem-se constatado a intensificação do processo de degradação do Bioma Pampa por diversos fatores, dentre eles a invasão da gramínea Capim Annoni (*Eragrostis plana*). O Capim Annoni é uma invasora que agride o ambiente, rompe o equilíbrio e torna-se dominante. No Estado do Rio Grande do Sul, esta gramínea não possui um nicho ecológico definido e vegeta em todas as regiões e tipos de solos existentes. O Estado possui condições climáticas e de solo bastante favoráveis ao desenvolvimento desta espécie invasora, a qual não possui ainda inibidores naturais. Estudos realizados no ano 1978 apontaram que cerca de 20 mil hectares do Estado já continham esta gramínea (REIS; OLIVEIRA, 1978), no ano de 2007 este valor foi estimado em 1,5 milhões de hectares, e que, no ano de 2008, esta área poderia aumentar para 2,2 milhões de hectares. (MEDEIROS; FOCHT, 2007).

Com isto, torna-se evidente a rápida e descontrolada disseminação do Capim Annoni no Estado do Rio Grande do Sul, desde a sua introdução. Esta exótica invasora tem modificando o bioma pampa e alterado a paisagem característica dos campos naturais. A detecção desta mudança é um dos requisitos fundamentais para mitigar os efeitos desta invasão, elaborar medidas preventivas de sua disseminação e ainda fornecer subsídios para elaboração de políticas públicas que visam minimizar as consequências desta disseminação tanto para a sociedade quanto para o meio ambiente.

É nesse contexto que a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto a estudos de vegetação, quando associadas a levantamentos de campo, tornam-se imprescindíveis, já que a partir destas aplicações é possível identificar em extensas áreas os ambientes e suas mudanças, de maneira rápida e eficiente, quando comparada com outros métodos, possibilitando ainda detectar e monitorar as mudanças na paisagem.

O uso de índices de vegetação é uma técnica amplamente utilizada em sensoriamento remoto para identificar os tipos de culturas. Estes índices podem fornecer medidas da quantidade e da condição

fenológica da vegetação através de uma análise do comprimento de onda do alvo estudado, quando o dado é coletado a campo, e das bandas espectrais, quando é utilizado um sensor orbital. (EPIPHÂNIO *et al.*, 1990; FRANCO; ROSA, 2004).

O estudo elaborado por Prado *et al.* (2016), ao caracterizar espectralmente o Capim Annoni (*Eragrostis plana*), mostrou que o comprimento de onda no intervalo de 500nm a 900nm apresentou resultados significativos para diferenciar a gramínea Capim Annoni (*Eragrostis plana*) das demais espécies encontradas na área de estudo.

Este capítulo tem como objetivo verificar se há diferenças significativas das medidas de índices de vegetação computadas, para dados obtidos com o espectrorradiômetro, para o Capim Annoni e demais espécies encontradas na área analisada, levando em consideração o comprimento de onda no intervalo de 500nm a 900nm e verificar se há um padrão no comportamento do Capim Annoni para o índice de vegetação que apresentar maior diferença entre as coberturas.

## 5.1 METODOLOGIA DE TRABALHO

Ao longo da UPG Ibirapuitã foram selecionadas 20 áreas de análise, sendo que para cada uma destas áreas foi definido um raio de 1 km (Figura 15), sendo que o critério de escolha das áreas baseou-se no fato de que em todas as áreas houvesse a existência da gramínea exótica invasora Capim Annoni (*Eragrostis plana*) em três circunstâncias (Figura 16): área com o Capim Annoni homogêneo sem pastejo, área com o pouco Capim Annoni misturado com outras espécies e área com o Capim Annoni menos concentrado e pastejado. Vale ressaltar que a área em que o Capim Annoni subsistia com outras espécies é uma área características mais próximas ao de campo natural (Bioma Pampa). Dentro deste perímetro foram identificadas sete espécies de gramíneas: *Andropogon lateralis nees* (Caninha), *Digitaria ciliares* (Pé-de-galinha), *Digitaria sanguinalis* (Pé-de-Galinha), *Paspalum notatum* (Gramma Forquilha), *Pennisetum setosum* (Capim Elefante), *Setaria parviflora* (Rabo de Raposa) e *Sporobolus indicus* (capim Toucerinha). Ressalta-se que de todas as espécies identificadas, somente o Capim Annoni (*Eragrostis plana*), possui características de exótica invasora. As gramíneas foram coletadas no período estival de forma que as plantas apresentam estágios assemelhados de maturação fisiológica e encontram-se sob mesmas condições agrônômicas, entretanto estabelecidas sobre solos diferentes: Solos Litólicos eutróficos, Terra

Roxa Estruturada eutrófica, Vertissolo, Planossolo eutrófico e Podzólico Vermelho-Escuro álico.

**Figura 16** - Unidade de Planejamento e Gestão Ibirapuitã Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã: situações de campo

Poucas touceiras de Capim Annoni misturado com outras espécies de pastagens



Capim Annoni pastejado ou manejado e em menor concentração em relação a área sem pastejo



Capim Annoni sem pastejo e homogêneo



Fonte: Elaborada pela autora.

Foram obtidas as medidas do FRB da face dorsal da folha de cada espécie identificada no interior das áreas de análise. As medidas obtidas constituem um conjunto de arquivos contendo o comprimento de onda na amplitude de 350nm a 2500nm e fator de reflectância correspondente para cada comprimento de onda. Para tanto, utilizou-se o espectrorradiômetro FieldSpec®3 do Laboratório de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Santa Maria-RS (Núcleo de Desenvolvimento de Informações e Geotecnologias).

Posteriormente, com o auxílio do software RStudio foram computados para estas medidas os seguintes índices de vegetação (Tabela 8).

**Tabela 8** - Índices de vegetação analisados

<b>Índices de vegetação</b>	<b>Autor</b>
<b>TVI</b> - Índice de vegetação triangular	Broge and Leblanc (2000)
<b>OSAVI</b> - Índice de vegetação ótimo ajustado para solo	Rondeaux et al. (1996)
<b>TCARI</b> - Índice CARI transformado	Haboudane et al. (2002)
<b>MCARI</b> - índice de reflectancia modificado em absorção de Clorofila	Daughtry et al. (2000)
<b>NDVI4</b> - Índice de vegetação da Diferença Normalizada	Ma et al. (1996)
<b>NDVI3</b> - Índice de vegetação da Diferença Normalizada	Gitelson et al. (1996)
<b>NDVI2</b> - Índice de vegetação da Diferença Normalizada	Gitelson and Merzlyak (1994)
<b>NDVI1</b> - Índice de vegetação da Diferença Normalizada	Vogelmann et al. (1993)
<b>NDI2</b> - Índice de vegetação da Diferença Normalizada	Datt (1999)
<b>NDI1</b> - Índice de vegetação da Diferença Normalizada	Datt (1999)
<b>PSRI</b> - índice de reflectancia senescência de plantas	Merzlyak et al., 1999
<b>mSR705</b> - índice razão simples modificado (mSR705)	Sims and Gamon (2002)
<b>mND705</b> - índice de Vegetação da Diferença Normalizada 705 Modificado	Sims et Gamon (2002)
<b>ND705</b> - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada 705	Sims et Gamon (2002)

<b>SIPI</b> - índice Estrutura de pigmento intensivo	Peçuelas et al. (1995)
<b>PRI</b> - índice de reflectancia fotoquímica	Gamon et al. (1992)
<b>PSNDb</b> - Diferença normalizada pigmento específico b (PSNDb)	Blackburn (1998)
<b>GNDVI</b> - índice da diferença normalizada no verde	Daughtry et al.(2000)
<b>VIopt1</b> - Índice de Vegetação Otimizada	Jasper et al. (2009)
<b>DVI</b> - índice Vegetação Diferença	Jordan (1969)
<b>DI1</b> - índice Diferença 1	Buschman and Nagel (1993)
<b>SR7</b> - índice Simple ratio 7	Datt (1998)
<b>SR6</b> - Índice Simple ratio 6	Chappelle et al. (1992)
<b>SR5</b> - índice Simple ratio 5	Chapepelle et al. (1992)
<b>SR4</b> - índice Simple ratio 4	Vogelmann et al. (1993)
<b>SR3</b> - índice Simple ratio 3	McMurtrey et al. (1994)
<b>SR2</b> - índice Simple ratio 2	Buschman and Nagel (1993)
<b>SR1</b> -índice Simple ratio 1	Daughtry et al. (2000)

Fonte: Elaborada a autora.

Com a finalidade de identificar diferenças nas medidas dos índices de vegetação, os valores obtidos para o Capim Annoni foram subtraídos dos valores das demais espécies.

Assim, para o desenvolvimento desta etapa da pesquisa, utilizou-se uma imagem do sensor OLI/LDCM (Landsat-8), órbita/ponto 224/81, com data de passagem do satélite em 14 de agosto de 2017. O sensor OLI, em órbita no LDCM, tem resolução temporal de 16 dias, resolução radiométrica de 12 bits, e apresenta nove bandas espectrais que têm diferentes características espectrais. (FREQUENTLY, 2017). No presente trabalho, foram empregadas seis das oito bandas espectrais (Tabela 9). A imagem utilizada para o estudo foi disponibilizada gratuitamente pelo United States Geological Survey (USGS).

**Tabela 9** - Informações das bandas espectrais do sensor OLI (Landsat 8), utilizadas para gerar a classificação

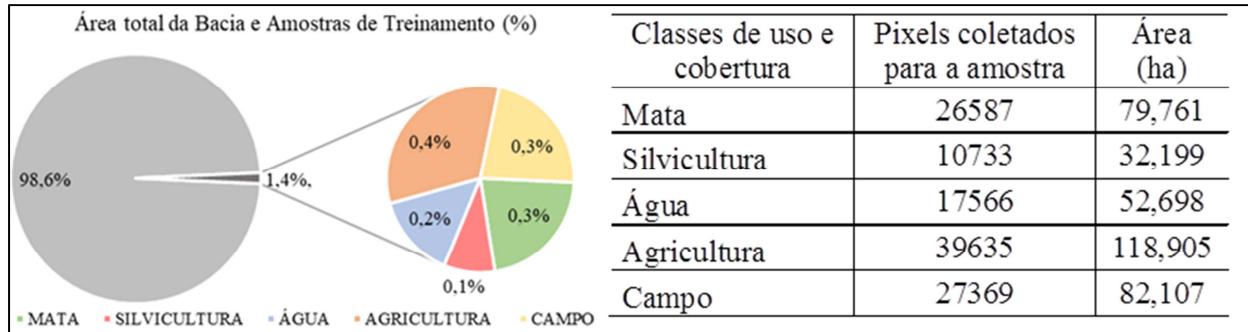
Bandas	Comprimento de onda (micrômetros)	Resolução (metros)
Banda 2 – Azul	0.452 - 0.512	30
Banda 3 – Verde	0.533 - 0.590	30
Banda 4 – Vermelho	0.636 - 0.673	30
Banda 5 – Infravermelho próximo (NIR)	0.851 - 0.879	30
Banda 6 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 1	1.566 - 1.651	30
Band 7 - nfravermelho de ondas curtas (SWIR) 2	2.107 - 2.294	30

Fonte: Adaptado de Frequently (2017).

Com a intenção de separar as áreas de uso de solo com a classe de campo foi empregada a técnica de classificação supervisionada, onde a partir de análises de campo foram selecionadas amostras das classes de interesse. Para tanto, utilizou-se o método de classificação paramétrica de Máxima Verossimilhança (MAXVER).

Para garantir a qualidade da classificação utilizou-se um número significativo de pixel para cada conjunto de treinamento para que a classificação por máxima verossimilhança seja considerada precisa. Em tendo isto, 1,4 % da área total da bacia foi coletada para treinar o classificador MAXVER (Gráfico 7):

**Gráfico7** - Área total da bacia e percentual representativo das amostras de treinamento para cada classe de uso e cobertura



Fonte: Elaborada pela autora.

As classes de uso e cobertura foram definidas com inspeções de campo e análises elaboradas com base na composição das bandas da imagem utilizada. Para tanto, considera-se:

- mata: cobertura vegetal arbórea, independentemente da unidade fitoecológica e estágio de sucessão.
- silvicultura: área de ocupada com plantio de espécies arbóreas.
- água: cursos d'água (rios) e corpos d'água (lagos, açudes, barragens).
- agricultura: área ocupada com atividades agrícolas de cultivos anuais.
- campo: formações predominantemente herbáceas, independentemente do tipo de unidade fitoecológica (savana, estepe, savana-estépica).

A fim de constatar se o classificador apresentou bons resultados, foi calculada a acurácia do mapa de uso e cobertura utilizando o método do índice Kappa (Equação 25) e o Kappa Condicional (Equação 26).

Para realizar essa validação, através de uma matriz de erro de onde foram derivados do Índice Kappa, foram selecionadas 100 amostras aleatórias e independentes, para cada classe de uso e cobertura definida neste estudo.

Após validação, a classe campo foi separada das demais para utilizar como máscara de extração da área de interesse para esta pesquisa.

Após a identificação do índice com as maiores diferenças, foram utilizadas imagens do sensor Landsat 8 com resolução espacial de 30 metros e com as devidas correções atmosféricas, para computar o mesmo para cada mês, com o intuito de verificar se há diferença significativa nos valores deste índice ao longo dos meses.

Em decorrência da existência de nuvens ao longo do mesmo ano, foram utilizadas imagens Landsat 8 de anos diferentes (Tabela 10) para os meses.

**Tabela 10** - Data das imagens Landsat 8 utilizadas nesta análise

Janeiro	2016
Fevereiro	2014
Março	2015
Abril	2015
Mai	2015
Junho	2017
Julho	2017
Agosto	2015
Setembro	2016
Outubro	2016
Novembro	2015
Dezembro	2013

Fonte: Elaborada pela autora.

As análises foram realizadas para cada um dos meses e para cada uma das três situações em que o Capim Annoni foi encontrado no campo: Capim Annoni pastejado e em menor concentração quando comparada com a próxima classe, Capim Annoni sem pastejo e

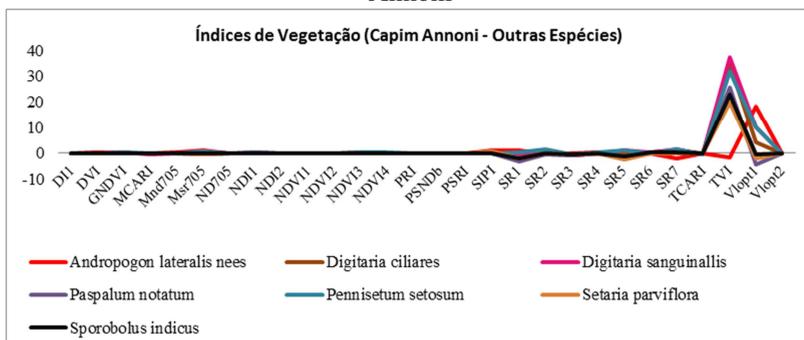
concentrado e Capim Annoni misturado com outras espécies de pastagem.

Com base nas análises de campo, foram definidos limiares para o índice de vegetação de maior diferença para os intervalos das classes para o mês de junho, com intuito de verificar a possibilidade de identificar as três situações em que o Capim Annoni é encontrado em campo. Estes limiares foram definidos com base na média das medidas do índice de vegetação, levando em consideração o valor dos pixels em que as mesmas áreas se encontram.

## 5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analisando o resultado da subtração dos valores dos índices de vegetação do Capim Annoni (Gráfico 8), em relação às demais espécies de gramíneas é possível observar que o índice que apresenta os valores mais distantes de zero é o Índice de Vegetação Triangular (TVI) (Equação 12).

**Gráfico 8** - Diferenças dos valores dos índices de vegetação das demais espécies encontradas em análises de campo em relação ao Capim Annoni

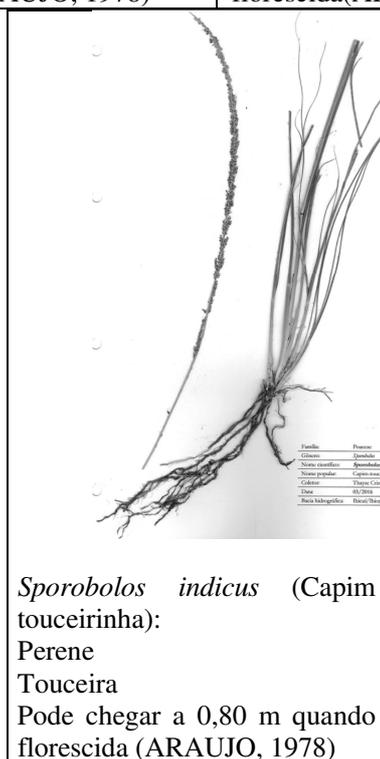
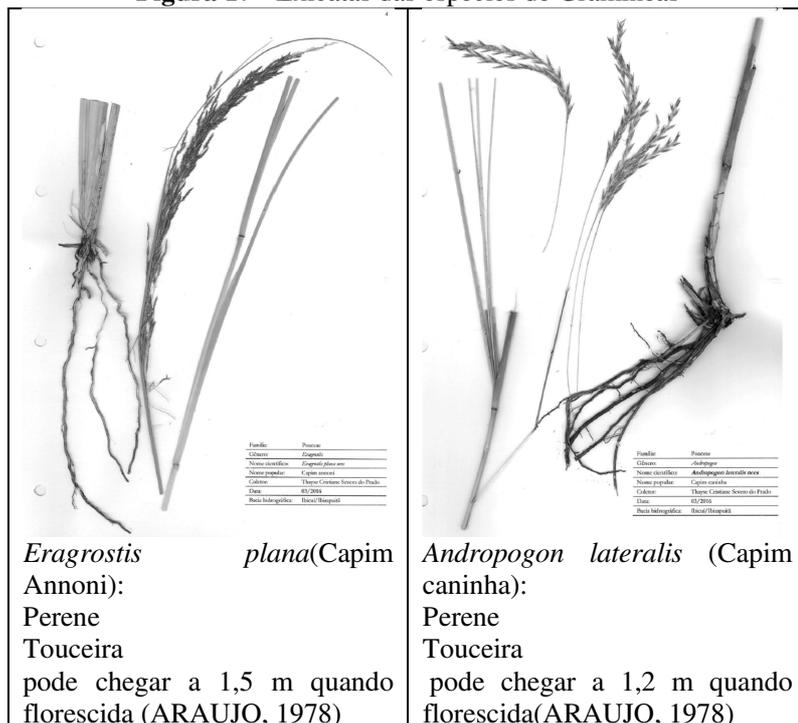


Fonte: Elaborada pela autora.

A espécie *Sporobolus indicus* é muitas vezes confundida com o Capim Annoni, diferenciando-se apenas pela base da planta, que é cilíndrica, e por sua inflorescência (Figura 17) Araujo (1978), Botrel et al. (1998) e Trindade et al. (2007). É possível observar no Gráfico 8 que os valores de TVI mais próximos dos valores de Capim Annoni são os da espécie *Andropogon lateralis*. As três espécies são perenes, possuem florescência de janeiro a março e são cespitosas, entretanto no mês em

que as coletas de campo foram feitas (março), conforme Araujo (1978), a *Andropogon lateralis* estava mais celulósica, sendo assim mais recusada pelo gado e, portanto, menos manejada/pastejada que a *Sporobolus indicus*, que é altamente palatável na mesma época (meados de março). A mesma recusa pelo gado neste período ocorre com o Capim Annoni, este é mais palatável ao gado em janeiro e início de fevereiro que coincide com a época da rebrota. Já a *Andropogon lateralis*, assim como as demais, possui um alto teor de fibras, mas quando jovem é muito consumido pelo animal por apresentar baixo teor de lignina. À medida que suas folhas ficam velhas são muito lignificadas. Em março, se não tiver sofrido pastejo anterior a dezembro, a mesma floresce e neste estágio, pelo seu alto teor de fibra, não é pastejada.

**Figura 17 - Exicatas das espécies de Gramíneas**



Fonte: Elaborada pela autora.



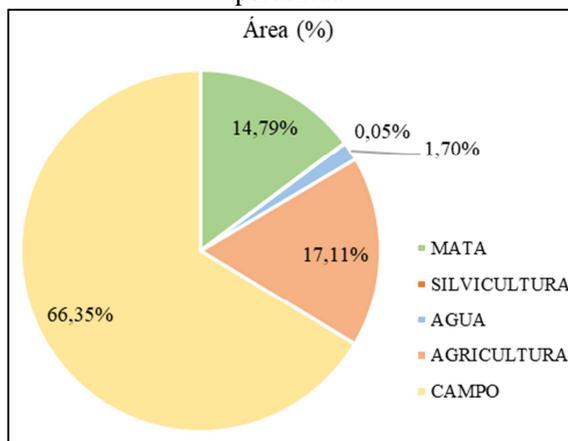
Analisando os dados obtidos a partir da classificação da imagem, observa-se que as classes predominantes na bacia para a data de aquisição da imagem são as classes campo, que ocupa 66% da área total da bacia, agricultura (17,11%) e mata (14,79%). (Gráfico 9). A Tabela 11 apresenta a área total ocupada por cada classe de uso e cobertura do solo da Bacia Hidrográfica do Rio do Ibirapuitã.

Tabela 11 - Área das classes obtidas pelo classificador MAXVER

Classe	Área (ha)	Área (%)
Mata	3910,0600	14,74
Silvicultura	12,3200	0,05
Água	448,2000	1,70
Agricultura	4522,3100	17,11
Campo	17535,7100	66,35

Fonte: Elaborada pela autora.

**Gráfico 9.** Área das classes obtidas pelo classificador MAXVER em percentual

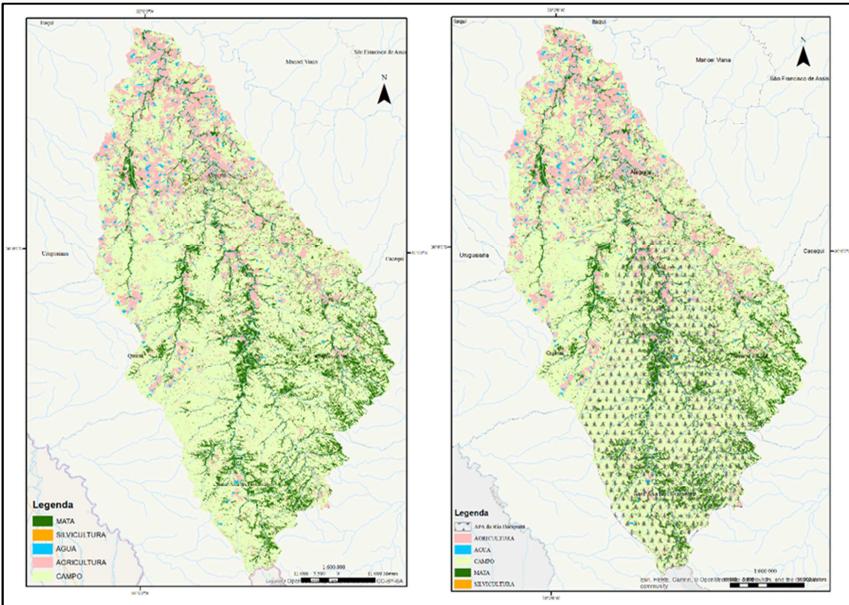


Fonte: Elaborada pela autora.

Com base na Figura 18a, pode-se observar que as áreas classificadas com a classe de agricultura encontram-se concentradas na região norte da bacia, já a classe mata concentra-se no entorno dos rios e a classe campo está distribuída por toda a bacia hidrográfica. Nota-se

ainda o aumento das áreas de mata e campo a sul da bacia à medida que diminui a classe de agricultura. Isso pode ser justificado pelo fato de que a sul da bacia hidrográfica existem duas Unidades de Conservação (Figura 18b): Área de Preservação Ambiental do Ibirapuitã e Parque Estadual do Espinilho.

**Figura 18** - a) Uso e ocupação do solo; b) Uso e ocupação do solo com a área de Preservação Ambiental do Ibirapuitã e Parque Estadual do Espinilho



Fonte: Elaborada pela autora.

As áreas de agricultura são basicamente áreas onde há orizicultura, já as áreas de campo são áreas que apresentam em sua maioria a característica de Bioma Pampa, no entanto podendo haver o uso antrópico rural como, por exemplo, pecuária extensiva. Vale ressaltar que, do ponto de vista da conservação, estudos têm apontado para a importância da produção pecuária para manutenção do Bioma Pampa, quando com controle de manejo, mostrando ainda, conforme afirma Nabinger (2006), ser a melhor forma de preservação do ambiente, tornando essa uma atividade econômica sustentável para este bioma.

A partir da matriz de erro, gerada para se obter a acurácia do mapa, é possível constatar que algumas classes tiveram poucos erros de classificação, o que é o caso das classes silvicultura e campo. Entretanto, a matriz aponta que a classe agricultura teve cerca de 21 % de confusão com a classe campo e a classe floresta aproximadamente 18%. Ainda é possível constatar que, com exceção da classe silvicultura, houve confusão na classificação em todas as demais classes com a classe campo, obtendo assim uma acurácia (Kappa Condicional) de 0,7. Essa confusão deve-se basicamente ao tamanho da área das classes, já que a classe campo possui área expressivamente maior que as demais (Tabela 12).

**Tabela 12 - Matriz de confusão.**

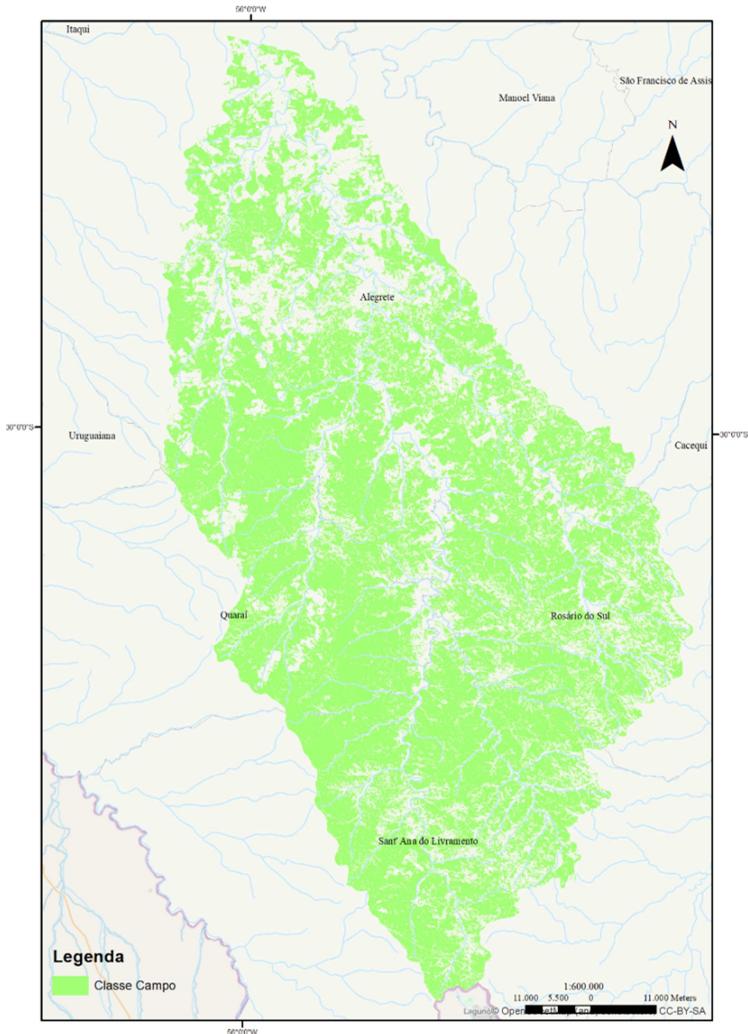
CLASSE	Floresta	Silvicultura	Água	Agricultura	Campo	Acurácia (Kappa Condicional)
Floresta	81	3	0	1	1	0,94
Silvicultura	0	97	0	0	0	1
Água	0	0	85	3	0	0,97
Agricultura	1	0	13	75	3	0,82
Campo	18	0	2	21	96	0,70

Fonte: Elaborada pela autora.

O valor do coeficiente Kappa obtido com o classificador MAXVER foi de 0,84, o que, segundo o conceito de desempenho do Índice Kappa aplicado por Congalton e Green (2009), é considerado excelente.

Após validação das classes de uso do solo, a classe campo foi individualizada para servir de máscara para a extração dos valores do TVI (Figura 19).

**Figura 19 - Classe Campo do Uso e Cobertura do Solo**



Fonte: Elaborada pela autora.

Após verificar com os dados do espectroradiômetro o índice que apresentou maior diferença em relação às outras espécies foi TVI e separar a classe de uso do solo campo, de interesse desta pesquisa, o mesmo foi computado para todos os meses utilizando as imagens Landsat 8.

Vale ressaltar que a equação TVI (Equação 12) teve alteração nos valores em relação ao índice calculado para os dados de campo. Esta alteração deve-se ao fato de que os valores das bandas correspondentes a região do vermelho, verde e infravermelho do Landsat 8 são correspondentes a intervalos de comprimento de onda e não a valores exatos como os dos dados obtidos do espectrorradiômetro (Equação 27). As medidas obtidas com TVI não possuem um intervalo de variação como a maioria dos índices que variam de 0 a 1, assim, para facilitar a análise, as medidas resultantes do cômputo do TVI para Landsat 8 foram posteriormente normalizadas.

(Eq. 27)

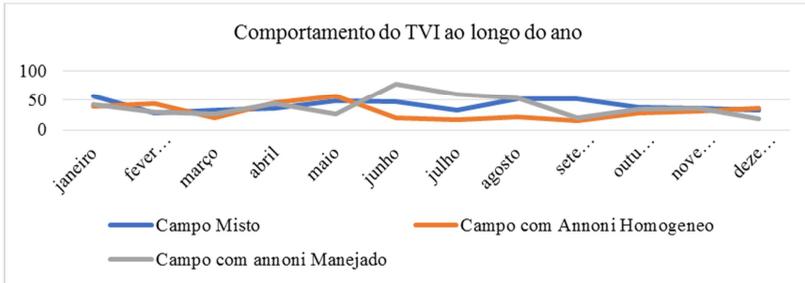
$$\begin{aligned} \text{TVI} &= 0.5|\det(\text{AB}, \text{AC})| \\ &= 0.5(120(\text{R}_{\text{NIR}} - \text{R}_{\text{Green}}) - 200(\text{R}_{\text{Red}} - \text{R}_{\text{Green}})) \end{aligned}$$

Onde:

A= 533 a 590 nm ( $\text{R}_{\text{Green}}$ ), B=636 a 673 nm ( $\text{R}_{\text{Red}}$ ) e C=851 a 879 nm ( $\text{R}_{\text{NIR}}$ ).

O Gráfico10 apresenta o resultado dos valores médios encontrados para cada situação em que o Capim Annoni apareceu. De maneira geral, pode-se observar que as variações destes valores são maiores entre os meses de junho e julho. Ainda, observa-se que a área em que o Capim Annoni que se encontrava sem manejo apresentou valores menores de TVI, indicando menores quantidades de clorofila na planta. Além disso, conforme análise feita *in loco*, a área que continha Capim Annoni altamente pastejado em março, no mês de junho apresentou altos valores de TVI, maior até que a área de campo misto, que se assemelha mais às condições de pastagens naturais.

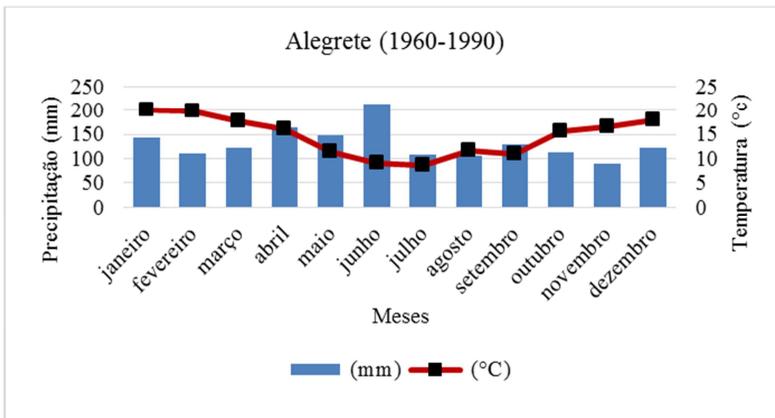
**Gráfico10** - Área total da bacia e percentual representativo das amostras de treinamento para cada classe de uso e cobertura



Fonte: Elaborada pela autora.

Por se tratar de uma planta estacional com sua florescência na primavera/verão, em estações frias e chuvosas, o Capim Annoni tende a secar e não rebrotar, já que isso ocorre no período de janeiro a março. O Gráfico 11 apresenta uma relação média das chuvas e temperatura para o período de 1960 a 1990 para a região de Alegrete, que se encontra na área de estudo. Pode-se observar que o mês de julho é o que apresenta a maior concentração média de chuvas e as menores temperaturas. O frio e a chuva fazem com que a touceira do Capim Annoni seque e assim diminua a quantidade de clorofila da planta, desta forma justificando os valores baixos de TVI para as áreas que continham Capim Annoni sem manejo ou pastejo.

**Gráfico11** - Climograma para a cidade de alegrete no período de 1960 a 1990



Fonte: Elaborada pela autora.

Nas áreas de campo misto, os valores de TVI foram maiores nas áreas de campo com Capim Annoni homogêneo, porque nesta época do ano (junho) as gramíneas hibernais começam a rebrotar e florescer, fazendo com que a quantidade de clorofila da planta fique maior. Entretanto, geralmente nestas áreas o solo costuma ser mais exposto e com gramíneas mais rasteiras de dossel menor, fazendo com que os valores de TVI fiquem inferiores aos das áreas em foi encontrado o Capim Annoni pastejado.

Vale ressaltar que o Capim Annoni somente sofrerá pastejo nesta época do ano se o gado for suplementado com sal protéico, caso contrário, a touceira do Capim Annoni tende a secar.

A partir da definição dos limiares, pode-se reclassificar a imagem com o TVI para o mês de julho. Para tanto, a partir do primeiro e terceiro quartil de cada amostra de classe, foram obtidos os seguintes limiares (Tabela 13):

**Tabela 13 - Limiares definidos para as classes de campo**

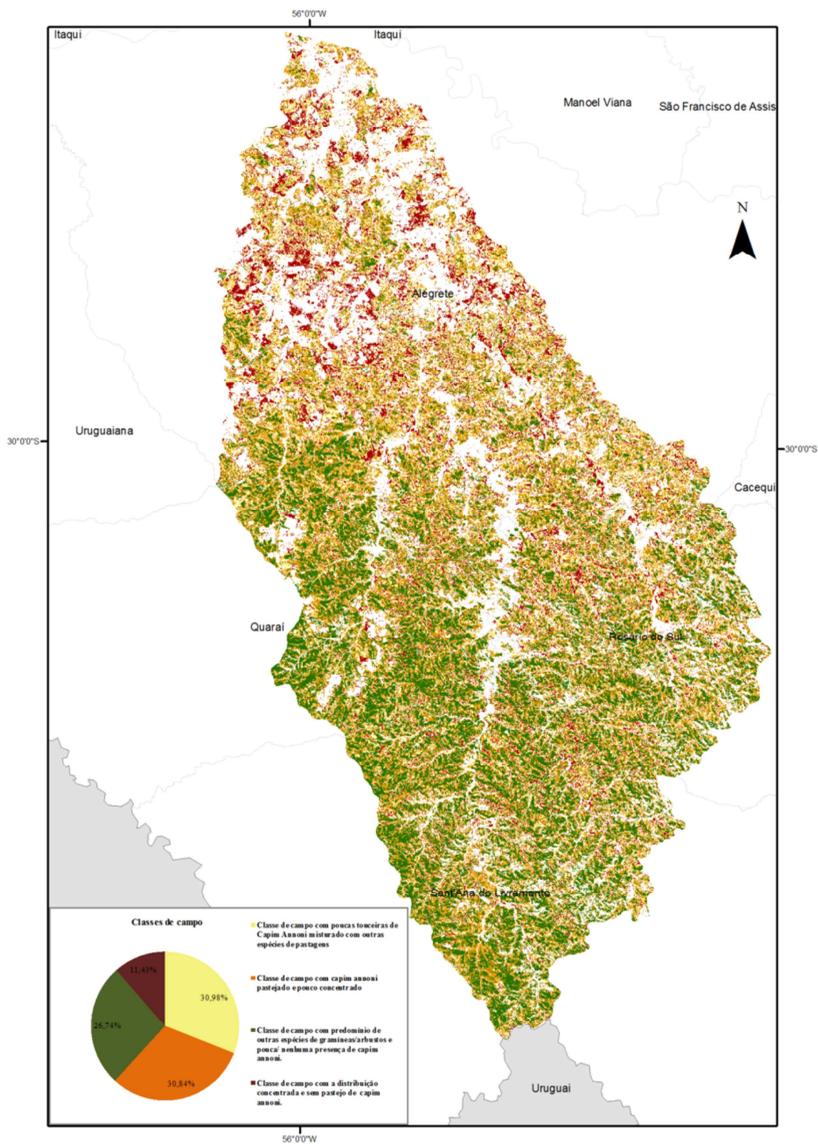
<b>Limiares</b>	<b>Nome da classe</b>
0 – 0,68	Classe de campo com predomínio de outras espécies de gramíneas ou arbustivas e pouca presença ou nenhuma presença de Capim Annoni.
0,68 – 0,70	Classe de campo com a distribuição concentrada e homogênea de apenas Capim Annoni.
0,70 – 0,72	Classe de campo com poucas touceiras de Capim Annoni misturado com outras espécies de pastagens
0,72 – 0,74	Classe de campo com Capim Annoni pastejado e com menor concentração
0,74 – 1	Classe de campo com predomínio de outras espécies de gramíneas ou arbustivas e pouca presença ou nenhuma presença de Capim Annoni.

Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando somente a área de campo, conforme classificação feita com base nestes limiares encontrados para as medidas TVI (Figura 20) nota-se que mais de 71% da área de campo tem alguma ocorrência de Capim Annoni. Ainda é possível observar que a maior concentração de áreas de Capim Annoni sem pastejo ou manejo encontra-se à norte da bacia, próximo à cidade, e que quando mais afastado da área urbanizada menor a existência destas áreas homogêneas. Proporcionalmente, na região central da bacia aumentam estas áreas em que o Capim Annoni

encontra-se em menor quantidade que a classe anterior e mais pastejado. Nesta mesma região, as áreas em que o Capim Annoni encontra-se misturado com outras espécies e em touceiras mais esparsas aumentam. Na região sul da bacia hidrográfica, apesar desta área possuir uma mescla de todas as classes, há o predomínio de outros tipos de gramíneas e ou vegetação arbustiva, apesar disso, não se pode excluir a total existência de Capim Annoni nesta classe.

**Figura 20 -** Reclassificação do TVI com base nos limiares definidos



Fonte: Elaborada pela autora.

De maneira geral, é possível observar que mais de 11% da bacia encontra-se em condições críticas de invasão do Capim Annoni e que cerca de 60% de sua área apresenta esta exótica invasora altamente disseminada.

### 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao se analisar as diferenças nas medidas obtidas para os índices de vegetação, computados com os dados do espectrorradiômetro, para cada espécie encontrada na área de estudo, em relação às medidas destes índices para o Capim Annoni, pode-se afirmar que o Índice de Vegetação Triangular (TVI) apresentou significativa diferença. Esta diferença aponta que o Capim Annoni, mesmo no mês de março, possui menor quantidade de clorofila em suas folhas quando comparadas com demais espécies, apesar do mesmo ainda possuir proximidade destes valores com a espécie *Andropogon lateralis*.

No que tange ao uso e ocupação do solo, das 5 classes temáticas de uso e cobertura identificadas, a classe campo foi a que apresentou maior área.

A determinação da matriz de erros permitiu verificar e analisar as confusões ocorridas entre as classes temáticas levantadas, constatando-se assim que tal confusão é principalmente dada entre a classe de campo.

Apesar disto, de forma geral, pode-se inferir que o Maxver apresentou uma classificação satisfatória e sua validação pode ser observada através do excelente índice kappa, assegurando a confiabilidade do estudo.

Com o cômputo do TVI para as imagens Landsat 8 ao longo do ano, foi possível concluir que no mês de junho, as áreas de campo em que o Capim Annoni não encontra-se misturado com outras espécies e sem estar pastejado, apresenta medidas menores em relação aos demais meses do ano. O mesmo comportamento pode-se identificar para as áreas de campo que possuem o Capim Annoni pastejado e em áreas de campo que possuem a ocorrência mais dispersa do Capim Annoni. Isso se deve ao fato das condições climáticas deste período, que desfavorecem o rebrote de espécies estivais e favorecerem o rebrote de espécies hibernais. Sendo o Capim Annoni uma espécie estival, no período de outono/inverno o mesmo seca e diminui o teor de clorofila das folhas, além disso, como cresce em touceiras podendo alcançar até 1,5 m de comprimento na florescência, a possibilidade de identificá-lo através do uso de sensores orbitais é significativamente maior.

Nesse contexto, analisando as médias das medidas de TVI para o mês de junho, nas áreas em que já se tinha o conhecimento prévio da classe de campo, o mesmo mostrou-se, inicialmente, eficiente para identificar áreas de campo que possuem *Capim Annoni*.

Análises estatísticas de validação seriam essenciais para comprovar esta informação.

#### 5.4 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. A. *Melhoramentodas pastagens*: agrostologia rio-grandense. 5. ed. Porto Alegre: Sulina, 1978.

BLACKBURN, G. A. Spectral indexes for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. **Int. J. Remote Sensing**, [S.l.], v. 19, p. 657-675, 1998a.

BOTREL, M. A.; NOVAES, L. P.; ALVIM, M. J. **Características forrageiras de algumas gramíneas tropicais**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 1998.

BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 76, p. 156-172, 2000.

BUSCHMANN, C.; NAGEL, E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. **Int. J. Remote Sens**, [S.l.], v. 14, p. 711-722, 1993.

CHAPPELLE, E. W.; KIM, M. S.; MCMURTREY, J. E. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids. **Remote Sens. Environ.**, [S.l.], 39, n. 3, p. 239-247, 1992.

CONGALTON, R.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data**: principles and practices. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2009.

DATT, B. A visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in Eucalyptus leaves. **International Journal of Remote Sensing**, [S.l.], v. 20, p. 2741-2759, 1999.

DATT, B. Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b, and total carotenoid content in eucalyptus leaves. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 66, p. 111-121, 1998.

DAUGHTRY, C. S. T. et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from 76 leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 74, n. 2, p. 229-239, 2000.

FREQUENTLY asked questions about the Landsat missions. Disponível em: <[http://landsat.usgs.gov/band\\_designations\\_landsat\\_satellites.php](http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php)>. Acesso em: 23 dez. 2017.

GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, 41, n. 1, p. 35-44. 1992.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in the remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 58, p. 289-298, 1996.

GITELSON, A., MERZLYAK, M. N. Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. **Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology**, [S.l.], v. 22, n. 3, p. 247-252, 1994. DOI: 10.1016/1011-1344(93)06963-4

HABOUDANE, D. et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 81, n. 2-3, p. 416-426, 2002. Doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4.

JASPER, J.; REUSCH, S.; LINK, A. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination - impact of seed rate, variety and growth stage. In: HENTEN, E.; GOENSE, J. D.; LOKHORST, C. (Ed). EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., Wageningen, 2009. **Proceedings...** Wageningen, Academic Publishers, 2009. p. 23-30.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest. **Ecology**, [S.l.], v. 50, n. 4, p. 663-666, Jul. 1969.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. M. **Remote sensing and image interpretation**. 5th. ed. Nova York: John Wiley, 2004.

MCMURTREY, J. E. et al. Field canopy and leaf level fluorescence for distinguishing plant condition differences due to nitrogen fertilization level. In: PROC. INT. GEOSCIENCE REMOTE SENSING

SYMPOSIUM, IGARSS'94. Pasadena, CA. 1994. **Anais...** Pasadena, CA. 1994.

MENESES, P. R.; SANO, E. E. Classificação pixel a pixel de imagens. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução do processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília, DF: UNB, 2012.

MERZLYAK, M. N. et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, [S.l.], v. 106, n. 1, p. 135-141, 1999.

NABINGER, C. Manejo e produtividade das pastagens nativas do subtropical brasileiro. In: SIMPÓSIO DE FORRAGEIRAS E PRODUÇÃO ANIMAL, 1, 2006, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. p. 25-76.

PEÑUELAS, J.; BARET, F.; FILELLA, I. Semi-empirical indices to assess carotenoids: chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, [S.l.], v. 31, p. 221-230, 1995.

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

SIMS, D. A.; GAMON, J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 81, p. 337-354, 2002. doi:10.1016/S0034-4257(02)00010-X

VOGELMANN, J. E.; ROCK, B. N.; MOSS, D. M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. **International Journal of Remote Sensing**, [S.l.], v. 14, p. 1563-1575, 1993.



## **6. ANÁLISE MULTITEMPORAL DE IMAGENS TVI PARA AVALIAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE ESPÉCIE EXÓTICA INVASORA CAPIM ANNONI (*ERAGROSTIS PLANA*) NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBIRAPUITÃ, RIO GRANDE DO SUL.**

A invasão de espécies exóticas sobre os ecossistemas naturais ocasiona perda de biodiversidade, bem como altera os ciclos ecológicos, inibindo a recuperação destes ecossistemas, eliminando as espécies nativas. Assim, as espécies nativas são ameaçadas pela concorrência e predação de invasoras, tornando-as vulneráveis e propensas à extinção em decorrência da hibridação com espécies exóticas e das mudanças causadas no ecossistema natural por estas espécies. (PIMENTEL *et al.*, 2001).

Nas últimas décadas, tem-se constatado a intensificação do processo de degradação destes ecossistemas por diversos fatores, dentre eles a invasão da gramínea Capim Annoni (*Eragrostis plana*). O Capim Annoni é uma invasora que agride o ambiente, rompe o equilíbrio e torna-se dominante. No Estado do Rio Grande do Sul, esta gramínea não possui um nicho ecológico definido e vegeta em todas as regiões e tipos de solos existentes, o que torna sua disseminação descontrolada e supressora em relação às espécies de gramíneas nativas, caracterizando-a assim como uma espécie invasora. Contudo, sua presença e disseminação se torna mais preocupante nas áreas de Bioma Pampa, já que este é um bioma formado em sua essência por uma vegetação de estepe formada por pequenos arbustos, gramíneas e pequenas formações arbóreas, o que o torna um ambiente extremamente propício à ocupação do Capim Annoni, colocando em risco a sobrevivência de inúmeras espécies nativas e a integridade de seus habitat.

Essa invasora exótica tem modificando o Bioma Pampa e alterado a paisagem característica dos campos naturais. A detecção desta mudança é um dos requisitos fundamentais para mitigar os efeitos desta invasão que ocorre nas pastagens naturais, e ainda elaborar medidas preventivas de sua disseminação.

É nesse contexto, que a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto a estudos de vegetação torna-se imprescindível, já que a partir destas aplicações é possível identificar em extensas áreas os ambientes e suas mudanças, de maneira rápida e eficiente, quando comparada com outros métodos, possibilitando ainda detectar mudanças na paisagem. Estudos de vegetação que consideram diferentes escalas de paisagem (espaciais e temporais) possibilitam identificar padrões de mudanças importantes para o planejamento e gestão ambiental. Assim, dados de

sensoriamento remoto vem sendo amplamente utilizados em análises de detecção de mudança (*change detection analysis*) da superfície da terra.

A grande maioria dos trabalhos que estudam a vegetação constrói as assinaturas temporais a partir do índice NDVI ou EVI, entretanto, tendo em vista que esta pesquisa utiliza apenas uma classe de uso e ocupação do solo, neste caso campo, que é composta essencialmente de vegetação da família das gramíneas e tem como objeto de estudo a espécie exótica invasora *Eragrostis plana* (Capim Annoni), e entendendo que o Índice de Vegetação Triangular (TVI) proposto por Broge e Leblanc (2000), apresentou significativa diferença de assinatura do Capim Annoni quando comparado com outras espécies, esta pesquisa utilizará o TVI para construir as assinaturas temporais.

Esta diferença aponta que o Capim Annoni, mesmo no mês de março, possui menor quantidade de clorofila em suas folhas quando comparadas com as demais espécies, apesar do mesmo ainda possuir proximidade destes valores com a espécie *Andropogon lateralis*. São poucos os estudos que abordam a possibilidade de diferenciação ou identificação de espécies com técnicas de sensoriamento remoto, para tanto, como premissa inicial entende-se que esta é uma tarefa complexa que requer vasto conhecimento da fenologia das espécies, das propriedades físicas das espécies estudadas e os componentes físicos de seu habitat

Este é um índice que possui sensibilidade à quantidade de clorofila na folha que esta atrelada ao tamanho do dossel da planta. Assim quanto maior for a densidade do dossel da planta, maior será sua sensibilidade ao conteúdo de clorofila da mesma e, quanto maior for a concentração de clorofila da planta, maior será a área do triângulo e aumentará concomitantemente a reflectância no infravermelho próximo. (BROGE; LEBLANC, 2000, HABOUDANE *et al.*, 2004).

Nessa perspectiva, o presente capítulo tem como objetivo estimar o TVI para a Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã, utilizando como metodologia a análise multitemporal de imagens de satélite dos anos de 2013 a 2017 a fim de avaliar padrão da ocorrência do Capim Annoni nesta bacia.

## 6.1 METODOLOGIA DE TRABALHO

A bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã (Figura 10) é uma Unidade de Planejamento e Gestão (UPG) da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí que está contida na região hidrográfica do Rio Uruguai, situando-se na região Oeste do Estado, entre as coordenadas geográficas 28°53' e

30°51' de latitude Sul e 53°39' e 57°36' de longitude Oeste, possui uma área de drenagem de 7.793 km<sup>2</sup>, sendo que seu principal formador é o rio Ibirapuitã.

O escopo desta pesquisa utiliza como área de estudo a bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã, tendo em vista que o bioma Pampa abrange cerca de 90% da área desta bacia e os municípios inseridos nesta foram os primeiros a relatar ocorrência da espécie exótica *Eragrostis plana*. Inúmeros estudos destacam ainda hoje a problemática existência desta exótica nos municípios que pertencem a esta bacia. (BARBOSA, 2011; MEDEIROS; FOCHT, 2007; NACHTIGAL *et al.*, 2009).

Vale ressaltar que para esta pesquisa a classe de uso e cobertura campo é a mais relevante, tendo em vista que é nas áreas de campo que a ocorrência do Capim Annoni é mais expressiva. Nesse contexto, analisando os dados obtidos a partir da classificação do uso e cobertura do solo com o algoritmo MAXVER, observou-se que a classe campo ocupa 66% da área total da bacia. (Gráfico 9).

Ao analisar as diferenças nas medidas obtidas para os índices de vegetação, em estudo anterior, computados com os dados do espectrorradiômetro, para cada espécie encontrada na área de estudo em relação às medidas destes índices para o Capim Annoni, constatou-se que o Índice de Vegetação Triangular (TVI) apresentou significativa diferença daquelas espécies em relação ao Capim Annoni. (Gráfico 8).

A partir da análise dos valores médios encontrados para cada situação em que o Capim Annoni aparece ao longo do ano constatou-se que as variações destes valores são maiores entre os meses de junho e julho. (Gráfico 10).

Esta diferença aponta que o Capim Annoni, mesmo no mês de março, possui menor quantidade de clorofila em suas folhas quando comparadas com demais espécies, apesar do mesmo ainda possuir proximidade destes valores com a espécie *Andropogon lateralis*.

Com o cômputo do TVI para as imagens Landsat 8 ao longo do ano foi possível concluir que no mês de junho as áreas de campo, em que o Capim Annoni não encontra-se misturado com outras espécies e sem estar pastejado, apresentam medidas menores em relação aos demais meses do ano. O mesmo comportamento pode-se identificar para as áreas de campo que possuem o Capim Annoni pastejado e em áreas de campo que possuem a ocorrência mais dispersa do Capim Annoni. Isso se deve ao fato das condições climáticas deste período que desfavorecem o rebrote de espécies estivais e favorecerem o rebrote de espécies hibernais. Sendo o Capim Annoni uma espécie estival, no

período de outono/inverno o mesmo seca e perde a quantidade de clorofila da folha. Além disso, como cresce em touceiras podendo alcançar até 1,5 m de comprimento na florescência, a possibilidade de identificá-lo através do uso de sensores orbitais é significativamente maior.

A partir do cômputo do TVI para o mês de julho, constatou-se que mais de 73% da área de campo tem alguma ocorrência de Capim Annoni (áreas em vermelho, laranja e amarelo na Figura 20). Ainda é possível observar que a maior concentração de áreas de Capim Annoni sem pastejo ou manejo encontra-se a norte da bacia, próximo a cidade, e que quando mais afastado da área urbanizada menor a existência destas áreas homogêneas. Proporcionalmente na região central da bacia aumentam estas áreas em que o Capim Annoni encontra-se em menor quantidade que a classe anterior e mais pastejado. Nesta mesma região, as áreas em que o Capim Annoni encontra-se misturado com outras espécies e em touceiras mais esparsas aumentam. Ao sul da bacia, apesar desta área possuir uma mescla de todas as classes, há o predomínio de outros tipos de gramíneas e vegetação arbustiva, apesar disso, não se pode excluir a total existência de Capim Annoni nesta classe. De maneira geral é possível observar que mais de 11% da bacia encontra-se em condições críticas de invasão do Capim Annoni (área em vermelho na Figura 20) e que cerca de 60% de sua área possui esta exótica invasora altamente disseminada (Figura 20).

### **6.1.1Método**

Para o desenvolvimento desta etapa da pesquisa, utilizou-se uma imagem do sensor OLI/LDCM (Landsat-8), órbita/ponto 224/81. O sensor OLI, em órbita no LDCM, tem resolução temporal de 16 dias, resolução radiométrica de 12 bits, e apresenta nove diferentes bandas espectrais que têm diferentes características espectrais (FREQUENTLY, 2017). Na presente pesquisa, foram empregadas três bandas espectrais (Tabela 14). A imagem utilizada para o estudo foi disponibilizada gratuitamente pelo USGS (United States Geological Survey).

**Tabela 14** - Informações das bandas espectrais do sensor OLI (Landsat 8), utilizadas para calcular o TVI

Bandas	Comprimento de onda (micrômetros)	Resolução (metros)
Banda 3 – Verde	0.533 - 0.590	30
Banda 4 – Vermelho	0.636 - 0.673	30
Banda 5 – Infravermelho próximo (NIR)	0.851 - 0.879	30

Fonte: Adaptado de Frequently (2017).

Entendendo que o mês de julho foi o que apresentou as maiores diferenças do Índice de Vegetação Triangular (TVI) para o Capim Annoni em relação às demais espécies encontradas na área de estudo, definiu-se como escala temporal os meses de mais frio e chuva, em decorrência da sensibilidade deste índice à presença de clorofila na planta e das características físicas do Capim Annoni. Assim, para esta análise temporal, utilizou-se os meses de maio, junho, julho e agosto de 2013 a 2017. Vale ressaltar ainda que devido à presença de mais de 50% de nuvens na área de estudo as imagens de agosto de 2015 e julho de 2016 foram excluídas da análise. Já 2018 apresenta apenas a imagem para a data de maio, tendo em vista que até a data deste estudo as demais datas (junho, julho e agosto) ainda não haviam sido disponibilizadas.

Utilizou-se neste estudo o Índice de Vegetação Triangular (TVI) desenvolvido por Broge e Leblanc (2000) (Equação 12). Vale ressaltar que a equação TVI teve alteração nos valores em relação ao índice calculado para os dados de campo (Equação 27).

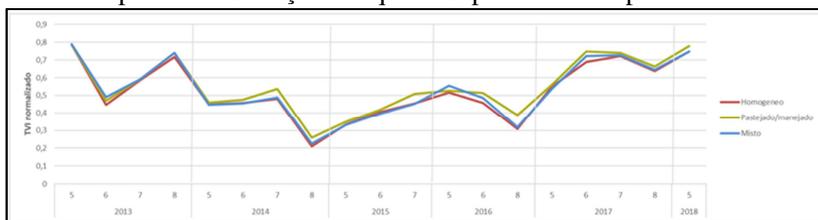
Após análise temporal dos valores de TVI para as referidas datas, foi gerada, a partir da subtração dos valores das áreas das classes e dos mapas gerados, uma análise de detecção de mudança de classe do ano de 2013 em relação ao de 2017. Sendo que os limiares utilizados para a classificação das imagens TVI foram definidos com base nas análises obtidas em campo e no primeiro e terceiro quartil das amostras coletadas na imagem com o cômputo do TVI.

### 6.1.2 Resultados

O Gráfico 12 apresenta o resultado dos valores médios de TVI encontrados para cada situação em que o Capim Annoni aparece na classe campo de uso e cobertura do solo, no período de maio a agosto de 2013 a 2018. De maneira geral pode-se observar que existem variações

destes valores ao longo dos meses analisados e em todos os anos, entretanto, para estes meses, quando analisado somente este Gráfico e cada classe em específico, não se nota um padrão de comportamento dos valores médios de TVI.

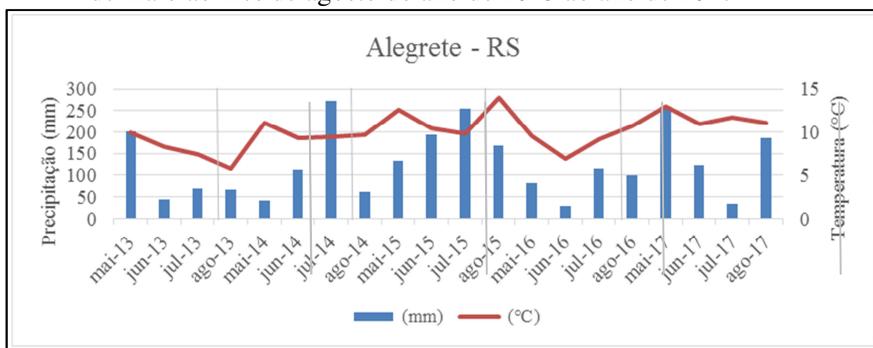
**Gráfico12** - Série temporal com os valores médios de TVI encontrados para cada situação em que o Capim Annoni aparece.



Fonte: Elaborada pela autora.

Contudo, ao comparar o Gráfico 12 com o climograma (Gráfico 13) observa-se que os valores médios de TVI sofrem influência direta da quantidade de precipitação acumulada e das temperaturas mais baixas. Isso porque o excesso de chuva ou sua escassez, associada a baixas temperaturas, fazem com que as gramíneas ressequem e por consequência diminuam a quantidade de clorofila na planta. Assim sendo, o estresse hídrico associado a baixas temperaturas causa o ressecamento das gramíneas estivais, o que é o caso do Capim Annoni, e o rebrote das hibernais.

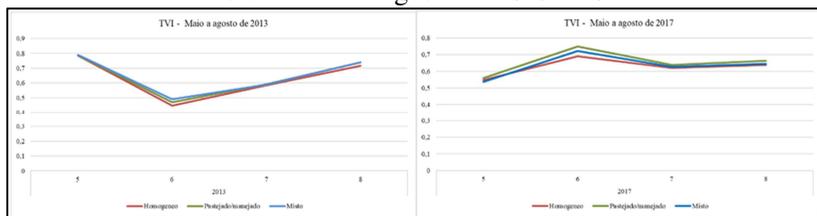
**Gráfico13** - Climograma para a cidade de Alegrete no período do mês de maio ao mês de agosto do ano de 2013 ao ano de 2017



Fonte: Elaborada pela autora.

Observando os anos de 2013 e 2017, nota-se que houve diferença entre os valores médios de TVI obtidos para o mês de junho destes anos (Gráfico 14), e que em 2013 a classe de campo compostas por poucas touceiras de Capim Annoni misturado com outras espécies de pastagens apresentou médias maiores quando comparado a junho de 2017. Isto ocorreu em 2013, pois houve baixas temperaturas e menores taxas de precipitação, fazendo com que o ambiente fosse propício ao rebrote de espécies de gramíneas hibernais e ocasionando o ressecamento de espécies estivais. Já em 2017, apesar de ocorrer estresse hídrico, neste caso com o aumento das chuvas para este período, as temperaturas acima da média em relação a 2013 resultaram em um rebrote do Annoni nas áreas em que o mesmo encontrava-se pastejado, por consequência, uma perda de vitalidade das plantas hibernais. Tal fato ocasionou ainda médias menores para as áreas em que o Capim Annoni encontrava-se misturado com outras espécies do que as médias obtidas para as áreas com a ocorrência do Capim Annoni pastejado.

**Gráfico14** - Série temporal com os valores médios de TVI para os meses de maio a agosto de 2013 e 2017



Fonte: Elaborada pela autora.

A partir da definição dos limiares, pode-se reclassificar a imagem com o TVI para o mês de julho. Para tanto, a partir do primeiro e terceiro quartil de cada amostra de classe, foram obtidos os seguintes limiares (Tabela 15):

**Tabela 15** - Limiares definidos para as classes de campo para os valores de TVI de junho de 2013 e junho de 2017

<b>Nome da classe</b>	<b>Limiares TVI junho/2013</b>	<b>Limiares TVI junho/2017</b>
Classe de campo com predomínio de outras espécies de gramíneas ou arbustivas e pouca presença ou nenhuma presença de Capim Annoni.	0 – 0,44	0 – 0,68
Classe de campo com a distribuição concentrada e homogênea de apenas Capim Annoni.	0,44 – 0,46	0,68 – 0,70
Classe de campo com Capim Annoni pastejado e com menor concentração	0,46 – 48	0,72 - 0,74
Classe de campo com poucas touceiras de Capim Annoni misturado com outras espécies de pastagens	0,48– 0,50	0,70 – 0,72
Classe de campo com predomínio de outras espécies de gramíneas ou arbustivas e pouca presença ou nenhuma presença de Capim Annoni.	0,50 – 1	0,74 – 1

Fonte: Elaborada pela autora.

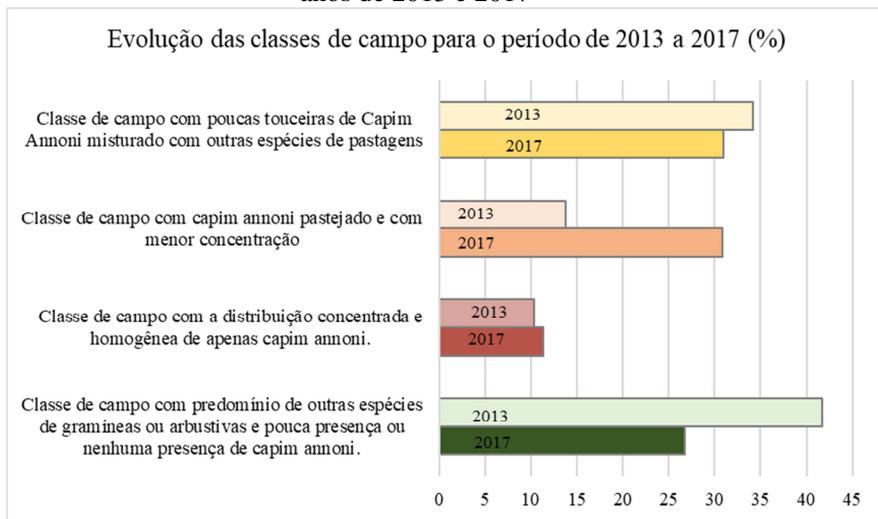
A Figura 21 apresenta os valores de TVI reclassificados para junho de 2013 e junho de 2017 para a bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã. É possível verificar que houve um significativo aumento de todas as classes que possuem a ocorrência de Capim Annoni na bacia hidrográfica como um todo. Nota-se ainda o aumento expressivo das áreas em que há a ocorrência do Capim Annoni de forma homogênea e concentrada (regiões em vermelho no mapa) e das áreas com a presença de Capim Annoni pastejado e em menor concentração (regiões em laranja no mapa) na região norte da bacia hidrográfica. Houve também a supressão de regiões onde o Capim Annoni era praticamente inexistente



De acordo com o Gráfico 15, é possível observar que no ano de 2013 cerca de 58% da área de campo apresentava a ocorrência de Capim Annoni, seja ele misturado com outras espécies, pastejado/manejado ou cobrindo de maneira homogênea a área de campo, já em 2017 este valor aumenta para cerca de 73%. Isto indica que do ano de 2013 ao ano de 2017 teve um aumento de cerca de 15 % de áreas com ocorrência de Capim Annoni sobre as áreas que não apresentavam ou apresentavam de forma isolada sua ocorrência.

Observa-se ainda que houve um aumento de pouco mais de 1% das áreas em que o Capim Annoni encontrava-se distribuído de forma intensa e homogênea. As áreas em que o Capim Annoni encontrava-se misturado com outras espécies diminuiu aproximadamente 4% em relação ao ano de 2013, já as áreas que apresentavam a ocorrência do Capim Annoni manejado ou pastejado tiveram um significativo aumento de cerca de 17%.

**Gráfico15** - Ocorrência em percentual das classes de campo para os anos de 2013 e 2017



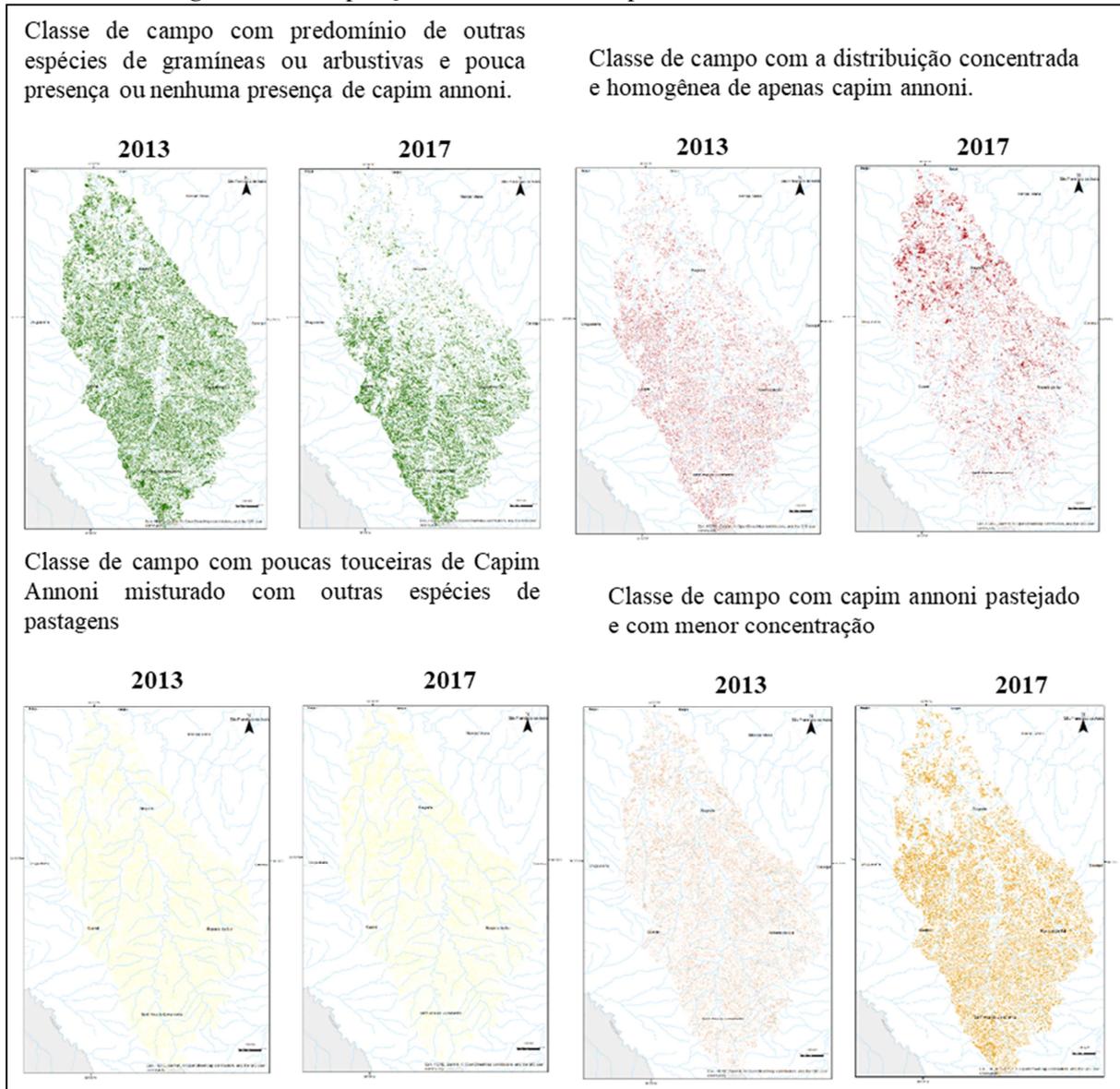
Fonte: Elaborada pela autora.

A partir da Figura 22, é possível detectar a mudança de cada classe de campo identificada, do ano de 2013 a 2017. Nota-se ainda que há um aumento das áreas em que o Capim Annoni encontra-se homogeneamente distribuído ao norte da bacia hidrográfica, e ao sul da bacia hidrográfica há um decréscimo desta classe. A região norte da

bacia hidrográfica é a mais urbanizada, com as principais vias de escoamento e altamente utilizada pela agropecuária, tornando este solo mais exposto à proliferação e disseminação do Capim Annoni. Tal decréscimo pode ser atribuído à existência da Unidade de Conservação APA do Ibirapuitã (Figura 23), que apesar de ser criada no ano de 1992, apenas em 2013 iniciou a implementação de seu plano de manejo.



**Figura 22 - Comparação das classes de campo entre os anos de 2013 e 2017**

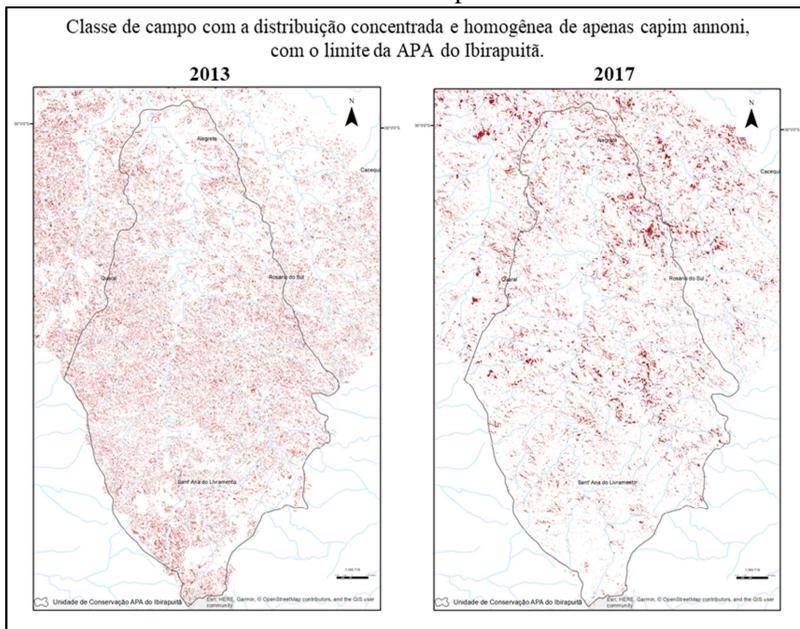


Fonte: Elaborada pela autora.

No ano de 2017, a classe de campo com a ocorrência de Capim Annoni disseminado homogeneamente estava mais concentrada em algumas regiões, formando áreas de campo cobertas de somente Capim Annoni, já no ano de 2013 esta classe não apresentava agrupamentos, estando, portanto, mais dispersa (Figura 22).



**Figura 23** - Comparação da classe campo com distribuição homogênea e concentrada do Capim Annoni na para os anos de 2013 e 2017 na APA do Ibirapuitã



Fonte: Elaborada pela autora.

Nota-se um aumento das áreas em que o mesmo se encontrava manejado ou pastejado. Conforme análises anteriores, uma das razões deste aumento significativo é em decorrência das condições climáticas apresentadas para a data da imagem de 2017, quando as temperaturas não tão baixas possibilitaram o rebrote do Annoni que, por sua característica de invasora, ao rebrotar, sufoca as demais espécies de gramíneas nativas do bioma pampa.

### 6.1.3 Considerações Finais

A partir do uso da metodologia de análise multitemporal de imagens de satélite dos anos de 2013 a 2017, chegou-se a um resultado que possibilitou avaliar a dinâmica da ocorrência do Capim Annoni na Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã.

Somente com a análise temporal, não é possível identificar um padrão de comportamento em um tipo de vegetação da mesma família,

como é o caso das gramíneas. Essa técnica, quando usada isolada, é apropriada quando se diferenciam famílias diferentes. Quando se procura a diferenciação de espécies da mesma família, outros parâmetros devem ser levados em consideração, neste caso a análise de precipitação e temperatura.

Para tanto, com a análise multitemporal das imagens com o cômputo do TVI e a análise dos parâmetros de precipitação e temperatura, foi possível identificar o mês de julho como sendo o mais adequado para este estudo.

Vale ressaltar que não necessariamente será o mês de julho o mais adequado para este tipo de análise, tendo em vista que as propriedades físico-químicas das plantas sofrem influência direta das condições climáticas, que por vezes também possuem variações, por isso a importância de se analisar em escala temporal e espacial.

Com base nos resultados apresentados, constatou-se que houve uma mudança da classe de campo, na região norte da bacia hidrográfica, onde havia pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni em 2013, principalmente para a classe de campo onde havia a ocorrência de Capim Annoni distribuído de forma homogênea e concentrada. Já ao sul da Bacia Hidrográfica esta classe com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni foi alterada principalmente para a classe de campo onde havia a presença de Capim Annoni manejado/pastejado e em menor concentração. Com isto nota-se um padrão de mudança, onde há maior influência antrópica, o Capim Annoni se estabelece de forma mais agressiva; já nas áreas com menor ação antrópica, ele ocorre de forma mais amena e diretamente associado às condições climáticas do momento.

O substancial avanço do Capim Annoni sob as áreas de campo em que sua ocorrência era praticamente inexistente é um indicativo da dificuldade de controle desta espécie invasora.

Esta referência à sua forma mais amena de ocorrência está associada às áreas de campo onde há Capim Annoni, porém ele foi pastejado pelo gado ou manejado pelo ser humano. A identificação desta classe de campo é diretamente associada às condições climáticas, é relativa à data da imagem utilizada, isso porque o estágio de maturação do Capim Annoni é dependente, principalmente, das condições de precipitação e temperatura. E isso pode ser observado com os altos valores de TVI apresentados para as mesmas classes analisadas em 2017, principalmente para a classe de campo com Capim Annoni pastejado que no ano de 2017 teve o maior valor, que ao comparar com o climograma já apontava para a possibilidade de esta classe apresentar

um significativo aumento no ano de 2017, que foi constatado com a reclassificação da imagem com base nos limiares definidos. Assim sendo, esses valores elevados são em decorrência de temperaturas mais elevadas na data da imagem utilizada, que propiciaram o processo de rebrote do Capim Annoni.

Estas áreas de rebrote são indicativas de um expressivo banco de sementes do Capim Annoni na área de análise. Isto torna a identificação do Capim Annoni mais complexa, já que em um período em que principalmente as temperaturas estiverem mais altas, o Capim Annoni tende a rebrotar e a sufocar as gramíneas nativas, fazendo com que a detecção de mudança seja sempre associada às condições climáticas da data da imagem utilizada. A mesma complexidade se aplica se temperaturas muito baixas ocorrerem, pois, o Capim Annoni pode secar totalmente impossibilitando sua identificação, já que, além dele, as espécies hibernais também tendem a secar. Vale lembrar que, apesar de Capim Annoni não ter um nicho ecológico definido e ser substancialmente resistente, o mesmo ainda sofre com os extremos das intempéries.

No que se refere ao uso do sensor multiespectral Landsat 8 para esta análise, vale ressaltar que o mesmo apresentou um bom desempenho. Entretanto, tal análise seria mais completa se utilizados sensores hiperespectrais já que os mesmos possibilitariam obter detalhes das propriedades físico-químicas da vegetação. Isto se deve ao fato de possuírem um grande número de bandas que são estreitas e contínuas que se traduzem em uma imagem composta por milhares de espectros e, portanto, com resolução espectral semelhante à verificada em espectrorradiômetros de campo ou de laboratório.

Assim sendo, o método de análise multitemporal de imagens de satélite utilizado para avaliar a dinâmica da ocorrência do Capim Annoni na Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã mostrou-se promissor à medida que foi possível definir, com o auxílio das análises de campo, suas áreas de ocorrência. Entretanto, validações estatísticas devem ser feitas para a determinação do grau de confiabilidade do método.

## 6.2 REFERÊNCIAS

BARBOSA, F. G. **Modelos de distribuição de espécies invasoras: tendências e Aplicações**. 2011. 140 f. Tese (Doutorado em Ecologia) – Instituto de biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BAYMA, Adriana Panhol; SANO, Edson Eyji. Séries temporais de índices de vegetação (NDVI E EVI) do sensor modis para detecção de desmatamentos no bioma cerrado. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba, v. 21, n. 4 out./dez. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000400047>.

BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 76, p. 156-172, 2000.

CARVALHO JUNIOR, O. A. et al. Avaliação dos classificadores espectrais de mínima distância euclidiana e spectral correlation mapper em séries temporais NDVIMODIS no campo de instrução militar de Formosa (GO). **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 61, n. 4, p. 399-412, 2009. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/296/285>>. Acesso em: 5 maio 2014.

DEFRIES, R. S.; TOWNSHEND, J. R. G. NDVI-derived land cover classifications at a global scale. **International Journal of Remote Sensing**, [S.l.], v. 15, p. 17, 3567-3586, 1994.

DEFRIES, R.; HANSEN, M.; TOWNSHEND, J. Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR Pathfinder data, *Remote Sens. Environ.*, 54, 209-222, 1995.

FREQUENTLY asked questions about the Landsat missions. Disponível em: <[http://landsat.usgs.gov/band\\_designations\\_landsat\\_satellites.php](http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php)>. Acesso em: 23 dez. 2017.

GINCIENE, B. R.; BITENCOURT, M. D. **Utilização do EVI (Enhanced Vegetation Index) para maior sensibilidade na detecção de mudanças temporais em fragmentos de floresta estacional semidecidual**. Paper apresentado no Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba, 2011.

HABOUDANE, D. et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 90, n. 3, p. 337-352, 2004.

MEDEIROS, R. B.; FOCHT, T. Invasão, prevenção, controle e utilização do capim-Annoni-2 (*Eragrostis plana* Nees) no Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.13, n.1-2, p. 105-114, 2007.

NACHTIGAL, G. F. et al. Ocorrência de ferrugem associada ao Capim-Annoni-2 (*Eragrostis plana* Nees) na região de fronteira da metade sul do RS. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 2888-2891, nov. 2009.

PIMENTEL, D. et al. Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. **Agriculture, Ecosystems e Environment**, [S.l.], v. 84, n. 1, p. 1-20, Mar. 2001.

PRINCE, S. D. A model of regional primary production for use with courseresolution satellite data. **Int. J. Remote Sens.**, [S.l.],v. 12, p. 1313–1330, 1991a.

PRINCE, S. D. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981–1988. **Int. J. Remote Sens.**, [S.l.],v. 12, p. 1301–1311, 1991b.

RUDORFF, C. M. et al. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 37, n. 2, p. 269-280, 2007.

RUNNING, S. W. et al. A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis. **Remote Sens. Environ.**, [S.l.], v. 51, p. 39-48, 1995.

TUCKER, C. J.; DREGNE, H. E.; NEWCOMB, W. W. Expansion and contraction of the Saharan desert from 1980 to 1990. **Science**, [S.l.], v. 253, p. 299-301, 1991.

WESSELS, K. J. et.al. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 91, p. 47–67, 2004.



## 7. ANÁLISE DE DETECÇÃO DE MUDANÇA (*CHANGE DETECTION ANALYSIS*) DAS ÁREAS DE CAMPO COM OCORRÊNCIA DA ESPÉCIE EXÓTICA INVASORA CAPIM ANNONI (*ERAGROSTIS PLANA*) POR MEIO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO TRIANGULAR (TVI)

Em março de 1976, o Ministério da Agricultura publicou a portaria nº 205 que proíbe a comercialização, transporte, importação e exportação de sementes e mudas do vulgo Capim Annoni, reconhecendo a agressividade desta vegetação invasora no que se refere a sua rápida disseminação e sua capacidade em se tornar uma espécie dominante. (BRASIL, 1976).

Em 23 de junho de 2009, no Estado do Rio Grande do Sul entra em vigor a Lei nº 13.187 que institui o Programa de Combate do Capim Annoni e em outubro de 2013, é publicada a portaria 79 da Secretaria Estadual do Meio Ambiente que destaca uma lista oficial de espécies exóticas invasoras existentes no Estado e estabelece ainda normas de controle entre outras providências. Nesta portaria a espécie *Eragrostis plana*, mais conhecida como Capim Annoni, é enquadrada em classe 1, que significa que esta espécie não pode ser produzida, doada ou comercializada. (RIO GRANDE DO SUL, 2009; RIO GRANDE DO SUL, 2013).

A necessidade de espacializar a ocorrência desta espécie e quantificá-la torna-se evidente ao poder público, tendo em vista o seu constatado avanço sobre as áreas de domínio do Bioma Pampa e os prejuízos causados a diversos setores da agro-economia, em especial ao setor da pecuária.

Nesse contexto, estudos que integram ferramentas de sensoriamento remoto e de análise de séries temporais de imagens de satélite mostram-se extremamente úteis para a compreensão da evolução ambiental e a detecção de mudança das classes, facilitando o monitoramento espacial e temporal da vegetação.

A utilização de índices de vegetação tem sido amplamente empregados por facilitarem a obtenção de parâmetros biofísicos da vegetação, dentre estes se pode mencionar o Índice de Vegetação Triangular (TVI) (Equação 12) proposto por Broge e Leblanc (2000), Epiphanyo *et al.* (1996) e Toledo e Epiphanyo (2007).

Nesse contexto, o objetivo deste capítulo é gerar, a partir de técnicas de análise de mudanças de coberturas vegetais (*Change Detection Analysis*), projeções de mudanças da disseminação desta

espécie, identificando sua tendência de distribuição, visando à prospecção de cenários futuros.

## 7.1 METODOLOGIA DE TRABALHO

A bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã (Figura 10) é uma Unidade de Planejamento e Gestão (UPG) da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí que está contida na região hidrográfica do Uruguai. Situa-se na região Oeste do Estado, entre as coordenadas geográficas 28°53' e 30°51' de latitude Sul e 53°39' e 57°36' de longitude Oeste, possui uma área de drenagem de 7.793 km<sup>2</sup>, sendo que seu principal formador é o rio Ibirapuitã.

O Bioma Pampa abrange 100% da área da Bacia Hidrográfica do Ibirapuitã (Figura 13), já a classe campo de uso e cobertura do solo ocupa 66 % da área desta bacia. (Figura19). Vale ressaltar que na classe de campo foram consideradas tanto as pastagens naturais presentes no bioma pampa, quanto as cultivadas, tendo em vista que ambas servem ao mesmo propósito (pecuária). A classe de campo torna-se particularmente interessante para esta pesquisa, já que as áreas mais afetadas pelo Capim Annoni, no bioma pampa, são as áreas de campo. Aproximadamente 40 % da área da bacia é coberta pela Unidade de Conservação Área de Proteção Ambiental Ibirapuitã. A APA do Ibirapuitã foi criada em 1992 tendo seu plano de manejo instituído em 2012. (Figura 14).

Ao analisar as diferenças nas medidas obtidas para os índices de vegetação, em estudo anterior, computados com os dados do espectrorradiômetro para cada espécie encontrada na área de estudo em relação às medidas destes índices para o Capim Annoni, constatou-se que o Índice de Vegetação Triangular (TVI) apresentou significativa diferença destas espécies em relação ao Capim Annoni. (Gráfico 8).

A partir da reclassificação dos valores de TVI para os anos de 2013 e 2017, constatou-se um aumento expressivo das áreas em que há a ocorrência do Capim Annoni de forma homogênea e concentrada (regiões em vermelho no mapa) e das áreas com a presença de Capim Annoni pastejado e em menor concentração (regiões em laranja no mapa) na região norte da bacia hidrográfica. Da mesma forma constatou-se a supressão de regiões onde o Capim Annoni era praticamente inexistente (regiões em verde no mapa), apontando para uma mudança de classe de ano 2013 para o ano de 2017. (Gráfico 15).

### 7.1.1 Método

Após o computo do TVI para as áreas de campo existente na bacia hidrográfica para as datas de 2013 e 2017, foi utilizado o método do índice Kappa (Equação 25) e o Kappa Condicional (Equação 26) para a validação dos resultados obtidos para as reclassificações daqueles anos. Para o cálculo do Índice Kappa foram geradas 100 amostras aleatórias para cada classe de campo definida neste estudo.

Contudo, cabe mencionar que, para o ano de 2017, foram utilizados dados em visitas a área de estudo para validar as amostras, já para 2013, pela inexistência de dados provenientes de visitas a área de estudo na data, foram utilizados relatos dos moradores e interpretação visual de imagens da época.

Após verificar a acurácia da classificação do TVI, foram geradas as análises de detecção de mudança. Para tanto, foi utilizado, para a modelagem da dinâmica das classes de campo obtidas com o Índice de Vegetação Triangular, o módulo *Land Change Modeler* (LCM) do SIG Idrisi Selva desenvolvido pela Clark Labs da Clark University, EUA. Este módulo possibilita elaborar análises de mudança da cobertura da terra, cálculo dos potenciais de transição, simulação de mudanças futuras além de ferramentas para avaliação de intervenções planejadas no uso da terra e impactos para biodiversidade. (EASTMAN, 2009). Assim, a metodologia proposta por Eastman (2009), foi utilizada para gerar as análises de perdas e ganhos de área e as mudanças de classe temática de campo para o período de 2013 a 2017. Logo, foram elaborados mapas dos submodelos de transição das classes temáticas de campo por meio da metodologia de *Multi-Layer Perceptron- MLP* (redes neurais artificiais), possibilitando a visualização das mudanças de classes ocorridas no período 2013 a 2017.

Com base nas mudanças ocorridas entre 2013 e 2017, utilizou-se o procedimento Cadeia de Markov, contido dentro do módulo *Land Change Modeler* (LCM) para estimar, a partir de uma matriz de probabilidade de transição entre as classes, um prognóstico de cobertura das classes de campo para os próximos 30 anos.

## 7.2 RESULTADOS

A Figura 21 apresenta os valores de TVI reclassificados para junho de 2013 e junho de 2017 para a bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã.

Com base na matriz de erro gerada para se obter a acurácia da reclassificação do TVI para o ano 2013, foram identificados erros de reclassificação em todas as classes, entretanto, todas as classes apresentaram valores acima de 84% de acerto. Ainda é possível constatar que houve confusão na classificação em todas demais classes com a classe campo com Capim Annoni misturado com outras espécies, obtendo assim uma acurácia (Kappa Condicional) de 0,77. Essa classe é complexa de ser identificada já que é composta por diversas espécies de gramíneas, incluindo o Capim Annoni, onde, conforme a matriz de erro, a classe campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada apresentou 10 amostras com confusão e a classe campo com Capim Annoni pastejado/manejado 14 amostras com confusão (Tabela 16).

**Tabela 16** - Matriz de confusão obtida para a reclassificação do TVI gerado para o ano de 2013

CLASSE 2013	Campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni	Campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada	Campo com Capim Annoni misturado com outras espécies	Campo com Capim Annoni pastejado/manejado	Acurácia (Kappa Condicional)
Campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni	84	5	1	2	0,91
Campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada	5	85	1	0	0,93
Campo com Capim Annoni misturado com outras espécies	4	10	98	14	0,77
Campo com Capim Annoni pastejado/manejado	7	0	0	84	0,92

Fonte: Elaborada pela autora.

O valor do coeficiente Kappa obtido com a reclassificação do TVI foi de 0,83, o que segundo o conceito de desempenho do Índice Kappa aplicado por Congalton e Green (2009) é considerado excelente.

Já na matriz de erro gerada para se obter a acurácia da reclassificação do TVI para o ano 2017, também se constataram erros de reclassificação em todas as classes, entretanto nenhuma das classes confundiu-se com a classe de campo com Capim Annoni distribuído de

forma concentrada, fazendo com que o mesmo tivesse acurácia (Kappa Condicional) equivalente a 1. Já no que se refere à classe de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies, todas as demais classes tiveram confusão com suas amostras, assim como em 2013. As classes de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni e campo com Capim Annoni pastejado/manejado foram as que mais apresentaram confusão em suas amostras com a classe de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies (Tabela 17).

**Tabela 17 - Matriz de confusão obtida para a reclassificação do TVI gerado para o ano de 2013**

CLASSE 2017	Campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni	Campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada	Campo com Capim Annoni misturado com outras espécies	Campo com Capim annoni pastejado/manejado	Acurácia (Kappa Condicional)
Campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni	79	3	15	2	0,79
Campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada	0	84	0	0	1
Campo com Capim Annoni misturado com outras espécies	20	13	82	20	0,60
Campo com Capim Annoni pastejado/manejado	1	0	3	78	0,95

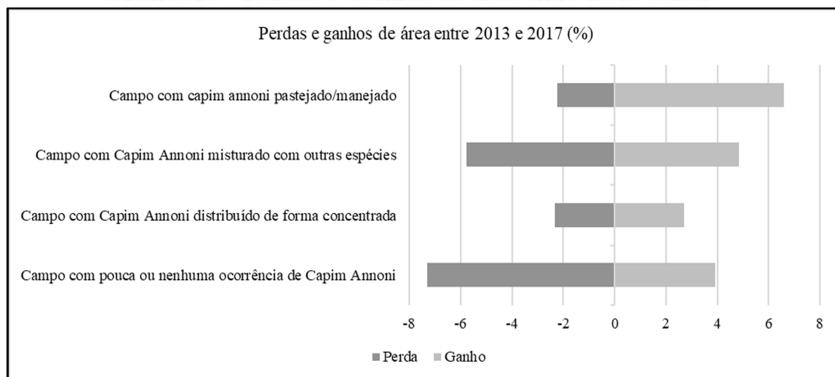
Fonte: Elaborada pela autora.

O valor do coeficiente Kappa obtido com a reclassificação do TVI foi de 0,74, o que segundo o conceito de desempenho do Índice Kappa aplicado por Congalton e Green (2009) é considerado muito bom.

As análises de perdas e ganhos de área das classes de campo para os anos de 2013 e 2017 (Gráfico 16) indicaram que a classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni teve significativa perda de área (7,9%) para as classes que possuem, de alguma forma, a ocorrência do Capim Annoni, resultando em uma perda

real de aproximadamente 3,4% de sua área. Esta classe torna-se de importante relevância para a conservação ambiental, já que possui significativas semelhanças com as pastagens naturais existentes nos campos presentes no bioma Pampa. Observa-se ainda que a classe de campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada, praticamente ganhou e perdeu área na mesma proporção indicando que apenas houve mudança espacial desta classe. Já a classe de campo com Capim Annoni pastejado/manejado obteve a menor perda de área dentre todas as classes (2,24%) e também o maior ganho de área (6,59%). A classe de campo onde havia a ocorrência do Capim Annoni misturado com outras espécies perdeu aproximadamente 5,8% de área para demais classes, entretanto obteve um ganho de área em 2017 de aproximadamente 4,9%, fazendo com que as taxas de perdas reais de sua área fossem inferiores a 1%.

**Gráfico16** - Perdas e Ganhos de área entre 2013 e 2017

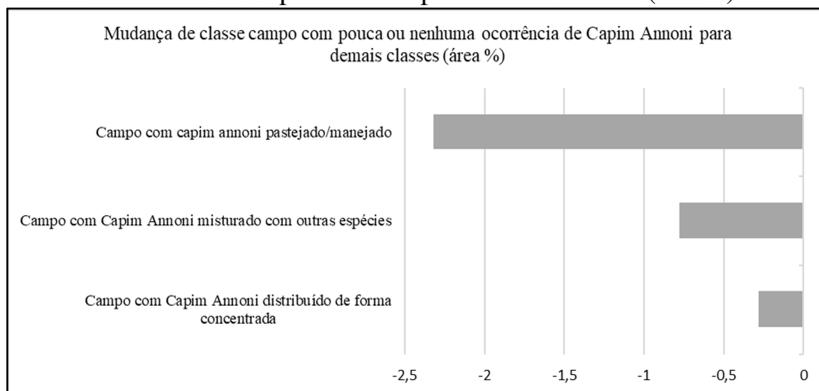


Fonte: Elaborada pela autora.

Com base no Gráfico 17, observa-se que a classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni mudou mais de 2% de sua área para a classe campo com Capim Annoni pastejado/manejado em 2017. Esta mudança pode estar associada às condições climáticas na data da imagem que propiciaram o rebrote do Capim Annoni, tornando-o palatável ao gado, o que ocorre em seus estágios iniciais de crescimento, acarretando o pastejo pelos animais. Esta classe também mudou para as classes de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies e campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada. Assim, as áreas sem ou com pouca ocorrência do Capim Annoni, nos últimos 4 anos, apresentaram expressiva perda de sua área

para classes em que há o Capim Annoni, indicando desta forma a expansão desta exótica para as áreas de campo com características mais próximas às de campo natural.

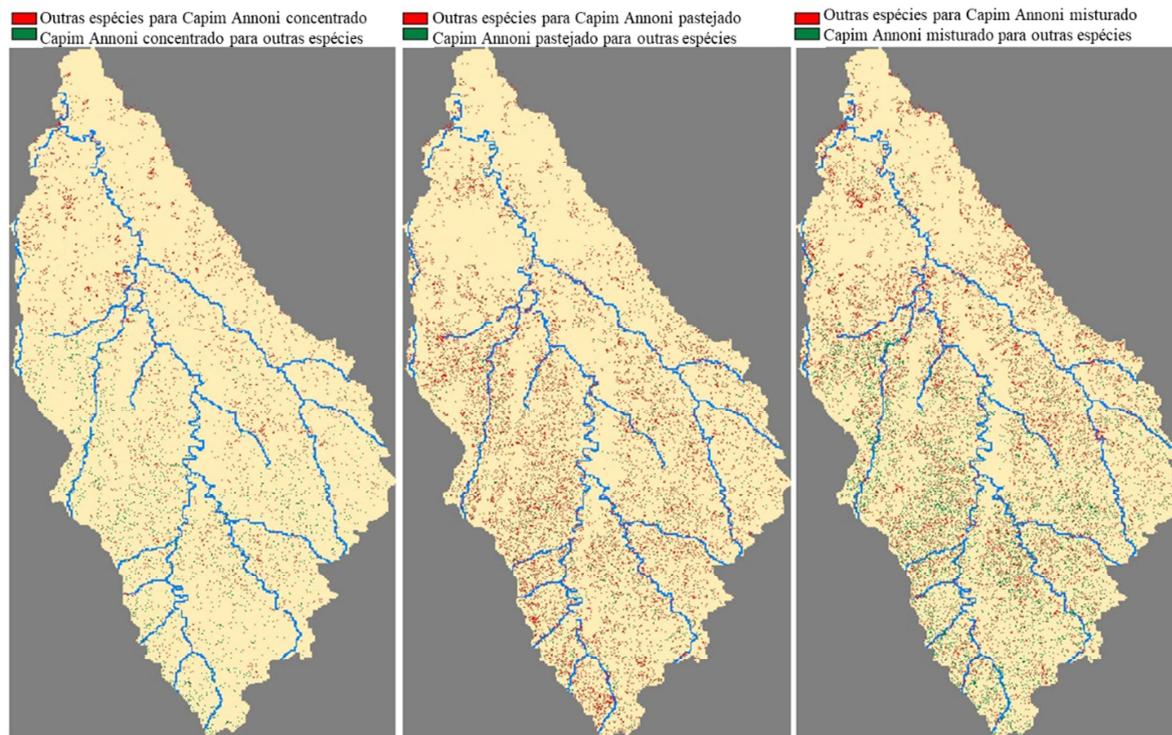
**Gráfico17** - Mudança de classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni para demais classes (área%)



Fonte: Elaborada pela autora.

Estas mudanças espaciais podem ser vistas na Figura 24. Nota-se que a sul da Bacia Hidrográfica houve uma mudança das demais classes para a classe sem ou com pouca ocorrência do Capim Annoni, apontando para uma suposta melhora neste ambiente. O oposto ocorre no centro e a norte desta bacia em que houve expansão das demais classes analisadas, indicando que estas regiões estão potencialmente mais degradadas que a região sul. Ainda, nota-se que a classe de campo com Capim Annoni pastejado/manejado, se distribuiu de forma uniforme sobre as áreas sem ou com pouca ocorrência do Capim Annoni, o qual praticamente não avançou sob as áreas pastejadas de Capim Annoni.

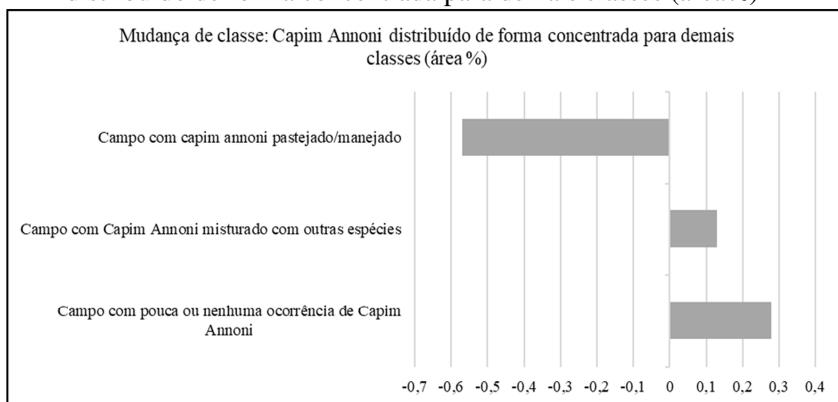
**Figura 24 -** Mudança de classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni para demais classe



Fonte: Elaborada pela autora.

A classe de campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada, apresentou mudança maior de sua área para a classe em que o mesmo se encontrava pastejado/manejado. Isso indica que, possivelmente, o Capim Annoni rebrotou e foi pastejado. Observa-se ainda que as classes de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies e campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni mudaram parte de sua área para a classe em que o Capim Annoni encontrava-se disseminado de forma homogênea e concentrado (Gráfico 18).

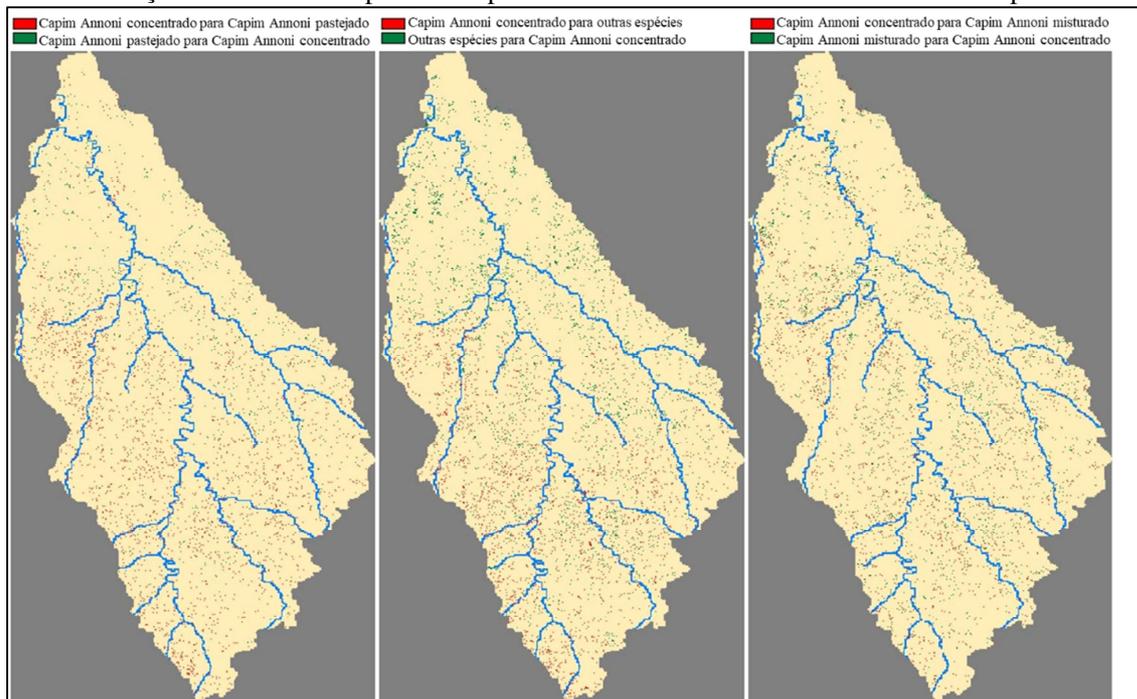
**Gráfico18** - A mudança de classe de campo com capim Annoni distribuído de forma concentrada para demais classes (área%)



Fonte: Elaborada pela autora.

É possível detectar mudanças do ano de 2013 a 2017 de todas as classes para a classe de Capim Annoni concentrado mais a norte da bacia, indicando uma concentração do mesmo nesta região (Figura 25). A classe de Capim Annoni concentrado/homogêneo teve mudanças a sul da bacia para a classe de Capim Annoni pastejado/manejado e para classe em que o mesmo se encontrava misturado com outras espécies. Observa-se ainda o avanço das áreas de Capim Annoni em sua forma homogênea sob a classe em que não há ou há pouca ocorrência do mesmo a norte da bacia.

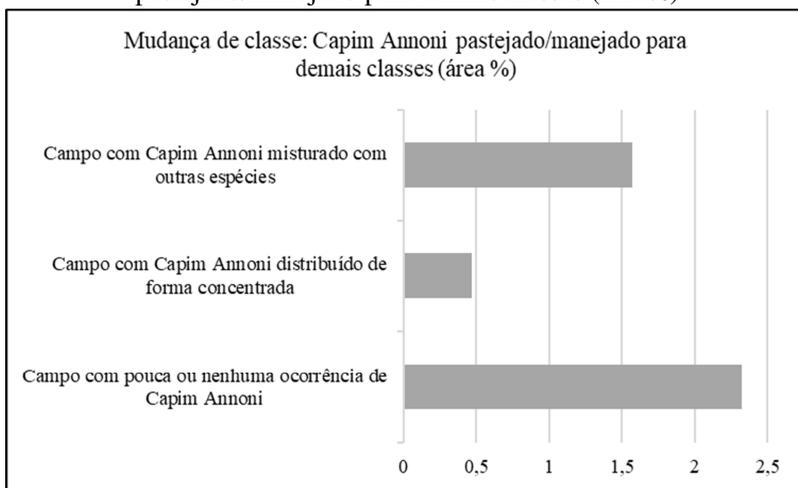
**Figura 25** - Mudança de classe de campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada para demais classes



Fonte: Elaborada pela autora.

A classe de campo de Capim Annoni pastejado/manejado em 2013 não perdeu área em 2017 (Gráfico 16), assim não se observou mudança de área desta classe para as demais, entretanto, houve um ganho de área onde a mesma avançou principalmente sob as classes de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni e campo com Capim Annoni misturado com outras espécies (Gráfico 19).

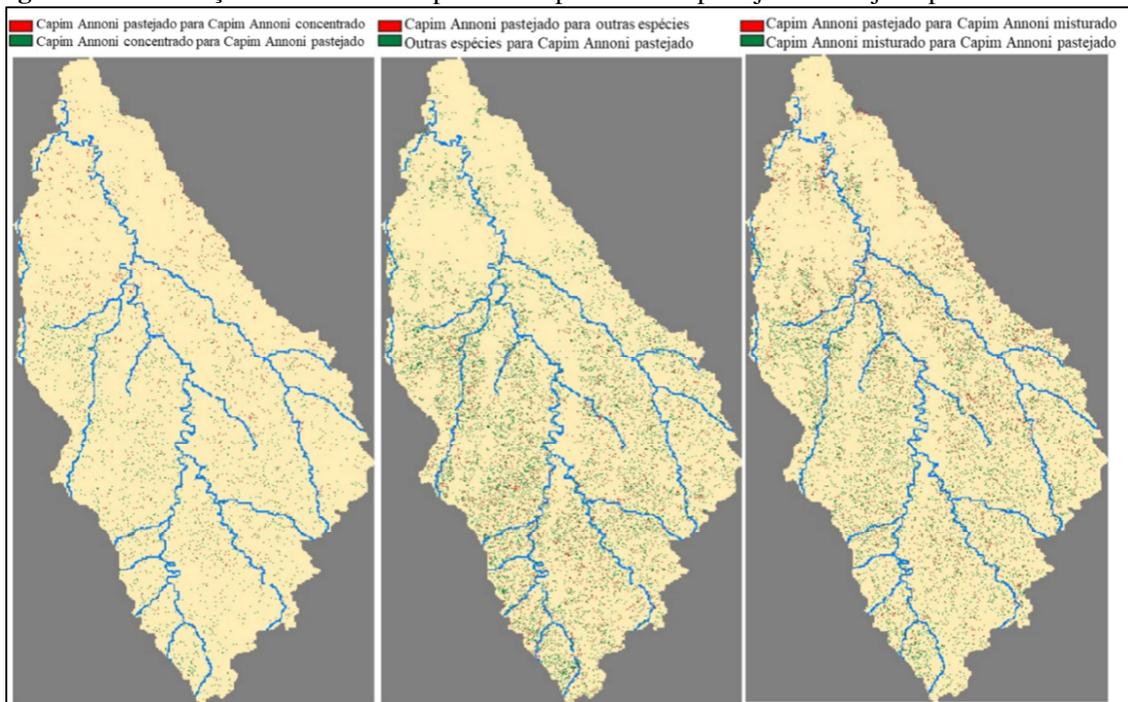
**Gráfico19** - A mudança de classe de campo com Capim Annoni pastejado/manejado para demais classes (área%)



Fonte: Elaborada pela autora.

Ao analisar a disposição espacial deste avanço é possível observar que a classe de Capim Annoni pastejado/manejado avançou de maneira uniforme na área da bacia hidrográfica, sob as classes de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni e campo com Capim Annoni misturado com outras espécies, entretanto, a região sul da bacia hidrográfica apresentou substancial mudança destas classes para a de Capim Annoni pastejado/manejado (Figura 26).

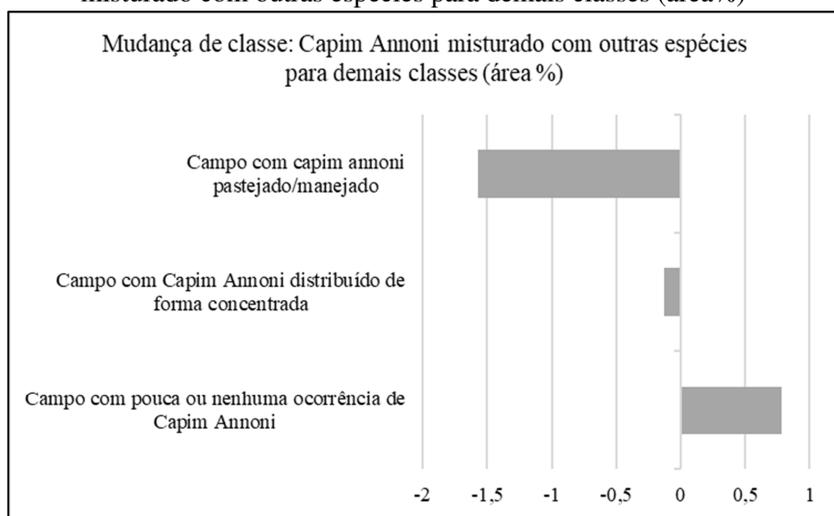
**Figura 26 -** Mudança de classe de campo com Capim Annoni pastejado/manejado para demais classes



Fonte: Elaborada pela autora.

A classe de campo onde o Capim Annoni encontrava-se misturado com outras espécies em 2013, em 2017 perdeu parte de sua área, principalmente para a classe de campo onde havia a ocorrência de Capim Annoni pastejado/manejado e avançou menos de 1% sobre as áreas em que havia pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni (Gráfico 20).

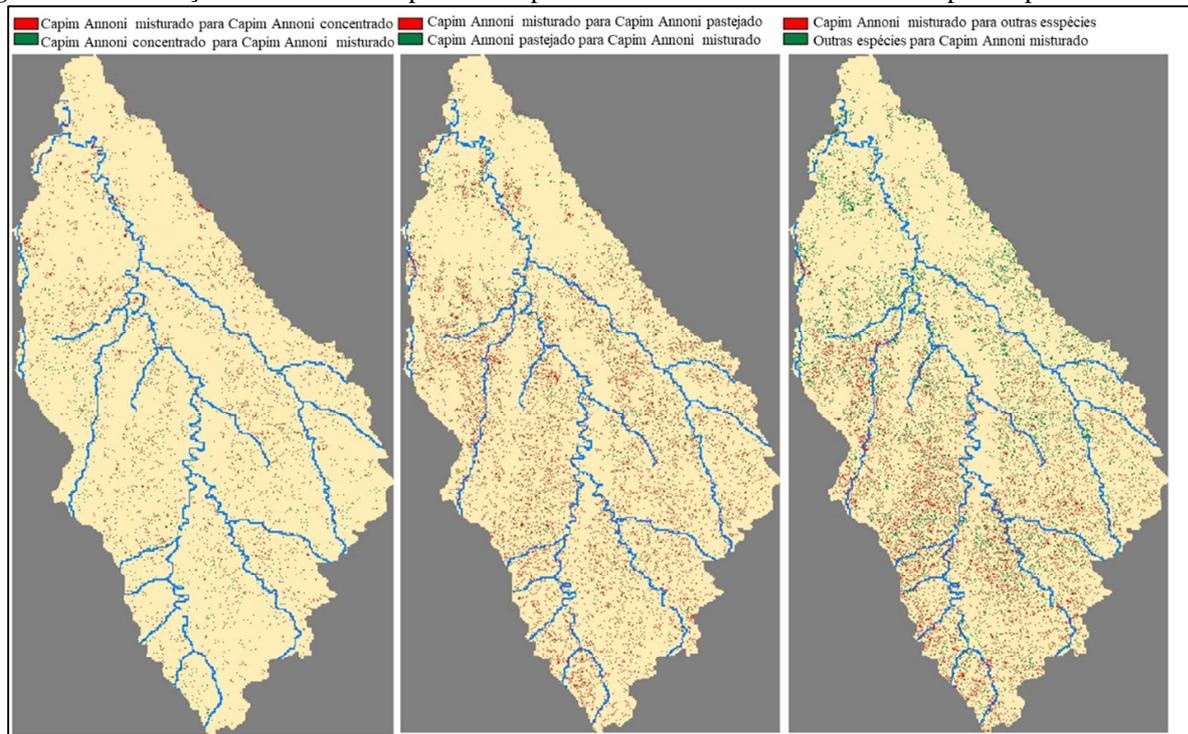
**Gráfico 20** - A mudança de classe de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies para demais classes (área%)



Fonte: Elaborada pela autora.

Essas mudanças de classe ocorreram principalmente na região central e sul da bacia, onde a classe de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies, altera para as classes de campo com Capim Annoni pastejado/manejado e campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni. Ainda, é possível observar a disseminação do Capim Annoni sobre as áreas onde a presença do mesmo não ocorria ou ocorria em menor quantidade (Figura 27).

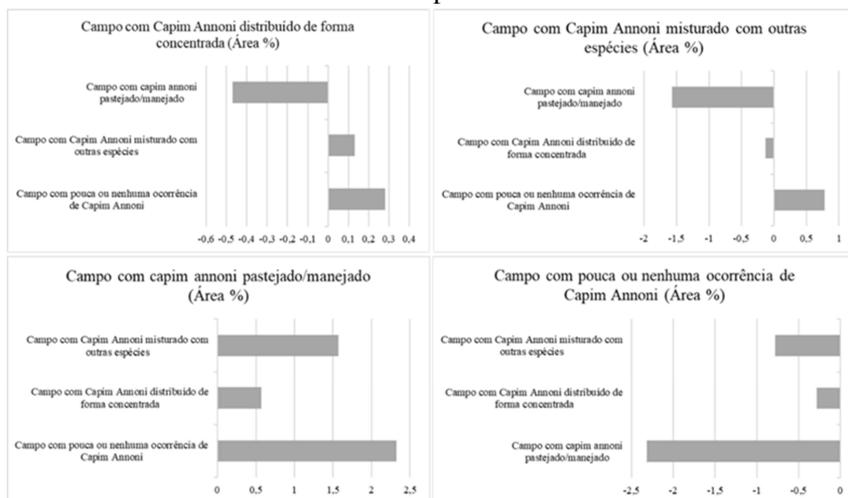
**Figura 27 - Mudança de classe de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies para demais classes**



Fonte: Elaborada pela autora.

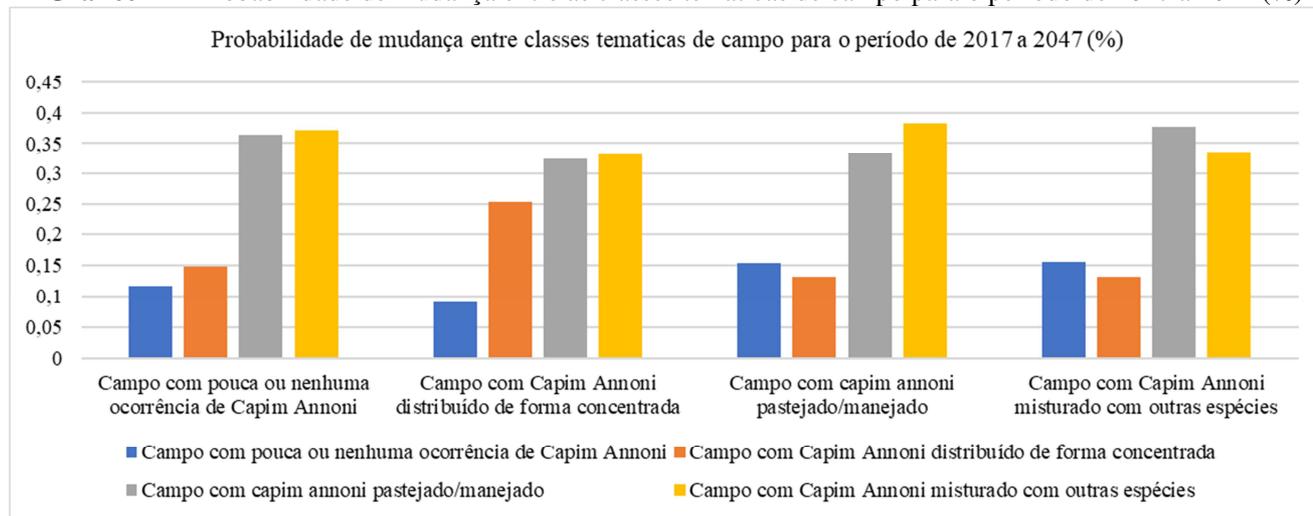
De maneira geral, pode-se observar que em 2017 as classes de Capim Annoni distribuído de forma concentrada, Capim Annoni pastejado/manejado e Capim Annoni misturado com outras espécies de gramíneas, avançaram principalmente sobre as áreas que em 2013, apresentavam a classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni, sendo esta a única classe temática de campo que não alterou outra classe em 2017 (Gráfico 21).

**Gráfico 21** - Aumento de área (%) das classes de campo de 2017 sob as classes de campo de 2013



Fonte: Elaborada pela autora.

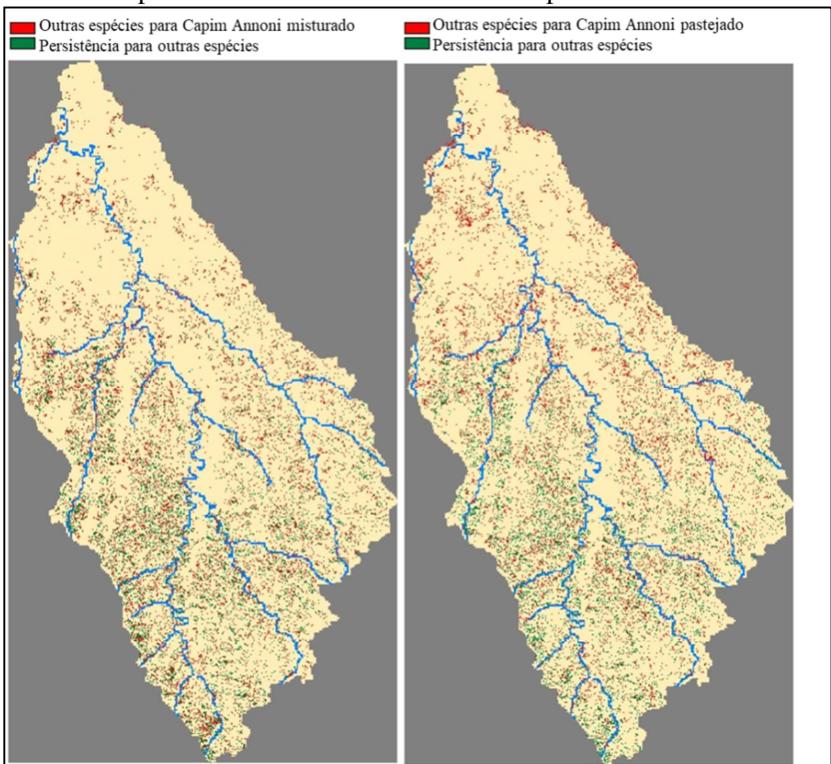
Ao analisar as probabilidades de mudança entre as classes temáticas de campo para o período de 2017 a 2047, observa-se que todas as classes possuem maiores probabilidades de mudança para a classe Capim Annoni pastejado/manejado e para classe com Capim Annoni misturado com outras espécies (Gráfico 22). As probabilidades de que haja mudança das classes para classe de campo com pouco ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni são baixas, indicando a dificuldade de as áreas de campo, que ainda possuem aspectos mais semelhantes ao encontrado no Bioma Pampa se recuperarem. Nota-se ainda que as chances de que esta classe em 2047 continue persistindo no ambiente são baixas, já que a possibilidade de classe de Capim Annoni distribuído de forma concentrada persistir no ambiente é elevada. Vale ressaltar que a acurácia apresentada nesta análise de probabilidades foi de 71,3%.

**Gráfico 22 - Probabilidade de mudança entre as classes temáticas de campo para o período de 2017 a 2012 (%)**

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com as probabilidades de mudanças entre as classes e as persistências das mesmas na Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã, nota-se a tendência de que a classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni persista ao sul da sua bacia e a norte diminua substancialmente, indicando a ocupação das demais classes, sendo que as classes de Capim Annoni pastejado/manejado e misturado com outras espécies, predominarão sob as áreas em que há pouca ou não há a ocorrência do Capim Annoni (Figura 28).

**Figura 28** - Áreas de persistência e mudança da classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni

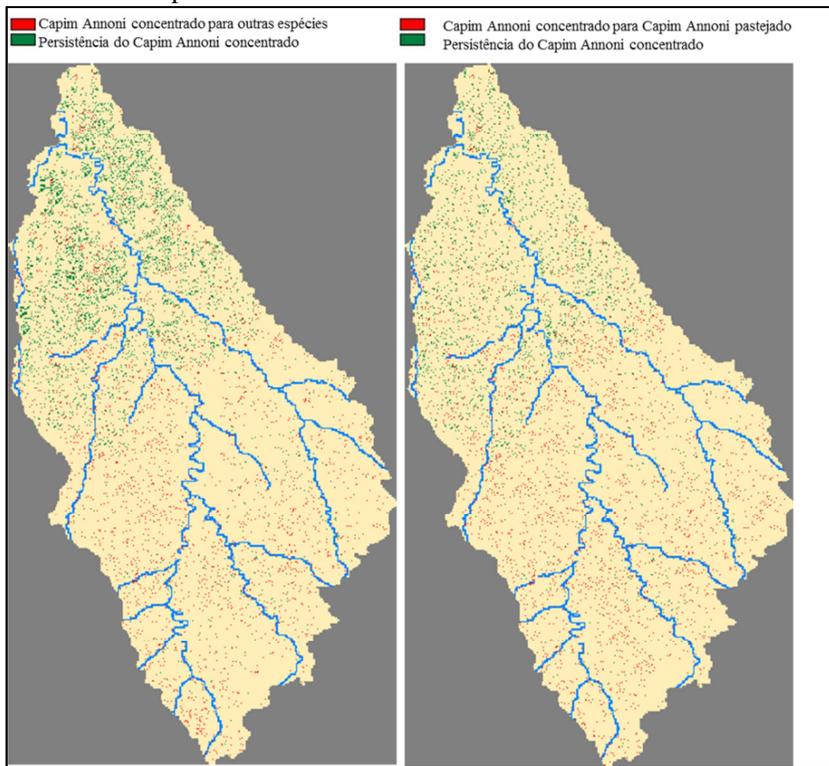


Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando a possível transição da classe de campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada para demais classes, observou-se que, espacialmente, há possibilidade de que classes de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies e a classe de campo com

Capim Annoni pastejado/manejado persistam na região sul. Por outro lado, ao norte da Bacia Hidrográfica, nota-se a possibilidade de persistência da classe de Capim Annoni distribuído de forma concentrada sob demais classes (Figura 29).

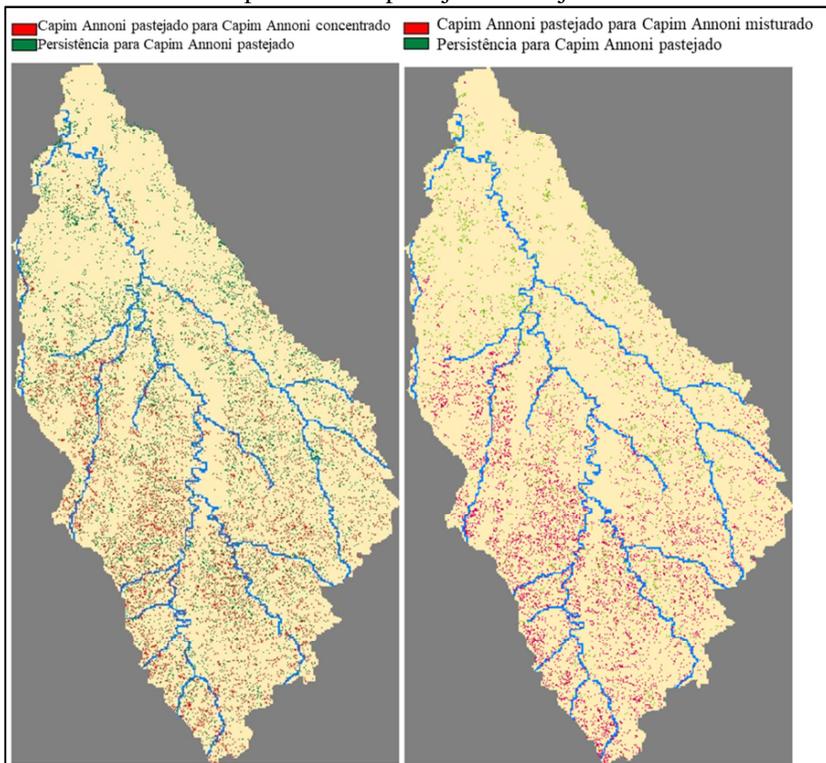
**Figura 29** - Áreas de persistência e mudança da classe de campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada



Fonte: Elaborada pela autora.

Com relação à classe de campo com Capim Annoni pastejado/manejado, observa-se que a probabilidade de que o mesmo persista na região norte, sob a classe de campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada, e na região sul da Bacia Hidrográfica haja a transição para a classe de campo com Capim Annoni pastejado/manejado (Figura 30).

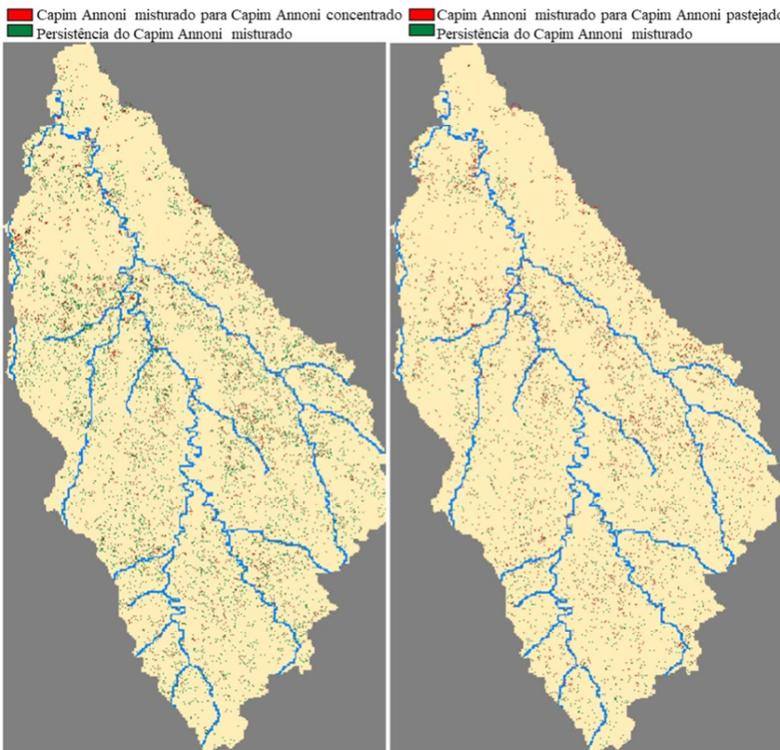
**Figura 30** - Áreas de persistência e mudança da classe de campo com Capim Annoni pastejado/manejado



Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando as probabilidades de mudança da classe de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies, nota-se a possibilidade de que estas áreas persistam em toda a área da bacia, principalmente sob a classe de Capim Annoni distribuído de forma concentrada. Nota-se ainda, a tendência de mudança da classe de campo de Capim Annoni misturado com outras espécies para a classe de Capim Annoni pastejado/manejado na região central e norte da Bacia Hidrográfica (Figura 31).

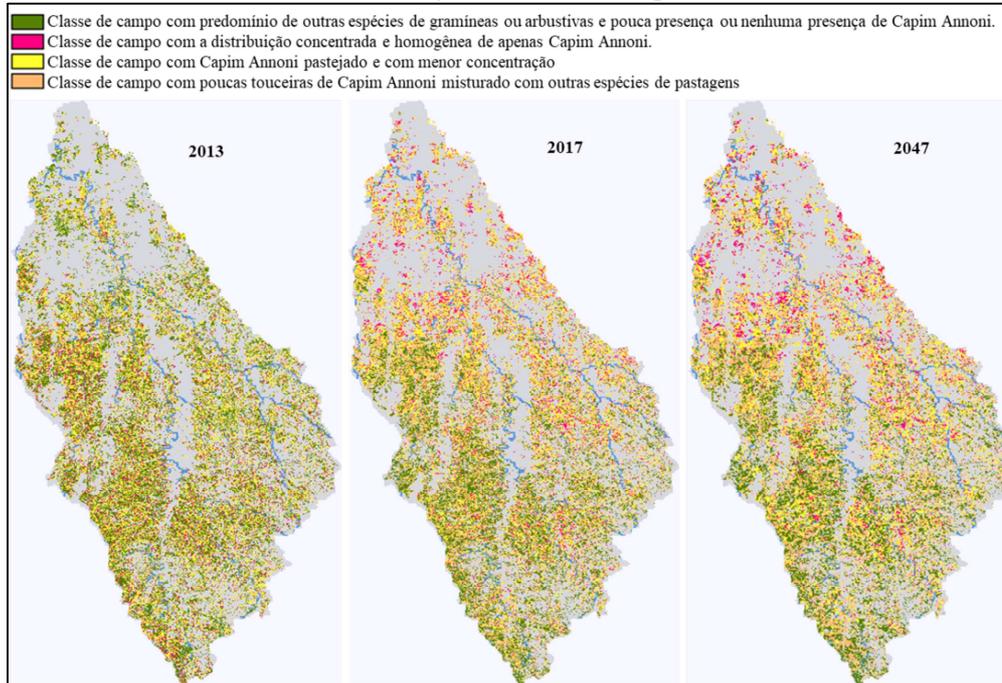
**Figura 31** - Áreas de persistência e mudança da classe de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 32 apresenta os resultados obtidos com a Cadeia de Markov, geradas a partir das probabilidades de transição das classes temáticas de campo de 2013 a 2017, para o prognóstico de 2047. Os resultados apresentados na Figura 32 mostram a possibilidade de que as classes de campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada, campo com Capim Annoni pastejado/manejado e campo com Capim Annoni misturado com outras espécies se concentrem na região norte e se disseminem de maneira menos concentrada a sul da bacia hidrográfica sobre a classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni que, de acordo com o cenário, possivelmente persistirá a sudoeste da bacia hidrográfica.

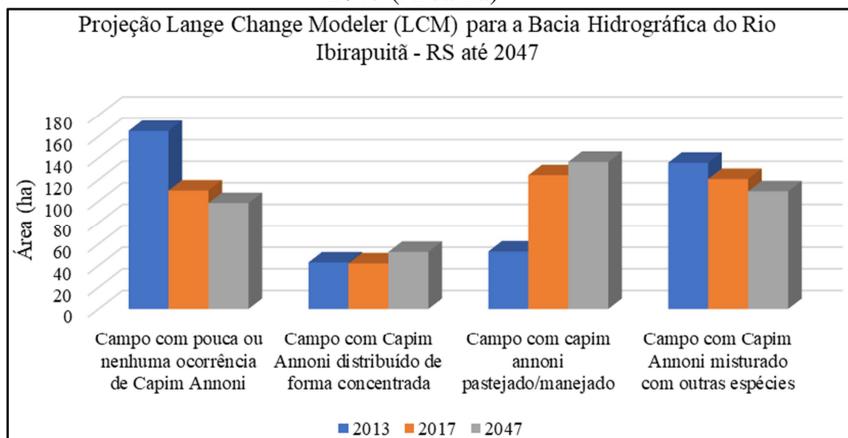
**Figura 32 -** Projeção das classes temáticas de campo para o ano de 2047 com base no modelo de Cadeia de Markov, na bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã-RS



Fonte: Elaborada pela autora.

A projeção elaborada para 2047 indica que a classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni e a classe de Campo com Capim Annoni misturado com outras espécies poderiam perder cerca de 11 ha de sua área. Já a classe de campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada poderia aumentar aproximadamente 11 ha e a de campo com Capim Annoni pastejado/manejado cerca de 13 ha (Gráfico 23).

**Gráfico 23** - Projeção das classes temáticas de campo para o ano de 2047 (Área-ha)



Fonte: Elaborada pela autora.

### 7.3 CONSIDERAÇÕES

A determinação das matrizes de erros geradas para os anos de 2013 e 2017 para as reclassificações do TVI permitiram verificar e analisar as confusões ocorridas entre as classes temáticas levantadas. As confusões ocorreram principalmente entre a classe de campo com Capim Annoni misturado com outras espécies para ambos os anos. Já a classe de campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada e homogênea foi a que apresentou menos confusão entre as classes, tanto para o ano de 2013 quanto para o ano de 2017.

Apesar disto, as reclassificações geradas a partir dos limiares definidos demonstraram-se satisfatórias. Isto pode ser constatado através do excelente índice Kappa apresentado para 2013 e um índice Kappa muito bom para 2017, assegurando a confiabilidade do estudo.

Entretanto, cabe mencionar que a validação do índice Kappa para 2013 torna-se limitada pela falta de dados decorrentes de visitas à área de estudo para esta data.

A partir da análise de perdas e ganhos de área entre os anos de 2013 e 2017, detectou-se que houve mudança entre as classes de cobertura de campo, sendo que a classe que apresentou maior ganho de área em 2017 foi a de campo com Capim Annoni pastejado/manejado. Ao mesmo tempo, a que apresentou maior perda de área foi a classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni.

De acordo com a análise de mudança entre as classes verificou-se que a classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni perdeu sua área principalmente para a classe campo com Capim Annoni pastejado/manejado.

No que se refere à classe de campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada percebe-se que houve significativa perda de área para a classe Capim Annoni pastejado/manejado. Tal perda de área para esta classe é coerente com as análises, já que há, para a data da imagem de 2017, condições climáticas favoráveis ao rebrote do Capim Annoni e por se tornar mais palatável neste estágio de biológico o mesmo torna-se potencial ao pastejo. Nota-se ainda que o mesmo avançou sob a área em que 2013 havia a cobertura da classe campo com pouca ou nenhuma ocorrência do Capim Annoni. A distribuição espacial indicou que a classe Capim Annoni distribuído de forma concentrada e homogênea obteve acréscimo de área, principalmente na região norte da bacia e um decréscimo de área na região sul da bacia hidrográfica.

A classe Capim Annoni pastejado/manejado não perdeu área para as demais classes, porém a mesma obteve significativo aumento de sua área sobre os locais em que, em 2013, havia a presença das classes de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni e campo com Capim Annoni misturado com outras espécies. A distribuição espacial desta classe indica que a mesma teve significativo acréscimo de região sul da bacia hidrográfica.

Já houve aumento da classe de campo onde o Capim Annoni está misturado com outras espécies sobre as áreas que, no ano de 2013, estavam cobertas com a classe que apresentava pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni. Entretanto, a mudança mais significativa desta classe ocorreu com a perda de sua área para a classe de campo com Capim Annoni pastejado/manejado. O aumento desta classe ocorreu principalmente na região central e norte da bacia hidrográfica e o decréscimo de sua área ocorreu, sobretudo, na região sul.

De maneira geral, constatou-se que a classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni foi a que sofreu maiores perdas de área de 2013 a 2017 para todas as demais classes, porém principalmente para a classe de Capim Annoni pastejado/manejado.

Nesse contexto, houve mudanças entre as coberturas de campos do período de 2013 a 2017 com uma significativa perda de área onde não havia invasão do Capim Annoni para as demais classes com ocorrência desta espécie. Ainda, de acordo com as análises de mudança, observou-se que houve um aumento destas áreas invadidas por esta espécie na região norte, e um decréscimo desta espécie ao sul da bacia hidrográfica.

As probabilidades de mudança entre as classes temáticas de campo para o período de 2017 a 2047 apontaram a possibilidades de todas as classes mudarem, principalmente, para a classe de Capim Annoni pastejado/manejado e para classe com Capim Annoni misturado com outras espécies. Ainda, ao longo do tempo, possivelmente a classe de campo com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni perderá sua área para demais classes. Isto indica maior degradação por invasão desta exótica nos ambientes com características mais próximas a dos campos existentes no Bioma Pampa.

A partir dos resultados obtidos com as Cadeias de Markov, verificou-se que, apesar de possuírem maior concentração na região norte da bacia hidrográfica, as classes que de alguma forma possuam a ocorrência do Capim Annoni possivelmente se disseminem em direção à região sul da bacia, avançando sobre as áreas em não há ou há pouca ocorrência de Capim Annoni.

De acordo com a projeção elaborada para 2047, a possibilidade de aumento de área de campo com Capim Annoni distribuído de forma concentrada e de campo com Capim Annoni pastejado/manejado, indica que o Capim Annoni continuaria a invadir outros locais, podendo haver diminuição das áreas onde atualmente ainda existem campos remanescentes do bioma Pampa.

Nesse contexto, apesar do modelo de simulação ter apresentado resultados compatíveis com a realidade de expansão do Capim Annoni apresentada nos últimos anos na bacia hidrográfica estudada, as análises de probabilidades e as projeções elaboradas para os próximos 30 anos apresentam limitações. Isto se deve a que a mesma considera apenas o fator espacial, não considerando variáveis importantes para definição de cenários futuros da disseminação de gramíneas como, por exemplo, os fatores climáticos, com grande influência em plantas de características

estivais ou hibernais. Tais limitações ocorrem devido ao fato de que o modelo de simulação dinâmica baseado em Cadeias de Markov entender que as transições envolvidas na modelagem são estáticas e não são dependentes de outras variáveis.

#### 7.4 REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Portaria nº 205**. Brasília, DF, mar. 1976.

BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 76, p. 156-172, 2000.

CONGALTON, R.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2009.

EASTMAN, J. **IDRISI Taiga tutorial**. Massachusetts: Clark Labs. 2009. Disponível em: <[www.clarklabs.org](http://www.clarklabs.org)>. Acesso em: 28 abr. 2015.

EASTMAN, J. R. **IDRISI Manual**. IDRISI Andes guide to GIS and image processing. manual version 15.00. Worcester: Clark University, 2006.

EPIPHANIO, J. C. N. et. al. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

FERREIRA, R. F. **Controle ecológico de focos dispersores de Capim-Annoni-2 em acostamento de rodovias**. 2007. 216 f.. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

FREQUENTLY asked questions about the Landsat missions. Disponível em: <[http://landsat.usgs.gov/band\\_designations\\_landsat\\_satellites.php](http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php)>. Acesso em: 23 dez. 2017.

GUTERRES, O. E. Considerações sobre o estabelecimento de forrageiras em áreas inçadas com o *Capim Annoni-2* na estação experimental zootécnica de Tupanciretã. In: REUNIÃO REGIONAL DE AVALIAÇÃO DE PESQUISA COM ANNONI-2, 1991. Bagé.

**Anais...** Bagé: EMBRAPA-CPPSUL, 1993. p. 25-39. (EMBRAPA-CPPSUL. Documentos, 7).

HABOUDANE, D. et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 81, n. 2-3, p. 416-426, 2002. Doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4.

REIS, J. C. L. *Capim Annoni-2*: origem, morfologia, características, disseminação. In: REUNIAO REGIONAL DE AVALIAÇÃO DE PESQUISA COM ANNONI 2, 1991. Bagé. **Anais...** Bagé: EMBRAPA-CPPSUL, 1993. p. 5-23. (EMBRAPA-CPPSUL. Documentos, 7).

RIO GRANDE DO SUL. **Lei nº13.187, de 23 de junho de 2009**. Institui o Programa de Combate do Capim Annoni-2 no âmbito do Estado do Rio Grande do Sul, e dá outras providências. 2009. Disponível em: <<http://www.legislacao.sefaz.rs.gov.br/Site/Document.aspx?inpKey=162636&inpCodDispositivo=&inpDsKeywords>>. Acesso em 12 mar. 2015.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Portaria 79, de 31 de outubro de 2013**. Reconhece a lista de espécies exóticas invasoras do estado do Rio Grande do Sul e demais classificações, estabelece normas de controle e dá outras providências. 2013.

Disponível em:<[http://www.sema.rs.gov.br/upload/Portaria%20SEMA%20n%C2%BA%2079\\_2013%20reconhece%20a%20lista%20Esp%C3%A9cies%20Ex%C3%B3ticas%20Invasoras%20%20RS%20e%20demais%20classifica%C3%A7%C3%B5es\\_normas%20de%20controle%20e%20outras%20providencias.pdf](http://www.sema.rs.gov.br/upload/Portaria%20SEMA%20n%C2%BA%2079_2013%20reconhece%20a%20lista%20Esp%C3%A9cies%20Ex%C3%B3ticas%20Invasoras%20%20RS%20e%20demais%20classifica%C3%A7%C3%B5es_normas%20de%20controle%20e%20outras%20providencias.pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2015.

RUHOFF, A.; FANTIN-CRUZ, I.; COLLISCHONN, W. Modelos de simulação dinâmica do desmatamento na Amazônia. **Caminhos da Geografia**, Uberlândia, v. 1, n. 36, p. 258-268, dez. 2010.

TOLEDO, J. M. A.; EPIPHANIO, J.C.N. Comportamento de Índices de Vegetação a partir de três sensores orbitais: estudo de caso no município de São Borja (RS). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO,13., Florianópolis, 2007. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 741-748.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de técnicas de sensoriamento remoto a partir da metodologia de mudanças de coberturas vegetais mostrou-se promissora, já que foi possível verificar a magnitude da existência problemática do Capim Annoni (*Eragrostis plana*) nas áreas de abrangência do Bioma Pampa na bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã.

Assim constatou-se que esta espécie tem se expandido em sua forma mais agressiva sob a região norte da bacia, gerando extensos campos cobertos com a invasora, e que as áreas de campo em que quase não havia a ocorrência de Capim Annoni estão diminuindo, quando comparado com o ano de 2013.

Atualmente, aproximadamente 27% da bacia ainda possuem remanescentes de campos naturais e cerca de 73% estão cobertas com esta exótica e, de acordo com as projeções para 2047, a mesma aumentará para aproximadamente 77% da área. Vale ressaltar que esta projeção foi elaborada com base em um modelo estático que entende que as condições seriam mantidas ao longo do tempo. Entretanto, a partir desta pesquisa, entendeu-se que o Capim Annoni é uma gramínea que é afetada pelas condições sazonais de clima, assim, o modelo não corresponde completamente ao que ocorre na realidade. Apesar disso, a possibilidade de que com o tempo diminua a classe de campo com características mais próximas dos campos nativos típicos do Bioma Pampa é alarmante, já que, apesar de o mesmo representar apenas 7% do território brasileiro, este abrange mais de 60 % do Estado do Rio Grande do Sul, sendo que mais de 60% deste bioma é composto por estes campos naturais.

Algumas considerações devem ser feitas acerca da metodologia utilizada. Ao longo da pesquisa, o Índice de Vegetação Triangular mostrou-se apropriado para a identificação da espécie, bem como os limiares definidos para reclassificar as imagens. Entretanto, vale lembrar que esta análise mostrou-se eficiente pelas características da disseminação do Capim Annoni, que em alguns pontos da bacia ocorre em mais de 2 km<sup>2</sup> em cada uma das situações estudadas.

Conforme a literatura, as sementes de Capim Annoni possuem alta capacidade de germinação com o aumento de temperatura, isto faz com que a classe de Capim Annoni pastejado possa apresentar substancial diferença de uma data para outra. Esta foi a classe que apresentou maior crescimento de 2013 a 2017. Apesar disto, se a mesma

for extremamente<sup>4</sup> pastejada neste período, é possível que não possua vigor para chegar ao período de floração, desta forma não ocorrendo aumento no seu banco de sementes, que é a principal causa das dificuldades de manejo da invasora. Já as áreas em que o Capim Annoni encontra-se extremamente concentrado são áreas onde ele está potencialmente consolidado e que a longas datas vem aumentando seu banco de sementes, dificultando assim o seu manejo. Estas áreas geralmente são mais degradadas e mais antropizadas, com presença de áreas agricultadas e inúmeras rodovias e vias de acesso. Estas situações facilitam a expansão da invasora e reforça que o fato de que a diminuição da biodiversidade do Bioma Pampa, sua degradação e descaracterização possui associação com a progressiva implantação das monoculturas.

Entretanto, de acordo com a pesquisa, verificou-se que na região sul da bacia as áreas com pouca ou nenhuma ocorrência de Capim Annoni, em 2013, aumentaram sobre as áreas em que o mesmo se encontrava de forma concentrada, ocorrendo justamente o contrário na região norte da bacia.

Na região sul, onde constatou-se a persistência dos campos naturais, encontra-se a Área de Preservação Ambiental do Ibirapuitã. Isto pode ser um indicador de que as práticas de manejo podem estar apresentando resultados positivos para a preservação da biodiversidade.

Com base nos dados apresentados, pode-se constatar a magnitude da existência do Capim Annoni (*Eragrostis plana*) nas áreas de campo da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã, que esta é uma problemática com tendência crescente que necessita de medidas que controlem sua disseminação sob os campos naturais não somente da bacia estudada como em toda a área do Bioma Pampa, uma vez que este é um ambiente propício à sua disseminação.

Com base nestas análises sugere-se que ao se elaborar políticas públicas que visem minimizar a expansão do Capim Annoni, a relação de temperatura e precipitação aqui identificados seja considerada principalmente para a identificação e o manejo de áreas onde há o capim annoni pastejado .

---

<sup>4</sup>Levando em consideração a taxa de lotação em que a pressão do pastejo possa ser sustentável neste ecossistema. (AMARAL et al., 2016;DIKMAN, 1998).

## 9. REFERÊNCIAS

AMARAL, G. A. et. al. A produção animal como controle opção ao controle do capim-annoni e a conservação do Pampa. **Natureza em Revista**, Porto Alegre, p. 30-33. mar. 2016.

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY (ASP). **Manual of remote sensing**. Falls Church, VA: Sheridan Press, 1983. v. 1-2.

ARAÚJO, A. A. **Melhoramentodas pastagens**: agrostologia rio-grandense. 5. ed. Porto Alegre: Sulina, 1978.

BARBOSA, F. G. **Modelos de distribuição de espécies invasoras**: tendências e Aplicações. 2011. 140 f. Tese (Doutorado em Ecologia) – Instituto de biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BAYMA, Adriana Panhol; SANO, Edson Eyji. Séries temporais de índices de vegetação (NDVI E EVI) do sensor modis para detecção de desmatamentos no bioma cerrado. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba, v. 21, n. 4 out./dez. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000400047>.

BILENCA, D.; MIÑARRO, F. **Identificación de áreas valiosas de pastizal en las pampas y campos de Argentina, Uruguay y sur Brasil (AVPs)**. Buenos Aires: Fundación Vida Silvestre Argentina, 2004.

BLACKBURN, G. A. Spectral indexes for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. **International Journal of Remote Sensing**, [S.l.], v. 19, p. 657-675, 1998a.

BLASCHKE, T.; GLÄSSER, C.; LANG, S. Processamento de imagens num ambiente integrado sig/sensoriamento remoto: tendências e consequências. In: BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento remoto e SIG avançados**: novos sistemas sensores, métodos inovadores. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento remoto e SIG avançados**: novos sistemas sensores, métodos inovadores. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BOECHAT, S. C.; LONGHI-WAGNER, H. M. Padrões de distribuição geográfica dos táxons brasileiros de *Eragrostis* (Poaceae, Chloridoideae). **Revista brasileira de Botânica**, São Paulo, V. 23, n. 2, p. 177-194, 2000.

BOTREL, M. A.; NOVAES, L. P.; ALVIM, M. J. **Características forrageiras de algumas gramíneas tropicais**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 1998.

BRASIL. **Lei federal nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006a**. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. 2006. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2006/lei/111428.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/111428.htm)>. Acesso em: 12 jun. 2015.

BRASIL. **Lei federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm). Acesso em 17/04/2015>. Acesso em: 12 jun. 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Portaria nº 205**. Brasília, DF, mar. 1976.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONABIO nº 05, de 21 de outubro de 2009**. Dispõe sobre a Estratégia Nacional sobre Espécies Exóticas Invasoras. 2009. Disponível em: <[http://www.institutohorus.org.br/download/marcos\\_legais/Resolucao\\_CONABIO\\_n5\\_EEI\\_dez\\_2009.pdf](http://www.institutohorus.org.br/download/marcos_legais/Resolucao_CONABIO_n5_EEI_dez_2009.pdf)>. Acesso em: 04 maio 2015.

BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 76, p. 156-172, 2000.

BUSCHMANN, C.; NAGEL, E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, p. 711–722, 1993.

CALDAS, M. M. et al. Ciclo de vida da família e desmatamento na Amazônia: combinando informações de sensoriamento remoto com dados primários. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 57, n. 4, p. 683-711, 2003.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**. 3. rd. ed. Nova York: The Guilford Press, 2002.

CARVALHO JUNIOR, O. A. et al. Avaliação dos classificadores espectrais de mínima distância euclidiana e spectral correlation mapper em séries temporais NDVIMODIS no campo de instrução militar de Formosa (GO). **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 61, n. 4, p. 399-412, 2009. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/296/285>>. Acesso em: 5 maio 2014.

CHAPPELLE, E. W.; KIM, M. S.; MCMURTREY, J. E. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids. **Remote Sens. Environ.**, [S.l.], 39, n. 3, p. 239–247, 1992.

COELHO, R. W. **Utilização de herbicidas no controle do capim annoni 2**. Bagé: EMBRAPA-UEPAE de Bagé, 1985. (Boletim de Pesquisa, 3).

CONGALTON, R.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2009.

DATT, B. A visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in Eucalyptus leaves. **International Journal of Remote Sensing**, [S.l.], v. 20, p. 2741–2759, 1999.

DATT, B. Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b, and total carotenoid content in eucalyptus leaves. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 66, p. 111-121, 1998.

DAUGHTRY, C. S. T. et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from 76 leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 74, n. 2, p. 229-239, 2000.

DEFRIES, R. S.; TOWNSHEND, J. R. G. NDVI-derived land cover classifications at a global scale. **International Journal of Remote Sensing**, [S.l.], v. 15, p. 17, 3567-3586, 1994.

DEFRIES, R.; HANSEN, M.; TOWNSHEND, J. Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR Pathfinder data. **Remote Sens. Environ.**, [S.l.], 54, 209-222, 1995.

DIKMAN, J. Carrying capacity: outdated concept or useful livestock management tool? **Overseas Development Institute**, [S.l.], 1998. Disponível em: <<http://www.odi.org.uk/pdn/drought/dijkman.html>>. Acesso em: 21 jun. 2017.

DUDA, R. O.; HART, P. E.; STORK, D. G. **Pattern classification**. New York: John Wiley & Sons, 2000.

DUSSEUX, P. et al. Agricultural practices in grasslands detected by spatial remote sensing. **Environmental Monitoring Assessing**, [S.l.], v. 12, n. 186, p. 8249–8265, Dec. 2014.

EASTMAN, J. **IDRISI Taiga tutorial**. Massachusetts: Clark Labs. 2009. Disponível em: <[www.clarklabs.org](http://www.clarklabs.org)>. Acesso em: 28 abr. 2015.

EASTMAN, J. R. **IDRISI Manual**. IDRISI Andes guide to GIS and image processing. manual version 15.00. Worcester: Clark University, 2006.

EASTMAN, J. R.; SOLORZANO, L.; FOSSEN, M. V. Transition Potential Modeling for Land-Cover Change. In: MAGUIRE, D. J.; BATTY, M.; GOODCHILD, M. F. (Ed.). **GIS, spatial analysis and modeling**. Redlands: ESRI Press. 2005. p. 357-385.

EASTMAN, J. R.; TOLEDANO, J. geomatic approaches for modeling land change scenarios. In: OLMEDO, M. T. C. et al. (Ed.). **Lecture notes in geoinformation and cartography**. [S.l.]: Springer, 2018. p. 499-505.

EPIPHANIO, J. C. N. et al. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

FERRARI, P. A.; GALVES, J. A. **Acoplamento em processos estocásticos, notas para um minicurso apresentado na XIII Escuela Venezolana de Matemáticas**. [S.l.], 2000.

FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, M. E. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. **Acta Scientiarum Biological Sciences**, Maringá, v. 30, n. 4, p. 379-390, 2008.

FERREIRA, N. R.; FILIPPI, E. E. Reflexos econômicos, sociais e ambientais da invasão biológica pelo Capim-Annoni (*Eragrostis Plana* Nees) no Bioma Pampa. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, DF, v. 27, n. 1/3, p. 47-70, 2010.

FERREIRA, N. R.; MEDEIROS, R. B. de; SOARES, G. L. G. Potencial alelopático do capim-annoni (*Eragrostis plana* Nees) na germinação de sementes de gramíneas perenes estivais. *Revista Brasileira de Sementes*, Londrina, v. 30, n. 2, p. 43-50, 2008.

FERREIRA, N. R.; MEDEIROS, R. B.; SOARES, G. L. G. Avaliação alelopática do capim-annoni-2 sobre a germinação de sementes de gramíneas perenes. In: REUNIÃO DO GRUPO TÉCNICO EM FORRAGEIRAS DO CONE SUL GRUPO CAMPOS, 2006, Pelotas. **Anais...** Pelotas: EMBRAPA, 2006.

FERREIRA, R. F. **Controle ecológico de focos dispersores de Capim-Annoni-2 em acostamento de rodovias**. 2007. 216 f.. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

FISCHER, M. M.; SCHOLTEN, H. J. Geographic information systems, spatial data analysis and spatial modelling: problems and possibilities. **WSG-Discussion Paper**, [S.l.], n. 37, Feb. 1994.

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

FOCHT, T. **Ecologia e dinâmica do capim-annoni-2 (eragrostis Plana Nees), uma invasora dos campos sulinos**: prevenção da sua expansão. 2008. 145 f. Tese (Doutorado em Ecologia) - Instituto de Biociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

FREQUENTLY asked questions about the Landsat missions. Disponível em: <[http://landsat.usgs.gov/band\\_designations\\_landsat\\_satellites.php](http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php)>. Acesso em: 23 dez. 2017.

GALO, M. L. B. T. **Caracterização ambiental do Parque Estadual Morro do Diabo através de dados e técnicas de sensoriamento remoto**: abordagens utilizando redes neurais artificiais. 2000. 205f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, 41, n. 1, p. 35–44. 1992.

GARCIA, R. P. A. **Suplementação proteica e mineral de novilhas gestantes em pastagens nativas dominada por Capoim-Annoni-2**. 2008. 93 f.. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GINCIENE, B. R.; BITENCOURT, M. D. **Utilização do EVI (Enhanced Vegetation Index) para maior sensibilidade na detecção de mudanças temporais em fragmentos de floresta estacional semidecidual**. Paper apresentado no Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba, 2011.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in the remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 58, p. 289–298, 1996.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: Algorithm development for remote sensing of

chlorophyll. **Journal of Plant Physiology**, [S.l.], v.148, p. 494–500, 1996.

GITELSON, A., MERZLYAK, M. N. Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. **Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology**, [S.l.], v. 22, n. 3, p. 247-252, 1994. DOI: 10.1016/1011-1344(93)06963-4

GOMES, J. F. et. al. **Situação atual e demandas de pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica em forrageiras e pastagens** - Região Sul do Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. (Documentos, 178).

GONÇALVES, L. M. **Métodos de classificação não-supervisionada de imagens de sensoriamento remoto usando mapas auto-organizáveis de Kohonen**. 2009.455 f.Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas – Campinas, 2009.

GONÇALVES, M. L. et al. Classificação não-supervisionada de imagens de sensores remotos utilizando redes neurais auto-organizáveis de métodos de agrupamentos hierárquicos. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 60/01, 2008.

GONZAGA, S. S.; COELHO, R. W. Manejo de pastagem de *Agrostis Espillaris* consorciado com *Lotus Corniculatus* *Trifolium Repens* visando controlar a reinvasão com *Eragrostis Plana*. In: REUNIÃO REGIONAL DE AVALIAÇÃO DE PESQUISA COM ANNONI-2, 1991. Bagé. **Anais...** Bagé: EMBRAPA-CPPSUL, 1993. p. 71 -82. (EMBRAPA-CPPSUL. Documentos, 7).

GONZAGA, S. S.; GONÇALVES, O. N. avaliação da eficiência de herbicidas no controle de capimannoni 2 (*Eragrostis Plana* Nees). Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 1999. (Circular técnica, 13).

GOULART, I. C. G. R. et. al. Controle de Capim-Annoni-2 (*Eragrostis Plana*) com herbicidas pré-emergentes em associação com diferentes métodos de manejo do campo nativo. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 181-190, 2009.

GOULART, I. C. G. R. et. al. Interações entre herbicidas e protetores para o controle de capim-annoni em pastagem natural. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 10, p. 1722-1730, 2012.

GUTERRES, O. E. Considerações sobre o estabelecimento de forrageiras em áreas inçadas com o *Capim Annoni-2* na estação experimental zootécnica de Tupanciretã. In: REUNIÃO REGIONAL DE AVALIAÇÃO DE PESQUISA COM ANNONI-2, 1991. Bagé. **Anais...** Bagé: EMBRAPA-CPPSUL, 1993. p. 25-39. (EMBRAPA-CPPSUL. Documentos, 7).

HABOUDANE, D. et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 81, n. 2-3, p. 416-426, 2002. Doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4.

HABOUDANE, D. et. al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 90, n. 3, p. 337-352, 2004.

HALL, G. A. B.; NASCIMENTO, A. Estudos comparativos de capim-annoni 2 (*eragrostis plana nees*) e pastagem nativa de várzea da região de Santa Maria, RS: Crescimento ponderal e rebrote. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 13, n. 2, p. 15-21, 1978.

HAYKIN, S. **Neural networks: a comprehensive foundation**. [S.l.]: Macmillan Publishing, 1994.

HOUET, T. et al. Exploring subtle land use and land cover changes: a framework for future landscape studies. **Landscape Ecology**, [S.l.], v. 25, n. 2, p. 249-266, Feb. 2010. doi.org/10.1007/s10980-009-9362-8

HUETE A. R. A. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 25, p. 295-309, 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico 2010: características da população e dos domicílios: resultados do universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. Acompanha 1 CD-ROM. Disponível em:

<[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/552/cd\\_2010\\_agst\\_n\\_if.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/552/cd_2010_agst_n_if.pdf)>. Acesso em: mar. 2017.

JASPER, J.; REUSCH, S.; LINK, A. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination - impact of seed rate, variety and growth stage. In: HENTEN, E.; GOENSE, J. D.; LOKHORST, C. (Ed). EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., Wageningen, 2009. **Proceedings...** Wageningen, Academic Publishers, 2009. p. 23-30.

JESSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução José Carlos Neves Epiphânio. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest. **Ecology**, [S.l.], v. 50, n. 4, p. 663-666, Jul. 1969.

KIM, M. S. et al. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (Apar). Proceedings of the 6th Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing. Val D'Isere, France. p. 299-306. 1994

KLEIN, S. M. **Presença de gramíneas forrageiras exóticas em área de floresta ombrófila densa em Blumenau/SC**: plantas forrageiras sob o enfoque de plantas forrageiras. 2009. Dissertação (Mestrado Zootecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

LAMBIN, E. et al. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. **Global Environmental change**: human and policy dimensions, [S.l.], v. 11, n. 4, p. 261-269, 2001.

LAMBIN, E.; GEIST, H. **Land-use and land-cover change**: local processes and global impacts. Springer, IGBP Series, 2006.

LEAL, T. C. et al. Performance de novilhos em pastagens de *Eragrostis plana* (*Capim Annoni-2*) e Campo Nativo, com e sem Fertilização. **Anuário Técnico do IPZFO**, Porto Alegre, n. 1, p. 117-118, 1973.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 4. ed. Nova York: John Wiley, 2000.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. M. **Remote sensing and image interpretation**. 5th. ed. Nova York: John Wiley, 2004.

LONGCHAMPS, L. et. al. Discrimination of corn, grasses and dicot weeds by their UV-induced fluorescence spectral signature. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 181-197, 2010.

LORENZZETTI, J. A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. São Paulo: Blucher, 2015.

MA, B. L.; MORRISON, M. J.; DWYER, L. M. Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize. **Agron. J.**, [S.l.], v. 88, p. 915–920. 1996.

MAANTAY, J; ZIEGLER, J. **GIS for the urban environment**. Redlands: ESRI Press, 2006.

MACEDO, W. Reunião Regional de Avaliação de Pesquisa Com Annoni-2, 1991. **Anais...** Bagé: EMBRAPA-CPPSUL, 1993. (EMBRAPA-CPPSUL, Documentos, 7).

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

MARTINELLI, G.; MORAES, M. Á. (Org.). **Livro vermelho da flora do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2013.

MCMURTREY, J. E. et al. Field canopy and leaf level fluorescence for distinguishing plant condition differences due to nitrogen fertilization level. In: PROC. INT. GEOSCIENCE REMOTE SENSING SYMPOSIUM, IGARSS'94. Pasadena, CA. 1994. **Anais...** Pasadena, CA. 1994.

MEDEIROS, R. B.; FERREIRA, N. R. Controle de invasão biológica por capim-Annoni em margem viária mediante a introdução de gramíneas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, n. 2, p. 260-269, 2011.

MEDEIROS, R. B.; FOCHT, T. Invasão, prevenção, controle e utilização do capim-Annoni-2 (*Eragrostis plana* Nees) no Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 13, n. 1-2, p. 105-114, 2007.

MEDEIROS, R. B.; PILLAR, V. P.; REIS, J. C. L. Expansão de *Eragrostis plana* Ness. (capim-annoni-2) no Rio Grande do Sul e indicativos de controle. In: MEMORIAS DE LA REUNIÓN DEL GRUPO TÉCNICO REGIONAL DEL CONO SUR EM MEJORAMIENTO Y UTYILIZACIÓN DE LOS RECURSOS FORRAJEROS DEL ÁREA TROPICAL E SUBTROPICAL, - GRUPO CAMPOS, 20., 2004, Salto. **Anais...** Salto: Regional Norte de la Universidad de la República, 2004. p. 208-211.

MEDEIROS, R. B.; SAIBRO, J. C.; FOCHT, T. Invasão de capim-annoni (*Eragrostis plana* Nees) no bioma Pampa do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, V. P. et al. (Org.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília, DF: MMA, 2009. p. 317-330.

MENESES, P. R. Princípios de sensoriamento remoto. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília, DF: UNB, 2012. p. 1-33.

MENESES, P. R.; SANO, E. E. Classificação pixel a pixel de imagens. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução do processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília, DF: UNB, 2012.

MERZLYAK, M. N. et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, [S.l.], v. 106, n. 1, p. 135-141, 1999.

MORAES, P. V. D. et al. Margem bruta de sucessão de culturas usadas para controle do capim-annoni-2 (*Eragrostis plana* Nees). **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 135-141, 2008.

MOREIRA, M. A. et al. Comparação da resposta espectral de alvos em imagens CBERS-2/CCD e LANDSAT-5TM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005, Goiânia. **Anais ...** Goiânia: INPE, 2005. p. 1027-1034.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2007.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2004.

MOUSIVAND, A. et. al. Multi-temporal, multi-sensor retrieval of terrestrial vegetation properties from spectral-directional radiometric data. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 158, p. 311-330, 2015.

MRÓZ, M.; SOBIERAJ, A. Comparison of several vegetation indices calculated on the basis of a seasonal spot xs time series, and their suitability for land cover and agricultural crop identification. **Technical Sciences**, [S.l.], n. 7, 2004.

NABINGER, C. Manejo e produtividade das pastagens nativas do subtropical brasileiro. In: SIMPÓSIO DE FORRAGEIRAS E PRODUÇÃO ANIMAL, 1, 2006, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. p. 25-76.

NACHTIGAL, G. F. et al. Ocorrência de ferrugem associada ao Capim-Annoni-2 (*Eragrostis plana* Nees) na região de fronteira da metade sul do RS. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 2888-2891, nov. 2009.

NACHTIGAL, G. F.; COSTA, F. A. **Modelagem de Nicho Ecológico: implicações na priorização de áreas para exploração e liberação de agentes de biocontrole do capim-annoni-2 (*Eragrostisplana* Nees) no Brasil - Região Sul do Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010. (Documentos, 292).

NASCIMENTO, A. **Caracterização Química e Digestibilidade do Capim Annoni-2 (*Eragrostis plana* Nees) comparada com o pasto nativo, em diferentes estágios de desenvolvimento**. 1976. 67 f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) – Faculdade de Agronomia. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1976.

NASCIMENTO, A.; HALL, G. A. B. Estudos Comparativos de Capim-Annoni 2 (*Eragrostis Plana* Nees) e pastagem nativa de várzea da

região de Santa Maria, RS: crescimento ponderal e rebrote. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 13, n. 2, p 15-21, 1978.

NEVES, M. C.; PEREZ, N. B.; SISTI, R. N. Análise exploratória de dados de monitoramento da dinâmica do gado em uma pastagem natural invadida pelo capim-Annoni. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 18., João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: 2015. p. 2252-2258 .

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. rev. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

OLIVEIRA NETO, R. A. **Comportamento ingestivo e consumo de forragem por novilhas de corte em sistemas forrageiros de ciclo estival**. 2011. 84 f. Dissertação (Mestrado Agrobiologia) – Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

OLIVEIRA, O. L. P. Considerações sobre o *Capim Annoni-2* (*Eragrostis plana* Nees). Histórico e Evolução no CNPO. In: REUNIÃO REGIONAL DE AVALIAÇÃO DE PESQUISA COM ANNONI-2, 1991. Bagé. **Anais...** Bagé: EMBRAPA-CPPSUL, 1993. p. 41-51. (EMBRAPA-CPPSUL. Documentos, 7).

PAEGELOW, M.; CAMACHO, M. T. O. **Modelling environmental dynamics: advances in geomatic solutions**. Springer: Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

PEÑUELAS, J.; BARET, F.; FILELLA, I. Semi-empirical indices to assess carotenoids: chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, [S.l.], v. 31, p. 221-230, 1995.

PIMENTEL, D. et al. Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. **Agriculture, Ecosystems e Environment**, [S.l.], v. 84, n. 1, p. 1-20, Mar. 2001.

PONZONI, F. J. et al. **Calibração de sensores orbitais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

PONZONI, F. J. et al. Local illumination influence on vegetation indices and Plant Area Index (PAI) Relationships. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 6, p. 6266-6282, 2014.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 2010. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2010.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. atual. ampl. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

PRADO, T. C. S. et al. Discriminação da espécie exótica invasora Capim Annoni (*Eragrostis Plana*) por meio da resposta espectral na unidade de planejamento e gestão da bacia hidrográfica do Rio Ibicuí, Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18. (SBSR), 2017, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2017. p. 4803-4810. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP6W34M/3PSM3NH>>. Acesso em: 21 jun. 2017.

PRINCE, S. D. A model of regional primary production for use with course resolution satellite data. **Int. J. Remote Sens.**, [S.l.], v. 12, p. 1313–1330, 1991a.

PRINCE, S. D. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981–1988. **Int. J. Remote Sens.**, [S.l.], v. 12, p. 1301–1311, 1991b.

PROFIL. **Processo de planejamento da bacia hidrográfica do Rio Ibicuí, fases A e B.** Porto Alegre: Secretaria Estadual do Meio Ambiente, Rio Grande do Sul, 2012.

RAHMAN, A. F. et al. Modeling spatial distributed ecosystem flux of boreal forests using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, [S.l.], v. 106(d24), p. 33579-33591, 2001.

REIS, J. C. L. *Capim Annoni-2*: origem, morfologia, características, disseminação. In: REUNIAO REGIONAL DE AVALIAÇÃO DE PESQUISA COM ANNONI 2, 1991. Bagé. **Anais...** Bagé: EMBRAPA-CPPSUL, 1993. p. 5-23. (EMBRAPA-CPPSUL. Documentos, 7).

REIS, J. C. L.; MORAES, P. V. D. de.; MONKS, P. L. Sucessão de culturas no controle da vegetação e banco de sementes do solo de capim-annoni-2 (*Eragrostis plana* Nees). **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 143-149, 2008.

REIS, J. C. L.; OLIVEIRA, O. L. P. **Considerações sobre o Capim Annoni (*Eragrostis plana* Nees)**. Bagé: EMBRAPA-UEPAE de Bagé, 1978. (Circular Técnica, 2).

REIS, J. C. L.; COELHO, R.W. **Controle do Capim Annoni-2 em campos naturais e pastagens**. Pelotas: EMBRAPA Clima Temperado, 2000. (EMBRAPA Clima Temperado, Circular Técnica, 22).

RICHARDS, J. A.; JIA X. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction**. 4 ed. Australia: Springer, 2006. 473 p.

RIO GRANDE DO SUL. Departamento de Unidade de Conservação (DUC). Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Fotografias Capim Annoni**. PAUL, C. R.; BLASCO, F. F. D. MANDIÃO, A. G. Porto Alegre: 2014.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei nº13.187, de 23 de junho de 2009**. Institui o Programa de Combate do Capim Annoni-2 no âmbito do Estado do Rio Grande do Sul, e dá outras providências. 2009. Disponível em: <<http://www.legislacao.sefaz.rs.gov.br/Site/Document.aspx?inpKey=162636&inpCodDispositive=&inpDsKeywords>>. Acesso em 12 mar. 2015.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Portaria 79, de 31 de outubro de 2013**. Reconhece a lista de espécies exóticas invasoras do estado do Rio Grande do Sul e demais classificações, estabelece normas de controle e dá outras providências. 2013. Disponível em:<[http://www.sema.rs.gov.br/upload/Portaria%20SEMA%20n%C2%BA%2079\\_2013%20reconhece%20a%20lista%20Esp%C3%A9cies%20Ex%C3%B3ticas%20Invasoras%20%20RS%20e%20demais%20classifica%C3%A7%C3%B5es\\_normas%20de%20controle%20e%20outras%20providencias.pdf](http://www.sema.rs.gov.br/upload/Portaria%20SEMA%20n%C2%BA%2079_2013%20reconhece%20a%20lista%20Esp%C3%A9cies%20Ex%C3%B3ticas%20Invasoras%20%20RS%20e%20demais%20classifica%C3%A7%C3%B5es_normas%20de%20controle%20e%20outras%20providencias.pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2015.

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

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In PROCEEDINGS EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE (ERTS) SYMPOSIUM. **Anais...** Washington: NASA, 1973. v. 1, p. 309–317.

ROSSITER, D. G. **Technical note**: statistical methods for accuracy assesment of classified thematic maps. Enschede: International Institute for Geo-information Science & Earth Observation (ITC), 2004.

RUDORFF, C. M. et al. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 37, n. 2, p. 269-280, 2007.

RUHOFF, A.; FANTIN-CRUZ, I.; COLLISCHONN, W. Modelos de simulação dinâmica do desmatamento na Amazônia. **Caminhos da Geografia**, Uberlândia, v. 1, n. 36, p. 258-268, dez. 2010.

RUNNING, S. W. et al. A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis. **Remote Sens. Environ.**, [S.l.], v. 51, p. 39-48, 1995.

SANGERMANO, F.; TOLEDANO, J.; EASTMAN, J. R. Land cover change in the Bolivian Amazon and its implications for REDD+and endemic biodiversity. **Landscape Ecology**, [S.l.], v. 27, n. 4, p. 571-584. 2012.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing**: models and methods for image processing. 2. ed. Nova York: Academic Press, 1997.

SECRETARIADO DA CONVENÇÃO SOBRE DIVERSIDADE BIOLÓGICA (CDB). **Panorama da biodiversidade global 3**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas (MMA), 2010.

SHIMABUKURO, M. T. **Avaliação de classificadores espectrais de imagens Lansat- TM em áreas rurais densamente ocupadas**: o caso

da região de Brotas e Torrinha, São Paulo. 1996. 193 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) -- Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

SILVA, A. C. F. **Alelopatia de carqueja (*Baccharis Trimeria* Less) e ação de fungos em capim-annoni (*Eragrostis Plana* Ness)**. 2014. 88 f. Dissertação (Mestrado Agrobiologia) – Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

SIMS, D.; GAMON, J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 81, p. 337-354, 2002. doi:10.1016/S0034-4257(02)00010-X

TAKADA, T.; MIYAMOTO, A.; HASEGAWA, S. F. Derivation of a yearly transition probability matrix for land-use dynamics and its applications, **Landscape Ecology**, [S.l.], v. 25, p. 561–572, 2010.

THENKABAIL, P. S.; SMITH, R. B.; DE-PAUW, E. Hyperspectral vegetation indices for determining agricultural crop characteristics. **Remote sensing of Environment**, [S.l.], v. 71, p. 158-182. 2000.

TOLEDO, J. M. A.; EPIPHANIO, J. C. N. Comportamento de Índices de Vegetação a partir de três sensores orbitais: estudo de caso no município de São Borja (RS). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO,13., Florianópolis, 2007. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 741-748.

TUCKER, C. J.; DREGNE, H. E.; NEWCOMB, W. W. Expansion and contraction of the Saharan desert from 1980 to 1990. **Science**, [S.l.], v. 253, p. 299-301, 1991.

VIEIRA, C. A. O. **Accuracy Of remotely sensing classification of agricultural crops: a comparative study**. 2000. 396 f.. Tese. -- Universidade Nottingham, Reino Unido, 2000.

VITOUSEK, P. M. et al. Human domination of Earth's ecosystems. **Science**, [S.l.], v. 277, p. 494–499, 1997. doi:10.1126/science.277.5325.494

VOGELMANN, J. E.; ROCK, B. N.; MOSS, D. M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. **International Journal of Remote Sensing**, [S.l.], v. 14, p. 1563-1575, 1993.

WESSELS, K. J. et.al. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 91, p. 47–67, 2004.

WORKSHOP ESTADO ATUAL E DESAFIOS PARA A CONSERVAÇÃO DOS CAMPOS, 2., 2006, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2006. 24 p.

YU, K-Q. et al. Hyperspectral imaging for mapping of total nitrogen spatial distribution in pepper plant. **PLoS ONE**, [S.l.], v. 9, n. 12, 2014.

## **10. ANEXO I**





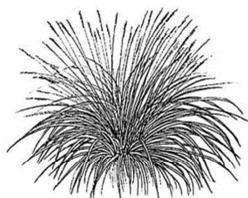
LIVRO DE

# EXSICATA



THAYSE CRISTIANE SEVERO DO PRADO





de espécies de *Poaceae* coletadas nas regiões Norte e Nordeste  
da Bacia do Rio Ibicui, Sub-bacia do Rio Ibirapuitã  
Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

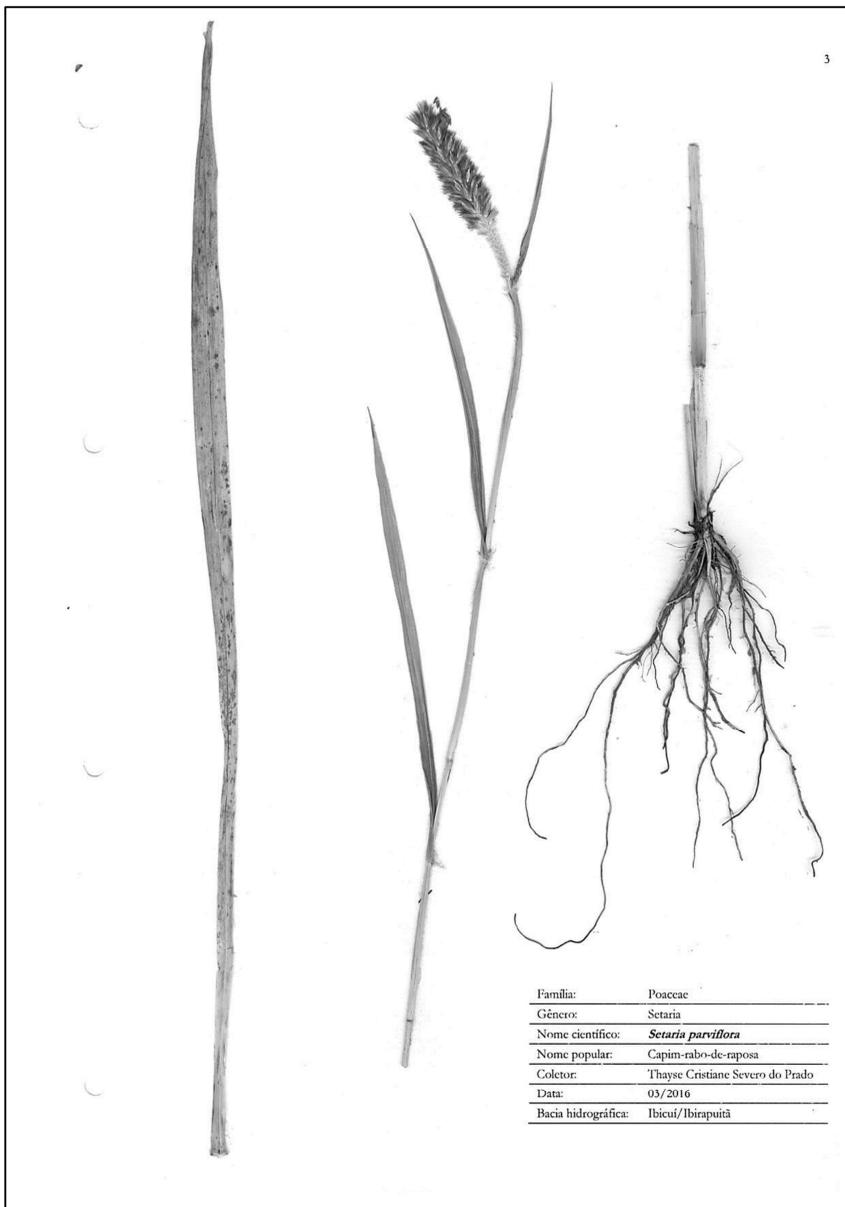
"Não me perguntes onde fica o Alegrete  
 Segue o rumo do teu próprio coração  
 Cruzaria pela estrada algum ginete  
 E ouviria toque de gaita e violão  
 Prá quem chega de Rosário ao fim da tarde  
 Ou quem vem de Uruguiana de manhã  
 Tem o sol como uma brasa que ainda arde  
 Mergulhado no Rio Ibirapuitã

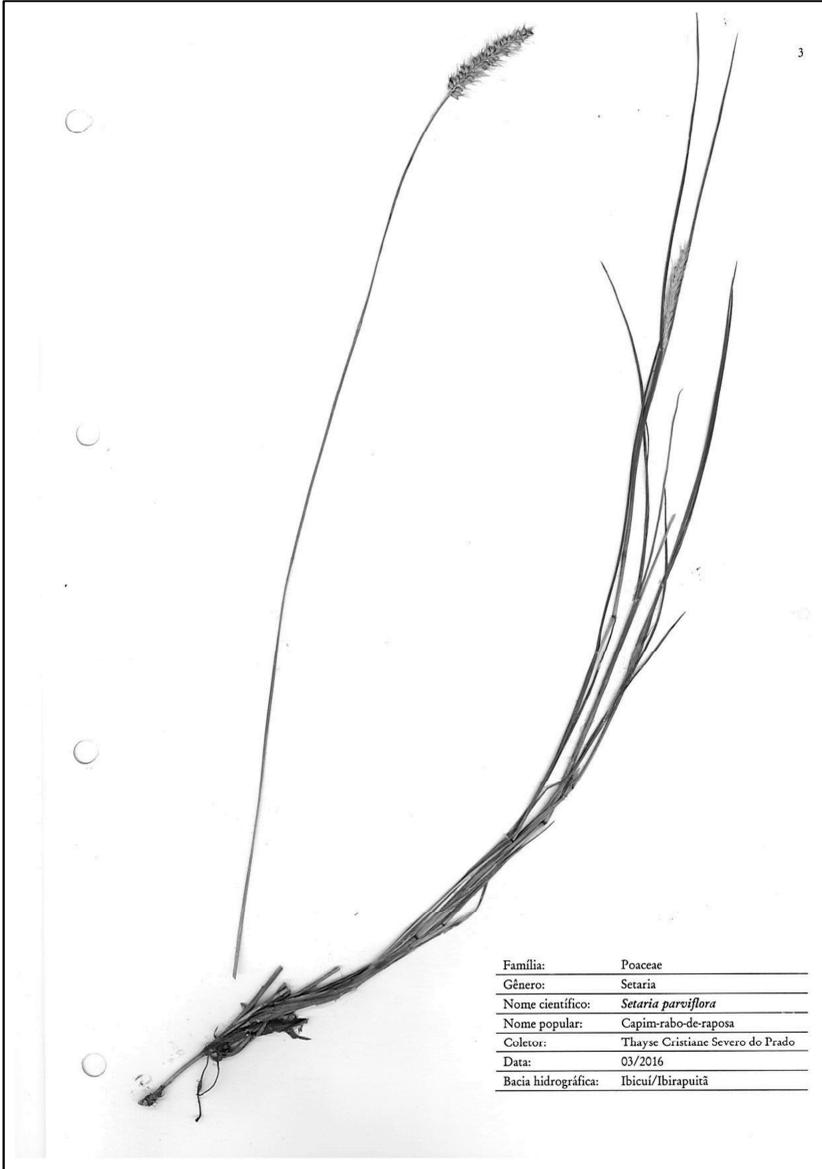
Ouve o canto gauchesco e brasileiro  
 Desta terra que eu amei desde guri  
 Flor de tuna, carmoatim de mel campesino  
 Pedra moara das quebradas do Inhanday  
 E na hora derradeira que eu mereça  
 Ver o sol alegretense entardecer  
 Como os potros vou virar minha cabeça  
 Para os pagos no momento de morrer

E nos olhos vou levar o encantamento  
 Desta terra que eu amei com devoção  
 Cada verso que eu componho é um pagamento  
 De uma dívida de amor e gratidão".

**Canto Alegretense**

Antonio (Nico) Augusto da Silva Fagundes  
 Euclides (Bago) Fagundes Filho





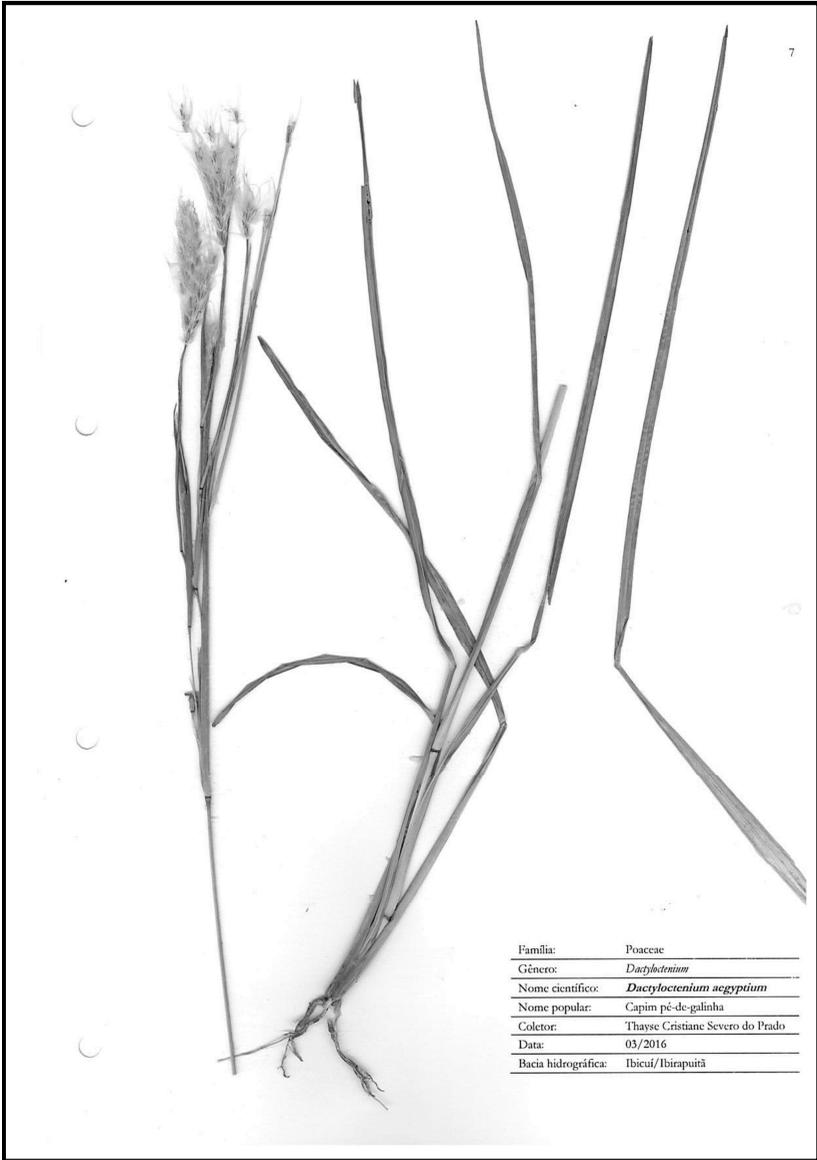




Família:	Poaceae
Gênero:	<i>Andropogon</i>
Nome científico:	<i>Andropogon lateralis nees</i>
Nome popular:	Capim caninha
Coletor:	Thayse Cristiane Severo do Prado
Data:	03/2016
Bacia hidrográfica:	Ibicuí/Ibirapuitã



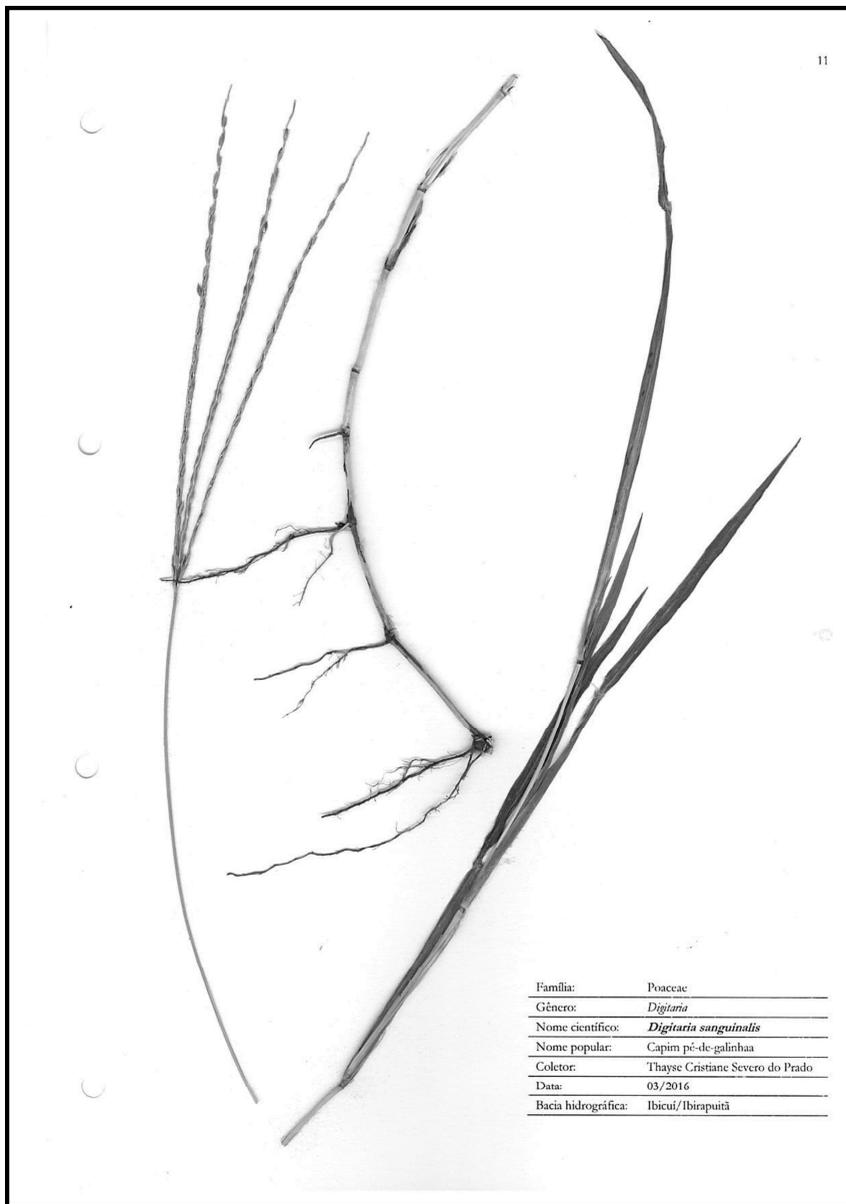
Família:	Poaceae
Gênero:	<i>Paspalum</i>
Nome científico:	<i>Paspalum Notatum Flügge</i>
Nome popular:	Grama-forquilha
Coletor:	Thayse Cristiane Severo do Prado
Data:	03/2016
Bacia hidrográfica:	Ibicuí/Ibirapuitã







Família:	Poaceae
Gênero:	<i>Digitaria</i>
Nome científico:	<i>Digitaria cognata</i>
Nome popular:	Capim pé-de-galinha
Coletor:	Thaysc Cristiane Severo do Prado
Data:	03/2016
Bacia hidrográfica:	Ibicui/Ibirapuitã





**11. ANEXO II - RELATÓRIO DE CAMPO**  
**THAYSE CRISTIANE SEVERO DO PRADO**

**RELATÓRIO DE CAMPO**

Florianópolis, 2015

## **Objetivo**

Estudar o comportamento espectral da gramínea exótica invasora *Eragrostis Plana* (Capim Annoni) com o intuito de diferenciá-la das demais espécies de gramíneas, tanto exóticas quanto nativas, existentes na Unidade de Planejamento e Gestão Ibirapuitã da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí.

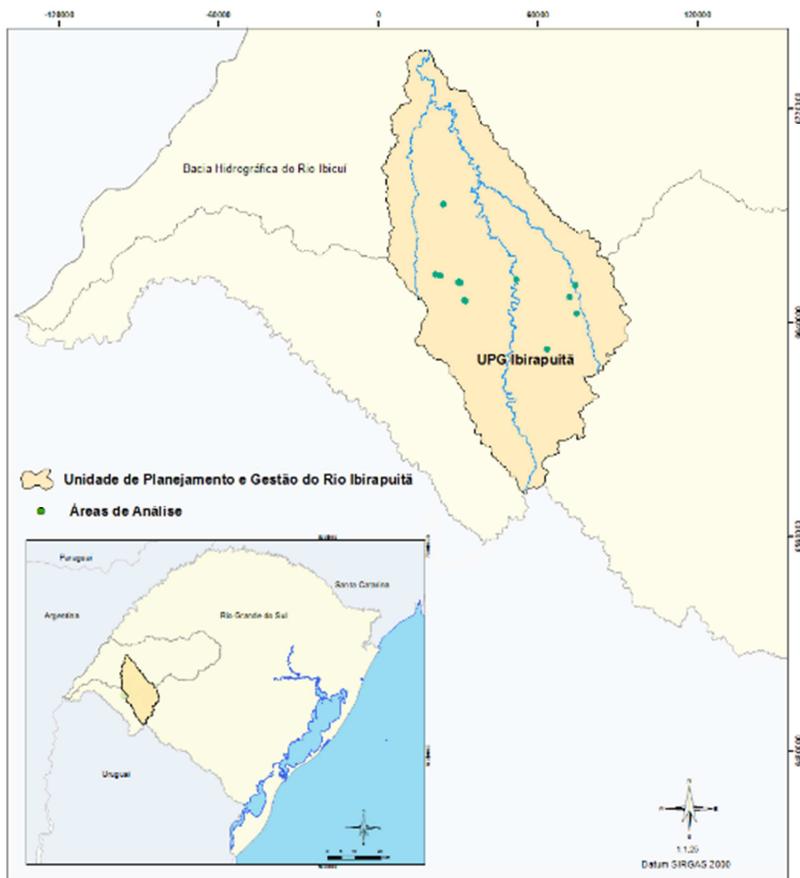
## **Metas**

- Identificar as espécies predominantes de gramíneas existentes nas áreas onde serão obtidas as amostras espectrais,
- Coletar as amostras espectrais destas espécies identificadas,
- Processar as informações de campo em laboratório,
- Estudar e analisar o comportamento espectral de todas as espécies envolvidas no estudo,

## **Metodologia**

Para a coleta das amostras espectrais adotou-se como área piloto a Unidade de Planejamento e Gestão Ibirapuitã da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. As coordenadas onde as amostras foram coletadas foram previamente identificadas em laboratório, com o auxílio dos Técnicos da Fundação Marronna e dos Técnicos da Secretaria Estadual do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável- RS (Agência de Alegrete-RS) (Figura 1) .

Figura 1: Áreas de coleta de amostras



Também foi levado em consideração o tamanho que cada área deveria ter. Assim, estipulou-se que cada área onde seriam feitas as coletas das amostras deveria ter no mínimo 1 km<sup>2</sup>. Dentro deste quadrante foram coletadas as espécies de gramíneas predominantes, com o intuito de elaborar as exsicatas. Vale ressaltar que a radiância refletida das espécies identificadas foram adquiridas em campo, com as condições reais do ambiente.

Para tanto, adotou-se como critério para definir as áreas amostrais, três situações mínimas:

- 1 - Área com presença homogênea de E. Plana;
- 2 - Área com presença de E. Plana e outros tipos de gramíneas.
- 3 - Área manejada/pastejada com a presença predominante do E. Plana.

No que se refere às características físicas da Unidade de Planejamento e Gestão Ibirapuitã da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí identificadas in loco, a mesma está inserida nos domínios das pradarias mistas, com presença de coxilhas extensivas com pequena mamelonização ou formas pseudomamelonares do relevo. Esta UPG apresenta grande variabilidade de formações vegetais, constituídas por gramíneas. Possui uma variação de solo raso de origem basáltica e solo um pouco mais profundo derivado do arenito.

### **Procedimentos no campo**

Com o intuito de caracterizar espectralmente a espécie E. Plana e diferenciá-la de outras espécies de gramínea exótica utilizadas como forrageira e de pastagens naturais, foi utilizado o espectrorradiômetro FieldSpec@3 (Figura 2).

Figura 2: Coleta de dados com o espectrorradiômetro FieldSpec@3



O campo ocorreu nos dias 3 e 4 de março de 2016, no período entre as 10:00h e 15:00h, devido este período ser o de maior incidência de radiação solar.

Para a realização do experimento foram obtidas as medidas de radiância refletida da face dorsal da folha de cada espécie encontrada nas áreas amostrais, sendo que em cada área amostral foram coletadas as medidas de radiância refletida de 3 plantas de cada espécie. Na coleta, foram escolhidas as folhas que ficavam na porção intermediária da touceira, numa tentativa de homogeneizar as amostras quanto aos estágios de desenvolvimento (Figura 3).

Figura 3: Coleta da curva espectral da face dorsal da folha



As folhas foram cuidadosamente posicionadas para que apenas o limbo foliar permanecesse na ponta da pistola do espectrorradiômetro, evitando pegar a nervura central das mesmas. Estas informações constituem um conjunto de arquivos contendo comprimento de onda na amplitude de 350nm a 2500nm e reflectância correspondente para cada comprimento de onda.

Um microcomputador acoplado ao espectrorradiômetro armazenou as medidas radiométricas à medida que foram sendo obtidas.

### **RT1- RELATÓRIO DE CAMPO (dia 03/03/ 16)**

No primeiro dia foi possível coletar amostras em 5 áreas. Nestas, além da *Eragrostis Plana*, foram identificadas outras quatro

espécies: *Setaria parviflora*, *Andropogon lateralis* Nees, *Sporobolus indicus* e *Paspalum notatum* Flügge.

Neste dia as condições climáticas eram favoráveis, tendo em vista que havia sol com poucas nuvens. Vale mencionar que as áreas onde as coletas foram feitas possuem solo raso (basalto).

Dentre estas 5 áreas, 4 apresentavam características das situações mínimas desejada para a pesquisa, entretanto, uma apresentava característica diferenciada, com uma extensa área manejada/pastejada com a presença do *E. Plana*, mas com a predominância da espécie *Paspalum notatum* Flügge (capim forquilha).

### Área 1

Na primeira área foi identificada a situação em que a *E. Plana* encontrava-se misturada com a espécie *Andropogon lateralis* Nees (espécie cultivada, com o intuito de servir de forrageira), ambas com inflorescência (Figura 4).

Figura 4: Capim Annoni misturado com outras espécies.



Esta área não era manejada/pastejada, o que fez com que tanto a *E. Plana* quanto a *Andropogon lateralis* Nees apresentasse tamanho de aproximadamente 1 metro (Figura 5, 6 e 7) .

Figura 5: Extração da touceira de Capim Annoni



Figura 6: Extração da touceira de Capim Annoni



Figura 7: Extração da touceira de Capim Annoni



## Área 2

Esta área apresentou a maior quantidade de espécies encontradas: *Eragrostis Plana*, *Setaria parviflora*, *Andropogon lateralis* Nees, *Sporobolus indicus* e *Paspalum notatum* Flüggé (Figura 8, 9 e 10).

Figura 8: Área com Capim Annoni misturado com outras espécies



Figura 9: Touceira de *Sporobolus indicus*



Figura 10: *Setaria parviflora*

Apesar de toda a heterogeneidade, predominam nesta área as espécies *Sporobolus indicus*, *Eragrostis Plana*, *Andropogon lateralis* Nees, e em áreas com vegetação mais aberta a espécie *Paspalum notatum* Flüggé. Já em menor quantidade, geralmente entre as touceiras de *Sporobolus indicus*, *Eragrostis Plana* e *Andropogon lateralis* Nees era possível identificar a *Setaria parviflora*.

Está foi uma área importante, pois entre todas as espécies encontradas, 2 destas possuem propriedades físicas que são semelhantes às da *Eragrostis Plana*: *Sporobolus indicus* e *Andropogon lateralis* Nees.

### Área 3

A área 3 caracterizou-se pela situação de área homogeneamente coberta pela *Eragrostis plana* manejada/pastejada. Esta área não era intensamente manejada/pastejada, entretanto já era possível notar a diferença do tamanho da planta existente na área manejada/pastejada, em relação à área para fora da cerca, no entorno da estrada, que não possuía manejo/pastejo. Na área manejada/pastejada, a *Eragrostis plana* possuía um tamanho de cerca 20 cm, na área para fora da cerca a *E. Plana*, possuía mais de 1 metro (Figura 11, 12 e 13).

Figura 11: Campo repleto de Capim Annoni sem manejo ou pastejo



Figura 12: Campo repleto de Capim Annoni com manejo ou pastejo



Figura 13: Campo repleto de Capim Annoni sem manejo ou pastejo



## Área 4

Esta é uma área de pastejo intensivo, com a presença da espécie *Eragrostis plana*, entretanto, há o predomínio da espécie *Paspalum notatum* Flügge. Na imagem abaixo é possível identificar a *E. Plana* que possui formato de touceiras, e a *Paspalum notatum* Flügge que tem uma característica mais rasteira (Figura 14).

Figura 14: Capim Annoni misturado com outras espécies.



As touceiras da *E. Plana*, não possuem mais que 15 centímetros. Esta pequena altura deve-se ao fato do pastejo intensivo e fica evidente ao comparar com a *E. plana* fora da cerca, no entorno da estrada. Outra consequência do pastejo intensivo é o solo exposto e compactado que pode ser visto nas imagens abaixo (Figura 15 e 16).

Figura 15: Capim Annoni misturado com outras espécies e com pastejo intenso



Figura 16: Capim Annoni misturado com outras espécies e com pastejo intenso



### Área 5

Esta é uma área com cobertura homogênea da gramínea *E. plana*, com a presença de algumas pequenas árvores da espécie *Vachellia caven* (Espinilhos). Esta é uma área preservada existente dentro da propriedade da Fundação Maronna, onde a *E.plana* não é manejada/pastejada há pelo menos três anos.

Nesta área a *E. plana* possui uma altura de aproximadamente 1,5 metros, com sua inflorescência e devido à falta de manejo, já formou, com suas touceiras uma espécie de tapete sobre o solo (Figura).

Vale ressaltar que também foi coletada amostra da radiância refletida da inflorescência da *E. plana*.

Figura 17: Campo repleto de Capim Annoni sem manejo ou pastejo



### **RT1- RELATÓRIO DE CAMPO (dia 04/03/ 16)**

Este foi o segundo dia de coleta de amostras da radiância refletida das espécies encontradas em campo. Foi possível coletar amostras em quatro áreas, onde além da *E. plana*, foram identificadas outras cinco espécies: *Digitaria sanguinalis*, *Digitaria ciliaris*, *Pennisetum setosum*, *Setaria parviflora* e *Andropogon lateralis* Nees.

Neste dia as condições climáticas eram favoráveis, tendo em vista que havia sol sem nuvens. Vale ressaltar ainda que esta é uma região de solo mais profundo (arenito).

Das quatro áreas amostradas, foi possível identificar duas áreas com situação de *E. plana* homogênea, sem manejo, onde foi possível coletar amostras da radiância refletida das inflorescências em uma das áreas. A outra área possuía a *E. plana* intensamente manejada/pastejada, sem inflorescência.

Em uma das áreas, próxima à Serra do Caverá, havia o cultivo da pastagem da espécie *Andropogon lateralis* Nees, que não havia sido manejada/pastejada, e no entorno da estrada havia a *E. plana*, sem manejo, também com inflorescência. Esta foi uma situação interessante, tendo em vista as semelhanças entre as espécies. Ainda nesta área, havia a presença da espécie *Setaria parviflora*, porém em menor quantidade.

A última área possuía uma diversidade de espécies, onde a *E. plana* estava intensamente concentrada ao longo da estrada. Dentre todas as áreas, esta foi a que possuiu características mais heterogêneas.

## Área 1

Nesta área foi identificada a situação de *E. plana* homogênea sem manejo. Além da amostra da radiância refletida da face dorsal da folha da planta, também foi coletada a radiância refletida da inflorescência (Figura 18 e 19).

Figura 18: Campo repleto de Capim Annoni sem manejo ou pastejo: inflorescência



Figura 19: Campo repleto de Capim Annoni sem manejo ou pastejo:  
inflorescência



## Área 2

Esta área também é uma situação de E. plana homogênea onde também foi coletada amostra da radiância refletida da inflorescência da planta, entretanto, esta é uma área muito manejada/pastejada, em que é possível verificar a E. plana em uma tonalidade verde forte.

### Área 3

Nesta área foi coletada apenas a amostra da inflorescência do *Andropogon lateralis* Nees, devido à sua semelhança com a inflorescência da *E. plana*. Também foi coletada amostra da radiância refletida da *Setaria parviflora* (rabo de porco).

Esta é uma área extensa com presença da *E. plana* mais concentrada ao longo da estrada. Nesta área foram identificadas outras espécies: *Digitaria sanguinalis*, *Digitaria ciliaris* e *Pennisetum setosum*. Esta é uma área de manejo/pastejo não intensivo.