

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO
REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
SENSORIAMENTO REMOTO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DETECÇÃO DA EXPANSÃO DA SOJA NO BIOMA PAMPA A PARTIR DE
ATRIBUTO ESPECTRO-TEMPORAL E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A
OBJETO**

MAURO RICARDO ROXO NÓBREGA

Porto Alegre, agosto de 2016.

MAURO RICARDO ROXO NÓBREGA

**DETECÇÃO DA EXPANSÃO DA SOJA NO BIOMA PAMPA A PARTIR DE
ATRIBUTO ESPECTRO-TEMPORAL E CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A
OBJETO**

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

Orientadora: Dra. Denise Cybis Fontana

Porto Alegre, 2016.

“Há mais coisas no céu e na terra (...) do que foram sonhadas na sua filosofia”

William Shakespeare



UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM SENSORIMENTO REMOTO

Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR)
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPRSM)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Porto Alegre, RS, Brasil.

Aprovada em: 31/08/2016

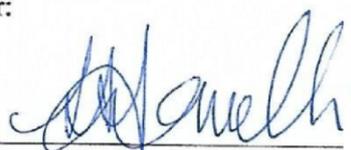
Homologada em 31/08/16

Pela Banca Examinadora:

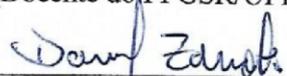
Por:



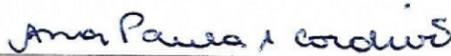
Prof.ª Dr.ª Denise Cybis Fontana
Orientadora
(Docente do PPGSR/UFRGS)



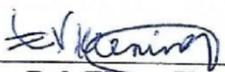
Prof. Dr. Laurindo Antonio Guasselli
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto



Dr. Daniel Capella Zanotta
(FURG)



Dr.ª Ana Paula Cordeiro
(Externa ao PPGSR)



Dr.ª Eliana Veleda Klering
(Docente do PPGSR/UFRGS)

Agradecimentos

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao curso de mestrado em Sensoriamento Remoto pela oportunidade de formação e capacitação profissional.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pela bolsa de estudos, tornando possível o desenvolvimento deste estudo.

À minha orientadora Prof^a. Denise Cybis Fontana pelo exemplo, pelos conhecimentos transmitidos, pela paciência, pela amizade e pela confiança depositada.

Ao professor Daniel Zanotta pelos conhecimentos transmitidos e pelo estímulo.

As professoras Eliana Klering e Ana Paula Cordeiro, por terem aceito o convite de participar desta banca e pelas contribuições dadas.

Aos professores do curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto pelo empenho e ensino.

Aos “Sensorientos”, colegas do curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto pela amizade, pelas ciclovagens, pelos desafios resolvidos e pelas provocações criadas.

Aos ex-colegas da Embrapa Clima Temperado, Henrique Cunha e Adalberto Miura pelas provocações criadas, pelo incentivo e pela amizade.

Aos colegas de LEAA, Vagner Mengue, Luis Abuchaim e Paula Vanacor pela grande contribuição e dedicação nos trabalhos de campo e processamento dos dados deste estudo.

Aos colegas da CEFAV pelas trocas de ideias e amizade.

Aos meus amigos pelo carinho, apoio e por estarem presentes nos diversos momentos desta trajetória.

À Cleonice Oliveira, pelo companheirismo, paciência, conversas e amizade.

Aos meus pais, Simone e Jorge, pela educação, pelo amor e apoio em toda minha caminhada.

Resumo

O bioma Pampa ocorre na Argentina, Brasil, Uruguai e Paraguai. Suas paisagens compõem um rico patrimônio cultural relativo à biodiversidade, com flora e fauna singulares. Nos últimos anos, a área cultivada com soja teve um crescimento significativo nos municípios situados no sul do estado do Rio Grande do Sul, especialmente sobre o bioma Pampa. Este avanço tem causado preocupação, tanto por parte de ambientalistas, apreensivos em relação à preservação deste bioma, como pelos órgãos de planejamento agrícola, visto que esta região é considerada de risco elevado para o cultivo da soja em função de restrições hídricas. Neste sentido, este estudo objetivou identificar transformações ocorridas, entre os anos 2000 e 2015, em uma área de abrangência do bioma Pampa em virtude da inserção e expansão da cultura da soja. O estudo monitorou a expansão das lavouras de soja no sul do Brasil sobre áreas pertencentes ao bioma Pampa através dos índices de vegetação (EVI e NDVI) de imagens MODIS. Foram realizados dois trabalhos de campo, um em 2014 e o outro em 2015, nos quais foram coletados diferentes usos e coberturas da terra na área de estudo. Uma parte desses dados serviu de base para a realização de testes metodológicos, e a outra para verificação de acurácia. Inicialmente, o padrão de evolução dos índices ao longo do tempo foi caracterizado para as culturas da soja e do arroz irrigado no bioma como um todo, e após foram analisadas as diferenças entre regiões ecoclimáticas. Foram realizadas duas modalidades de classificação, pixel a pixel e orientada a objeto. A classificação pixel a pixel foi a estratégia usada na confecção das máscaras de área plantada com culturas de primavera/verão nas safras 2000/2001, 2002/2003, 2005/2006, 2008/2009, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015. Como as culturas da soja e do arroz apresentam ciclos fenológicos similares, conferindo baixa separabilidade entre as classes, foi calculada a distância de Bhattacharyya, feição por feição disponível, de áreas conhecidas com soja e com arroz (trabalho de campo) para cada região ecoclimática, de forma a definir as feições e períodos de maior separabilidade entre as culturas. Em seguida foi realizada uma classificação orientada a objeto para a safra 2014/2015 através de árvore de decisão e, com base nesta árvore, o processo foi generalizado para as demais safras avaliadas. Visando caracterizar se as áreas de expansão da soja estão ocorrendo sobre áreas de campos ou áreas de arroz, as áreas classificadas foram cruzadas com o Modelo HAND. Os resultados mostraram que as culturas de primavera-verão tiveram um incremento de 1.760.225 ha em área plantada, o que equivale a 92% em relação a 2000. Existem diferenças no padrão de variação dos indicadores espectrais ao longo da safra (bandas e índices de vegetação) apresentados pelas lavouras de soja e arroz no bioma Pampa. O melhor momento verificado para a distinção das culturas de soja e arroz ocorre no período que antecede o ciclo destas culturas. Em termos de indicador espectral as imagens de índices de vegetação são as que melhor diferenciam as culturas da soja e do arroz. Na metade sul do estado, a soja vem sendo cultivada preponderantemente nas áreas mais úmidas.

Abstract

The Pampa biome occurs in Argentina, Brazil, Uruguay and Paraguay. Its landscapes make up a rich cultural heritage relating to biodiversity with singular flora and fauna. In recent years the soybean had significant increase in municipalities in the south of the Rio Grande do Sul state, especially on the Pampa biome. This development had caused many issues in these environmentalists, as by the organisms of agricultural planning or by its consideration of high risk for soy cultivation due to water restrictions. Thus, this study aims to identify changes that occurred between 2000 and 2015 in Pampa biome coverage area due to the insertion and expansion of soybean cultivation. The study monitored the expansion of soybean crops in southern Brazil on areas belonging to the Pampa biome through the vegetation index (EVI and NDVI) on MODIS images. There were two on field activities, one in 2014 and another in 2015, in which different usages and land cover were sampled in the study area. A portion of this data was used in methodological tests and the other for assessing. Initially, the pattern of evolution of the indices over time was characterized for both soybean and rice crops, and later on the differences between ecoclimatic regions. Two methods of classification were considered: pixel by pixel and object-based. The pixel by pixel classification was the strategy used in the making of masks for area planted with spring-summer crops in the 2000/2001, 2002/2003, 2005/2006, 2008/2009, 2012/2013, 2013/2014 and 2014 / 2015 years. Since soybean and rice crops have similar phenological cycle, the Bhattacharyya distance was computed for each considered feature on known areas with soy and rice (field work) for each ecoclimatic region, in order to define the indices and periods of high separability between cultures. Later on an object-based classification for the 2014/2015 harvest was done using a decision tree, and based on this tree the process was generalized to the other crops evaluated. In order to characterize whether the soybean expansion is occurring on non-cultivated fields or rice areas, the classified areas were crossed-checked with a HAND model. The results showed that the spring-summer crops had an increase of 1,760,225 ha in acreage, which is equivalent to 92% compared to the year of 2000. There are differences of spectral indices in the pattern of variation along the crop (bands and vegetation indices) shown by soybean and rice in the Pampa biome. The best time for the distinction of soybean and rice cultures occurs in the period before the cycle of these crops. In terms of spectral index the vegetation indices (NDVI and EVI) images are those that best differentiate the soybean and rice. In the southern part of the state, the soybean has been cultivated mainly in wet areas, although.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Abrangência do bioma Pampa. Fonte: Adaptado de Santiago, 2004.....	18
Figura 2. Evolução de área plantada com soja e arroz irrigado no bioma Pampa.....	19
Figura 3. Evolução da sojicultura no bioma Pampa até 2012 em relação a 2000 e área máxima plantada pelos municípios do bioma Pampa de 2000 até 2012.	20
Figura 4. Produto MOD13Q1: NDVI e EVI abrangendo o Rio Grande do Sul.....	23
Figura 5. Área de estudo, com destaque no modelo digital de elevação.....	27
Figura 6. Fluxograma descrevendo as etapas e processos para a confecção das áreas com soja.....	28
Figura 7. Municípios gaúchos pertencentes ao bioma Pampa por regiões Ecoclimáticas. Elaborada pelo autor, adaptado de MALUF e CAIAFFO, 2001.....	29
Figura 8. Roteiro do campo sobre uma composição RGB de valores máximos e mínimos de EVI do bioma Pampa na safra de primavera verão 2015.	32
Figura 9. Demonstração de pontos coletados no município de Dom Pedrito/RS.	33
Figura 10: Demonstração de pontos coletados no município de Jaguarão/RS.	34
Figura 11. Ilustração do esquema de vetorização as feições correspondentes às lavouras de soja e de arroz sobre composições coloridas em falsa cor das imagens Landsat/OLI.	36
Figura 12. Ilustração do esquema de composição RGB de máximos e mínimos para a construção de máscaras de cultivo.....	38
Figura 13. Direção de fluxo de drenagem. Fonte: Adaptado de Rennó, 2008.	41
Figura 14. Evolução das áreas plantadas com as culturas temporárias de primavera/verão, soja e arroz no bioma Pampa, no período entre 2000 a 2013, por região ecoclimática.	42
Figura 15. Área, em hectares, plantada com sojicultura no bioma Pampa, em 2000 (esquerda) e sua respectiva porcentagem (direita), por região ecoclimática.	44
Figura 16. Área, em hectares, plantada com sojicultura no bioma Pampa, em 2013 (esquerda) e sua respectiva porcentagem (direita), por região ecoclimática.	44
Figura 17. Crescimento (esquerda) e crescimento percentual (direita) da área plantada com sojicultura no bioma Pampa, em 2013, em relação a 2000, por região ecoclimática.	45
Figura 18. Área cultivada com lavouras de primavera/verão em 2000/2001.....	47
Figura 19. Área cultivada com lavouras de primavera/verão em 2002/2003.....	47
Figura 20. Área cultivada com lavouras de primavera/verão em 2005/2006.....	48

Figura 21. Área cultivada com lavouras de primavera/verão em 2008/2009.....	48
Figura 22. Área cultivada com lavouras de primavera/verão em 2012/2013.....	49
Figura 23. Área cultivada com lavouras de primavera/verão em 2013/2014.....	49
Figura 24. Área cultivada com lavouras de primavera/verão em 2014/2015.....	50
Figura 25. Perfil espectro-temporal nas bandas do infravermelho próximo (NIR), infravermelho médio (MIR), vermelho (Red) e azul (Blue) de lavouras de soja e de arroz no bioma Pampa.	51
Figura 26. Perfil espectro-temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) de lavouras de soja e de arroz no bioma Pampa.	52
Figura 27. Perfil espectro-temporal do índice de vegetação realçado (EVI) de lavouras de soja e de arroz no bioma Pampa.	52
Figura 28. Perfil espectro-temporal do índice de vegetação realçado (EVI) de lavouras de soja e de arroz no bioma Pampa, por região ecoclimática.....	53
Figura 29. Distância de Bhattacharyya existente entre feições de soja e de arroz na safra de 2014/2015 na região ecoclimática Depressão Central.	54
Figura 30. Distância de Bhattacharyya existente entre feições de soja e de arroz na safra de 2014/2015 na região ecoclimática Baixo Vale do Uruguai.	55
Figura 31. Distância de Bhattacharyya existente entre feições de soja e de arroz na safra de 2014/2015 na região ecoclimática Campanha.	55
Figura 32. Distância de Bhattacharyya existente entre feições de soja e de arroz na safra de 2014/2015 na região ecoclimática Grandes Lagoas.....	56
Figura 33. Árvore de decisão para a região ecoclimática da Depressão Central	57
Figura 34. Árvore de decisão para a região ecoclimática do Baixo Vale do Uruguai ..	58
Figura 35. Árvore de decisão para a região ecoclimática da Campanha.....	58
Figura 36. Árvore de decisão para a região ecoclimática das Grandes Lagoas	58
Figura 37. Máscara de cultivo das lavouras de classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2000/2001.	59
Figura 38. Máscara de cultivo das lavouras de classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2002/2003.	60
Figura 39. Máscara de cultivo das lavouras de classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2005/2006.	60
Figura 40. Máscara de cultivo das lavouras de classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2008/2009.	61

Figura 41. Máscara de cultivo das lavouras de classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2012/2013.	61
Figura 42. Máscara de cultivo das lavouras de classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2013/2014.	62
Figura 43. Máscara de cultivo das lavouras de classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2014/2015.	62
Figura 44. Áreas de inundação gerada pelo modelo HAND com alturas mínimas de 0 a 100 metros para a drenagem mais próxima.	64
Figura 45. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com soja no bioma Pampa do Rio Grande do Sul.	66
Figura 46. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com arroz no bioma Pampa do Rio Grande do Sul.	66
Figura 47. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com soja na região ecoclimática da Depressão Central.....	67
Figura 48. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com arroz na região ecoclimática da Depressão Central.....	67
Figura 49. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com soja na região ecoclimática do Baixo Vale do Uruguai.....	68
Figura 50. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com arroz na região ecoclimática do Baixo Vale do Uruguai.....	68
Figura 51. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com soja na região ecoclimática da Campanha	69
Figura 52. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com arroz na região ecoclimática da Campanha	69
Figura 53. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com soja na região ecoclimática das Grandes Lagoas.....	70
Figura 54. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com arroz na região ecoclimática das Grandes Lagoas.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Informações de órbita/ponto, tiles e datas das imagens de satélite utilizadas.	31
Tabela 2. Número de pontos amostrais coletados nos levantamentos de campo no bioma Pampa. Período 2014 e 2015.	32
Tabela 3. Relação das datas (ano e dia juliano) de imagens Landsat 8 para diferentes órbitas-ponto, utilizadas para a delimitação das áreas de arroz e de soja na safra de 2013/2014.	34
Tabela 4. Relação das datas (ano e dia juliano) de imagens Landsat 8 para diferentes órbitas-ponto, utilizadas para a delimitação das áreas de arroz e de soja na safra de 2014/2015.	35
Tabela 5. Área oficial (IBGE, 2014), e áreas obtidas com a metodologia proposta dos principais cultivos de primavera/verão nos municípios gaúchos pertencentes ao bioma Pampa para o ano-safra 2000/2001, 2002/2003, 2005/2006, 2008/2009, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015.	46
Tabela 6. Valores de área plantada com soja e com arroz segundo os dados oficiais e valores classificados com a soja e com o arroz no bioma Pampa pela árvore de decisão.	63
Tabela 7. Matriz de concordância para a soja.....	63
Tabela 8. Matriz de concordância para o arroz.....	63

SUMÁRIO

1. Introdução	14
1.1 Hipótese	15
1.2 Objetivos	16
1.3 Objetivos específicos	16
2. Revisão bibliográfica	17
2.1 Bioma Pampa	17
2.2 Área de cultivo da soja e do arroz no RS	18
2.3 Identificação das áreas de cultivo de soja e arroz usando o atributo espectro-temporal.....	20
2.4 Sensores orbitais.....	21
2.4.1 Terra/MODIS	21
2.4.2 Landsat/OLI	23
2.5 Métodos estatísticos para identificação de culturas anuais	24
2.5.1 Distância de Bhattacharyya.....	24
2.5.2 Segmentação	25
2.5.3 Técnicas de mineração de dados	25
3. Material e Métodos	27
3.1 Área de estudo.....	27
3.2 Dados de referência	29
3.2.1 Oficial.....	29
3.2.2 Campo	30
3.2.3 Imagem Landsat/OLI	34
3.2.4 Processamento de imagens Terra/MODIS.....	36

3.2.5 Caracterização dos perfis espectro-temporais	37
3.2.6 Geração das máscaras de cultivo	37
3.2.7 Distância de Bhattacharyya.....	39
3.2.8 Segmentação	39
3.2.9 Árvore de decisão.....	40
3.2.10 Modelo HAND	40
4. Resultados e Discussão.....	42
4.1 Área de cultivo da soja segundo os dados oficiais.....	42
4.2 Máscaras de cultivo de primavera-verão	45
4.3 Diferenciação das culturas da soja e arroz irrigado baseado no atributo espectro-temporal.....	50
4.3.1 Padrão espectro-temporal das culturas da soja e arroz no sul do Estado do Rio Grande do Sul.....	50
4.3.2 Segmentação	53
4.3.3 Árvore de decisão.....	56
4.4 Quantificação do avanço da soja sobre o bioma Pampa e área de cultivo de arroz	59
5. Conclusões.....	71
Referências Bibliográficas.....	72

Lista de abreviaturas

AD - Áreas degradadas

APP - Área de Preservação Permanente

AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer

CEPSRM - Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EOS - *Earth Observing System*

ETM + - *Enhanced Thematic Mapper Plus*

EUA - Estados Unidos da América

EVI – *Enhanced Vegetation Index*

ha – Hectares

GLOVIS - *Global Visualization Viewer*

HAND - *Height Above the Nearest Drainage*

GPS - Sistema de Posicionamento Global

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Landsat - *Land Observation Satellite*

LEAA - Laboratório de Estudos em Agricultura e Agrometeorologia

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MSS - *Multispectral Scanner System*

MODIS – *Moderate resolution Imaging Spectroradiometer*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*

NOAA - *National Oceanic & Atmospheric Administration*

OLI - *Operational Land Imager*

SIDRA - Sistema Recuperação Automática do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

TM - *Thematic Mapper*

SVM - *Support Vector Machine*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USGS - *United States Geological Service*

1. INTRODUÇÃO

Identificar as regiões com maiores e menores transformações é de suma importância para o planejamento agrícola e ambiental. Os instrumentos de quantificação acerca destas transformações são ferramentas importantes que podem ser empregadas como subsídio às tomadas de decisões por parte de gestores territoriais, sejam programas ou políticas públicas.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), nos últimos anos a área cultivada com soja teve um crescimento significativo nos municípios situados no sul do estado do Rio Grande do Sul, especialmente sobre o bioma Pampa. Este avanço tem causado preocupação, tanto por parte de ambientalistas, apreensivos em relação a preservação deste bioma, como pelos órgãos de planejamento agrícola, visto que esta região é considerada de risco elevado para o cultivo da soja em função de restrições hídricas.

Ao longo dos últimos anos, paisagens naturais ocorrentes no bioma Pampa vêm sendo gradualmente suprimidas e degradadas. Esta supressão vem se consolidando de diversas formas, as mais evidentes são a conversão de campos nativos em lavouras de soja ou em de florestas de eucaliptos, ocorrentes principalmente nas regiões situadas na metade sul do estado, e nos países vizinhos, Uruguai e Argentina. Muitas áreas nativas também tiveram os seus usos e coberturas transformados após o estímulo dado pela instituição do Novo Código Florestal brasileiro (BRASIL, Lei nº 12.651/2012, de 25 de maio de 2012, 2012) que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e usa critérios menos restritivos que a legislação específica antecessora.

No território pampeano, as atividades agropecuárias contribuem grandemente para as receitas estaduais, entretanto, estas mesmas atividades, quando desenvolvidas de maneira não responsável, com uso acima da capacidade de suporte, são precursoras de degradação ambiental. Por exemplo, no sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, ocorrem focos naturais de areais (SUERTEGARAY, 1987). No entanto, o manejo inadequado de lavouras e da pecuária tem promovido perda da cobertura vegetal protetora do solo e provocando ou intensificando a arenização nestas áreas (SUERTEGARAY et al., 1989; NÓBREGA et al., 2012).

No contexto da expansão da cultura da soja para áreas de menor aptidão, uma das formas utilizadas para minimizar os riscos de perdas no rendimento tem sido a migração sobre as áreas tradicionalmente cultivadas com arroz irrigado. Neste caso, nas áreas de várzea o risco de restrição hídrica é menor. Por outro lado, anos com alta pluviosidade também podem representar risco, devido a problemas com o excesso hídrico.

As geotecnologias, em especial o Sensoriamento Remoto, que permite a obtenção de informações por intermédio da resposta espectral de um determinado alvo ou fenômeno em estudo, e os Sistemas de Informação Geográfica, são ferramentas rotineiramente utilizadas para o levantamento, qualificação e monitoramento de uso e cobertura da terra tanto em áreas naturais, rurais quanto no contexto urbano e

periurbano. Portanto, as geotecnologias podem contribuir para o monitoramento do avanço da soja sobre o bioma Pampa.

Diversos sensores orbitais têm sido usados para obter informações sobre a área cultivada com lavouras anuais, dentre os quais se destaca o sensor MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*). Estas, apresentam potencialidades de fácil acesso e obtenção dos diferentes produtos, especialmente os índices de vegetação, todos de forma gratuita.

O produto NDVI (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) tem como característica a sensibilidade a pigmentos responsáveis pela absorção da radiação solar na banda do vermelho, como por exemplo, a clorofila. O EVI (do inglês *Enhanced Vegetation Index*, por sua vez, tem maior sensibilidade para a estrutura do dossel. Os índices NDVI e EVI do produto MOD13Q1 do sensor MODIS e são disponibilizados na forma de combinações de imagens a cada 16 dias: produto obtido mediante a seleção dos pixels com os valores máximos e livres da cobertura de nuvens no período da composição. Estes, permitem o acompanhamento no tempo da evolução da biomassa verde da superfície, o qual tem sido extensamente utilizado para identificação de tipos de culturas, assim como, para o monitoramento das condições de crescimento, desenvolvimento e rendimento de culturas anuais.

Para a identificação de culturas, os índices de vegetação têm sido utilizados para a construção das denominadas máscaras de cultivo, as quais exploram o padrão diferenciado do desenvolvimento da biomassa que as culturas anuais apresentam em relação a outros alvos naturais.

No Rio Grande do Sul, entretanto, as culturas do arroz irrigado e da soja apresentam ciclos fenológicos similares, com épocas de semeadura muito semelhantes e veem sendo plantadas de áreas com os mesmos planos topográficos. Com isso, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto que utilizam atributo espectro-temporal e a topografia para diferenciar os cultivos tornam-se complexas. Não obstante, é necessário um maior aprimoramento e avançar em métodos e técnicas de processamento digital para separação destas culturas.

1.1 Hipótese

A Hipótese deste estudo é que a combinação de diferentes técnicas de processamentos digitais de imagens, como a confecção de imagens de máximos e mínimos valores de índices de vegetação, associada aos processos de segmentação e de árvore de decisão podem conferir maior qualidade aos resultados do mapeamento das culturas anuais e, portanto, contribuir para o monitoramento das transformações ocorridas no bioma Pampa nos últimos 15 anos em virtude da migração da cultura da soja para o sul do Estado.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste estudo é identificar transformações ocorridas entre os anos 2000 e 2015 em uma área de abrangência do bioma Pampa, na área do Rio Grande do Sul, em virtude da inserção e expansão da cultura da soja.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

Caracterizar os padrões individuais de evolução no tempo dos índices NDVI e EVI para as culturas da soja e do arroz irrigado.

Caracterizar as diferenças no padrão espectro-temporal do NDVI e EVI para as diferentes regiões ecoclimáticas que compõem o bioma Pampa.

Identificar os indicadores espectrais de separabilidade entre as culturas da soja e do arroz através de abordagens estatísticas.

Utilizar de forma integrada diferentes indicadores espectrais e técnicas de classificação de imagens para classificar, baseado no atributo temporal, as culturas da soja e do arroz irrigado, cujos ciclos fenológicos são semelhantes.

Identificar e discutir sobre o padrão da soja que vem sendo cultivada mais em áreas úmidas ou secas no bioma Pampa do Rio Grande do Sul.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Bioma Pampa

O bioma Pampa abrange uma área de aproximadamente 750 000 Km², dividida entre a Argentina, Brasil, Uruguai e Paraguai (Figura 1). No Brasil, este bioma é restrito ao Rio Grande do Sul e se situa na metade sul do estado, ocupando uma área correspondente a 176.496 Km², aproximadamente 63% do estado (IBGE, 2004).

“Pampa: do quíchua *pampa*, planície, às vezes comparada com o mar, devido à larga extensão e coxilhas semelhantes às ondas oceânicas, fazendo o olhar perder-se no horizonte...” (SILVA, 2002).

O bioma Pampa é delimitado pelo bioma Mata Atlântica e tem como característica vegetação campestre nativa, sendo usado predominantemente para a pecuária (MMA, 2007). Segundo Boldrini (2009) a vegetação ocorrente neste bioma é uma das mais ricas do mundo em gramíneas, e embora sejam estas as mais representativas, ele é formado por várias formações vegetais, tratando-se de um bioma complexo.

A partir da implantação do Novo Código Florestal, várias áreas do bioma Pampa sofreram perdas relevantes da sua preservação ambiental, cujos parâmetros estabelecidos na definição das áreas de preservação permanente (APP), pelo Novo Código Florestal brasileiro, Lei nº 12.651/2012, são menos restritivos. Não bastasse a consolidação de novas áreas desprotegidas, a legislação específica ainda previu a omissão dos crimes cometidos até então. Aos infratores que tenham descumprido a legislação específica vigente até então, o código florestal Lei nº 4.771/ 1965, da nova legislação, legitimou a utilização efetiva e sustentável das áreas já convertidas até 22 de julho de 2008. Dentre as quais, áreas, incluem-se as áreas úmidas, banhados e também áreas declivosas - como topos de morros, montanhas e serras. (CUNHA et al., 2015).

Esta anistia, prevista pelo Novo Código Florestal brasileiro, permitiu que áreas ocupadas com campos nativos fossem declaradas como exploráveis pelo uso sustentável através da pecuária. Deste modo e após esta legislação, tornou-se viável a conversão de uma grande quantidade de áreas, muitas vezes extensas, em lavouras de soja. (BRASIL Lei nº 12.651/2012, de 25 de maio de 2012, 2012).

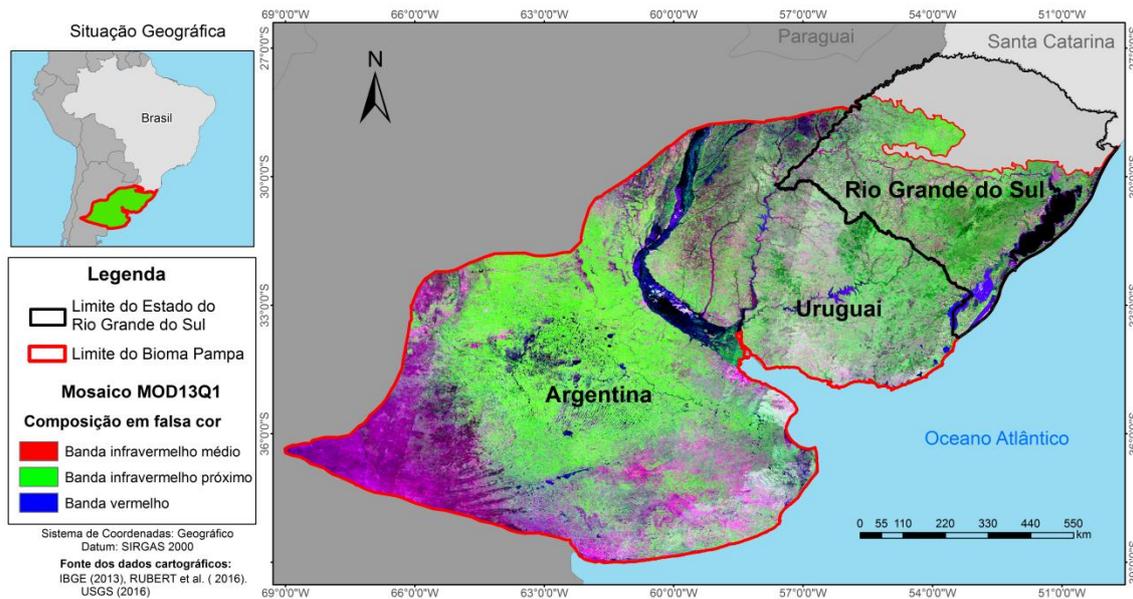


Figura 1. Abrangência do bioma Pampa. Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2 Área de cultivo da soja e do arroz no Rio Grande do Sul

A soja é uma cultura milenar, sendo que o seu cultivo se originou no oriente. Em 1882, por intermédio dos Estados Unidos da América (EUA), a cultura chegou ao Brasil, mais precisamente na Bahia, ainda como uma cultura forrageira. Nos anos de 1900 e 1901 a soja foi introduzida no estado do Rio Grande do Sul, região que apresentava condições climáticas e ecossistêmicas semelhantes à região sul dos EUA. Ainda em 1914 existem relatos de cultivos de soja, no município gaúcho de Santa Rosa. Mas o cultivo de soja para grãos ganhou relevância econômica, em 1941 a área plantada superou a destinada para plantação forrageira, momento que ali também se principiou a indústria processadora de soja no país (EMBRAPA, 2004).

Na década de 1960 o Rio Grande do Sul já era um dos estados pioneiros no cultivo comercial de soja no país, quando a cultura se consolidava na região norte do Estado. Nos campos sulinos, por sua vez, a soja foi introduzida na década de noventa, impulsionada pela modernização da agricultura e o surgimento da soja transgênica (RIZZI, 2005).

Na região sul do estado do Rio Grande do Sul, onde ocorre o bioma Pampa, o cultivo do arroz, por sua vez, teve os seus primeiros registros no fim do século XIX. Os primeiros plantios da cultura ocorreram nas várzeas sul-rio-grandenses.

Em 1907, motivada por tarifas alfandegárias, a produção do arroz já atendia às demandas de abastecimento do mercado local. Em 1914, se quantificava uma produção de 10.000 toneladas da cultura. A produção do arroz cresceu de forma tão intensa, ao passo que em 1930 somava 232.000 toneladas e, ainda em 1940, aportada por políticas públicas que asseguravam um preço mínimo de garantia ao produtor, a cultura do arroz já atingia o mercado nacional. Em 1963 a cultura do arroz chegara a marca das 825.000 toneladas, cobrindo uma área superior a 305.000 ha (PÉBAYLE, 1965). Atualmente, o estado do Rio Grande do Sul é considerado estabilizador da safra nacional de arroz, tendo sido responsável, na safra 2013/2014, por 67,8% da produção brasileira (8,2

milhões de toneladas), com área cultivada superior a 1,11 milhão de hectares (IBGE, 2014).

Segundo dados oficiais (IBGE, 2014), a soja e o arroz irrigado são as principais culturas no Rio Grande do Sul, ocupando 79,51% da área de cultivo no Estado (cerca de 3,4 milhões de hectares – Figura 2), e responsável por 67,62% da produção total de grãos no Estado.

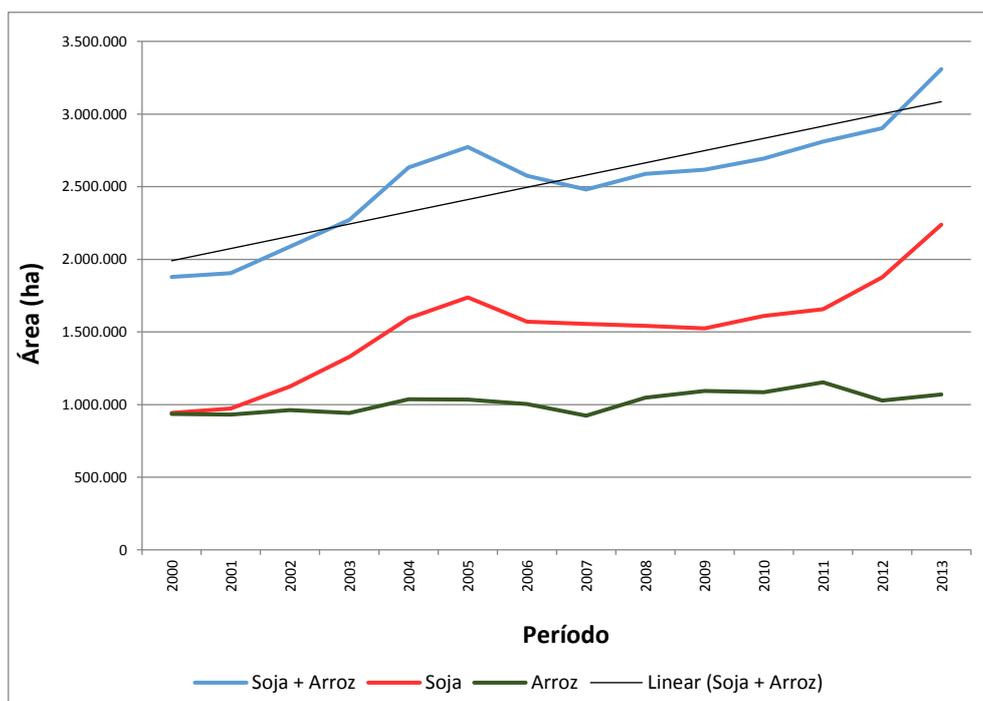


Figura 2. Evolução de área plantada com soja e arroz irrigado no bioma Pampa. Fonte: Elaborada pelo autor.

Estudos realizados por Cordeiro e Hasenack (2009) mostraram que nos últimos anos diversas mudanças na cobertura e no uso do solo vêm ocorrendo no bioma Pampa e que as atividades agrícolas têm crescido grandemente sobre estes campos. Historicamente, os campos do sudoeste do Rio Grande do Sul estiveram associados à produção pastoril, praticada de forma extensiva em latifúndios, sendo a pecuária e o cultivo de arroz irrigado as atividades pioneiras. No entanto, a partir dos anos 2000, houve uma expansão das áreas com cultivares de soja sobre esta região (GUASSELLI et al., 2009; PIZATTO, 2013). Tradicionalmente, as áreas no sul do estado vinham sendo utilizadas pela pecuária extensiva e pela orizicultura. Nos últimos anos, esse cenário tem se transformando frente ao exponencial crescimento da sojicultura na região (PILLAR e LANGUE, 2015).

A Figura 3 mostra a evolução das áreas com soja no bioma Pampa de 2000 para 2012 (esquerda) e a área máxima plantada por municípios neste período (direita). As áreas em cores mais quentes representam os municípios com grande área ou grande crescimento de áreas com o cultivo de soja (IBGE, 2014).

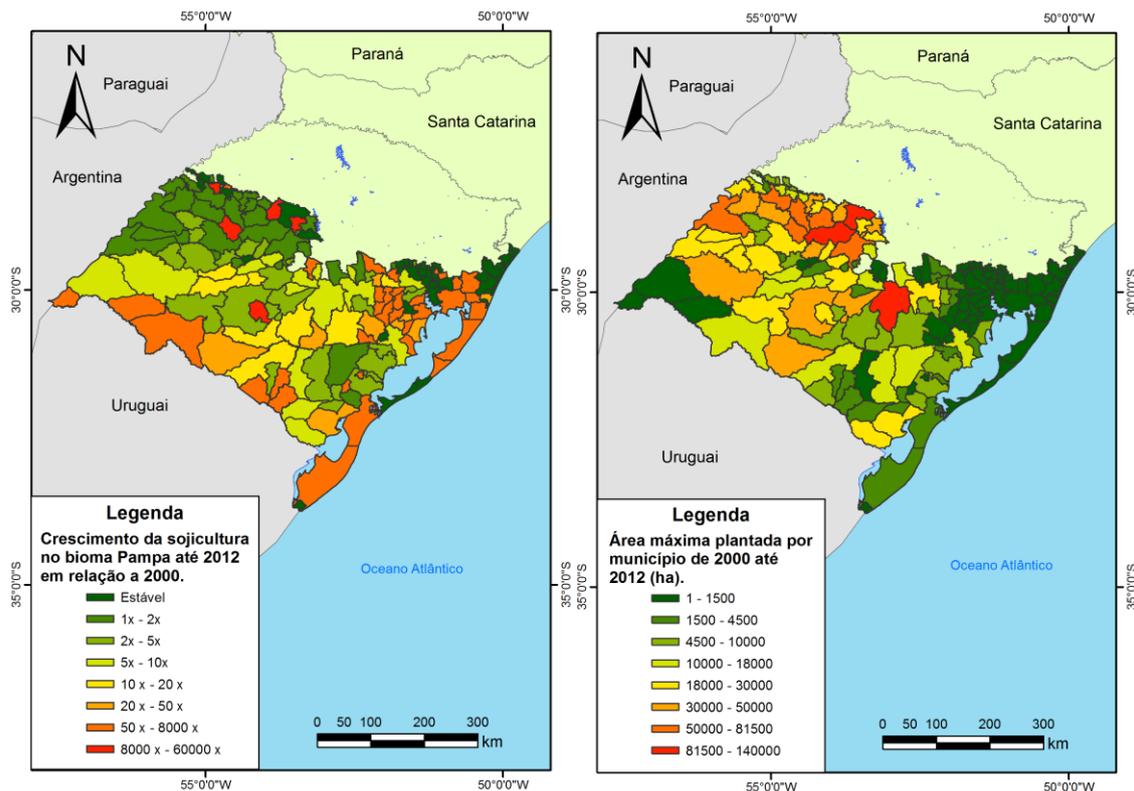


Figura 3. Evolução da sojicultura no bioma Pampa até 2012 em relação a 2000 e área máxima plantada pelos municípios do bioma Pampa de 2000 até 2012. Fonte de dados: IBGE (2014) - Produção Agrícola Municipal. Elaborada pelo autor.

No bioma Pampa os maiores incrementos na área de cultivo da soja ocorreram nos municípios situados próximo à fronteira com o Uruguai e próximo à área metropolitana de Porto Alegre (figura 3, à esquerda). Os valores muito grandes de incremento aparecem como resultado da introdução do cultivo em municípios que historicamente não cultivavam soja. Apesar disso, a área de cultivo de soja nestes municípios ainda é relativamente pequena (figura 3, à

2.3 Identificação das áreas de cultivo de soja e arroz usando o atributo espectral-temporal

Diversas estratégias têm sido utilizadas para a construção de máscaras de cultivo. Dentre estas abordagens, destacam-se as que utilizam o atributo espectral-temporal, dado que as culturas anuais apresentam um padrão de evolução da biomassa ao longo do tempo bastante distinto de outros alvos naturais (GALFORD et al, 2008; MORAES et al, 2009). Em geral, o atributo espectral mais utilizado são as imagens de índices de vegetação (FONTANA et al., 2015)

Utilizando este atributo podem-se citar alguns trabalhos desenvolvidos no estado do Rio Grande do Sul, como: imagem diferença em trigo (FONTANA et al., 2005), realce de distribuição em soja (WAGNER et al., 2007), classificação não supervisionada em trigo (JUNGES & FONTANA, 2011), classificação supervisionada em arroz

irrigado (KLERING et al., 2011), classificação supervisionada com uso de distância de drenagem em arroz e soja (MENGUE et al., 2015), entre outros.

Os resultados dos trabalhos desenvolvidos no Estado (KLERING et al., 2012; SANTOS et al., 2014) demonstram a robustez do enfoque metodológico baseado no atributo temporal, sendo viável a utilização desta abordagem para identificar e separar culturas que apresentam grandes áreas de lavoura e com datas de semeadura não muito amplas, ciclos fenológicos distintos ou diferenças no plano topográfico onde são plantadas (MENGUE et al., 2016). Entretanto, dada a migração da soja sobre as áreas úmidas, é absolutamente carecente o desenvolvimento de novas técnicas que viabilizem a separação de culturas com ciclos fenológicos semelhantes.

2.4 Sensores orbitais

2.4.1 Terra/MODIS

O sensor MODIS, a bordo das plataformas Terra e Aqua, é um dos instrumentos do programa EOS (*Earth Observing System*). A origem deste programa ocorreu nos anos 1980, através de um trabalho interdisciplinar realizado por um conjunto de pesquisadores da área da Ciência da Terra. Tal arranjo assinalou o cenário do sensoriamento remoto, pois proporcionou que as informações geradas por intermédio dos instrumentos do programa EOS tivessem consonância às demandas existentes em estudos ambientais. O programa EOS foi o primeiro programa a combinar diferentes sensores numa mesma plataforma, deste modo, são observados diversos dados em condições equivalentes, potencializando o cruzamento destas informações (RUDORFF et al., 2007).

A plataforma Terra, lançada em 18 de dezembro de 1999, foi a primeira plataforma do programa EOS e objetivou a aquisição de informações que subsidiassem investigações sobre nuvens, aerossóis, balanço de radiação, ciclo de carbono, entre outros. Sua órbita é quase polar e as suas observações são feitas no período da manhã. A plataforma Aqua foi lançada em 4 de maio de 2002 e tem por finalidade assistir dados sobre o ciclo da água na Terra. Como a imagem da cobertura da Terra é obtida em momento distinto da plataforma Terra, cruzando a linha do equador à tarde, gera informações com diferentes condições de atmosfera e iluminação, complementando os dados obtidos pela primeira plataforma. O sensor MODIS teve como principal referencial o sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), a bordo dos satélites da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). O MODIS possui 36 bandas espectrais com resoluções que se distribuem de 620 a 14.385nm. A resolução espacial dos produtos fornecidos pelo sensor MODIS variam de 250, 500 e 1000m (TEIXEIRA, 2016).

Entre os fatores que potencializam a qualidade de dados oriundos do sensor MODIS estão os níveis de pré-processamento, que vêm sendo constantemente aprimorados. As imagens são organizadas por *Tiles* e disponibilizadas em projeção sinusoidal, uma projeção pseudocilíndrica de igual área, às vezes chamada de Sanson-de-Flamsteed (FITZ, 2012).

O conjunto de dados MODIS correspondem a uma série histórica de informações relativas à dinâmica espacial e temporal da biomassa do Globo. Entre os principais produtos do sensor MODIS, destaca-se o MOD13Q1 que dispõe de dois índices de vegetação e de imagens correspondentes às reflectâncias nos comprimentos de onda do azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio, em composições, de imagens ou mosaico de 16 dias (RUDORFF et al., 2007).

Os índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais (JENSEN, 2011) amplamente utilizados na detecção e avaliação de coberturas agrícolas (RIZZI, 2007; SANTOS, 2010), em virtude das interações do espectro eletromagnético, nas diferentes imagens espectrais, com os componentes celulares da vegetação e com o solo. Destes índices, salientam-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, do inglês, *Normalized Difference Vegetation Index* (ROUSE et al., 1973) e o Índice de Vegetação Realçado, do inglês, *Enhanced Vegetation Index* (EVI), que inclui a refletância do azul, além de coeficientes para minimizar a contribuição do solo (HUETE et al., 2002).

O índice de vegetação por diferença normalizada é uma relação baseada na refletância do vermelho e do infravermelho próximo e pode ser calculado através da Equação 1 podendo os seus valores variar de -1 a 1.

$$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V) \quad (1)$$

Sendo:

ρ_{IVP} e ρ_V , as reflectâncias no infravermelho próximo e vermelho, respectivamente.

O índice de vegetação realçado foi elaborado para melhorar o sinal de resposta da vegetação, otimizando a sensibilidade em áreas onde ocorre maior densidade de biomassa, além de reduzir influências atmosféricas. O EVI pode ser calculado através da seguinte equação:

$$EVI = G (\rho_{IVP} - \rho_V) / (L + \rho_{IVP} + C1 \times \rho_V - C2 \rho_{Az}) \quad (2)$$

Sendo

L fator de ajuste para o solo;

C1 e C2 coeficientes de ajuste para o efeito de aerossóis;

G o fator de ganho;

ρ_{Az} a reflectância no azul.

A Figura 4 ilustra um mosaico de imagens (*Tiles* h13v11 e h13v12) do produto MOD13Q1 com os índices NDVI (à esquerda) e EVI (à direita) abrangendo o Rio Grande do Sul.

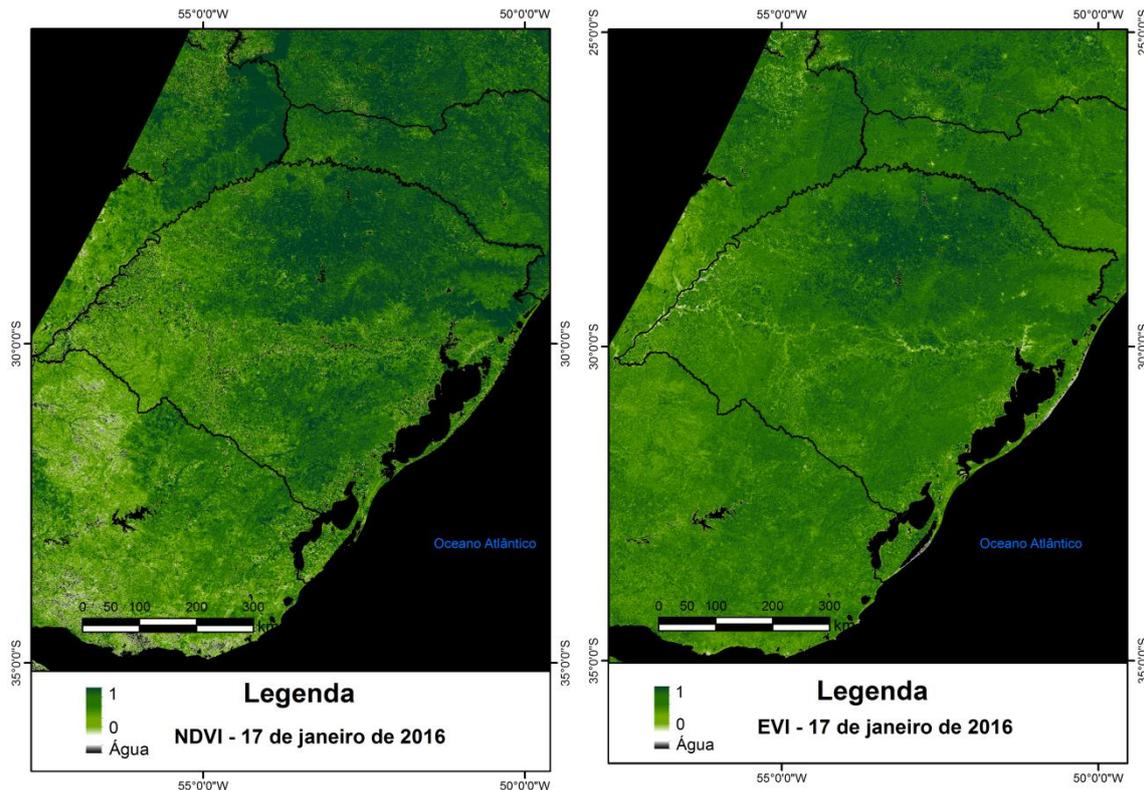


Figura 4. Produto MOD13Q1: NDVI e EVI abrangendo o Rio Grande do Sul.

Fonte: Elaborada pelo autor

Os dados deste sensor têm sido habitualmente explorados em trabalhos que visam identificar e monitorar a cobertura terrestre considerando fenologia e alterações antrópicas, para estimar áreas cultivadas Mengue e Fontana (2013), para modelagens de rendimento de grãos (KLERING et al., 2012), entre outros. A principal vantagem do uso deste sensor é a possibilidade de obter informações de forma rápida e precisa.

2.4.2 Landsat/OLI

O programa Landsat (*Land Observation Satellite*) despontou em 1967, como parte do Programa de Levantamento de Recursos Terrestres da NASA (*Earth Aeronautics & Space Administration*). Este é um dos primeiros programas com dados de observação terrestre, seus primeiros registros correram em 1972 através do Satélite ERTS 1, mais tarde denominado de Landsat 1.

O Landsat1 foi o pioneiro de uma série de 8 satélites cujas tecnologias de sensores foram sendo aprimoradas ao passo que a série evoluía.

Os primeiros registros da série Landsat foram obtidos por intermédio do sensor Landsat MSS (*Multispectral Scanner*). Este sensor captava dados de refletância nos comprimentos de onda entre 0,5 a 1,1 μ m, distribuídos em quatro canais.

O sensor MSS possuía uma resolução espacial de 79 metros e uma faixa de imageamento de 185 x 170 Km para cada órbita. O MSS esteve a bordo dos satélites Landsat até a sua quinta edição da série, nas três primeiras ele possuía um período de revisita de 18 dias e nas demais uma revisita de 16 dias.

Os sistemas sensores Landsat TM (*Thematic Mapper*) foram lançados em 16 de julho de 1982 e 1^o de março de 1984, a bordo dos satélites Landsat 4 e 5, respectivamente. O TM representou um grande avanço tecnológico à série Landsat, pois as informações obtidas por ele eram obtidas em resoluções espectrais, espaciais e radiométricas superiores que as do MSS.

É importante ressaltar a formidável longevidade do satélite Landsat 5 TM, que até 2011 forneceu dados em alta qualidade, suprimindo boa parte das demandas estimadas aos seus sucessores, o Landsat 6, que no começo dos anos 1990 teve imprevistos ainda no seu lançamento.

Em 15 de abril de 1999 foi lançado, a bordo do Landsat 7, o ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), com algumas características similares a seus precursores, aos sensores TM dos Landsats 4 e 5, porém com consideráveis melhorias. Em 2003 o espelho de varredura eletrônica apresentou falhas, seus produtos são disponibilizados até os dias atuais, porém com limitações (JENSEN, 2009).

O OLI (*Operational Land Imager*) foi lançado ao espaço, a bordo do Landsat 8 em 2013. Entre as suas novidades está a resolução radiométrica das suas imagens, que possuem 16 bits. As bandas espectrais são compatíveis as do seu predecessor, o sensor ETM + do Landsat 7, embora o OLI apresente outras potencialidades, como a sua sensibilidade espectral mais apurada, que nas 11 bandas se distribui entre Pancromático: 0,50 – 0,68 μ m (Banda8); Multiespectral: 0,43 – 0,45 μ m (Banda1), 0,45 – 0,51 μ m (Banda2), 0,53 – 0,59 μ m (Banda3), 0,64 – 0,69 μ m (Banda4, Vermelho), 0,85 – 0,88 μ m (Banda5, Infravermelho próximo), 1,57 – 1,65 μ m (Banda6, SWIR1), 2,11 – 2,29 μ m (Banda7, SWIR2), 1,36 – 1,38 μ m (Banda9, Cirrus); Termal: 1,060 – 1,119 μ m (Banda10, TIRS1), 1,150 – 1,251 μ m (Banda11 TIRS2).

As suas imagens possuem uma resolução temporal de 16 dias, imageando uma área de 185 x 185 km e o sistema de organização ocorre como seus precedentes, através de um sistema de órbita/ponto.

2.5 Métodos estatísticos para identificação de culturas anuais

2.5.1 Distância de Bhattacharyya

A distância Bhattacharyya (Equação 3) vem sendo empregada em estudos onde se almeja identificar a proximidade relativa de duas amostras de sensores remotos a serem consideradas (JENSEN, 2005). Esta distância mede a separabilidade entre classes para cada feição específica, como EVI, NDVI, bandas espectrais, etc., possibilitando a seleção das feições que melhor discriminam o dado de interesse. A distância de Bhattacharyya é calculado a partir da equação.

$$B = -\ln \left[\int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{p\left(\frac{X}{\omega_1}\right) p\left(\frac{X}{\omega_2}\right)} dX \right] \quad (3)$$

Sendo:

X a variável de cada feição e ω a classe.

Essa distância tem sido aplicada em estudos que utilizam diferentes resoluções espaciais, em boa resolução cita-se o trabalho desenvolvido por Campos (2013), que comparou métodos de classificação baseada em objeto para a classificação do uso e cobertura do solo através de imagem multiespectral do sensor REIS do satélite RapidEye.

2.5.2 Segmentação

O processo de segmentação tem como objetivo agrupar conjuntos de pixels com valores digitais similares (JENSEN, 2005). Esta técnica teve as suas primeiras aplicações no contexto das imagens com altas resoluções espaciais, aplicada à estudos urbanos (MENEZES et.al., 2012).

Em estudos onde se almeja isolar alvos naturais, como as áreas agrícolas, a similaridade entre pixels de uma mesma cultura é uma característica trivial, visto que, via de regra, estas feições são lavouras que abrangem um número significativo de pixels homogêneos (FILIPPINI et. al, 2012). Neste sentido, ultimamente, a segmentação também vem sendo empregada em imagens com baixas e médias resoluções, em grande parte associadas a feições agrícolas (FOCKELMANN, 2013).

A segmentação parte do pressuposto da decomposição da imagem em regiões ou objetos formados por pixels. Deste modo, cada segmento corresponde a uma região formada por um conjunto de pixels com critérios de homogeneidade em uma ou mais dimensões do espaço de atributo (SILVA JUNIOR, et al., 2014).

Este processo minimiza o efeito *salt-and-pepper* (sal e pimenta), que é tipificado pela existência de pequenos polígonos dispersos ao longo da área mapeada. Efeito que, por sua vez, tende a requisitar operações de análise de contexto espacial e a utilização de filtros para remover estas imperfeições (MENEZES et.al., 2012).

Zanotta (2014), mencionou resultados satisfatórios ao explorar essa abordagem ao identificar áreas de desmatamento na Amazônia, anteriormente essa estratégia já havia sido explorada pelo mesmo autor no monitoramento de queimadas no Pantanal. Em ambientes agrícolas, a abordagem também apresentou resultados satisfatórios no estudo realizado por Junior (2013), que estimou áreas plantadas com soja no Maranhão e por Lucas et. al. (2007), no mapeamento multi-temporal feito por intermédio de imagens orbitais.

2.5.3 Técnicas de mineração de dados

Mineração de dados consiste num processo não trivial de identificação de novos padrões em um conjunto de dados (FAYYAD et al. 1996). Dentre as diversas aplicações de técnicas de mineração de dados em classificação de imagens, as abordagens Árvore de decisão (AD), *Support Vector Machine* (SVM) e as Redes Neurais tem ganhado destaque por apresentarem resultados satisfatórios (MANABE; ROCHA, 2013).

Dentre estes, a AD tem ganhado relevância por ser considerada de mais fácil assimilação, em virtude da simples interpretação dos seus resultados. Outros fatores que

potencializam as suas aplicações estão associados à desnecessidade de que os dados tenham distribuições normais e a possibilidade de trabalhar com dados medidos em múltiplas escalas.

Essa técnica trabalha de forma recursiva, agrupando o conjunto de informações até que resulte apenas uma classe em cada subconjunto. Cada subconjunto é denominado nó, e cada nó é calculado por intermédio da entropia e no ganho de informação e apesar da simplicidade da técnica ela representa uma poderosa ferramenta (RUIZ et. al, 2014).

O C4.5 é um algoritmo de AD que tem sido largamente aplicado em diversos estudos para desenvolvimento da árvore (SILVA-JUNIR, 2013). Este algoritmo possui alguns parâmetros que devem ser estabelecidos e que estão associados à melhores resultados, tais como o fator de confiança, o número mínimo de instâncias por nó-folha, a necessidade de podar ou não a árvore de decisão.

Estudos utilizando árvores de decisão tem se mostrado favoráveis no mapeamento da cobertura da terra na região central do estado do Rio Grande do Sul, (RUIZ et. al, 2014), na detecção de desmatamento na Amazônia (ZANOTTA, 2014) e na identificação de culturas utilizando índices de vegetação (PEÑA-BARRAGÁN et al., 2011).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área analisada neste estudo possui 180.597 Km², abrangendo todos os municípios pertencentes ao bioma Pampa compreendido no estado do Rio Grande do Sul (Figura 5), o qual ocupa cerca de 63% do território do estadual.

Na maior parte do bioma o clima, segundo Köppen, (Köppen, 1948) predominante é o Cfa (subtropical chuvoso com verões quentes), somente nas regiões de maior altitude o clima é Cfb (subtropical chuvoso com verões amenos).

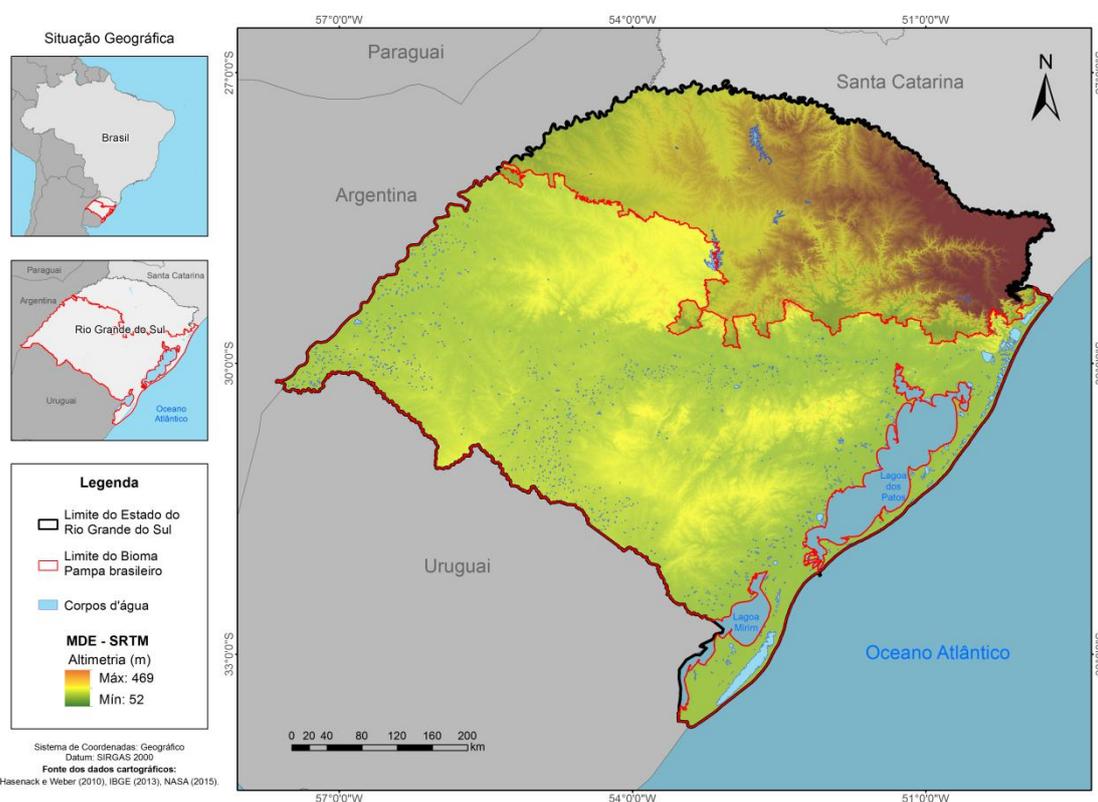


Figura 5. Área de estudo, com destaque no modelo digital de elevação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 6 ilustra o fluxograma adotado para o desenvolvimento das atividades realizadas.

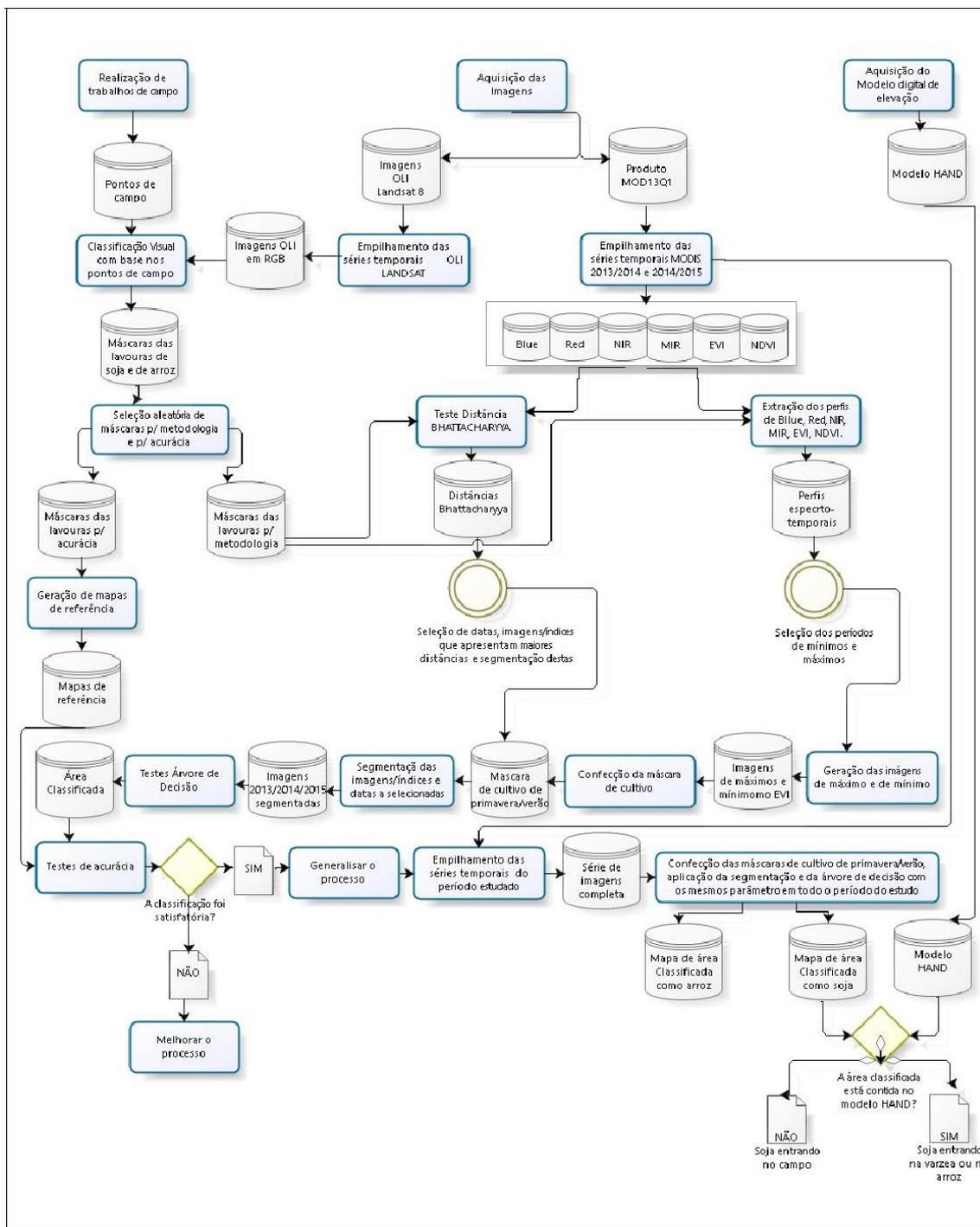


Figura 6. Fluxograma descrevendo as etapas e processos para a confecção das áreas com soja.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 Dados de referência

3.2.1 Oficial

Para análise da dinâmica das áreas cultivadas com soja no bioma Pampa, os municípios pertencentes ao bioma foram agrupados nas nove regiões ecoclimáticas (Figura 7), as quais foram definidas por MALUF & CAIAFFO (2001), com base nas regiões agroecológicas. Estas regiões foram definidas para o zoneamento de espécies florestais, considerando características climáticas (principalmente o regime termopluviométrico), geomorfológicas, capacidade de uso dos solos e seus usos.

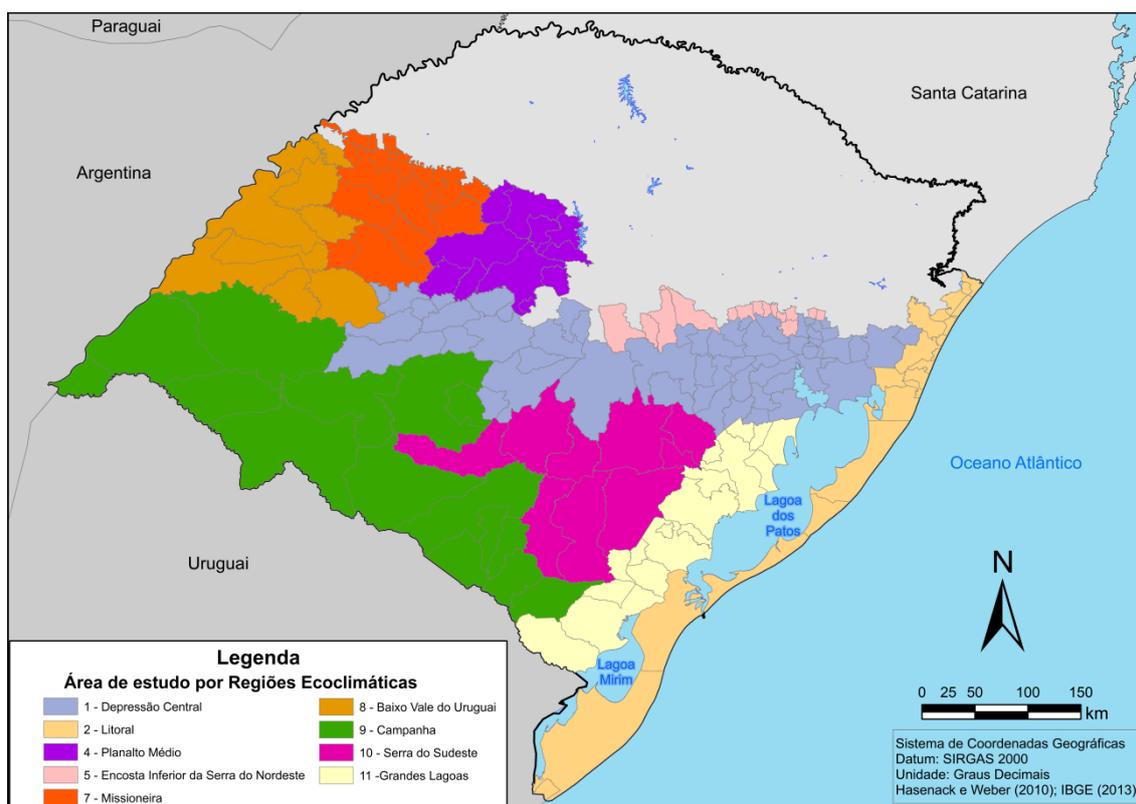


Figura 7. Municípios gaúchos pertencentes ao bioma Pampa por regiões ecoclimáticas. Elaborada pelo autor, adaptado de Maluf e Caiaffo (2001).

A partir do Sistema Recuperação Automática (SIDRA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foram obtidas informações correspondentes à Produção Agrícola Municipal. Foram selecionados dados de área plantada com soja e com arroz dos municípios gaúchos pertencentes ao bioma Pampa de 2000 a 2013. Sequencialmente, estes dados foram agrupados por região ecoclimática. Tendo em vista que as regiões ecoclimáticas possuem dimensões distintas, optou-se também por trabalhar com valores percentuais, viabilizando um melhor entendimento da expansão das áreas plantadas com soja em cada região.

3.2.2 Campo

Os materiais utilizados para a realização do trabalho de campo consistiram em vinte cenas do sensor OLI da série Landsat; mapas derivados de índices de vegetação do sensor MODIS; base cartográfica vetorial – IBGE; um GPS Garmin modelo Etrex Vista HCx; uma câmera fotográfica modelo Nikon D3200; uma planilha para anotações, caneta e veículo.

Foram realizados dois levantamentos de campo, sendo que o primeiro ocorreu no mês abril de 2014 e o segundo nos meses de março e abril de 2015 e tiveram como propósito a observação *in situ* de áreas agrícolas das culturas de primavera-verão nos municípios gaúchos pertencentes ao bioma Pampa. Uma parte destes dados serviram para os testes de desenvolvimento das metodologias e uma outra foi utilizada como referência para averiguação da acurácia dos resultados.

A primeira saída de campo (abril de 2014) permitiu uma caracterização inicial da área de estudo, tendo sido coletados pontos e gerado um perfil norte-sul desde o município de Porto Alegre até a fronteira sul do Estado, no município do Chuí. Para a segunda saída de campo (2015), estabeleceu-se um roteiro com base na diferença entre mapeamentos das culturas de primavera-verão dos anos de 2015 e de 2001. A confecção destes mapas foi realizada utilizando séries temporais dos produtos de índices de vegetação derivados do sensor MODIS, cujas datas estão expressas na Tabela 1. Esta etapa foi realizada no programa computacional ENVI 5.0®, e utilizou o banco de imagens MODIS disponível no Laboratório de Estudos em Agricultura e Agrometeorologia (LEAA) do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto (CEPSRM).

A coleta dos dados teve como base a visualização de pontos amostrais e espacialização destes num banco de dados em um Sistema de Informações Geográficas. Os pontos coletados foram distribuídos no entorno das vias de trânsito de acordo com o campo de visada do observador, tornando possível obter informações sobre diferentes dimensões de lavouras. Este procedimento foi realizado no programa computacional ArcMap®, onde utilizou-se 20 cenas oriundas do sensor OLI da série Landsat (Tabela 1).

Para a coleta exata das coordenadas dos pontos amostrais foi utilizado um receptor GPS (Sistema de Posicionamento Global) conectado a um microcomputador, sendo subsidiado pelo aplicativo DNR Garmin para permitir a coleta das informações em tempo real.

Tabela 1. Informações de órbita/ponto, *tiles* e datas das imagens de satélite utilizadas.

SensorOLI – Landsat		Sensor MODIS - Terra (EOS)		
Órbita /Ponto	Data	Tiles	Data	
221/81	05/01/2014	h13v11 e h13v12	15/10/2000	
221/82	05/01/2014		31/10/2000	
221/83	05/01/2014		16/11/2000	
222/83	11/12/2013		02/12/2000	
221/81	25/02/2015		18/12/2000	
221/82	09/02/2015		01/01/2001	
221/83	07/12/2014		17/01/2001	
221/83	13/03/2015		02/02/2001	
222/81	28/11/2014		18/02/2001	
222/81	20/03/2015		06/03/2001	
222/82	31/01/2015		22/03/2001	
222/83	20/03/2015		07/04/2001	
223/80	07/02/2015		23/04/2001	
223/81	07/02/2015		16/10/2014	
223/82	05/12/2014		01/11/2014	
223/82	07/02/2015		17/11/2014	
224/80	18/03/2015		03/12/2014	
224/81	18/03/2015		19/12/2014	
225/80	09/03/2015		01/01/2015	
225/81	09/03/2015		17/01/2015	
				02/02/2015
				18/02/2015

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 8 observa-se o roteiro dos dois campos, sobre uma composição RGB composta através de valores máximos e mínimos de EVI do bioma Pampa, na safra de primavera verão de 2015. Nesta imagem as feições em tons de vermelho estão associadas a culturas de primavera-verão e as demais áreas como não cultura. O percurso do primeiro campo pode ser observado em verde, enquanto o percurso do segundo levantamento pode ser visualizado em amarelo.

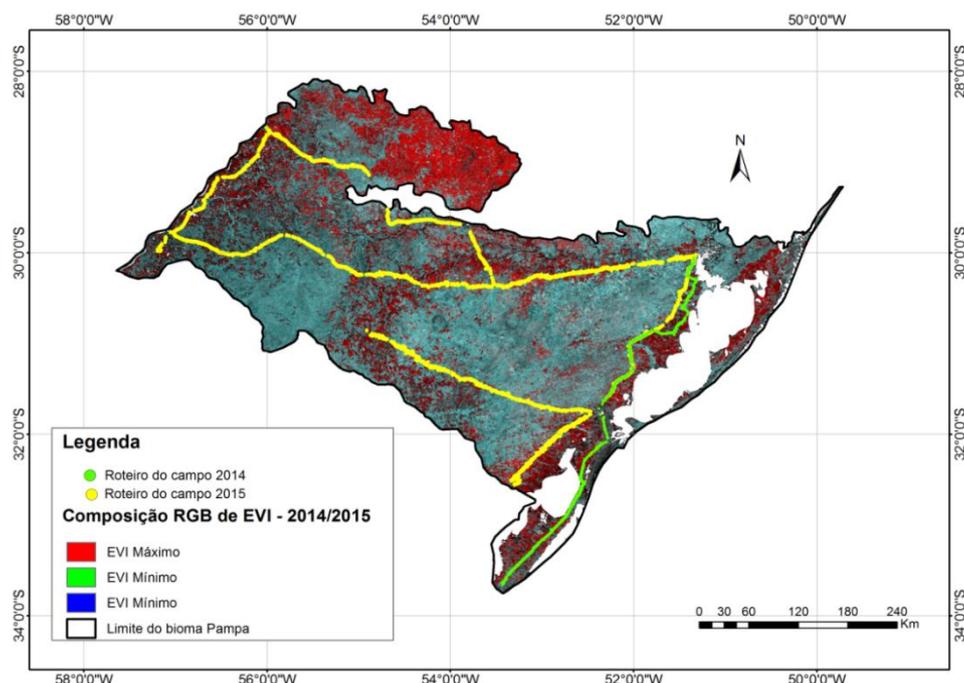


Figura 8. Roteiro do campo sobre uma composição RGB de valores máximos e mínimos de EVI do bioma Pampa na safra de primavera-verão 2015.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dois levantamentos de campo totalizaram 4.047 pontos amostrais distribuídos nas respectivas classes: soja, milho, arroz, culturas diversas, campo, pastagem, vegetação nativa, silvicultura, água, solo exposto (outras culturas), desconhecido e uva (Tabela 2). Adicionalmente foram realizados 413 registros fotográficos de feições de campo, lavouras de soja e de arroz irrigado, bem como do processo de colheita do arroz.

Tabela 2. Número de pontos amostrais coletados nos levantamentos de campo no bioma Pampa. Período 2014 e 2015.

Uso do solo	1º Campo	2º Campo	Total
Soja	253	1022	1.275
Milho	6	17	23
Arroz	217	396	613
Culturas diversas	16	10	26
Campo	358	929	1.287
Pastagem	27	95	122
Mata ciliar	60	242	302
Silvicultura	86	253	339
Água	19	7	26
Solo exposto (outras culturas)	0	8	8
Desconhecido	0	14	14
Uva	0	12	12
Total	1042	3005	4047

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 9 é apresentado um exemplo da aquisição de pontos no município de Dom Pedrito, nas proximidades do Rio Santa Maria. A imagem utilizada neste trecho corresponde a 05 de dezembro de 2014, quando as áreas de cultivo de soja possuíam

baixa cobertura vegetal. Na composição RGB, associada aos canais 6, 5 e 4, respectivamente, se podem observar em tons de magenta algumas feições correspondentes a lavouras de soja, enquanto que existem feições em tons de verde que relacionam-se às áreas de campo e os pixels em verde escuro correspondem a mata ciliar, neste estudo atribuída a classe mata ciliar.

Ainda na Figura 9, em detalhe, é apresentado um registro fotográfico em sentido sudeste, onde em perspectiva é possível observar áreas numeradas de soja, campo, soja e campo novamente.

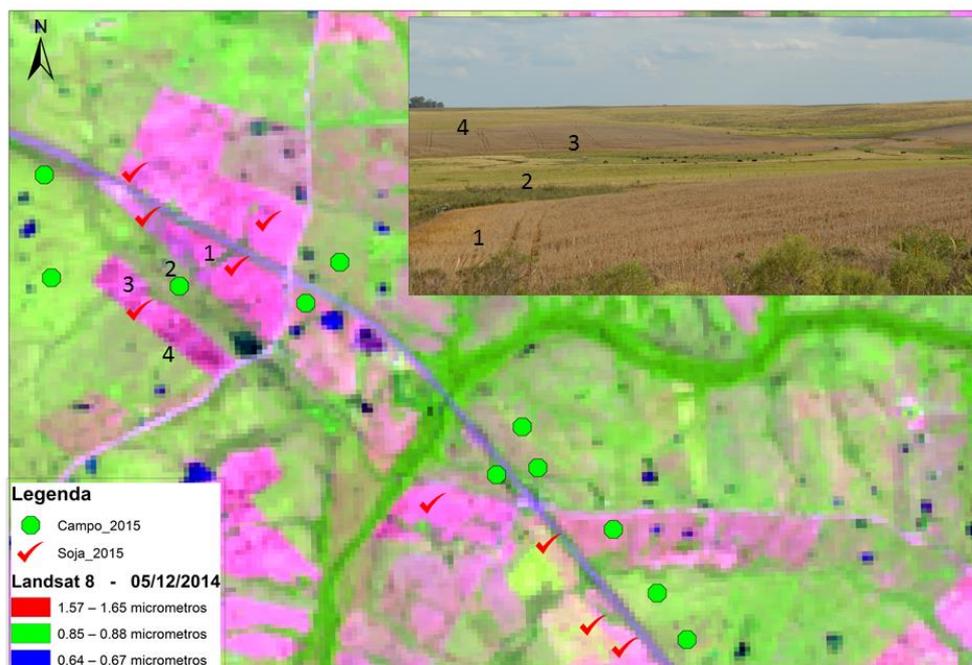


Figura 9. Demonstração de pontos coletados no município de Dom Pedrito/ Rio Grande do Sul em abril de 2015. Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 10 ilustra outro exemplo de aquisição de pontos aos arredores do rio Jaguarão, no município de mesmo nome, onde há o cultivo de soja, arroz e silvicultura. Em destaque é possível identificar estas áreas numeradas.

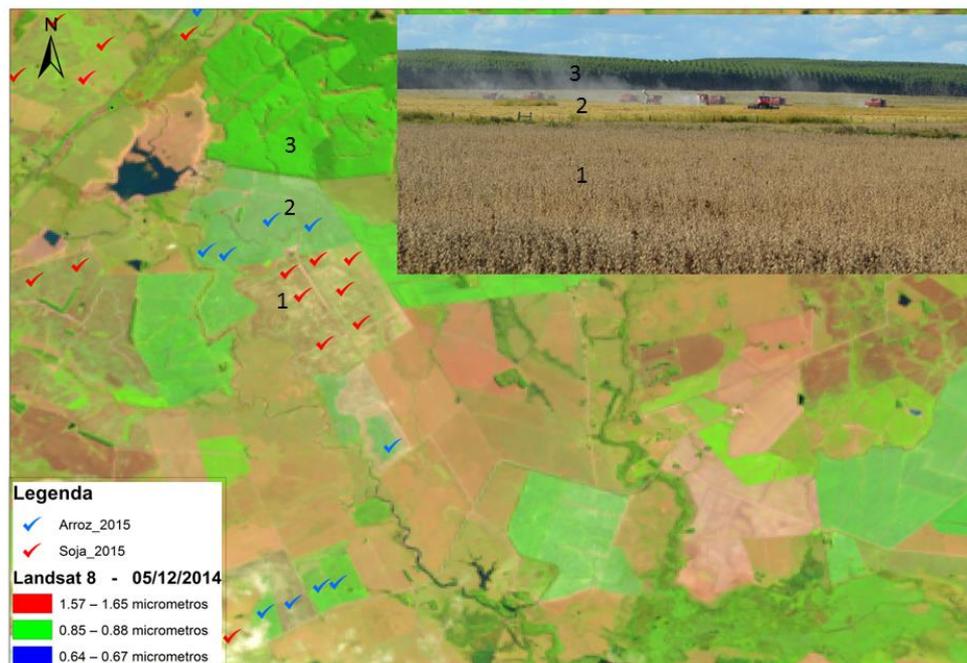


Figura 10: Demonstração de pontos coletados no município de Jaguarão/ Rio Grande do Sul em abril de 2015. Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.3 Imagem Landsat/OLI

Foram obtidas imagens de média resolução espacial (30 metros) para a delimitação das áreas de forma a compor um banco de imagens OLI compreendendo o período em que ocorre o ciclo fenológico das culturas em estudo, referente a 126 cenas livres ou parcialmente livres de nuvens. Foram 32 imagens correspondentes a safra de 2013/2014, distribuídas entre 30/08/2013 e 23/06/2014 (Tabela 3), e outras 94 cenas referentes à safra de 2014/2015, quando o trabalho de campo cobriu uma área mais ampla. Este segundo grupo de imagens distribuiu-se no período entre 29/08/2014 e 23/05/2015 (Tabela 3). As imagens foram obtidas através do *Global Visualization Viewer (GLOVIS)*.

Tabela 3. Relação das datas (ano e dia juliano) de imagens Landsat 8 para diferentes órbitas-ponto, utilizadas para a delimitação das áreas de arroz e de soja na safra de 2013/2014.

221-81	221-82	221-83	222-83
2013242	2013242	2013322	2013281
2013274	2013274	2013338	2013297
2013322	2013322	2014005	2013329
2013338	2013338	2014021	2013345
2013354	2014005	2014053	2013361
2014005	2014021	2014085	
2014021	2014053	2014117	
2014037	2014085		
2014069	2014117		
2014085			
20141174			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na safra 2013/14 foram contempladas quatro das regiões ecoclimáticas que compõem o bioma Pampa, enquanto que em 2014/15 (Tabela 4), foram coletados pontos de campo outras duas regiões.

Tabela 4. Relação das datas (ano e dia juliano) de imagens Landsat 8 para diferentes órbitas-ponto, utilizadas para a delimitação das áreas de arroz e de soja na safra de 2014/2015.

221-081	221-082	222-081	222-82	223-080	223-81	224-80	224-81	225-81
2014277	2014293	2014300	2014300	2014259	2014339	2014266	2014314	2014241
2014293	2014309	2014316	2014332	2014275	2015006	2014298	2014330	2014321
2014309	2014341	2014332	2014348	2014323	2015022	2014314	2015013	2014337
2014325	2014357	2014348	2014364	2014339	2015054	2014330	2015045	2015004
2014341	2015024	2014364	2015031	2015006	2015070	2014346	2015061	2015036
2014357	2015040	2015015	2015047	2015022	2015086	2015013	2015077	2015052
2015024	2015056	2015031	2015079	2015038	2015102	2015045	2015093	2015068
2015040	2015072	2015047	2015111	2015054	2015118	2015077	2015109	2015100
2015056	2015088	2015079	2015127	2015070		2015093	2015125	2015116
2015072		2015095		2015102		2015109	2015141	2015132
2015104		2015111		2015118		2015125		
		2015127		2015134		2015141		
		2015143						

Fonte: Elaborada pelo autor.

No programa computacional ENVI 5.0® foram confeccionadas composições coloridas em falsa cor das imagens Landsat, utilizando os canais correspondentes aos comprimentos de onda infravermelho próximo, infravermelho médio e vermelho. Para otimizar o processo de interpretação dos alvos, foram realizados procedimentos de ajustes de histogramas, realçando as feições de soja e de arroz.

Com base nos pontos coletados em campo, no ambiente ArcMap®, foi realizada uma classificação do tipo interpretação visual das cenas do sensor OLI e foram vetorizadas as feições correspondentes às lavouras de soja e de arroz.

Cabe salientar que dentro do ciclo fenológico das culturas de primavera-verão, existe uma grande amplitude de estádios de desenvolvimento em que as culturas se apresentam, as quais puderam ser percebidas durante a coleta de dados em campo. Estas variações estão associadas a diferenças em épocas de semeadura, opções de manejo ou mesmo efeito de condições meteorológicas. Neste sentido, o processo de vetorização sobre imagens multitemporais teve como princípio a delimitação das lavouras, buscando a homogeneidade da resposta espectral de cada alvo. Esta etapa teve como objetivo que um determinado ponto de campo pudesse derivar em mais de um polígono, quando na área deste ocorressem talhões limítrofes de uma mesma cultura apresentando momentos fenológicos distintos. Um exemplo deste processo pode ser observado na Figura 11, na qual é possível visualizar a delimitação de áreas nas cinco regiões ecoclimáticas.

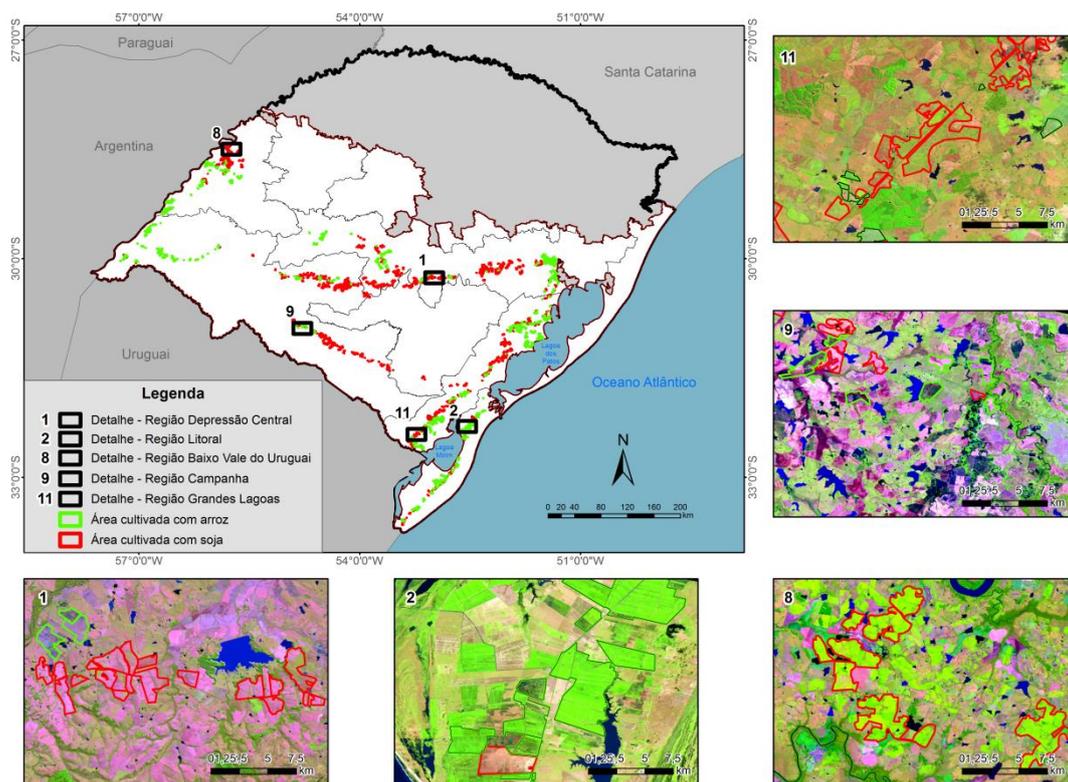


Figura 11. Ilustração do esquema de vetorização as feições correspondentes às lavouras de soja e de arroz sobre composições coloridas em falsa cor das imagens Landsat/OLI. Fonte: Elaborada pelo autor.

Sequencialmente, os vetores foram divididos de forma aleatória em dois grupos, um deles foi denominado “Metodologia”, tendo como objetivo a obtenção das informações que nortearam o emprego dos experimentos metodológicos. O segundo grupo foi intitulado “Teste”, o qual teve como finalidade a confecção de um mapa de referência, cujo propósito foi a verificação da acurácia destes testes metodológicos. A partir das máscaras de cultivo destinadas à metodologia, o trabalho teve duas abordagens, a primeira delas trata da extração de perfis espectro-temporais e, a segunda, dos cálculos da distância de Bhattacharyya existente entre os alvos de soja e de arroz.

3.2.4 Processamento de imagens Terra/MODIS

O processamento digital de imagens e os procedimentos de geoprocessamento foram conduzidos nos programas computacionais ENVI 5.0 + IDL® (*Exelis Visual Information Solutions, Boulder, Colorado*), ArcGIS® 10.2 e MATLAB® (*MATrixLABoratory*).

O estudo compreendeu as safras de primavera/verão de 2000/2001, 2002/2003, 2005/2006, 2008/2009, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015. Foram utilizadas 828 imagens MODIS, correspondentes aos *tiles* h13v11 e 12. Trata-se de imagens compostas de 16 dias e fornecidas após processo de correções em nível 5. Esse conjunto de imagens foi disponibilizado sem custos, em projeção sinusoidal.

Para cada safra estudada foram utilizadas 23 datas de imagens correspondentes ao intervalo de tempo entre 25 de maio de um ao dia 9 de maio do ano seguinte, completando o ciclo de um ano agrícola.

Foram analisados os produtos de reflectância nas bandas do Azul, Vermelho, Infravermelho próximo e Infravermelho médio, e os índices de vegetação EVI e NDVI, todos obtidos do produto MOD 13Q1.

Em um primeiro momento, as imagens de reflectância e dos índices de vegetação foram mosaicadas e empilhadas em séries temporais. Em uma etapa subsequente, estas séries foram reprojctadas de forma análoga às imagens *Landsat*, em projeção Albers e DATUM WGS84.

3.2.5 Caracterização dos perfis espectro-temporais

Os perfis espectro-temporais das lavouras de soja e de arroz foram construídos a partir da extração dos valores das diferentes bandas e índices de vegetação (EVI e NDVI), viabilizando a compreensão da dinâmica dos alvos, soja e arroz, ao longo do tempo. Também, os perfis foram utilizados para subsidiar a seleção das imagens a ser utilizadas para a confecção das máscaras de cultivo.

Para a realização desta etapa, primeiramente, o conjunto de polígonos destinados a metodologia foi dividido em subconjuntos correspondendo às regiões ecoclimáticas, possibilitando, assim, a obtenção de informações regionalizadas. Os pontos obtidos na safra de 2013/2014 cobriram as regiões Litoral e Grandes Lagoas. Os pontos coletados na safra 2014/2015 contemplaram as regiões Depressão Central, Baixo Vale do Uruguai, Campanha e Região das Grandes Lagoas.

Foram utilizadas nesta etapa, portanto, duas séries temporais de imagens MODIS, uma foi referente a safra 2013/2014 e outra relativa a safra 2014/2015. Os polígonos do subgrupo de vetores “Metodologia” foram associados às imagens MODIS e construídas as séries temporais de imagens de reflectância do Azul, do Vermelho, do Infravermelho Próximo, do Infravermelho Médio e dos índices EVI e NDVI. Finalmente, os valores médios dos pixels pertencentes a área dos polígonos, por região ecoclimática, foram plotados frente ao tempo, constituindo os perfis espectro-temporais.

Para evitar o efeito de contaminação de borda, foram considerados estritamente os polígonos com número de pixels superior a cinco.

3.2.6 Geração das máscaras de cultivo

A metodologia selecionada para a confecção das máscaras de cultivo neste estudo foi a proposta por Araujo (2010), cujo intuito é através do conhecimento do ciclo fenológico de uma ou mais culturas agrícolas, destacar as áreas onde estas ocorrem, corroborando com o processo de classificação digital. Para tanto, as séries temporais de EVI foram organizadas por ano agrícola (FIGUEIREDO et. al, 2016).

Em um primeiro momento, a análise do perfil de EVI ao longo da safra possibilitou entender o padrão espectral das lavouras de soja e de arroz irrigado ao longo do tempo.

Em seguida, foram selecionadas as datas das imagens em que as feições destas culturas responderam a momentos de maior e menor vigor vegetativo. As datas em que as culturas apresentaram os melhores atributos para a confecção da imagem de máximo correspondeu ao intervalo de tempo entre 1 de janeiro a 6 de março. Na lógica inversa, observou-se o período em que as culturas apresentaram menor resposta em termos de vigor vegetativo atendendo os critérios de seleção para a imagem de mínimo. Este período foi composto por imagens entre 14 de setembro a 19 de dezembro. Foram então realizadas operações de álgebra de bandas, confeccionando duas imagens, uma imagem de máximo e a outra de mínimo valor do EVI no período.

Através destas duas imagens, elaborou-se uma composição RGB, conforme ilustrado na Figura 12. A imagem de máximo foi associada ao canal vermelho, enquanto que a imagem de mínimo foi associada aos canais verde e azul.

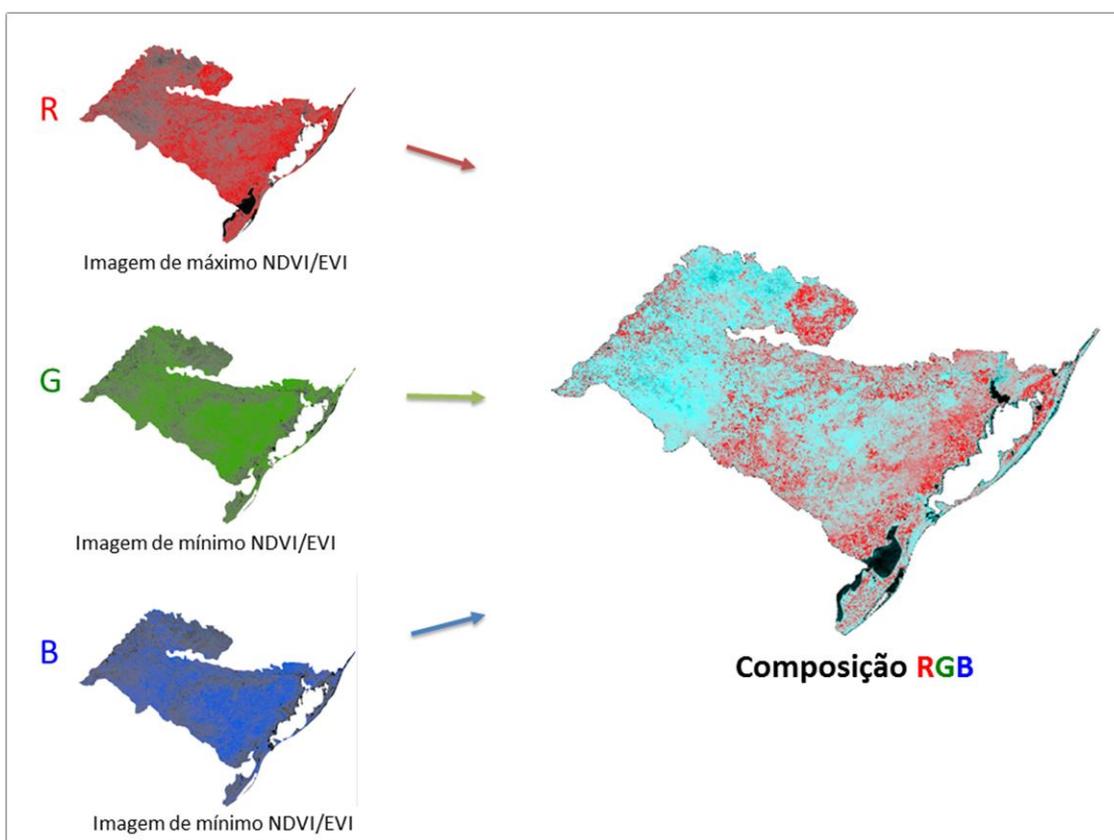


Figura 12. Ilustração do esquema de composição RGB de máximos e mínimos para a construção de máscaras de cultivo. Fonte: Elaborada pelo autor.

Na composição RGB gerada, as áreas ocupadas com culturas anuais, dada a alta variabilidade do EVI, aparecem associadas aos tons de vermelho, sequencialmente, foram coletadas regiões de treinamento e realizada uma classificação supervisionada pelo método paralelepípedo. As resultantes das classificações foram máscaras de cultivos de primavera-verão, principalmente arroz irrigado e soja, referentes as sete

safras: 2000/2001, 2002/2003, 2005/2006, 2008/2009, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015.

3.2.7 Distância de Bhattacharyya

A distância de Bhattacharyya, que calcula a separabilidade estatística entre um par de classes, foi selecionada buscando conferir objetividade ao processo de separabilidade dos alvos soja e arroz.

As rotinas para a realização deste método foram escritas em ambiente MatLab®. O teste foi realizado nas safras de 2013/2014 e 2014/2015 (disponibilidade de dados de campo), por região ecoclimática e foram utilizados os mesmos polígonos amostrais dos quais se extraiu os perfis espectro-temporais.

Salienta-se, novamente, que para a safra 2013/2014 foram testados os pixels de arroz e de soja pertencentes as regiões Litoral e Grandes Lagoas e para a safra 2014/2015 os das regiões Depressão Central, Baixo Vale do Uruguai, Campanha e Grandes Lagoas.

Foi calculada a distância de Bhattacharyya existente entre as respostas do conjunto de pixels de soja e arroz para todos dos dados disponíveis, ou seja, para as bandas do Azul, do Vermelho, do Infravermelho Próximo, do Infravermelho Médio e dos índices de vegetação EVI e NDVI, em todo o período que abrange o ano agrícola, de maio de um ano a abril do ano seguinte.

O produto desta etapa foi a definição dos indicadores espectrais, ou seja, datas e bandas e/ou índices cujas distâncias existentes entre as culturas da soja e do arroz, para cada região ecoclimática, possibilitam separar as culturas. Quanto maior a distância entre as classes em alguma feição específica, presume-se maior separabilidade.

3.2.8 Segmentação

Para esta etapa foram utilizadas as séries temporais das imagens MODIS das safras de 2000/2001, 2002/2003, 2005/2006, 2008/2009, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015.

A segmentação foi feita utilizando apenas os pixels contidos na máscara de cultivo para cada uma das sete safras selecionadas. Para as cinco regiões ecoclimáticas em que havia dados de campo foi utilizado o valor de distância de Bhattacharyya obtido. Foram utilizadas as duas imagens em que ocorrem as maiores amplitudes de distância Bhattacharyya, considerando estas as imagens que melhor ilustram os momentos em que as culturas de soja e de arroz apresentam maiores desigualdades.

As regiões ecoclimáticas em que não havia disponibilidade de áreas de campo para a determinação das distâncias, não foram segmentadas.

No ambiente MatLab®, foram escritos os algoritmos para cada uma destas regiões onde foram coletados pontos (Depressão Central, Baixo Vale do Uruguai, Campanha e Grandes Lagoas). Então foram segmentadas, separadamente, por região ecoclimática através do método de crescimento de regiões, utilizou-se como limiar de similaridade 15 e atribuído como cinco pixels o tamanho mínimo para os polígonos. Por

fim, as imagens de cada ano agrícola foram reagrupadas, desta vez considerando as duas imagens segmentadas em cada região ecoclimática.

3.2.9 Árvore de decisão

Após a obtenção das séries temporais compostas por imagens segmentadas cada um dos conjuntos compostos pelas 23 imagens de EVI e de NDVI, foi submetido a classificação por árvore de decisão. Para a realização desta classificação, foram utilizados, para cada região, o conjunto de amostras de treinamento obtidas em campo. Com base nesse conjunto, árvore foi treinada primeiramente nas imagens da safra 2014/2015.

Para a realização deste processo utilizou-se o algoritmo C4.5 – J48, através da função *classregtree* do software MatLab. Esta abordagem trabalha de forma a dividir aleatoriamente pontos chamados de folhas e então, com base no conjunto de dados de treinamento as regiões são agrupadas, ou não, a estas folhas.

Após o treinamento da árvore com os pontos conhecidos da safra 2014/2015, o processo foi generalizado para as demais safras estudadas.

3.2.10 Modelo HAND

O modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) desenvolvido por Rennó et al. (2008) é um descritor de terreno capaz de discriminar as áreas de várzea. O modelo utiliza para tanto, dados topográficos na forma de modelos digitais de elevação e determina a distância vertical à drenagem mais próxima (Figura 13).

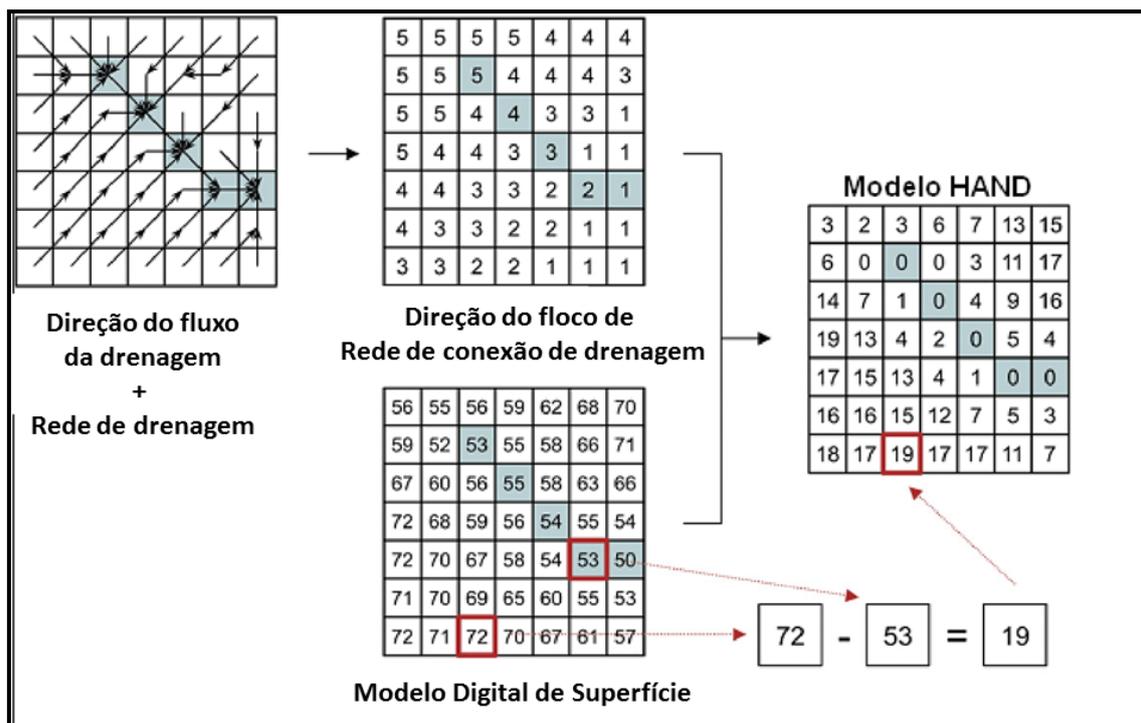


Figura 13. Direção de fluxo de drenagem

Elaborada pelo autor, adaptado de Rennó et al., (2008)

Neste trabalho, foi utilizado o modelo HAND, explorado por Mengue (2013) para o estado do Rio Grande do Sul, como ferramenta de identificação se o avanço da cultura da soja no território do bioma Pampa está ocorrendo nas áreas de várzea e, portanto, sobre as áreas tradicionalmente destinadas à cultura do arroz irrigado, ou sobre os campos do Bioma.

Os dados resultantes do modelo HAND foram relacionados com os pixels classificados como arroz e como soja pela árvore de decisão em todas as sete safras avaliadas.

Para a realização desta etapa, primeiramente, cada pixel da área de estudo foi convertido para um ponto, então foram extraídos os valores nas safras 2000/2001, 2002/2003, 2005/2006, 2008/2009, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015. Em seguida foi gerado um mosaico composto cada um dos 862.638 pixels que em alguma destas safras foi classificado, como soja (1) ou como arroz (2). Em seguida, por safra e por cultura, os pixels foram associados ao valor de metros em relação à drenagem mais próxima, obtidos pelo modelo HAND.

Os valores identificados pelo modelo HAND foram distribuídos em dez intervalos de distâncias em relação à drenagem mais próxima espaçados de 10 em 10 metros, assumido como valor máximo a distância de 100 metros. Logo, foi construída uma tabela onde se verificou em cada safra o valor total de pixels em cada classe. Numa próxima etapa, foram verificados os percentuais que estes representavam sobre o valor total de pixels classificados por cultura em cada ano. Foi avaliada a distribuição dos pixels ao longo do bioma Pampa, obtidos através destas cinco regiões ecoclimáticas avaliadas e em cada uma destas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Área de cultivo da soja segundo os dados oficiais

A Figura 14 ilustra a evolução da área plantada com lavouras de soja e de arroz de 2000 a 2013, por região ecoclimática. Ao longo dos 14 anos analisados é possível observar incrementos nas áreas de cultivo em todas as regiões ecoclimáticas.

Nas safras de 2003, 2004 e 2005 houve incremento, seguido por redução na área de cultivo nas safras seguintes, de 2006 e 2007. As regiões que apresentaram maior redução de área plantada foram, principalmente, a Campanha e o Baixo Vale do Uruguai. No período entre 2007 a 2011, em geral, as áreas tenderam a se manter, relativamente, estáveis até 2012, quando se observa um incremento significativo.

A Depressão Central foi a região que apresentou maior acréscimo em área plantada no período avaliado, seguida pela região da Campanha. Estas duas regiões tiveram incrementos de 409.589 e 301.807 ha, respectivamente. As regiões ecoclimáticas que apresentaram menores acréscimos foram a Encosta Inferior da Serra do Nordeste e o Litoral, cujo crescimento foi inferior a 40 mil ha.

Existe uma relação direta entre estes dados de incrementos e o tamanho que cada região ecoclimática possui, ou seja, as quatro regiões mencionadas representarem as duas maiores e as duas menores regiões ecoclimáticas em termos territoriais.

Quando considerada a área plantada em relação a área territorial de cada região ecoclimática, pode se verificar que as regiões do Planalto Médio e Missioneira, foram as que apresentaram os maiores acréscimos em proporção aos territórios. Estas duas regiões estão situadas na tradicional zona produtora de soja no Rio Grande do Sul. A região do Planalto Médio, onde no ano 2000 foram plantados, aproximadamente 322 mil ha, o que equivale a 33% do seu território, em 2013, teve uma área de 511 mil ha plantadas, representando um acréscimo de 19%. Dada a magnitude destes valores, nestas regiões a área plantada com arroz, se existir, é próxima a zero.

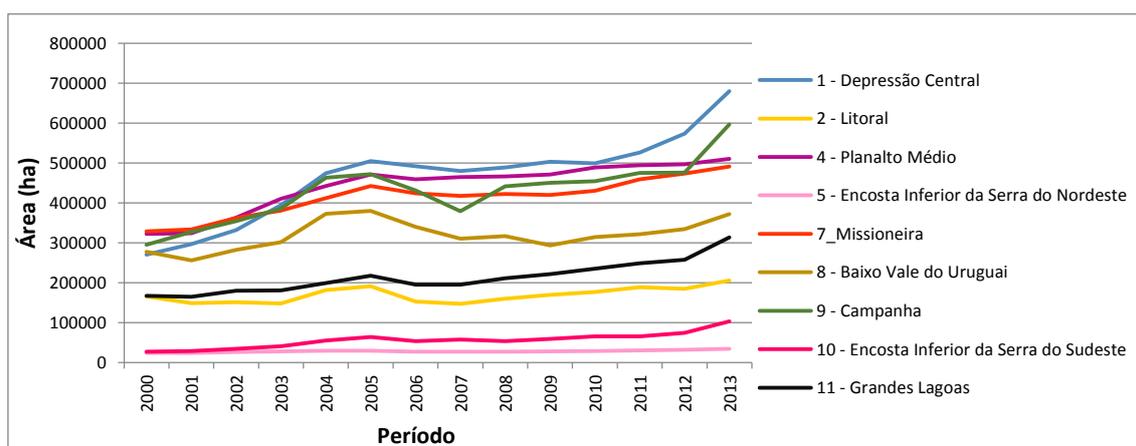


Figura 14. Evolução das áreas plantadas com as culturas temporárias de primavera-verão, soja e arroz no bioma Pampa, no período entre 2000 a 2013, por região ecoclimática no Rio Grande do Sul. Fonte: Elaborada pelo autor.

As Figuras 15, 16 e 17 ilustram a distribuição espacial das áreas plantadas com soja no período de 2000 e 2013, onde os tons mais quentes foram associados às áreas com maiores valores de área plantada e em tons mais frios às áreas com menores valores.

Em 2000 as regiões Missioneira e Planalto Médio foram as duas regiões com maior área de cultivo de soja, acima de 300 mil hectares, respondendo por mais de 20% da área de cultivo no bioma Pampa. A região da Campanha, dada a grande área territorial, apesar de produzir mais de 30 mil hectares, foi a que, percentualmente, apresentou menor contribuição em área de cultivo, menos de 1%. A região do Litoral, Grande Lagoas e Encosta Inferior da Serra do Nordeste as áreas de soja foram muito pequenas.

Em 2013 pode-se observar uma importante expansão de área de cultivo (Figura 16), sendo nesta safra cultivadas áreas superiores a 300 mil hectares nas regiões Missioneira, Planalto Médio, Depressão Central e Campanha. Somente a região do Litoral permaneceu com área inferior a 20 mil hectares.

No período analisado as regiões que tiveram maiores crescimentos das áreas plantadas com soja (Figura 14) foram a Depressão Central, Campanha e Planalto Médio. Na Depressão Central e Campanha os acréscimos foram de 388.221 ha e 238.373 ha, respectivamente. Quando considerado o percentual das áreas (Figura 17 à direita) as regiões Planalto Médio e Missioneira, foram as regiões que apresentaram os maiores crescimentos, enquanto que as regiões Litoral e Encosta Inferior da Serra do Nordeste foram as regiões que tiveram menores expansões em área plantada com soja tanto em valores brutos quando em valores percentuais.

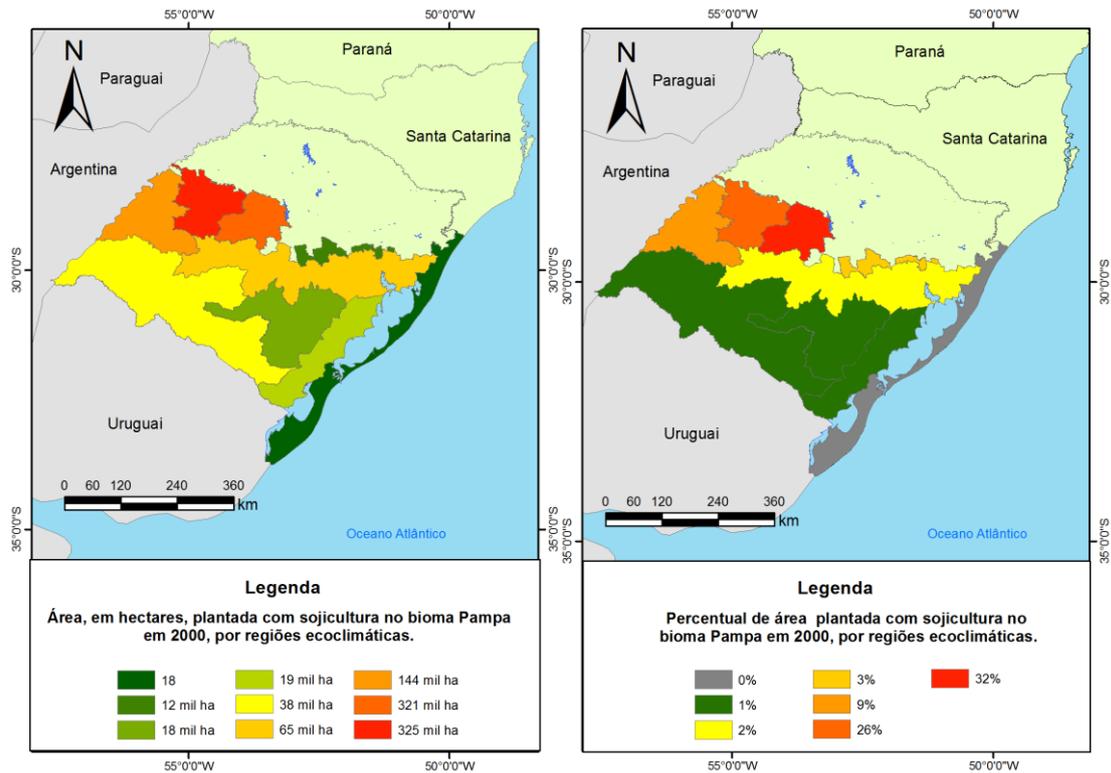


Figura 15. Área, em hectares, plantada com sojicultura no bioma Pampa, em 2000 (à esquerda) e sua respectiva porcentagem (à direita), por região ecoclimática. Fonte: Elaborada pelo autor.

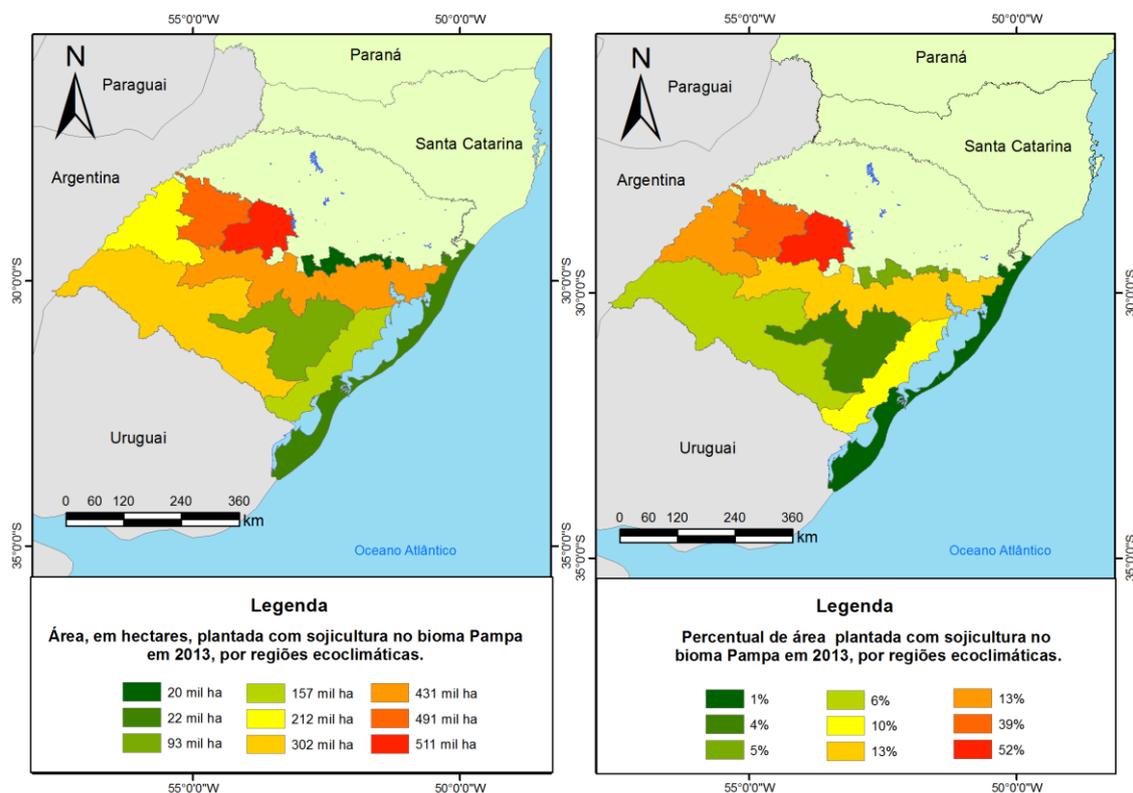


Figura 16. Área, em hectares, plantada com sojicultura no bioma Pampa, em 2013 (à esquerda) e sua respectiva porcentagem (à direita), por região ecoclimática. Fonte: Elaborada pelo autor.

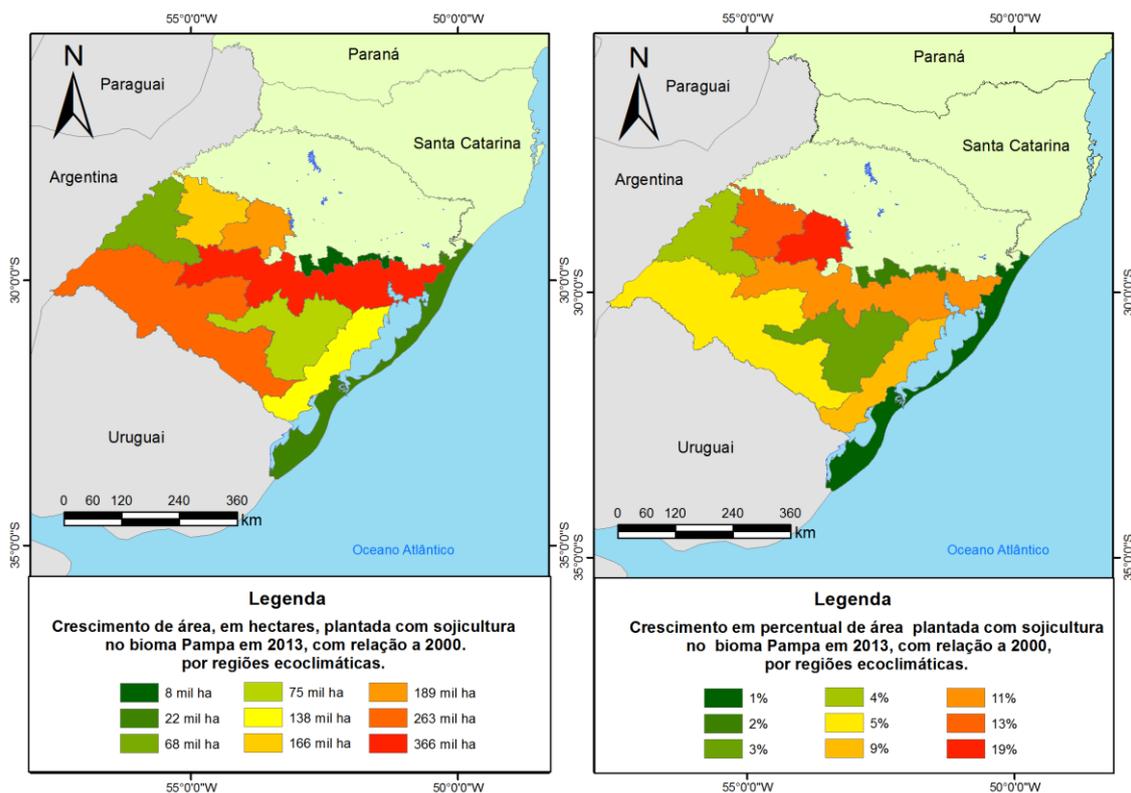


Figura 17. Crescimento (à esquerda) e crescimento percentual (à direita) da área plantada com soja cultura no bioma Pampa em 2013, em relação a 2000, por região ecoclimática. Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Máscaras de cultivo de primavera-verão

As Figuras 18, 19, 20, 21, 22, 23 e 24 ilustram, respectivamente, as máscaras de cultivo com culturas temporárias de primavera-verão nas safras 2000/2001, 2002/2003, 2005/2006, 2008/2009, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015, oriundas de classificação digital. Observa-se um crescente e contínuo incremento de áreas de cultivo no período, assim como, pode-se verificar que a distribuição das áreas mostra consistência em termos de localização no território.

Para efeitos de comparação, foram considerados como referência os dados oficiais do IBGE (Tabela 5), onde foram somados os valores de área plantada com soja e com arroz, nos municípios pertencentes ao bioma Pampa. É sabido que, além destas duas culturas, outras também ocorrem na área de estudo, como, por exemplo, o milho, mas em escala bastante inferior. Esta informação foi confirmada por intermédio dos dados oficiais (KLERING et al., 2012; PINTO & FONTANA, 2011; CORDEIRO et al., 2016) e também, através das duas saídas de campo. De forma geral, ambos, IBGE e MODIS, mostraram um incremento contínuo da área cultivada ao longo do período analisado. Também, é possível perceber que a área mapeada como de lavouras segue um padrão de distribuição no bioma Pampa similar em todas as safras.

Em comparação com os dados oficiais, o erro médio das classificações foi de 6,29%, variando de 1 a 13 %. Em todos os anos estudados as áreas classificadas tenderam a superestimar os dados oficiais do IBGE.

Em 2000/01 as regiões classificadas como cultura de primavera/verão totalizaram uma área de 1.904.944 ha, acusando a menor área e o menor desvio da classificação na série analisada, aproximadamente 1%, em comparação com dados oficiais do IBGE, o que equivale a uma superestimação comissão de 26.203 ha.

Na safra de 2002/2003 houve um acréscimo em área plantada de 19% em dois anos, atingindo 2.274.888 ha. Se comparado aos dados oficiais dos IBGE, a metodologia proposta superestimou em 9%, ou 187.790 ha.

Nas duas safras seguintes (2005/06 e 2008/09) a área de cultivo ultrapassou os 2.600.000 ha, representando um incremento próximo a 16% em relação a 2002/03, e também com baixos desvios em relação às estimativas do IBGE. Tal cenário foge da tendência que até então vinha sendo desenhada, com crescimentos superiores a 15%. Entre diversos fatores que podem estar associados à causa desta estabilização, pode-se considerar o fenômeno de déficit hídrico ocorrido no estado do Rio Grande do Sul, em 2004/2005, causando enormes perdas aos agricultores (EMATER, 2012).

A partir de 2012/2013, pela metodologia proposta verifica-se um acréscimo para uma área de cultivo superior a 3.300.000 ha. Nesta safra, foram totalizados 3.324.075 ha, o que equivale a 26 % de aumento. Mas comparado com os dados oficiais do IBGE, isto acusa o maior desvio (14%).

Na safra 2013/2014 houve, novamente, incremento na área cultivada, ocupando uma área de 3.622.713 ha com lavouras temporárias de primavera-verão. Este resultado, quando comparado com os dados oficiais, corresponde uma diferença inferior a 10%, superestimando, em 313.734 ha a área classificada.

Na última safra analisada (2014/15) não foi possível a comparação com dados IBGE, pois os mesmos não estavam ainda disponíveis.

Tendo como base somente os dados das máscaras de cultivo geradas, verifica-se um incremento de 1.760.225 ha em área plantada, o que equivale a 92%, em relação ao ano 2000.

Tabela 5. Área oficial (IBGE, 2014) e áreas obtidas com a metodologia proposta dos principais cultivos de primavera-verão nos municípios gaúchos pertencentes ao bioma Pampa para o ano-safra 2000/2001, 2002/2003, 2005/2006, 2008/2009, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015.

Variáveis	Safra						
	2000/2001	2002/2003	2005/2006	2008/2009	2012/2013	2013/2014	2014/2015
Área Oficial IBGE (ha)	1.878.741	2.087.098	2.575.162	2.588.414	2.903.125	3.308.979	
Área classificação MODIS (ha)	1.904.944	2.274.888	2.628.963	2.643.806	3.324.075	3.622.713	3.665.169
Diferença (MODIS-IBGE) (ha)	26.203	187.790	53.801	55.392	420.950	313.734	
Diferença (%)	1,3	9,0	2,0	2,1	14,5	8,6	

Fonte: Elaborada pelo autor.

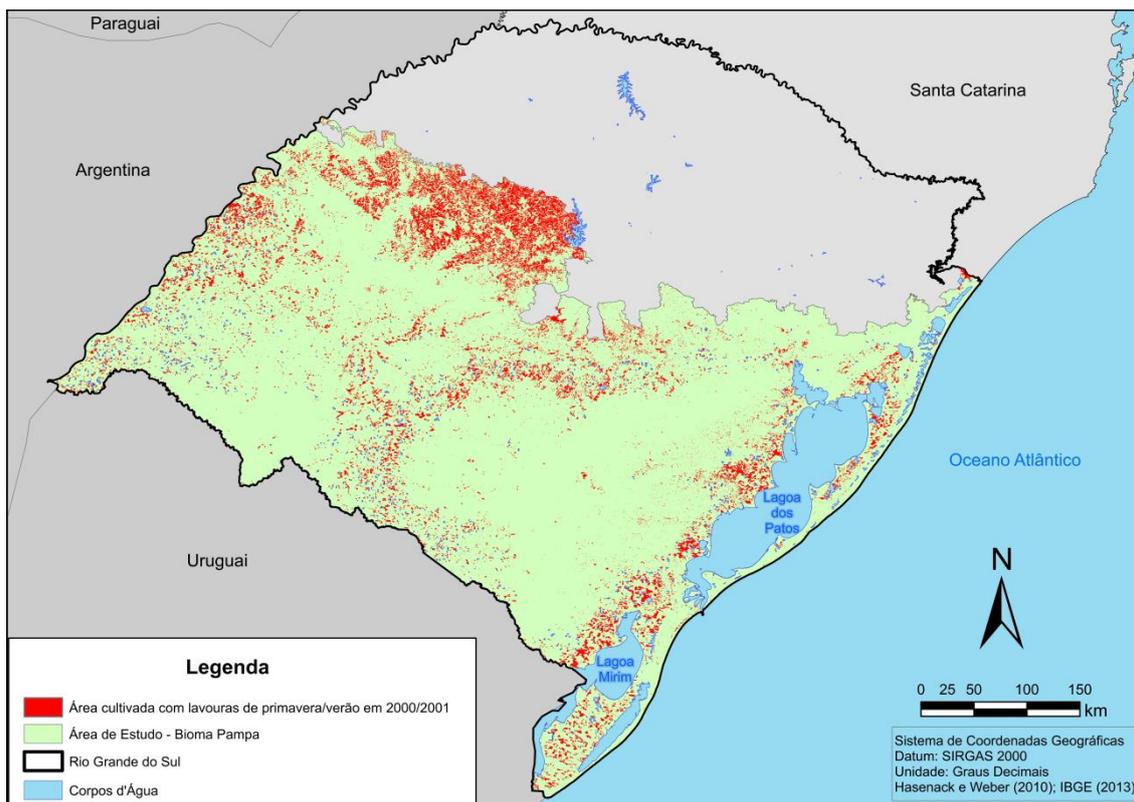


Figura 18. Área cultivada com lavouras de primavera-verão em 2000/2001. Fonte: Elaborada pelo autor.

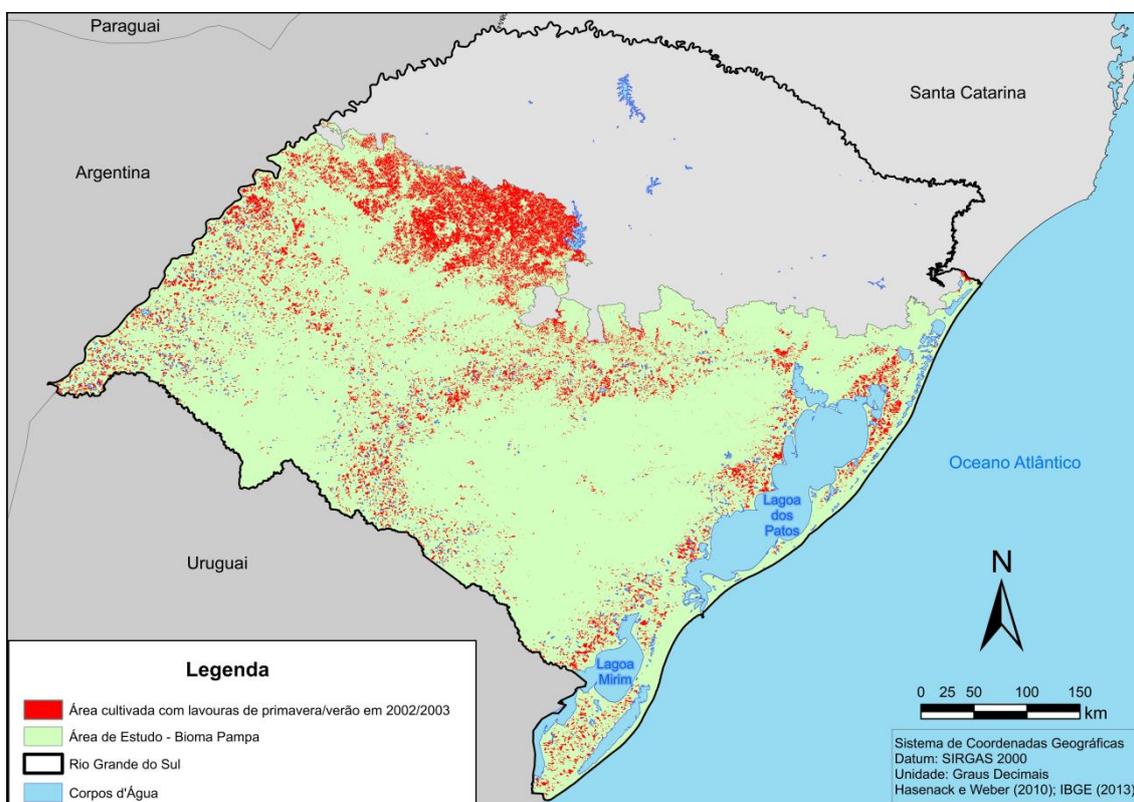


Figura 19. Área cultivada com lavouras de primavera-verão em 2002/2003. Fonte: Elaborada pelo autor.

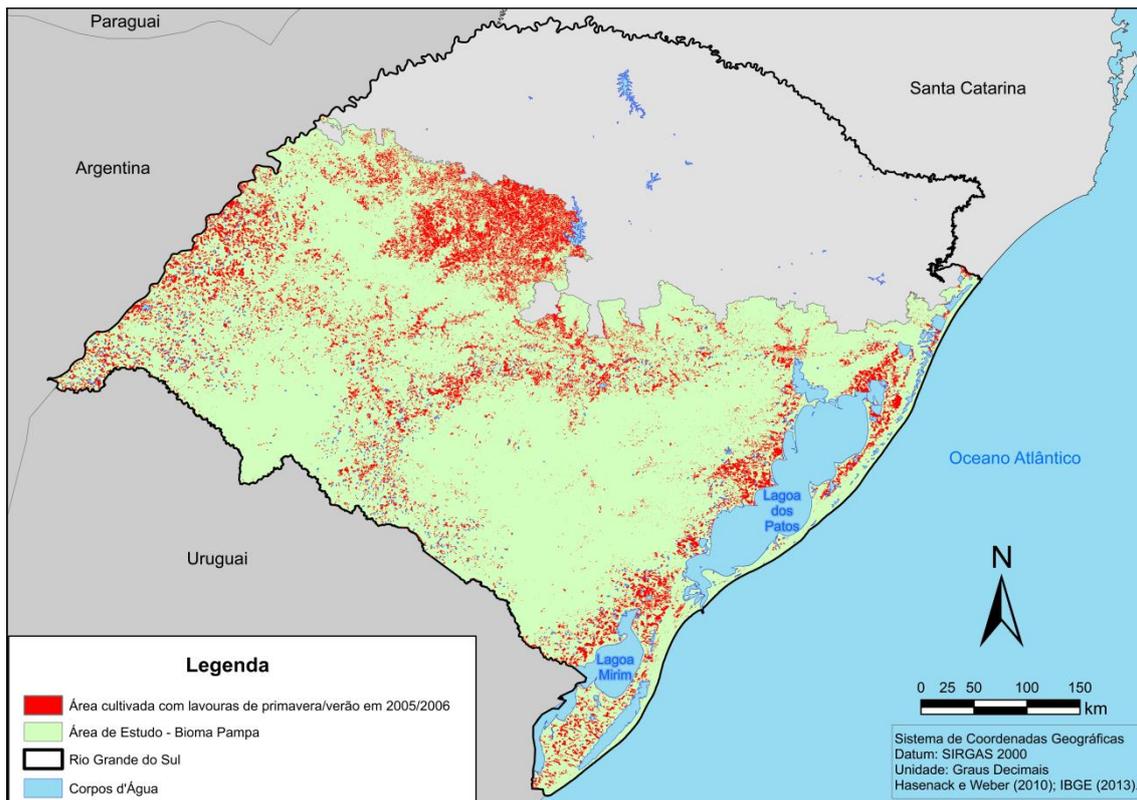


Figura 20. Área cultivada com lavouras de primavera-verão em 2005/2006. Fonte: Elaborada pelo autor.

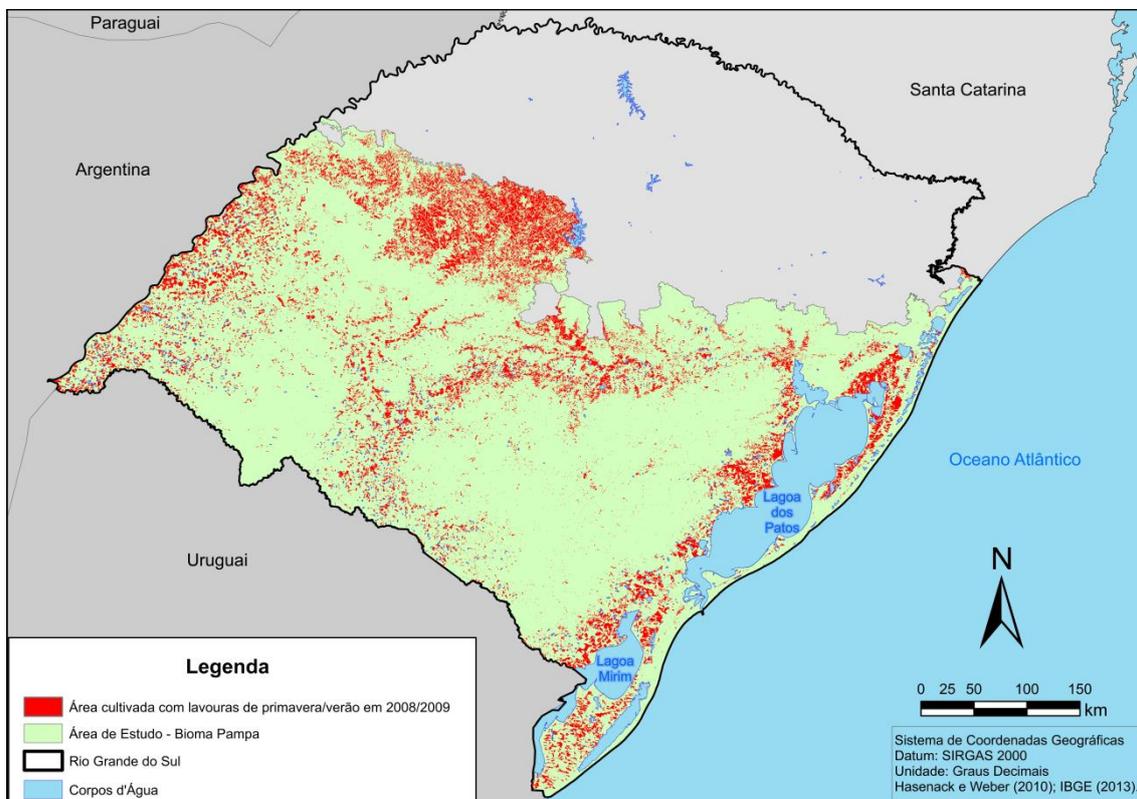


Figura 21. Área cultivada com lavouras de primavera-verão em 2008/2009. Fonte: Elaborada pelo autor.

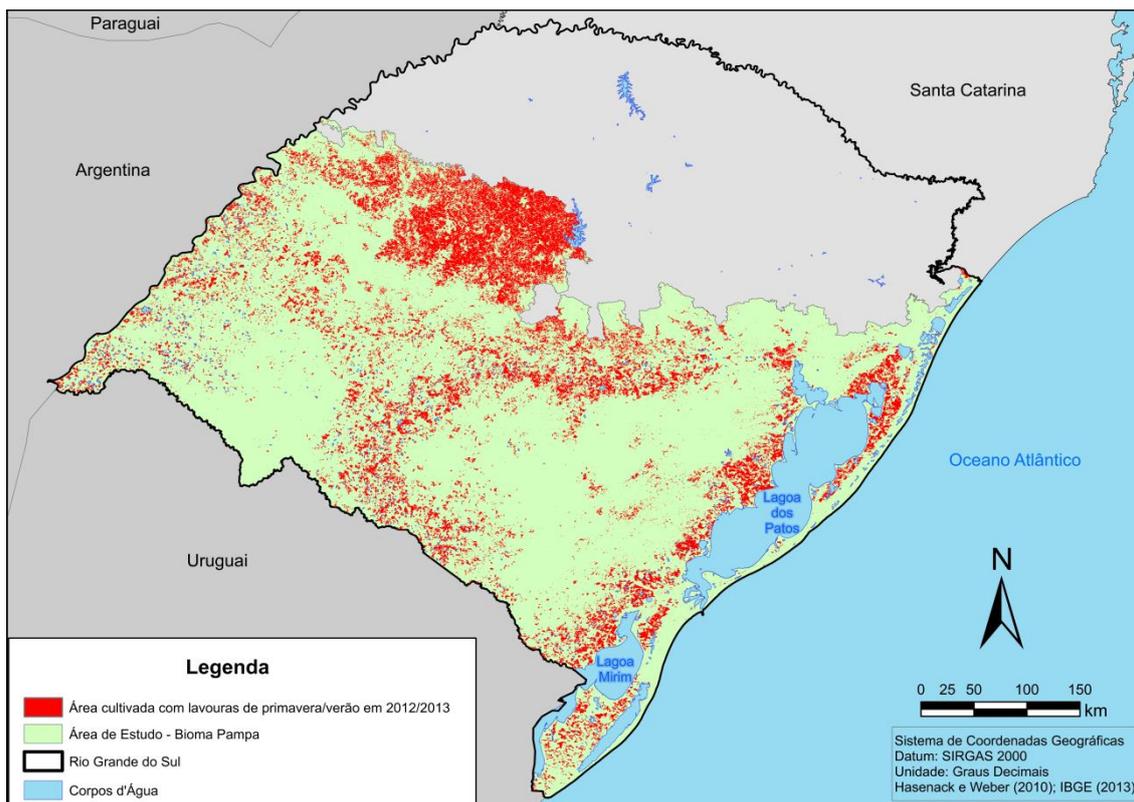


Figura 22. Área cultivada com lavouras de primavera-verão em 2012/2013. Fonte: Elaborada pelo autor.

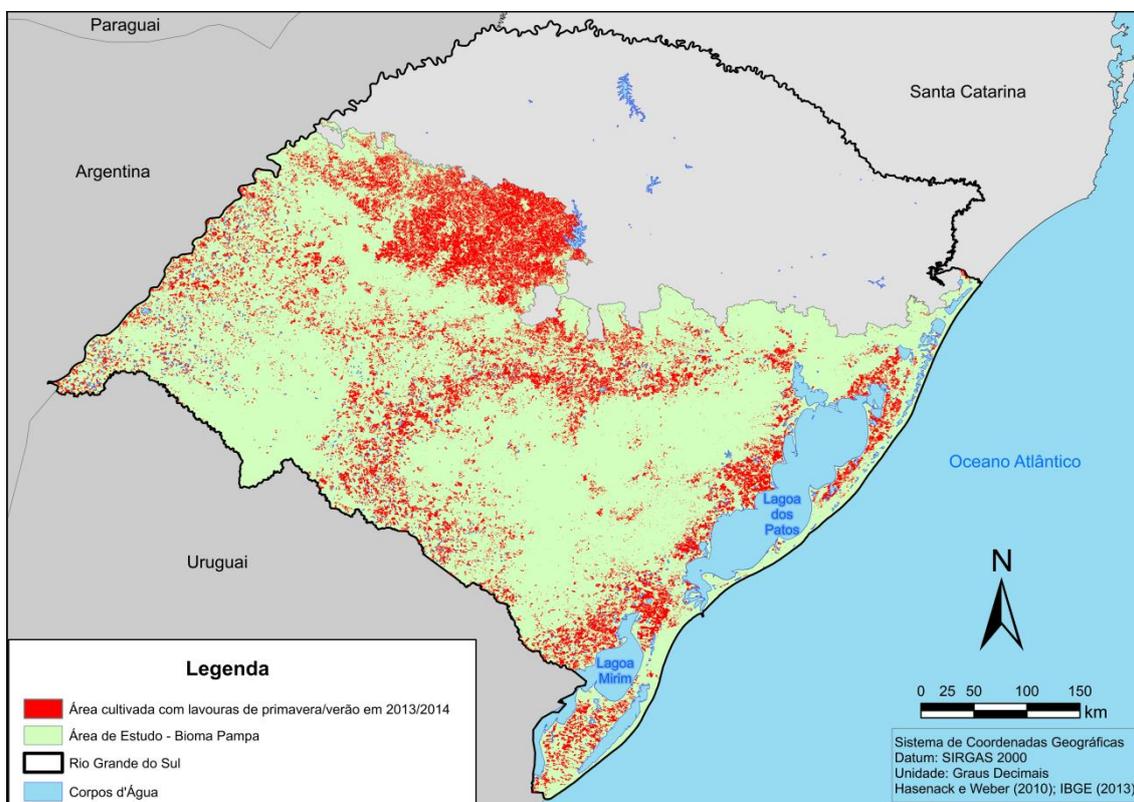


Figura 23. Área cultivada com lavouras de primavera-verão em 2013/2014. Fonte: Elaborada pelo autor.

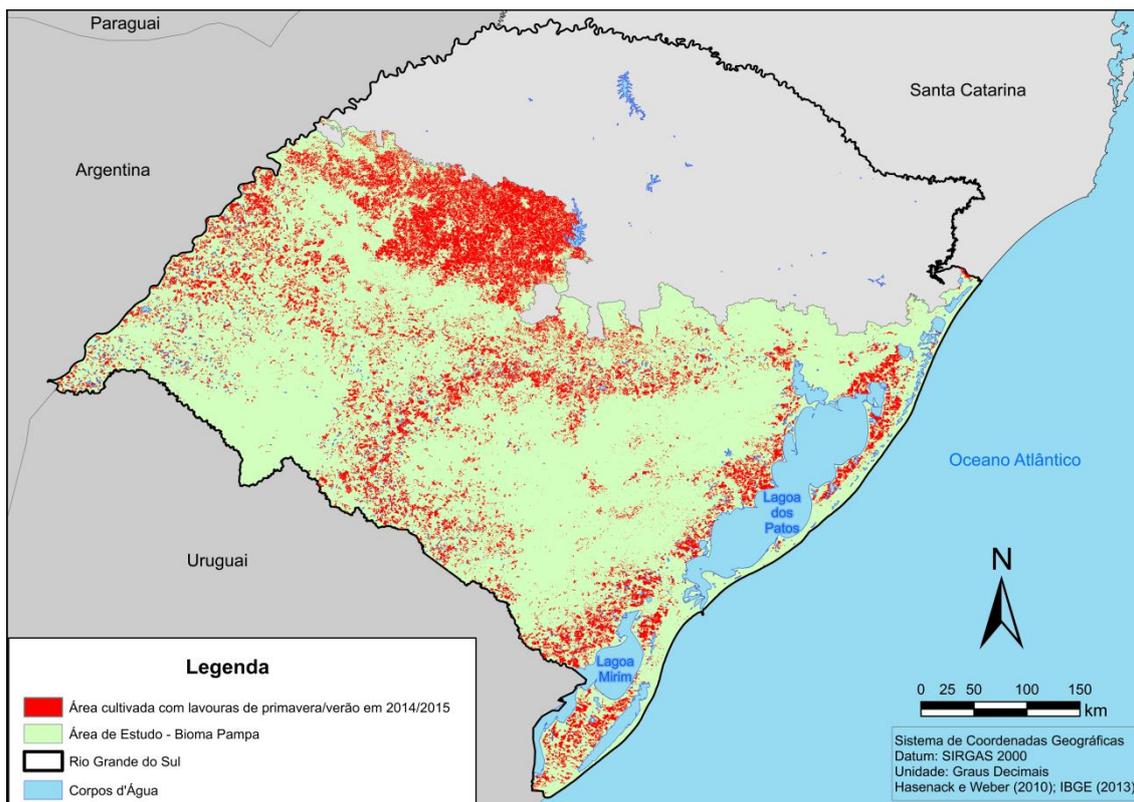


Figura 24. Área cultivada com lavouras de primavera-verão em 2014/2015. Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Diferenciação das culturas da soja e arroz irrigado baseado no atributo espectro-temporal

4.3.1 Padrão espectro-temporal das culturas da soja e arroz no sul do estado do Rio Grande do Sul

O processo de interpretação visual, realizado durante a fase de vetorização dos pontos dos campos, permitiu uma primeira percepção de que, em comparação com as lavouras de soja, as lavouras de arroz tendem a ocorrer em regiões consolidadas e requerem maior sistematização do solo. Esta leitura pode ser feita observando nas imagens que os talhões cultivados com arroz exibem formas lineares, com limites bem estabelecidos.

Quando é avaliada a resposta espectral das culturas ao longo do tempo em que se dá o ciclo de primavera-verão (Figura 25, 26 e 27), é possível observar o incremento na refletância na banda do infravermelho e nos índices EVI e NDVI a partir de início de novembro, associado ao estabelecimento e crescimento das mesmas. Após atingir um máximo, os valores retornam ao padrão inicial, como consequência do final do ciclo e colheita. Este é o padrão típico de culturas anuais já verificado por outros estudos na região (KLERING et al., 2012; MENGUE et al., 2016).

Na cultura da soja, entretanto, verifica-se que o valor máximo é maior e um pouco mais tardio comparada a cultura do arroz. Um máximo maior é consequência da estrutura das plantas, em que é conhecida a maior reflectância no infravermelho próximo de leguminosas em comparação com gramíneas (PONZONI & SHIMABUKURO, 2009).

Diferença importante entre as duas culturas ocorre também no período que antecede à sementeira. Para a cultura do arroz, os índices EVI (Figura 26) e EVI (Figura 27) permanecem com valores baixos até o início da sementeira em outubro.

As áreas onde ocorrem as lavouras de soja, no entanto, tendem a exibir um padrão espectral diverso. Verifica-se a ocorrência de uma cultura antecessora, com um ciclo de menor vigor, típico dos cultivos de outono-inverno (JUNGES & FONTANA, 2011). As regiões ocupadas com soja também apresentaram morfologias mais livres, o que pode estar associado ao processo de expansão da área de cultivo na região. Cabe salientar, no entanto, que este padrão não é uma regra, pois é perceptível que existem áreas onde, preteritamente, ocorreram usos orizícolas e, atualmente, vem sendo ocupados com o plantio da soja.

No caso de culturas como a soja e o arroz, normalmente o período de mínimo valor do índice de vegetação está associado às suas fases de implantação e colheita, quando o solo tende a estar descoberto ou com vegetação seca e apresentar menores respostas associadas à vegetação.

Observa-se ainda que existe diferença no perfil médio do EVI entre as regiões ecoclimáticas do Rio Grande do Sul (Figura 28). Mas, o padrão temporal deste índice, em cada uma delas, é similar ao padrão médio do bioma para ambas culturas. Os perfis para cada uma das regiões ecoclimáticas analisadas encontra-se nos apêndices 1 a 9.

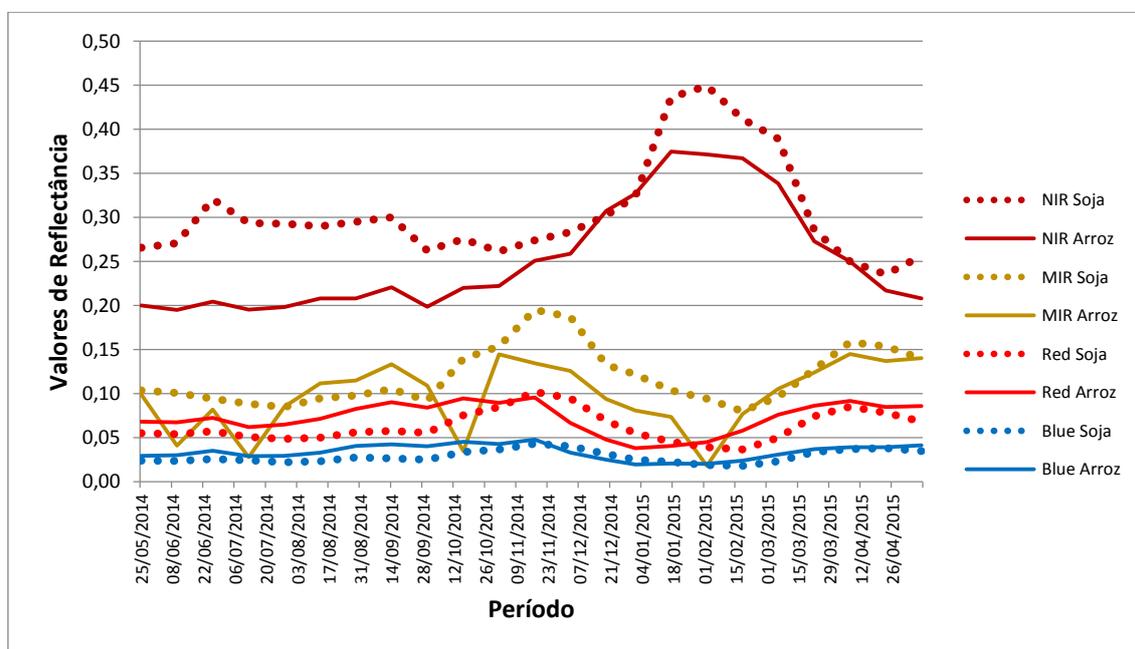


Figura 25. Perfil espectro-temporal nas bandas do infravermelho próximo (NIR), infravermelho médio (MIR), vermelho (Red) e azul (Blue) de lavouras de soja e de arroz no bioma Pampa no Rio Grande do Sul. Fonte: Elaborada pelo autor.

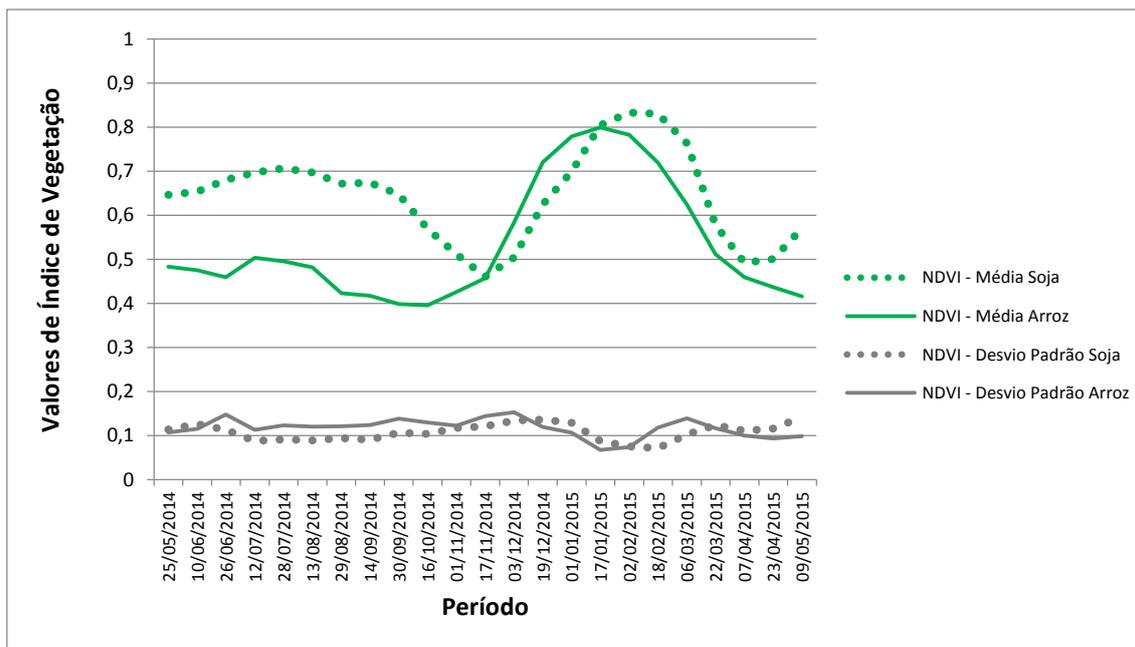


Figura 26. Perfil espectro-temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) de lavouras de soja e de arroz no bioma Pampa no Rio Grande do Sul. Fonte: Elaborada pelo autor.

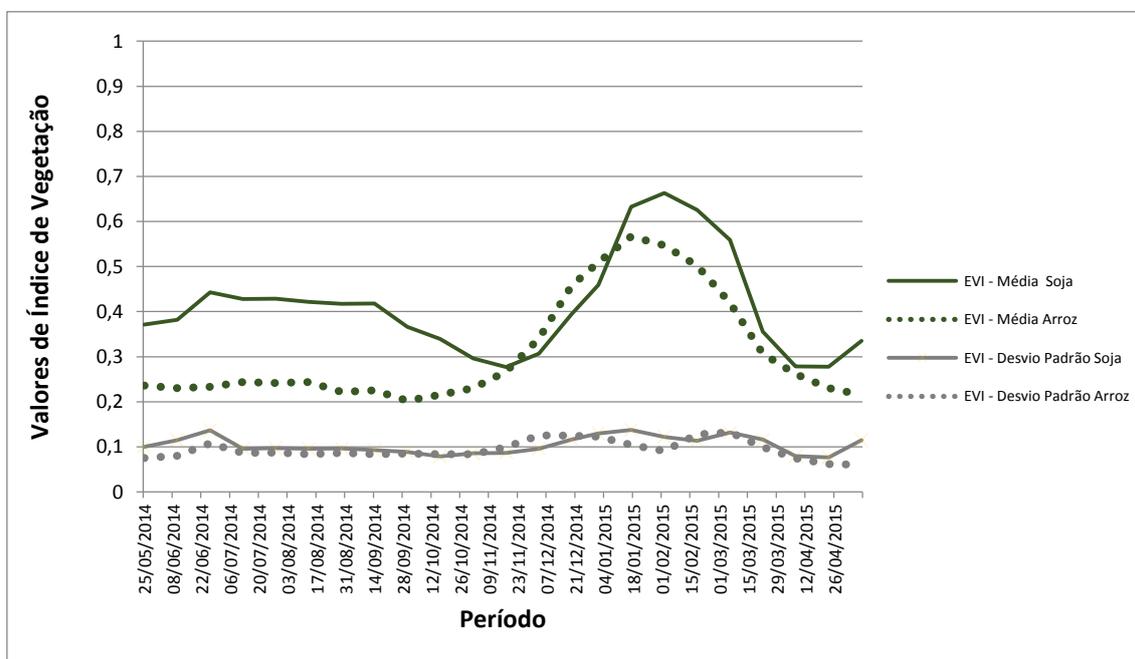


Figura 27. Perfil espectro-temporal do índice de vegetação realçado (EVI) de lavouras de soja e de arroz no bioma Pampa no Rio Grande do Sul. Fonte: Elaborada pelo autor.

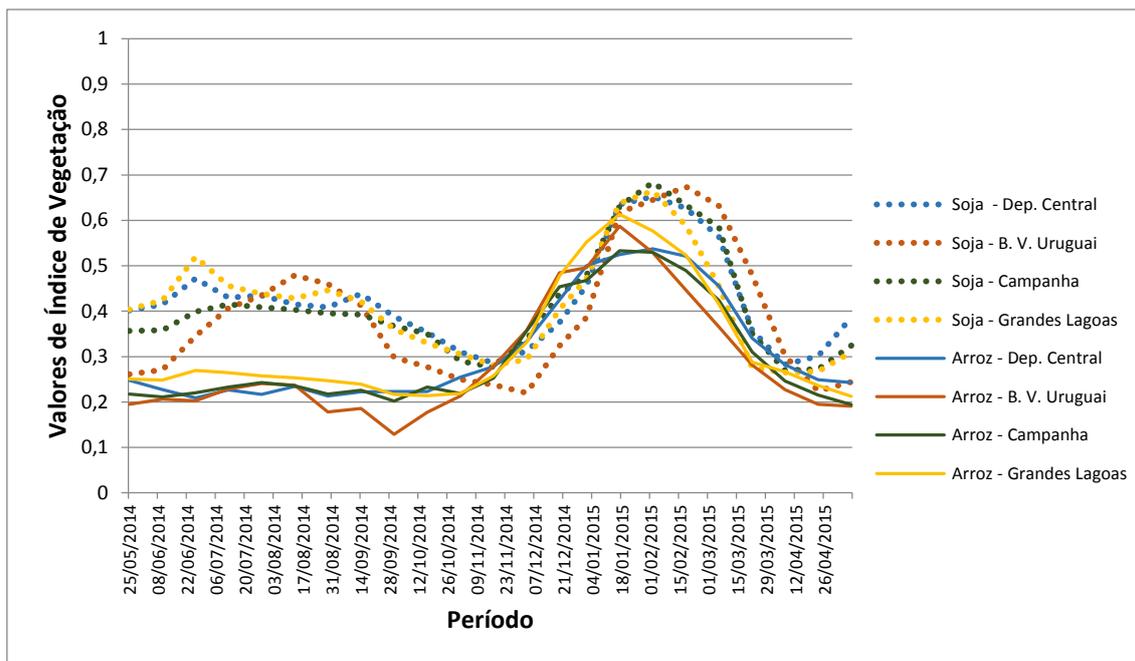


Figura 28. Perfil espectral-temporal do índice de vegetação realçado (EVI) de lavouras de soja e de arroz no bioma Pampa, por regiões ecoclimáticas do Rio Grande do Sul. Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.2 Segmentação

As Figuras 29 a 32 mostram as distâncias de Bhattacharyya encontradas para as bandas do Azul, Vermelho, Infravermelho Próximo, Infravermelho Médio e para os Índices de Vegetação EVI e NDVI ao longo do ano agrícola para as regiões ecoclimáticas da Depressão Central, Baixo Vale do Uruguai, Campanha e Grandes Lagoas.

A Figura 29 ilustra as maiores distâncias entre os alvos (soja e arroz) na região Depressão Central. Pode-se perceber que os maiores valores ocorrem no período que antecede o ciclo fenológico da soja através dos índices de vegetação e da imagem de refletância do infravermelho próximo. Os maiores valores são apresentados na imagem de EVI e correspondem ao mês de julho.

A região do Baixo Vale do Uruguai foi a que apresentou as maiores distâncias de Bhattacharyya. Nesta região, a maior separabilidade ocorre entre os meses de agosto e setembro usando as imagens do índice NDVI. Em dezembro e em março observa-se novamente períodos em que as distâncias são importantes (Figura 30).

A região da Campanha também apresentou altos valores de distâncias (Figura 31), sendo que o período com maior possibilidade de separação entre as culturas ocorreu principalmente no período anterior à implantação das culturas de primavera-verão, de junho até setembro. Com menores valores de distâncias, padrão similar foi observado para a região das Grandes Lagoas (Figura 32).

Em todas as regiões, a possibilidade de diferenciar as duas culturas é maior quando utilizados os índices de vegetação ou a banda do infravermelho próximo, se comparado ao uso das bandas do visível. Os dados obtidos nestas regiões ecoclimáticas estão em consonância com as impressões anteriormente verificadas quando da análise dos perfis espectro-temporais dos índices e bandas individuais, para a média da área cultivada em todo o bioma.

As distâncias de Bhattacharyya podem, portanto, ser utilizadas como um critério objetivo para a escolha das imagens de Índices de Vegetação EVI e NDVI ou bandas que melhor discriminam os alvos de soja e arroz nas áreas distribuídas ao longo do bioma Pampa. Verifica-se que os melhores momentos para separar as duas culturas ocorrem entre julho e setembro, visto que as maiores dissociações acontecem no período que antecede à safra.

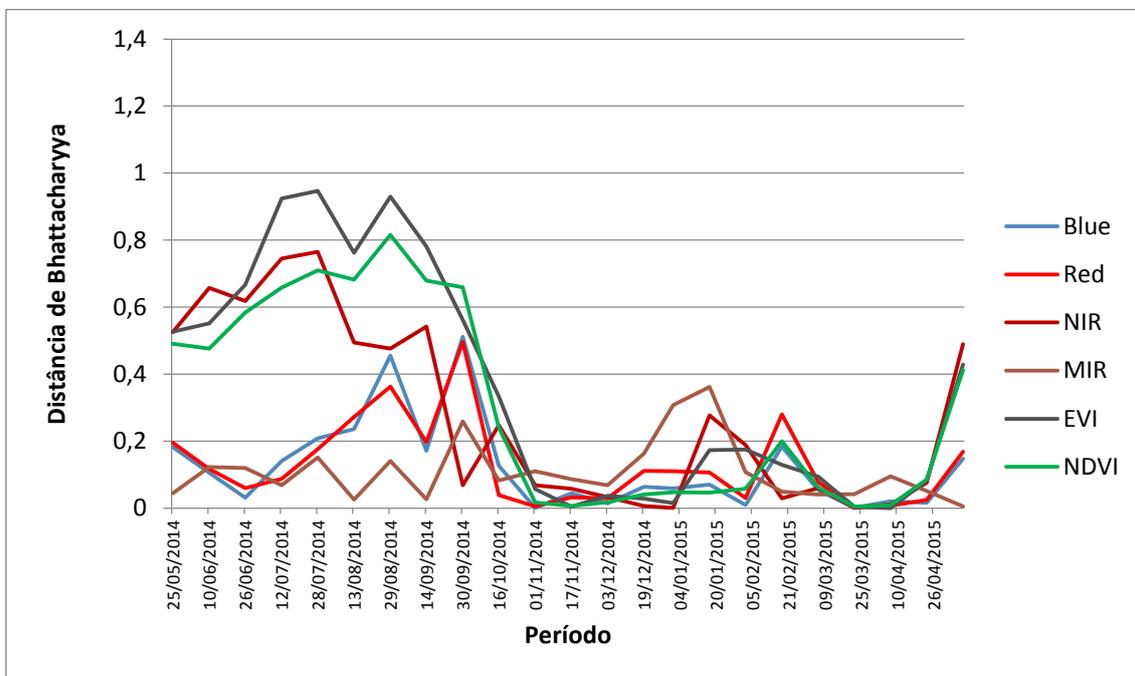


Figura 29. Distância de Bhattacharyya existente entre feições de soja e de arroz na safra de 2014/2015 na região ecoclimática da Depressão Central. Fonte: Elaborada pelo autor.

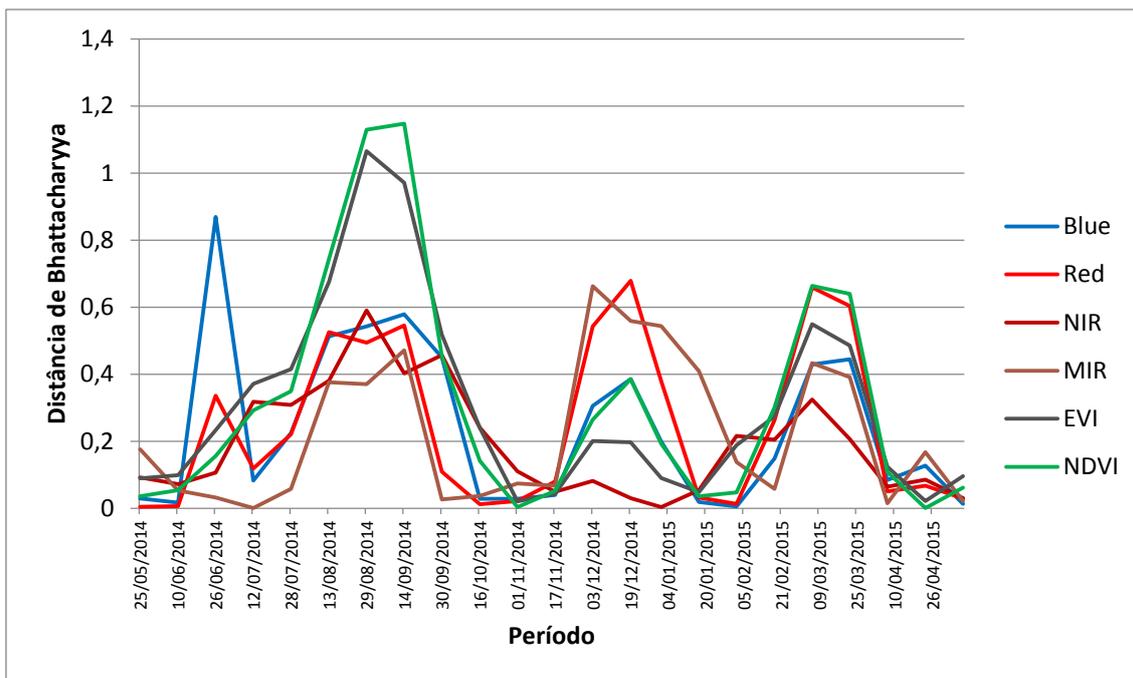


Figura 30. Distância de Bhattacharyya existente entre feições de soja e de arroz na safra de 2014/2015 na região ecoclimática do Baixo Vale do Uruguai. Fonte: Elaborada pelo autor.

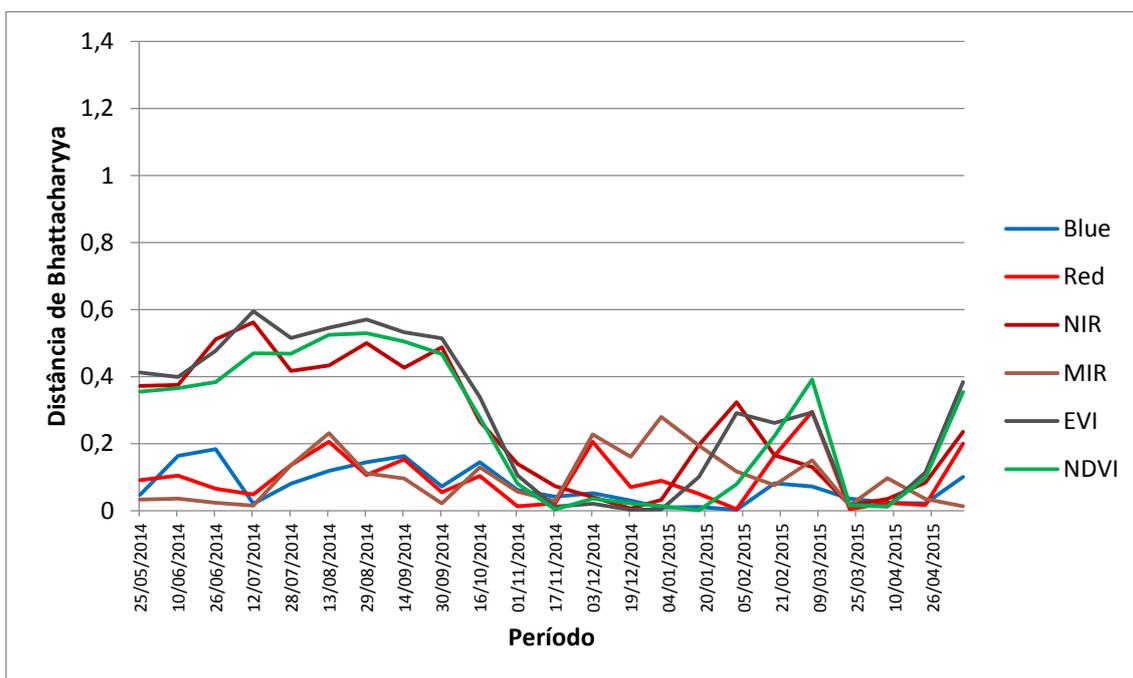


Figura 31. Distância de Bhattacharyya existente entre feições de soja e de arroz na safra de 2014/2015 na região ecoclimática da Campanha. Fonte: Elaborada pelo autor.

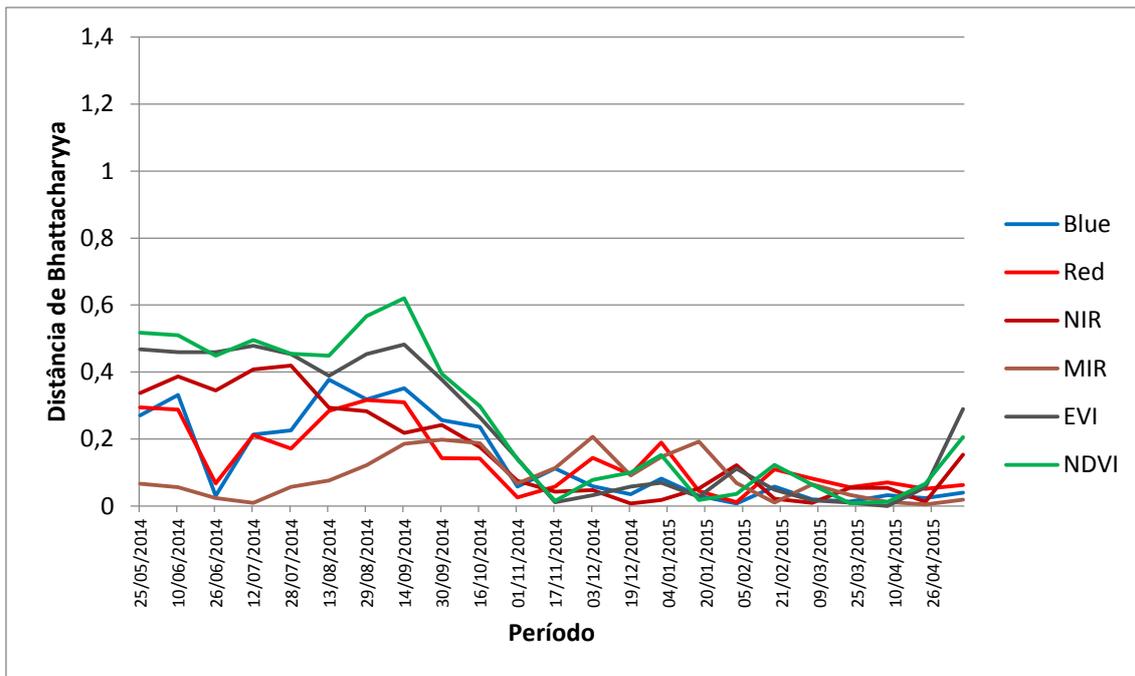


Figura 32. Distância de Bhattacharyya existente entre feições de soja e de arroz na safra de 2014/2015 na região ecoclimática das Grandes Lagoas. Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.3 Árvore de decisão

As Figuras 33 a 36 expõem as árvores de decisão geradas para cada uma das quatro regiões ecoclimáticas avaliadas. Os tons de verde escuro correspondem as imagens de EVI, enquanto que os tons de verde mais claro referem-se às imagens de NDVI.

Em todas elas se pode perceber que a raiz da árvore ocorre no período que antecede o início do ciclo, mais precisamente, entre os meses de julho a setembro, indicando que este é o principal período em que as culturas apresentam padrões distintos.

Na região da Depressão Central (Figura 33), além deste período, o algoritmo apontou imagens referentes ao mês de fevereiro, período em que a soja e o arroz apresentam grande acúmulo de biomassa, e também ao mês de abril, quando as culturas já se dirigem para a fase de colheita.

A Figura 34 mostra a árvore de decisão na região do Baixo Vale do Uruguai, podendo-se observar que a árvore concentra as informações mais relevantes entre os meses de março a setembro. Ao observar os segundos nós descendentes, percebe-se que ela logo requisita a imagem de março, quando a cultura ainda não foi colhida, mas a soja tende a apresentar valores de índice de vegetação superiores ao arroz, como pode ser observado na Figura 28.

A árvore de decisão da região da Campanha (Figura 35) foi a que apresentou valores mais diferenciados, quando comparada com as demais. Logo no primeiro nó descendente a árvore já requisitou as imagens de fevereiro e março, fugindo do padrão que vinha se estabelecendo até então. Quando observado o perfil espectro-temporal do arroz e da soja nesta região (Figura 28) percebe-se que a região é a que apresenta menores valores para a cultura do arroz e que o mesmo não ocorre com a soja.

A região das Grandes Lagoras (Figura 36) foi a única das quatro regiões cuja raiz da árvore foi iniciada com a imagem de NDVI e não com imagem de EVI. Sabe-se que os valores de NDVI tendem a ser mais altos, quando comparados aos de EVI, o que justifica o seu limiar também possuir valores na raiz acima dos valores nas raízes na demais regiões.

Fica evidente, portanto, que a tomada de decisão baseia-se preponderantemente no período que antecede o início do ciclo de primavera-verão, sendo requisitadas também as outras imagens apenas nas regiões mais extremas da árvore e que o critério utilizado nos nós descendentes da árvore variaram conforme as regiões ecoclimáticas. Os valores mais decisivos acusaram, aproximadamente, 3,0, em EVI e 5,5, em NDVI, ambos no período que antecede o início do ciclo, em concordância com a interpretação dos perfis espectro-temporais.

As raízes das árvores tenderam a começar nas imagens segmentadas, mas não necessariamente nas imagens que apresentavam os maiores valores numéricos de distância de Bhattacharya.

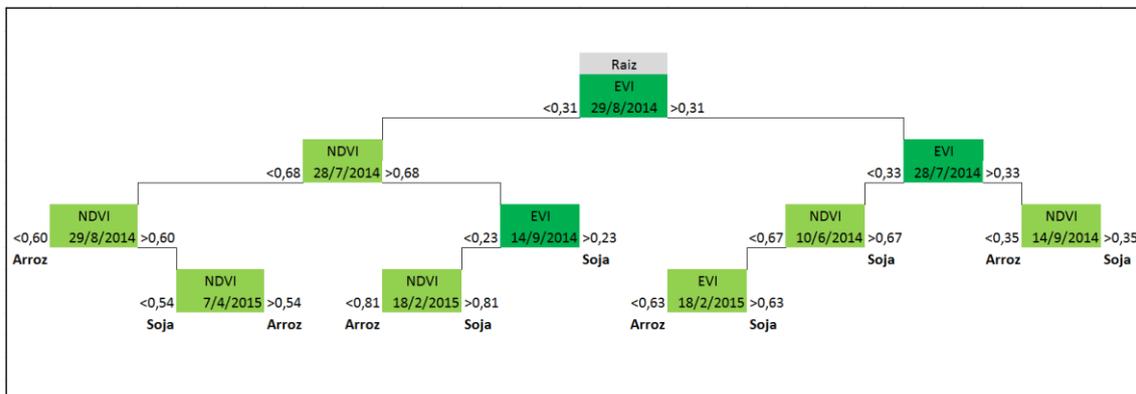


Figura 33. Árvore de decisão para a região ecoclimática da Depressão Central. Fonte: Elaborada pelo autor.

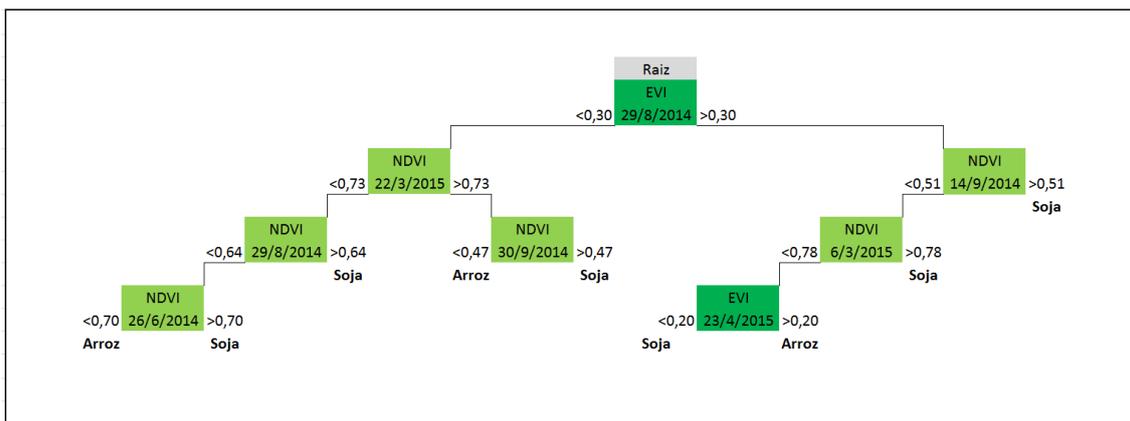


Figura 34. Árvore de decisão para a região ecoclimática do Baixo Vale do Uruguai. Fonte: Elaborada pelo autor.

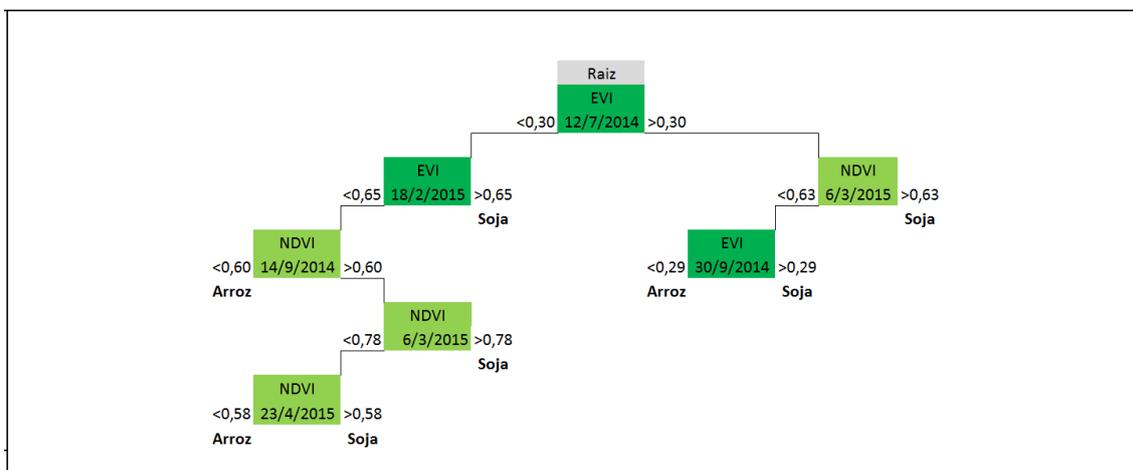


Figura 35. Árvore de decisão para a região ecoclimática da Campanha. Fonte: Elaborada pelo autor.

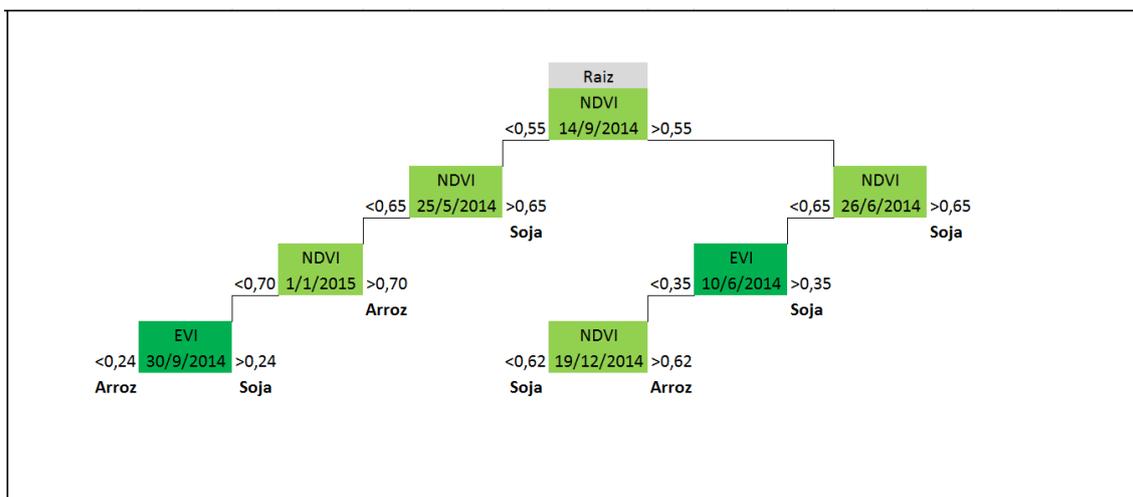


Figura 36. Árvore de decisão para a região ecoclimática das Grandes Lagoas. Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4 Quantificação do avanço da soja sobre o bioma Pampa e área de cultivo de arroz

As Figuras 37 a 43 ilustram as áreas classificadas por árvore de decisão nas regiões ecoclimáticas Depressão Central, Baixo Vale do Uruguai, Campanha e Grandes Lagoas. Em vermelho estão representadas as áreas classificadas com soja e em verde as áreas classificadas como arroz.

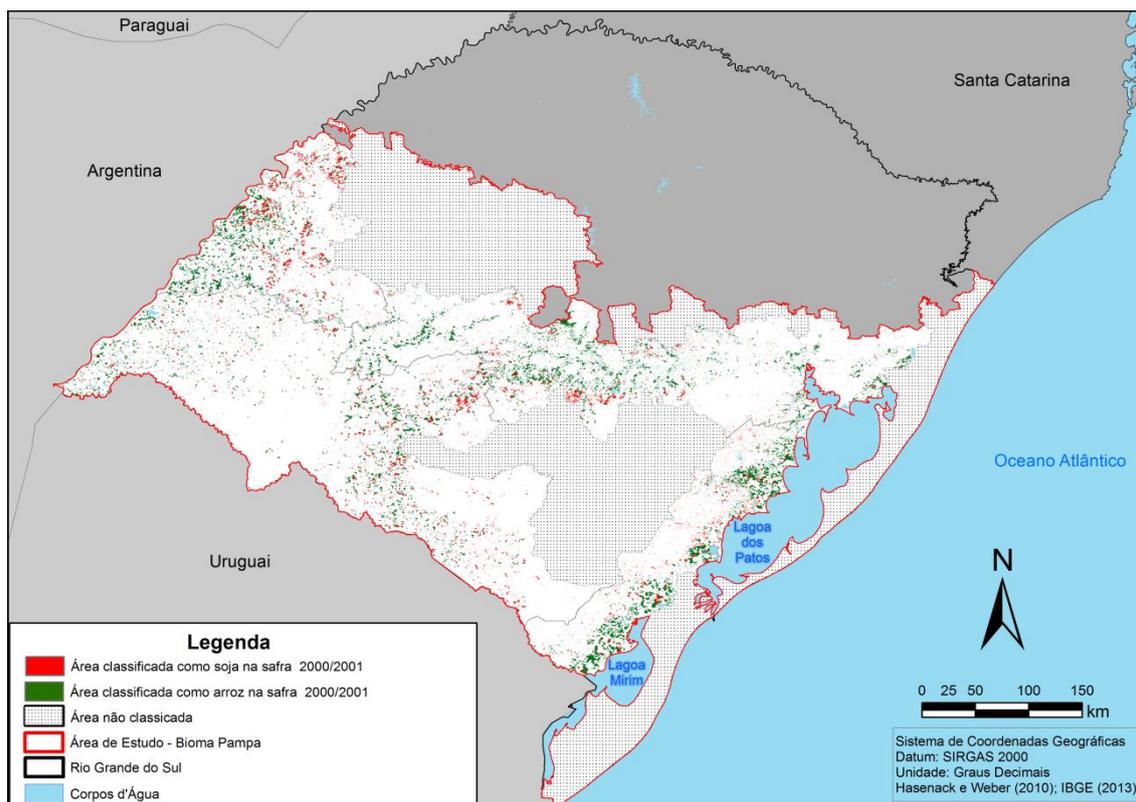


Figura 37. Máscara de cultivo das lavouras classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2000/2001. Fonte: Elaborada pelo autor.

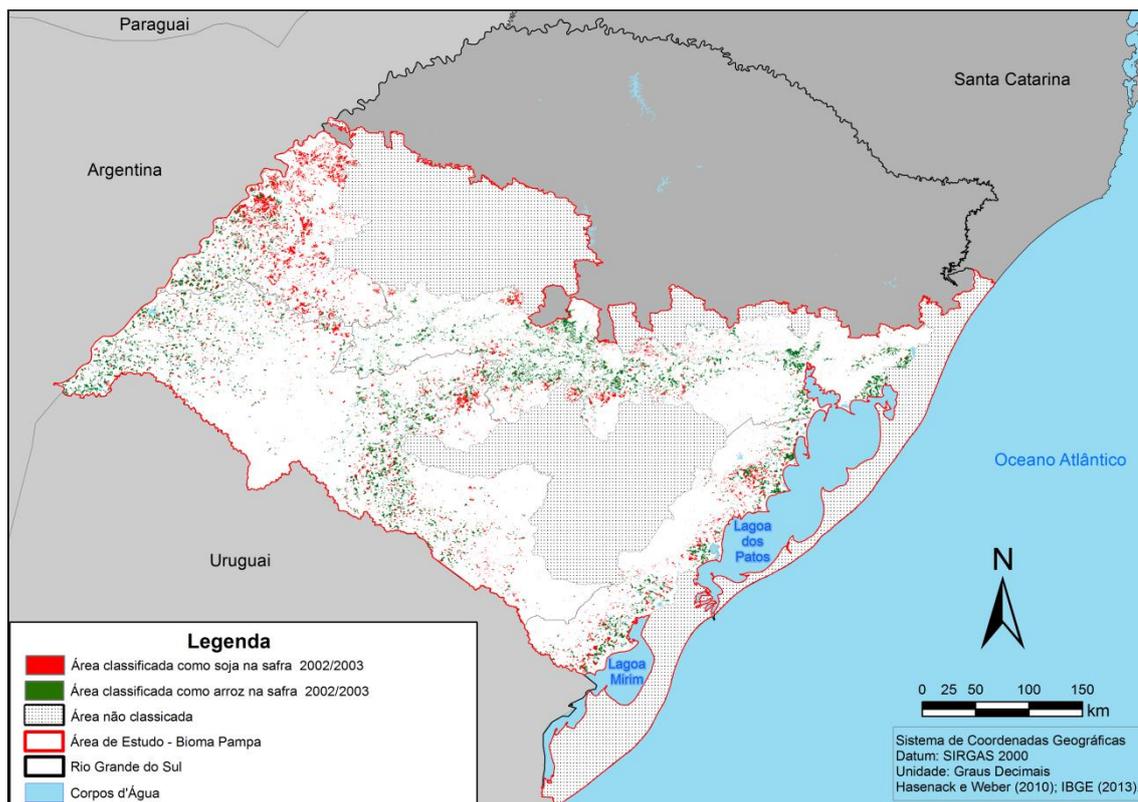


Figura 38. Máscara de cultivo das lavouras classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2002/2003. Fonte: Elaborada pelo autor.

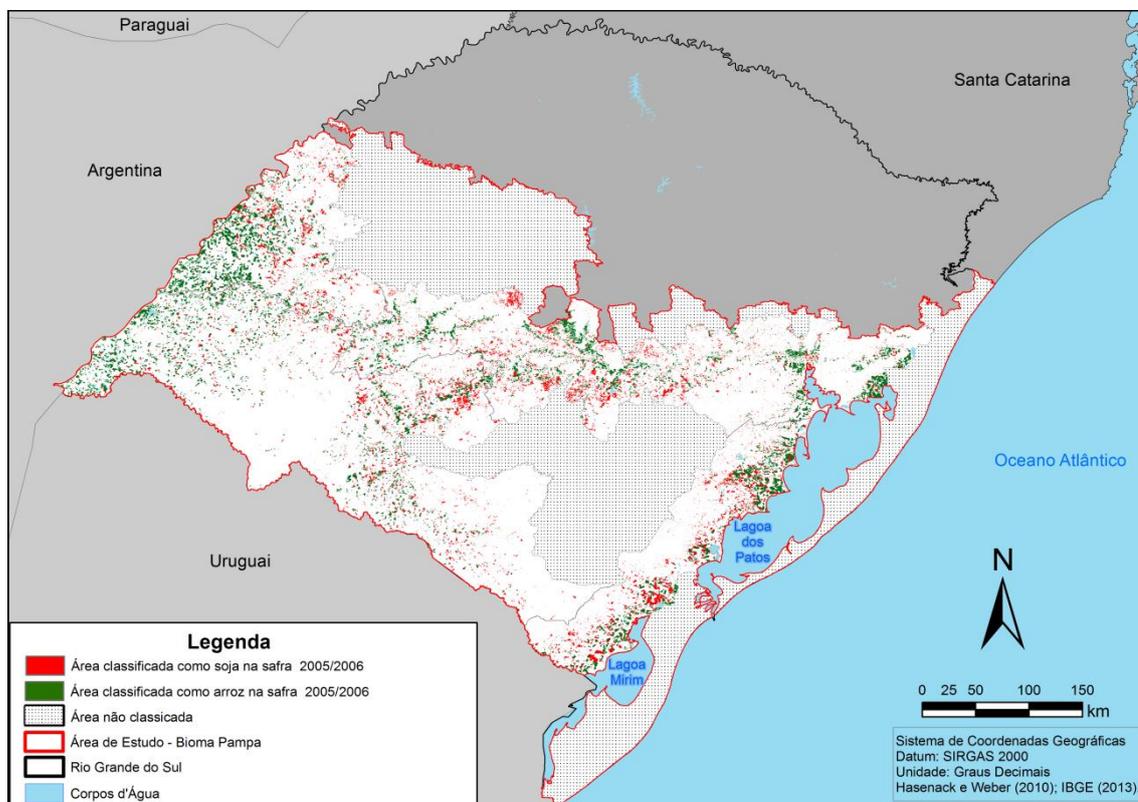


Figura 39. Máscara de cultivo das lavouras classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2005/2006. Fonte: Elaborada pelo autor.

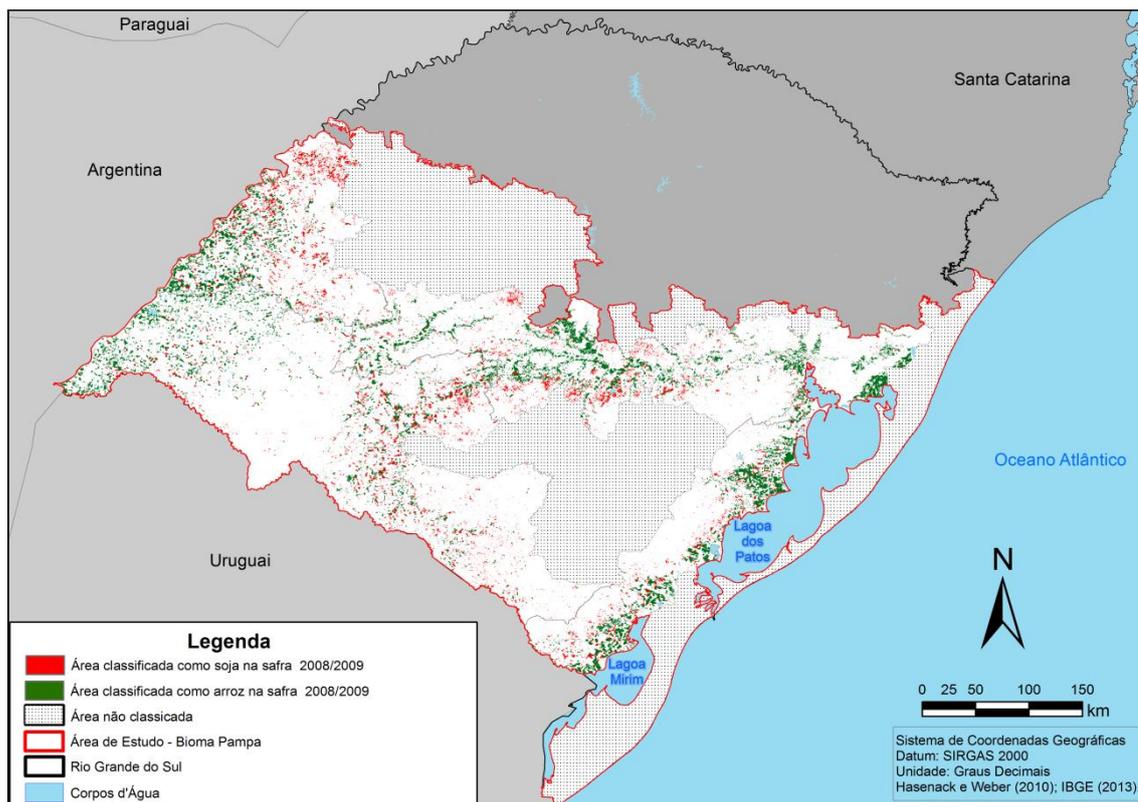


Figura 40. Máscara de cultivo das lavouras classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2008/2009. Fonte: Elaborada pelo autor.

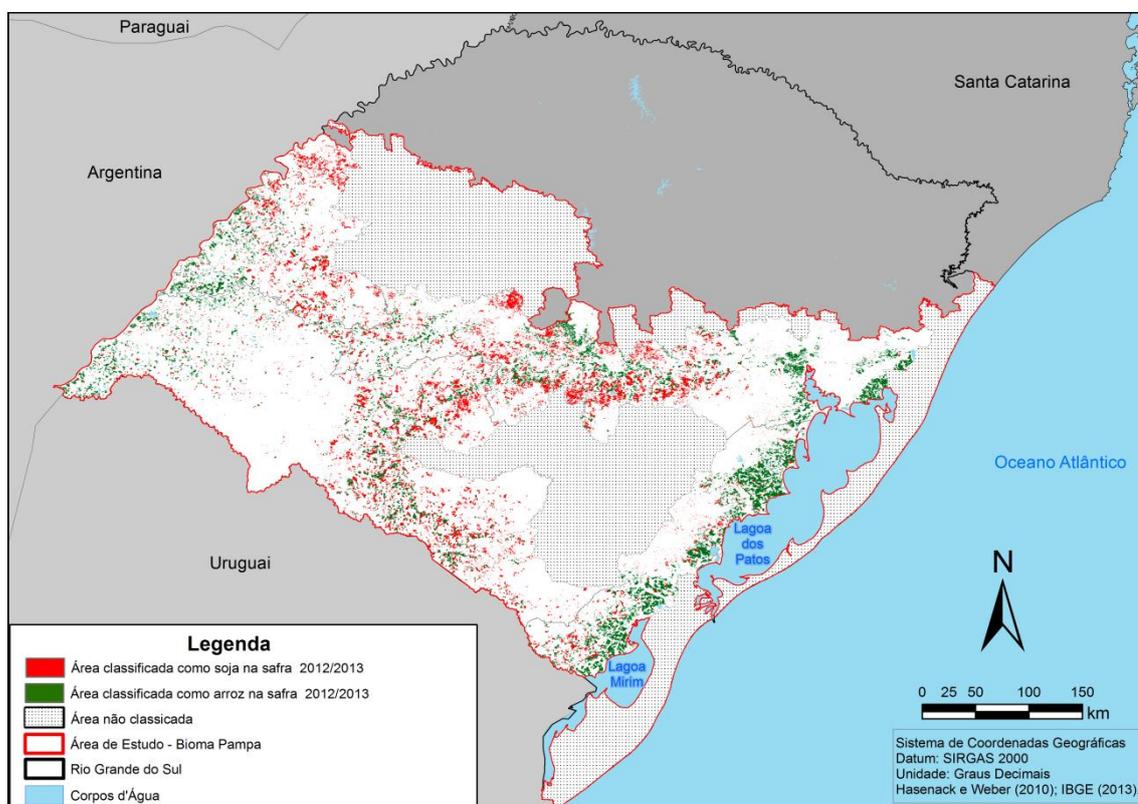


Figura 41. Máscara de cultivo das lavouras classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2012/2013. Fonte: Elaborada pelo autor.

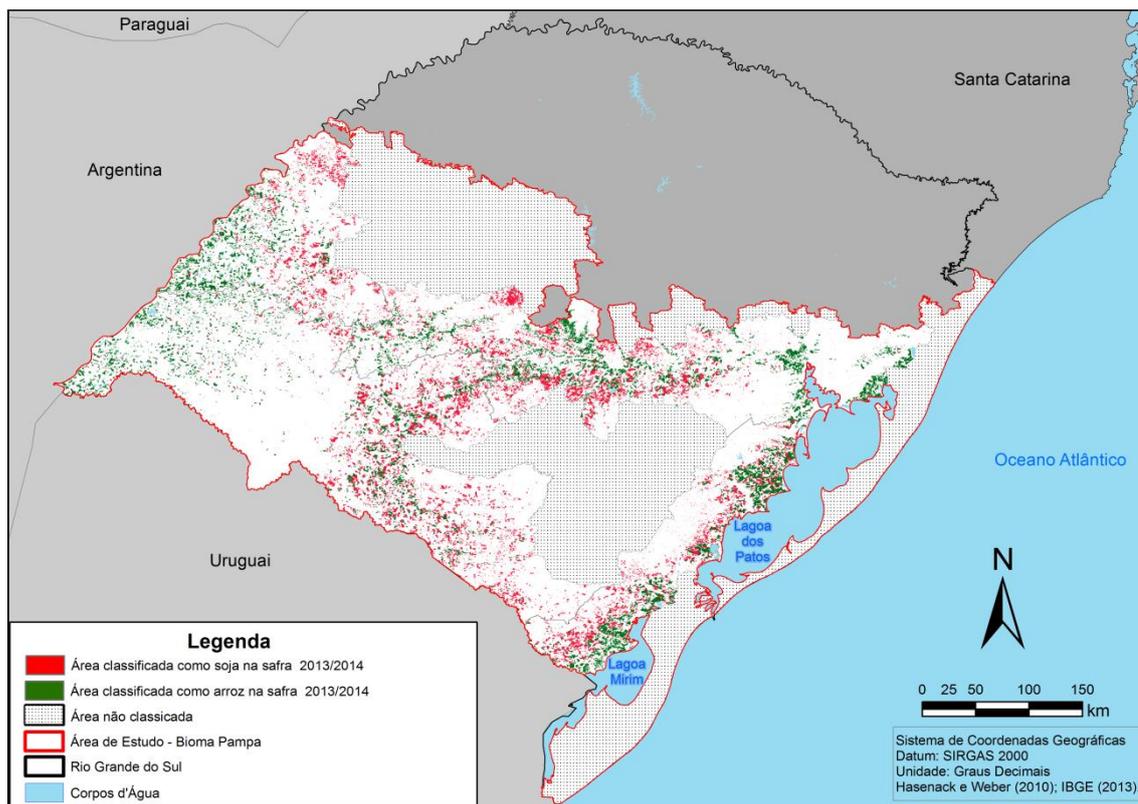


Figura 42. Máscara de cultivo das lavouras classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2013/2014. Fonte: Elaborada pelo autor.

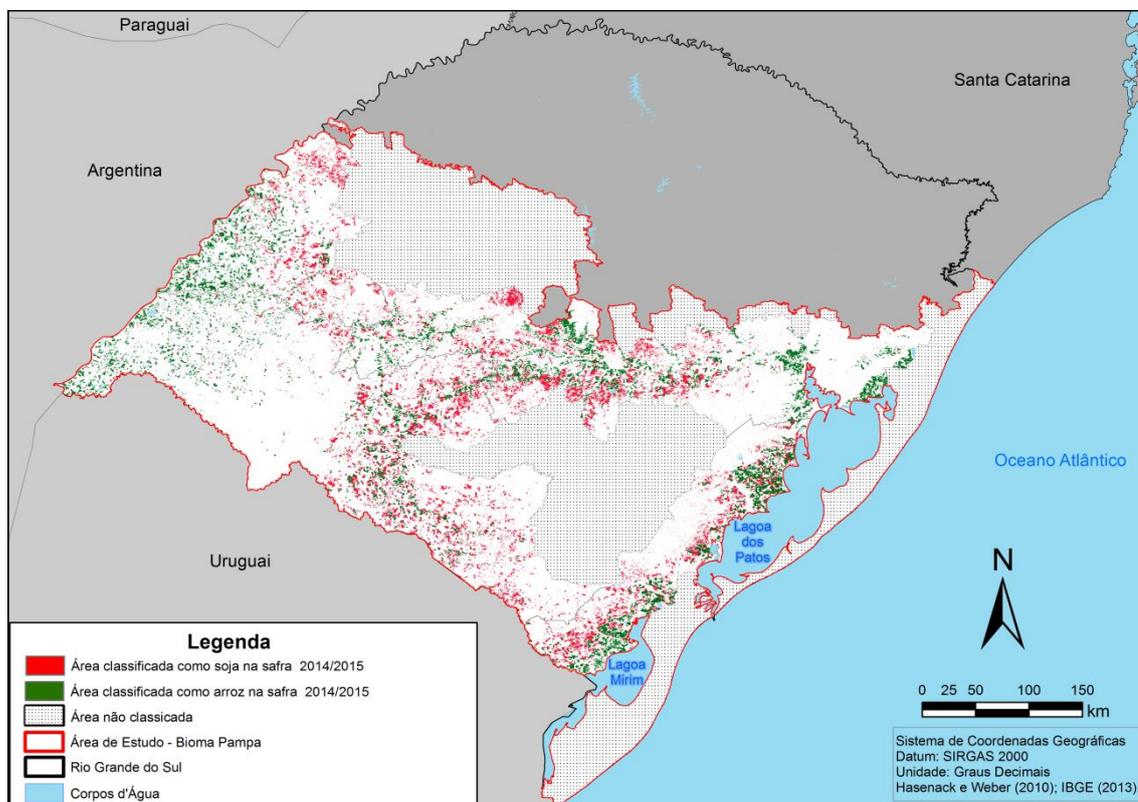


Figura 43. Máscara de cultivo das lavouras classificadas como soja ou como arroz por árvore de decisão na safra de 2014/2015. Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar das figuras mostrarem um padrão de distribuição territorial das lavouras de arroz e de soja similar ao observado nas Figuras de 18 a 24, a área classificada no bioma Pampa como um todo foi bastante inferior em todos os anos analisados. Cabe salientar que por consequência da ausência de dados para treinamento da árvore de decisão nas demais regiões ecoclimáticas que compõem o Bioma, a classificação foi feita somente para 4 delas (Depressão Central, Baixo Vale do Uruguai, Campanha e Grandes Lagoas).

A Tabela 6 ilustra os valores de área plantada com soja segundo os dados oficiais e os valores classificados pela árvore de decisão com soja e com arroz nestas quatro regiões avaliadas ao longo do bioma Pampa. Pode-se observar que a árvore classificou de 71 a 60% das áreas com soja ou arroz, com relação aos dados oficiais. A árvore de decisão subestimou as áreas em todas as regiões, possivelmente por considerar janelas muito restritivas.

Tabela 6. Valores de área plantada com soja e com arroz segundo os dados oficiais e valores classificados com a soja e com o arroz no bioma Pampa pela árvore de decisão.

Período	Dados Oficiais		Árvore de Decisão	
	Área (ha)		Área (ha)	
	IBGE Soja	IBGE Arroz	Soja (ha)	Arroz (ha)
2000-2001	936.040	942.701	329.231	798.225
2002-2003	961.844	1.125.254	541.312	733.581
2005-2006	1.004.321	1.570.841	660.100	1.093.063
2008-2009	1.047.002	1.310.812	546.487	1.244.375
2012-2013	1.027.154	1.875.971	869.518	1.198.606
2013-2014	1.070.518	2.238.461	1.089.031	1.253.313
2014-2015	-	-	1.088.612	1.192.875

Fonte: Elaborada pelo autor.

As Tabelas 7 e 8 mostram as concordâncias apresentadas pela árvore de decisão para a soja e para o arroz, tendo como referência os pontos coletados em campo na safra 2014/2015, não utilizados na construção da metodologia. A soja teve um acerto de 71%, enquanto que o arroz apontou 66% de acerto. Ao avaliar o resultado de ambas culturas pode se perceber que os erros estão mais associados a omissão, do que a confusão entre os dados de outras classes.

Tabela 7. Matriz de concordância para a soja.

	Rótulo	Contagem geral	Acerto
Discordância	0	1939	19 %
Concordância	Soja	7041	71%
Discordância	Arroz	1007	10 %
Total geral		9987	100%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8. Matriz de concordância para o arroz.

	Rótulo	Contagem geral	Acerto
Discordância	0	2366	30 %
Discordância	Soja	344	4 %
Concordância	Arroz	5178	66 %
Total geral		7888	100 %

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 44 pode-se observar a distribuição das distâncias da drenagem mais próxima, obtidas através do modelo HAND, ao longo do bioma Pampa. Nesta, em tons de verde estão as áreas mais baixas e em tons mais quentes (vermelho) as áreas mais altas. Uma comparação visual desta figura frente à distribuição espacial da máscara de cultivo (Figuras 18 a 24) percebe-se que a agricultura de primavera-verão ocupa, majoritariamente, as áreas de menor distância (mais baixas ou várzeas).

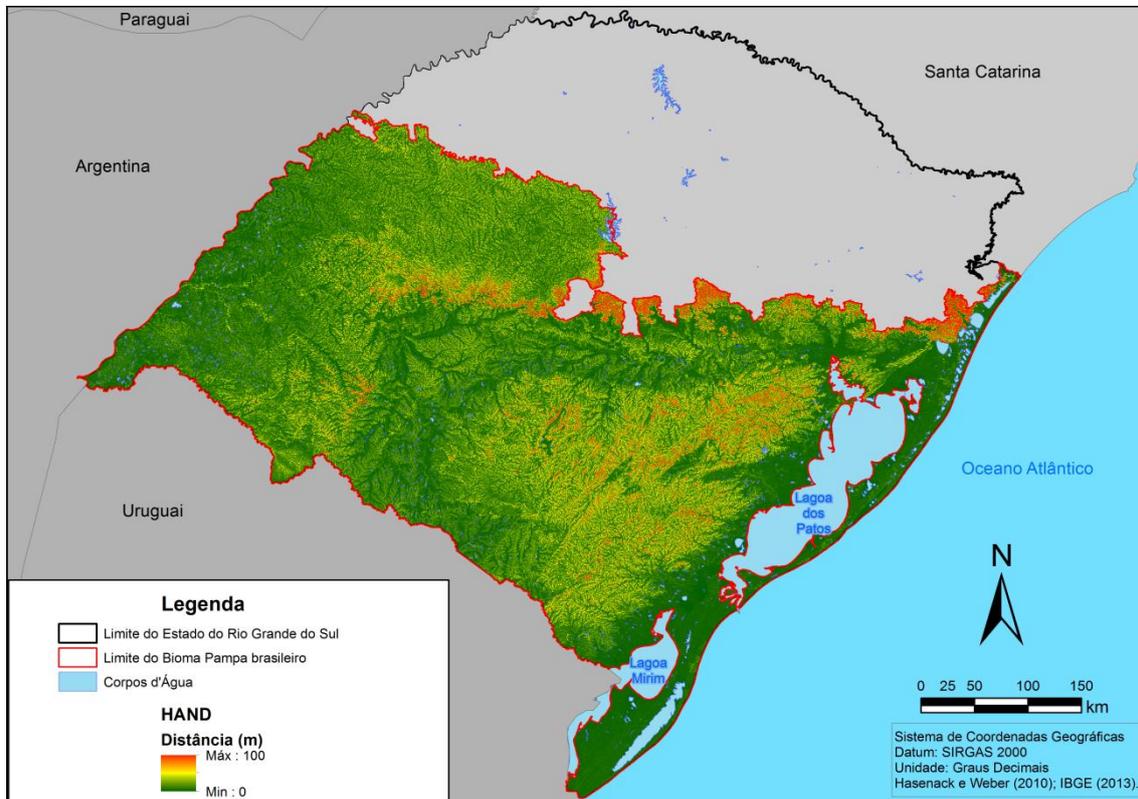


Figura 44. Áreas de inundação gerada pelo modelo HAND com alturas mínimas de 0 a 100 metros para a drenagem mais próxima. Fonte: Elaborada pelo autor.

As Figuras 45 a 54 mostram as frequências com que as áreas classificadas, como soja e arroz, pela árvore de decisão, se distribuem em termos de distâncias da drenagem mais próxima (modelo HAND) para as quatro regiões ecoclimáticas avaliadas.

Fica evidente que existem variações na distribuição de alturas onde estão sendo plantadas estas culturas entre as regiões ecoclimáticas. No entanto, em todas as regiões, o arroz ocupa somente áreas muito baixas, enquanto a soja ocorre em áreas baixas, mas também, se distribui, em alturas um pouco superiores.

Na Figura 45, é possível observar nas sete safras avaliadas, que os valores que variam entre 45 a 58% das lavouras identificadas com cultivo de soja no bioma Pampa ocorrem em áreas inferiores a 10 metros, outros 45% ocorrem nas alturas entre 10 e 30 metros e as demais frequências se distribuem em áreas superiores a 30 metros. Já as áreas de arroz ocorrem preponderantemente em áreas baixas, com mais de 80% da área de cultivo ocorrendo em alturas inferiores a 10 metros (Figura 46).

Na região ecoclimática da Depressão Central um pouco menos da metade das áreas de soja (Figura 47) ocorrem em áreas inferiores a 10 metros, em uma frequência que variou de 38 a 49% entre as safras. As áreas de arroz, no entanto (Figura 48),

apresentam uma frequência similar a observada para todo o Bioma, de praticamente 80% das áreas abaixo de 10 metros, em todas as safras.

A região do Baixo Vale do Uruguai foi a que apresentou as menores frequências de áreas cultivadas com soja abaixo de 10 metros. Em torno de 60% as áreas com soja se distribuíram nas alturas inferiores a 10 e/ou 20 metros nos anos analisados (Figura 49). Em contraste, observa-se que na região das Grandes Lagoas mais de 90% do arroz e mais de 70% da soja é cultivada em alturas inferiores a 10 metros da drenagem mais próxima.

Em todas as figuras também é possível observar que nos últimos dois anos avaliados, houve um decréscimo na frequência de áreas de soja cultivadas em altitudes inferiores a 10 metros e um acréscimo em áreas em altitudes superiores a 10, 20 e 30 metros.

A Figura 51 ilustra a frequência onde são plantadas áreas de soja na região da Campanha, ao observá-la é possível perceber que a maior frequência também acontece em alturas inferiores a 10 metros. Não obstante, a contar das últimas três safras avaliadas as frequências iam, gradualmente, reduzidas em áreas mais baixas (inferiores a 10 metros), enquanto, em mesmas proporções, cresceram sobre as áreas superiores a 10, 20 e 30 metros. As frequências de distribuição das áreas de arroz na Campanha podem ser observadas na Figura 52, onde fica evidente que aproximadamente 75% das áreas ocorrem em áreas com cotas máximas de 10 metros de altura e outras 20 % em áreas inferiores a 20 metros de altura.

A Figura 53 mostra que a frequência das alturas onde foi plantada a soja na região das Grandes Lagoas. As sete safras prevaleceram em áreas inferiores a 10 metros, variando de 61 a 85 % entre os anos avaliados. Percebe-se que em comparação com o ano de 2002, nos anos mais recentes a soja tendeu a ser plantada em áreas cada vez mais altas. A Figura 54 ilustra a frequência das áreas de arroz nesta região, ficando novamente evidente que o arroz ocupa áreas bem baixas.

Os dados mostram, portanto, que grande parte das lavouras de soja vem ocupando áreas úmidas, como aquelas tradicionalmente cultivadas com arroz. No entanto, como as áreas de arroz não têm apresentado decréscimo (IBGE, 2014), possivelmente, a soja esteja sendo utilizada como alternativa da rotação desta cultura.

Observa-se ainda que apesar dos dados mostrarem maior frequência nas áreas baixas, as quatro regiões avaliadas mostraram que o cultivo da soja vem gradualmente migrando para as áreas mais altas, possivelmente campestres.

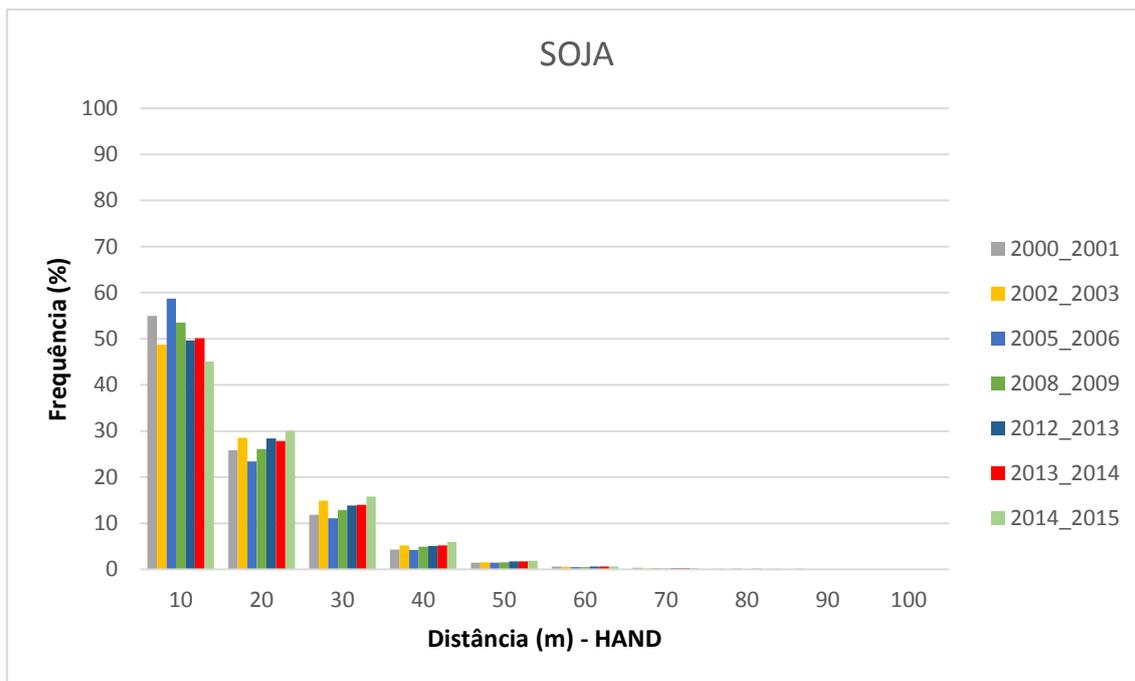


Figura 45. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com soja no bioma Pampa do Rio Grande do Sul. Fonte: Elaborada pelo autor.

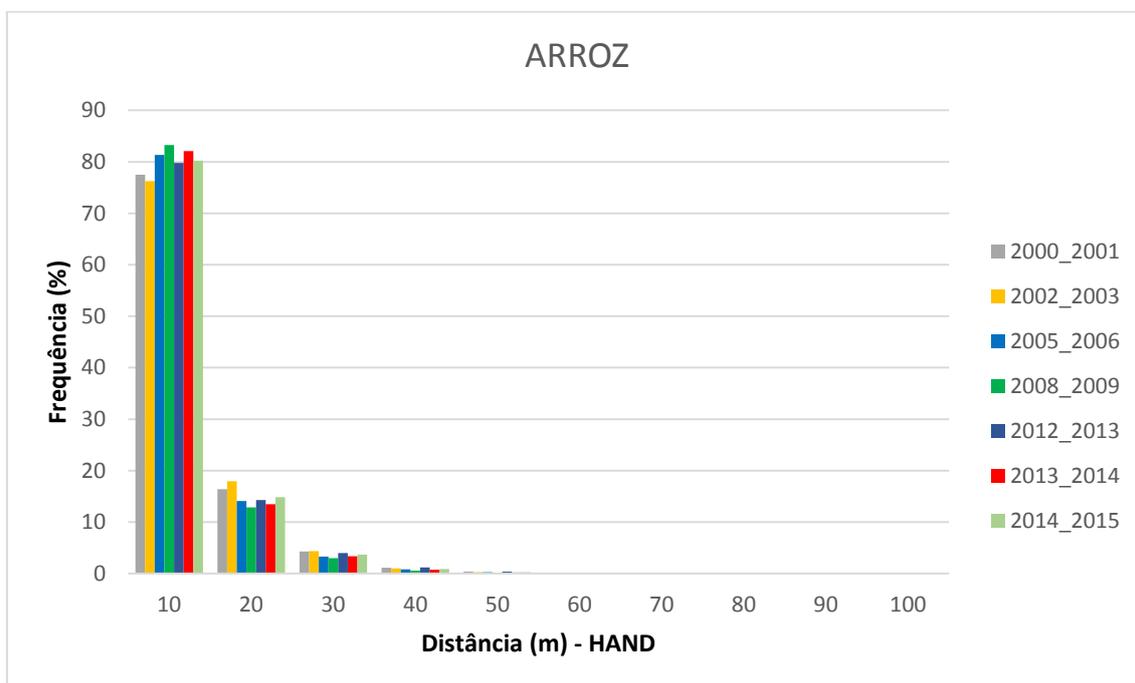


Figura 46. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com arroz no bioma Pampa do Rio Grande do Sul. Fonte: Elaborada pelo autor.

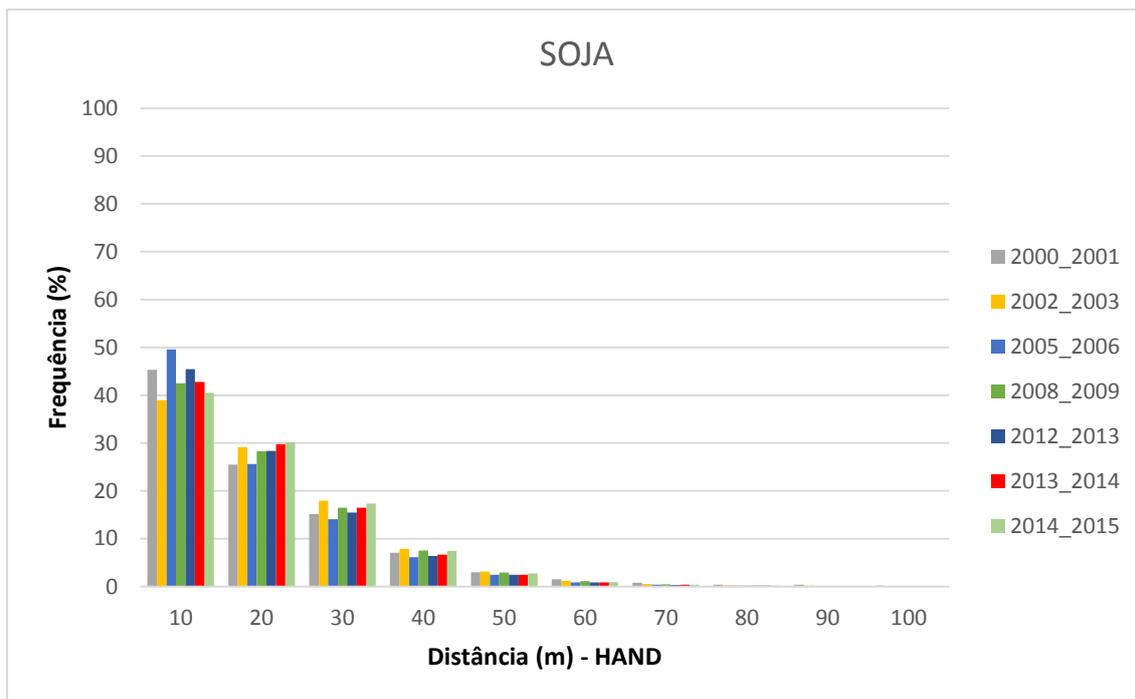


Figura 47. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com soja na região ecoclimática da Depressão Central. Fonte: Elaborada pelo autor.

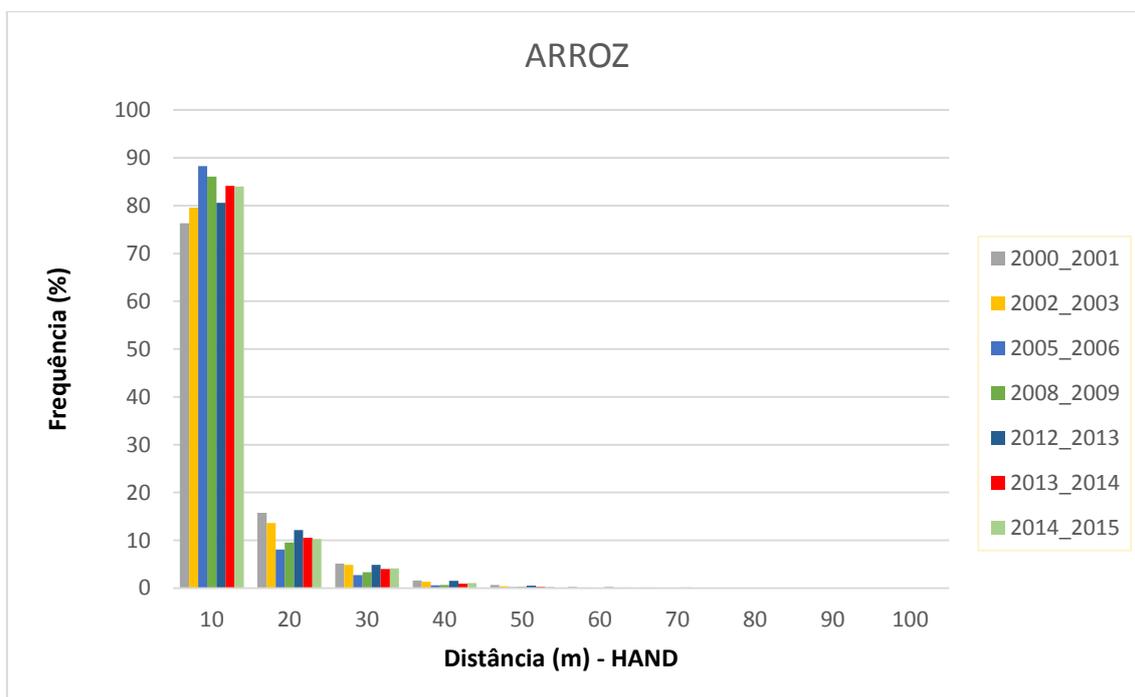


Figura 48. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com arroz na região ecoclimática da Depressão Central. Fonte: Elaborada pelo autor.

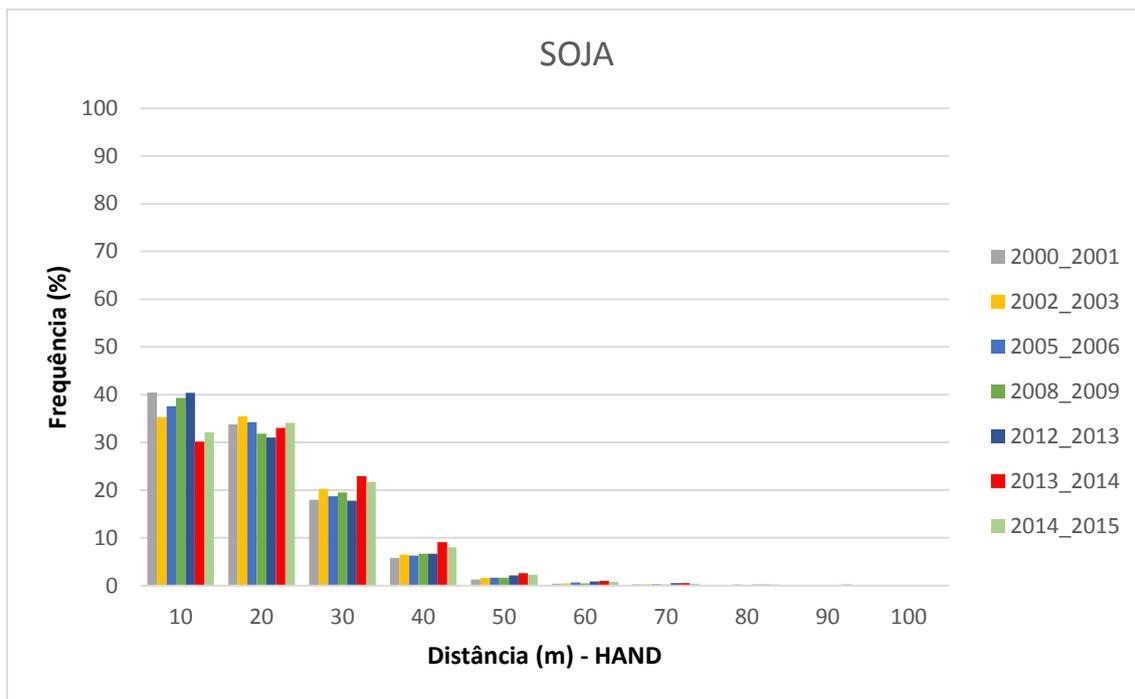


Figura 49. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com soja na região ecoclimática do Baixo Vale do Uruguai. Fonte: Elaborada pelo autor.

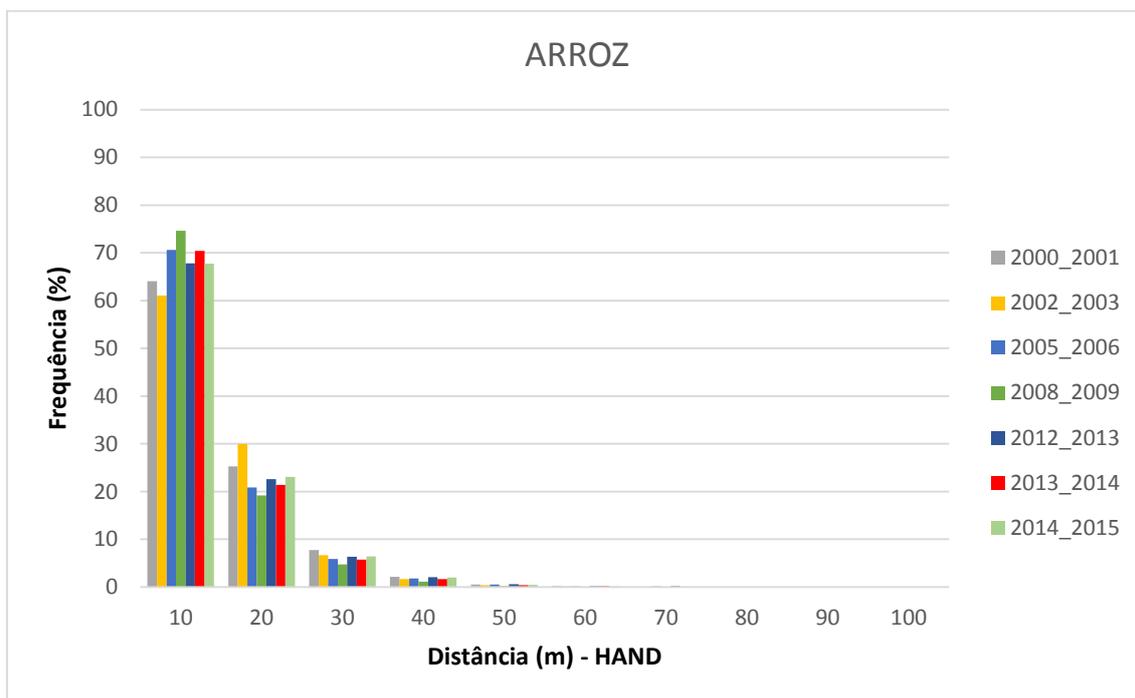


Figura 50. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com arroz na região ecoclimática do Baixo Vale do Uruguai. Fonte: Elaborada pelo autor.

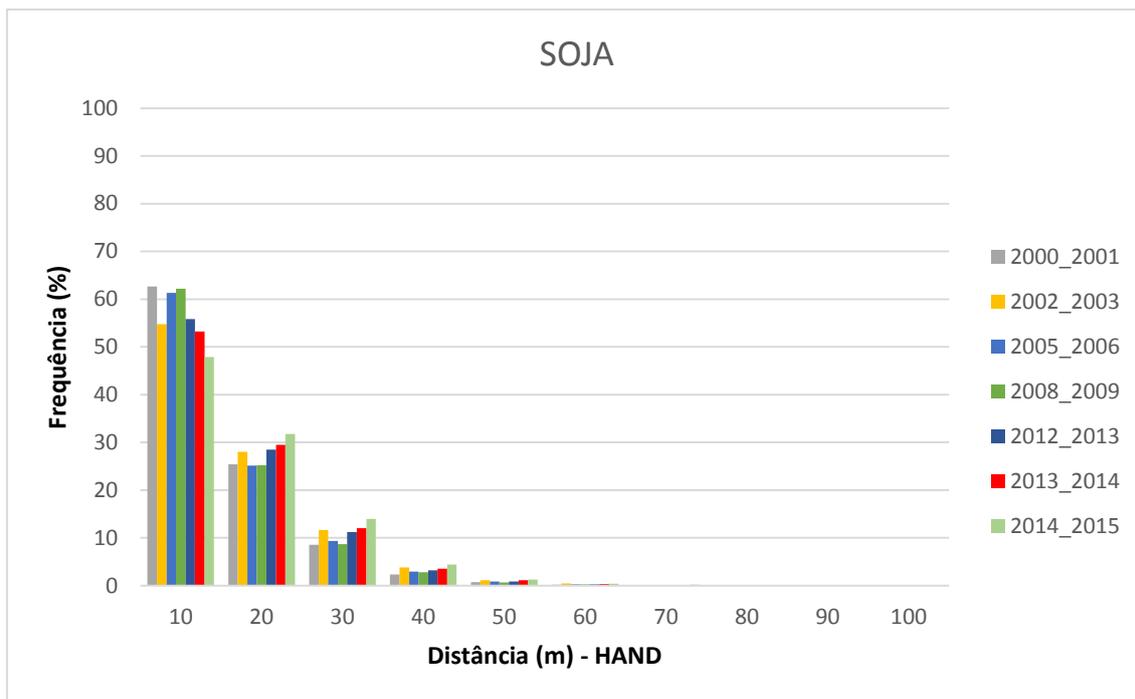


Figura 51. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com soja na região ecoclimática da Campanha. Fonte: Elaborada pelo autor.

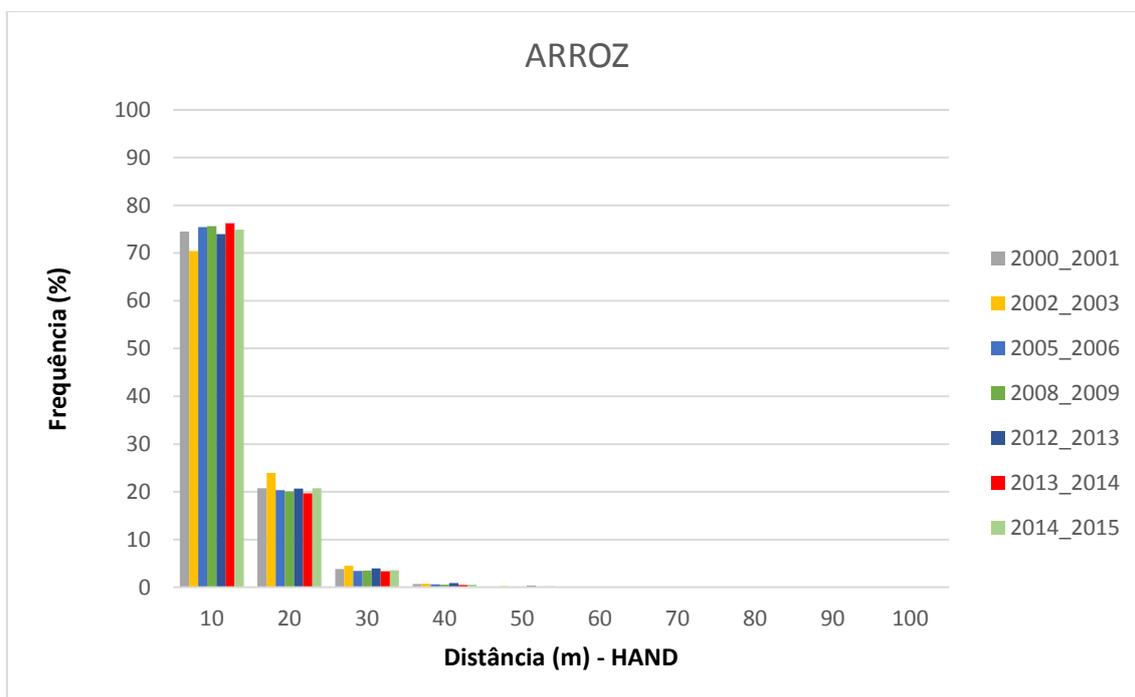


Figura 52. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com arroz na região ecoclimática da Campanha. Fonte: Elaborada pelo autor.

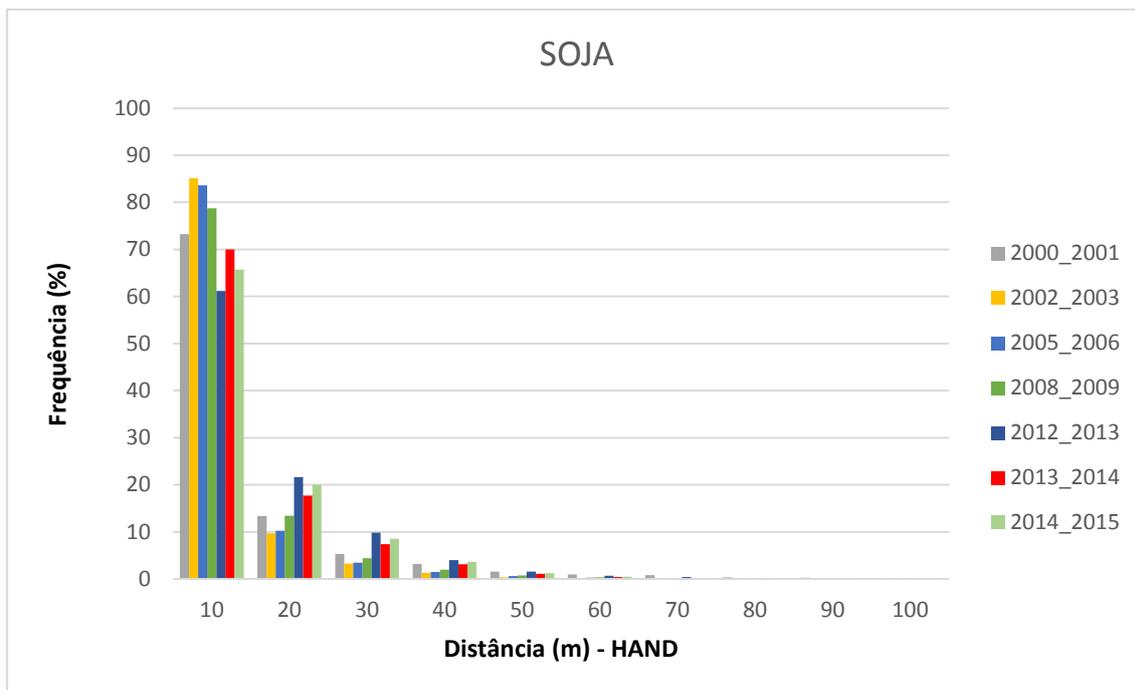


Figura 53. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com soja na região ecoclimática das Grandes Lagoas. Fonte: Elaborada pelo autor.

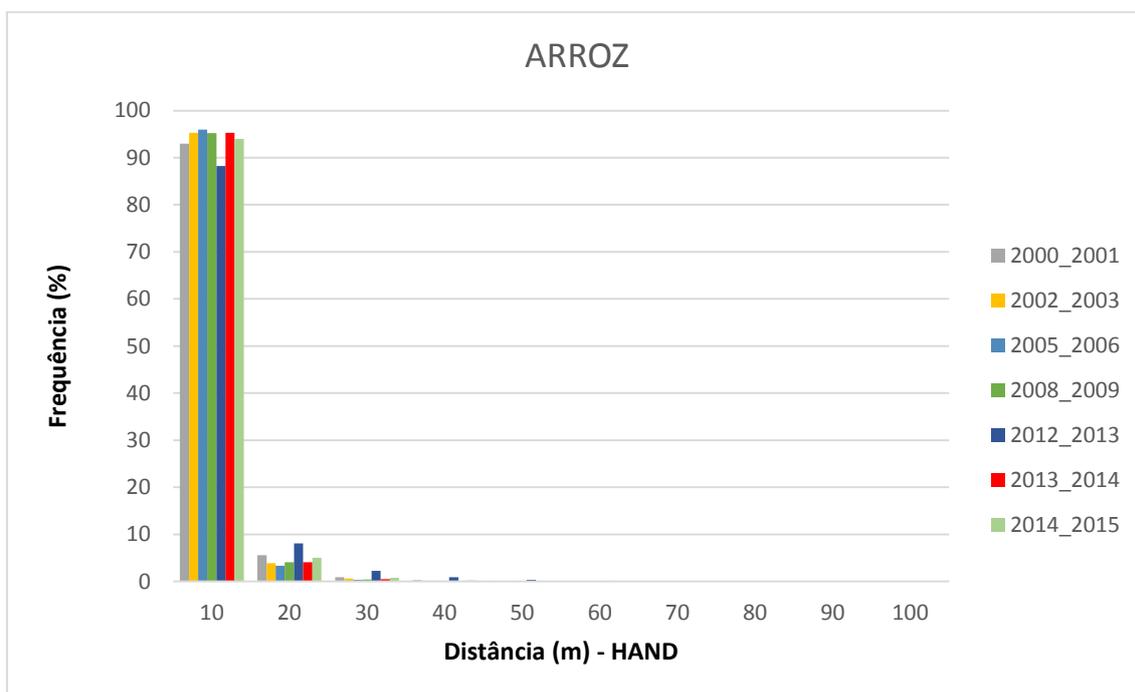


Figura 54. Distribuição da frequência de altitude das áreas cultivadas com arroz na região ecoclimática das Grandes Lagoas. Fonte: Elaborada pelo autor.

5. CONCLUSÕES

Existem diferenças no padrão de variação ao longo da safra dos indicadores espectrais (índices de vegetação e bandas) apresentados pelas lavouras de soja e arroz no bioma Pampa;

Em termos temporais, o melhor momento para a distinção das culturas de soja e arroz ocorre no período que antecede o início do ciclo destas culturas;

Em termos de indicador espectral, são os índices de vegetação que melhor diferenciam as culturas da soja e do arroz;

O uso de limiares automatizados reduz o grau de subjetividade e mostra-se útil para o mapeamento de áreas de soja e arroz no bioma Pampa.

A integração de técnicas de processamentos digitais de imagens representa uma sofisticação em métodos e técnicas de processamento digital para separação das culturas soja e arroz irrigado no bioma Pampa;

A tendência de subestimação encontrada indica a necessidade de novos ajustes. Entretanto, os erros estão mais associados à omissão, o que leva a interpretações mais conservadoras;

Na metade sul do Rio Grande do Sul, a soja vem sendo cultivada preponderantemente nas áreas mais úmidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAUJO, G.K.D. **Determinação e mapeamento de início do ciclo para culturas de verão no estado do Paraná por meio de imagens de satélite e dados de precipitação**. 2010. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2010.
- BRASIL, Decreto-Lei 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 no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 25 maio 2012. Seção 1, p. 37.
- BOLDRINI, I. A flora dos campos do Rio Grande do Sul. **Campos Sulinos: Conservação e Uso Sustentável da Biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. cap. 4, p. 63-77.
- CAMPOS, A. R.; FONSECA, D. F.; SAMPAIO, D. M.; FARIA, S. D.; ELMIRO, M. A. T. **Classificação orientada a objeto para mapeamento do uso e cobertura do solo do município de Rio Acima - MG: por crescimento de regiões e por extração de objetos**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, 2013. p 8035-8042.
- CORDEIRO, A. P. A.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C; MELO, R. W. de; SHIMABUKURO, Y. E.; FIOR, C. S. Regiões homogêneas de vegetação utilizando a variabilidade do NDVI. *Ciência Florestal*. No prelo 2016.
- CORDEIRO, J. L. P.; HASENACK, H. Cobertura vegetal atual do Rio Grande do Sul. In: Pillar, V. D.; Muller, S. C.; Castilhos, Z. M. S.; Jacques, A. V. A. (Org.). **Campos Sulinos: Conservação e Uso Sustentável da Biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. cap. 23, p. 285-299.
- CUNHA, H. N. da.; NÓBREGA, M. R. R.; FIORI, D.; FILIPPINI ALBA, J. M.; MIURA, A. K.; SALDANHA, D. L. **Mapeamento de áreas de preservação permanente de topo de morro na bacia hidrográfica do Alto Camaquã, RS, nos termos da resolução CONAMA de 2002 (revogado) e do Novo Código Florestal de 2012**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. Anais... São José dos Campos: INPE, 2015.
- EMATER; Estudo comparativo das estiagens: 2004/2005 e 2011/2012, **NOTA TÉCNICA** Nº05 23 de janeiro de 2012.
- EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de Produção de Soja Região Central do Brasil 2004**. Disponível em <<http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm>>. Acesso em 20 nov. 2014.
- FAYYAD, U.; PIATETSKI-SHAPIRO, G.; SMYTH, P. The KDD Process for Extracting Useful Knowledge from Volumes of Data. In: **Communications of the ACM**, pp.27-34, Nov.1996
- FIGUEIREDO, K. D. A.; BRUNSELLB, N. A.; ROCHAA, J. V.; LAMPARELLIC, R. A. C.; PICOLI, M. C. A. Using temporal stability to estimate soya bean yield: a case study in Paraná state, Brazil. **INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING**, 2016. VOL. 37, NO. 5, 1223–1242. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1148280>>. Acesso em: 14 jul. 2016.
- FILIPPINI, J. M. A.; SCHRODER, V. F.; NÓBREGA, M. R. R. (2012). Land Cover Change Detection in Southern Brazil Through Orbital Imagery Classification Methods, **Remote Sensing - Applications**, Dr. Boris Escalante (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/36940. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/remote-sensing-applications/strategies-of-change-detection-in-southern-brazil-by-orbital-imagery-classification-methods>>. Acesso em: 10 jun. 2016
- FITZ, P. R. Cartografia Básica. Editora **OFICINA DE TEXTOS**. 2012.

FOCKELMANN, R. **Agricultural parcel detection with Definiens e-Cognition**. Disponível em: <http://www.ecognition.com/sites/default/files/definiens_agricultural_parcel_detection_eCognition.pdf> Acesso em: 16 nov. 2015.

FONTANA, D. C.; POTGIETER, A. B.; APAN, A. **Assessing the relationship between shire winter crop yield and multi temporal MODIS NDVI and EVI images**. Proceedings of SSC 2005 Spatial Intelligence, Innovation and Praxis: The national biennial conference of the spatial Sciences Institute, September, 2005. Melbourne: Spatial Science Institute. ISBN 0-9581366-2-9.

FONTANA, D. C.; PINTO, D. G. JUNGES, A.H.; BREMM, C. Inferências sobre o calendário agrícola a partir de perfis temporais de NDVI/MODIS. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 3, p.350-358, 2015.

GALFORD, G. L.; MUSTARD, J. F.; MELILLO, J.; GENDRIN, A.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of rowcrop agriculture in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 2, p. 576-587, 15 fev. 2008. Disponível em : Available online at www.sciencedirect.com. Acesso em: 20 abr. 2014.

Global Visualization Viewer (GLOVIS). Disponível em:<<http://glovis.usgs.gov/>> Acesso em: 20 mai. 2016.

GUASSELLI, L. A. ; OLIVEIRA, M. G. ; EVERS, H. ; SUERTEGARAY, D. M. A. . **Avaliação dos impactos da expansão agrícola sobre as áreas susceptíveis à arenização Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí - Rio Grande do Sul Brasil**. In: 12 encuentro de geógrafos de América Latina, 2009, Montevideo. Caminando en una América Latina en transformación. Montevideo: EasyPlanners, 2009.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.) **Base cartográfica vetorial continua do Rio Grande do Sul – escala 1:50.000**. Porto Alegre: UFRGS/Centro de Ecologia.2010.1 DVD-ROM (Série Geoprocessamento).

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p.195-213, 2002. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2. Disponível em: <https://cimss.ssec.wisc.edu/dbs/China2011/Day2/Lectures/MODIS_MOD13_NDVI_referenc.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2016.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) - **Mapa da vegetação do Brasil e Mapa de Biomassas do Brasil**. 2004.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - Produção Agrícola Municipal. Disponível em:<<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=1612&z=t&o=11>>. Acesso em 07 dez 2014.

JENSEN, J. R.; **Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective**. ESTADOS UNIDOS DA AMERICA: PRENTICE HALL, 2005 - 526 p. SBN: 0131453610.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres / Remote sensing of the environment: na earthre source perspective**. São José dos Campos: PARENTESE EDITORA, 2009. 672 p. ISBN 85605070, 13: 9788560507061. (INPE--/).

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2011. 604 p.

PEÑA-BARRAGÁN, J. M.; MOFFATT, K.; NGUGI, R. E. Plant, Johan Six Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology. **Remote Sensing of Environment**, Volume 115, Issue 6, 15 Jun. 2011, Pag. 1301–1316

JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C. Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 1, p. 9-16, 2011.

JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C. **Perfis temporais de NDVI/MODIS de áreas agrícolas de outono-inverno, na região de Passo Fundo (RS), provenientes de máscara de cultivos e classificação não**

supervisionada. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.0031.

JUNIOR, C. A. da S.; Frank, T.; Rodrigues, T. C. D. 2013 Discriminação de áreas de soja por meio de imagens EVI/MODIS e análise baseada em geo-objeto.. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v.18, n.1, p.44-53, 2014. ISSN 1807-1929. Campina Grande, PB, UAEA/UFPG – Disponível em: <http://www.agriambi.com.br>.

KÖPPEN, W. **Climatología.** México, DF : Fondo de Cultura Económica, 1948. 71 p.

KLERING, E. V.; WAGNER, A. P.; FONTANA, D. C.; BERLATO, M. **A. Comparação entre dois métodos de estimativa de área cultivada com arroz irrigado no Rio grande do Sul.** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.0191.

KLERING, E. V. **Mapeamento da área cultivada e estimativa de rendimento de grãos de arroz irrigado a partir de modelos agrometeorológicos-espectrais para o Rio Grande do Sul.** 2012. 163 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Curso de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, 2012.

LUCAS. R.; ROWLANS, A. BROWN, A.; KEYWORTH, S.; BUNTING, P. Rule-based classification of multi-temporal satellite imagery for habitat and agricultural land cover mapping. **ISPRS. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,** v62, n.3, p. 165-185, 2007.

MALUF, J.R.T.; CAIAFFO, M.R.R. **Regiões Ecoclimáticas do Estado do Rio Grande do Sul.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12. / REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3., 2001, Fortaleza. Água e Agrometeorologia no novo milênio. 2001. p.151-152.

MANABE, V. D.; ROCHA, J.V. **Comparação de classificadores para o mapeamento de culturas agrícolas anuais em Novo do Parecis – MT, utilizando NDVI/MODIS.** Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

MENGUE, V. P.; SCOTTÁ, F. C.; SILVA, S. S; **Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai.** Pesquisas em Geociências, 43 (1): 41-53, jan./abr. 2016. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. ISSN 1518-2398. E-ISSN 1807-9806. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/igeo/pesquisas/4301/034301.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2016.

MENGUE, V. P.; FONTANA, D. C. **Metodologia para mapear áreas de arroz irrigado utilizando o Modelo HAND em áreas agrícolas de São Borja e Pelotas/RS.** Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

MENGUE, V. P. **Avaliação da dinâmica espectro-temporal visando o mapeamento da soja e do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. 2013.** 122f. Dissertação (mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Porto Alegre, 2013.

MENGUE, V. P.; FONTANA, D. C.; Avaliação da dinâmica espectro-temporal visando o mapeamento dos principais cultivos de verão no Rio Grande do Sul. **Bragantia** vol.74 no.3 Campinas jul./set. 2015 Epub 21-Jul-2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0452>>. Acesso em: 10 ago. 2015

MMA - Ministério do Meio Ambiente - **República Federativa do Brasil,** Áreas prioritárias para conservação, uso sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade brasileira ATUALIZAÇÃO: Portaria MMA nº 9, de 23 de janeiro de 2007.

MENESES, P. R. & ALMEIDA, T. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Brasília: **UNB/CNPq,** 2012. 266 pag.

MORAES, E. C. PEREIRA, G. ARAI, E. Uso dos produtos Evi do sensor Modis para a estimativa de áreas de alta variabilidade intra e interanual no bioma Pantanal. **Geografia**, Rio Claro, v. 34, Número Especial, p. 757-767. 2009.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). **Shuttle Radar Topography Mission**. Disponível em: <<http://glovis.usgs.gov/>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

NÓBREGA, M. R. R. ; CUNHA, H. N. ; MIURA, A. K. ; ALBA, J. M. F. . **Estimativa de áreas degradadas no município de Manoel Viana - RS por meio da técnica do modelo linear de mistura espectral**. 2012. (Apresentação de Trabalho/Congresso). n: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DA EMBRAPA CLIMA TEMPERADO, 4., 2012, Pelotas. Ciência e inovação para 2050: qual o futuro que queremos? Resumos e palestras... Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2012. 1 CD-ROM.

PÉBAYLE, R. **A rizicultura irrigada no Rio Gande do Sul. Boletim Mineiro de Geografia, nº 10**. 11, julho, 1965.

PILLAR, V de PATTA. LANGUE, O. Os campos do Sul, Porto Alegre: **Rede Campos Sulinos**. UFRGS,2015. 192p:il.

PINTO, D. V.; FONTANA, D. C. **Inferências sobre o calendário agrícola da soja a partir de perfis temporais de NDVI em imagens MODIS**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.0149.

PIZZATO, F. **Pampa gaúcho: Causas e consequências do expressivo aumento das áreas de soja**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Programa de Pós Graduação em Geografia, IGEO/UFRGS, Porto Alegre, 2013. 105 p.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. São José dos Campos: **Parêntese**, 2009. 127 p.

SILVA JUNIOR, C. A.; FRANK, T.; RODRIGUES, T. C. S. . Discriminação de áreas de soja por meio de imagens EVI/MODIS e análise baseada em geo-objeto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** (Online), v. 18, p. 44-53, 2014.

RENNÓ, C., NOBRE, A.D., CUARTAS, L.A., SOARES, J.V., HODNETT, M.G. & TOMASELLA, J., WATERLOO, M. 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, 112: 3469-3481

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, INPE. 2005.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T.; SUGAWARA, L. M.; VIEIRA, C. A. O. Superfícies de resposta espectro-temporal de imagens do sensor MODIS para classificação de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.37, n.1, jan-fev, 2007.

ROSE, J. W.: HASS, R. H.; SCHELL, J.A.; DEERING. D.W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with**. ERTS SYMPOSIUM, 3. NASA 351. P.309-317.1973.

RUDORFF, F. T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J. C. O sensor Modis e suas aplicações no Brasil. São José dos Campos, SP A. Silva Vieira E. 2007. ISBN 978-85-60507-00-9. **Editora Parentese**, 2007.

RUBERT, G. C. D.; ROBERTI, D. R.; DIAZ, M. B.; MORAES, O. L. L. Estimativa da evapotranspiração em área de pastagem em Santa Maria- RS. **Ciência e Natura, Santa Maria** v.38 Ed. Especial- **Editora UFSM**. P 300-304.

RUIZ, L. F. C; CATEN, A. C; DALMOLIN, R. S. D. Árvore de decisão e a densidade mínima de amostras no mapeamento da cobertura da terra. **Ciência Rural, Santa Maria**, v.44, n.6, p.1001-1007, jun, 2014. ISSN 0103-8478.

SANTOS, J. S. **Metodologias para o mapeamento da cultura da soja no estado do Rio Grande do Sul utilizando imagens de sensor de moderada resolução espacial**. Fevereiro de 2010. 111 páginas. Dissertação apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de Mestre em Sensoriamento Remoto, Área de Concentração Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, fevereiro de 2010.

SANTOS, J. S. dos; FONTANA, D. C.; SILVA, T. S. F.; RUDORFF, B. F. T. Identificação da dinâmica espaço-temporal para estimar área cultivada de soja a partir de imagens MODIS no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.18, n.1, p.54-63, 2014.

SILVA, DEONÍSIO.; **A vida íntima das palavras: origens e curiosidades da língua portuguesa /** Deonísio da Silva. – São Paulo: Arx, 2002.

SUERTEGARAY, D. M. A. (1987) **A Trajetória da Natureza: um estudo geomorfológico sobre os areais de Quaraí/RS**. 243f. Tese de Doutorado em Geografia Física com ênfase em Geomorfologia - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SUERTEGARAY, D. M. A., MOURA, N. S. V. e NUNES, J. O. R. (1989) São Francisco de Assis e Alegrete: **Uma Análise Geomorfológica da Ocorrência de Arais**. III Simpósio de Geografia Física Aplicada, 1989, Nova Friburgo. Anais III Simpósio de Geografia Física Aplicada. UFRJ p. 384-397. Nova Friburgo, Rio de Janeiro.

TEIXEIRA, F. B.; Satélites meteorológicos: Imagens, aplicações e curiosidades. **Tipografia Iris**,190p 2016.

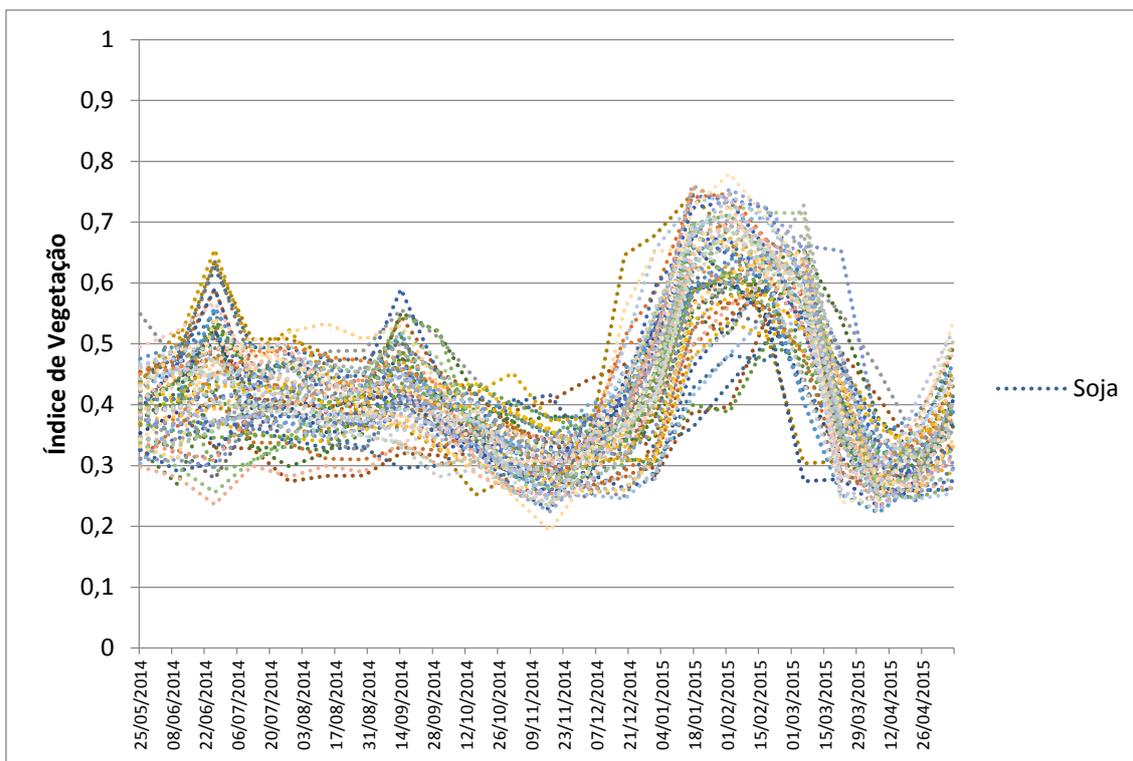
USGS. **Global VisualizationViewer (GLOVIS)**. Disponível em: <http://glovis.usgs.gov>. Acesso em: 20 de maio de 2016

WAGNER, A. P.; WEBER, E.; FONTANA, D. C.; DUCATI J. R.; KLERING, E. **Estimativa de Área de Soja no Rio Grande do Sul Utilizando Imagens NDVI/MODIS**. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 457-464.

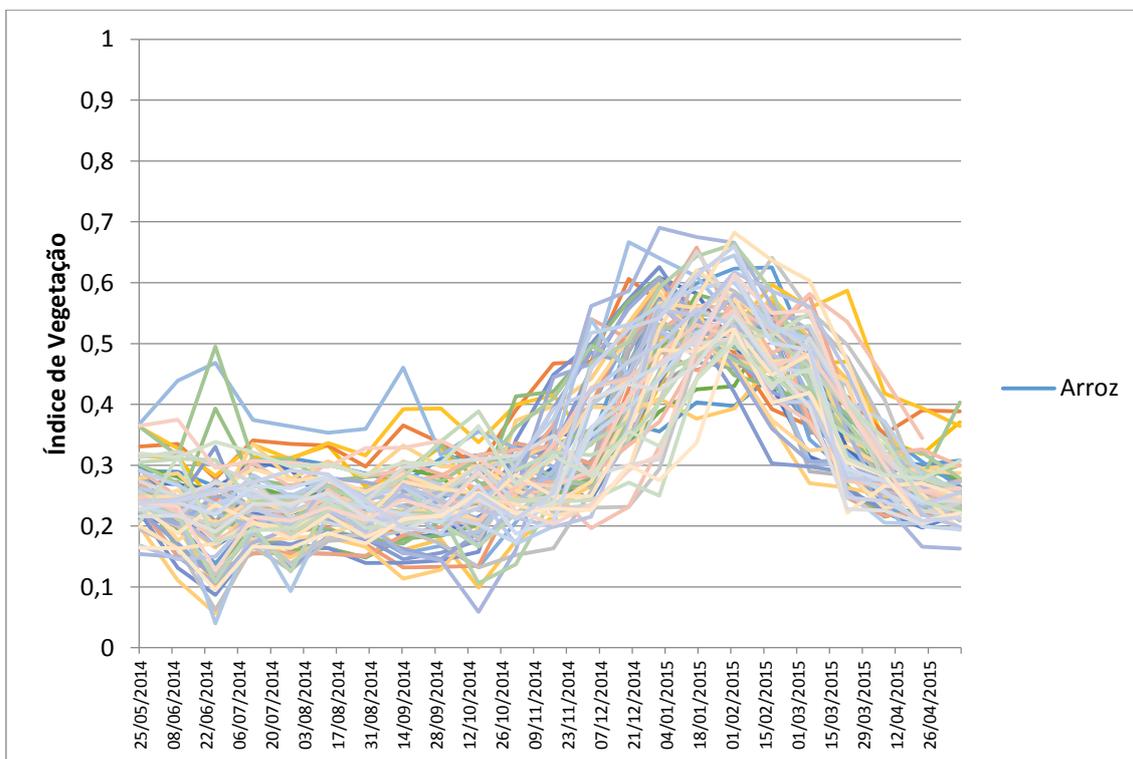
ZANOTTA, D. C.; Novak, T.; Coura, S. M. da C.; Zani, H.; Almeida, C. M. **Deteção de queimadas no Pantanal a partir de classificação orientada a objeto e informações multiespectrais de sensoriamento remoto**. Anais 3º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Cáceres, MT, 16-20 de outubro 2010 Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.800.800 - 808.

ZANOTTA, D. C.; **Uma metodologia adaptativa baseada em objetos para deteção semi-automática de desmatamento na Amazônia por imagens de sensoriamento remoto /** Daniel Capella Zanotta. – São José dos Campos: INPE, 2014. xxvi + 113 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.01.05.56-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

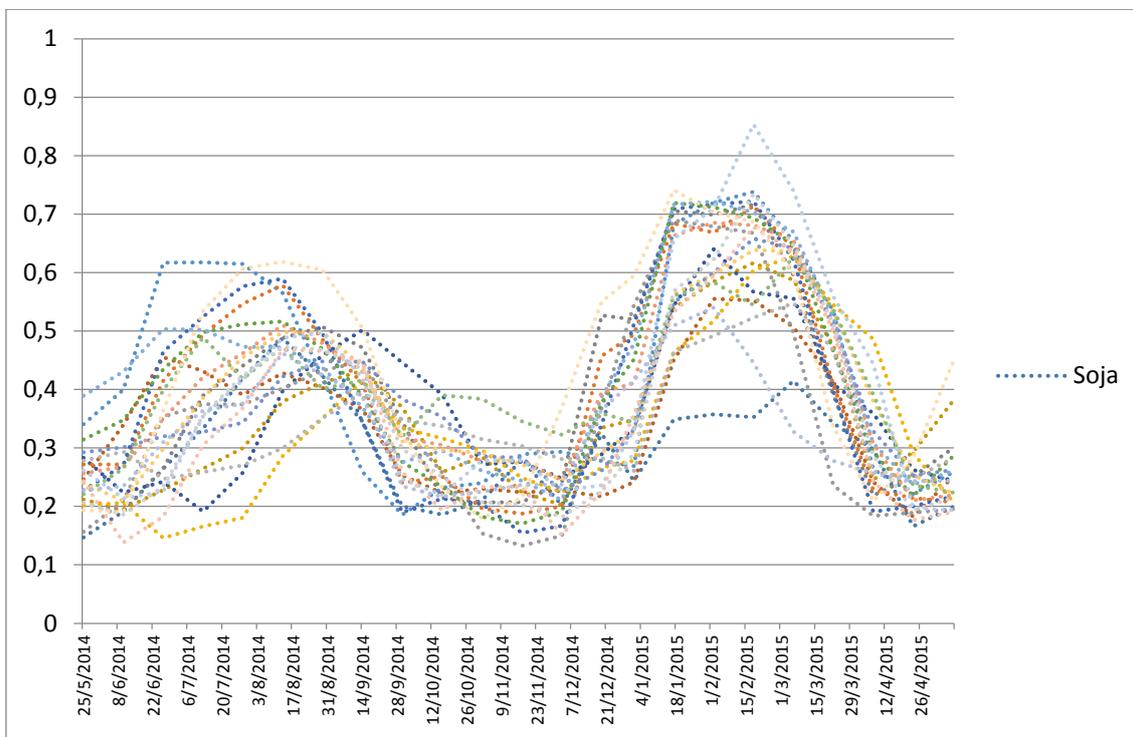
APÊNDICE 1 – Perfil espectro-temporal do índice de vegetação realçado (EVI) para a cultura da soja nas região ecoclimática da Depressão Central no período de maio de 2014 a maio de 2015.



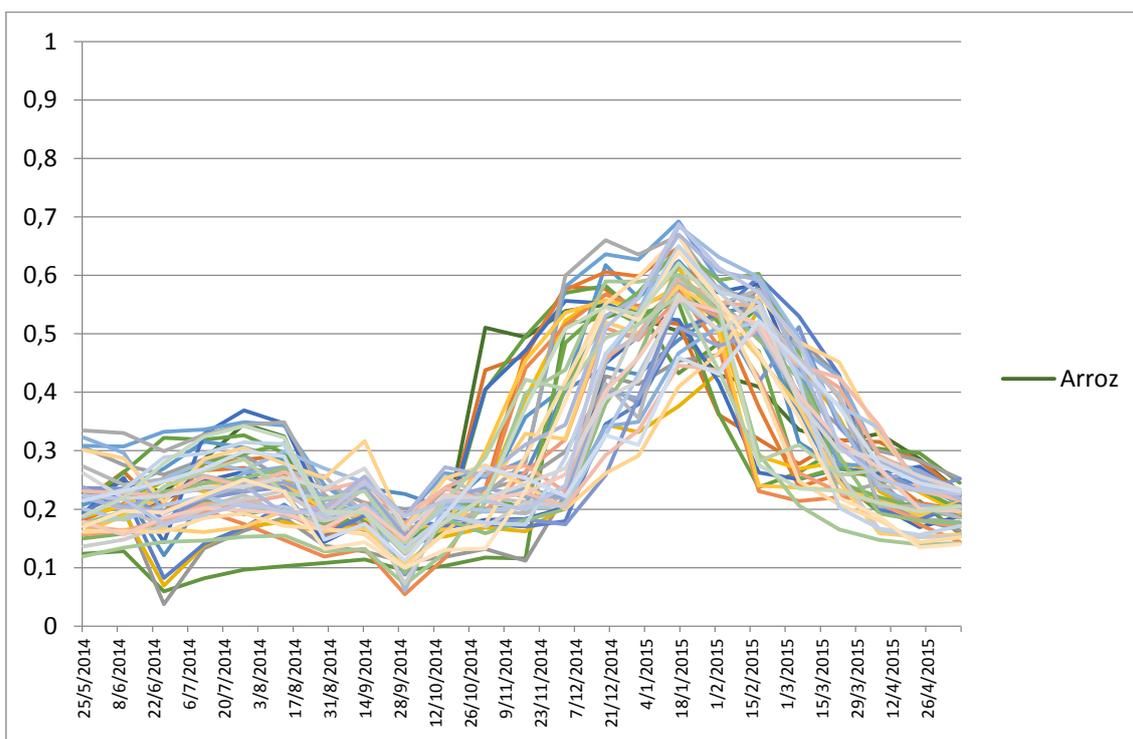
APÊNDICE 2 – Perfil espectro-temporal do índice de vegetação realçado (EVI) para a cultura do arroz na região ecoclimática da Depressão Central no período de maio de 2014 a maio de 2015.



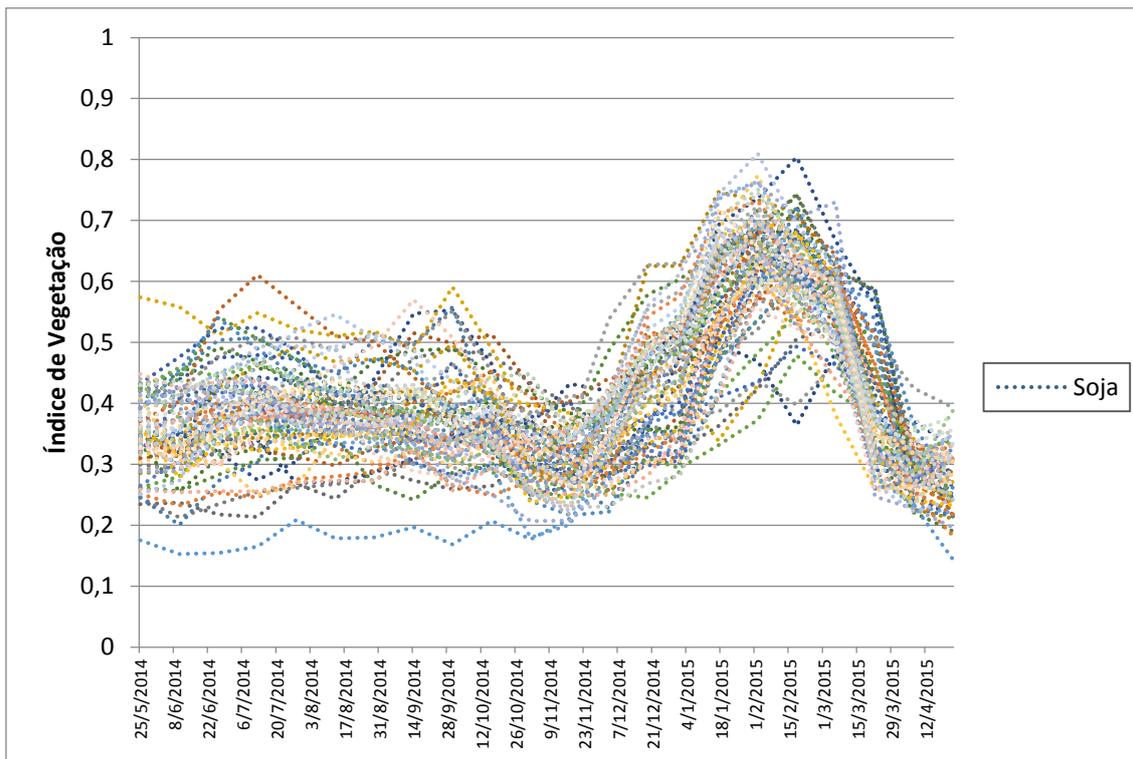
APÊNDICE 3 – Perfil espectro-temporal do índice de vegetação realçado (EVI) para a cultura da soja nas região ecoclimática do Baixo Vale do Uruguai no período de maio de 2014 a maio de 2015.



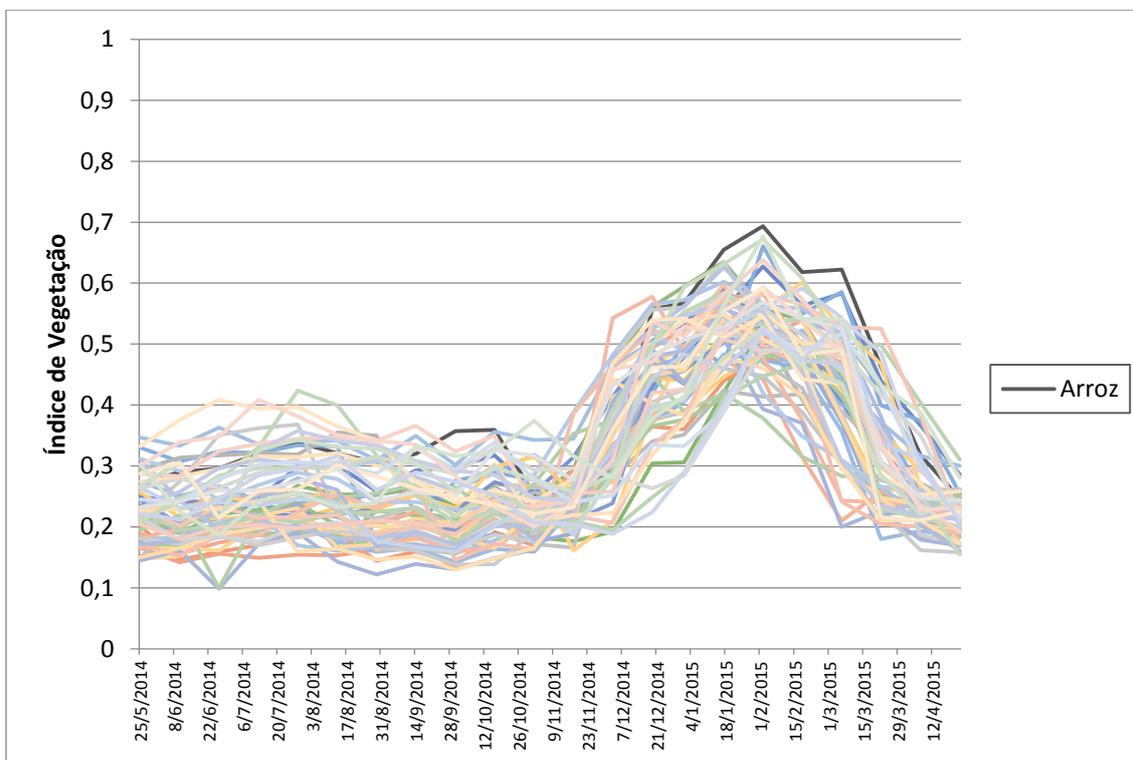
APÊNDICE 4 – Perfil espectro-temporal do índice de vegetação realçado (EVI) para a cultura do arroz na região ecoclimática do Baixo Vale do Uruguai no período de maio de 2014 a maio de 2015.



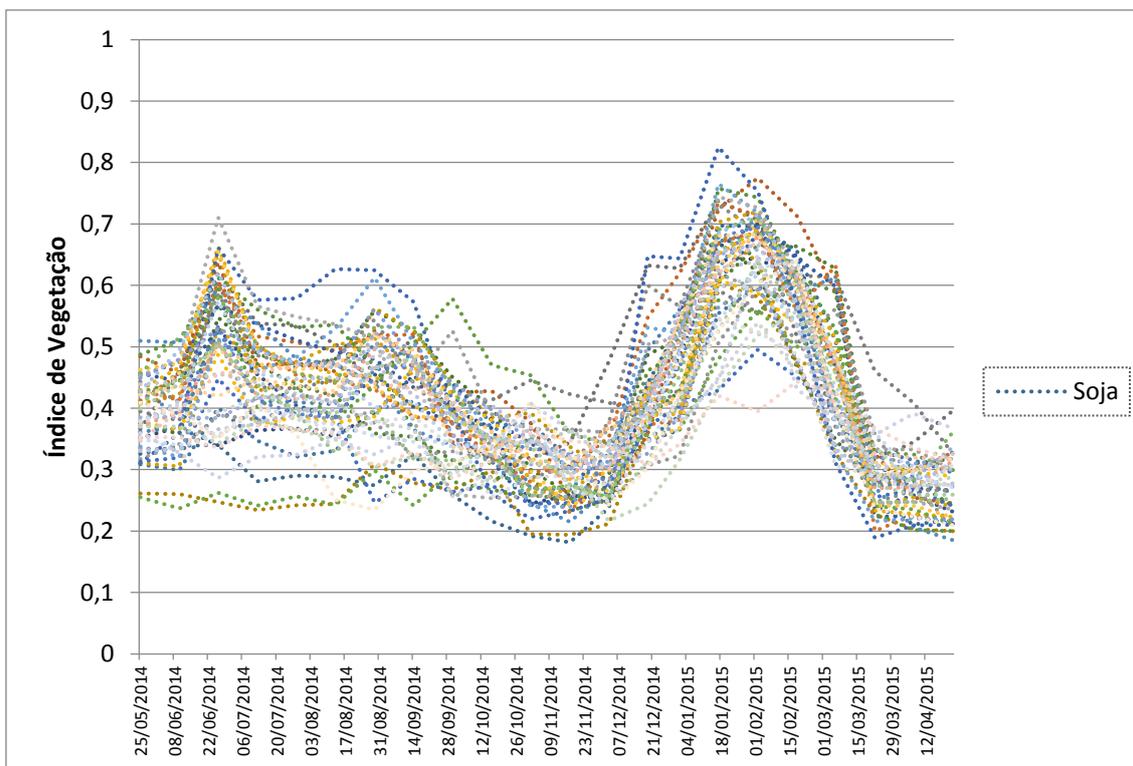
APÊNDICE 5 – Perfil espectro-temporal do índice de vegetação realçado (EVI) para a cultura da soja na região ecoclimática da Campanha no período de maio de 2014 a maio de 2015.



APÊNDICE 6 – Perfil espectro-temporal do índice de vegetação realçado (EVI) para a cultura do arroz na região ecoclimática da Campanha no período de maio de 2014 a maio de 2015.



APÊNDICE 7 – Perfil espectro-temporal do índice de vegetação realçado (EVI) para a cultura da soja na região ecoclimática das Grandes Lagoas no período de maio de 2014 a maio de 2015.



APÊNDICE 8 – Perfil espectro-temporal do índice de vegetação realçado (EVI) para a cultura do arroz na região ecoclimática das Grandes Lagoas no período de maio de 2014 a maio de 2015.

