

Métodos de Machine Learning na Produtividade de Soja

Arthur Hintz, Lucas Sartor

04 dez 2025

Contents

1 Resumo	1
2 Introdução	1
3 Conjunto de Dados	2
4 Análise Descritiva	2
5 Metodologia	7
5.1 Aprendizado não supervisionado	7
5.2 Aprendizado supervisionado	8
6 Resultados	9
7 Conclusão	10

1 Resumo

Este relatório apresenta o desenvolvimento de um projeto de Machine Learning realizado no âmbito da disciplina, empregando inicialmente métodos não supervisionados e, posteriormente, técnicas supervisionadas. São descritos os objetivos, o conjunto de dados, a metodologia empregada e os resultados obtidos, incluindo análises de sensibilidade com ênfase em validação, regularização e reproduzibilidade. Para a avaliação do desempenho preditivo, adotou-se a abordagem de validação cruzada (cross-validation).

2 Introdução

Segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), o agronegócio representou 23,8% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro em 2023. Entre as commodities agrícolas, a soja destaca-se como aquela de maior valor de produção no país, conforme dados do IBGE. A produtividade das lavouras sofre influência de diversos fatores, muitos deles incontroláveis, como condições climáticas. No último ciclo, por exemplo, observou-se um

aumento de 70,83% na produtividade em relação ao ano anterior, possivelmente associado ao maior volume de precipitação.

Dante desse contexto, torna-se essencial analisar as regiões do Rio Grande do Sul que apresentam maiores desafios produtivos, agrupando áreas com características semelhantes. Tal abordagem auxilia na compreensão dos fatores que diferenciam os ambientes de produção e pode apoiar estratégias de manejo mais eficientes.

Inicialmente, realiza-se uma análise descritiva do conjunto de dados para compreender as variáveis envolvidas e suas inter-relações. Em seguida, aplica-se o método k-means para identificar agrupamentos homogêneos (clusters). Posteriormente, estima-se o potencial produtivo de cada cluster por meio de um modelo de regressão.

Os dados utilizados neste estudo foram disponibilizados pela empresa Crops Team e foram coletados a partir de experimentos com cultivares de soja conduzidos em diversas localidades do estado do Rio Grande do Sul durante as safras de 2021/2022 e 2022/2023.

Este estudo é relevante pois permite identificar os principais determinantes da produtividade da soja, fornecendo subsídios para a tomada de decisões agrícolas e para a otimização dos rendimentos das cultivares. Ao compreender melhor os fatores que influenciam a produtividade, produtores e pesquisadores podem implementar práticas agrícolas mais eficientes, maximizando o potencial produtivo das regiões analisadas.

3 Conjunto de Dados

O conjunto de dados original continha informações provenientes dos quatro blocos de cada ensaio. As médias dos blocos por cultivar foram então calculadas, resultando em 1513 observações e 33 variáveis. Após o processo de filtragem e tratamento de valores faltantes, obteve-se o banco de dados final utilizado nas análises.

- **Cultivares:** Informações sobre as diferentes variedades de soja utilizadas nos experimentos.
- **Localização:** Características geográficas dos locais onde os experimentos foram conduzidos.
- **Dados Climáticos:** Informações sobre precipitação, temperatura e outras condições climáticas durante o período dos experimentos.
- **Componentes Químicos do Solo:** Dados sobre a composição química do solo, incluindo níveis de nutrientes e pH.

Dessa forma, resultou na seguinte Tabela 1 que apresenta uma amostra aleatória de 10 linhas do conjunto de dados final e as colunas das variáveis qualitativas .

4 Análise Descritiva

A análise descritiva dos dados constitui uma etapa fundamental para compreender o comportamento da produtividade de soja no Rio Grande do Sul. Nessa fase, foram avali-

Table 1: Exemplo das variáveis qualitativa

Safra	COD_PROD	Local	Terras	Ambiente	Cultivar
2021/2022	SS444	SAO MARTINHO DA SERRA	ALTAS	SEQUEIRO	BMX ZEUS IPRO
2022/2023	DA542	DOIS IRMAOS DAS MISSOES	ALTAS	IRRIGADO	DM 54IX57 12X
2021/2022	SR227	SANTA ROSA	ALTAS	SEQUEIRO	DM 5958 IPRO
2022/2023	SL009	SANTA VITORIA DO PALMAR	BAIXAS	SEQUEIRO	CZ 15B20 I2X
2021/2022	CA070	CACHOEIRA DO SUL	BAIXAS	SEQUEIRO	DM 5958 IPRO
2022/2023	DA542	DOIS IRMAOS DAS MISSOES	ALTAS	IRRIGADO	AS 3551 XTD
2022/2023	BA255	BOSSOROCA	ALTAS	SEQUEIRO	ST 622 IPRO
2021/2022	TA485	TUPANCIRETA	ALTAS	SEQUEIRO	M 5710 I2X
2021/2022	IP051	ITAQUI	BAIXAS	IRRIGADO	TMG 7362 IPRO
2022/2023	TA485	TUPANCIRETA	ALTAS	IRRIGADO	P 95R21 E

Table 2: Variáveis qualitativas

variaveis	n_faltantes	n_categorias
Safra	0	2
COD_PROD	0	34
Local	0	27
Cod_Estacao_Met	0	18
Terras	0	2
Ambiente	0	3
Cultivar	0	184
Cultura_Ant	119	12
Epoca_de_semeadura	0	40

adas medidas de tendência central e de dispersão, além das relações entre as variáveis e a distribuições da variável resposta.

A Tabela 2 apresenta as variáveis qualitativas do conjunto de dados. A coluna *n_faltantes* indica a presença de valores ausentes, observando-se que apenas a variável *Cultura_Ant* possui registros faltantes. Já a coluna *n_categorias* evidencia o número de categorias existentes em cada variável qualitativa.

Em complemento, a Tabela 3 exibe as variáveis quantitativas juntamente com suas estatísticas descritivas. São apresentados valores de média, desvio padrão, mínimo, máximo e quartis, permitindo identificar a distribuição dos dados e potenciais assimetrias ou dispersões relevantes para a modelagem.

A Figura 1 apresenta a matriz de correlação das variáveis numéricas. A intensidade e o tamanho dos círculos permitem identificar rapidamente associações fortes — positivas quando em azul, negativas quando em vermelho. Essa etapa auxilia na identificação de possíveis casos de multicolinearidade e variáveis potencialmente relevantes para explicar a produtividade.

A Figura 2 mostra a distribuição da produtividade (Kg/ha) ao longo das duas safras analisadas. A linha vertical laranja indica a média geral, igual a 2457.65.

A Figura 3 compara a produtividade entre as safras 2021/2022 e 2022/2023. Verifica-se um aumento expressivo no segundo ciclo, provavelmente associado a condições climáticas mais favoráveis.

Table 3: Variáveis quantitativas

variaveis	media	dp	min	quartil_25	mediana	quartil_75	max
Altitude	304.69	217.97	3.00	105.00	288.00	489.00	688.00
N_base	12.46	8.56	0.00	6.00	9.20	17.20	40.00
P_base	74.45	28.20	40.00	56.00	64.40	92.00	135.00
K_base	41.47	32.79	0.00	0.00	45.50	60.00	112.50
Produtividade	2630.00	1417.06	185.00	1512.70	2416.70	3622.57	6898.68
GMR	5.83	0.43	4.90	5.50	5.80	6.10	8.10
N_Plantas	77.28	25.36	12.00	59.75	74.50	92.25	172.00
Espacamento	0.47	0.04	0.40	0.45	0.45	0.45	0.58
Area_colhida	3.37	0.96	0.90	2.70	3.60	4.05	5.40
Populacao	18.12	9.21	0.00	15.25	20.30	24.07	43.98
Temperatura_Max	24.42	1.23	22.08	23.59	24.48	25.08	28.10
Precipitacao_Total	389.34	88.58	158.70	315.90	372.80	451.20	735.20
Umidade_Med	68.61	6.20	52.93	64.45	68.68	72.00	80.19
Radiacao_Med	24285.63	2940.83	20411.79	22770.84	23768.85	24520.27	38592.57
PH	5.18	0.35	4.50	5.00	5.10	5.30	6.30
ARGILA	43.19	20.31	4.00	27.00	44.00	59.00	85.00
P.mg.L.	26.14	41.91	2.50	9.00	19.00	27.00	359.20
K.mg.L.	130.42	109.59	28.00	72.00	88.00	180.00	636.00
M_O	2.51	0.83	1.00	1.90	2.50	2.90	5.90
CTC.PH7	14.09	4.21	6.90	11.40	14.00	15.40	35.50
SATURACAO.DE.BASE...	62.70	14.10	27.00	54.00	65.00	76.00	86.00
SATURACAO.Al...	3.38	5.74	0.00	0.00	2.10	4.00	34.00
Latitude	-29.52	1.57	-33.52	-29.70	-29.08	-28.53	-27.55
Longitude	-53.65	1.29	-56.68	-53.99	-53.78	-53.21	-49.74

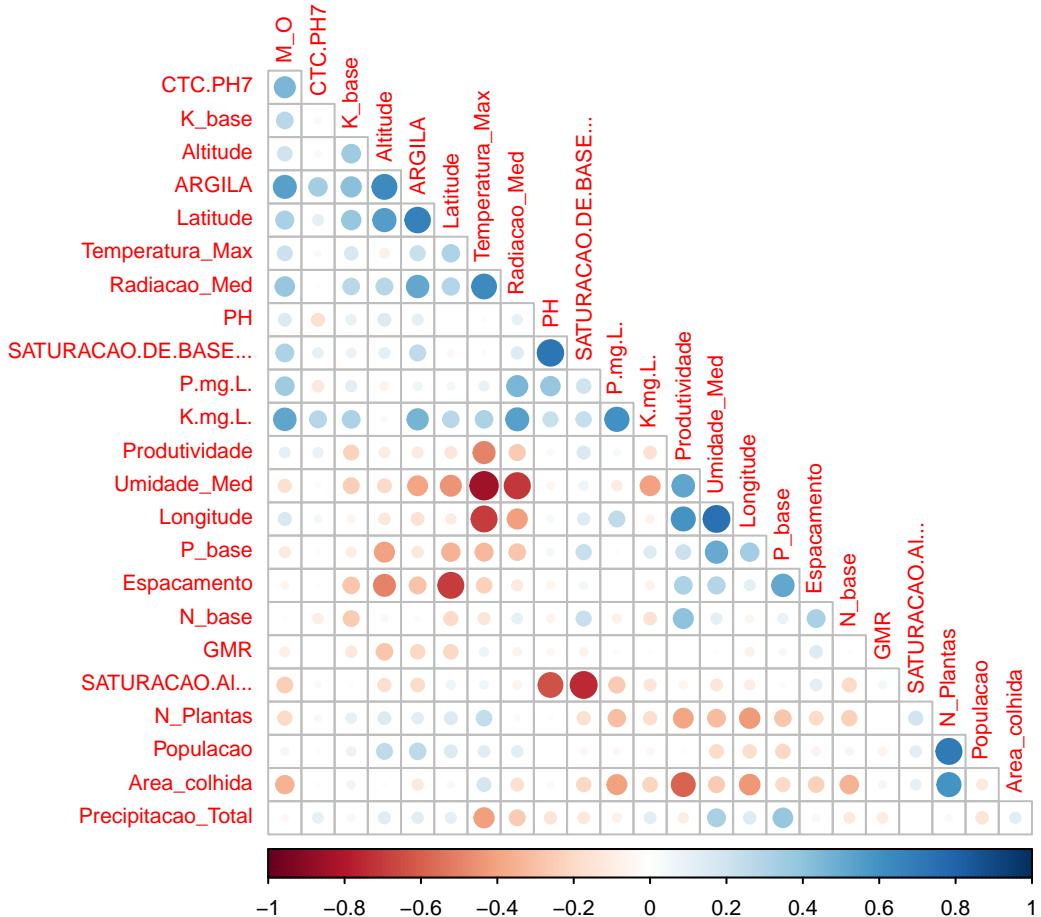


Figure 1: Corplot das Variáveis Numéricas

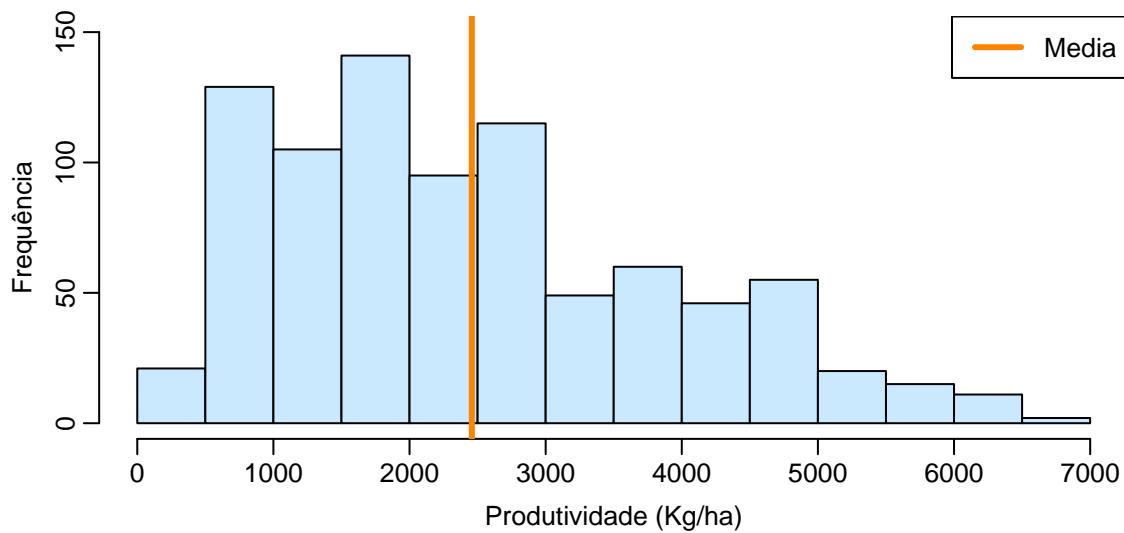


Figure 2: Histograma da Produtividade de Soja

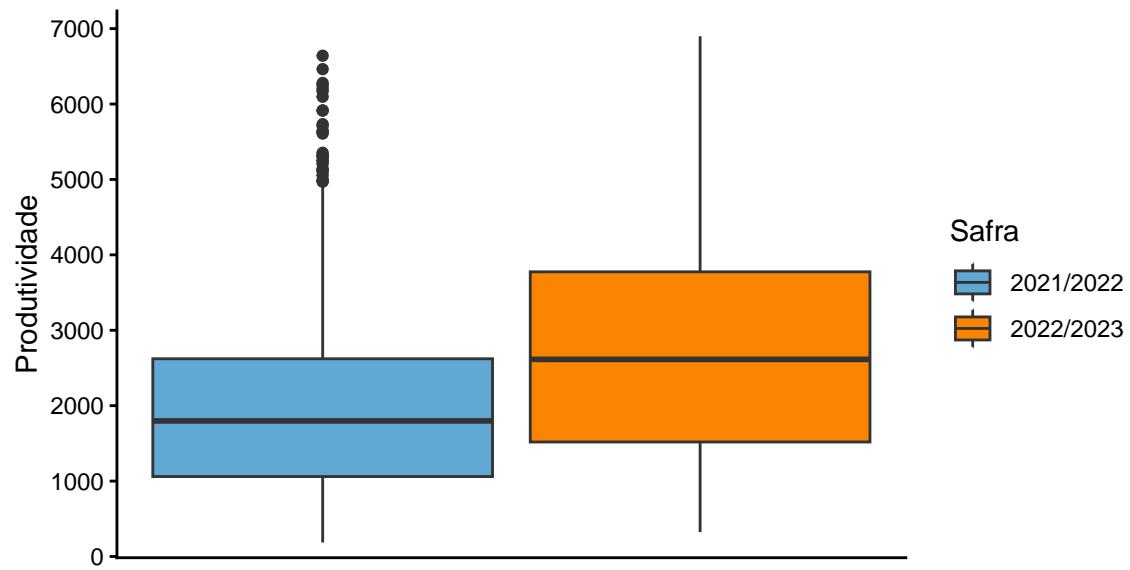


Figure 3: Boxplot da produtividade de soja

A Figura 4 ilustra a variabilidade entre locais. Observa-se grande amplitude produtiva, com valores inferiores a 1000 kg/ha em Bossoroca e superiores a 6000 kg/ha na cidade de Torres, evidenciando forte heterogeneidade espacial.

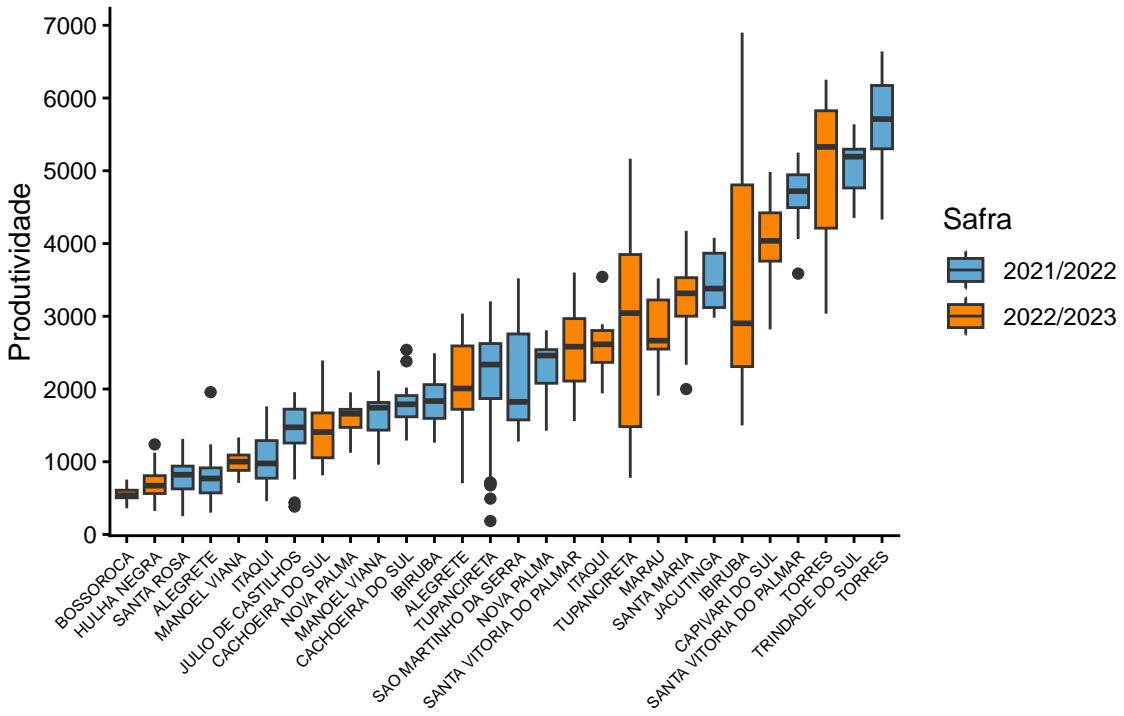


Figure 4: Boxplot da Produtividade separada por Locais e por Safra

5 Metodologia

A metodologia adotada neste estudo foi dividida em duas etapas principais:

- (i) um procedimento de aprendizado não supervisionado, voltado à identificação de padrões estruturais nos ambientes experimentais; e
 - (ii) um processo de aprendizado supervisionado, cujo objetivo é a predição da produtividade de soja utilizando os agrupamentos previamente identificados.

5.1 Aprendizado não supervisionado

Para a etapa não supervisionada, empregou-se o algoritmo K-Means, cuja finalidade é particionar as observações em K grupos distintos, de modo que exista alta homogeneidade dentro dos clusters e heterogeneidade entre os cluster. Cada observação pertence exclusivamente a um único grupo, e a definição dos clusters é realizada minimizando a variabilidade

interna de cada conjunto. Sejam C_1, \dots, C_K os conjuntos de índices das observações pertencentes a cada cluster e seja $X \in R^{n \times p}$ a matriz de dados padronizados. O critério otimizado pelo K-Means pode ser escrito como:

$$\underset{C_1, \dots, C_K}{\text{minimize}} \left\{ \sum_{k=1}^K \frac{1}{|C_k|} \sum_{i, i' \in C_k} \sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{i'j})^2 \right\}.$$

O método busca minimizar a soma das distâncias quadráticas entre cada observação e o centróide de seu respectivo grupo. O algoritmo segue as seguintes etapas:

1. Inicialização: Cada observação recebe aleatoriamente um rótulo entre 1 e K . Estas são as atribuições iniciais de cluster para as observações.
2. Iteração (até convergência):
 - a. Recalcular os centróides de cada cluster;
 - b. Reatribuir cada observação ao cluster cujo centróide apresente menor distância Euclidiana.

A seleção do número adequado de clusters (K) é uma etapa essencial no processo de agrupamento. Neste trabalho, a escolha do K ótimo foi avaliada considerando o intervalo de valores $K \in \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$. Para determinar o particionamento mais apropriado, utilizou-se a métrica Soma dos Quadrados Dentro do Cluster (Within-Cluster Sum of Squares - WSS).

O WSS é definido como a soma das distâncias quadráticas entre cada observação e o centróide de seu respectivo cluster. Essa medida reflete a coerência interna dos grupos: valores menores indicam clusters mais compactos e homogêneos, o que é desejável.

Formalmente, o WSS é expresso por:

$$\text{WSS}(K) = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2.$$

em que C_k representa o conjunto de observações atribuídas ao cluster k e μ_k é seu centróide.

A análise do WSS em função de K é crucial para a aplicação do Método do Cotovelo (Elbow Method), que permite identificar o ponto de inflexão (cotovelo) onde o ganho na redução do WSS começa a diminuir significativamente, indicando o valor de K que oferece um bom equilíbrio entre compacidade e número de clusters.

No presente estudo, ainda que o WSS apresentasse redução contínua para valores crescentes de K , essa redução ocorreu de maneira aproximadamente linear, sem indicar um cotovelo claramente definido. Assim, considerando também o conhecimento prévio sobre a estrutura dos ambientes experimentais e a necessidade de manter interpretabilidade, optou-se por adotar $K = 4$ clusters.

5.2 Aprendizado supervisionado

Com os dados previamente particionados em 4 clusters com base na similaridade das variáveis analisadas, torna-se necessário verificar se essa segmentação também se reflete na

variável produtividade, dado que essa variável não foi utilizada para atribuir os grupos. Caso os clusters apresentem diferenças significativas nos níveis de produtividade, será possível inferir que essa variável é influenciada pelas demais variáveis consideradas e que a estrutura de clusters obtida é adequada para avaliar a produção.

Para verificar se a produtividade pode ser explicada pelos clusters, é preciso empregar um método de aprendizado supervisionado, no qual há uma variável resposta a ser prevista e um conjunto de variáveis explicativas utilizadas para modelar essa previsão. O método supervisionado escolhido foi o de árvore de regressão com apenas os clusters determinando a produtividade.

Uma árvore de regressão é um modelo que realiza a predição de uma variável resposta por meio da construção de uma estrutura hierárquica de decisões. Trata-se de um particionamento do espaço das variáveis explicativas, essas divisões podem ser chamadas de nó. Em cada etapa procura-se a variável que minimiza a soma de quadrados de suas respectivas regiões.

Cada particionamento é definido por:

$$\min_{j,s} \left\{ \sum_{y_i \in R_1(j,s)} (y_i - \bar{y}_{R_1})^2 + \sum_{y_i \in R_2(j,s)} (y_i - \bar{y}_{R_2})^2 \right\},$$

em que j representa as variáveis explicativas, s corresponde ao ponto de corte, X são cada linha do banco de dados, $R_1(j,s)$ e $R_2(j,s)$ são as regiões em que X_j são menores ou iguais ao ponto de corte ou maior que o ponto de corte respectivamente. \bar{y}_R é a média da variável resposta em cada região.

Esse processo acontece até que o número mínimo de observações por nó ou o máximo de profundidade da árvore sejam atingidos. Além disso há um custo de complexidade que define se vale a pena uma divisão extra. Esses são hiperparâmetros que foram tunados antes do ajuste para encontrar o melhor modelo.

O modelo por fim estima valores de produtividade para minimizar essa soma para cada um dos clusters.

6 Resultados

Para inspeção visual dos clusters, realizou-se uma Análise de Componentes Principais (PCA), um método que projeta os dados para um espaço de menor dimensão preservando a maior variabilidade possível. O primeiro componente principal é definido por:

$$Z_1 = \phi_{11}X_1 + \phi_{21}X_2 + \cdots + \phi_{p1}X_p,$$

em que o vetor $\phi_1 = (\phi_{11}, \phi_{21}, \dots, \phi_{p1})^\top$ é obtido pela maximização da variância projetada sob a restrição de normalização.

A PCA permite representar os clusters em duas dimensões, fornecendo uma visão clara de sua dispersão e separabilidade. A Figura 5 ilustra esta projeção, mostrando que os quatro grupos apresentam estrutura coerente, ainda que com alguma sobreposição esperada dada a complexidade dos ambientes agrícolas.

A partir do agrupamento, foi possível estimar a produtividade média associada a cada cluster, conforme detalhado na legenda da Figura 6. Os resultados revelam diferenças

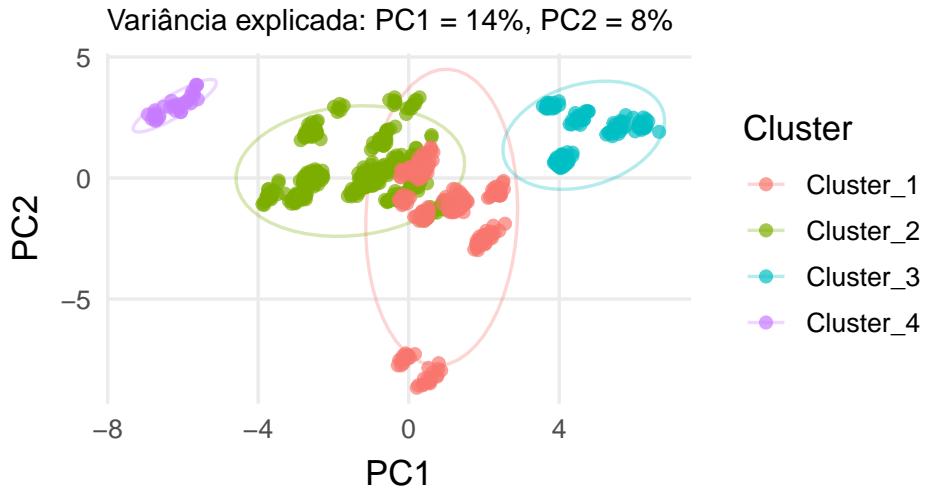


Figure 5: Análise de Componentes Principais

expressivas nas médias de produtividade entre os grupos, o que corrobora a tese de que características semelhantes entre as observações influenciam diretamente seu desempenho final.

A distribuição geográfica desses clusters é visualizada no mapa do Rio Grande do Sul (Figura 6), onde as médias de produtividade de cada grupo e sua localização são apresentadas. O mapa inclui um raio de 100 km em torno dos pontos, sugerindo uma homogeneidade de características dentro dessa área.

Essa representação espacial demonstra que a divisão dos clusters está fortemente correlacionada com as divisões geográficas do estado, destacando a relevância dos fatores naturais e regionais na determinação da produtividade.

7 Conclusão

Este estudo aplicou técnicas de aprendizado de máquina para analisar fatores associados à produtividade de soja no Rio Grande do Sul. A análise descritiva revelou grande variabilidade produtiva entre regiões e safras, reforçando a influência das condições edafoclimáticas.

O agrupamento via K-Means permitiu segmentar os ambientes em quatro clusters com características distintas. Embora o método do cotovelo não indicasse claramente o número ideal de grupos, a escolha de quatro clusters mostrou boa interpretabilidade e coerência estrutural, evidenciada também pela análise de componentes principais.

A etapa supervisionada, utilizando uma árvore de regressão, confirmou que os clusters possuem relação significativa com a produtividade, indicando que regiões com atributos semelhantes apresentam desempenhos próximos. O mapeamento espacial reforçou o papel dos fatores naturais na diferenciação produtiva.

Em síntese, os resultados mostram que métodos de machine learning são úteis para

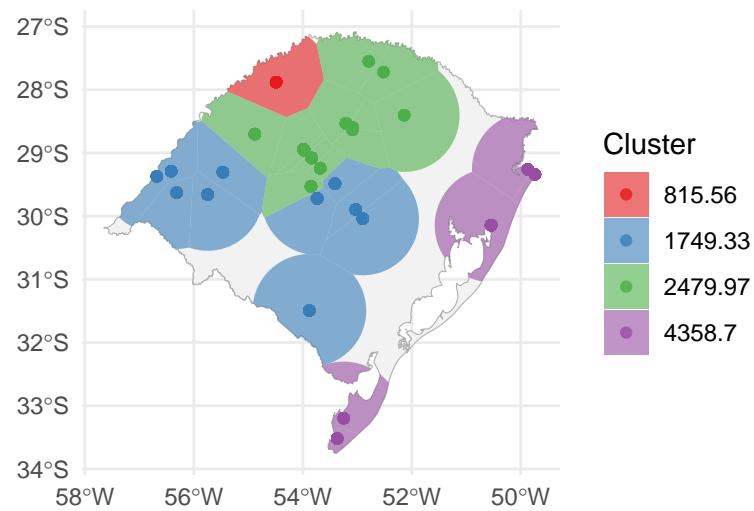


Figure 6: Mapa da Produtividade Média por Cluster

identificar padrões ambientais e apoiar a predição da produtividade. Estudos futuros podem explorar modelos mais complexos e integrar novas fontes de dados para aprofundar as análises.