UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Territorial e Sistemas Agroindustriais

Dissertação

Geotecnologia na caracterização da expansão do cultivo da soja no Sul do Rio Grande do Sul.

Daniel Baptista de Medeiros

Pelotas, 2023

Daniel Baptista de Medeiros

Geotecnologia na caracterização da expansão do cultivo da soja no Sul do Rio Grande do Sul.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Territorial e Sistemas Agroindustriais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Territorial e Sistemas Agroindustriais.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Costa Campos
Co-Orientador: Prof. Dr. Mario Duarte Canever

Pelotas, 2023

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

M488g Medeiros, Daniel Baptista de

Geotecnologia na caracterização da expansão do cultivo da soja no Sul do Rio Grande do Sul [recurso eletrônico] / Daniel Baptista de Medeiros; Rogério Costa Campos, orientador ; Mário Duarte Canever, coorientador. — Pelotas, 2023.

40 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Territorial e Sistemas Agroindustriais, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. Soja. 2. Expansão. 3. Mapeamento. 4. Classificação supervisionada. 5. Aspecto econômico. I. Campos, Rogério Costa, orient. II. Canever, Mário Duarte, coorient. III. Título.

CDD 633.346

Elaborada por Ubirajara Buddin Cruz CRB: 10/901

Daniel Baptista de Medeiros

Geotecnologia na caracterização da expansão do cultivo da soja no Sul do Rio Grande do Sul.

Dissertação aprovada, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Desenvolvimento Territorial e Sistemas Agroindustriais, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Territorial e Sistemas Agroindustriais, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 11 de agosto de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rogério Costa Campos
(Orientador)
Doutor em: Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil

Prof. Dr. Marcelo Fernandes Pacheco Dias
Doutor em: Agronegócios, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil

Profa. Dra Daniela Arnold Tisot
Doutora em: Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil

Prof. José Marinaldo Gleriani
Doutor em: Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil

Resumo

O cultivo da soja é a principal atividade agrícola no Brasil. Sua importância econômica decorre da versatilidade do grão na indústria que pode ser utilizado para consumo humano, para criação animal e para a produção de biocombustíveis. A quantificação das áreas agrícolas com soja nos municípios brasileiros é realizada por meio de uma metodologia do IBGE denominada Pesquisa Agrícola Municipal-PAM, que é baseada em um levantamento subjetivo, que não implica na mensuração da área. Portanto, justifica-se a importância da utilização de outras metodologias de maior precisão para mapear áreas de soja, que são realizadas de forma objetiva e produzem resultados que podem ser utilizados posteriormente como informações importantes no planejamento de políticas públicas voltadas à sojicultura. Uma destas metodologias consiste no uso de imagens geradas por meio de sensores a bordo de satélites, que possibilitam mapear a expansão das áreas de soja sobre outros usos/coberturas de solo, e com isso avaliar o impacto desta expansão na economia da região. O presente estudo teve por objetivo realizar o mapeamento das áreas cultivadas com soja nos municípios de Jaguarão, Arroio Grande e Santa Vitória do Palmar entre 1999 e 2022. O mapeamento da soja durante este período permitiu verificar sobre quais usos/coberturas a soja se expandiu e avaliar o impacto no aspecto econômico dos municípios. Foram utilizadas imagens das plataformas Landsat 5, 7 e 8 nas bandas do Vermelho, do Infravermelho Próximo e do Infravermelho Médio no período de dezembro a maio de cada ano-safra. O mapeamento foi realizado por meio de classificação supervisionada com o algoritmo de aprendizado de máquina *Random Forest* no sistema de informações geográficas Qgis. Para os três municípios estudados, a classificação supervisionada gerou valores de índice *kappa* considerados excelentes, houve uma expansão das áreas cultivadas com soja, as classes que mais cederam espaço para a soja foram pastagem e arroz e foi constatado um aumento da participação da cultura no PIB municipal, durante o período estudado. Ao comparar a rentabilidade do cultivo de soja com o cultivo de arroz, este demostrou ser mais rentável que aquele. A ocupação da soja nas áreas mapeadas parece ser mais rentável ao produtor rural do que ocupações tradicionais como pasto nativo, porém não é mais rentável do que a ocupação alternativa de arroz. Também se pode sugerir que o aumento na área de soja contribuiu com o aumento do PIB dos municípios estudados.

Palavras-chave: soja; expansão; mapeamento; classificação supervisionada, aspecto econômico

Abstract

Soybean cultivation is the main agricultural activity in Brazil. Its economic importance stems from the versatility of the grain in the industry that can be used for human consumption, for animal husbandry and for the production of biofuels. The quantification of agricultural areas with soybeans in Brazilian municipalities is carried out using an IBGE methodology called Pesquisa Agrícola Municipal-PAM, which is based on a subjective survey, which does not imply measuring the area. Therefore, the importance of using other more accurate methodologies to map soybean areas is justified, which are carried out objectively and produce results that can be used later as important information in the planning of public policies aimed at soybean cultivation. One of these methodologies consists of the use of images generated by means of sensors on board satellites, which makes it possible to map the expansion of soybean areas over other land uses/covers, and thereby assess the impact of this expansion on the region's economy. The present study aimed to map the areas cultivated with soybeans in the municipalities of Jaguarão, Arroio Grande and Santa Vitória do Palmar between 1999 and 2022. The mapping of soybeans during this period made it possible to verify which uses/coverages soybeans expanded and to evaluate the impact on the economic aspect of the municipalities. Images from Landsat 5, 7 and 8 platforms were used in the Red, Near Infrared and Medium Infrared bands from December to May of each crop year. Mapping was performed through supervised classification with the Random Forest machine learning algorithm in the geographic Information System Qgis. For the three municipalities studied, the supervised classification generated kappa index values considered excellent, there was an expansion of areas cultivated with soybeans, the classes that most gave way to soybeans were pasture and rice, and an increase in the participation of the crop in the municipal GDP was observed during the period studied. Comparing the profitability of soybean cultivation with rice cultivation, the latter proved to be more profitable. The occupation of soy in the mapped areas seems to be more profitable for the rural producer than traditional occupations such as native pasture, but it is not more profitable than the alternative occupation of rice. It can also be suggested that the increase in soybean area contributed to the increase in the GDP of the municipalities studied.

Keywords: soybean; expansion; mapping; supervised classification, economic aspect

Sumário

1. Introdução 5
1.1 Objetivos 7
2. Metodologia 7
2.1 Área de estudo 7
2.2 Imagens de satélite e mapeamento da soja 8
2.3 Mapeamento 11
2.3.1 Classificação 12
3. Resultados e discussão 15
3.1 Desempenho da classificação 15
3.2 Resultados do mapeamento 16
3.3 Área e produtividade 22
3.4 Análise da expansão da soja sobre outros usos de solo 24
3.5 Classificação vs IBGE 28
3.6 Expansão da soja e impacto no PIB 31
3.7 Valor da produção Soja vs Arroz 32
4. Conclusão 33
Referências 34

1. Introdução

O cultivo da soja é a principal atividade agrícola no Brasil, sua importância econômica ocorre em virtude da versatilidade do grão na indústria, como fonte de proteína para criação animal e a produção de biocombustíveis (FPA, 2021). Esta importância reflete-se nos grandes volumes de produção e comercialização da soja pelo mercado brasileiro, como por exemplo a produção de 134,9 milhões de toneladas e a geração de um montante de R$ 341,7 bilhões decorrentes de sua comercialização no ano-safra 2021-22 (IBGE, 2022a).

A quantificação das áreas agrícolas dos municípios dos estados brasileiros é realizada pelo IBGE, por meio de uma compilação de dados denominada Produção Agrícola Municipal (PAM), que tem por finalidade a divulgação de valores de área plantada, área destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e preço médio pago ao produtor para diversas culturas temporárias e permanentes presentes em cada município do Brasil a cada ano civil (IBGE, 2022c). Esta compilação possui algumas limitações devido ao fato de que as grandezas descritas anteriormente são coletadas apenas por meio de questionários que o agente do IBGE aplica a produtores, entidades e técnicos do setor agrícola de cada município (IBGE, 2022d). Métodos de mapeamento para determinar com maior precisão a localização e as dimensões espaciais das áreas agrícolas conferem vantagens em relação aos levantamentos por questionário, pois permitem analisar o desempenho agrícola nas interações espaço-temporais e a dinâmica do uso do solo.

Imagens geradas por sensores a bordo de satélites permitem a identificação e posterior mapeamento de áreas de cultivos agrícolas (JENSEN, 2009; JOHNSON e MUELLER, 2021). Identificam-se visualmente na imagem os alvos a serem mapeados, por meio de padrões espectro-temporais que estes apresentam. Em seguida, os alvos com padrões semelhantes são agrupados na mesma classe temática e realiza-se o processo de classificação.

Neste contexto, a importância do mapeamento da distribuição espacial da soja por meio da utilização de imagens a bordo de satélites se dá pela maior precisão que este método pode oferecer na detecção dos valores de área de soja obtidos em comparação com os resultados obtidos pela metodologia do IBGE. Sob posse de valores de área mais próximos da realidade, as entidades governamentais possuem

ferramentas disponíveis para o estabelecimento de políticas públicas de fomento voltadas ao setor agrícola, uma vez que ao se determinar com precisão os valores de área cultivada com uma determinada cultura em uma determinada região, as políticas de fomento a esta cultura poderão ser elaboradas com maior assertividade.

Ao longo do tempo, houve um avanço nas condições para a realização de mapeamento de uso/cobertura do solo, em virtude do advento de sensores mais precisos e a possibilidade da utilização de diversos sensores integrados (TOTH e JÓZCÓW, 2015), bem como há atualmente uma grande disponibilidade de algoritmos de linguagem de programação utilizados como ferramentas para Sistemas de Informações Geográficas (PSU, 2023), que possibilitaram a execução de processos com resultados mais próximos da realidade.

Dentre os estados brasileiros, o Rio Grande do Sul é atualmente o terceiro maior produtor de soja. O estado experimentou um aumento da área plantada e volume de produção de 3,054 milhões de hectares e 4,46 milhões de toneladas respectivamente no ano-safra 1999-00 para 6,107 milhões de hectares e 20,42 milhões de toneladas no ano-safra 2021-22 (IBGE, 2022b).

A partir dos anos 90, a produção de soja teve um impulso proporcionado pela Lei Kandir (1996), que isenta a cobrança de ICMS (Imposto sobre a Circulação de Mercadorias) na circulação de produtos primários (BRASIL, 1996). No sul do Rio Grande do Sul, as áreas cultivadas com soja têm experimentado um grande aumento a partir do início dos anos 2000 nas regiões do Bioma Pampa, sobretudo em áreas em que anteriormente havia a presença de milho e pastagem nativa. Este aumento se deu em virtude do maior e mais rápido retorno econômico da soja em comparação com a pecuária (KUPLICH et al, 2018). Novas técnicas de manejo agrícola surgiram para viabilizar da soja também nas várzeas, onde tradicionalmente é produzido arroz. Esta expansão se concretizou com a adoção de práticas de drenagem com sistemas de camalhão de base larga para o rebaixamento do nível do lençol freático e consequente redução do estresse hídrico sofrido pela soja em áreas de terras baixas (ROSSO et al., 2018).

O objetivo deste estudo foi mapear a expansão da soja no sul do estado do Rio Grande do Sul entre os anos de 1999 e de 2022. O mapeamento de como se dá a evolução da área cultivada na região sul do RS permite a mensuração mais precisa do impacto dessa expansão sobre o desenvolvimento espacial, bem como projetar futuras perspectivas para a economia agrícola desta região.

1.1 Objetivos

O presente estudo teve por objetivo realizar o mapeamento das áreas cultivadas com soja em três municípios do sul do estado do Rio Grande do Sul nos seguintes anos-safra: 1999-00, 2000-01, 2003-04, 2007-08, 2008-09, 2013-14, 2016-17, 2018-19, 2020-21 e 2021-22, com a finalidade de detectar a expansão/retração da soja durante este período, identificar sobre quais outros usos/coberturas a soja se expandiu/retraiu e avaliar seu impacto no aspecto econômico destes municípios por meio da mensuração de sua participação no PIB municipal e a comparação da rentabilidade de seu cultivo com a rentabilidade do cultivo alternativo de arroz .

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

A região do estudo corresponde aos municípios de: Jaguarão, Arroio Grande e Santa Vitória do Palmar (Figura 1).

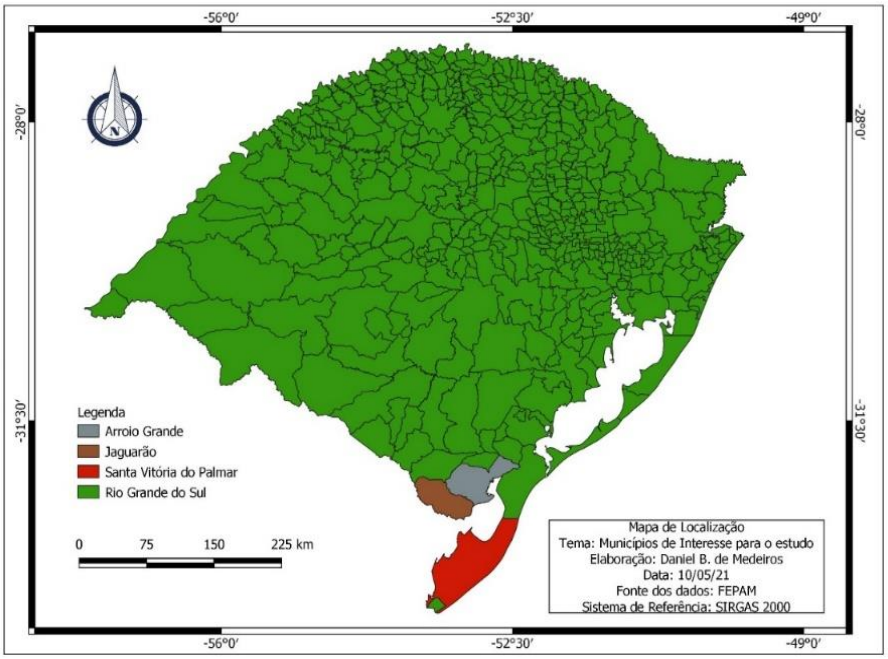

Figura 1 – Área de estudo

O município de Jaguarão possui uma área de 2.051,845 Km², com as seguintes confrontações: ao norte com o município de Herval, ao sul com a Lagoa Mirim, ao leste com o município de Arroio Grande e à oeste com o departamento de Rio Branco,

Uruguai. Possui cerca de 26.500 habitantes com sua economia baseada em agropecuária, serviços e comércio (SEBRAE, 2020a; IBGE, 2021).

O município de Arroio Grande possui uma área de 2.518,480 km², com as seguintes confrontações: ao norte com Capão do Leão e Pedro Osório, ao sul com a Lagoa Mirim, ao leste com Rio Grande e à oeste com Jaguarão e Herval. Possui cerca de 18.935 habitantes e assim como o município de Jaguarão sua economia é baseada em agropecuária, serviços e comércio (SEBRAE, 2020b).

O município de Santa Vitória do Palmar possui uma área de 5.195,667 km² com as seguintes confrontações: ao norte com o município de Rio Grande, ao sul com o município de Chuí, ao leste com o Oceano Atlântico e à oeste com a Lagoa Mirim. Possui cerca de 30.990 habitantes. Sua economia é baseada em agricultura, pecuária e geração de energia eólica (PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTA VITÓRIA DO PALMAR, 2021).

Os três municípios foram escolhidos em virtude de estarem presentes na área de interesse estudada e por possuírem juntos uma produção superior a 100.000 hectares de soja para o ano-safra 2021-22 (IBGE, 2022b).

2.2 Imagens de satélite e mapeamento da soja

A área cultivada com soja nos municípios selecionados para o estudo foi mapeada nos anos-safra 1999-00, 2000-01, 2003-04, 2007-08, 2008-09, 2013-14, 2016-17, 2018-19, 2020-21 e 2021-22. Para tal, foram utilizadas imagens de reflectância de superfície dos sensores TM, ETM+ e OLI. O processamento e download foi realizado por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE), que permite a realização de processamento, análise e *download* de dados geoespaciais dentro da infraestrutura da plataforma *Google*, por meio da utilização de códigos em linguagem R, *Pythom* e *JavaScript* (GOOGLE, 2022a).

Foram adquiridas imagens dentro do período de dezembro a maio de cada ano-safra analisado. Por apresentar variações na sua resposta espectral em função do seu estádio de desenvolvimento, a detecção da presença da soja em cada município requereu a observação de imagens de datas diferentes dentro do mesmo ano-safra, para que fosse possível identificar a soja em sua máxima expressão em pelo menos uma destas datas (conforme exemplo da Figura 2). Para identificar esta presença, as bandas Infravermelho Próximo (NIR), Infravermelho Médio de Ondas Curtas 1 (SWIR1) e Vermelho (RED) foram selecionadas, uma vez que nesta composição a

soja apresenta um comportamento espectral que a diferencia dos demais alvos por possuir altos valores de reflectância nas bandas NIR e SWIR1 e um baixo valor de reflectância na banda RED em comparação com outras culturas agrícolas e consequentemente apresenta uma coloração amarelo-alaranjado quando vista em uma cena de composição NIR-SWIR1-RED associada ao RGB (Figura 3). (RIZZI, 2004; RIZZI e RUDORFF, 2005; SANCHES et al., 2005).

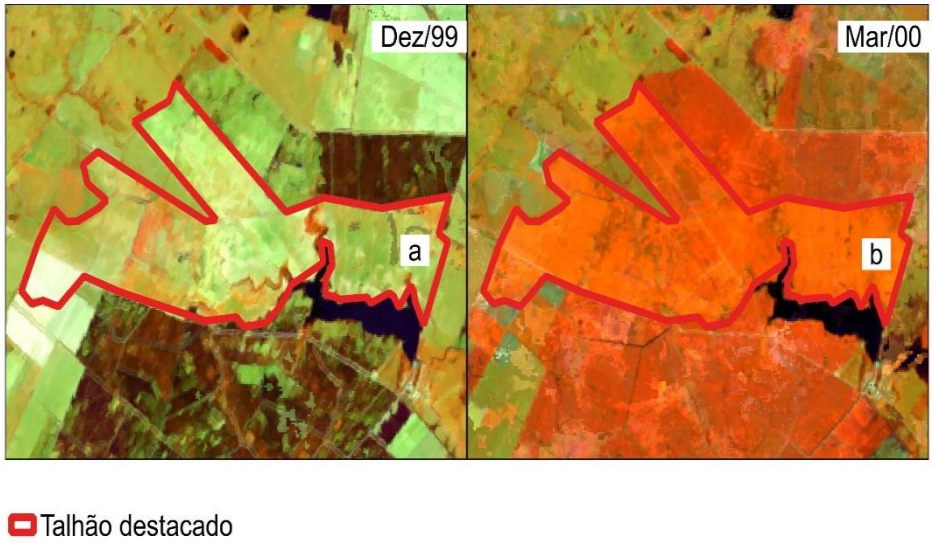

Figura 2- Recorte de uma porção do município de Jaguarão para o ano-safra 1999-00 com destaque para a mesma área em dois momentos distintos: (a) sem a presença de soja em data; (b) com a presença de soja em data.

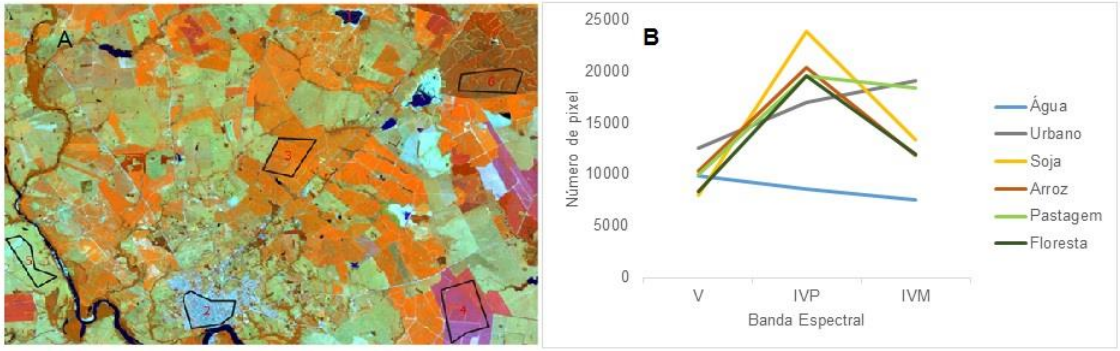

Figura 3 – Mediana do mês de março de 2021 das imagens adquiridas pelos sensoresTM, ETM+ e OLI. A: Alvos mapeados: (1) água (azul escuro), (2) urbano (ciano), (3) soja (amarelo-alaranjado), (4) arroz (avermelhado), (5) pastagem (esverdeado) e (6) floresta (marrom), em composição R(IVP), G(IVM) e B(V). B. Comportamento espectral dos alvos citados na presente data.

O comportamento espectral distinto da soja (Figuras 2 e 3) está associado a características estruturais do dossel em fases específicas do ciclo. Principalmente por conta da estrutura mais planófila da orientação das folhas, a interceptação e o espalhamento da radiação ocorrem nas primeiras camadas do dossel, em oposição com outros alvos com estrutura erectófila, a exemplo do arroz (LEMOS, 2016).

Os sensores orbitais utilizados foram TM, ETM+ e OLI, respectivamente presentes nas plataformas Landsat 5, 7 e 8 (Tabela 1).

Tabela 1 – Características gerais dos sensores utilizados.

Sensor	RE	RT	V (µm)	IVP (µm)	IVM (µm)
TM	30	16	(0,63-0,69)	(0,76-0,90)	(1,55-1,75)
ETM+	30	16	(0,63-0,69)	(0,775-0,90)	(1,55-1,75)
OLI	30	16	(0,63-0,68)	(0,845-0,885)	(1,56-1,66)

RE: Resolução Espacial (m); RT: Resolução Temporal (d).
Fonte: Adaptado de NASA: 2023a, 2023b, 2023c e 2023d.

Os dados foram obtidos dos produtos LANDSAT/LT05/C01/T1_SR, LANDSAT/LT07/C01/T1_SR e LANDSAT/LT08/C01/T1_SR do acervo da plataforma GEE (GOOGLE, 2022b). O sistema de coordenadas utilizado foi o sistema de coordenadas planas, projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000, Zona UTM 22 Sul, Meridiano Central -51°. As órbitas/ponto das imagens utilizadas foram 221/083, 222/082 e 222/083.

As bandas RED, NIR e SWIR1 foram utilizadas por conta da baixa correlação entre as mesmas, bem como do conhecimento prévio sobre a identificação visual dos alvos na composição falsa cor R(NIR), G(SWIR1) e B(RED) (Figuras 3 e 4) (SANCHES et al., 2005). A composição realizada foi 453/RGB nos Sensores TM e ETM+ e 564/RGB no sensor OLI.

Medianas mensais das imagens foram obtidas para o período de dezembro a maio dos anos analisados. O processamento realizado na plataforma GEE envolveu as etapas de filtragem para nuvens e sombra de nuvens e de harmonização entre os sensores. Os pixels que permaneceram indisponíveis no mês por conta da interferência atmosférica foram interpolados como o valor médio da reflectância dos dois meses anteriores e dos dois meses posteriores.

Após a aquisição e os processamentos descritos anteriormente, foi formada uma composição em falsa-cor das bandas NIR-SWIR1-RED em RGB para a identificação da soja nas imagens em cada ano-safra levantado.

Na etapa de seleção de amostras de treinamento, a distinção entre soja e os demais alvos foi apoiada na coloração, textura e forma dos alvos na composição citada anteriormente. As classes temáticas definidas no processo de treinamento do classificador foram: água, urbano, soja, arroz, pastagem e floresta. A seguir (Tabela 2) consta a descrição dos critérios para coleta de amostras das classes de uso do solo

para cada alvo analisado no início, meio e fim do período de dezembro a maio de cada ano-safra:

Tabela 2 – Chave de interpretação para as classes

	Alvo	Cor	Textura	Forma
Início	Água	Azul escuro/Preto	Lisa	Irregular
	Urbano	Ciano	Rugosa	Regular (diversos quadriláteros aglomerados)
	Soja	Azulado	Lisa	Regular (talhão agrícola)
	Arroz	Azulado/Marrom	Lisa	Regular (talhão agrícola e presença de canais de irrigação típicos da cultura)
	Pastagem	Marrom	Rugosa	Irregular
	Floresta	Marrom	Rugosa	Irregular (eventuais presenças de sombra e/ou serpenteamento de corpos d'água)
Meio	Água	Azul escuro/Preto	Lisa	Irregular
	Urbano	Ciano	Rugosa	Regular (diversos quadriláteros aglomerados)
	Soja	Amarelo-alaranjado	Lisa	Regular (talhão agrícola)
	Arroz	Avermelhado	Lisa	Regular (talhão agrícola e presença de canais de irrigação típicos da cultura)
	Pastagem	Esverdeado	Rugosa	Irregular
	Floresta	Marrom	Rugosa	Irregular (eventuais presenças de sombra e/ou serpenteamento de corpos d'água)
Final	Água	Azul escuro/Preto	Lisa	Irregular
	Urbano	Ciano	Rugosa	Regular (diversos quadriláteros aglomerados)
	Soja	Azulado/Esverdeado	Lisa	Regular (talhão agrícola)
	Arroz	Azulado/Esverdeado	Lisa	Regular (talhão agrícola e presença de canais de irrigação típicos da cultura)
	Pastagem	Marrom	Rugosa	Irregular
	Floresta	Marrom	Rugosa	Irregular (eventuais presenças de sombra e/ou serpenteamento de corpos d'água)

2.3 Mapeamento

O mapeamento foi realizado por meio da classificação supervisionada com o algoritmo de aprendizado de máquina *Random Forest* no sistema de informações geográficas Qgis. Este algoritmo é constituído por um grupo de árvores de decisão que são formadas a partir de um conjunto de dados. Para a construção de cada árvore, são retirados aleatoriamente 2/3 dos dados deste conjunto para a formação de um subconjunto (*Bootstrap Dataset*). Deste subconjunto é retirada a característica que melhor separa dos dados e esta é utilizada como nó inicial da árvore de decisão. Posteriormente, as demais características do subconjunto completam a formação dos demais nós desta árvore e o processo de decisão é executado. O 1/3 restante dos dados remanescentes no conjunto original (*out of bag*) é utilizado para validar a decisão e então o processo recomeça com a formação de uma nova árvore. A decisão

final sobre a classificação é definida em um sistema de votação em que a classe mais votada pelas árvores é atribuída ao pixel (BREIMAN, 2001; HARTSHORN, 2016).

O *Random Forest* é uma ferramenta largamente utilizada para a classificação supervisionada de imagens com a finalidade da identificação e quantificação de áreas agrícolas em uma determinada região. Dentre diversas de suas aplicações, destaca-se seu uso na classificação de áreas com: diversos cultivos agrícolas analisados simultaneamente nos Estados Unidos, China e França (LIN et al.,2022); cana-de-açúcar no Brasil (CASTRO et al., 2022) e algodão na China (FEI et al., 2022), em que se obteve valores de acurácia global, índice *kappa* ou pontuação f-1 superiores a 0,8.

2.3.1 Classificação

A figura 4 apresenta o fluxograma do processamento e classificação das imagens:

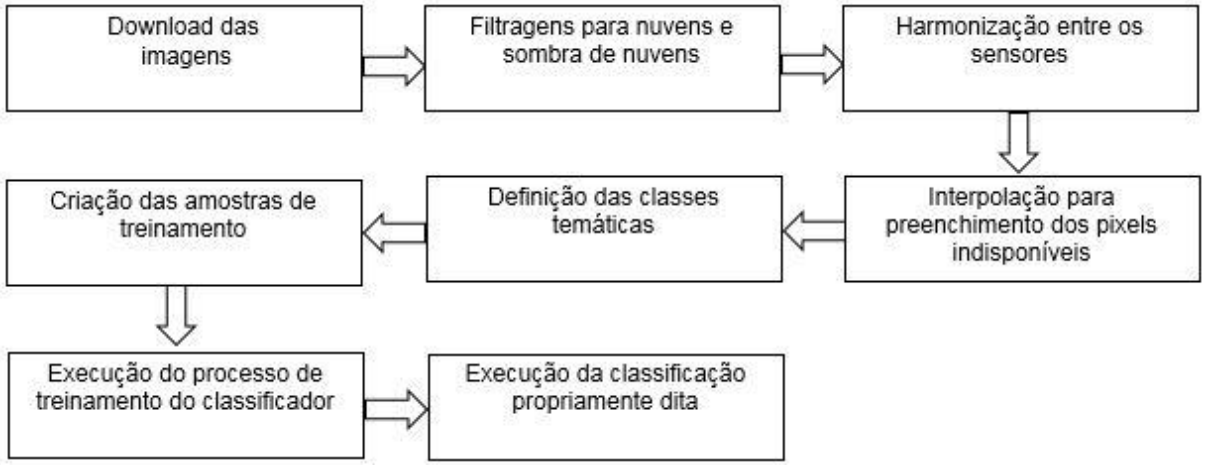

Figura 4 – Fluxograma do processamento e classificação das imagens.

Para treinar o classificador, foi criado um conjunto de amostras de treinamento de polígonos em formato *shapefile* (Figura 5) para cada um dos municípios e anos-safra estudados.

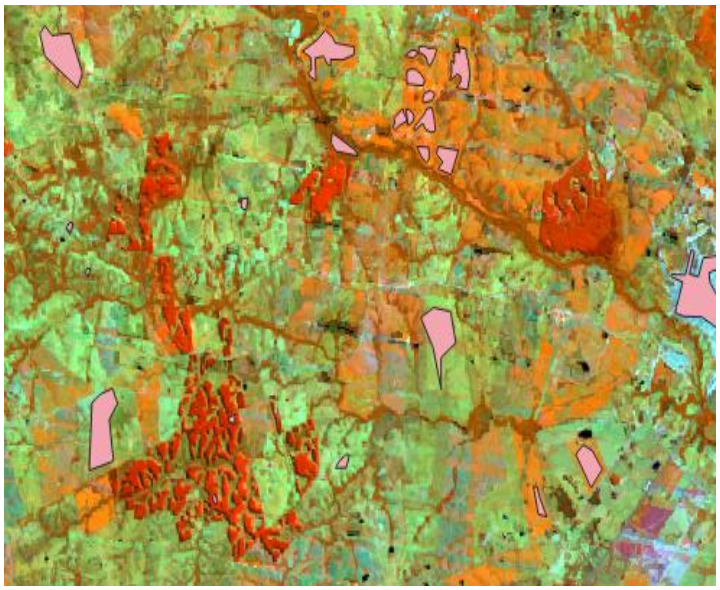

Figura 5 – Exemplo de polígonos (em cor rosa) que foram utilizados como amostras durante o processo de classificação supervisionada (composição 564/RGB em uma cena Landsat de março de 2021).

As classes temáticas citadas anteriormente foram identificadas visualmente conforme os critérios citados na tabela 2. Após a identificação de uma classe, desenhava-se um polígono sobre a mesma, de modo que cada polígono criado foi associado à uma e apenas uma classe.

Após a criação das amostras, foi realizado o treinamento do algoritmo *Random Forest* para a obtenção da estatística índice *kappa* (κ) para cada um dos mapeamentos. O cálculo do índice *kappa* é apresentado na equação 1 (CONGALTON e GREEN, 1998 apud SANTOS, et al. 2010):

$$\kappa = \frac{(D-Q)}{(T-Q)} \text{ em que}$$

D: elementos da diagonal principal da matriz de confusão;

T: número total de amostras;

Q: $\sum_{i=1}^{r}(X_{i+}X_{+i})$;

κ: índice *kappa*.

Neste treinamento, o algoritmo foi alimentado com o conjunto de amostras criado. 70% das amostras deste conjunto foram utilizadas para o treinamento propriamente dito e o restante foi reservado para a validação deste treinamento. Desta forma, os 70% do conjunto das amostras que foram submetidos ao treinamento foram comparados aos 30% restantes que foram utilizados como a "verdade". No final do processo, foram obtidos os valores de κ gerados a partir de uma matriz de confusão criada com os pixels selecionados pelo algoritmo para o treinamento do mesmo, bem como um arquivo de modelo de treinamento com extensão XML que foi utilizado na fase seguinte.

Após a fase anterior, foi realizada a classificação propriamente dita. Nesta fase, o arquivo modelo de treinamento gerado anteriormente foi utilizado pelo algoritmo como modelo de base para a identificação de cada pixel na imagem a ser classificada. Assim, gerou-se uma camada classificada do tipo *raster*, em que cada pixel da imagem original foi atribuído à uma das classes temáticas listadas anteriormente.

Após a geração desta camada, foi introduzida manualmente na mesma uma nova classe temática denominada "outros", que teve por finalidade contemplar demais usos/coberturas do solo também presentes na área de estudo, porém em menor extensão (milho, feijão, etc.).

Em seguida, foi realizado o processo de edição manual da camada *raster* classificada, para a remoção/inserção de pixels classificados erroneamente nesta. Tal edição foi a última etapa do processo de classificação.

Como não houve visitas aos municípios estudados para levantamentos de campo nas áreas de interesse, não foi possível estabelecer pontos de controle nestas áreas para que estes balizassem os resultados obtidos na classificação.

Para mensurar o efeito da sojização na economia dos municípios, primeiramente multiplicou-se a área plantada pela produtividade, estimadas pelo método proposto. Esta multiplicação gerou o volume da produção de soja de cada município nos anos considerados no estudo. De posse dos dados de produção e considerando os preços médios da soja no Rio Grande do Sul (reais por quilo), obteve-se o valor da produção de soja em cada município para cada um dos anos da série. Finalmente, dividindo-se o valor da soja pelo PIB municipal, obteve-se a participação da soja no PIB municipal também em cada ano.

Para a comparação da rentabilidade do cultivo de soja com o cultivo alternativo de arroz, considerou-se as áreas que a classe "arroz" cedeu para a classe "soja" do

ano-safra 1999-00 para os anos-safra 2003-04, 2008-09, 2013-14, 2018-19 e 2021-22. Primeiramente, foram calculados o valor da produção e custo de produção para a soja nestas áreas. Em seguida, o uso de tais áreas foi substituído hipoteticamente de cultivo de soja para cultivo de arroz para que se pudesse simular qual seria a rentabilidade destas áreas caso o uso original do arroz houvesse sido mantido, e foram calculados novamente o valor da produção e custo de produção. Finalmente, foi calculada a diferença entre valor da produção e custo de produção para a situação real das áreas cultivadas com soja e para a situação hipotética da permanência do cultivo do arroz e esta diferença foi comparada entre as duas situações. Para as duas culturas, o valor da produção foi obtido pela multiplicação da área mapeada pela produtividade corrigida e seu resultado multiplicado pelo preço de venda da cultura (CONAB, 2022; EMATER, 2004, 2008, 2009, 2014, 2017, 2019, 2021, 2023; IRGA, 2022; SAMPAIO, 2001). Os valores de produtividade corrigida foram obtidos pela divisão do volume de produção (IBGE, 2022) pela área mapeada.

3. Resultados e discussão

3.1 Desempenho da classificação

Os valores de κ (Tabela 3) gerados para avaliar a classificação supervisionada para os municípios de Jaguarão, Arroio Grande e Santa Vitória do Palmar indicam um bom desempenho na separação das classes de interesse.

Tabela 3 – Valores de estatística k gerados para os três municípios.

Ano-safra	Jaguarão	Arroio Grande	Santa Vitória do Palmar
	Índice Kappa (k)		
1999-00	0,98	0,98	0,96
2000-01	0,98	0,97	0,96
2003-04	0,96	0,93	0,94
2007-08	0,93	0,95	0,97
2008-09	0,95	0,95	0,92
2013-14	0,95	0,90	0,95
2016-17	0,93	0,93	0,96
2018-19	0,96	0,95	0,94
2020-21	0,97	0,97	0,95
2021-22	0,97	0,97	0,96

As bandas utilizadas e o algoritmo RF se mostraram apropriados para escalar o processo de classificação de uso e cobertura do solo na zona Sul. Ressalva se faz ao processo de seleção das amostras de treinamento que não foi validado no campo, mas construído por meio do conhecimento prévio a respeito dos padrões espectrotemporais dos alvos agrícolas nas bandas V, IVP e IVM. Embora a metodologia apresentada não esteja isenta da presença de incertezas, uma vez que em alguns momentos da série temporal um ou mais alvos podem ser identificados erroneamente no momento da seleção das amostras de treinamento do classificador, a exemplo da soja que pode ser confundida com outros cultivos agrícolas quando no seu início de ciclo vegetativo (SANCHES et al., 2005), os valores de κ gerados durante a classificação supervisionada alcançaram um valor igual ou superior a 0,9, o que indica que o resultado da classificação supervisionada para os três municípios foi considerada excelente (LANDIS e KOCH, 1977).

A classificação de uso/cobertura do solo com imagens de satélite em áreas agrícolas com o algoritmo *Random Forest* tem apresentado bom desempenho com *kappa* de 0,83 a 0,95 para mapeamento de milho, soja e arroz no nordeste da China (DONG et al., 2023) e de 0,80 para soja e outras culturas anuais no Brasil (PARREIRAS et al., 2022). Desempenhos similares aos obtidos nesse estudo.

3.2 Resultados do mapeamento

A tabela 4 apresenta os valores de área em hectares para cada uma das classes temáticas de uso/cobertura do solo mapeadas e as figuras 6 e 7 apresentam respectivamente os mapas temáticos com estas classes e os mapas temáticos com a classe soja, para o município de Jaguarão.

Tabela 4 – Área em hectares obtida para cada a classificação temática anual no município de Jaguarão.

	Água	**Urbano**	**Soja**	**Arroz**	**Pastagem**	**Floresta**	**Outros**
1999-00	5099,58	473,97	2621,65	21166,13	170726,16	3687,43	2004,71
2000-01	5057,55	475,47	2608,52	19605,74	172029,86	3994,78	2007,71
2003-04	4795,98	492,73	6073,79	19254,49	167357,34	6064,78	1740,51
2007-08	3446,88	477,72	5981,47	21182,64	166162,47	6444,56	2083,89
2008-09	5232,43	441,70	7782,78	21322,62	163444,00	5336,00	2220,11
2013-14	3153,79	488,23	28872,73	21935,81	139137,96	8685,69	3505,42
2016-17	4812,50	503,99	45006,07	23533,35	120549,58	9419,34	1954,80
2018-19	4538,92	468,72	38263,17	19273,63	131994,27	9342,41	1898,50
2020-21	4373,43	552,78	44529,48	18205,23	126617,37	9602,85	1898,50
2021-22	4588,46	525,01	41865,42	18357,59	128312,47	10232,18	1898,50

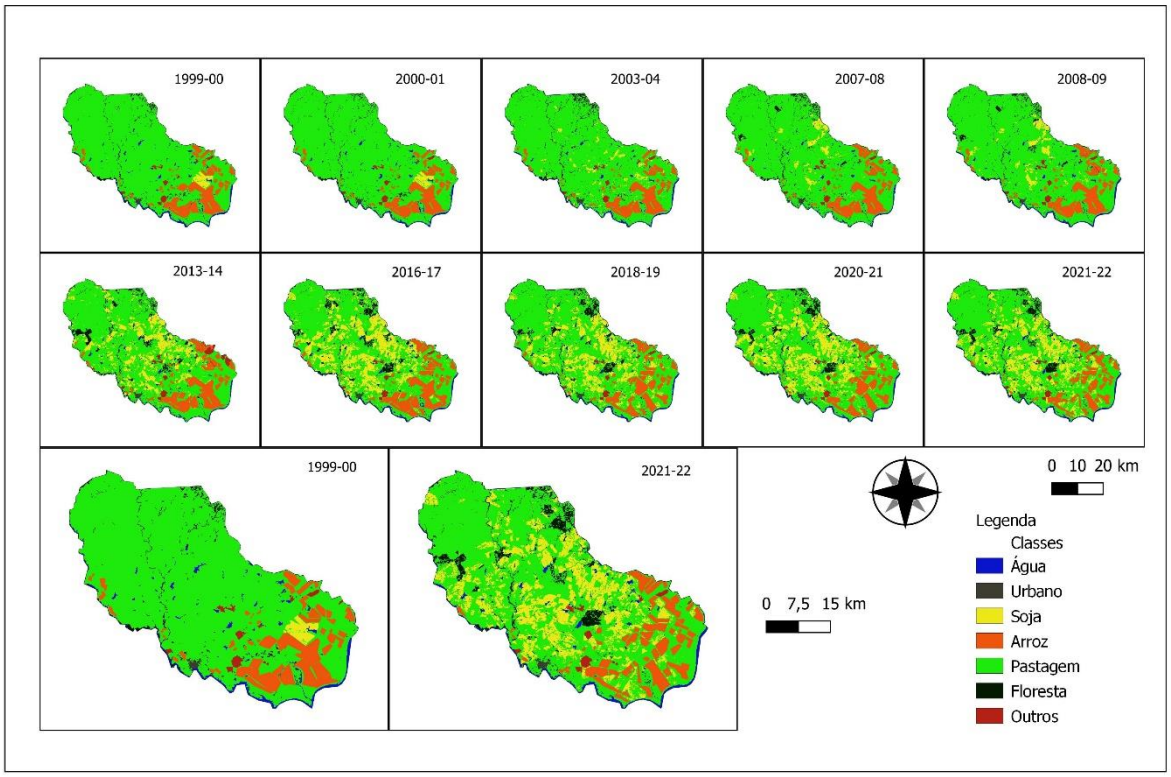

Figura 6 – Mapas temáticos gerados pelo processo de classificação do município de Jaguarão para todos os anos-safra estudados e para os anos-safra inicial e final em escala maior.

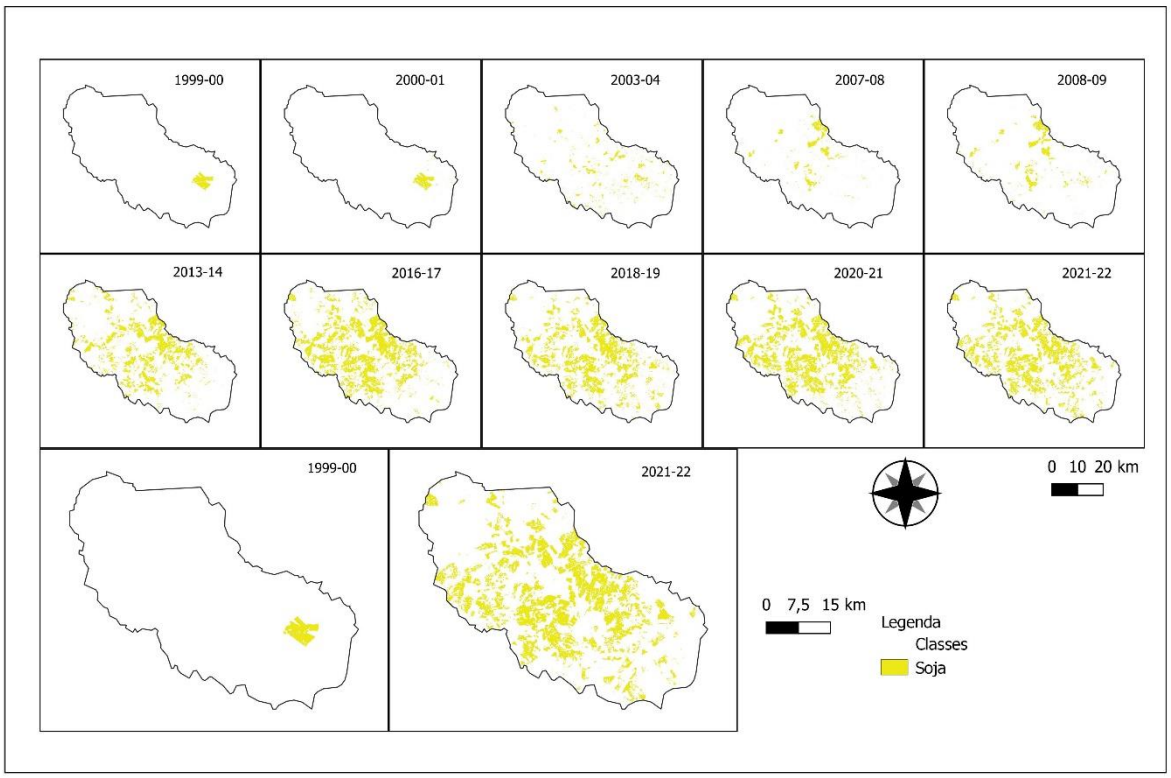

Figura 7 – Limite do município de Jaguarão e evolução espacial da soja para os anos analisados.

A área cultivada com soja no município de Jaguarão apresentou um acréscimo de 39243,76 ha do ano-safra 1999-00 para o ano-safra 2021-22 com uma taxa de expansão média de 1635,15 ha/ano. A expansão não se deu de forma constante no município. Por exemplo, na transição entre os anos-safra 1999-00 para 2000-01, 2003-04 para 2007-08, 2016-17 para 2018-19 e 2020-21 para 2021-22 aconteceram reduções da área cultivada. Até o ano-safra 2008-09, a área de soja não ultrapassou o valor de 8000,00 ha. Até o ano-safra 2013-14 o valor aumentou 3,71 vezes, de 7782,78 ha em 2008-09 para 28872,73 ha em 2013-14, até alcançar o máximo na safra-2016-17 com 45006,07 ha (Tabela 4). Durante o período estudado, o cultivo da soja teve início na região leste do município e se expandiu para as demais regiões de forma pulverizada. Algumas áreas que cultivavam soja nos primeiros anos da série temporal (1999-00 a 2000-01) deixaram de cultivar nos anos seguintes, o que pode demonstrar as incertezas sobre as práticas de manejo da soja na zona sul do Estado, bem como os eventos de rotação de cultura nas safras de verão (Figuras 6 e 7).

Quanto ao município de Arroio Grande, a tabela 5 apresenta os valores de área em hectares para cada uma das classes temáticas de uso/cobertura do solo mapeadas e as figuras 8 e 9 apresentam respectivamente os mapas temáticos com estas classes e os mapas temáticos com a classe soja, para o mesmo município.

Tabela 5 – Área em hectares obtida para cada a classificação temática anual no município de Arroio Grande.

	Água	**Urbano**	**Soja**	**Arroz**	**Pastagem**	**Floresta**	**Outros**
1999-00	10625,68	336,26	920,69	38554,50	184570,93	15643,14	1137,77
2000-01	9038,79	350,08	1780,93	36711,39	187451,62	15790,54	665,62
2003-04	8786,60	312,08	11371,33	36098,17	180753,43	13205,81	1261,56
2007-08	8382,39	325,32	9646,26	40464,99	178360,43	12851,69	1757,90
2008-09	9130,35	350,66	9316,90	41525,02	175436,55	13976,79	2052,70
2013-14	8118,10	333,38	38340,31	39374,43	149101,52	13926,12	2595,10
2016-17	9443,00	363,90	38734,15	43577,14	142470,69	16044,46	1155,62
2018-19	9668,14	348,93	38561,41	30917,19	152756,09	17393,55	2143,68
2020-21	9232,84	362,17	43672,15	29683,84	146219,11	21104,53	1514,33
2021-22	9535,13	359,87	44523,75	35612,78	138440,73	21983,19	1333,54

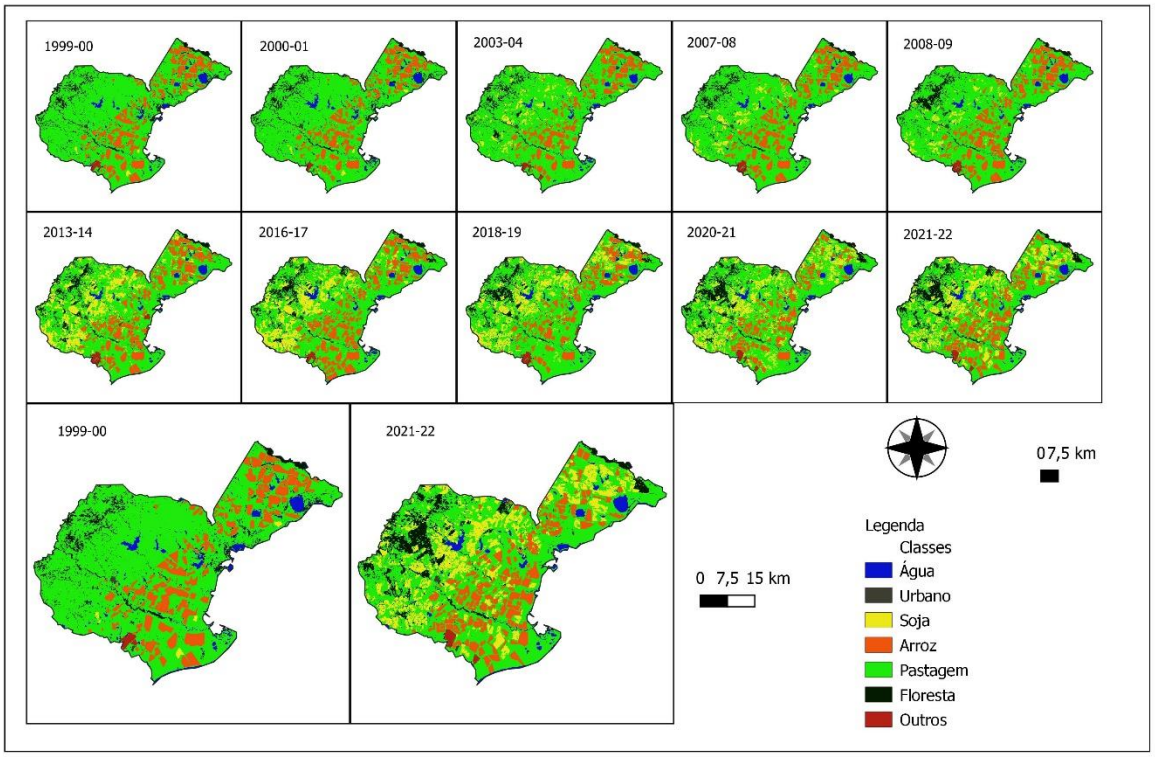

Figura 8 – Mapas temáticos gerados pelo processo de classificação do município de Arroio Grande para todos os anos-safra estudados e para os anos-safra inicial e final em escala maior.

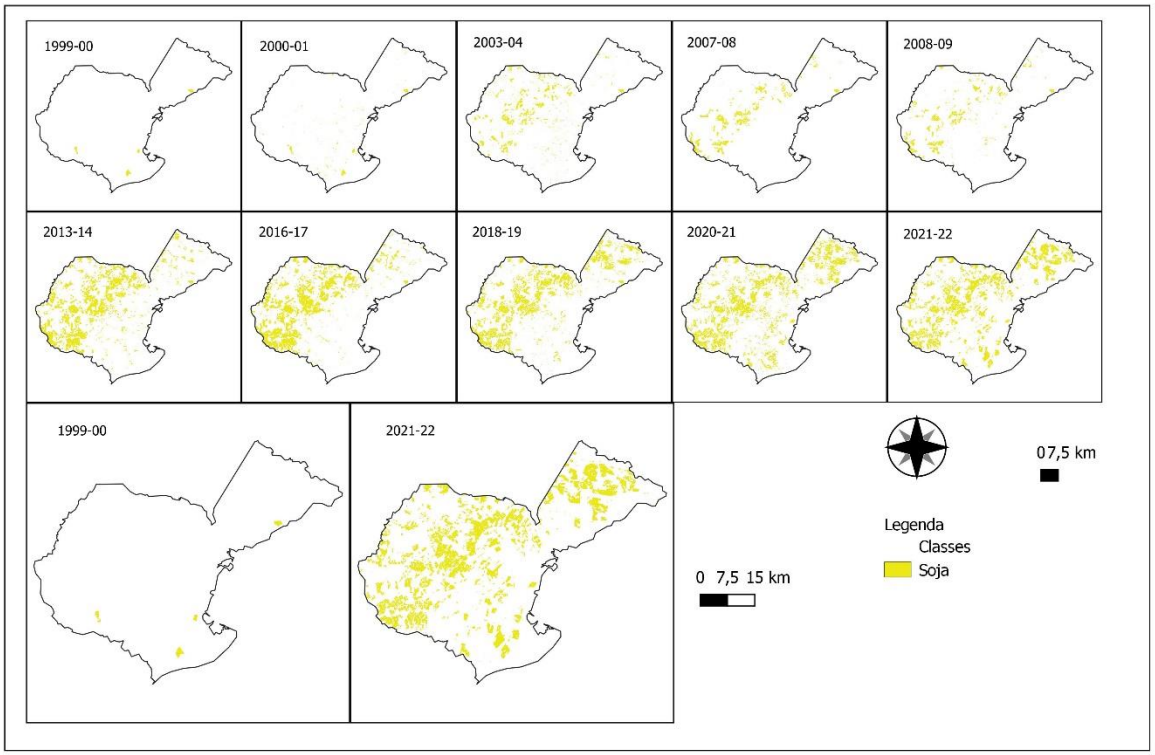

Figura 9 – Limite do município de Arroio Grande e evolução espacial da soja para os anos analisados.

A área cultivada com soja no município de Arroio Grande apresentou um crescimento de 43603,06 ha do ano-safra 1999-00 para o ano-safra 2021-22, com uma taxa de expansão média de 1816,79 ha/ano. A expansão não foi observada em todas as transições analisadas, algumas retrações da área cultivada aconteceram no período, possivelmente decorrente da incerteza inicial sobre o futuro da soja na região, bem como pela opção por outros cultivos. Por exemplo, na transição entre os anos-safra 2003-04 para 2007-08, 2007-08 para 2008-09 e 2016-17 para 2018-19. Destaca-se o crescimento de 1780,93 ha no ano-safra de 2000-01 para 11371,33 ha no ano-safra de 2003-04 (Tabela 5). Durante o período estudado, o cultivo da soja iniciou-se na região sul do município e expandiu-se primeiramente para a região oeste até o ano-safra 2013-14. A partir do ano-safra 2003-04, a expansão aconteceu ao oeste do município. A partir do ano-safra 2013-14 esta expansão se deu para o norte até se consolidar nas demais regiões no último ano da série. Algumas áreas apresentaram uma produção descontinuada, quando produziram soja em alguns anos-safra e em outros não (Figuras 8 e 9).

Quanto ao município de Santa Vitória do Palmar, a tabela 6 apresenta os valores de área em hectares para cada uma das classes temáticas de uso/cobertura do solo mapeadas e as figuras 10 e 11 apresentam respectivamente os mapas temáticos com estas classes e os mapas temáticos com a classe soja, para o mesmo município.

Tabela 6 – Área em hectares obtida para cada a classificação temática anual no município de Santa Vitória do Palmar.

	Água	**Urbano**	**Soja**	**Arroz**	**Pastagem**	**Floresta**	**Outros**
1999-00	96201,40	1191,78	0,00	79428,83	341217,90	4653,51	2206,58
2000-01	96510,30	1004,61	0,00	69882,33	351818,16	5000,85	683,75
2003-04	97878,48	1035,60	0,00	79581,06	341179,31	5034,10	191,44
2007-08	97725,78	1273,08	244,43	59679,65	360146,67	5785,83	44,56
2008-09	94249,83	1274,27	201,13	75312,79	347808,34	6043,45	10,18
2013-14	93668,35	1269,45	18461,19	72945,83	330823,15	7720,56	11,46
2016-17	95623,92	1280,72	17424,71	71394,57	332305,58	6801,75	68,75
2018-19	94389,03	1275,82	21194,91	71112,32	327753,29	9107,15	67,48
2020-21	92803,80	1274,55	30680,79	64325,77	328640,76	7106,85	67,48
2021-22	93170,68	1283,27	36071,57	67199,76	320020,32	7111,11	43,28

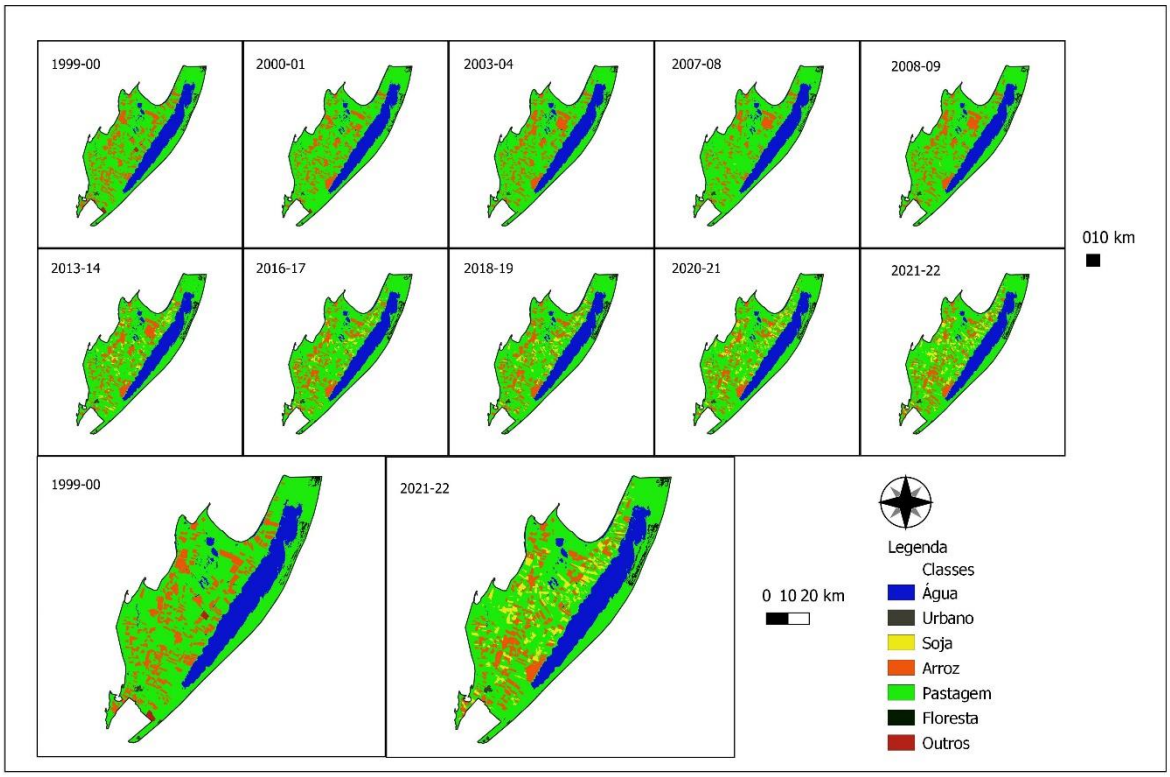

Figura 10 – Mapas temáticos gerados pelo processo de classificação do município de Santa Vitória do Palmar para todos os anos-safra estudados e para os ano-safra inicial e final em escala maior.

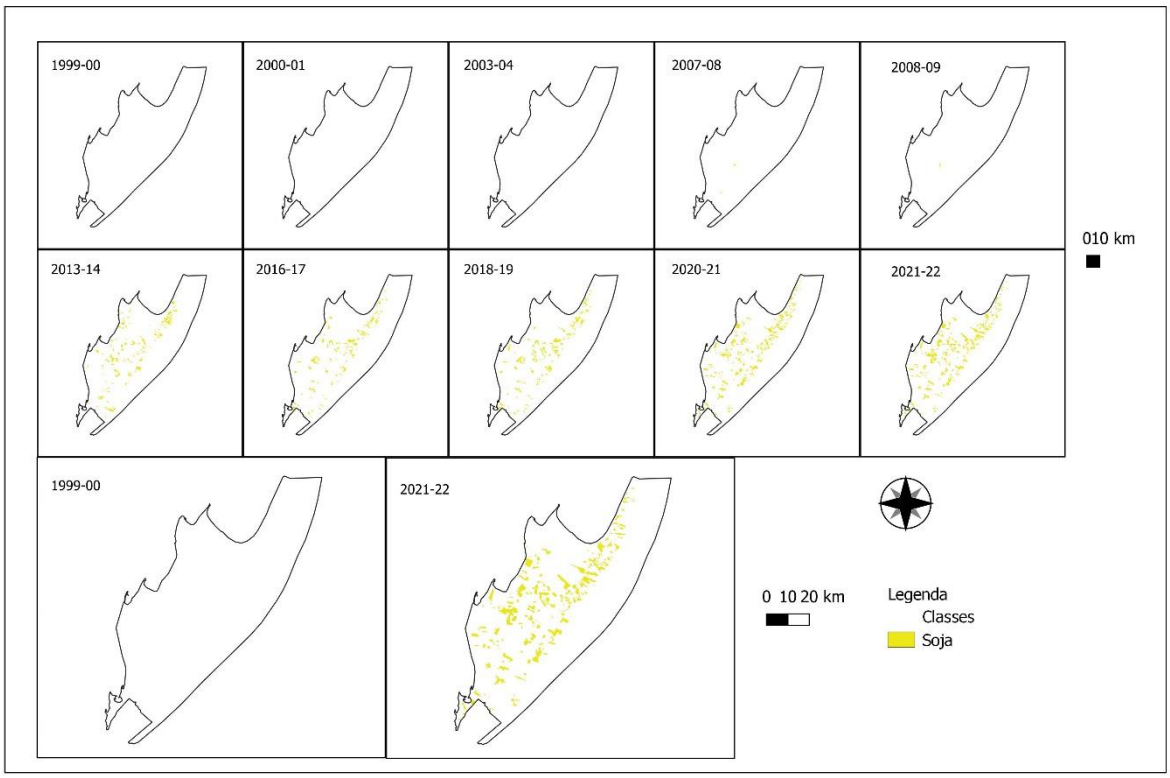

Figura 11 – Limite do município de Santa Vitória do Palmar e evolução espacial da soja para os anos analisados.

A área cultivada com soja no município de Santa Vitória do Palmar apresentou um acréscimo de 36071,57 ha do ano-safra 1999-00 para o ano-safra 2021-22, com uma taxa de expansão média de 1502,98 ha/ano. Até o ano-safra 2003-04, não foi detectada a produção de soja no município, ao que parece a especialização do município no cultivo do arroz retardou a entrada da soja. A partir do ano-safra 2007-08, surgiram as primeiras áreas na região central que posteriormente se expandiram de forma pulverizada para as demais regiões ao longo da série temporal. Destaca-se o aumento de área de 201,13 ha no ano-safra 2008-09 para 18461,19 ha no ano 2013-14. Assim como nos municípios de Jaguarão e Arroio Grande, em Santa Vitória do Palmar a expansão da soja não foi constante, houve redução de área na transição entre os anos-safra 2007-08 para 2008-09 e 2013-14 para 2016-17. O maior incremento de área foi observado no ano-safra 2021-22 com 36071,57 ha (Tabela 6; Figuras 10 e 11).

3.3 Área e produtividade

A evolução da área e da produtividade da soja para os municípios de Jaguarão, Arroio Grande e Santa Vitória do Palmar foi analisada no período do estudo (Figuras 12 e 13).

Figura 12 – Evolução da área de soja nos municípios no período estudado.

A tendência de aumento de área acontece em todos os municípios, porém com diferentes taxas de incremento. As taxas de incremento para Jaguarão, Arroio Grande e Santa Vitória do Palmar são respectivamente 1496,91%, 4735,89% e 14657,29%. Fatores relacionados à aptidão agrícola para a soja e a área disponível para o cultivo aparentemente geraram respostas diferentes ao estímulo do retorno econômico para a produção de soja no período.

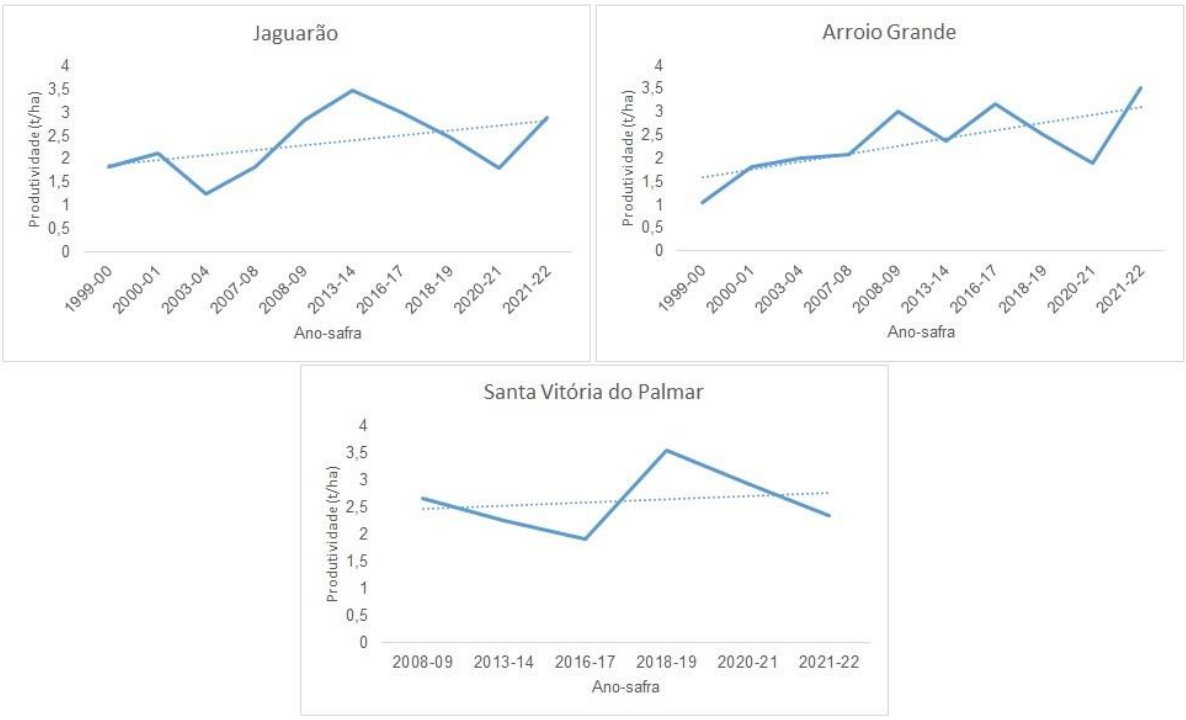

Figura 13 – Evolução da produtividade corrigida de soja nos municípios para o período estudado
Fonte: Adaptado de IBGE, 2023f.

A expansão da soja no município de Jaguarão (Figura 12) pode ser explicada pela migração de agricultores tradicionais no cultivo de soja oriundos do noroeste do Rio Grande do Sul que passaram a comprar ou arrendar terras em Jaguarão em virtude de alguns benefícios que a sojicultura poderia trazer ao município, como por exemplo, baixo custo da terra, aumento de empregos diretos e indiretos, valorização das terras e aumento da receita municipal (SILVA e ANJOS, 2020).

Para os três municípios de forma geral (Figura 12), um dos fatores que pode justificar a expansão da soja é o aumento do preço das *commodities* a partir do ano 2000 e o uso da soja como principal matéria-prima para a produção de biodiesel durante o período de 2006 a 2013 no Brasil, o que fez com que houvesse um incremento da área agrícola nos municípios que compõem os Biomas Pampa e da Mata Atlântica do estado do Rio Grande do Sul (SILVEIRA et al., 2017). Um fator

importante que sugere a expansão da soja a partir de 2012 é aumento da demanda por farelo e óleo de soja brasileiros em mercados internacionais como por exemplo o mercado chinês (HIRAKURI e LAZZAROTTO, 2014). Até o ano-safra 2021-22, a soja ocupou 20,34%, 17,68% e 6,87% da área dos municípios de Jaguarão, Arroio Grande e Santa Vitória do Palmar, respectivamente. Consequentemente, a cultura ainda tem potencial de expansão nos três municípios. Seria importante entender esse potencial de expansão em futuros estudos sobre a ponderação à estímulos econômicos, à disponibilidade de terras aptas e aos impactos ambientais.

Em relação à produtividade da soja (Figura 13), foi observado um crescimento de 1,83 t/ha no ano-safra 1999-00 para 2,90 t/ha no ano 2021-22 com destaque para o ano-safra 2013-14 com 3,49 t/ha para o município de Jaguarão. Isso demostra que satisfatórias (t/ha igual a 58 sacas/ha) produtividades médias podem ser obtidas e que o incremento tecnológico responde pelo aumento de cerca mil quilos na produtividade média no período. Para o município de Arroio Grande, ocorre um crescimento de 1,04 t/ha no ano-safra 1999-00 para 3,51 t/ha no ano-safra 2021-22. A média de produtividade desses municípios foi 2,35 t/ha durante o período. Para o município de Santa Vitoria do Palmar, aconteceu um decréscimo de 2,66 t/ha no ano-safra 2008-09[1] para 2,34 t/ha no ano-safra 2021-22, com destaque para o ano-safra 2018-19 com 3,53 t/ha, o valor médio de produtividade durante o período estudado é de 2,60 t/ha.

Os valores de produtividade na safra 2021-22 para os três municípios estão próximos da produtividade média para soja no estado do Rio Grande do Sul para o ano-safra 2021-22 que é de 3,34 t/ha (IBGE, 2022e).

3.4 Análise da expansão da soja sobre outros usos do solo

A análise de como a soja se expandiu (Figuras 14 a 16) na região pôde ser mapeada pelo cruzamento dos mapas anuais de uso do solo. A retração de outras classes de uso para a expansão da soja é uma informação importante para o mercado agrícola. Localmente, as informações sobre oferta e preço dos produtos são ainda

[1] No site do IBGE não estão disponíveis dados sobre valor da produção de soja antes do ano-safra 2013-14 para o município de Santa Vitória do Palmar para que se possibilite a realização do cálculo da produtividade da soja no município antes deste período.

mais especulativas antes da realização da safra. A mensuração da área plantada por meio da metodologia utilizada nesse estudo traz maior transparência para o mercado.

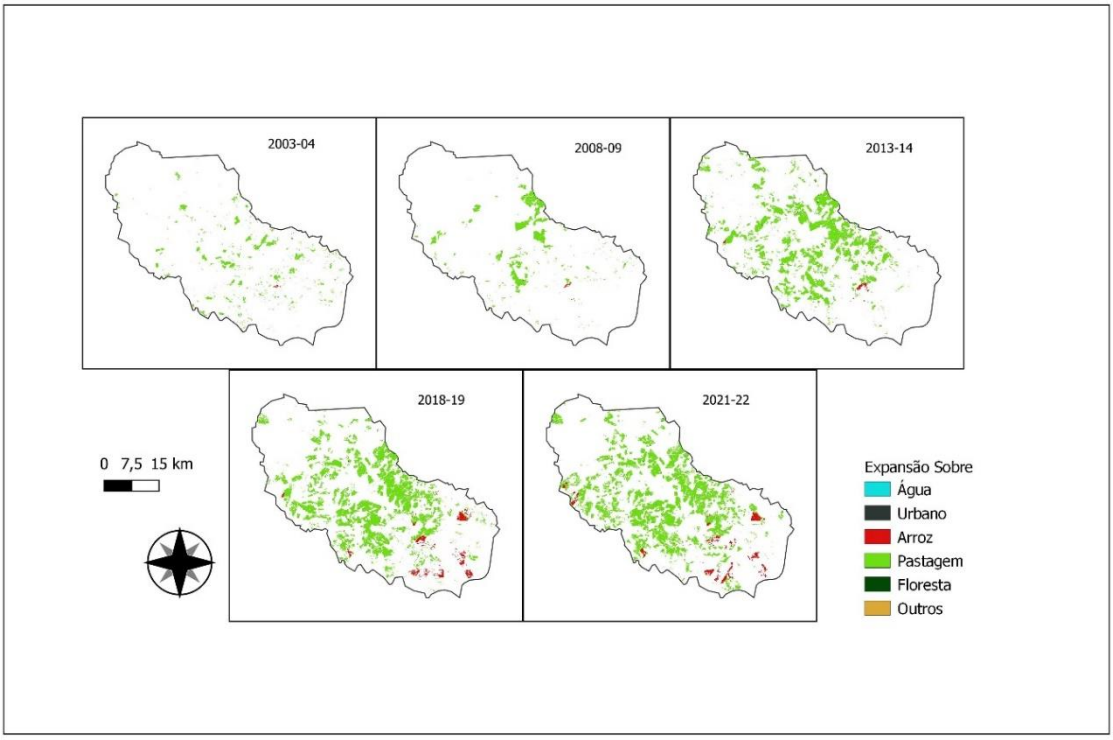

Figura 14 –Expansão da soja sobre as demais classes de uso/cobertura do solo nos anos-safra 2003-04, 2008-09, 2013-14, 2018-19 e 2021-22 para o município de Jaguarão.

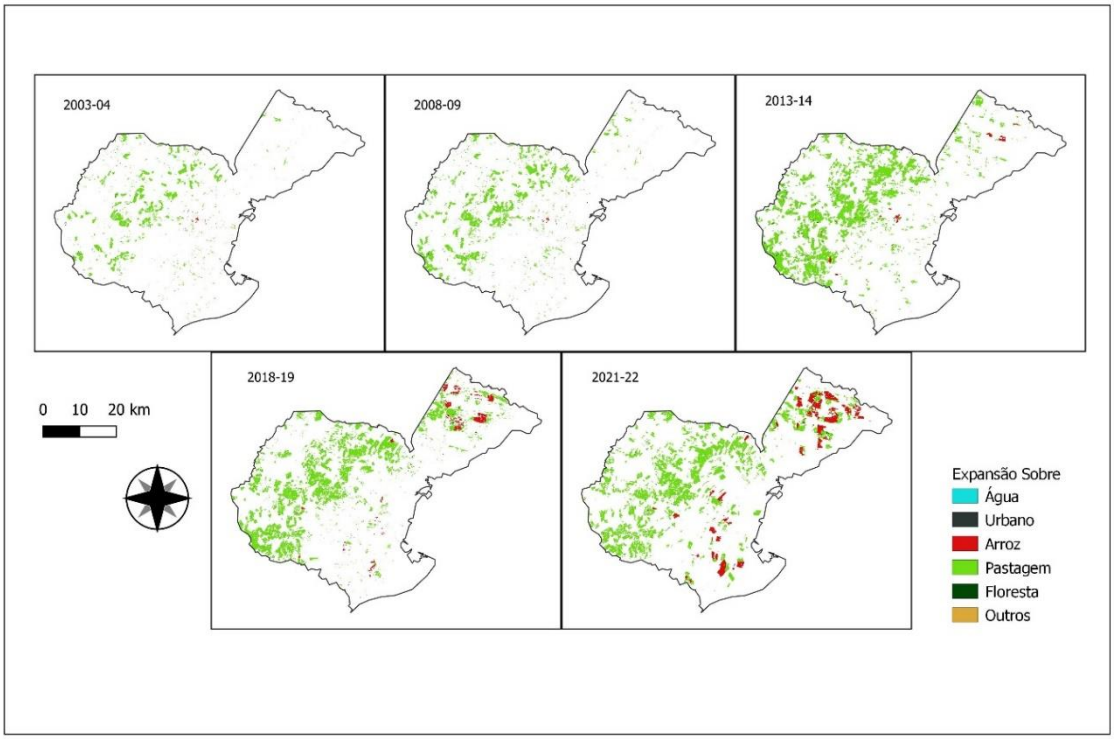

Figura 15 – Expansão da soja sobre as demais classes de uso/cobertura do solo nos anos-safra 2003-04, 2008-09, 2013-14, 2018-19 e 2020-21 para o município de Arroio Grande.

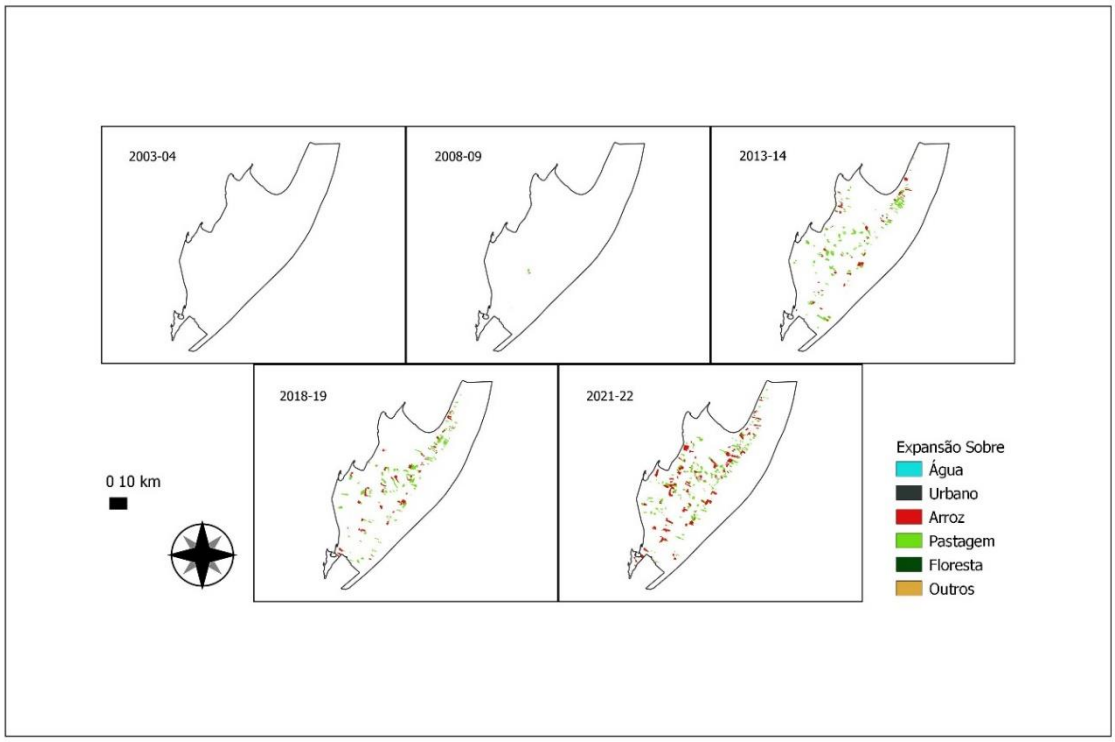

Figura 16 – Expansão da soja sobre as demais classes de uso/cobertura do solo nos anos-safra 2003-04, 2008-09, 2013-14, 2018-19 e 2020-21 para o município de Santa Vitória do Palmar.

Assim como no mapeamento das áreas, o mapeamento de como a soja se expandiu sobre outros usos é uma informação não disponível de forma pública, pois o IBGE aplica métodos de levantamento que não possibilitam o mapeamento das áreas onde a mudança aconteceu. A área cedida por classe temática para a expansão da soja a partir do início da série (ano-safra 1999-00) foi verificada nos anos-safra 2003-04, 2008-09, 2013-14, 2018-19 e 2021-22 (Tabelas 7 a 9).

Tabela 7 – Área (ha) cedida para soja pelas classes temáticas de uso/cobertura do solo nos anos 2003-04, 2008-09, 2013-14, 2018-19 e 2021-22 para o município de Jaguarão.

		1999-00					
		Água	**Urbano**	**Arroz**	**Pastagem**	**Floresta**	**Outros**
2003-04		11,26	0,00	78,81	5410,68	26,27	0,38
2008-09		8,26	0,00	89,32	7359,85	24,77	0,75
2013-14	**Soja**	0,00	0,00	388,41	28260,66	116,71	0,00
2018-19		0,00	0,00	2397,62	35378,08	79,56	1,88
2021-22		0,00	0,00	2995,05	38717,25	63,05	4,50

Tabela 8 – Área (ha) cedida para soja pelas classes temáticas de uso/cobertura do solo nos anos 2003-04, 2008-09, 2013-14, 2018-19 e 2021-22 para o município de Arroio Grande.

		1999-00					
		Água	**Urbano**	**Arroz**	**Pastagem**	**Floresta**	**Outros**
2003-04		39,15	0,00	105,37	10716,08	132,43	0,00
2008-09		24,76	0,00	0,00	8822,87	61,61	0,00
2013-14	**Soja**	160,65	0,00	668,50	36606,60	477,91	0,00
2018-19		68,52	0,00	2528,31	35286,88	241,83	0,00
2021-22		62,76	0,00	6995,31	36684,91	223,98	42,03

Tabela 9 – Área (ha) cedida para soja pelas classes temáticas de uso/cobertura do solo nos anos 2003-04, 2008-09, 2013-14, 2018-19 e 2021-22 para o município de Santa Vitória do Palmar.

	1999-00						
	Água	**Urbano**	**Soja**	**Arroz**	**Pastagem**	**Floresta**	**Outros**
2003-04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2008-09	0,00	0,00	0,00	24,18	176,96	0,00	0,00
2013-14	0,00	0,00	0,00	5232,57	13222,25	6,37	0,00
2018-19	0,00	0,00	0,00	7497,79	13697,12	0,00	0,00
2021-22	0,00	0,00	0,00	18266,21	17760,80	0,00	44,56

Para os três municípios, a classe que majoritariamente cedeu área para a classe “soja” dentre todas as classes mapeadas foi a classe “pastagem”, em cada um dos cinco anos avaliados em comparação ao ano-safra 1999-00, seguida pela classe “arroz”. Para os municípios de Jaguarão e Arroio Grande, a classe “pastagem” cedeu as maiores áreas para a soja nos cinco anos, enquanto que para o município de Santa Vitoria do Palmar esta cessão foi maior nos quatro primeiros anos e segunda maior no último ano (atrás da classe “arroz”), o que demonstra a predisposição dos produtores em buscar alternativas para diversificar suas atividades.

A expansão da soja aponta para uma nova realidade em termos de produção agrícola nos três municípios. A substituição das áreas de pastagem por áreas de soja pode ter se dado em virtude de uma possível maior atratividade econômica da soja em relação a este outro uso do solo, sua substituição pela soja pode se dar em função das modificações agropecuárias ocorridas em virtude da Revolução Verde que reduziu o tamanho dos rebanhos devido à transição da pecuária para a agricultura, tendo em vista que esta possui um rendimento maior por unidade de área superior àquela (KUPLICH et al., 2018).

Assim, o avanço da soja produz uma modificação no cenário econômico destes municípios, principalmente no que se refere às exportações principalmente para o mercado da China (MAPA, 2023). Um aumento da produção de soja no Brasil poderá

ser benéfico para abastecer eventuais aumentos de demanda chinesa e com isso favorecer o crescimento econômico do Brasil, por meio de acordos bilaterais entre os dois países.

3.5 Classificação vs IBGE

No que tange a comparação entre as metodologias de levantamento de área (IBGE e a classificação supervisionada de imagens de satélite), existem incertezas nas duas abordagens. A metodologia do IBGE depende de informações locais providas por colaboradores locais, tais informações não realizam mensuração objetiva da área e validação. Por outro lado, embora a classificação supervisionada seja baseada na mensuração de área gerada pela classificação de pixels, permanece a incerteza sobre a atribuição da classe no método de classificação. Pode-se dizer que a metodologia do IBGE é mais eficiente na atribuição da classe, mas limitada pela não mensuração da área.

Nesse estudo, parte da incerteza na classificação acontece pela ausência de calibrações do classificador com dados de campo. Os critérios para atribuição de classes foram definidos pela experiência do intérprete em selecionar as amostras de treinamento, bem como na implementação de critérios descritos na literatura (SANCHES et al., 2005, PARREIRAS, 2022). Na zona sul do Estado, a identificação visual da área de soja nas imagens é bastante favorecida pela disponibilidade de imagens no período de transição entre os ciclos de arroz e soja. Nesse estudo, observou-se que em geral o plantio do arroz inicia em setembro por conta da disponibilidade de água por irrigação, enquanto a soja geralmente é plantada a partir de dezembro em condições mais adequadas de umidade e temperatura do solo. A diferença de coloração na composição R(IVP)G(IVM)B(V) entre a soja e os outros alvos auxilia o método de classificação, principalmente nos anos em que imagens livres da interferência atmosférica são adquiridas em pontos específicos do ciclo das culturas, quando ocorre a maior distinção espectral entre esses alvos.

A apresentação dos resultados obtidos para os métodos (IBGE e classificação) de estimativa de área tem o objetivo de apresentar resultados produzidos por metodologias independentes, e dessa forma melhorar as estimativas de área por meio da agregação de fontes independentes de dados e métodos. Quando aplicados de forma independente, esses métodos podem destacar resultados divergentes que devem ser auditados.

Tabela 10 – Área (ha) de soja obtida pelo IBGE pelo método de classificação para o município de Jaguarão.

	IBGE	Método
1999-00	2000,00	2621,65
2000-01	2300,00	2608,52
2003-04	6000,00	6073,79
2007-08	7300,00	5981,47
2008-09	8000,00	7782,78
2013-14	42000,00	28872,73
2016-17	45000,00	45006,07
2018-19	45000,00	38263,17
2020-21	45000,00	44529,48
2021-22	45000,00	41865,42

Fonte: Adaptado de IBGE, 2023d

Tabela 11 – Área (ha) de soja obtida pelo IBGE pelo método de classificação para o município de Arroio Grande.

	IBGE	Método
1999-00	800,00	920,69
2000-01	1900,00	1780,93
2003-04	10908,00	11371,33
2007-08	8000,00	9646,26
2008-09	11671,00	9316,90
2013-14	40000,00	38340,31
2016-17	39500,00	38734,15
2018-19	42500,00	38561,41
2020-21	44530,00	43672,15
2021-22	47120,00	44523,75

Fonte: Adaptado de IBGE, 2023d

Tabela 12 – Área (ha) de soja obtida pelo IBGE pelo método de classificação para o município de Santa Vitória do Palmar.

	IBGE	Método
1999-00	-	0,00
2000-01	60,00	0,00
2003-04	-	0,00
2007-08	-	244,43
2008-09	255,00	201,13
2013-14	23000,00	18461,19
2016-17	18637,00	17424,71
2018-19	25864,00	21194,91
2020-21	31000,00	30680,79
2021-22	36209,00	36071,57

Fonte: Adaptado de IBGE, 2023d
*Valores não encontrados.

Quando os valores de área fornecidos pelo IBGE são confrontados com os valores obtidos na classificação, as diferenças médias de área entre as duas fontes são: 12,07% ha para Jaguarão (Tabela 10), 8,91% ha para Arroio Grande (Tabela 11) e 13,63% ha para Santa Vitória do Palmar (Tabela 12). Com base nestas diferenças, há uma consequente diferença nos valores de produtividade (Figura 17).

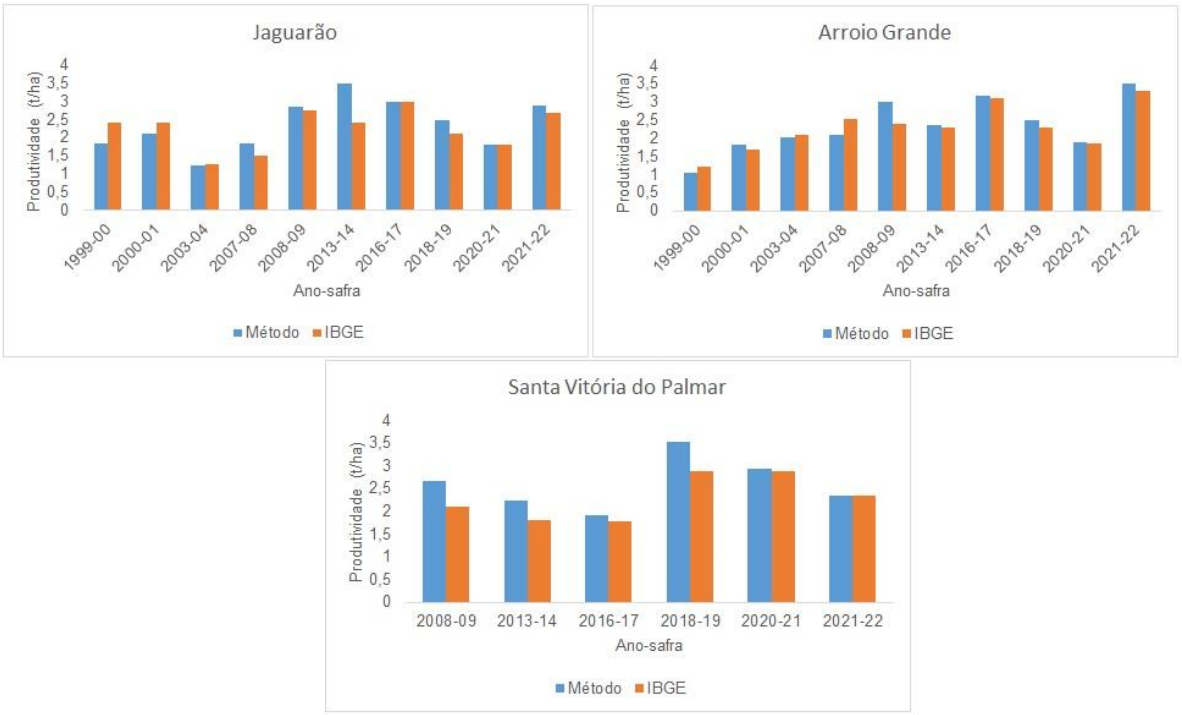

Figura 17 – Valores de produtividade de soja obtidos pela metodologia do presente estudo vs valores de produtividade de soja fornecidos pelo IBGE para os três municípios.
Fonte: Adaptado de IBGE, 2023c.

A diferença dos valores de produtividade de soja encontrada ao se comparar a metodologia do presente estudo com os valores fornecidos pelo IBGE (Figura 17) pode ser atribuída às diferenças metodológicas das duas formas de obtenção dos dados, conforme já discutido anteriormente. A importância de se conhecer os valores de produtividade de soja nos municípios estudados é devida ao fato de que sob posse destes valores se poderá compará-los com os valores médios de regiões similares, com o objetivo de determinar se a região de estudo está dentro de um valor de produtividade aceitável. A partir deste conhecimento, é possível promover o desenvolvimento de projetos de pesquisa, como o desenvolvimento de novas variedades de soja, com a finalidade de aumentar a produtividade de áreas com baixos rendimentos.

Esta diferença confirma a importância da aplicação de metodologias como a descrita no presente estudo para mapeamento de uso/cobertura do solo para a identificação e quantificação de áreas agrícolas.

3.6 Expansão da soja e impacto no PIB

Ao longo da série estudada, observou-se um aumento da contribuição da soja no PIB dos três municípios conforme a figura 18.

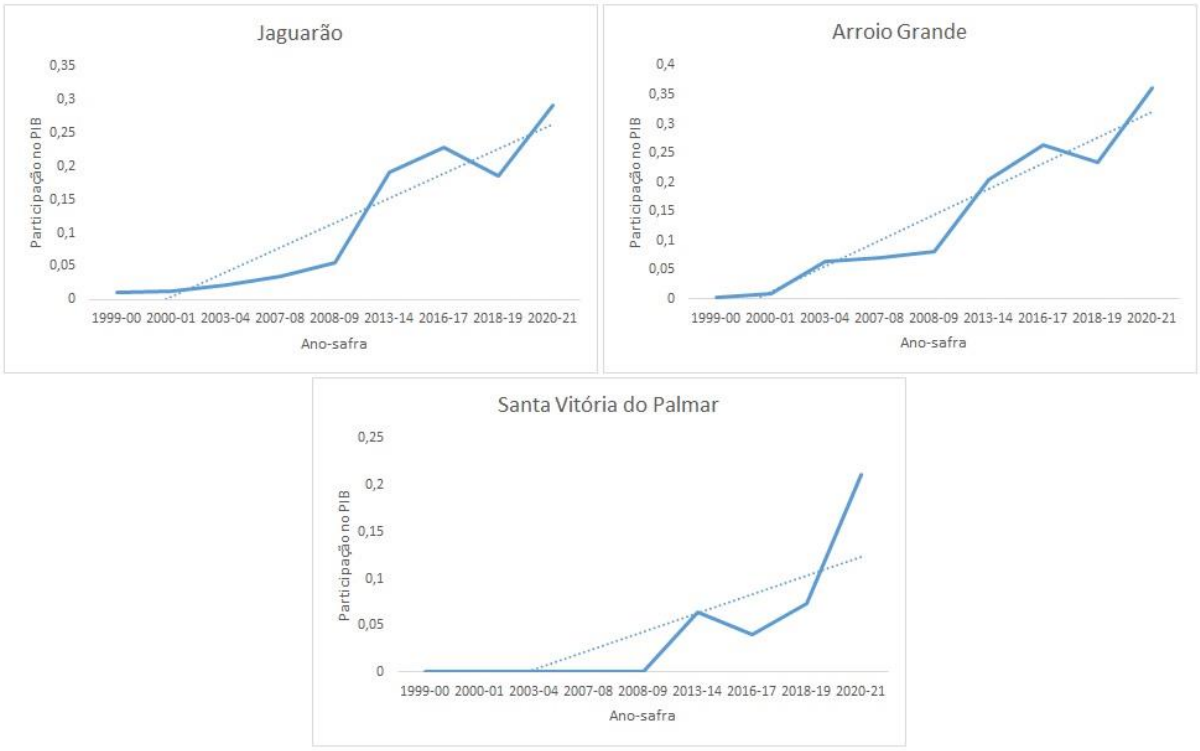

Figura 18 – Evolução da participação da soja no PIB dos três municípios estudados ao longo da série histórica.
Fonte: Adaptado de: EMATER: 2004, 2008, 2009, 2014, 2017, 2019, 2021, 2023; IBGE: 2023a; 2023b; 2023c; SAMPAIO, 2001.

Ao considerar a transição do ano-safra 1999-00 para 2020-21, o aumento desta contribuição foi de 1,16% para 29,18% para o município de Jaguarão; 0,26% para 36,22% para o município de Arroio Grande e; 0% para 21,11% para o município de Santa Vitoria do Palmar.

Com a expansão da produção e seu consequente aumento na participação da formação do PIB, se pode notar um aumento da contribuição direta da soja para a economia dos três municípios estudados. Este aumento pode refletir direta ou indiretamente em modificações na estrutura econômica destes municípios, uma vez que o cultivo da soja movimenta uma grande cadeia produtiva que envolve itens como

investimentos públicos e privados, unidades de armazenamento, beneficiamento e processamento de grãos e modais para transporte de soja e seus derivados (APROSOJA, 2023).

Também poderá haver para a região a atração de empresas direta ou indiretamente ligadas a atividades do agronegócio, como a comercialização de máquinas e implementos agrícolas, equipamentos de irrigação e execução de projetos de construções rurais específicos para a sojicultora, bem como a dinamização de novos empreendimentos conectados a serviços de assessoria e consultoria em manejo, produção, empresas de sementes, máquinas, silos, armazéns, etc.

Caso o aumento da contribuição da soja na formação do PIB tenha sido uma das causas do aumento do próprio PIB nos municípios estudados, ainda é possível sugerir prováveis impactos sociais desta contribuição, uma vez que o aumento do PIB gera um aumento da receita municipal, que poderá ser direcionada à elaboração de políticas públicas de fins sociais, como habitação, geração de empregos e combate à miséria, por exemplo.

3.7 Valor da produção Soja VS Arroz

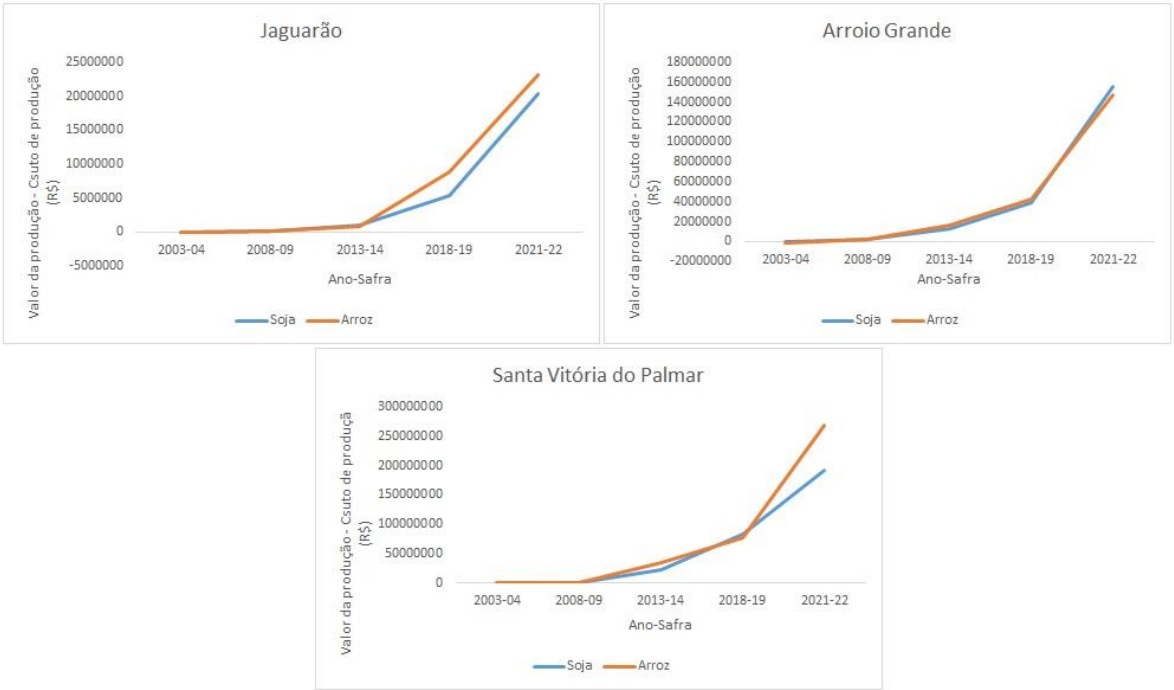

Figura 19 – Diferenças entre valor da produção e custo de produção para arroz e soja para os anos-safra 2003-04, 2008-09, 2013-14, 2018-19 e 2021-22.
Fonte: Adaptado de: Conab, 2022; EMATER: 2004, 2008, 2009, 2014, 2017, 2019, 2021, 2023; IBGE: 2022e; SAMPAIO, 2001.

Para os três municípios, é possível observar que a renda gerada pelo cultivo da soja é inferior à renda que seria gerada alternativamente pelo cultivo de arroz na maioria dos anos-safra analisados. Porém, para o município de Arroio Grande, que o cultivo da soja ultrapassou economicamente o cultivo hipotético de arroz no último ano-safra analisado (2021-22). Isto mostra que poderá haver uma tendência ao aumento das áreas de transição de arroz para soja neste município. Para os municípios de Jaguarão e Santa Vitória do Palmar, o cultivo de hipotético de arroz seria superior ao cultivo de soja no último ano-safra analisado, o que sugere que nestes dois municípios ainda há uma tendência econômica à permanência das áreas originais de arroz.

4. Conclusão

Para os três municípios que foram objeto do presente estudo, foi observada uma expansão das áreas cultivadas com soja durante a série histórica estudada.

Para o município de Jaguarão, o cultivo da soja iniciou na região leste e expandiu-se para as demais regiões de forma pulverizada. Algumas áreas apresentaram produção de soja no início da série e interromperam esta produção nos anos-safra seguintes enquanto diversas outras iniciaram sua produção após o início da série e mantiveram tal produção até o final.

Para o município de Arroio Grande, o cultivo da soja iniciou na região sul e se expandiu primeiramente para a região oeste no-safra 2003-04, depois para o norte a partir do ano-safra 2013-14 e se consolidou em todas as regiões do município no ano-safra de 2021-22. Algumas áreas apresentaram uma produção intermitente em que produziram soja em alguns anos-safra e em outros não.

Para o município de Santa Vitória do Palmar, a expansão das áreas de soja começou a partir do ano-safra 2007-08 na região central e posteriormente se expandiu de forma pulverizada para as demais regiões ao longo do restante da série temporal.

Nos três municípios a expansão não se deu de forma constante, uma vez que houve anos-safra em que aconteceram retrações da área de soja.

Para os três municípios, as classes de uso/cobertura do solo que mais cederam área para a classe “soja” foram as classes “pastagem” e “arroz”, foi observado um aumento da contribuição da soja no PIB durante a série temporal estudada e o cultivo hipotético de arroz em vez de soja foi considerado economicamente mais rentável na maioria dos anos safra-analisados.

Desta forma, embora tenha sido observado alguns casos de retração das áreas cultivadas com soja nos três municípios em alguns anos da série histórica estudada, foi observado para a maioria dos anos uma expansão nestas áreas e uma expansão geral ao comparar o primeiro ano (1999-00) com o último ano da série (2021-22). Deste modo, é sugerido que poderá haver uma tendência de continuidade desta expansão no futuro, principalmente sobre áreas de pastagem.

Referências

ADMINISTRAÇÃO NACIONAL DA AERONÁUTICA E ESPAÇO-NASA.Thematic Mapper. 2023a. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/thematic-mapper/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço-NASA. The Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). 2023b. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/the-enhanced-thematic-mapper-plus-etm/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

ADMINISTRAÇÃO NACIONAL DA AERONÁUTICA E ESPAÇO-NASA. OLI Requirements. 2023c. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/spacecraft-instruments/operational-land-imager/oli-requirements/>. Acesso em: 01 mar.

ADMINISTRAÇÃO NACIONAL DA AERONÁUTICA E ESPAÇO-NASA. Landsat 8. 2023d. Disponível em:<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE SOJA-APROSOJA. A soja. 2023. Disponível em:<https://aprosojabrasil.com.br/a-soja/>. Acesso em: 15 abr. 2023.

BRASIL-Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos: Lei Complementar n° 87, de 13 de setembro de 1996. 2023. Disponível em: < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp87.htm>. Acesso em: 10 mar. 2023.

BREIMAN, L. Random Forest. **Machine Learning**, n 45, p 5-32, 2001.

CASTRO, P. I. V; Yin. H.; TEIXEIRA JÚNIOR, P. D.; 2022. Sugarcane abandonment mapping in Rio de Janeiro state Brazil. **Remote Sensing of Environment**, p 1-13, 2022.

Companhia Nacional de Abastecimento-CONAB. Planilhas de Custo de Produção, 2022. Disponivel em:< https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-producao/planilhas-de-custo-de-producao>. Acesso em: 07 out. 2022.

DONG, F. X. Y.; LI, J.; LI, X.; SU, W.; HUANG, X.; HUANG, J.; XIE, Z.; LI, Z.; LIU, H.; TAO, W.; WEN, Y.; ZHANG, Y. Mapping crop type in Northeast China during 2013–2021 using automatic sampling and tile-based image classification. **Remote Sensing of Environment**, p 1-15, 2023.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL-EMATER. Acompanhamento de preços recebidos pelos produtores do Rio Grande do Sul, semana 06/12/04 à 10/12/04. 2004. 6p.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL-EMATER. Acompanhamento de preços recebidos pelos produtores do Rio Grande do Sul, semana 08/12/08 à 12/12/08. 2008. 3p.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL-EMATER. Acompanhamento de preços recebidos pelos produtores do Rio Grande do Sul, semana 07/12/09 à 11/12/09. 2009. 3p.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL-EMATER. Acompanhamento de preços recebidos pelos produtores do Rio Grande do Sul, semana 08/12/14 à 12/12/14. 2014. 4p.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL-EMATER. Acompanhamento de preços recebidos pelos produtores do Rio Grande do Sul, semana 11/12/17 à 15/12/17. 2017. 7p.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL-EMATER. Acompanhamento de preços recebidos pelos produtores do Rio Grande do Sul, semana 09/12/19 à 13/12/19. 2019. 7p.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL-EMATER. Acompanhamento de preços recebidos pelos produtores do Rio Grande do Sul, semana 13/12/21 à 17/12/21. 2021. 6p.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL-EMATER. Acompanhamento de preços recebidos pelos produtores do Rio Grande do Sul, semana 07/08/23 à 11/08/23. 2023. 7p.

FEI, H.; FAN, Z.; WANG, C.; ZHANG, N.; WANG, T.; CHEN, R.; BAI, T. Cotton Classification Method at the County Scale Based on Multi-Features and Random Forest Feature Selection Algorithm and Classifier. **Remote Sensing of Environment**, p 1-28, 2022.

Frente Parlamentar Agropecuária-FPA. Importância da soja para o Brasil: introdução. 2021. Disponível em: <https://fpagropecuaria.org.br/2021/10/18/importancia-da-soja-para-o-brasil/>. Acesso em: 19 out. 2022.

GOOGLE. Paltform. 2022a. Disponível em: <https://earthengine.google.com/platform/>. Acesso em: 15 fev. 2023.
GOOGLE. Google Earth Engine Data Catalog.Landsat Collections. 2022b. disponível em:< https://developers.google.com/earth engine/datasets/catalog/landsat>.

HARTSHORN, Scott. **Machine Learning: with random forest and decison tree**: a visual guide for beginners. 2016. 83 p.

HIRAKURI, Marcelo Hiroschi; LAZZAROTTO, Joelsio José. **O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro**. Londrina: EMBRAPA SOJA, 2014, 70 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE. Pesquisas Agropecuárias. 3 ed. Rio de Janeiro: 2018. 113 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE. 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/jaguarao/panorama>. Acesso em: 10 ago. 2021.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. Valor da produção agrícola bate recorde, mas safra 2021 não supera ano anterior. 2022a. Disponível em:< https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/34943-valor-de-producao-bate-recorde-mas-safra-2021-nao-supera-ano-anterior#:~:text=Com%20um%20total%20de%20134,341%2C7%20bilh%C3%B5es%20em%202021.>. Acesso em: 30 set. 2022.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE IBGE. 2022b. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>. Acesso em: 30 out 2022.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. PAM-Produção Agrícola Municipal. 2022c. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 20 fev. 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. 2022d. disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=conceitos-e-metodos>. Acesso em: 01 mar. 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. **Rendimento médio na produção de soja (quilogramas por hectare) por estado brasileiro**. 2022e. 1 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. Valor da produção de culturas agrícolas por Mesorregião, Microrregião e Município, em ordem de código de Meso, Micro e nome do município, para o ano de 2021-RS. 2022f. 35 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. **PIB dos Municípios (1999-2001)**. 2023a. 1p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. **PIB dos Municípios (2002-2005; 2007-2009)**. 2023b. 1p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. **PIB dos Municípios (2013-2019)**. 2023c. 1p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. **Produção Agrícola Municipal-PAM: Área colhida em soja nos municípios brasileiros 2000-2021.** 2023d. 1p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. **Produção Agrícola Municipal-PAM: Quantidade produzida de soja nos municípios brasileiros 1999-2021.** 2023f. 1p.

Instituto Rio Grandense do Arroz-IRGA. **Custo de produção médio ponderado arroz irrigado – projeção**. 2022. 1 p.

JENSEN, John R. **Remote Sensing of the Environment**: An Earth Resource Perspective. New Delhi: Pearson Education India, 2009, 613 p.

JOHNSON, D. M.; MUELLER, R. Pre-and within-season crop type classification trained with archival land cover information. **Remote Sensing of Environment**, v. 264, p. 1-13, 2021.

KUPLICH, T. M.; CAPOANE, V.; FLENIK, L. F. O avanço da soja no Bioma Pampa, **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, n. 31, p. 83-100, 2018.

LANDIS, R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v. 33, n 1, p. 159-174, 1977.

LEMOS, Gabriel da Silva. **Mapeamento de áreas de soja em municípios da metade sul do estado do Rio Grande do Sul a partir de imagens de satélite**. 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

LIN, C.; ZHONG, L.; SONG, X. P.; DONG, J.; LOBELL D. B.; JIN, Z. Early- and in-season crop type mapping without current-year ground truth: Generating labels from historical information via a topology-based approach. **Remote Sensing of Environment**, p. 1-22, 2022.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA E ABASTECIMENTO-MAPA. Agrostat: estatísticas de comércio exterior do agronegócio brasileiro. 2023. Disponível em: <https://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>. Acesso em: 15 abr. 2023.

PARREIRAS, T. C.; BOLFE, E. L.; CHAVES, M. E. D.; SANCHES, I. D.; SANO, E. E.; VICTORIA, D. CASTRO, BETTIOL, G. M.; VICENTE, L. E. Hierarchical Classification of Soybean in the Brazilian Savanna Based on Harmonized Landsat Sentinel Data. **Remote Sensing**, p. 1-22, 2022.

Prefeitura Municipal de Santa Vitória do Palmar. Santa Vitória do Palmar. 2021. Disponível em: <https://www.santavitoriadopalmar.rs.gov.br/municipio/cidade/>. Acesso em: 15 jul. 2021.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul.** 2004. 214 f. Tese (Doutorado em

Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 2004.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Estimativa da área plantada com soja no Rio Grande do Sul por meio de imagens Landsat. **Revista Brasileira de Cartografia**, p 1-10, 2005.

ROSSO, R. B.; PEITER, M. X.; ROBAINA, A. D.; TORRES, R. R.; KIRCHNER, J. H. Uso de camalhões de base larga para a viabilização do cultivo de soja em terras baixas. **Irriga**, v. 23, n. 4, p. 679-696, 2018.

SAMPAIO, M. H. A. Agricultura. A supersafra 2000/01. **Indic. Econ. FEE**, v. 29, p. 52-60, ago, 2001.

SANCHES, I. D.; EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Culturas agrícolas em imagens multitemporais do satélite Landsat. Revista **Agricultura em São Paulo**, v. 52, n. 1, p. 83-96, 2005.

Santos, Alexandre Rosa; Peluzio, Telma Machado Oliveira; Saito, Nathália Suemi. **Spring 5.1.2 Passo a Passo**. Aplicações práticas. Alegre: 2010, 154 p.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS-SEBRAE. Perfil das cidades gaúchas: Jaguarão. 21 p, 2020a.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS-SEBRAE. Perfil das cidades gaúchas: Arroio Grande. 21 p, 2020b.

SILVA, M. N.; ANJOS, F. S. A expansão da soja no município de Jaguarão/RS: análise das percepções
através da abordagem narrativa. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, p. 1-13, 2020.

SILVEIRA, V. C. P.; 2017. GONZÁLEZ J. A.; FONSECA, E. L. Land use chance after the period commodities rising price in the Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 47, n. 04, p. 1-7, 2017.

TOTH, C.; JÓZCÓW, G. Remote sensing platforms and sensors: A survey. **ISPRS Journal of Photogrametry and Remote Sensing**, p. 1-15, 2015.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PENSILVÂNIA-PSU. Overwieu of programming language for GIS. 2023. Disponível em: <https://www.e-education.psu.edu/geog583/node/67>. Acesso em: 19 abr. 2023.