

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Análise e modelagem da demanda de energia no processo de secagem a baixa temperatura de arroz e soja no Brasil**

Augusto Cesar Laviola de Oliveira  
*Doctor Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**AUGUSTO CESAR LAVIOLA DE OLIVEIRA**

**Análise e modelagem da demanda de energia no processo de secagem a baixa temperatura de arroz e soja no Brasil**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Natalia dos Santos Renato

Coorientador: Luis Cesar da Silva

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

O48a  
2025

Oliveira, Augusto Cesar Laviola de, 1996-  
Análise e modelagem da demanda de energia no processo  
de secagem a baixa temperatura de arroz e soja no Brasil /  
Augusto Cesar Laviola de Oliveira. – Viçosa, MG, 2025.  
1 tese eletrônica (219 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Natália dos Santos Renato.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Agrícola, 2025.

Referências bibliográficas: f. 191-198.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.239>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Arroz - Secagem. 2. Soja - Secagem. 3. Energia elétrica -  
Consumo. 4. Calorimetria. 5. Análise espacial (Estatística).  
6. Redes neurais (Computação). I. Renato, Natália dos Santos,  
1984-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 633

**AUGUSTO CESAR LAVIOLA DE OLIVEIRA**

**Análise e modelagem da demanda de energia no processo de secagem a baixa temperatura de arroz e soja no Brasil**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 21 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

---

Augusto Cesar Laviola de Oliveira  
Autor

---

Natalia dos Santos Renato  
Orientadora

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 08/05/2025 às 11:23:37 e pela orientadora em 08/05/2025 às 15:21:29. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **AJJO.XZ44.324A** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus pais, Marcelo José de Oliveira e Fabiane Laviola Ricardo Oliveira, pela infinita capacidade de amar, aos meus irmãos, Victor Hugo e Gustavo Henrique pelo companheirismo e confiança e à Thassiana por todo o amor, carinho e paciência.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que se mostrou criador, que foi criativo. Seu fôlego de vida em mim me foi sustento e me deu coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades.

Aos meus pais, que me serviram como guia e apoio para todas as minhas decisões e realizações nessa jornada, e que a todo tempo não mediram esforços para que tudo isso fosse possível.

À Thassiana Rafaelle Rodrigues Leite, pela confiança, amor, paciência e incentivo, por acreditar junto comigo que tudo daria certo.

À Professora Natália dos Santos Renato, pela confiança, incentivo e orientação que permitiram a conclusão deste trabalho, e pelos ensinamentos e conselhos que serão levados por toda vida.

Ao Professor Luís César da Silva pela coorientação, pelas valiosas críticas, sugestões e conselhos.

Ao Professor e amigo Michael de Oliveira Resende, pelo companheirismo e incentivo durante os quatro anos de doutorado.

Ao Engenheiro e amigo Lucas Fernandes Rocha Lago, pelas contribuições valiosas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos estudantes de pós-graduação da área de energia, pela parceria em demais trabalhos acadêmicos e convivência no dia a dia de estudos.

Aos amigos da Seção Técnica Regional de Criminalística de Manhuaçu, com os quais tenho a honra de trabalhar, pelo incentivo e apoio.

A todos que de alguma forma fizeram com que esse momento se realizasse, seja com conselhos, sugestões, incentivos, apoios ou confiança.

À Universidade Federal de Viçosa, e em especial, ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À Procer - Agroateligência de Pós-colheita pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## RESUMO

OLIVEIRA, Augusto Cesar Laviola de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Análise e modelagem da demanda de energia no processo de secagem a baixa temperatura de arroz e soja no Brasil**. Orientadora: Natalia dos Santos Renato. Coorientador: Luis Cesar da Silva.

A eficiência energética é uma preocupação global crescente, mas poucos estudos analisam a demanda de energia em processos de secagem de grãos, especialmente em silo-secadores. A secagem a baixa temperatura (SBT) destaca-se por reduzir os riscos de danos térmicos e mecânicos, embora suas condições operacionais dependam diretamente do ar ambiente. Esse tema é especialmente relevante para o Brasil, país com grande diversidade climática e importância agrícola. Este trabalho teve como objetivo avaliar a demanda de energia elétrica e térmica na secagem de arroz e soja no Brasil, propor alternativas sustentáveis com base no uso de biomassa residual e desenvolver um modelo preditivo eficiente com redes neurais artificiais (RNAs). Para isso, o modelo de Thompson foi aplicado para simular a demanda de energia em unidades armazenadoras padrão, utilizando dados meteorológicos interpolados espacialmente. As simulações abrangeram quatro safras (2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2020/21), considerando variações sazonais e regionais. Um modelo de RNA feed-forward foi desenvolvido para prever as demandas energéticas. Os resultados mostraram que, no caso do arroz, a região Sul, responsável por 81% da produção nacional, concentrou até 86,63% da demanda energética total da safra (903,640 a 1.350,594GWh), e que a reutilização de resíduos compensaria totalmente essa demanda, com balanço de emissões de CO<sub>2</sub> variando entre -5.567,2 e 83715,3 toneladas. Para a soja, o Estado do Mato Grosso, maior produtor, apresentou demanda específica de 42,16 a 88,26kWh.ton<sup>-1</sup> de produto fresco, enquanto a demanda nacional, de 5,320 a 9,370TWh, esteve concentrada na região Centro-Oeste (42,24% - 44,24%). A casca da soja poderia suprir integralmente a demanda de energia elétrica, implicando em balanços de emissões de CO<sub>2</sub> entre -594,8 mil a 775,5 mil toneladas. A SBT de arroz e soja apresentaram demandas específicas totais de energia entre 2,147 e 5,984 e entre 1,266 e 5,822MJ.kg<sup>-1</sup> de água evaporada, respectivamente. Comparativamente, a SBT foi mais eficiente para a soja na maioria das condições, exceto em ambientes de baixa temperatura e alta umidade relativa, onde o arroz mostrou maior eficiência. O modelo de RNA proposto apresentou alta precisão na previsão de demandas energéticas, destacando-se como uma alternativa viável ao modelo tradicional. Concluiu-se que as condições climáticas brasileiras favorecem

a SBT, que a cogeração com biomassa residual é uma solução sustentável e que o modelo de RNA é eficiente e replicável em outros contextos. As metodologias apresentadas podem subsidiar decisões estratégicas para manejo agrícola e expansão da infraestrutura energética, promovendo eficiência e sustentabilidade, especialmente nos polos produtores agrícolas.

Palavras-chave: análise de dados espaciais; desenvolvimento sustentável; eficiência energética; planejamento energético; redes neurais artificiais

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Augusto Cesar Laviola de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Analysis and modeling of energy demand in the low-temperature drying process of rice and soybeans in Brazil.** Adviser: Natalia dos Santos Renato. Co-adviser: Luis Cesar da Silva.

Energy efficiency is a growing global concern, but few studies analyze energy demand in grain drying processes, especially in silo dryers. Low-temperature drying (LTD) stands out for reducing the risks of thermal and mechanical damage, although its operational conditions directly depend on ambient air. This topic is particularly relevant for Brazil, a country with climatic diversity and agricultural importance. This study aimed to evaluate the electrical and thermal energy demand in the drying of rice and soybeans in Brazil, propose sustainable alternatives based on the use of residual biomass, and develop an efficient predictive model using artificial neural networks (ANNs). For this purpose, the Thompson model was applied to simulate energy demand in standard storage units using spatially interpolated meteorological data. The simulations covered four harvests (2012/13, 2015/16, 2018/19, and 2020/21), considering seasonal and regional variations. A feed-forward ANN model was developed to predict energy demands. The results showed that, in the case of rice, the South region, responsible for 81% of national production, accounted for up to 86.63% of the total energy demand for the harvest (903.640 to 1,350.594GWh), and that the reuse of residues would fully offset this demand, with CO<sub>2</sub> emission balances ranging from -5,567.2 to 83,715.3 tons. For soybeans, the state of Mato Grosso, the main producer, showed a specific demand of 42.16 to 88.26kWh.ton<sup>-1</sup> of fresh product, while national demand, ranging from 5.320 to 9.370TWh, was concentrated in the Central-West region (42.24% - 44.24%). Soybean husks could fully meet the demand for electrical energy, resulting in CO<sub>2</sub> emission balances between -594,800 and 775,500 tons. LTD of rice and soybeans presented total specific energy demands between 2.147 and 5.984 and between 1.266 and 5.822MJ.kg<sup>-1</sup> of evaporated water, respectively. Comparatively, LTD was more efficient for soybeans under most conditions, except in low-temperature and high-relative-humidity environments, where rice showed greater efficiency. The proposed ANN model demonstrated high accuracy in predicting energy demands, standing out as a viable alternative to the traditional model. It was concluded that Brazilian climatic conditions favor LTD, that cogeneration with residual biomass is a sustainable solution, and that the ANN model is efficient and replicable in other contexts. The methodologies presented can support strategic decisions for agricultural

management and the expansion of energy infrastructure, promoting efficiency and sustainability, especially in agricultural production hubs.

Keywords: artificial neural networks; energy efficiency; energy planning; spatial data analysis; sustainable development

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Croqui ilustrativo do sistema de secagem a baixa temperatura.....	35
Figura 2 - Fluxograma do algoritmo de simulação do processo de secagem a baixa temperatura com base no Modelo de Thompson.....	43
Figura 3 - Estrutura básica de uma rede neural artificial.....	54
Figura 4 - Imagem ilustrativa dos blocos que compõem a Rede Neural artificial feed-foward com duas camadas. ....	56
Figura 5 - Análise da variação significativa das demandas de energia elétrica (a) e térmica (b) entre os meses simulados (fevereiro a junho) para a secagem de arroz.....	68
Figura 6 - Análise da variação significativa das demandas de energia elétrica (a) e térmica (b) entre as safras simuladas (2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22) para a secagem de arroz. ....	69
Figura 7 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2012/13.....	73
Figura 8 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2015/16.....	74
Figura 9 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2018/19.....	75
Figura 10 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2021/22.....	76
Figura 11 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2012/13.....	79
Figura 12 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2015/16.....	80
Figura 13 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2018/19.....	81

Figura 14 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2021/22. ....	82
Figura 15 - Análise da variação significativa das demandas de energia elétrica (a) e térmica (b) entre os meses simulados (janeiro a agosto) para a secagem de soja. ....	115
Figura 16 - Análise da variação significativa das demandas de energia elétrica (a) e térmica (b) entre as safras simuladas (2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22) para a secagem de soja. ....	117
Figura 17 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2012/13. ...	119
Figura 18 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2012/13. ....	120
Figura 19 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2015/16. ...	122
Figura 20 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2015/16. ....	123
Figura 21 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2018/19. ...	124
Figura 22 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2018/19. ....	125
Figura 23 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2021/22. ...	126
Figura 24 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2021/22. ....	127
Figura 25 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2012/13. ...	128
Figura 26 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2012/13. ....	130
Figura 27 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2015/16. ...	131
Figura 28 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2015/16. ....	132
Figura 29 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2018/19. ...	133

Figura 30 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2018/19.....	134
Figura 31 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2021/22. ...	135
Figura 32 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2021/22.....	136
Figura 33 - Evolução, de fevereiro a junho (“a” até “e”), das áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maiores eficiências energéticas quando comparadas entre si. ....	158
Figura 34 - Distribuição espacial das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.	219

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cronograma anual de simulações de secagem a baixa temperatura de grãos de arroz para as safras 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22. ....	39
Tabela 2 - Cronograma anual de simulações de secagem a baixa temperatura de grãos de soja para as safras 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22. ....	39
Tabela 3 - Análise de variância (ANOVA) para um delineamento inteiramente casualizado. ....	47
Tabela 4 - Coeficientes E, F e G da Equação 34 em diferentes condições de armazenamento. ....	50
Tabela 5 - Cenários definidos para análise das condições do ar ambiente nas áreas indicadas para secagem de arroz e soja. ....	53
Tabela 6 - Quantidade de estações com dados convergentes para a modelagem proposta (arroz). ....	58
Tabela 7 - Demanda média de energia elétrica (kWh) para SBT de 1951,24 toneladas de grãos de arroz. ....	60
Tabela 8 - Demanda média de energia térmica (kWh) para SBT de 1951,24 toneladas de grãos de arroz. ....	61
Tabela 9 - Demanda média de energia elétrica (kWh) no estado do Rio Grande do Sul para a SBT de 1951,24 toneladas de arroz. ....	63
Tabela 10 - Resultados da análise de variância para os dados de demanda de energia elétrica e térmica na SBT para os estados brasileiros (simulações para grãos de arroz). ....	65
Tabela 11 - Ajustes dos modelos formulados pelas Equações 23 e 24 (arroz). ....	84
Tabela 12 - Produção de arroz por estado nas safras de 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22. ....	84
Tabela 13 - Demandas específicas de energia elétrica, térmica e total por estado no processo de SBT do arroz. ....	86
Tabela 14 - Demandas de energia elétrica, térmica e total para os estados brasileiros por safra (secagem de arroz). ....	88
Tabela 15 - Estimativa do reaproveitamento energético da casca de arroz por estado. ....	89
Tabela 16 - Dados de tempo de secagem ( $t_s$ ), perda de matéria seca (PMS) e emissão de CO <sub>2</sub> em decorrência de PMS ( $m_{CO_2(1)}$ ) na secagem de arroz. ....	91
Tabela 17 - Balanço das emissões de CO <sub>2</sub> por estado (secagem de arroz). ....	93

Tabela 18 - Dados tarifários, demanda específica, custo médio e balanço de emissões por tonelada de arroz com casca submetida à secagem. ....	98
Tabela 19 - Quantidade de estações com dados convergentes para a modelagem proposta (soja). ....	101
Tabela 20 - Demanda média de energia elétrica (kWh) para SBT de 2674,54 toneladas de soja.....	103
Tabela 21 - Demanda média de energia térmica (kWh) para SBT de 2674,54 toneladas de soja.....	105
Tabela 22 - Demanda média de energia elétrica (kWh) no estado do Mato Grosso para a SBT de 2674,54 toneladas de soja. ....	108
Tabela 23 - Resultados da análise de variância para os dados de demanda de energia elétrica e térmica na SBT para os estados brasileiros (simulações para grãos de soja). ....	111
Tabela 24 - Ajustes dos modelos formulados pelas Equações 23 e 24 (soja). ....	137
Tabela 25 - Produção de soja por estado nas safras de 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22. ....	138
Tabela 26 - Demandas específicas de energia elétrica, térmica e total por estado no processo de SBT da soja.....	139
Tabela 27 - Demandas de energia elétrica, térmica e total para os estados brasileiros por safra (secagem de soja). ....	141
Tabela 28 - Estimativa do reaproveitamento energético da casca de soja por estado. ....	144
Tabela 29 - Dados de tempo de secagem ( $t_s$ ), perda de matéria seca (PMS) e emissão de CO <sub>2</sub> em decorrência de PMS ( $m_{CO_2(1)}$ ) na secagem de soja.....	146
Tabela 30 - Balanço das emissões de CO <sub>2</sub> por estado (secagem de soja). ....	148
Tabela 31 - Dados tarifários, demanda específica, custo médio e balanço de emissões por tonelada de soja submetida à secagem. ....	153
Tabela 32 - Percentual de áreas por estado onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética. ....	162
Tabela 33 - Umidade relativa do ar média (%) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética. ....	164
Tabela 34 - Temperatura de bulbo seco (°C) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética. ....	166
Tabela 35 - Pressão atmosférica média (kPa) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética. ....	168

Tabela 36 - Demanda específica média de energia elétrica (kWh.ton <sup>-1</sup> ) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética. ....	170
Tabela 37 - Demanda específica média de energia térmica (kWh.ton <sup>-1</sup> ) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética. ....	172
Tabela 38 - Demanda específica média de energia total (kWh.ton <sup>-1</sup> ) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética. ....	174
Tabela 39 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia elétrica na secagem de arroz. ....	177
Tabela 40 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia térmica na secagem de arroz. ....	178
Tabela 41 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia total na secagem de arroz. ....	178
Tabela 42 - Amostras utilizadas na validação final das RNAs para previsão das demandas de energia na secagem do arroz. ....	179
Tabela 43 - Resultados obtidos para validação final da RNAs para previsão das demandas de energia na secagem do arroz. ....	180
Tabela 44 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia elétrica na secagem de soja. ....	181
Tabela 45 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia térmica na secagem de soja. ....	182
Tabela 46 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia total na secagem de soja. ....	183
Tabela 47 - Amostras utilizadas na validação final das RNAs para previsão das demandas de energia na secagem de soja. ....	184
Tabela 48 - Resultados obtidos para validação final da RNAs para previsão das demandas de energia na secagem do soja. ....	185
Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho. ....	199

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\hat{E}_j$  representa os valores estimados (kWh);
- $\Delta T_{qm}$  é o aquecimento do ar de secagem pelo queimador (°C);
- $B_{CO_2}$  é o balanço de emissões de CO<sub>2</sub> (ton);
- $D_{GLP}$  é a quantidade de GLP demandada no processo de secagem (kg);
- $C_{ea}$  é a capacidade estática da unidade armazenadora padrão (ton);
- $C_{ea}$  é a capacidade estática do silo secador (ton);
- $\bar{E}$  é média dos valores observados (kWh);
- $EE_S$  é demanda de energia elétrica na safra (kWh);
- $EE_{aq}$  é a energia elétrica demandada pelo aquecedor (kWh);
- $EE_{vent}$  é a energia elétrica demandada por  $n_{vent}$  ventilador (kWh);
- $ET_{GLP_S}$  é demanda de energia térmica na safra (kWh);
- $ET_{GLP}$  é a demanda de energia térmica por unidade armazenadora padrão cheia (kWh);
- $E_{TOT}$  é a energia total demandada no processo de secagem dos grãos (kWh);
- $E_b$  é a energia demandada no processo de fabricação do briquete (MWh);
- $E_c$  é a energia que será utilizada para compensação no sistema produtivo (MWh);
- $E_{el}$  é a energia elétrica gerada pelo sistema de cogeração (MWh);
- $E_f$  é o fator de emissão da matriz elétrica brasileira (adimensional);
- $E_j$  representa os valores observados (kWh);
- $FM_{pg}$  é o fator de majoração da pressão estática (adimensional);
- $F_{area}$  é o fluxo de ar por área ( $m^3 \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$ );
- $H_g$  é a altura da coluna de grãos (m);
- $I_{L-v}$  é corrente de linha do ventilador (A);
- $I_{qm}$  é a corrente do queimador (A);
- $M_N$  e  $N_N$  é o número de neurônios na entrada e camadas ocultas;
- $PCI_{GLP}$  é poder calorífico inferior do gás liquefeito de petróleo ( $kcal \cdot kg^{-1}$ );
- $PCI_b$  é o poder calorífico do briquete de casca de soja ou arroz ( $MJ \cdot kg^{-1}$ );
- $PROD_g$  é a produção de grãos (ton);
- $P_{atm}$  é a pressão atmosférica (Pa);

$P_{es}$  é a pressão estática (kPa);

$Pot_d$  é a potência disponível a partir do reaproveitamento do resíduo (MW);

$Pot_{el}$  é a potência de energia gerada (MW);

$P_{vent}$  é a potência total dos ventiladores (CV);

$R^2$  é o coeficiente de determinação;

$RM_f$  é a razão de mistura do ar de saída da camada de grãos (kg de vapor.kg de ar seco<sup>-1</sup>);

$RM_o$  é a razão de mistura do ar no instante  $t$  (kg de vapor.kg de ar seco<sup>-1</sup>);

$Raster_{DET-ARROZ}$  é a camada *raster* de demanda de energia total na secagem do arroz;

$Raster_{DET-SOJA}$  é a camada *raster* de demanda de energia total na secagem da soja;

$Raster_{COMP}$  é a camada *raster* que recebe a análise comparativa da demanda de energia entre a secagem de arroz e soja;

$SS_{res}$  é a soma dos quadrados dos resíduos;

$SS_{total}$  é a soma dos quadrados total;

$SS_{trat}$  é a soma dos quadrados dos tratamentos;

$T_{bs}$  é a temperatura de bulbo seco (°C);

$T_f$  é a temperatura de equilíbrio entre o ar e os grãos no instante  $t + \Delta t$  (°C);

$T_{gf}$  é a temperatura da massa de grãos no instante  $t + \Delta t$ , equilíbrio, igual a  $T_f$  (°C);

$T_{go}$  é a temperatura da massa de grãos no instante  $t$  (°C);

$T_i$  é a soma dos investimentos no tratamento  $i$ ;

$T_o$  é a temperatura do ar no instante  $t$  (°C);

$T_s$  é a temperatura do ar (°C);

$UR_e$  é a umidade relativa do ar (%);

$U_e$  é a umidade de equilíbrio em base seca do grão com o ar de secagem (decimal);

$U_f$  é o teor de água final do produto em base seca no instante  $t + \Delta t$  (decimal);

$U_o$  é o teor de água inicial do produto em base úmida (decimal);

$U_p$  é o teor de água do produto (%);

$U_{ra}$  é a umidade relativa do ar (%);

$U_{rp}$  é o teor de água retirado do produto (%);

$V_e$  é o volume específico do ar (m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>);

$V_{f-q}$  é tensão de fase do aquecedor (V);

$V_{f-v}$  é tensão de fase do ventilador (V);

$W_{ji}$  é um peso na camada oculta que conecta o  $i$ -ésimo na camada de entrada e o  $j$ -ésimo neurônio na camada oculta;

$W_{jo}$  é o viés para o  $j$ -ésimo neurônio oculto;

$W_{kj}$  é um peso na camada de saída conecta o  $j$ -ésimo neurônio na camada oculta e o  $k$ -ésimo neurônio na camada de saída;

$W_{ko}$  é o viés para o  $k$ -ésimo neurônio de saída;

$X_i$  é a  $i$ -ésima variável de entrada para a camada de entrada;

$c_{ar}$  é o calor específico ar ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ );

$d_{oi}$  é o inverso da distância entre o ponto alvo e os pontos observados;

$f_h$  é a função de ativação do neurônio oculto;

$f_{ar}$  é o fluxo de ar ( $\text{m}^3$  de ar/min ton);

$f_o$  é a função de ativação do neurônio de saída;

$f_u$  é o fator de utilização de  $E_c$  (adimensional);

$k_T$  é a constante de ajuste de tempo de ( $\text{s.ano}^{-1}$ );

$m_{CO_2(1)}$  é a massa de  $\text{CO}_2$  acumulada durante o processo de secagem (ton);

$m_{CO_2(2)}$  é a massa de  $\text{CO}_2$  emitida em decorrência do demanda/queima de GLP (ton);

$m_{CO_2(NE)}$  é a quantidade de  $\text{CO}_2$  que deixaria de ser emitida (ton);

$m_r$  é a massa de resíduos (ton);

$p_c$  é a perda de carga (mmca);

$p_c$  é a perda de carga imposta pela coluna de grãos (Pa);

$r_i$  é o número de repetições do tratamento  $i$ ;

$t_{qm}$  é o tempo de secagem com aquecimento (h);

$t_s$  é o tempo de secagem total (h);

$v_j$  é o campo local induzido do neurônio “ $j$ ”;

$w_o$  e  $w_b$  são os pesos para as fases de operação e construção de novas usinas (adimensional);

$\hat{y}(S_0)$  é o valor que pretende-se interpolar em um ponto alvo  $S_0$ ;

$y_i$  é a saída do neurônio “ $i$ ”;

$y_k$  é a variável de saída computada;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  e  $\beta_6$  são as constantes de ajuste de modelos de regressão linear múltipla;

$\eta_{CT}$  é a eficiência de conversão de energia do ciclo termodinâmico de Rankine (decimal);

$\lambda_i$  são os pesos, atendendo a condição de que  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ ;

$\rho_{ar}$  é a massa específica do ar ( $\text{kg.m}^{-3}$ );

$\Delta T$  é o aquecimento referente a passagem de ar pelo ventilador ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\Delta t$  é o incremento de tempo (h);

$\Delta x$  é a espessura da camada fina (m);

$A$  é a área da base do silo secador ( $\text{m}^2$ );

$A$  é a área da seção transversal ( $\text{m}^2$ );

$A, B, C$  e  $D$  são as constantes empíricas do produto para estimativa da  $PMS$ ;

$C$  é a correção;

$D$  é o calculo de desvio entre  $E_j$  e  $\hat{E}_j$  em termos percentuais;

$EE$  é demanda de energia elétrica por unidade armazenadora padrão cheia (kWh);

$FC$  é o fato de capacidade do sistema de cogeração (decimal);

$I$  é o número de tratamentos do delineamento inteiramente casualizado;

$N$  é o número total de observações;

$PMS$  é a perda de matéria seca (%);

$Pvs$  é a pressão parcial do vapor de água no estado de saturação (Pa);

$Q$  é a vazão do ar de secagem ( $\text{m}^3.\text{min}^{-1}$ );

$R$  é a razão entre a massa de matéria seca da camada delgada e a massa de ar seco que a ultrapassa no intervalo  $\Delta t$  ( $\text{kg de matéria seca.kg de ar seco}^{-1}$ );

$R$  é a razão entre as massas de matéria seca e de ar seco;

$RM$  é a razão de mistura do ar ( $\text{kg de vapor.kg de ar seco}^{-1}$ );

$RMSE$  é o erro médio quadrático (kWh);

$T$  é a temperatura da massa de grãos ( $^{\circ}\text{C}$ );

$U$  é o teor de água do produto em base seca (%);

$U$  é o teor de água do produto no tempo  $t$ ;

$cp$  é o calor específico do grão ( $\text{kcal.kg}^{-1}.\text{^{\circ}\text{C}}^{-1}$ );

$fp$  é fator de potência (0,92);

$k$  é o número de amostras;

$n$  é o número de pontos observados;

$p$  é a parcela a massa total de grãos correspondente à casca (0,21);

$t$  é tempo de funcionamento da planta de cogeração (h);

$u$  é a energia específica demandada no processo de briquetagem ( $\text{MWh}\cdot\text{ton}^{-1}$ );

$x$  é a demanda média de energia elétrica ou térmica (kWh);

$y(S_i)$  são os valores observados nos pontos  $S_i$ ;

$\alpha$  é a potência de interpolação IDW;

$\varepsilon$  é a eficiência total do ventilador (decimal);

$\eta$  é o rendimento dos conjuntos motores/ventiladores (decimal);

$\rho$  é massa específica inicial do produto ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );

## APRESENTAÇÃO

AUGUSTO CESAR LAVIOLA DE OLIVEIRA, filho de Marcelo José de Oliveira e Fabiane Laviola Ricardo Oliveira, nasceu em Miradouro, Minas Gerais, Brasil, em 11 de novembro de 1996.

Em agosto de 2014, iniciou o curso de Engenharia Mecatrônica no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais (IF Sudeste MG), graduando-se em dezembro de 2018. No período de março de 2015 a julho 2016 foi monitor de Geometria Analítica e Cálculo III. Entre agosto de 2016 a julho de 2018 foi bolsista de iniciação científica nas áreas de Modelagem Computacional nos Estudos de Biomecânica Articular e Planejamento Estático de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica.

Em março de 2019, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, na área de Energia na Agricultura, tendo obtido o do título de *Magister Scientiae* em 2021 com a dissertação “Técnicas para avaliação e proposição de soluções energéticas em pequenas zonas rurais”.

Em março de 2021, iniciou o Doutorado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, na área de Energia na Agricultura, submetendo-se à defesa desta tese, requisito indispensável para a obtenção do título de *Doctor Scientiae*, em fevereiro de 2025.

Em julho de 2022, foi nomeado e tomou posse, em razão de aprovação em Concurso Público de Provas e Títulos, no cargo efetivo de Perito Criminal da Polícia Civil do Estado de Minas Gerais (PCMG), e atualmente exerce as suas atividades funcionais na Seção Técnica Regional de Criminalística de Manhuaçu.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1	Revisão bibliográfica	25
1.1.1	Secagem de arroz	25
1.1.2	Secagem de soja	30
1.2	Motivações e objetivos	35
1.3	Contribuições do trabalho	36
1.4	Estrutura do trabalho	37
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>38</b>
2.1	Configuração do processo de simulação de Secagem a Baixa Temperatura	38
2.2	Modelagem de Thompson e implementação do algoritmo	39
2.3	Georreferenciamento e geoprocessamento dos resultados obtidos	45
2.4	Análise estatística temporal das simulações	46
2.5	Estimativa das demandas de energia elétrica e térmica em safras	48
2.6	Análise compensativa da demanda de energia elétrica pela biomassa residual	48
2.7	Estudo do balanço da emissão de CO <sub>2</sub> no processo de secagem	50
2.8	Análise comparativa entre os Estudos de Casos 1 e 2	52
2.9	Modelagem de SBT por meio de Rede Neural Artificial	54
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO 1: SECAGEM A BAIXA TEMPERATURA DE ARROZ</b>	<b>58</b>
3.1	Análise de convergência do Modelo de Thompson	58
3.2	Estatística descritiva preliminar das demandas de energia	59
3.3	Extração de dados georreferenciados e análise estatística temporal	62
3.4	Estimativa da demanda de energia elétrica e térmica por safra	84
3.5	Estimativa da compensação da demanda de energia pela biomassa residual	89
3.6	Balanço da emissão de CO <sub>2</sub> durante o processo de SBT	91
3.7	Discussão dos resultados obtidos para o Estudo de Caso 1	94
3.8	Conclusões sobre o Estudo de Caso 1	100
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO 2: SECAGEM A BAIXA TEMPERATURA DE SOJA</b>	<b>101</b>
4.1	Análise de convergência do Modelo de Thompson	101
4.2	Estatística descritiva preliminar das demandas de energia	103
4.3	Extração de dados georreferenciados e análise estatística temporal	107
4.4	Estimativa da demanda de energia elétrica e térmica por safra	137
4.5	Estimativa da compensação da demanda de energia pela biomassa residual	143

4.6	Balanco da emissão de CO <sub>2</sub> durante o processo de SBT .....	145
4.7	Discussão dos resultados obtidos para o Estudo de Caso 2.....	149
4.8	Conclusões sobre o Estudos de Caso 2 .....	155
5	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS ESTUDOS DE CASO 1 E 2.....	156
6	ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DA REDE NEURAL ARTIFICIAL PROPOSTA 176	
6.1	Secagem de arroz .....	176
6.2	Secagem de soja.....	181
7	CONCLUSÃO .....	187
7.1	Conclusões finais .....	187
7.2	Trabalhos futuros .....	189
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	191
	APÊNDICE A .....	199
	APÊNDICE B.....	219

## 1 INTRODUÇÃO

A energia possui um papel integral na formação da trajetória do progresso humano, desde a Revolução Industrial e demais avanços subsequentes (LUO; SUN, 2024). Em razão da quantidade finita de recursos energéticos disponíveis e da confluência de crises energéticas e eventos climáticos extremos, a busca pela eficiência energética surgiu como uma grande preocupação em escala global (LI; WANG, 2024). A eficiência energética é o resultado de inovações tecnológicas nos mais diversos eixos da sociedade e contribui para a redução da dependência de mercados externos e de situações de vulnerabilidade do setor energético de um país (ZHANG et al., 2021).

Em 2016, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu a “energização limpa e acessível” como o sétimo objetivo do desenvolvimento sustentável (ONU, 2016). Desde então, políticas voltadas para o aumento da eficiência energética emergiram como uma escolha imperativa para o efetivo enfrentamento de desafios duplos inter-relacionados: poluição ambiental e escassez de energia (YU; LIANG; YAO, 2024). A maioria das emissões de gases de efeito estufa induzidas pelo homem estão relacionadas à energia, tornando essencial a combinação de eficiência na conversão, distribuição e uso final, uma vez que as energias renováveis por si só não podem substituir totalmente a utilização de combustíveis fósseis (NORDENSTAM, 2024), com as tecnologias atuais.

À medida que o mundo enfrenta desafios ambientais sem precedentes, os desastres passaram a ser vistos como ameaças crescentes, impactando profundamente as sociedades globais. Nos últimos anos, os desastres climáticos têm se tornado cada vez mais frequentes e severos, impactando diretamente a vida de milhões de pessoas ao redor do mundo. Fenômenos como furacões, secas extremas, ondas de calor e inundações, entre outros, estão ocorrendo com maior intensidade, e as evidências científicas apontam para uma relação direta entre esses eventos e as crescentes emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (SILVA et al., 2025).

A União Europeia e os seus Estados-Membros estabeleceram uma variedade de instrumentos políticos para orientar as ações das empresas e dos residentes neste sentido (EUROPEAN COMMISSION, 2022). Na China, uma estratégia piloto de cidade de baixo carbono proposta pelo governo garantiu a otimização do ambiente ecológico urbano e a melhoria da eficiência energética em 199 cidades de 2003 a 2016 (WANG; SHAO; MA, 2023). No Japão, o Plano Estratégico de Energia, que delineia o plano de fornecimento de energia, foi revisado em 2021 para atingir a meta de neutralidade de carbono até 2050, de modo que a

energia renovável seria a principal fonte de energia e que o uso de combustíveis fósseis seria reduzido (OTSUKA, 2023).

No Brasil, o Governo Federal vem aplicando medidas que resultam na racionalização e redução do consumo de energia, de cunho linear e obrigatório, sob pena de cortes no fornecimento e multas. A dependência do país em relação à geração hidrelétrica é uma das principais causas dessa política. Esta fonte de energia representa uma parcela equivalente a 61,9% da matriz elétrica brasileira, segundo informações do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2023, ano base de 2022 (EPE, 2023a); além de ser diretamente influenciada por transformações ambientais.

Diante do cenário previamente descrito, o investimento em fontes alternativas de energia que sejam renováveis e a otimização do consumo em processos produtivos devem ser tratados com prioridade. Diversificar a matriz elétrica e tornar a matriz energética cada vez mais renovável, de certa forma, promove o aproveitamento das dimensões territoriais e condições físicas e climáticas existentes no território brasileiro. E a redução no consumo, além de causar impactos positivos nas esferas econômica e ambiental, implica na redução da sobrecarga dos sistemas de transmissão e distribuição de energia, devido ao transporte de blocos de potência ativa cada vez menores na rede, e no aumento da confiabilidade do atendimento à demanda (OLIVEIRA et al., 2022).

A biomassa é uma das fontes renováveis mais abundantes do território brasileiro, por se tratar de um recurso derivado de material orgânico de origem animal ou vegetal, tais como resíduos de atividades agrícolas, industriais e urbanas (FERREIRA et al., 2018). Estima-se um potencial distribuído no Brasil de  $64,93\text{TWh}\cdot\text{ano}^{-1}$  de energia proveniente do esterco animal e esgoto doméstico (OLIVEIRA et al., 2020). As principais rotas de conversão da biomassa em energia são bioquímicas e termoquímicas, que possuem como produtos primários o biogás, o bio-óleo, o gás de síntese e/ou o calor, de acordo com a caracterização do recurso disponível (WANG; BUI; ZHANG, 2020).

A agroindústria, além de produzir um montante considerável de resíduos que podem ser reaproveitados energeticamente, possui elevada demanda em paralelo. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de energia elétrica da classe rural juntamente com a iluminação pública e unidades consumidoras públicas (classe definida como “outros”) resultou em 15,17% do consumo total de energia no Brasil em 2023, quantidade similar a classe comercial, com 18,39% (EPE, 2023b). Essa métrica está intimamente relacionada ao fato do Brasil se figurar como quarto maior produtor mundial de grãos (arroz,

cevada, soja, milho e trigo são os principais tipos produzidos), atrás somente da China, Estados Unidos e Índia. Na safra de 2022/2023 o país foi responsável por 5,84% da produção mundial, com 160,9 milhões de toneladas métricas de grãos produzidos (USDA, 2024).

O arroz é um cereal que, juntamente com o feijão, é um dos principais constituintes da alimentação dos brasileiros. A soja é a maior fonte de proteína vegetal consumida mundialmente, cultivada principalmente para a produção de óleo e farelo, que são usados na indústria alimentícia, na produção de biodiesel, ração animal e até como matéria-prima para vários outros produtos, como plásticos e cosméticos. As estimativas anuais de produção de arroz e soja no Brasil são de 12 e 166 milhões de toneladas, respectivamente (CONAB, 2024; SILVA et al., 2021).

Por se tratarem de culturas sazonais, as etapas de pós-colheita desempenham papel crucial na garantia da disponibilidade e preservação da qualidade dos produtos ao longo do tempo. No caso do arroz com casca, o teor de água no momento da colheita varia geralmente entre 18% e 25% b.u. (base úmida), enquanto o ideal para armazenamento situa-se entre 9% e 14% b.u. (IRRI, 2013). De maneira similar, os grãos de soja são colhidos com altos teores de água, entre 16% e 25% b.u., níveis inadequados para armazenamento devido à maior suscetibilidade a contaminações por fungos e outros microrganismos, e para que sejam armazenados e comercializados adequadamente, o teor de água deve ser reduzido para valores entre 12% e 14% b.u. (CORADI et al., 2016). Assim, a secagem, independentemente do método empregado, é indispensável para minimizar perdas qualitativas e quantitativas. Com o intuito de compreender os métodos e condições de secagem mais estudados e relatados na literatura para os grãos de arroz e a soja, foi conduzida uma revisão bibliográfica apresentada de forma cronológica, conforme exposto na seção 1.1.

## **1.1 Revisão bibliográfica**

### **1.1.1 Secagem de arroz**

Rangel e Zimmer (1997) avaliaram os efeitos da secagem estacionária com ar natural (não aquecido) sobre a velocidade da frente de secagem, bem como sobre a qualidade e armazenabilidade de sementes de arroz. O estudo utilizou 12 protótipos de silos aerados, cada um com 5 metros de altura e capacidade estática de 100kg. As sementes, inicialmente com 22,9% de umidade, foram pré-secadas em um secador intermitente até os teores de umidade de

19,7% e 17,8%, sendo então transferidas para silos com vazões de ar ajustadas em 1, 3 e 5  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{ton}^{-1}$ , onde foram secas com ar natural até atingirem 13% de umidade. Como controle, um lote foi seco diretamente no secador intermitente a 70°C até 12,7% de umidade. A qualidade das sementes foi monitorada por meio de avaliações bimestrais, durante 180 dias, utilizando parâmetros como germinação, envelhecimento acelerado, emergência em campo, rendimento de sementes inteiras e teor de água. Os resultados mostraram que a frente de secagem atingiu a camada superior das sementes em 13, 6 e 4 dias para as vazões de ar de 1, 3 e 5  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{ton}^{-1}$ , respectivamente, em silos com sementes a 17,8% de umidade. Para sementes com 19,7% de umidade, os tempos foram de 15, 6 e 4 dias, nas mesmas condições de vazão. A secagem estacionária com ar natural foi considerada viável, mantendo a qualidade das sementes durante 180 dias de armazenamento. Além disso, as sementes secas com ar natural apresentaram maior rendimento de grãos inteiros em comparação às secas no secador intermitente. Verificou-se também que uma vazão de ar de 1  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{ton}^{-1}$  é suficiente para secar camadas de sementes com aproximadamente 5 metros de altura e teor inicial de 19,7% de umidade.

Por outro lado, Motta, Villela e Zimmer (1999) investigaram os efeitos da adaptação do método de secagem contínua na qualidade de sementes de arroz durante o armazenamento para quatro lotes de 2500 kg cada. Os produtos foram submetidos à secagem em um secador de fluxo contínuo KW-2 Kepler Weber, com diferentes combinações de temperaturas nas câmaras superior e inferior: 60/40°C, 60/50°C, 70/50°C e 70/60°C. Como controle, amostras foram secas de forma estacionária em estufa a 32°C. A qualidade das sementes foi monitorada com base em teor de umidade, germinação, envelhecimento acelerado e emergência em campo, avaliados aos 0, 60, 120 e 180 dias de armazenamento à temperatura ambiente. Na primeira avaliação, foram determinados os componentes do processamento industrial. Observou-se que lotes com alta porcentagem de sementes quebradas podem apresentar elevada qualidade fisiológica. Além disso, temperaturas máximas de 50°C e 60°C nas câmaras inferior e superior, respectivamente, mostraram-se adequadas para a secagem contínua de sementes de arroz. Contudo, o método de secagem contínua adaptado contribuiu para a redução na porcentagem de sementes intactas.

Avaliação do uso de diferentes tratamentos térmicos do ar para a secagem de arroz longo-fino com teor de água entre 17% e 22% b.u (base úmida) foi conduzida em silos industriais de fundo plano, empregando o método de secagem estacionária. Cinco processos distintos foram analisados: (1) sistema alternado de insuflação-sucção com controle automatizado da umidade relativa do ar em 75%, utilizando ar ambiente sem aquecimento ou

aquecido por gás liquefeito de petróleo (GLP), caso a umidade relativa fosse superior a 75%; (2) sistema de insuflação com controle automatizado da temperatura de secagem em 20°C, utilizando ar ambiente ou aquecido por GLP; (3) sistema de insuflação com ar ambiente sem aquecimento e controle manual da temperatura e umidade; (4) sistema de insuflação com controle automatizado da umidade relativa do ar em 75%, utilizando ar ambiente ou aquecido por GLP; e (5) sistema alternado de insuflação-sucção com ar ambiente sem aquecimento e controle automatizado da umidade relativa do ar em 75%. Após a secagem, os grãos foram processados de duas formas: submetidos ao método padrão de obtenção de arroz branco ou à parboilização, e posteriormente avaliados quanto ao desempenho industrial. Os resultados indicaram que o sistema de insuflação, aliado ao controle das condições psicrométricas do ar, proporcionou menor tempo de secagem e melhor qualidade dos grãos, comparado ao sistema alternado de insuflação-sucção e ao uso de ar ambiente não aquecido (BARBOSA et al., 2009).

Jittanit, Saeteaw e Charoenchaisri (2010) analisaram a secagem de arroz como um processo que possui alta demanda energética, com impacto direto na qualidade do produto final. O estudo investigou a demanda energética em uma usina de moagem de grande escala e conduziu experimentos laboratoriais para propor alternativas mais econômicas para a indústria. Os resultados apontaram que a demanda energética na planta variava entre 3,874 e 4,421MJ.kg<sup>-1</sup> de água evaporada. Experimentos demonstraram que a secagem em duas etapas, combinando o uso de um secador de leito fluidizado operando entre 100°C e 110°C na primeira etapa e um secador solar com ar ambiente na segunda etapa, manteve a qualidade do arroz em níveis equivalentes aos obtidos pela usina. Além disso, cálculos indicaram que o custo energético poderia ser reduzido com a adoção de um silo secador com fluxo ascendente após a primeira etapa de secagem em um secador de fluxo contínuo.

Meneghetti et al. (2012) propuseram o ajuste de modelos matemáticos aos valores experimentais de razão de teor de água, temperatura da massa de grãos e taxa horária de secagem em função do teor de água e o estudo dos efeitos das relações de intermitência na eficiência da operação de secagem de grãos de arroz. Para isso utilizaram grãos de arroz com casca produzidos na Região Sul do Rio Grande do Sul. As amostras com teor de água próximo a 20% b. u. foram secadas sob três condições de relação de intermitência (tempo sob ação do ar aquecido pelo tempo de descanso): 1:1, 1:2 e 1:4; em todas as condições foram utilizados os mesmos manejos térmicos em temperaturas graduais crescentes do ar: 70, 90, 110 ± 5°C, respectivamente, na 1ª e na 2ª e a partir da 3ª hora de secagem. Os modelos matemáticos foram ajustados por meio de regressão não-linear, método Simplex e de Quasi-Newton, cujos valores

foram os parâmetros dos modelos estimados em função da temperatura do ar de secagem. Realizada uma análise comparativa entre os coeficientes de determinação ajustados ( $R^2$ -ajustado), o erro médio relativo (P) e estimado (SE) e a distribuição de resíduos, os resultados obtidos permitem concluir que a relação de intermitência altera o tempo de operação e a taxa horária de secagem dos grãos de arroz e que o modelo de Midilli foi o que melhor representou a secagem intermitente do arroz com casca.

Os efeitos provocados pela temperatura utilizada no processo de secagem na qualidade dos grãos produzidos foram investigados por Menezes et al. (2012), adotando os seguintes parâmetros: integridade física, qualidade fisiológica e composição química de sementes de arroz irrigado. Quatro lotes de cada cultivar foram formados e secos pelo método estacionário, utilizando-se as seguintes temperaturas: 32°C, 38°C, 44°C e 50°C. Após os tratamentos de secagem, avaliou-se a integridade física das sementes, por meio do teor de água e percentual de fissuras. A qualidade fisiológica foi determinada com o auxílio de teste de germinação, primeira contagem, condutividade elétrica, envelhecimento acelerado, teste de frio, comprimento total e fitomassa seca de plântula. A composição química das sementes foi avaliada por meio das frações massa seca, proteína e fibra bruta e extrato etéreo das sementes. Os autores concluíram que a temperaturas de secagem afetaram a qualidade das sementes, tendo o aumento da temperatura, na secagem (32 - 50°C), proporcionado também o aumento do percentual de fissuras nas sementes de arroz irrigado. Temperaturas de 32°C e 38°C, na secagem, permitiram a expressão da qualidade das sementes, enquanto a temperatura de 50°C reduziu o potencial fisiológico.

O desempenho energético e a eficiência de um secador comercial de fluxo cruzado foram avaliados durante a secagem de arroz bruto em diferentes condições ambientais e temperaturas do ar de secagem. Durante a safra de 2011, foram realizados quatro testes com arroz apresentando teores iniciais de umidade entre 19,0% e 21,7% (base úmida), enquanto na safra de 2012, três testes foram conduzidos com teores de água iniciais variando de 15,4% a 18,3%. Os requisitos de energia térmica foram determinados dividindo a energia demandada pelo queimador pela massa total de água removida, enquanto os requisitos de energia elétrica foram calculados com base na potência média do motor do ventilador multiplicada pelo tempo de operação. A eficiência térmica foi estimada como a razão entre os requisitos teóricos de energia e os requisitos térmicos medidos. Na safra de 2011, os requisitos de energia térmica variaram entre 6900 e 9670kJ.kg<sup>-1</sup> de água removida, e na de 2012, de 8810 a 9620kJ.kg<sup>-1</sup>. A demanda de energia elétrica, que representou de 4% a 5% do total de energia utilizada, variou

de 300 a 400kJ.kg<sup>-1</sup> de água removida em 2011 e de 410 a 630kJ.kg<sup>-1</sup> em 2012. Observou-se uma correlação linear positiva entre os requisitos de energia térmica e a diferença entre a temperatura do ar de secagem e a temperatura ambiente, bem como uma correlação linear negativa com a quantidade de água removida por massa de matéria seca. A eficiência térmica do secador variou de 26% a 36% em 2011 e de 27% a 29% em 2012 (BILLIRIS, 2014).

O uso de energia e a eficiência de um secador de fluxo cruzado foram avaliados em propriedades agrícolas por meio de cinco testes realizados na safra de 2011 e três testes na safra de 2012. Os requisitos de energia térmica, expressos como energia por unidade de massa de água removida, variaram entre 2840 e 5310kJ.kg<sup>-1</sup> em 2011, com teores iniciais de umidade do arroz entre 16,6% e 21,7%, e entre 3730 e 5840kJ.kg<sup>-1</sup> em 2012, com umidade inicial de 17,4% a 18,2%. A eficiência térmica energética oscilou entre 47% e 90% em 2011 e entre 44% e 69% em 2012. Fatores como a diferença entre a temperatura do ar de secagem e a temperatura ambiente, bem como a quantidade de água removida por unidade de massa de matéria seca, influenciaram significativamente a demanda de energia. Modelos matemáticos foram desenvolvidos para prever a demanda energética e a eficiência com base nesses parâmetros (BILLIRIS, SIEBENMORGEN, 2014).

Conforme avaliado por Müller et al. (2022), a secagem por micro-ondas surgiu como uma alternativa aos métodos amplamente utilizados de secagem intermitente e secadores de leito fixo. O controle das temperaturas do ar de secagem (entre 40 e 60°C), conforme a variedade de arroz, pode manter melhor a qualidade, especialmente para variedades exóticas. Manter os grãos armazenados em equilíbrio higroscópico, com teor de água entre 11 e 15%, temperaturas entre 16 e 20°C e umidade relativa intergranular próxima de 60%, permite um armazenamento controlado por 12 meses sem deterioração significativa. Inovações, como a aplicação de refrigeração artificial aos grãos armazenados em massa em silos verticais cilíndricos e o uso de embalagens impermeáveis para armazenamento, garantem a conservação da massa de grãos por mais tempo.

A secagem de arroz em camada única em um silo-secador-aerador permite uma secagem uniforme. Dessa forma, a qualidade física, físico-química e morfológica de cultivares de grãos de arroz (IRGA 424, BRS Pampeira e Guri INTA) nas camadas inferior (tempo inicial) e superior (tempo final) foram avaliadas em um silo-secador-aerador, utilizando carregamento em camada única a baixas temperaturas. Os autores utilizaram métodos de espectroscopia no infravermelho próximo, análise de difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura e análise estatística multivariada. Verificou-se que a secagem de arroz no silo-secador-aerador

atenuou a difusividade da umidade nos grãos, minimizando seus efeitos sobre as propriedades físicas, físico-químicas e morfológicas, entretanto, os constituintes físico-químicos e a morfologia do amido foram preservados pelas baixas temperaturas de secagem, principalmente nas camadas inferiores ao longo dos dois meses de operação. Conclui-se que grãos de arroz das cultivares Guri INTA e BRS Pampeira foram os mais resistentes à secagem e apresentaram maior uniformidade na qualidade final (MORAES et al., 2023).

### 1.1.2 Secagem de soja

Miranda, Silva e Cavariani (1999a) investigaram diversos parâmetros físicos envolvidos no processo de secagem de sementes de soja, submetidas a um processo estacionário com distribuição radial de ar. O estudo combinou fluxos de ar ( $26,9$ ;  $28,4$  e  $33,2\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{ton}^{-1}$ ) e temperaturas ( $42$ ,  $46$  e  $50^\circ\text{C}$ ), levando em consideração as posições das sementes na massa ( $17$ ,  $34$  e  $51\text{cm}$  em relação ao cilindro de insuflação) e os períodos de secagem (variando de zero a doze horas com intervalos de duas horas). Foram caracterizados o ar ambiente, o ar de insuflação, as temperaturas das sementes, o teor de umidade, a velocidade de secagem e as curvas de secagem. Os resultados mostraram que a combinação de fluxo de  $28,4\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{ton}^{-1}$  a  $46^\circ\text{C}$  apresentou vantagens físicas, enquanto a combinação de  $26,9\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{ton}^{-1}$  a  $42^\circ\text{C}$  apresentou desvantagens no processo de secagem.

De forma análoga ao estudo anterior, Miranda, Silva e Cavariani (1999b) investigaram as combinações de fluxos de ar e temperaturas na qualidade de sementes de soja submetidas a um processo de secagem estacionário com distribuição radial de ar, considerando diferentes posições das sementes na massa (conforme descrito anteriormente) e quatro períodos de amostragem com intervalos de quatro horas. Além da temperatura e do teor de umidade da massa de sementes, a qualidade fisiológica das sementes foi avaliada tanto no início quanto após um período de seis meses de armazenamento. Embora a combinação intermediária de vazão de ar ( $28,4\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{ton}^{-1}$ ) e temperatura ( $46^\circ\text{C}$ ) tenha se mostrado fisicamente vantajosa, a qualidade das sementes foi menos prejudicada pelas combinações de vazões de ar mais baixas ( $26,9$  e  $28,4\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{ton}^{-1}$ ) com a maior temperatura ( $50^\circ\text{C}$ ), bem como pela combinação de maior vazão de ar ( $33,2\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{ton}^{-1}$ ) com as temperaturas mais baixas ( $42$  e  $46^\circ\text{C}$ ). Dentre essas combinações, a associação de  $28,4\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{ton}^{-1}$  com  $50^\circ\text{C}$  foi a mais eficiente na absorção de água pelas sementes. Assim, considerando os intervalos de vazão de ar entre  $26,9$  e  $33,2\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{ton}^{-1}$  e temperaturas entre  $42$  e  $50^\circ\text{C}$ , conclui-se que o aumento da vazão de ar

exige a diminuição da temperatura, ao passo que o aumento da temperatura exige a redução da vazão de ar.

Coradi, Fernandes e Helmich (2016) investigaram a influência do teor de água inicial da soja e das temperaturas do ar de secagem sobre a cinética de secagem e a qualidade dos grãos, com o objetivo de determinar o melhor modelo matemático para descrever os dados experimentais de secagem, a difusividade efetiva e o calor isostérico de dessorção. Foi adotado o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC) com esquema fatorial (4x2), envolvendo quatro temperaturas de secagem (75, 90, 105 e 120°C) e dois teores de água inicial (25 e 19% base seca, b.s.), com três repetições. O teor de água inicial influenciou o tempo de secagem. O modelo de Wang e Singh foi o mais adequado para descrever o processo de secagem dos grãos de soja nas diferentes faixas de temperatura (75, 90, 105 e 120°C) e teores de água iniciais de 19% e 25% (b.u.). A difusividade efetiva de grãos de soja foi maior ( $2,5 \cdot 10^{-11} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) para a temperatura de 120°C e o teor de água de 25% (b.s.). O uso de temperaturas elevadas (acima de 105°C) e maiores teores de água inicial (25% b.u.) aumentou a quantidade de energia requerida para a secagem, com um calor isostérico de dessorção de 3894,57 3894,57 kJ.kg<sup>-1</sup>. Embora a temperatura de secagem e o teor de água inicial tenham influenciado a qualidade dos grãos ao longo do processo (com condutividade elétrica de  $540,35 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ), não houve efeito sobre o rendimento final de óleo extraído, que foi de 15,69%.

Coradi et al. (2016) avaliaram o efeito da temperatura do ar de secagem e do teor de umidade inicial sobre a contração volumétrica, a qualidade física e o rendimento da extração de óleo de grãos de soja. Os grãos, colhidos com teores de umidade iniciais de 19 e 25%, foram submetidos à secagem em três diferentes temperaturas de ar (75°C, 90°C e 105°C) em um forno de convecção com circulação forçada. Observou-se que o aumento da temperatura do ar reduziu o tempo de secagem. Em relação à contração volumétrica, a diminuição no teor de umidade influenciou o volume dos grãos, sendo o modelo de Rahman o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Além disso, a temperatura do ar teve um efeito direto sobre a contração volumétrica e a qualidade física dos grãos, com impactos mais significativos à medida que a temperatura aumentava. Os maiores efeitos na redução do volume e no rendimento de óleo ocorreram quando os grãos apresentavam um teor de água inicial mais elevado. A temperatura de 105°C e o teor de água inicial de 25% foram os fatores que mais comprometeram a qualidade física dos grãos, embora não tivessem influência no rendimento da extração de óleo.

As temperaturas aplicadas durante o processo de secagem são de grande importância para manutenção da integridade e para a longevidade do produto. Nesse contexto, Filho et al.

(2016) pesquisaram o efeito imediato e latente das temperaturas de secagem ao ar na qualidade da soja produzida como cultura de segunda safra. Os grãos foram colhidos no estágio R8, próximo à maturidade fisiológica, com teor de umidade de aproximadamente 23% b.u., e submetidos a temperaturas de secagem de 40°C, 50°C, 60°C, 70°C e 80°C até atingirem um teor de umidade de  $12,5 \pm 0,7\%$  b.u. Após a secagem, os grãos foram armazenados sob condições de umidade e temperatura não controladas por 180 dias. A qualidade da soja foi avaliada a cada 45 dias, sendo analisados os parâmetros de perda de matéria seca, cor, teores de proteína bruta e lipídios, além dos índices de acidez e peróxido do óleo bruto extraído. Os resultados indicaram que o aumento da temperatura de secagem ao ar compromete a qualidade da soja e do óleo bruto extraído, com esse efeito sendo intensificado com o tempo de armazenamento, e que a temperatura de 40°C teve o menor impacto sobre a qualidade dos grãos de soja e do óleo bruto extraído.

O estudo de Filho et al. (2017) avaliou o potencial fisiológico de sementes de soja colhidas em diferentes estádios de maturação durante duas safras, e submetidas a diversas temperaturas de secagem. As sementes foram coletadas nos estádios de maturação R7, R7+2, R7+3, R7+5, R7+6, R7+7, R7+10 e R7+12 dias (com teores de água de 55%, 50%, 45%, 40%, 35%, 30%, 25% e 20%, respectivamente). Para cada estágio de maturação, as sementes foram divididas em três amostras: uma amostra foi analisada diretamente quanto ao potencial fisiológico, enquanto as demais foram secas a 40°C e 50°C até atingirem um teor de umidade de 11,5%. O potencial fisiológico foi avaliado por meio de testes de germinação, primeira contagem de germinação, envelhecimento acelerado, frio modificado, condutividade elétrica e emergência de plântulas. O potencial fisiológico máximo das sementes foi observado com um teor de umidade de 55%, quando a matéria seca atingiu o ponto máximo. As sementes tornaram-se tolerantes à secagem artificial aproximadamente no estágio R7+7 dias (30% de teor de umidade). A germinação e o vigor das sementes de soja diminuíram à medida que a temperatura de secagem aumentou de 40°C para 50°C, efeito esse potencializado quando as sementes apresentaram teores de umidade superiores a 30%.

Coradi et al. (2018) modelaram e validaram um novo conceito de silo-secador-aerador para a secagem de sementes de soja, analisando a qualidade das sementes em função das temperaturas do ar durante o processo de secagem. Sementes de soja com teor de água de 17% (b.u.) foram secas e armazenadas em um sistema projetado com uma câmara de secagem e quatro células de armazenamento independentes, utilizando temperaturas de secagem de 30, 40 e 50°C. Na secagem a 30°C, o modelo de aproximação por difusão teve o melhor ajuste na

célula C1, o modelo de Newton foi o mais adequado para a célula C2, e o modelo de Midilli obteve o melhor ajuste nas células C3 e C4. Com temperatura do ar a 40°C, o modelo de Page ajustou-se melhor aos dados na célula C1, enquanto o modelo de aproximação por difusão foi o mais adequado para a célula C2, e o modelo de Page também foi o mais eficaz nas células C3 e C4. Quando a temperatura de secagem foi elevada para 50°C, o modelo logarítmico apresentou o melhor ajuste nas células C1, C2, C3 e C4. O aumento da temperatura do ar para 50°C resultou em uma diminuição na qualidade das sementes de soja. Nas partes superior e intermediária das células de secagem, observou-se um aumento na condutividade elétrica ( $140,02\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ ) e na taxa de germinação (53%), quando comparado a parte inferior.

Com o crescente foco nas questões logísticas e na qualidade dos grãos durante as etapas pós-colheita, Coradi et al. (2020a) propuseram estratégias sustentáveis para o manejo da massa de grãos de soja, levando em consideração o teor de água e otimizando as operações combinadas de secagem e armazenamento. O objetivo foi melhorar o fluxo e a qualidade dos grãos em unidades de armazenamento em escala real. O experimento foi conduzido em duas etapas. Na primeira, foram avaliadas a soja úmida (SUL) com 17% de umidade, soja seca da safra RR (SSLRR) com 14%, soja seca da safra RR2 (SSLRR2) com 14%, soja seca em secador contínuo (SSS1) com 12%, soja seca em silo-secador (SSS2) com 14% e soja seca em secador intermitente (SSS3) com 14%. A soja úmida (SUL) foi submetida à secagem por aeração (Silo 1), enquanto a secagem parcial foi realizada nos sistemas SSS1, SSS2 e SSS3, complementados com aeração (Silo 2). A soja seca da safra RR2 (SSLRR2) foi armazenada com aeração (Silo 3), e a soja da safra RR (SSLRR) também foi armazenada em aeração (Silo 4). Na segunda etapa, os lotes de soja (RR e RR2) passaram por secagem a temperaturas de 35, 45 e 55°C até atingir 12% de umidade, sendo então armazenados sob refrigeração a 10 e 20°C durante dois meses. As qualidades física e físico-química dos grãos foram avaliadas antes e após a secagem, assim como ao longo do período de armazenamento. A estratégia mais eficaz para garantir o fluxo e a qualidade dos grãos em unidades de alta capacidade envolveu o uso de sistemas combinados de secagem (SSS1, SSS2, SSS3) e armazenamento com secagem por aeração. Os grãos de soja, colhidos com elevados teores de umidade, que passaram por secagem a baixas temperaturas e foram armazenados sob condições artificialmente refrigeradas, apresentaram melhor qualidade durante o armazenamento. Contudo, o aumento no tempo de operação de secagem dificultou o fluxo da massa de grãos.

Coradi et al. (2020b) realizaram uma avaliação em escala real de produção sobre o manejo de lotes de soja em unidades de armazenamento de grãos, submetidos a diferentes

tecnologias de secagem. O experimento foi conduzido em escala de produção plena, com os seguintes tratamentos: soja úmida recém-colhida (SUL), soja seca RR (SSLRR), soja seca RR2 (SSLRR2), soja seca em secador contínuo (SSS1) (11,0%), soja seca em silo-secador (SSS2) (12,5%) e soja seca em silo-aerador (SSS3) (14,0%). As perdas energéticas e a qualidade dos grãos, em função do manejo de secagem, apresentaram variações de 2,5% a 16,4% em termos energéticos, 0,23% a 3,26% em proteína bruta e 0,15% a 3,05% em óleo. O rendimento máximo foi obtido para a soja úmida recém-colhida (SUL), com um índice de 17% (b.u.). Considerando a produção anual de soja no Brasil, as perdas energéticas poderiam alcançar até 162.282,50m<sup>3</sup> de lenha, aproximadamente 2.116.963.470kg de proteína bruta e 810.616.800 litros de óleo bruto. A eficiência do sistema de secagem demonstrou a capacidade de reduzir as perdas e melhorar a qualidade dos grãos, proporcionando maior rendimento de proteína e óleo bruto, além de diminuir os impactos energéticos. Os autores concluíram que o sistema de secagem SSS1 foi responsável por uma redução de 80,23% nos impactos energético-ambientais, 94,73% nas perdas de proteína bruta e 95,08% nas perdas de óleo bruto.

O estudo realizado por Lima et al. (2024) teve como objetivo avaliar, em escala real de produção, o manejo de lotes de grãos de soja colhidos em unidades de armazenamento, submetidos a diferentes processos tecnológicos de secagem. As regiões estudadas foram divididas em microrregiões, com base na estrutura e na capacidade estática de armazenamento, abrangendo as áreas Oeste, Leste, Norte, Sul e Central. Em cada uma dessas microrregiões, os grãos de soja foram secos utilizando três sistemas: secador contínuo (CD1), secador contínuo seguido por silo-secador (CDSD2) e secador contínuo seguido por silo-aerador (CDAS3). As perdas na qualidade dos grãos, resultantes do manejo de secagem, variaram de 0,23% a 3,26% em proteína bruta e de 0,15% a 3,05% em óleo bruto. Em regiões com grande escala de produção de soja, a implementação de unidades de armazenamento na própria fazenda, situadas a uma distância de 11 a 19km, juntamente com tecnologia avançada de secagem parcial em fluxo contínuo e secagem final estacionária em silo-secador ou silo-aerador, foi identificada como a melhor alternativa para um sistema produtivo sustentável. O manejo dos sistemas de secagem CDSD2 e CDAS3 propiciou uma redução das perdas de proteína bruta e óleo em 94% e 95%, respectivamente, proporcionando um sistema pós-colheita mais sustentável.

## 1.2 Motivações e objetivos

A revisão bibliográfica realizada revela que os estudos energéticos focados na previsão de demanda e na realocação de recursos durante a secagem de grãos de arroz e de soja são ainda escassos, apontando lacunas a serem exploradas nesse campo do conhecimento. A secagem artificial a baixa temperatura é destacada por apresentar menores riscos de danos térmicos e mecânicos, o que torna sua investigação altamente relevante. Nesse processo, o ar de secagem movimenta em sentido ascendente no interior da unidade armazenadora com os grãos estacionários, conforme Figura 1, e deve ser mantido a temperaturas de no máximo 10°C acima da temperatura ambiente (VENTURIN, 2019).

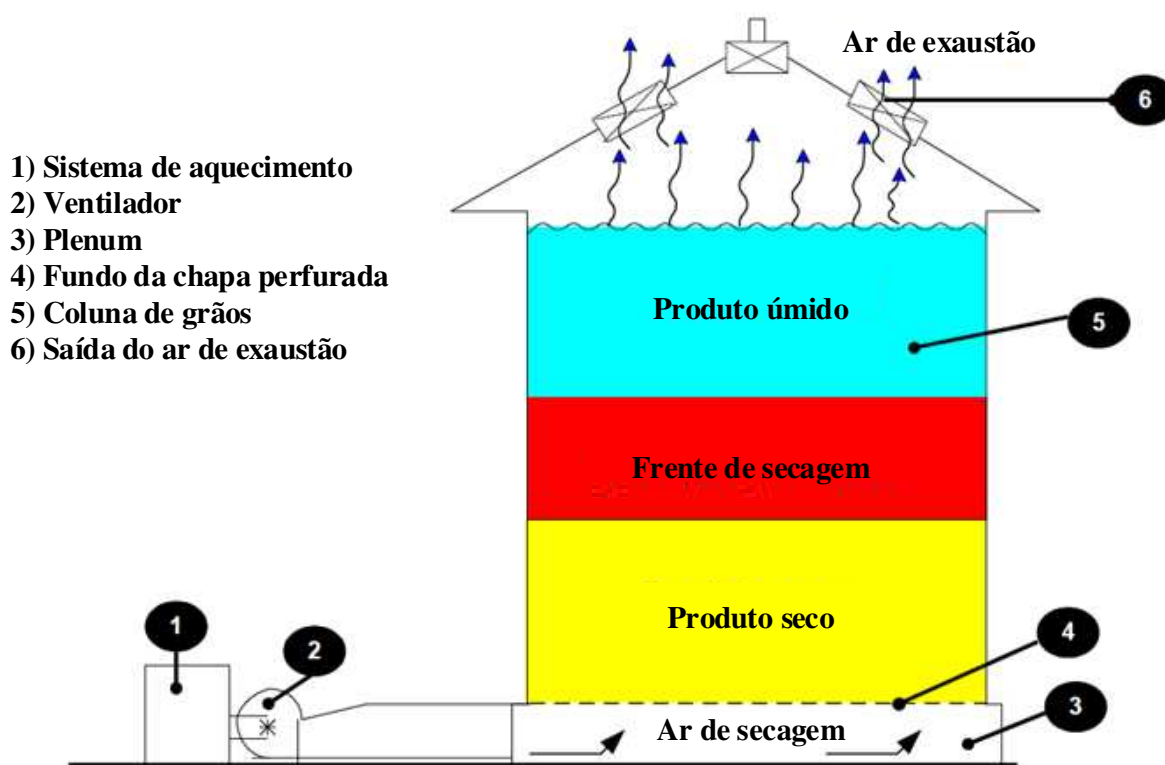


Figura 1 - Croqui ilustrativo do sistema de secagem a baixa temperatura.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

A duração da secagem a baixa temperatura é influenciada por fatores como as características construtivas dos silos, as estratégias de enchimento, as propriedades psicrométricas do ar de secagem, além dos teores de água e impurezas dos grãos. A temperatura e a umidade relativa do ar de secagem devem ser ajustadas de maneira a garantir que a umidade de equilíbrio final seja compatível com a umidade desejada. Caso a umidade de equilíbrio ultrapasse a umidade final, a temperatura do ar deve ser elevada até que as condições psicrométricas se adequem, com o uso de queimadores de GLP para aquecer o ar. Tempos de

secagem excessivos aumentam a demanda de energia elétrica e térmica, promovem perdas de matéria seca, a emissão de CO<sub>2</sub> e a deterioração do produto (MEAS et al., 2013).

Dessa forma, considerando a complexidade do processo, que envolve múltiplas variáveis, simulações computacionais são indicadas como ferramentas de apoio à tomada de decisão, avaliação, controle, otimização e desenvolvimento de estratégias operacionais. O Modelo de Thompson se destaca por sua precisão ao estimar variáveis de saída na secagem em camadas espessas, mas é dependente de condições iniciais que podem ocasionar problemas de convergência, sendo uma das alternativas o uso de inteligência artificial (THOMPSON, 1972).

Portanto, em virtude dessas circunstâncias o objetivo principal deste trabalho foi realizar um estudo temporal sobre a demanda de energia durante o processo de secagem a baixa temperatura de arroz e soja no Brasil, levando em consideração as condições do ar ambiente. Os objetivos específicos foram:

- Implementar o Modelo de Thompson e simular a secagem de arroz e soja a partir de dados das estações meteorológicas disponíveis no país para as safras de 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22.
- Georreferenciar, processar e mapear os dados de demanda de energia elétrica e térmica durante o processo de secagem.
- Analisar estatisticamente a variação temporal dos dados espaciais de demanda de energia elétrica e térmica no período de colheita das safras e entre as safras.
- Estimar a demanda de energia por safra, em níveis regional e nacional, a partir de bancos de dados governamentais e dos resultados obtidos pela modelagem implementada.
- Avaliar a realocação do recurso energético proveniente da biomassa residual do arroz e da soja para compensação da demanda e discutir o impacto desse componente de geração renovável no balanço de emissões de CO<sub>2</sub>.
- Comparar de forma técnica e espacial a eficiência do processo de secagem estudado para arroz e soja, realizando a segregação de áreas indicadas para cada tipo de grão.
- Propor e avaliar um modelo alternativo ao Modelo de Thompson para estimativa da demanda de energia na secagem, por meio de inteligência artificial.

### **1.3 Contribuições do trabalho**

As principais contribuições do trabalho consistiram na implementação de modelagens para previsão da demanda de energia elétrica e térmica à nível nacional, fornecendo além de

técnicas, dados importantes para o planejamento do processo de secagem no período de colheita das culturas estudadas e, também, para a tomada de decisão por parte de órgãos governamentais em relação ao planejamento da operação e expansão de sistemas de transmissão e distribuição de energia principalmente nos polos produtores de arroz e soja, promovendo a racionalização do uso, atendimento à demanda e o desenvolvimento sustentável.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

Este capítulo forneceu um panorama geral sobre o uso de energia e os estudos relacionados à secagem de arroz e soja, além de detalhar os objetivos, a motivação e as contribuições do trabalho. A estrutura do trabalho inclui este capítulo introdutório e mais seis capítulos, acompanhados de três apêndices, conforme descrito a seguir:

O capítulo 2 apresenta o arcabouço metodológico utilizado no trabalho, organizado em nove seções que descrevem detalhadamente as abordagens e ferramentas empregadas.

Os capítulos 3 e 4 correspondem aos Estudos de Caso 1 e 2, dedicados à análise dos processos de secagem do arroz e da soja, respectivamente, considerando aspectos espaciais, energéticos e operacionais.

No capítulo 5 contém uma análise comparativa abrangente entre as demandas de energia registrados nos processos de secagem de arroz e soja.

No capítulo 6 é proposta uma nova modelagem para previsão da demanda de energia no processo de secagem a baixa temperatura.

No capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões referentes à metodologia proposta, bem como sugestões de trabalhos futuros.

O apêndice A exibe os dados de identificação e de localização das estações meteorológicas utilizadas nas simulações realizadas no presente trabalho.

No apêndice B é apresentada uma representação gráfica da distribuição espacial das estações listadas no apêndice A.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Configuração do processo de simulação de Secagem a Baixa Temperatura

Conforme abordado na introdução deste trabalho, o processo de secagem a baixa temperatura é influenciado por características construtivas das unidades armazenadoras, propriedades psicrométricas do ar de secagem, teores de água e impureza dos grãos. Portanto, para realização do estudo proposto foi adotada uma unidade armazenadora padrão, com as seguintes características construtivas e operacionais: (i) diâmetro do silo (m): 18,18; (ii) altura do cilindro (m): 12,96; (iii) altura da chapa (m): 1,44; (iv) ângulo de fundo (°): nulo; (v) fluxo de ar ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{t}^{-1}$ ): 1,50; (vi) fator de compactação (%): 5; (vii) fator de majoração da pressão estática (%): 10; (viii) tipo de enchimento: carga plana; (ix) número de ventiladores: 2; (x) rendimento dos ventiladores (%): 77; (xi) velocidade de rotação dos ventiladores (rpm): 1750; (xii) tensão nominal dos ventiladores (V): 380; (xiii) corrente nominal dos ventiladores (A): 48,55; (xiv) potência nominal dos ventiladores (CV): 40; (xv) número de queimadores: 2; (xvi) tensão nominal dos queimadores (V): 220,37; (xvii) corrente nominal dos queimadores (A): 0,2; (xviii) fator de potência dos queimadores: 0,8; (xix) rendimento dos queimadores (%): 90; (xx) poder calorífico do gás liquefeito de petróleo (GLP) ( $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ ): 11000; (xxi) início do horário de pico (h): 18; (xxii) duração do horário de pico (h): 4; e (xxiii) umidade de equilíbrio desejada (%): 13 (VENTURIN, 2019). Para a unidade armazenadora descrita foram realizadas simulações referente ao processo de secagem de grãos de arroz com casca (massa específica igual a  $580 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  e ângulo de repouso de  $36^\circ$ ) e de soja (massa específica igual a  $795 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  e ângulo de repouso de  $30^\circ$ ), com teores de água iniciais iguais a 20% b.u., enchimento em apenas uma parcela, que foi dividida em 18 camadas virtuais de análise; e o teor de água final igual a 13% b.u. na camada superior, critério de parada estipulado para a simulações realizadas.

As condições do ar ambiente foram obtidas a partir de dados históricos de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que possuíam as seguintes variáveis de registro temporal: (i) temperatura de bulbo seco ( $^\circ\text{C}$ ), (ii) umidade relativa do ar (%) e (iii) pressão atmosférica (kPa) (INMET, 2024). As simulações foram realizadas semanalmente, ao meio-dia, para o período de colheita das safras de 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22, compreendido entre os dias 01 de fevereiro e 28 de junho dos anos de 2013, 2016, 2019 e 2022, para grãos de arroz, e entre os dias 04 de janeiro e 30 de agosto de 2013, 2016, 2019 e 2022, para grãos de soja, conforme Tabelas 1 e 2 (CONAB, 2023).

Tabela 1 - Cronograma anual de simulações de secagem a baixa temperatura de grãos de arroz para as safras 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22.

Meses	Dias Simulados					Horário (hh:mm)
Fevereiro	01	08	15	22	-	
Março	01	08	15	22	29	
Abril	05	12	19	26	-	12:00
Maio	03	10	17	24	31	
Junho	07	14	21	28	-	

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Tabela 2 - Cronograma anual de simulações de secagem a baixa temperatura de grãos de soja para as safras 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22.

Meses	Dias Simulados					Horário (hh:mm)
Janeiro	04	11	18	25	-	
Fevereiro	01	08	15	22	-	
Março	01	08	15	22	29	
Abril	05	12	19	26	-	12:00
Maio	03	10	17	24	31	
Junho	07	14	21	28	-	
Julho	05	12	19	26	-	
Agosto	02	09	16	23	30	

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

## 2.2 Modelagem de Thompson e implementação do algoritmo

A modelagem do processo de secagem de grãos a baixa temperatura foi implementada no software livre Thonny®, versão 4.1.1, em linguagem de programação tipo python 3.10.11. O algoritmo de previsão foi desenvolvido a partir do Modelo de Thompson (THOMPSON, 1972) e para a obtenção das propriedades psicrométricas do ar de secagem foram utilizadas as equações disponíveis em ASAE (1980). Trata-se de um problema de programação não-linear, determinístico, com variáveis contínuas e mistas.

O Modelo de Thompson é considerado semiempírico e descreve o comportamento da secagem de grãos em camada espessa, em condições de baixos fluxos de ar e temperaturas de secagem similares à do ambiente. Esse modelo parte da hipótese principal de que a temperatura

da massa de grãos e a temperatura do ar seriam iguais após balanços de massa e energia, dado um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), havendo equilíbrio higroscópico. A troca de calor entre o ar e o produto é considerada um processo adiabático, sem diferenças entre isotermas de adsorção e dessorção. A formulação matemática é composta por equações que descrevem a umidade de equilíbrio (Equação 1, para o arroz, Tritten-Henderson Modificado, e Equação 2, para a soja, Halsey Modificado) e umidade relativa de equilíbrio (Equação 3) (ASAE, 1999), calor específico (Equação 4, para o arroz, e Equação 5, para a soja) (CAVALCANTI MATA, 1992), razão entre massas de matéria seca e ar seco (Equação 6), balanço de energia (Equação 7) e balanço de massa (Equação 8).

$$U_e = \frac{1}{100} \cdot \left[ \frac{\ln(1 - 0,01 \cdot UR_e)}{-4,1 \cdot 10^{-5} \cdot (T_s + 49,828)} \right]^{1/2,1191} \quad (1)$$

$$U_e = \frac{1}{100} \cdot \left[ \frac{e^{2,87+0,0054 \cdot T_s}}{-\ln(0,01 \cdot UR_e)} \right]^{1/1,38} \quad (2)$$

$$UR_e = \frac{100 \cdot P_{atm} \cdot RM}{(0,622 + RM) \cdot P_{vs}} \quad (3)$$

$$cp = 0,278 + 0,960 \cdot \left( \frac{U}{100 + U} \right) \quad (4)$$

$$cp = 0,391 + 0,461 \cdot \left( \frac{U}{100 + U} \right) \quad (5)$$

$$R = \frac{\rho \cdot V_e \cdot A \cdot \Delta x}{Q \cdot \Delta t \cdot 60 \cdot (1 + U_o)} \quad (6)$$

Em que:  $U_e$  é a umidade de equilíbrio em base seca do grão com o ar de secagem (decimal);  $UR_e$  é a umidade relativa do ar (%);  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica (Pa);  $RM$  é a razão de mistura do ar (kg de vapor.kg de ar seco<sup>-1</sup>);  $P_{vs}$  é a pressão parcial do vapor de água no estado de saturação (Pa);  $T_s$  é a temperatura do ar (°C);  $cp$  é o calor específico do grão (kcal.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>) e  $U$  é o teor de água do produto em base seca (%);  $R$  é a razão entre as massas de matéria seca e de ar seco;  $\rho$  é o peso específico inicial do produto (kg.m<sup>-3</sup>);  $V_e$  é o volume específico do ar (m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>);  $A$  é a área da seção transversal (m<sup>2</sup>);  $\Delta x$  é a espessura da camada fina (m);  $Q$  é a vazão do ar de secagem (m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>);  $\Delta t$  é o incremento de tempo (h); e  $U_o$  é o teor de água inicial do produto em base úmida (decimal).

A equação do balanço de energia leva em consideração apenas o calor sensível, isto é, aquele utilizado no processo de evaporação da água existente no produto. Esse balanço é constituído pela soma de quatro parcelas: (1)  $0,24 \cdot T$  é a energia contida na massa de ar seco; (2)  $RM \cdot (588 + 0,45 \cdot T)$  é a energia contida na fração vapor de água; (3)  $cp \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_g$

é a energia contida na massa de produto; e (4)  $(RM_f - RM_o) \cdot T_g$  é a energia contida na água que está sendo evaporada. A conservação da energia antes e após o equilíbrio resulta na Equação 7, em que  $T_f$  é a temperatura de equilíbrio entre o ar e os grãos no instante  $t + \Delta t$  (°C);  $T_o$  é a temperatura do ar no instante  $t$  (°C);  $T_{go}$  é a temperatura da massa de grãos no instante  $t$  (°C);  $T_{gf}$  é a temperatura da massa de grãos no instante  $t + \Delta t$ , equilíbrio, igual a  $T_f$  (°C);  $U$  é o teor de água do produto no tempo  $t$ ;  $RM_o$  é a razão de mistura do ar no instante  $t$  (kg de vapor.kg de ar seco<sup>-1</sup>);  $RM_f$  é a razão de mistura do ar de saída da camada de grãos (kg de vapor.kg de ar seco<sup>-1</sup>);  $cp$  é o calor específico do grão (kcal.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>);  $R$  é a razão entre a massa de matéria seca da camada delgada e a massa de ar seco que a ultrapassa no intervalo  $\Delta t$  (kg de matéria seca.kg de ar seco<sup>-1</sup>).

$$\begin{aligned} 0,24 \cdot T_o + RM_o \cdot (588 + 0,45 \cdot T_o) + cp \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{go} + (RM_f - RM_o) \cdot T_{go} \\ = 0,24 \cdot T_f + RM_f \cdot (588 + 0,45 \cdot T_f) + cp \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{gf} \end{aligned} \quad (7)$$

O balanço de massa avalia a razão de mistura do ar consistente com a perda de umidade do produto ( $RM_f$ ) decorrido o intervalo de tempo  $\Delta t$ , conforme Equação 8, em que  $U_f$  é o teor de água final do produto em base seca no instante  $t + \Delta t$  (decimal).

$$RM_f - RM_o = R \cdot (U - U_f) \quad (8)$$

O processo de simulação do algoritmo cuja formulação foi apresentada nas Equações 1 a 8 é composto por 10 passos, os quais foram detalhados a seguir, e deve ser realizado repetidamente para cada uma das camadas em que a massa de grãos foi dividida, até que o critério de parada seja satisfeito. Adotou-se  $\Delta t = 1$  hora, pois a secagem a baixa temperatura é um processo demorado, com temperatura e umidade do ar ambiente sofrendo alterações ao longo dos dias simulados. O fluxograma do processo é apresentado na Figura 2.

- 1) cálculo da umidade relativa do ar de secagem ( $UR_s$ ) e da umidade relativa do ar intergranular ( $UR_{ai}$ ) pelas Equações 1 a 3, utilizando  $T_o$  e  $RM_o$  do ar de secagem e  $T_g$  e  $U_o$  do produto.
- 2) adoção da razão de mistura do ar de exaustão  $RM_f = RM_o$  e incremento da razão de mistura ( $\Delta RM$ ) em 0,001.
- 3) comparação dos valores de  $UR_s$  e  $UR_{ai}$ , podendo haver três casos: (i)  $UR_s > UR_{ai}$ , umedecimento da camada e  $\Delta RM = -\Delta RM$ ; (ii)  $UR_s < UR_{ai}$ , secagem da camada e  $\Delta RM = \Delta RM$ ; (iii)  $UR_s = UR_{ai}$ , equilíbrio higroscópico da camada com o ar de secagem.

- 4) para (i) e (ii) do passo 3 considerar  $RM_f = RM_f + \Delta RM$ , enquanto que para (iii) não existirá transferência de massa entre ar e produto.
- 5) obtenção da temperatura final do sistema ar/produto em equilíbrio ( $T_f$ ) por meio da Equação 7, sendo essa temperatura no instante  $t + \Delta t$ .
- 6) cálculo da umidade final do produto ( $U_f$ ) em  $t + \Delta t$  por meio da Equação 7.
- 7) recálculo de  $UR_s$  e  $UR_{ai}$  considerando as condições do ar e do produto em  $t + \Delta t$ .
- 8) definição do intervalo de aceitação, sendo o limite inferior ( $LI$ ) igual a  $UR_{ai} - 0,5$  e o limite superior ( $LS$ ) de  $UR_{ai} + 0,5$ , e avaliação de possíveis ocorrências a partir de  $UR_s$ :
  - Quando  $UR_s < LI$  e secagem (ii); ou  $UR_s > LS$  e umedecimento (i), retornar ao passo 4;
  - Quando  $UR_s < LI$  e umedecimento (i); ou  $UR_s > LS$  e secagem (ii), seguir para passo 9;
  - Quando  $LI < UR_s < LS$ , definir para o ar de exaustão  $T_f$  e  $RM_f$  e para o produto  $T_f$  e  $U_f$ ; e encerrar o algoritmo por ter atingido o ponto de equilíbrio, ressaltando que  $T_f$  e  $RM_f$  da camada em simulação, será o ar de secagem da camada sobrejacente (próxima a ser simulada).
- 9) considerar  $RM_f = RM_f - 4 \cdot \Delta RM$ .
- 10) considerar  $\Delta RM = 0,5 \cdot \Delta RM$  e retornar ao passo 4.

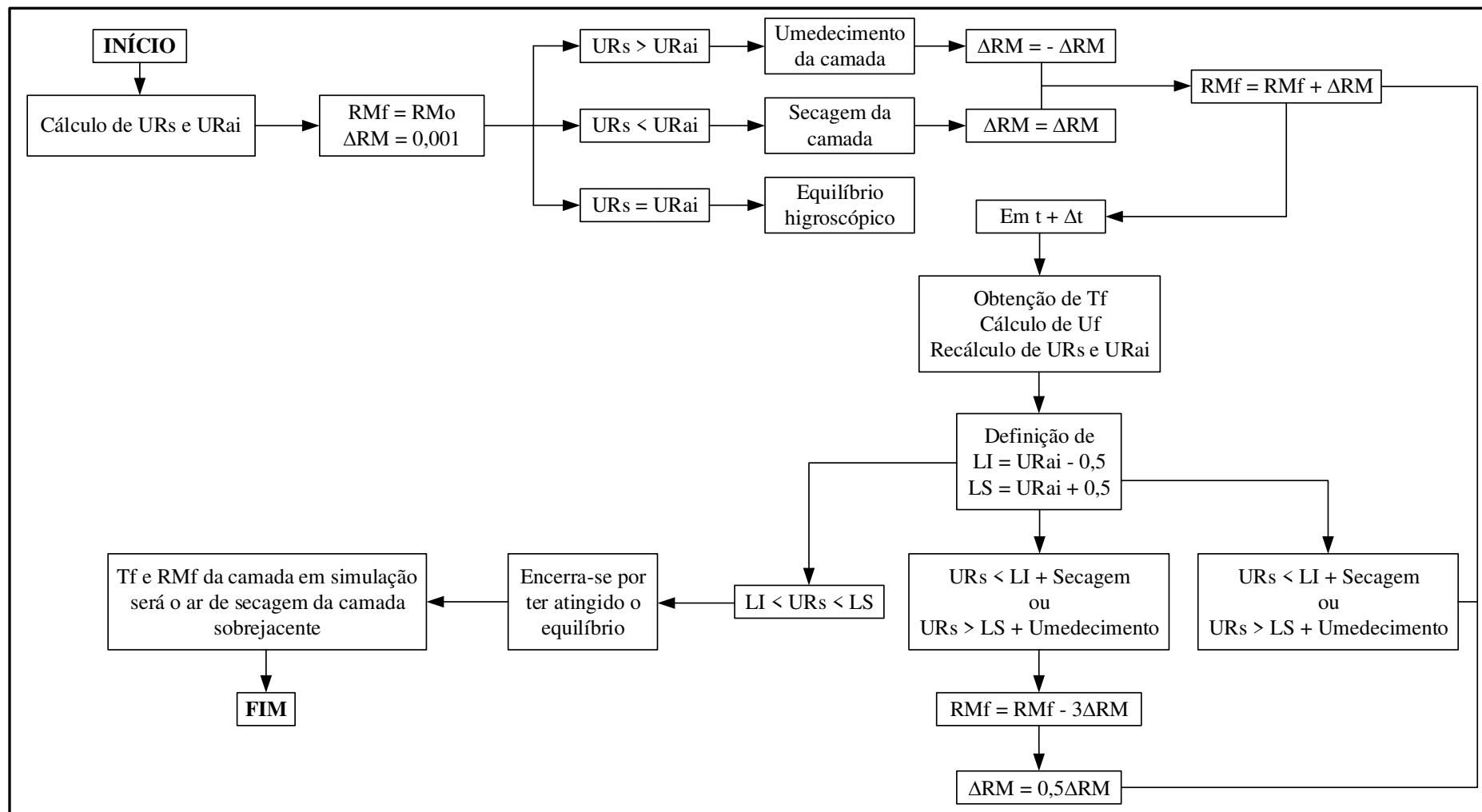


Figura 2 - Fluxograma do algoritmo de simulação do processo de secagem a baixa temperatura com base no Modelo de Thompson.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Dessa forma, o algoritmo implementado inicia a simulação com a leitura das características construtivas e operacionais da unidade armazenadora padrão, que não variam em função do tempo, e a partir de então executa a biblioteca de cubagem e perda de carga cujos parâmetros de saída são área, volume, capacidade estática (em sacas e toneladas), vazão total em  $\text{m}^3$  de  $\text{ar} \cdot \text{min}^{-1}$  (Equação 9) e perda de carga em mmca (Equação 10, onde  $a$  e  $b$  são parâmetros específicos das culturas estudadas, sendo iguais a 7,139 e 0,220 (arroz) e 2,833 e 0,267 (soja), respectivamente).

$$Q = f_{ar} \cdot C_{ea} \quad (9)$$

$$p_c = \frac{a \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \cdot H_g \cdot FM_{pg}}{\ln\left(1 + b \cdot \frac{Q}{A}\right)} \quad (10)$$

Em que:  $Q$  é a vazão de ar ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $f_{ar}$  é o fluxo de ar ( $\text{m}^3$  de  $\text{ar} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{ton}^{-1}$ ),  $C_{ea}$  é a capacidade estática do silo secador (ton),  $p_c$  é a perda de carga imposta pela coluna de grãos (Pa),  $A$  é a área da base do silo secador ( $\text{m}^2$ ),  $H_g$  é a altura da coluna de grãos (m) e  $FM_{pg}$  é o fator de majoração da pressão estática (adimensional).

A coluna de grãos do silo é dividida em uma quantidade de camadas iguais que já são pré-configuradas para aplicação do Modelo de Thompson e para cada uma dessas camadas são calculadas a vazão de ar (Equação 11) e a perda de carga (Equação 10), utilizando o método da secante, e também o aquecimento resultante da passagem do ar pelo ventilador (Equação 12).

$$Q = \frac{P_{vent} \cdot 4500 \cdot \eta}{p_c} \quad (11)$$

$$\Delta T = \frac{P_{es}}{\rho_{ar} \cdot c_{ar} \cdot \varepsilon} \quad (12)$$

Em que:  $Q$  é a vazão de ar ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $P_{vent}$  é a potência total dos ventiladores (CV),  $\eta$  é o rendimento dos conjuntos motores/ventiladores (decimal),  $p_c$  é a perda de carga (mmca),  $\Delta T$  é o aquecimento referente a passagem de ar pelo ventilador ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $P_{es}$  é a pressão estática (kPa),  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $c_{ar}$  é o calor específico ar ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) e  $\varepsilon$  é a eficiência total do ventilador (decimal).

Após o processamento das informações construtivas e operacionais da unidade, procedeu-se a leitura dos dados de cada uma das estações meteorológicas espacialmente distribuídas pelo país (Apêndices A e B) para os dias e horários definidos nas Tabelas 1 e 2. A partir dos dados temporais de temperatura de bulbo seco ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa do ar (%) e pressão atmosférica (atm); e da umidade de equilíbrio desejada (%), início e duração do horário de ponta (h) e poder calorífico do gás liquefeito de petróleo ( $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) são calculadas as

propriedades psicrométricas, umidade de equilíbrio do ar ambiente e aquecimento necessário (método da secante) para que o ar de secagem atinja a umidade de equilíbrio necessária para arroz com casca e soja (biblioteca de psicrometria).

Por fim, é conduzida a simulação do Modelo de Thompson para cada uma das condições do ar ambiente, adotando como critério de parada a umidade da camada superior, conforme já definido na seção 2.1 deste trabalho. Informações de aquecimento do ar de secagem pelo queimador ( $\Delta T_{qm}$ ), tempo de secagem total ( $t_s$ ) e com aquecimento ( $t_{qm}$ ), e fluxo de ar por área ( $F_{area}$ ) são imprescindíveis para os cálculos de energia térmica em kcal ( $ET_{GLP}$ ) e quantidade em kg ( $C_{GLP}$ ) de GLP (Equações 13 e 14), energia elétrica demandada por  $n_{vent}$  ventilador ( $EE_{vent}$ ) e  $n_{aq}$  aquecedor ( $EE_{aq}$ ) em kWh (Equações 15 e 16).

$$ET_{GLP} = 60 \cdot F_{area} \cdot A \cdot \rho_{ar} \cdot t_{qm} \cdot c_{ar} \cdot \Delta T_{qm} \quad (13)$$

$$C_{GLP} = ET_{GLP} / PCI_{GLP} \quad (14)$$

$$EE_{vent} = (\sqrt{3} \cdot V_{f-v} \cdot I_{L-v} \cdot t_s \cdot fp \cdot n_{vent}) / 1000 \quad (15)$$

$$EE_{aq} = (V_{f-q} \cdot I_{qm} \cdot t_{qm} \cdot n_{aq}) / 1000 \quad (16)$$

Em que:  $V_{f-v}$  é tensão (V) e  $I_{L-v}$  é corrente de linha (A) do ventilador;  $fp$  é fator de potência (0,92),  $V_{f-q}$  é tensão (V) e  $I_{qm}$  corrente (A) do queimador;  $PCI_{GLP}$  é poder calorífico inferior do gás liquefeito de petróleo ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ ).

### 2.3 Georreferenciamento e geoprocessamento dos resultados obtidos

Por meio do software QGIS, versão 3.32.3, os resultados referentes às demandas de energia elétrica e térmica foram georreferenciados com base nas coordenadas geográficas (latitude e longitude) das estações meteorológicas com simulações convergentes. No entanto, devido ao formato vetorial com geometria pontual desses dados, a abrangência espacial ficou limitada, inviabilizando a representação contínua em todo território brasileiro.

Para solucionar essa limitação, aplicou-se o método de interpolação espacial denominado ponderação pelo inverso da distância (IDW). Esse método calcula valores estimados com base na média ponderada dos pontos vizinhos, atribuindo maior peso aos pontos mais próximos do local de interesse e possibilitando a mudança gradual do valor estimado em função da distância (BABAK; DEUTSCH, 2009). Dessa forma, quanto mais distante um ponto observado está do ponto alvo em que se deseja estimar um valor, menor a influência do valor do ponto observado no valor desse ponto alvo, conforme formulação apresentada na Equação 17 (LU; WONG, 2008).

$$\hat{y}(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i y(S_i) \quad (17)$$

Em que:  $\hat{y}(S_0)$  é o valor que pretende-se interpolar em um ponto alvo  $S_0$ ,  $y(S_i)$  são os valores observados nos pontos  $S_i$ ,  $n$  é o número de pontos observados e  $\lambda_i$  são os pesos, atendendo a condição de que  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ .

Estes pesos são definidos pela Equação 18, em que  $d_{0i}$  é o inverso da distância entre o ponto alvo e os pontos observados, e  $\alpha$  é a potência, que determina o grau de contribuição dos pontos mais próximos para o valor estimado  $\hat{y}(S_0)$ . Após testes realizados, para este trabalho foi definida uma potência igual a 2 ( $\alpha = 2$ ) e a camada de saída do tipo raster foi configurada para pixels em x e y iguais a um décimo de grau.

$$\lambda_i = \frac{d_{0i}^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n d_{0i}^{-\alpha}} \quad (18)$$

Com base nos dados espacializados organizados em camadas do tipo *raster*, foram realizadas análises zonais para os 27 estados da federação. Essas análises incluíram a extração de estatísticas como média, mediana e desvio padrão das demandas de energia elétrica e térmica. Os cálculos consideraram um total de 88 simulações para o arroz (22 simulações referentes ao período de colheita de cada uma das quatro safras analisadas) e 140 simulações para a soja (35 simulações correspondentes ao período de colheita de cada uma das quatro safras investigadas). Essa abordagem permitiu uma caracterização temporal detalhada da demanda energética para os diferentes estados e culturas avaliadas.

## 2.4 Análise estatística temporal das simulações

A partir das demandas médias de energia elétrica e térmica obtidos no mapeamento, foram elaborados delineamentos experimentais inteiramente casualizados (DIC), considerando um nível de significância de 5%, com o objetivo de identificar possíveis diferenças significativas entre as simulações realizadas para cada estado. Para isso, duas análises de variância (ANOVA) foram conduzidas: uma utilizando como tratamentos os dias simulados (22 para o arroz e 35 para a soja) e outra considerando como tratamentos os quatro anos simulados.

A metodologia encontra-se detalhada na Tabela 3, onde a decisão estatística é baseada na comparação entre os valores da estatística F calculada e F tabelada. Caso a estatística F calculada seja maior ou igual à F tabelada, rejeita-se a hipótese nula (que postula a inexistência de diferenças significativas entre as médias) e aceita-se a hipótese alternativa, que indica

diferenças significativas entre as médias dos tratamentos avaliados. Essa abordagem permite verificar padrões de variabilidade entre as simulações e sua dependência dos fatores analisados.

Tabela 3 - Análise de variância (ANOVA) para um delineamento inteiramente casualizado.

Causas da variação	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F calculado
Tratamentos	$I - 1$	$SS_{trat}$	$\frac{SS_{treat}}{I - 1}$	$\frac{MS_{treat}}{MS_{res}}$
Resíduo	$k - I$	$SS_{res}$	$\frac{SS_{res}}{n - I}$	
Total	$k - 1$	$SS_{total}$		

Fonte: Cecon et al. (2012).

As formulações de alguns dos parâmetros calculados, como soma de quadrados e correção, podem ser verificadas nas Equações 19 a 22.

$$SS_{total} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^r x_{ij}^2 - C \quad (19)$$

$$SS_{trat} = \sum_{i=1}^I \frac{T_i^2}{r_i} - C \quad (20)$$

$$SS_{res} = SS_{total} - SS_{treat} \quad (21)$$

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^I r_i} \left( \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^r x_{ij} \right)^2 \quad (22)$$

Em que:  $I$  é o número de tratamentos;  $k$  é o número de amostras;  $r_i$  é o número de repetições do tratamento  $i$ ;  $x$  é a demanda média de energia elétrica ou térmica (kWh);  $T_i$  é a soma dos investimentos no tratamento  $i$ ;  $C$  é a correção.

Adicionalmente, com o objetivo de identificar quais variáveis temporais de entrada do Modelo de Thompson possuem maior influência sobre as demandas de energia elétrica e térmica, foram desenvolvidos modelos de regressão linear múltipla, conforme especificado nas Equações 23 e 24. Para avaliar a significância estatística dos coeficientes de ajuste obtidos, aplicou-se o teste t, permitindo calcular os p-valores correspondentes. Esses p-valores servem como base para determinar a relevância de cada variável no modelo, auxiliando na identificação dos principais fatores que impactam a demanda energética, elétrica e térmica.

$$EE = \beta_1 \cdot T_{bs} + \beta_2 \cdot U_{ra} + \beta_3 \cdot P_{atm} \quad (23)$$

$$ET_{GLP} = \beta_4 \cdot T_{bs} + \beta_5 \cdot U_{ra} + \beta_6 \cdot P_{atm} \quad (24)$$

Em que:  $EE$  é a demanda de energia elétrica (kWh);  $ET_{GLP}$  é a demanda de energia térmica (kWh);  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  e  $\beta_6$  são as constantes de ajuste;  $T_{bs}$  é a temperatura de bulbo seco (°C);  $U_{ra}$  é a umidade relativa do ar (%) e  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica (atm).

## 2.5 Estimativa das demandas de energia elétrica e térmica em safras

A estimativa da demanda de energia elétrica e térmica no processo de secagem a baixa temperatura foi desenvolvida considerando uma unidade armazenadora padrão com capacidade estática  $C_{ea}$ , expressa em toneladas. Assim, para estimar o montante total de energia demandada em uma safra, basta multiplicar a demanda unitária pela quantidade de unidades armazenadoras necessárias para secar toda a produção colhida, conforme Equações 25 e 26, em que  $EE_S$  é a demanda de energia elétrica na safra (kWh),  $ET_{GLP_S}$  é a demanda de energia térmica na safra (kWh) e  $PROD_g$  é a produção de grãos (ton). A partir dos resultados obtidos será possível avaliar o impacto energético do processo de secagem em função da escala da produção e da capacidade das unidades armazenadoras, sendo essencial para análises de eficiência energética e planejamento agrícola.

$$EE_S = \frac{PROD_g}{C_{ea}} \cdot EE \quad (25)$$

$$ET_{GLP_S} = \frac{PROD_g}{C_{ea}} \cdot ET_{GLP} \quad (26)$$

Nos estados em que foram observadas diferenças temporais significativas entre as simulações, foram adotadas faixas de valores para as demandas de energia elétrica e térmica, considerando os valores máximos e mínimos observados. Isso possibilita uma análise mais detalhada das variações sazonais na demanda de energia. Já para os estados onde não houveram diferenças significativas, foram utilizadas as médias globais das simulações realizadas, o que simplifica a análise ao adotar um único valor representativo.

## 2.6 Análise compensativa da demanda de energia elétrica pela biomassa residual

Após a operação de secagem, os grãos passam pelo processo de limpeza, o que gera resíduos, como a casca do arroz e da soja, com potenciais aplicações energéticas e econômicas. A casca do arroz, que representa aproximadamente 21% da massa total de grãos produzida ( $PROD_g$ , ton), ou seja,  $p = 0,21$ , é uma biomassa residual com propriedades físicas favoráveis

ao reaproveitamento energético (ALI et al., 2016). Por outro lado, a casca da soja, que corresponde em média a 5% da massa total do grão ( $p = 0,05$ ) (COBEN; SANCAKTAR, 2021), possui atualmente maior valor agregado no setor de nutrição animal. No entanto, neste estudo, a casca de soja também foi analisada como uma fonte de reaproveitamento energético, considerando seus potenciais conflitos com a cadeia alimentar.

A massa total de casca de arroz ou soja, também chamada de massa total residual ( $m_r$ ), foi calculada com base na Equação 27. Nesse cálculo, leva-se em consideração o teor de água retirado do produto ( $U_{rp}$ , definida como 8,1% em base seca) e o percentual de perda de matéria seca (PMS), que é determinado por meio da Equação 33.

$$m_r = p \cdot PROD_g \cdot \left( \frac{100 - U_{rp} - PMS}{100} \right) \quad (27)$$

A potência disponível ( $Pot_d$ ) em MW a partir da biomassa residual da casca de arroz ou soja ( $m_r$ , em toneladas) pode ser calculada utilizando a Equação 28. Os parâmetros empregados incluem: (i) o poder calorífico inferior ( $PCI_b$ ) do briquete, que é de 17,73MJ.kg<sup>-1</sup>, para o arroz (VIEIRA, 2014), e 15,21MJ.kg<sup>-1</sup>, para a soja (DE PRETTO; TARDIOLI; COSTA, 2017); e (ii) a constante de ajuste de tempo de ano para segundos ( $k_T = 31.536.000s.ano^{-1}$ , que corresponde ao número de segundos em um ano).

$$Pot_d = \frac{m_r \cdot PCI_b}{k_T} \quad (28)$$

Para conversão da energia disponível na casca de arroz ou soja em eletricidade foi proposta como metodologia a combustão interna dos briquetes seguida de um ciclo termodinâmico Rankine (CAMPOS, 2016). Com a potência disponível ( $Pot_d$ ) e a eficiência de conversão de energia do ciclo termodinâmico ( $\eta_{CT}$ ) de 0,37 (COGEN, 2019), calculou-se a potência elétrica gerada ( $Pot_{el}$ ) em MW (Equação 29). A partir do fator de capacidade ( $FC$ ) igual a 0,80 e do número total de horas anuais de funcionamento da planta ( $t$ ) de 8760h.ano<sup>-1</sup>, estimou-se a energia elétrica gerada ( $E_{el}$ ) em MWh.ano<sup>-1</sup> (Equação 30).

$$Pot_{el} = Pot_d \cdot \eta_{CT} \quad (29)$$

$$E_{el} = Pot_{el} \cdot t \cdot FC \quad (30)$$

A energia demandada na produção de briquetes prensados ( $E_b$ , em kWh) deve ser subtraída da energia produzida ( $E_{el}$ ), a fim de obter o saldo de energia elétrica que pode ser efetivamente compensada no sistema produtivo ( $E_c$ , em kWh). De acordo com JI et al. (2018), a demanda de energia do processo de briquetagem ( $u$ ) é de 0,07MWh.ton<sup>-1</sup>. Os cálculos de  $E_b$  e  $E_c$  foram realizados a partir das Equações 31 e 32, que seguem abaixo.

$$E_b = m_r \cdot u \quad (31)$$

$$E_c = E_{el} - E_b \quad (32)$$

## 2.7 Estudo do balanço da emissão de CO<sub>2</sub> no processo de secagem

A exposição do produto ao processo de secagem ocasiona na perda de matéria seca (*PMS*, %) estimada pela Equação 33, em que  $t_s$  é o tempo de secagem (h),  $T$  é a temperatura da massa de grãos (°C),  $U_p$  é o teor de água do produto (%) e  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  são as constantes empíricas 0,00091; 0,710; 0,049 e 31,62 (arroz médio), respectivamente (SEIB et al., 1980). Para a soja, o modelo existente na literatura para estimativa da *PMS* foi proposto por (SOROUR; UCHINO, 2004), Equação 34, cujos coeficientes  $E$ ,  $F$  e  $G$  variam de acordo com as condições de armazenamento do produto, ou seja, variam em função da temperatura (°C) e do teor de água (%), vide Tabela 4.

$$PMS = 100 - 100 \cdot \exp \left\{ -A \cdot \left( \frac{t_s}{1000} \right)^B \cdot \exp[C \cdot (T - 15,6)] + D \cdot \left( \frac{U_p - 14}{100} \right) \right\} \quad (33)$$

$$PMS = \frac{E \cdot [\exp(F \cdot t_s) - 1] + G \cdot t_s}{14,7} \quad (34)$$

Tabela 4 - Coeficientes E, F e G da Equação 34 em diferentes condições de armazenamento.

Temperatura (°C)	Teor de água (%)	Coeficientes		
		<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>
30	26	1,296	12,73E-4	3,49E-5
	22	1,297	4,85E-4	2,13E-4
	18	1,297	3,13E-4	7,53E-4
25	26	1,296	10,77E-4	3,21E-4
	22	1,297	4,14E-4	1,50E-4
	18	1,297	2,54E-4	2,94E-4
20	26	1,297	6,69E-4	7,69E-5
	22	1,297	3,69E-4	7,04E-4
	18	1,297	2,12E-4	6,60E-4
15	26	1,297	4,46E-4	6,68E-5
	22	1,297	2,94E-4	2,27E-4
	18	1,297	1,86E-4	10,19E-4

Fonte: Sorour e Uchino (2004).

As constantes empíricas  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  da Equação 33 foram determinadas para grãos de soja com base em um banco de dados extenso, gerado a partir da aplicação da Equação 34 e das informações da Tabela 4, para combinações de temperatura, umidade relativa do ar e tempo de secagem. Esse ajuste transformou o modelo, que originalmente era parcialmente discreto, em um modelo completamente contínuo, adequado para aplicação no processo de simulação proposto. O banco de dados utilizado no ajuste incluiu 24 mil observações de variáveis dependentes e independentes. O ajuste foi realizado no software *CurveExpert Professional*, versão 2.7.3, sendo obtidas as seguintes constantes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  para a soja, respectivamente: 0,000044; 1,849384; 0,245961 e 9,371312. O modelo ajustado apresentou um coeficiente de determinação de 0,874, indicando um bom ajuste aos dados observados e confirmando sua confiabilidade para uso em simulações contínuas.

Logo, a partir da  $PMS$  e da equação estequiométrica da respiração, calculou-se a massa de  $CO_2$  acumulada em toneladas durante o processo de secagem, vide Equação 35 (parcela 1).

$$m_{CO_2(1)} = PROD_g \cdot \left( \frac{6 \cdot 44 \cdot PMS}{180,15 \cdot 100} \right) \cdot \left( \frac{100 - U_{rp}}{100} \right) \quad (35)$$

A massa de  $CO_2$  emitida em decorrência da demanda/queima de GLP para o aquecimento do ar de secagem caracteriza a parcela 2, conforme Equação 36, em que  $D_{GLP}$  é a demanda de GLP (kg) e  $CO_{2_{GLP}}$  é a quantidade de  $CO_2$  emitida por quilograma de GLP demandado,  $0,00275 \text{ ton} CO_2 \cdot \text{kg de GLP}^{-1}$ , de acordo com agências internacionais (EPA, 2025).

$$m_{CO_2(2)} = D_{GLP} \cdot CO_{2_{GLP}} \quad (36)$$

Conforme detalhado na seção 2.6, as cascas de arroz e de soja apresentam um significativo potencial energético como biomassa residual. Sua utilização como fonte de energia elétrica contribui para a descarbonização da matriz elétrica brasileira, uma vez que biomassa apresenta um balanço neutro ou até negativo em relação às emissões de  $CO_2$ , devido à absorção de dióxido de carbono durante o crescimento das plantas (BÉRES; JUNGINGER; BROEK, 2024). Dessa forma, a quantidade de  $CO_2$  que deixaria de ser emitida para a atmosfera foi estimada proporcionalmente ao percentual de utilização de  $E_c$ , que é energia elétrica alternativa que pode ser efetivamente compensada no processo produtivo, conforme definido pela Equação 37 (FREITAS et al., 2019).

$$m_{CO_2(NE)} = f_u \cdot E_c \cdot E_f \quad (37)$$

Em que:  $m_{CO_2(NE)}$  é a quantidade de  $CO_2$  que deixaria de ser emitida em toneladas,  $f_u$  é o fator de utilização de  $E_c$  e  $E_f$  é o fator de emissão da matriz elétrica brasileira.

$E_f$  é a combinação entre os fatores de emissão da margem operacional ( $E_{fo}$ ) e de emissão da margem de construção ( $E_{fc}$ ), representando a intensidade das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da energia despachada e da construção das últimas usinas do país (Equação 38).

$$E_f = E_{fo} \cdot w_o + E_{fc} \cdot w_b \quad (38)$$

Dessa forma, adotou-se  $E_f$  igual a 0,3100 tonCO<sub>2</sub>.MWh<sup>-1</sup> (ano de referência: 2019), uma vez que  $w_o$  e  $w_b$  são os pesos para as fases de operação e construção, respectivamente, iguais a 0,5; e os fatores de emissões das margens operacional ( $E_{fo}$ ) e de construção ( $E_{fc}$ ) da matriz elétrica brasileira em 2019 foram estimados em 0,1020 e 0,5181 tonCO<sub>2</sub>.MWh<sup>-1</sup>, respectivamente (MCTIC, 2019; OLIVEIRA et al., 2021).

Por fim, com base nas parcelas 1 e 2 de emissão de CO<sub>2</sub> definidas pelas Equações 35 e 36, e na Equação 37 que estima créditos de CO<sub>2</sub> decorrentes da descarbonização da matriz elétrica em função da utilização da casca de arroz e soja como fonte alternativa, foi possível realizar o balanço de emissão de CO<sub>2</sub> no processo de secagem conforme Equação 39.

$$B_{CO_2} = m_{CO_2(1)} + m_{CO_2(2)} - m_{CO_2(NE)} \quad (39)$$

## 2.8 Análise comparativa entre os Estudos de Casos 1 e 2

A análise comparativa foi realizada por meio de camadas raster geradas para estimar a demanda total de energia durante o processo de secagem a baixa temperatura do arroz e da soja. Contudo, foi necessário ajustar essa métrica para refletir a demanda total específico de energia, dado que, para o mesmo volume de grãos inserido em uma unidade armazenadora padrão, as massas totais apresentaram variações devido às diferentes massas específicas dos produtos. O processo decisório foi executado pixel a pixel, destacando-se a relevância de uma base de dados robusta para a geração das camadas raster, bem como a importância de uma resolução espacial adequada para garantir precisão nos resultados. Nesse contexto, a camada  $Raster_{DET-ARROZ}$  representou a demanda de energia total necessária para a secagem do arroz, enquanto a camada  $Raster_{DET-SOJA}$  indicou a demanda de energia total requerida para a secagem da soja. A camada  $Raster_{COMP}$  registrou os resultados da análise, atribuindo o valor 1 aos pixels onde a eficiência da demanda total específica de energia foi maior para a secagem da soja e o valor 0 aos pixels onde a secagem do arroz apresentou maior eficiência.

$$\text{Se, } \frac{Raster_{DET-ARROZ}}{1951,24} - \frac{Raster_{DET-SOJA}}{2674,54} > 0, \text{ então } Raster_{COMP} = 1;$$

$$\text{Caso contrario, } Raster_{COMP} = 0$$

Após identificar as áreas onde a secagem foi mais eficiente do ponto de vista energético para cada um dos produtos analisados, realizou-se uma análise das condições predominantes do ar ambiente em cada uma dessas regiões. Essa análise comparativa foi conduzida de forma paritária para cada unidade da federação e nos meses de fevereiro a junho (135 casos analisados), período em que as colheitas de arroz e soja coincidem. O procedimento consistiu em responder “Sim” ou “Não” a três perguntas: (i) a umidade relativa do ar na área indicada para a secagem de soja foi superior à da área indicada para a secagem de arroz?; (ii) a temperatura de bulbo seco na área indicada para a secagem de soja foi superior à da área indicada para a secagem de arroz?; e (iii) a pressão atmosférica na área indicada para a secagem de soja foi superior à da área indicada para a secagem de arroz?

As respostas obtidas para as questões (i), (ii) e (iii) foram organizadas nas colunas 2, 3 e 4 da Tabela 5, formando um total de oito cenários distintos. Ressalta-se que, nos estados onde a indicação de secagem foi 100% favorável a um dos produtos, não foi possível realizar a análise comparativa devido à ausência de parâmetros referentes ao outro produto a fim de estabelecer comparações.

Tabela 5 - Cenários definidos para análise das condições do ar ambiente nas áreas indicadas para secagem de arroz e soja.

Cenários	Umidade relativa	Temperatura de bulbo seco	Pressão atmosférica
1	Sim	Sim	Sim
2	Sim	Sim	Não
3	Sim	Não	Sim
4	Sim	Não	Não
5	Não	Sim	Sim
6	Não	Sim	Não
7	Não	Não	Sim
8	Não	Não	Não

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Os casos analisados foram categorizados em cada um dos cenários propostos, com base nas combinações das respostas obtidas. A análise do percentual de casos enquadrados em cada cenário permitiu identificar tendências e investigar a influência das condições do ar ambiente na determinação das áreas onde o processo de secagem a baixa temperatura do arroz ou da soja apresentou maior eficiência energética.

## 2.9 Modelagem de SBT por meio de Rede Neural Artificial

As redes neurais artificiais são sistemas distribuídos e paralelos, compostos por unidades de processamento simples, conhecidas como nós, que realizam cálculos de funções matemáticas, frequentemente não lineares. Essas unidades são organizadas em uma ou mais camadas interligadas por um grande número de conexões, predominantemente unidirecionais (LOPEZ-GARCIA; CORONADO-MENDOZA; DOMÍNGUEZ-NAVARRO, 2020). Na maioria dos modelos, as conexões entre os nós são associadas a pesos, os quais armazenam o conhecimento representado no sistema e ajustam a relevância das entradas para cada neurônio (Figura 3). Esses neurônios são responsáveis por aprender, processar as informações de entrada e gerar os parâmetros de saída. A principal vantagem das redes neurais reside na sua capacidade de aprendizado a partir de exemplos e na habilidade de generalizar o conhecimento adquirido para novas situações (BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 2003).

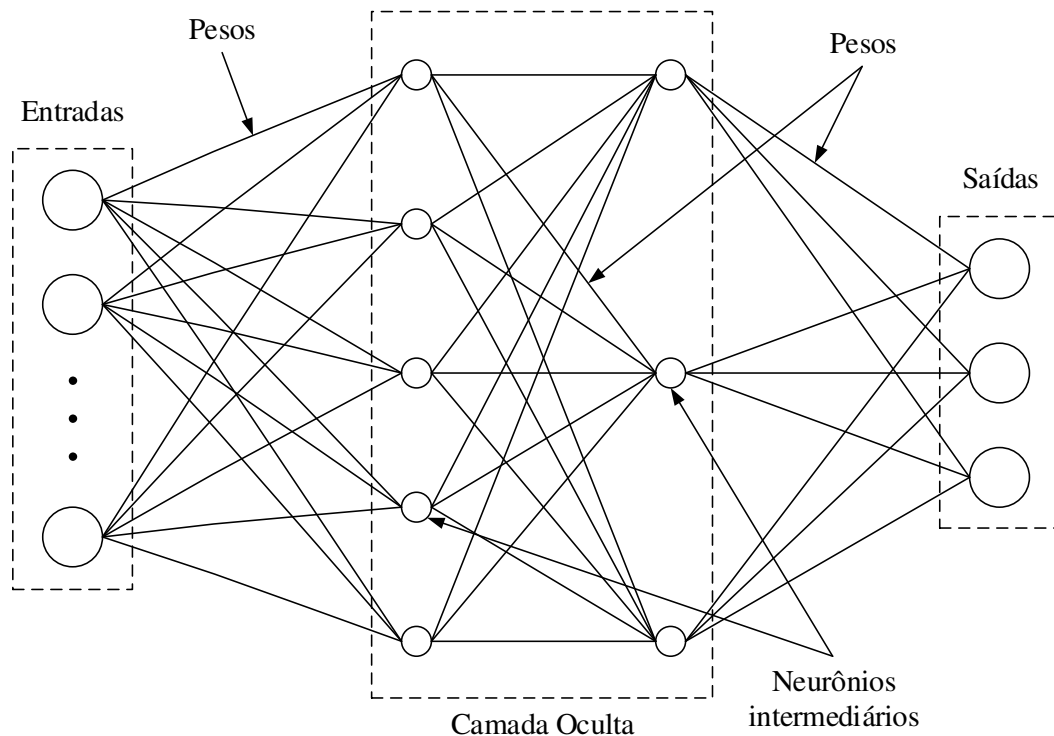


Figura 3 - Estrutura básica de uma rede neural artificial.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

As redes neurais podem ser classificadas em dois tipos principais: aprendizado supervisionado e aprendizado não supervisionado. No aprendizado supervisionado, o objetivo é prever uma variável dependente com base em variáveis independentes. Esse tipo de rede é caracterizado pelo uso de dados de treinamento que incluem as respostas esperadas, ou seja, a variável dependente está associada às variáveis independentes observadas. Esse método é

amplamente utilizado em problemas como classificação e reconhecimento de padrões, ajuste de curvas e mapeamentos multidimensionais, previsão de séries temporais, identificação de sistemas, controle de processos e projeto de filtros para processamento de sinais (HONDA; FACURE; YAOHAO, 2019; OLIVEIRA et al., 2023). Já no aprendizado não supervisionado, não há supervisores para avaliar o desempenho da rede em relação aos dados de entrada. Nesse caso, a rede se ajusta às regularidades estatísticas presentes nos dados, criando representações internas que codificam suas características intrínsecas. Essa abordagem permite à rede identificar padrões e categorizar novos dados com base em similaridades. Entre as principais técnicas utilizadas para resolver problemas de aprendizado não supervisionado estão o agrupamento k-means, a máquina de suporte vetorial em configurações específicas de *clustering* e o agrupamento hierárquico.

No presente estudo, foi proposta a implementação de uma rede neural artificial com aprendizado supervisionado como alternativa ao algoritmo desenvolvido com base no Modelo de Thompson (seção 2.2), que pode apresentar problemas de convergência para determinados valores de entrada. O problema abordado consiste em ajustar variáveis de entrada numéricas para prever alvos numéricos. As variáveis de entrada são a temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ), a umidade relativa ( $U_{ra}$ ) e a pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ), enquanto as variáveis de saída são a demanda de energia elétrica ( $EE$ ), demanda de energia térmica ( $ET_{GLP}$ ) e demanda de energia total ( $E_{TOT}$ ) no processo de secagem de grãos de arroz e soja.

Para superar as limitações das redes neurais de camada única, foi utilizada uma rede *feed-forward* multicamada, também conhecida como *Perceptron* Multicamadas (MLP), vide Figura 4. Esse tipo de rede conta com uma ou mais camadas ocultas, nas quais o aprendizado ocorre por meio do ajuste iterativo dos pesos das conexões, com base no erro entre a saída prevista e o valor esperado. A rede desenvolvida possui duas camadas: uma camada oculta com neurônios sigmóides, cuja ativação segue a Equação 40, e uma camada de saída composta por neurônios lineares, conforme descrito na Equação 41 (AL-ABOODI; AL-ABADI; T. IBRAHIM, 2017).

$$y_i = \frac{1}{1 + e^{-v_j}} \quad (40)$$

$$y_k = f_o \left[ \sum_{i=1}^{M_N} W_{kj} \cdot f_h \left( \sum_{i=1}^{N_N} W_{ji} X_i + W_{jo} \right) + W_{ko} \right] \quad (41)$$

Em que:  $y_i$  é a saída do neurônio “i”;  $v_j$  é o campo local induzido do neurônio “j”, ou seja, a soma ponderada de todas as entradas sinápticas mais o viés;  $W_{ji}$  é um peso na camada oculta

que conecta o  $i$ -ésimo na camada de entrada e o  $j$ -ésimo neurônio na camada oculta;  $W_{jo}$  é o viés para o  $j$ -ésimo neurônio oculto;  $f_h$  é a função de ativação do neurônio oculto;  $W_{kj}$  é um peso na camada de saída conecta o  $j$ -ésimo neurônio na camada oculta e o  $j$ -ésimo neurônio na camada de saída;  $W_{ko}$  é o viés para o  $k$ -ésimo neurônio de saída;  $f_o$  é a função de ativação do neurônio de saída;  $X_i$  é a  $i$ -ésima variável de entrada para a camada de entrada;  $y_k$  é a variável de saída computada;  $M_N$  e  $N_N$  é o número de neurônios na entrada e camadas ocultas, respectivamente.

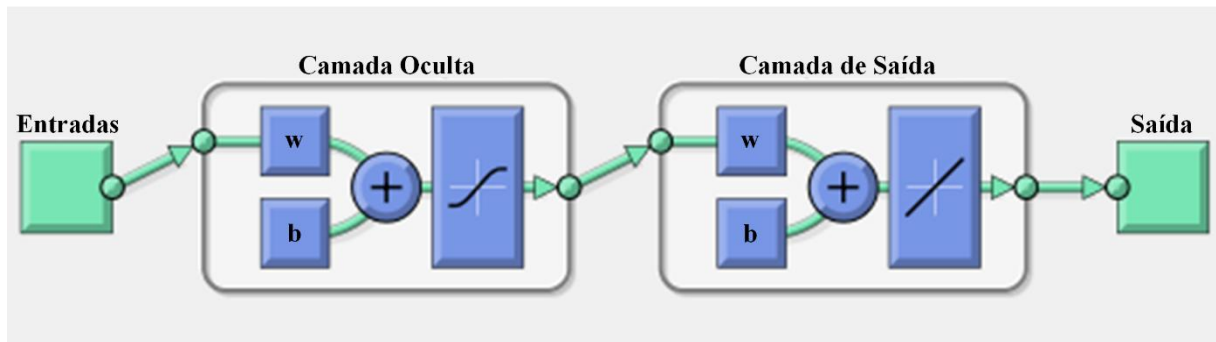


Figura 4 - Imagem ilustrativa dos blocos que compõem a Rede Neural artificial *feed-forward* com duas camadas.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

A rede *feed-forward* foi treinada utilizando o algoritmo de retropropagação Levenberg-Marquardt, amplamente reconhecido como um método eficaz para a otimização de parâmetros em modelos de regressão não linear. Esse algoritmo permite que os valores iniciais dos parâmetros converjam de forma consistente para um valor ótimo local desejado, garantindo maior precisão no ajuste dos modelos (MIMENBAYEVA et al., 2023). Durante o treinamento, a proporção de dados utilizada variou entre 30% e 70% do banco de dados disponível, assegurando uma análise robusta da performance da rede em diferentes condições.

Para os testes e validações, foi utilizada a ferramenta “*nftool*” do software Matlab R2018a, permitindo a avaliação da rede em diversas configurações. Nessas configurações, o percentual de dados de treinamento foi ajustado de 10 em 10%, e a quantidade de neurônios na camada oculta variou de forma discreta assumindo os seguintes valores: 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130 e 150 neurônios. A eficiência de cada configuração da rede foi avaliada utilizando duas métricas: a raiz do erro médio quadrático (*RMSE*) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). As fórmulas dessas métricas estão descritas nas Equações 42 e 43, respectivamente, onde  $E_j$  representa os valores observados,  $\hat{E}_j$  os valores estimados,  $\bar{E}$  a média dos valores observados e  $N$  o número total de observações. Essas métricas fornecem uma análise quantitativa da precisão

do modelo, sendo o  $RMSE$  uma medida do erro absoluto médio e o  $R^2$  um indicador da proporção de variação explicada pelo modelo em relação aos dados reais.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (E_j - \hat{E}_j)^2}{n}} \quad (42)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (E_j - \hat{E}_j)^2}{\sum_{j=1}^N (E_j - \bar{E})^2} \quad (43)$$

Na etapa final do trabalho, a definição da configuração otimizada da Rede Neural Artificial (RNA) foi realizada para os seis cenários avaliados: estimativas de demanda de energia elétrica, térmica e total nos processos de secagem de arroz e soja. Após ajustar a RNA, foram selecionadas aleatoriamente 8 amostras do banco de dados para validação, levando em consideração uma distribuição representativa. A seleção se baseou na combinação de variáveis climáticas - temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar e pressão atmosférica - com valores inferiores e superiores à média do banco de dados. Tal estratégia assegurou que as amostras cobrissem toda a faixa de operação da rede, garantindo uma validação abrangente e robusta. A análise comparativa envolveu a comparação direta dos valores estimados pelo Modelo de Thompson e os previstos pela RNA para cada amostra. O cálculo do desvio ( $D$ ) em termos percentuais, conforme descrito na Equação 44, foi utilizado como métrica de avaliação.

Esse procedimento permitiu verificar quantitativamente a precisão e a confiabilidade da RNA em prever as demandas de energia elétrica, térmica e total. A comparação é capaz de relevar se a adequação da RNA é ou não uma alternativa eficiente ao modelo tradicional para diferentes cenários climáticos e operacionais, ampliando a sua aplicação na otimização dos processos de secagem de arroz e soja.

$$D = \left( \frac{\hat{E}_j - E_j}{E_j} \right) \cdot 100 \quad (44)$$

### 3 ESTUDO DE CASO 1: SECAGEM A BAIXA TEMPERATURA DE ARROZ

#### 3.1 Análise de convergência do Modelo de Thompson

Os bancos de dados utilizados para as simulações de secagem a baixa temperatura do arroz foram constituídos de 438, 459, 477 e 565 estações meteorológicas para as safras de 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22, respectivamente. No entanto, a modelagem proposta convergiu para um número menor, por causa de falhas, inconsistência dos dados para os anos e dias simulados e/ou limitações do algoritmo (Tabela 6).

Tabela 6 - Quantidade de estações com dados convergentes para a modelagem proposta (arroz).  
(continua)

Mês	Dia	Saфра			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Fevereiro	1	424	406	417	338
	8	426	413	418	340
	15	423	407	415	338
	22	429	408	427	338
Março	1	434	419	427	326
	8	429	410	425	338
	15	426	419	420	335
	22	426	420	433	344
	29	426	415	439	338
Abril	5	424	415	436	351
	12	423	411	428	347
	19	424	415	426	350
	26	431	413	425	347
Maio	3	428	411	425	352
	10	416	412	424	357
	17	426	419	429	345
	24	428	418	429	353
	31	428	409	426	349
Junho	7	433	415	428	352
	14	410	423	434	361

Tabela 6 - Quantidade de estações com dados convergentes para a modelagem proposta (arroz).  
(conclusão)

Mês	Dia	Safr			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Junho	21	420	416	426	367
	28	423	412	429	364

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Observou-se que, na safra de 2021/22, havia um maior quantitativo de estações meteorológicas disponíveis para simulação. No entanto, essa safra apresentou o menor percentual de convergência em relação às demais analisadas, cerca de 61,38% (12/13: 97,10%; 15/16: 90,18%; 18/19: 89,44%), conforme apresentado na Tabela 6. Apesar dessa limitação, as informações utilizadas foram suficientemente bem distribuídas espacialmente ao longo do território brasileiro, garantindo a representatividade regional necessária. Isso assegurou a realização das análises, cujos resultados foram discutidos nas seções subsequentes.

### 3.2 Estatística descritiva preliminar das demandas de energia

Com base nos dados de saída das simulações realizadas, que incluem as demandas de energia elétrica e térmica (esta última derivada da queima de GLP), foi conduzida uma análise preliminar por meio de estatística descritiva. Essa análise utilizou métricas como a média, para o fornecimento de uma medida central de tendência, e o desvio padrão, para avaliação da variabilidade dos dados. Essas estatísticas foram calculadas com base nos valores pontuais, permitindo uma visão inicial do comportamento das demandas energéticas simuladas.

A análise da Tabela 7 revela que, no Brasil, a demanda média de energia elétrica para a secagem a baixa temperatura (SBT) de 1951,24 toneladas de arroz com casca, capacidade estática do silo padrão utilizado, oscilou entre 64324kWh (1º de fevereiro de 2019) e 80610kWh (17 de maio de 2022). Observou-se que a dispersão dos dados em relação à média foi mínima em 5 de abril de 2019 (7,20%) e máxima em 21 de junho de 2016 (17,64%). As condições climáticas dos dois dias que delimitam a faixa de demanda de energia revelam que, em 1º de fevereiro de 2019, a temperatura de bulbo seco foi 27,21°C e a umidade relativa do ar foi 65,97%, enquanto em 17 de maio de 2022 esses valores foram 18,72°C e 75,54%, respectivamente. A pressão do ar ambiente apresentou variações menores, de 966,15kPa para 963,45kPa. Essa análise confirma que temperaturas mais altas e umidades relativas mais baixas

aceleraram o processo de secagem, reduzindo o tempo de operação dos ventiladores, que são os principais responsáveis pela demanda de energia elétrica.

Tabela 7 - Demanda média de energia elétrica (kWh) para SBT de 1951,24 toneladas de grãos de arroz.

Mês	Dia	Safr			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Fevereiro	1	70135 ± 8878	70281 ± 7250	64324 ± 9711	72373 ± 6743
	8	71762 ± 8411	69983 ± 7837	71199 ± 7568	72655 ± 7833
	15	70105 ± 7719	71019 ± 7272	73007 ± 6468	70643 ± 8664
	22	69880 ± 8767	70611 ± 7887	71907 ± 6763	72117 ± 6616
Março	1	70950 ± 9234	69880 ± 9577	72153 ± 7451	69541 ± 8512
	8	69896 ± 8540	71397 ± 7528	71506 ± 6957	70158 ± 8275
	15	71948 ± 8426	71464 ± 7486	71944 ± 6474	73418 ± 6221
	22	72832 ± 6843	70074 ± 7504	74593 ± 6046	73705 ± 6708
	29	73785 ± 7534	70411 ± 8389	73352 ± 6125	72731 ± 6687
Abril	5	71981 ± 8160	69700 ± 7465	73349 ± 5278	70754 ± 7858
	12	71925 ± 7812	69984 ± 7740	74034 ± 5352	73112 ± 6754
	19	75531 ± 6219	67521 ± 8802	72590 ± 7081	74819 ± 7429
	26	74735 ± 6822	69541 ± 10634	72393 ± 6344	71400 ± 7807
Maio	3	72585 ± 6803	73123 ± 10261	72888 ± 6054	70434 ± 9064
	10	73925 ± 8128	70358 ± 9744	73043 ± 7213	74175 ± 8293
	17	75689 ± 10070	74853 ± 11320	76114 ± 5867	80610 ± 11053
	24	74393 ± 8112	75757 ± 12141	74063 ± 7939	74244 ± 10037
	31	75826 ± 10019	72655 ± 9249	71677 ± 8273	75860 ± 11658
Junho	7	74992 ± 8375	74364 ± 11710	74018 ± 10466	73445 ± 9378
	14	74950 ± 8022	76111 ± 13333	72953 ± 8152	77137 ± 11259
	21	73965 ± 8364	73927 ± 13039	72289 ± 10496	74722 ± 8665
	28	73147 ± 8585	73421 ± 11658	71169 ± 9626	75788 ± 10288

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

A análise dos dados apresentados na Tabela 8 indica que a demanda média de energia térmica, derivado da queima de GLP, para a secagem a baixa temperatura (SBT) de 1951,24 toneladas de arroz com casca no Brasil, variou entre 50681kWh (em 1º de fevereiro de 2019) e 127301kWh (em 17 de maio de 2019). Para esses mesmos dias, as variações relativas dos dados

em relação às médias foram significativamente distintas: 41,57% para a demanda mínima e 127,57% para a demanda máxima.

Tabela 8 - Demanda média de energia térmica (kWh) para SBT de 1951,24 toneladas de grãos de arroz.

Mês	Dia	Safrá			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Fevereiro	1	92398 ± 67116	82437 ± 68579	50681 ± 64656	92150 ± 65527
	8	101373 ± 69827	67396 ± 57366	78784 ± 64872	89127 ± 64229
	15	83263 ± 69440	85804 ± 62242	115495 ± 65107	78544 ± 65279
	22	78809 ± 68771	86527 ± 66986	92702 ± 60201	76428 ± 61135
Março	1	96354 ± 66670	77567 ± 66980	102436 ± 65042	64902 ± 67613
	8	86331 ± 66010	88963 ± 61977	86702 ± 60955	71770 ± 66775
	15	104150 ± 63920	89766 ± 61625	98157 ± 65489	106561 ± 63732
	22	110532 ± 61535	83358 ± 72496	114906 ± 55109	71909 ± 60964
	29	98008 ± 61887	83420 ± 66860	91367 ± 58907	81152 ± 64248
Abril	5	101507 ± 67859	74881 ± 64278	113681 ± 59550	84832 ± 73937
	12	109637 ± 63703	88479 ± 71780	111033 ± 56651	103338 ± 67283
	19	111167 ± 56850	55394 ± 64619	86102 ± 62171	80418 ± 64343
	26	96671 ± 63589	83258 ± 80054	96501 ± 64688	76346 ± 71611
Maio	3	85391 ± 65192	81888 ± 69157	110301 ± 61042	75834 ± 78556
	10	87798 ± 70418	96150 ± 79178	101772 ± 63343	86488 ± 74508
	17	110128 ± 72758	101664 ± 69437	127301 ± 52921	103754 ± 65978
	24	124279 ± 71424	101496 ± 73178	105298 ± 73764	71524 ± 70173
	31	112125 ± 69989	107725 ± 76487	84925 ± 74524	114510 ± 81264
Junho	7	117271 ± 70505	113576 ± 82335	78792 ± 70034	84642 ± 82892
	14	112006 ± 71747	86699 ± 70377	83320 ± 66790	99186 ± 81561
	21	112718 ± 79678	103567 ± 82359	82399 ± 73778	102595 ± 77042
	28	9236 ± 6046	7259 ± 6201	6586 ± 5945	7042 ± 6103

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Ao comparar as condições do ar ambiente entre 1º de fevereiro de 2019 e 17 de maio de 2019, observou-se que houve uma redução da temperatura de bulbo seco de 27,21°C para 21,45°C, enquanto a umidade relativa do ar aumentou de 65,97% para 81,89%. A pressão atmosférica variou de 966,15kPa para 968,21kPa, apresentando pequenas flutuações. Essa

alteração nas condições climáticas resultou em um aumento significativo na quantidade de energia térmica utilizada, uma vez que, com a redução da temperatura e o aumento da umidade relativa do ar, foi necessário utilizar mais GLP para ajustar as condições de secagem. Esse aumento na energia térmica é um reflexo direto da necessidade de compensar as condições desfavoráveis para a secagem, que exigem mais energia para manter a eficiência do processo.

Além disso, verificou-se que a demanda de energia térmica apresenta maior variabilidade em comparação à demanda de energia elétrica. Essa característica está diretamente associada à função desempenhada pela energia térmica como um componente adicional no processo de secagem. Sua atuação geralmente ocorre por meio de sistemas de controle *on-off*, que regulam a aplicação ou não de calor de acordo com as condições momentâneas do ar ambiente e também do produto. Essa sensibilidade faz com que a demanda de energia térmica seja mais suscetível às variações climáticas, como alterações na temperatura e umidade relativa do ar, além de ser influenciado por fatores operacionais inerentes ao processo de secagem estudado.

### **3.3 Extração de dados georreferenciados e análise estatística temporal**

As informações pontuais relativas às demandas de energia elétrica e térmica foram importadas, georreferenciadas e processadas no software QGIS, utilizando o método de interpolação ponderado pelo inverso da distância (IDW), conforme determinado na metodologia deste trabalho. A partir desse processamento, foram geradas camadas *raster* para todo o território brasileiro, compostas por 71297 pixels, representando a distribuição espacial das demandas energéticas. Em seguida, com base nos mapas gerados, foram extraídas estatísticas zonais para os 27 estados da federação, possibilitando uma análise detalhada das variações espaciais e regionais das demandas energéticas.

Foram desenvolvidos delineamentos completamente casualizados com base nas médias das 88 simulações realizadas e demonstradas na Tabela 9, ocasião em que o estado do Rio Grande do Sul foi utilizado como exemplo, sendo este o maior produtor de arroz do Brasil. As análises envolveram dois tipos de tratamentos: (i) dias simulados: considerando 22 tratamentos (dias) com 4 repetições cada; e (ii) safras simuladas: com 4 tratamentos (safras) e 22 repetições cada. Essas análises de variância permitiram avaliar diferenças significativas entre os tratamentos dentro de cada abordagem, fornecendo subsídios importantes para compreender a variabilidade temporal da demanda energética na operação estudada.

Tabela 9 - Demanda média de energia elétrica (kWh) no estado do Rio Grande do Sul para a SBT de 1951,24 toneladas de arroz.

Mês	Dia	Safrá			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Fevereiro	1	65045	75327	71504	70959
	8	75805	72806	71540	74001
	15	74384	72710	75781	62262
	22	75685	74349	73613	74122
Março	1	75925	71755	73856	75014
	8	65045	76486	75185	74889
	15	78510	75560	76297	76099
	22	77831	75949	80304	76699
	29	78730	76563	76996	75914
Abril	5	78600	73875	77445	76882
	12	77059	74879	78022	76573
	19	79357	72129	77468	79765
	26	78998	82199	75153	75881
Maio	3	75749	83373	75865	80248
	10	76040	77391	77109	79303
	17	94281	91854	80987	91911
	24	81868	88346	81755	82210
	31	90473	82840	80258	96728
Junho	7	85771	91591	80998	80134
	14	83154	90898	77606	86911
	21	82008	90597	84213	81435
	28	81836	81850	78394	81092

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Ao nível de significância de 5%, foram adotados valores críticos das estatísticas de teste F iguais ou superiores a 1,907 para a análise dos dias simulados e 8,559 para a análise das safras simuladas. Com base nesses critérios, rejeita-se a hipótese de nulidade, que afirma a inexistência de diferenças significativas entre as médias das demandas de energia para os tratamentos analisados. Isso indica que existem variações temporais significativas tanto no decorrer de uma safra quanto entre diferentes safras.

Conforme os dados analisados na Tabela 10, os estados da Região Sul (Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná) apresentaram variações significativas nas demandas de energia elétrica e térmica ao longo dos dias simulados durante a safra. Isso indica que as demandas energéticas nessas localidades foram impactadas por fatores temporais e climáticos inerentes ao período de simulação. No entanto, ao avaliar as demandas entre as safras, não foram identificadas variações significativas para nenhum estado dessa região. Isso sugere uma estabilidade no comportamento das demandas energéticas entre os anos simulados, possivelmente devido a condições climáticas consistentes entre as safras.

A partir dos dados apresentados na Tabela 10, constatou-se que, na região Sudeste, apenas o estado de Minas Gerais não apresentou variações significativas entre os dias simulados em relação à demanda de energia elétrica. Isso sugere que o comportamento energético nesse estado, ao longo das simulações diárias, foi mais uniforme, possivelmente devido a condições climáticas estáveis ou padrões operacionais consistentes. No que diz respeito à demanda de energia térmica, apenas o estado do Rio de Janeiro apresentou variações significativas entre os dias simulados, evidenciando que os fatores climáticos podem ter influenciado de forma mais acentuada a demanda desse tipo de energia. Além disso, assim como observado na Região Sul, não foram detectadas variações significativas entre as safras na demanda de energia elétrica e térmica para nenhum estado da Região Sudeste. Isso sugere estabilidade nas condições gerais entre os anos analisados, o que pode estar associado à uniformidade das condições climáticas de uma safra para a outra.

Na Região Centro-Oeste, os dados apresentados na Tabela 10 revelam os seguintes padrões: (i) Mato Grosso do Sul: houveram diferenças significativas na demanda de energia elétrica entre os dias simulados; (ii) Mato Grosso: foram identificadas diferenças significativas na demanda de energia térmica entre as safras simuladas, evidenciando que fatores sazonais, como variações climáticas específicas de cada safra, influenciaram o uso de energia derivada do GLP; (iii) Distrito Federal e Goiás: não foram registradas diferenças significativas para nenhum dos tratamentos analisados (dias ou safras), indicando maior estabilidade na demanda energética, tanto diária quanto anual.

Na Região Norte do Brasil, todos os estados apresentaram algum tipo de variação na demanda de energia elétrica e térmica, conforme indicado na Tabela 10. Tanto as variações sazonais quanto as flutuações entre safras impactaram diretamente nas demandas de energia:

- Energia elétrica: foram encontradas diferenças significativas nos estados do Acre, Amazonas, Rondônia, Roraima e Tocantins durante as safras simuladas, evidenciando

variações na demanda de energia ao longo da colheita. No Amapá, as variações foram significativas entre as safras simuladas, sugerindo que a diferença de demanda ocorre principalmente com a mudança de ano para ano, influenciada por mudanças climáticas no período estudado para o referido estado.

- Energia térmica: identificaram-se diferenças significativas na demanda de energia térmica nos estados do Pará, Roraima e Tocantins durante as safras simuladas, e no Acre, Amapá, Amazonas e Rondônia entre as safras. Essas variações estão relacionadas às mudanças nas condições climáticas (como umidade e temperatura) que afetam a necessidade de aquecer o ambiente de secagem.

Na Região Nordeste do Brasil, os resultados das simulações revelaram comportamentos distintos em relação às variações na demanda de energia elétrica e térmica: (i) Ceará e Paraíba não apresentaram variações significativas nos dados simulados para as demandas de energia elétrica e térmica; (ii) energia elétrica: foram observadas diferenças significativas nas demandas durante as safras nos estados de Alagoas, Maranhão, Pernambuco e Sergipe, e entre as safras nos estados de Piauí e Rio Grande do Norte; e (iii) energia térmica: as diferenças significativas na demanda de energia térmica ocorreram durante as safras nos estados de Alagoas, Bahia, Maranhão, Pernambuco, Piauí e Sergipe.

Tabela 10 - Resultados da análise de variância para os dados de demanda de energia elétrica e térmica na SBT para os estados brasileiros (simulações para grãos de arroz).

(continua)

Região	Estado	Demanda de energia			
		Elétrica		Térmica	
		Dias	Safras	Dias	Safras
Sul	Paraná	5,572*	1,124	2,694*	1,303
	Rio Grande do Sul	7,407*	0,567	5,163*	0,071
	Santa Catarina	8,269*	0,895	4,371*	0,552
Sudeste	Espírito Santo	2,521*	5,530	1,642	7,357
	Minas Gerais	1,546	3,220	0,543	6,145
	Rio de Janeiro	3,702*	1,667	2,640*	3,304
	São Paulo	3,157*	0,566	1,013	2,447
Centro-Oeste	Distrito Federal	0,713	3,439	0,759	2,255
	Goiás	0,845	4,905	1,194	3,778
	Mato Grosso	1,481	3,263	1,323	13,641*

Tabela 10 - Resultados da análise de variância para os dados de demanda de energia elétrica e térmica na SBT para os estados brasileiros (simulações para grãos de arroz).

(conclusão)

Região	Estado	Demanda de energia			
		Elétrica		Térmica	
		Dias	Safras	Dias	Safras
Centro-Oeste	Mato Grosso do Sul	3,274*	1,206	1,037	4,676
Norte	Acre	3,181*	0,211	0,033	44,489*
	Amapá	0,783	11,995*	1,037	9,154*
	Amazonas	2,033*	2,382	0,472	30,722*
	Pará	1,394	6,393	2,256*	4,767
	Rondônia	2,373*	0,953	0,970	27,246*
	Roraima	2,181*	7,406	2,270*	3,674
	Tocantins	3,589*	5,111	3,032*	3,342
Nordeste	Alagoas	5,306*	1,541	4,718*	0,047
	Bahia	0,909	5,364	1,907*	2,293
	Ceará	1,327	4,405	1,219	2,623
	Maranhão	3,429*	5,050	1,907*	3,197
	Paraíba	1,397	8,411	1,845	1,810
	Pernambuco	2,492*	3,206	2,752*	0,524
	Piauí	1,850	11,263*	2,126*	4,646
	Rio Grande do Norte	0,631	17,006*	0,922	7,254
Sergipe	5,319*	0,413	4,069*	0,039	

(\*) indica que houveram variações significativas a nível de 5%.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Para investigar as variações na demanda de energia elétrica e térmica ao longo das safras, foram calculadas as médias mensais para os estados que apresentaram diferenças significativas, conforme apresentado na Figura 5. A análise revelou padrões de comportamento distintos entre os estados para a demanda de energia elétrica (Figura 5a).

- Estados com comportamento regular e crescente: os estados de Santa Catarina (SC), Rio Grande do Sul (RS), Paraná (PR), Rio de Janeiro (RJ), Acre (AC), Pernambuco (PE) e Sergipe (SE) mostraram um aumento consistente na demanda de energia elétrica ao longo dos meses de fevereiro a junho.

- Comportamentos irregulares com tendência crescente: Os estados de São Paulo (SP), Mato Grosso do Sul (MS) e Alagoas (AL) apresentaram variações irregulares, mas com uma tendência geral de aumento na demanda de eletricidade.
- Comportamentos irregulares com tendência decrescente: Nos estados de Maranhão (MA) e Tocantins (TO), a demanda de energia elétrica apresentou uma tendência decrescente.
- Comportamentos oscilatórios: Nos estados de Amazonas (AM), Espírito Santo (ES), Rondônia (RR) e Roraima (RR), as demandas de energia elétrica não seguiram uma tendência clara de aumento ou diminuição, mas apresentaram flutuações significativas.

Na Figura 5b, os padrões de demanda de energia térmica devido à queima de GLP apresentam comportamentos distintos, destacando a influência de fatores locais e temporais. As principais observações incluem:

- Comportamento regular e crescente: Estados como Santa Catarina (SC), Rio Grande do Sul (RS), Paraná (PR), Sergipe (SE) e Bahia (BA) mostraram um aumento consistente na demanda de energia térmica ao longo dos meses de fevereiro a junho.
- Comportamento irregular e decrescente: Nos estados do Rio de Janeiro (RJ), Alagoas (AL) e Pernambuco (PE), a demanda de GLP apresentou uma tendência de queda, provavelmente devido a condições climáticas mais favoráveis que reduziram a necessidade de secagem intensiva.
- Comportamento irregular e crescente: Os estados do Pará (PA), Maranhão (MA) e Tocantins (TO) registraram um padrão de crescimento irregular, refletindo uma maior demanda por energia térmica em resposta a condições climáticas ou à dinâmica específica das safras.
- Comportamento irregular sem tendência definida: Nos estados de Roraima (RR) e Piauí (PI), as flutuações na demanda de energia térmica não seguiram uma tendência clara.

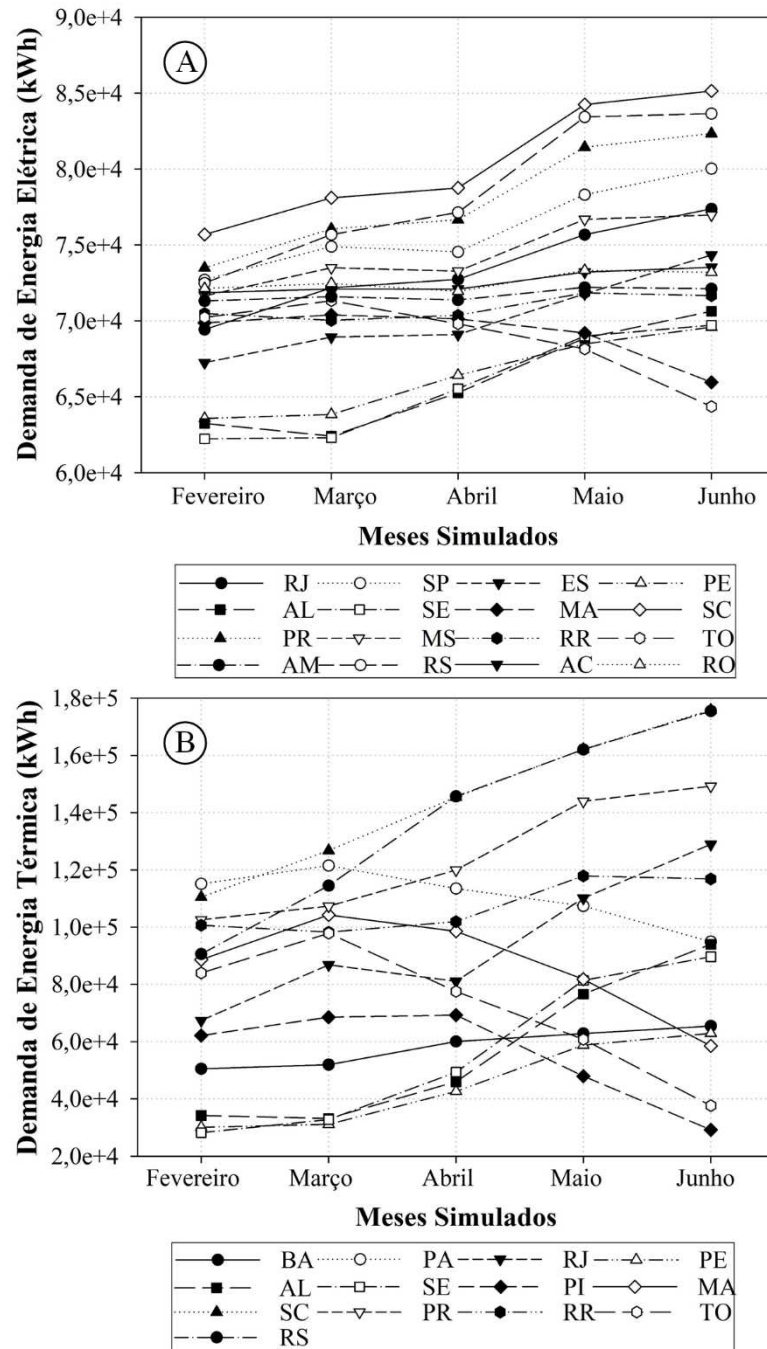


Figura 5 - Análise da variação significativa das demandas de energia elétrica (a) e térmica (b) entre os meses simulados (fevereiro a junho) para a secagem de arroz.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 6a, observa-se uma análise entre as safras simuladas para os estados com variação significativa na demanda de energia elétrica. Os principais destaques incluem: (i) Rio Grande do Norte (RN): apresentou um comportamento regular e crescente na demanda de energia elétrica entre a safra de 2012/13 e a de 2021/22; e (ii) Piauí (PI) e Amapá (AP): ambos os estados apresentaram oscilações nas demandas de energia elétrica ao longo das safras

simuladas. Contudo, ao comparar a demanda da primeira safra analisada (2012/13) com o da última (2021/22), constata-se um aumento na demanda geral.

Na Figura 6b, o comportamento da demanda de energia térmica decorrente da queima de GLP foi analisado entre as safras simuladas, revelando padrões distintos para os estados: (i) Acre (AC) e Rondônia (RO): ambos os estados apresentaram comportamentos regulares e decrescentes na demanda de energia térmica entre as safras avaliadas; e (ii) Amazonas (AM), Amapá (AP) e Mato Grosso (MT): demonstraram comportamentos irregulares, ou seja, com oscilações na demanda de GLP entre as safras. Contudo, ao analisar a demanda geral da safra de 2012/13 em relação à de 2021/22, observa-se uma redução significativa. Esse cenário (energia térmica) contrasta com o cenário da demanda de energia elétrica.

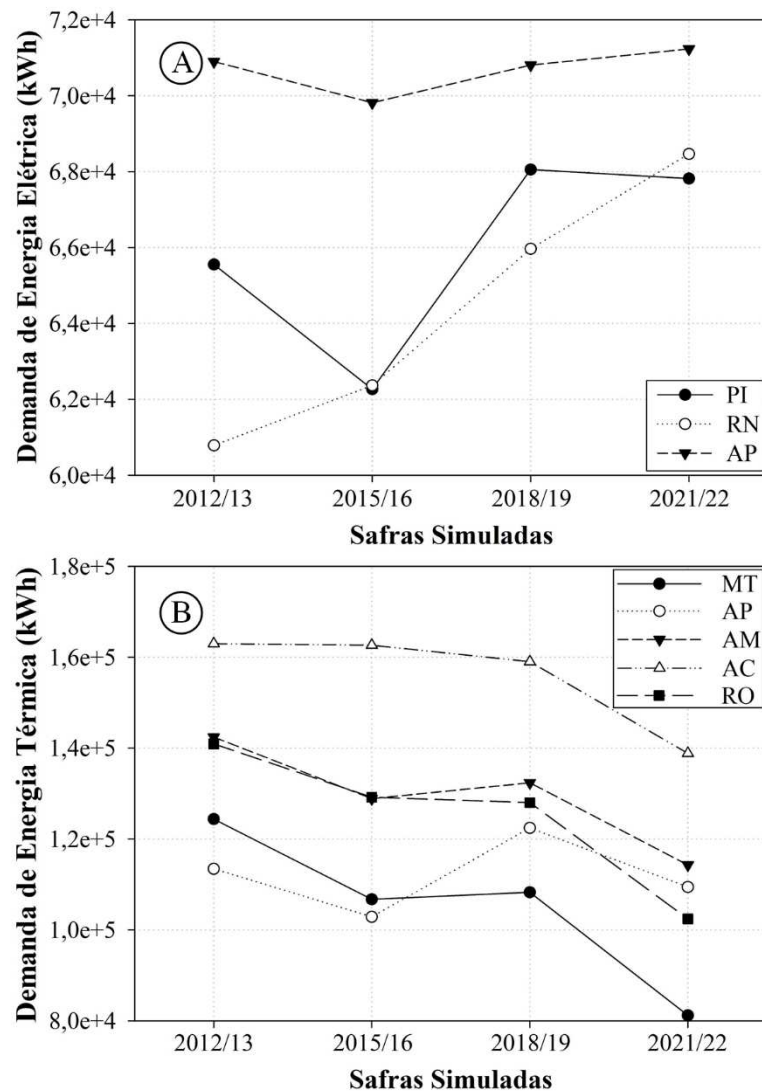


Figura 6 - Análise da variação significativa das demandas de energia elétrica (a) e térmica (b) entre as safras simuladas (2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22) para a secagem de arroz.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Com base na análise das demandas de energia elétrica e térmica, que demonstraram maior variação ao longo dos meses simulados, foram elaborados mapeamentos específicos para cada um dos meses de fevereiro a junho. Esses mapeamentos refletem as médias mensais calculadas a partir das simulações realizadas, os quais foram apresentados nas Figuras 7 (safra de 2012/13), 8 (safra de 2015/16), 9 (safra de 2018/19) e 10 (safra de 2021/22), referentes à demanda de energia elétrica, e nas Figuras 11 (safra de 2012/13), 12 (safra de 2015/16), 13 (safra de 2018/19) e 14 (safra de 2021/22), referentes à demanda de energia térmica.

Verifica-se que na safra de 2012/13, a demanda de energia elétrica no mês de fevereiro (Figura 7a) é relativamente alta em grande parte do Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, com picos de demanda nas áreas mais ao sul, principalmente no estado de Santa Catarina (SC), onde a temperatura e a umidade relativa do ar média no mês analisado foram iguais a 21,81% e 83,78%. O Norte e o Nordeste apresentaram demanda significativamente menor, principalmente nos estados do Rio Grande do Norte (RN) e Ceará (CE), onde a temperatura média em fevereiro foi de 29,56°C e 28,06°C, respectivamente.

O padrão de demanda em março (Figura 7b) é similar ao de fevereiro, mas com um ligeiro avanço do aumento da demanda pela região Sudeste e Centro-Oeste do país em direção as regiões Norte e Nordeste. No mês de abril (Figura 7c), quando comparado aos meses de fevereiro e março, percebe-se um aumento da demanda de energia elétrica principalmente no Rio Grande do Sul (RS), estado onde foi registrada temperatura e umidade relativa do ar iguais a 17,67°C e 82,38%, respectivamente; e a redução da área de demanda mínima próximo ao litoral da região Nordeste.

Na medida em que o outono foi avançando, ocorreu um aumento da demanda de energia elétrica, principalmente na região Sul do Brasil, conforme Figuras 7d (maio) e 7e (junho). A temperatura média nos estados do Paraná (PR), Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC) nesses dois meses variou entre 12,43°C e 15,73°C, e a umidade relativa nestes mesmos estados foram registradas entre 79,09% e 91,07%. Observou-se também uma migração das regiões de demanda mínima para os estados do Piauí (PI) e Tocantins (TO) (regiões Nordeste e Norte), onde os dados médios de temperatura e umidade relativa do ar ambiente assumiram valores entre 26,86°C e 27,99°C, e entre 55,80% e 69,95%, respectivamente.

Quantitativamente, ao analisar o mês de fevereiro de 2013, as demandas estimadas de energia elétrica para a SBT de 1951,24 toneladas de arroz com casca no Brasil variaram entre 48568kWh (mínimo) e 90127kWh (máximo). Nos meses subsequentes, o padrão de variação entre as demandas mínimas e máximas foi semelhante: (i) março: variaram entre 48211kWh

(mínimo) e 92552kWh (máximo); (ii) abril: oscilaram entre 47890kWh (mínimo) e 89933kWh (máximo); (iii) maio: valores entre 49321kWh (mínimo) e 91394kWh (máximo); (iv) junho: demandas entre 49657kWh (mínimo) e 93833kWh (máximo). Essa análise demonstra a variação consistente e progressiva nas demandas de energia elétrica ao longo dos meses, com oscilação entre os meses de março e abril, provavelmente devido à transição entre as estações verão e outono.

O comportamento descrito para as demandas de energia elétrica estimadas no Brasil na safra de 2012/13 manteve uma tendência semelhante nas safras de 2015/16, 2018/19 e 2021/22 (Figuras 8, 9 e 10). Contudo, as diferenças significativas identificadas para alguns estados, conforme ilustrado na Figura 6a, impactaram diretamente os valores mínimos e máximos de demanda estimadas para essas safras: (i) 2015/16: demandas mínimos e máximos de 44435kWh (fevereiro) e 103921kWh (junho de 2016); (ii) 2018/19: oscilações de 45373kWh (junho) a 95901kWh (maio de 2019); e (iii) 2021/22: valores de 46709kWh (fevereiro) e 95983kWh (junho de 2022).

Essas alterações sugerem mudanças nas distribuições espaciais da demanda de energia elétrica entre as safras, quando comparadas aos dados da safra de 2012/13. A seguir, serão detalhadas as principais diferenças espaciais e comportamentais nas distribuições de demanda energética observadas nas safras subsequentes:

- Na safra de 2015/16, foi identificada uma expansão tardia das regiões de maior demanda de energia elétrica do Sul em direção ao Norte e Nordeste, em comparação com a safra de 2012/13. Durante o mês de abril, as maiores demandas de energia elétrica permaneceram concentrados na região Sul e a expansão para as regiões Norte e Nordeste ocorreu apenas em maio e junho, acompanhando o avanço do outono e a redução das temperaturas médias, impactando o processo de secagem. Na safra de 2012/13, essa migração foi antecipada, com as demandas elevadas já se expandindo para essas regiões em março, marcando a transição entre o verão e o início do outono.
- Na safra de 2015/16, destacaram-se picos de demanda de energia elétrica na região Sul do Brasil, especificamente nos meses de maio e junho de 2016 (evidenciados pelas áreas em verde-escuro). Os registros climáticos relacionados apontaram que as temperaturas médias nos estados da região Sul variaram entre 9,20°C e 14,12°C, refletindo o início do inverno na região, e, umidade relativa média ficou entre 83,33% e 86,85%, índices que, combinados com as baixas temperaturas, impactaram o processo de secagem.

- Na safra de 2018/19, houve uma proliferação significativa de áreas com demandas médias de energia elétrica, principalmente no mês de abril. Observou-se uma redução nas áreas com demandas mínimas de energia (representadas em cor marrom-escuro), que praticamente desapareceram dos mapeamentos nesse período. Essas áreas de demanda mínima retornaram ao mapa apenas no mês de junho, com maior evidência na região interior do Nordeste, mais especificamente nas proximidades da área limítrofe com a região Norte, no estado do Tocantins (TO).
- Na safra de 2021/2022, observou-se a presença de elevados padrões de demanda de energia elétrica nas regiões Sudeste e Centro-Oeste para o mês de fevereiro, com destaque para os estados de Minas Gerais (MG) e Goiás (GO). Esse comportamento foi um fenômeno atípico, não identificado em outras safras para o mesmo período. A causa principal foi a redução da temperatura média e o aumento da umidade relativa do ar, que impactaram diretamente os sistemas de secagem, exigindo maior tempo de operação dos ventiladores e demanda mais elevada de energia elétrica.

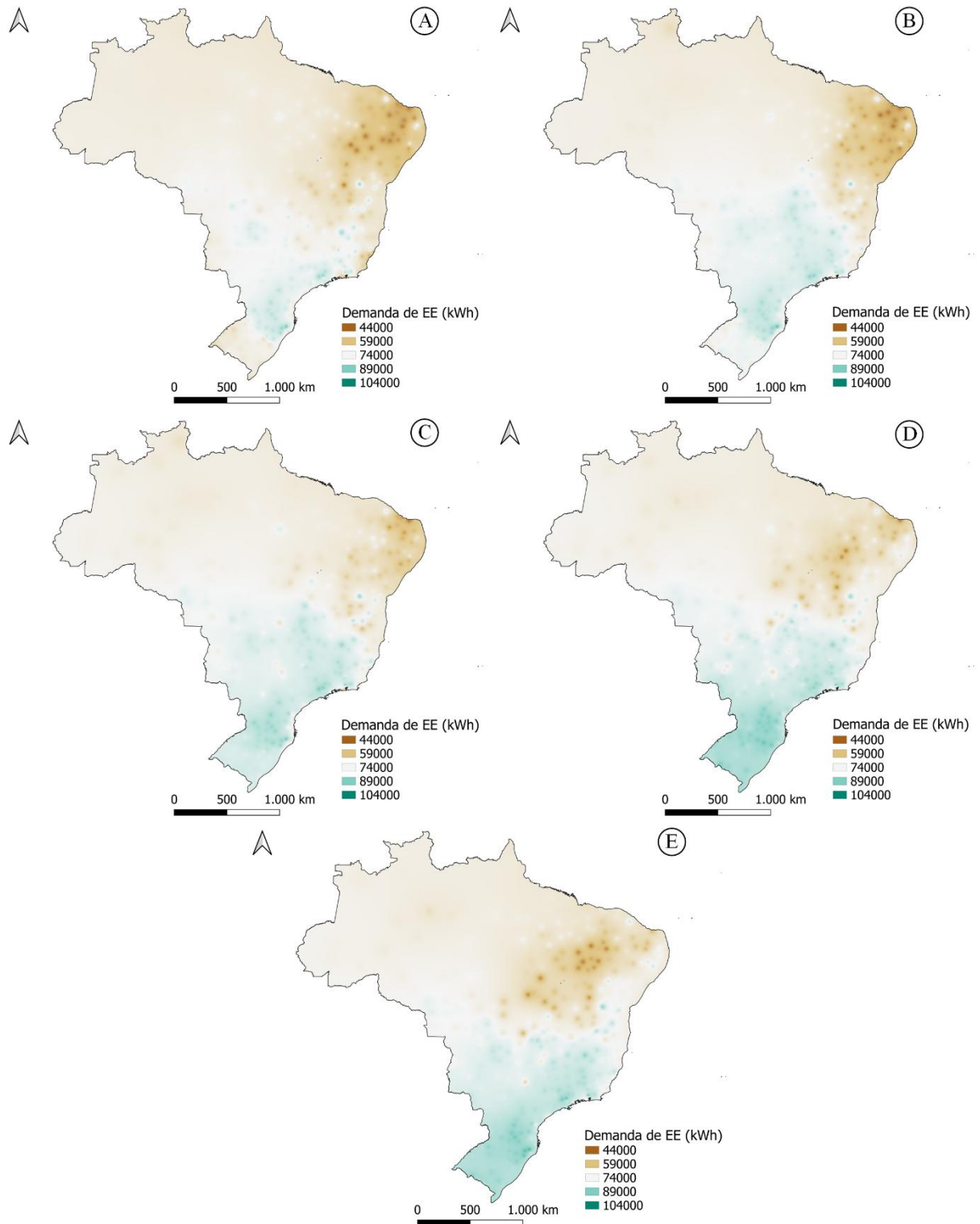


Figura 7 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2012/13.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

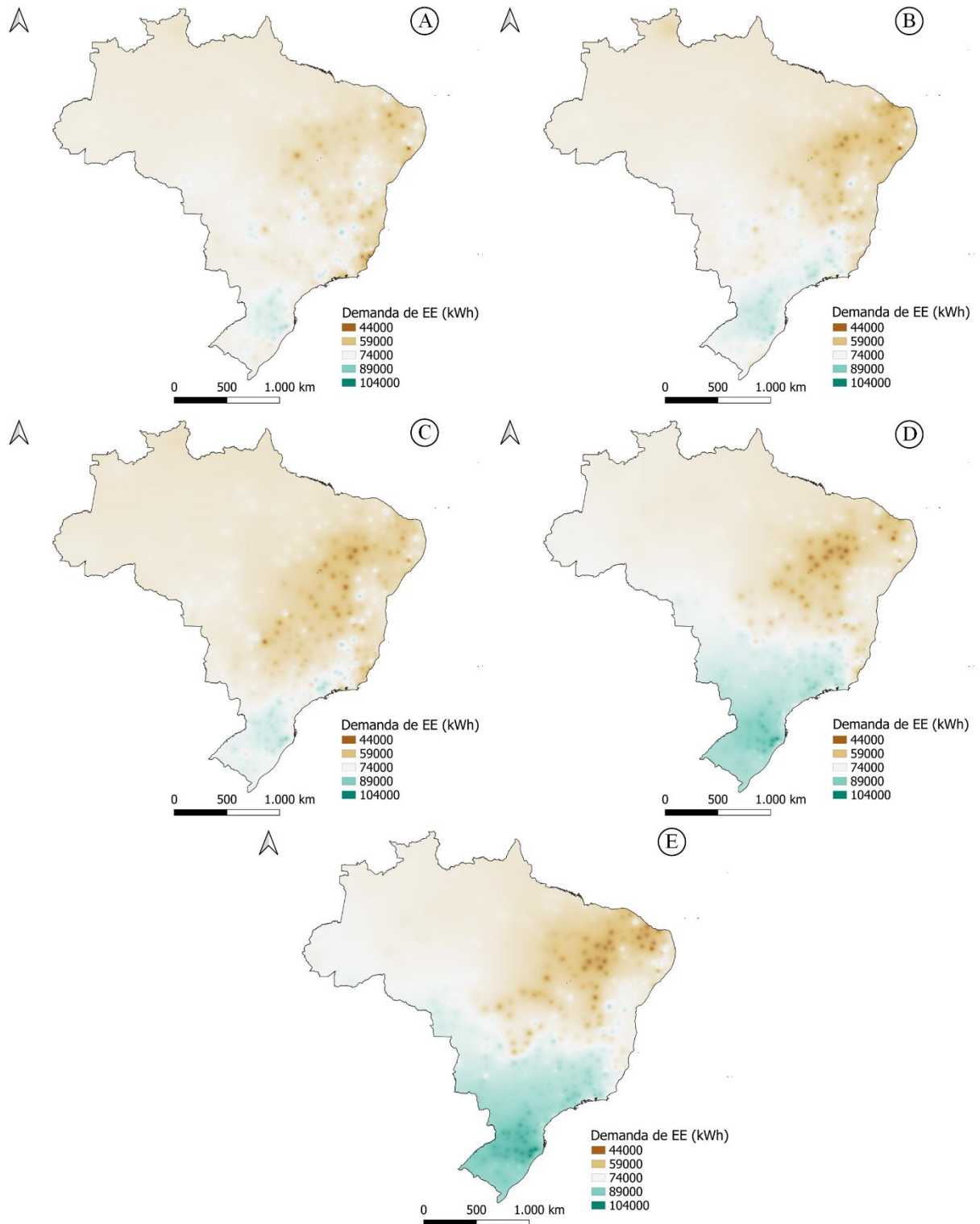


Figura 8 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2015/16.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

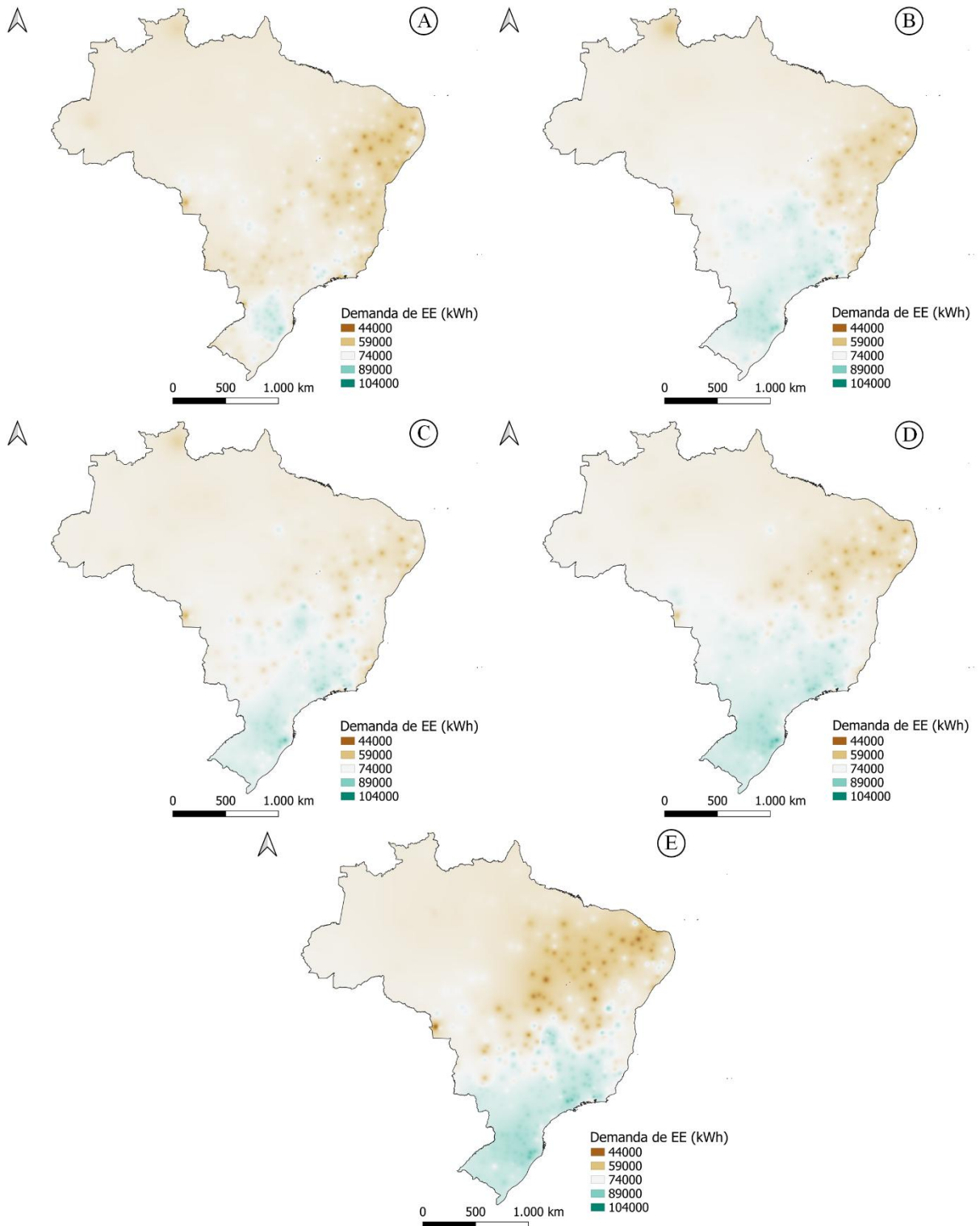


Figura 9 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2018/19.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

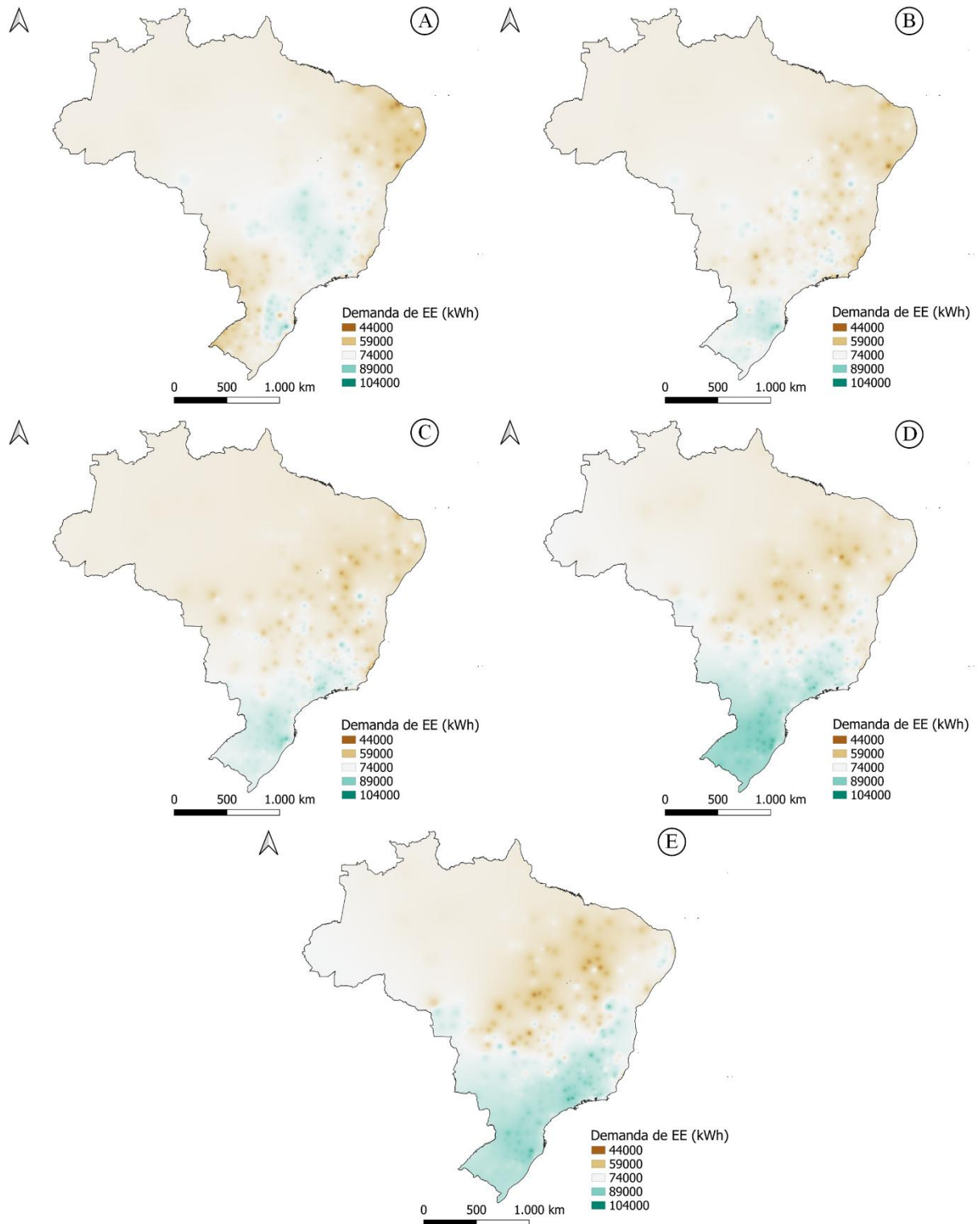


Figura 10 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2021/22. Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Como feito para a demanda de energia elétrica, também foram produzidos mapas de demanda de energia térmica para os meses de fevereiro a junho e para as safras de 2012/13

(Figura 11), 2015/16 (Figura 12), 2018/19 (Figura 13) e 2021/22 (Figura 14). Em fevereiro de 2013 (Figura 11a), foi identificado que as maiores demandas de energia térmica estavam concentradas nas regiões Norte (estados do Amazonas e Acre), Centro-Oeste (Mato Grosso e Mato Grosso do Sul) e Sul (Santa Catarina e Paraná). Em contraste, as menores demandas ocorreram na região Nordeste. No mês de março (Figura 11b), observou-se uma contração das áreas de demanda mínima na região Norte e uma expansão da área de maior demanda para o estado do Rio Grande do Sul (RS).

Nos meses de abril (Figura 11c), maio (Figura 11d) e junho (Figura 11e) de 2013, observou-se uma expansão gradual da demanda de energia térmica. Esse aumento foi notável principalmente ao longo do litoral e nas regiões limítrofes com os países da América do Sul, evidenciando uma mudança nas necessidades de secagem. Durante esse período, as áreas de demanda mínima, que inicialmente estavam localizadas ao longo do litoral do Nordeste, migraram para o interior do país, em direção à região central.

O comportamento da demanda de energia térmica para a safra de 2015/16 apresenta diferenças significativas quando comparado à safra de 2012/13. No mês de fevereiro de 2016 (Figura 12a), as áreas de maior demanda estavam concentradas em pequenas porções das regiões Norte, Centro-Oeste e Sul do Brasil. No entanto, ao longo dos meses seguintes, houve uma mudança nas distribuições espaciais. Em março de 2016 (Figura 12b), observou-se um avanço das áreas de maior demanda para a região Norte, enquanto a região Sul experimentou uma contração. De abril a junho (Figuras 12c a 12e), o padrão se inverteu, com contração das áreas de alta demanda na região Norte e expansão para o Sul, estendendo-se também em direção ao Sudeste e ao Centro-Oeste. Em relação às áreas de demanda mínima, ocorreu o oposto: inicialmente, elas se expandiram para a região Sudeste em abril (Figura 12c), mas em maio e junho (Figuras 12d e 12e), houve uma contração, especialmente na região litorânea Sudeste-Nordeste, retornando a padrões mais típicos das regiões do interior do país.

Na safra de 2018/19, o comportamento da demanda de energia térmica apresentou uma mudança na dinâmica entre os meses, conforme indicado na Figura 13. Em fevereiro de 2019 (Figura 13a), observou-se que a região Norte do Brasil apresentava demandas elevadas, enquanto, ao longo dos meses seguintes, as áreas de maior demanda no Sul do país começaram a expandir. No entanto, no mês de junho (Figura 13e), ocorreu uma inversão, com as áreas de menor demanda das regiões Nordeste e Sudeste migrando para as regiões Norte e Centro-Oeste. Na safra de 2021/22, a dinâmica da demanda de energia térmica para a secagem de arroz sofreu variações significativas nos meses de fevereiro (Figura 14a) e março (Figura 14b). Durante

esses meses, algumas áreas isoladas na região Norte apresentaram demandas elevadas, possivelmente devido a fatores climáticos locais e disponibilidade de dados convergentes. À medida que a colheita avançava, nos meses de abril (Figura 14c), maio (Figura 14d) e junho (Figura 14e), as áreas com menores demandas de energia térmica se contraíram na região Sul, onde surgiu uma área de elevada demanda. Ao longo do período, as regiões de menor demanda permaneceram concentradas nas regiões Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste.

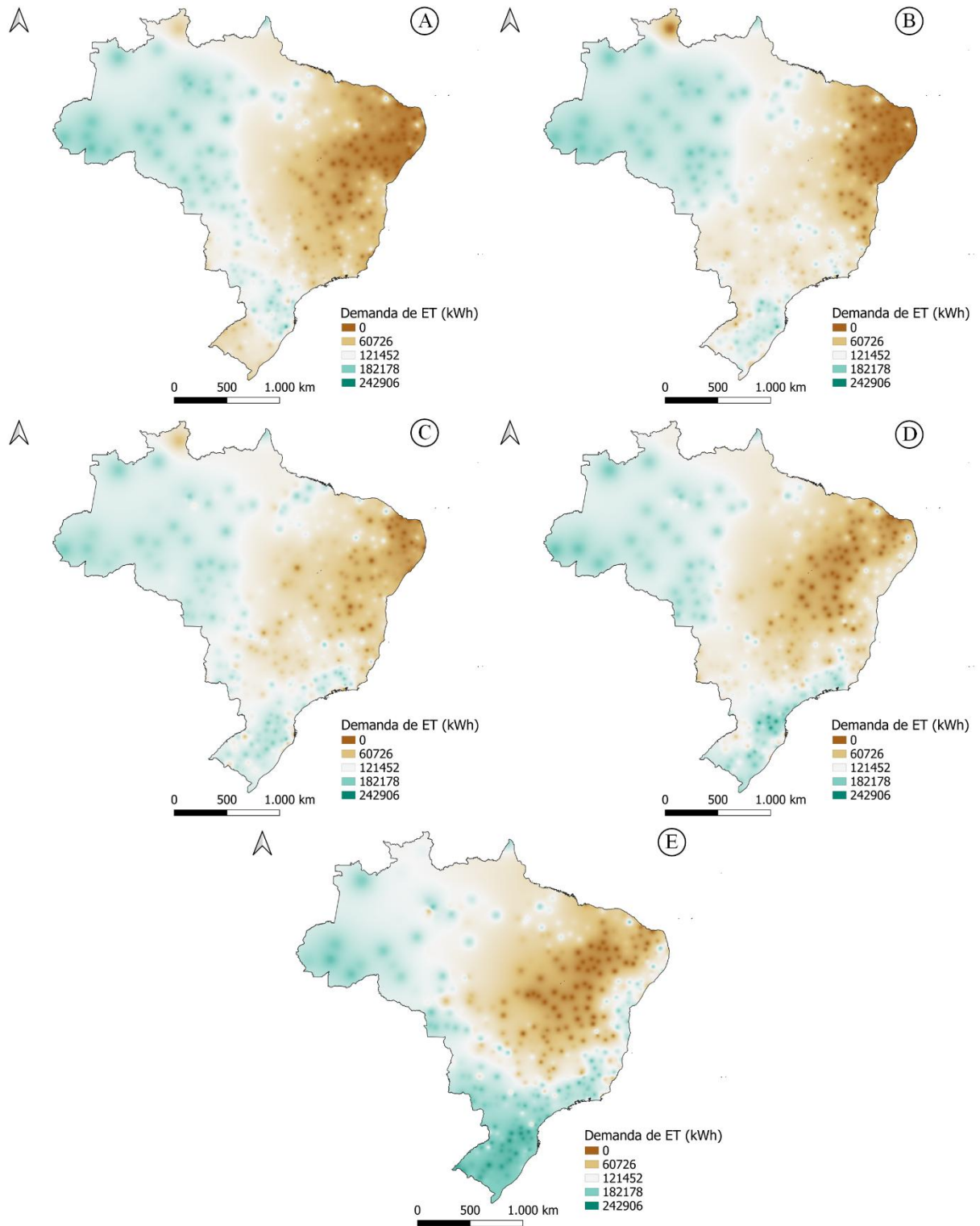


Figura 11 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2012/13. Fonte: elaborada pelo próprio autor.

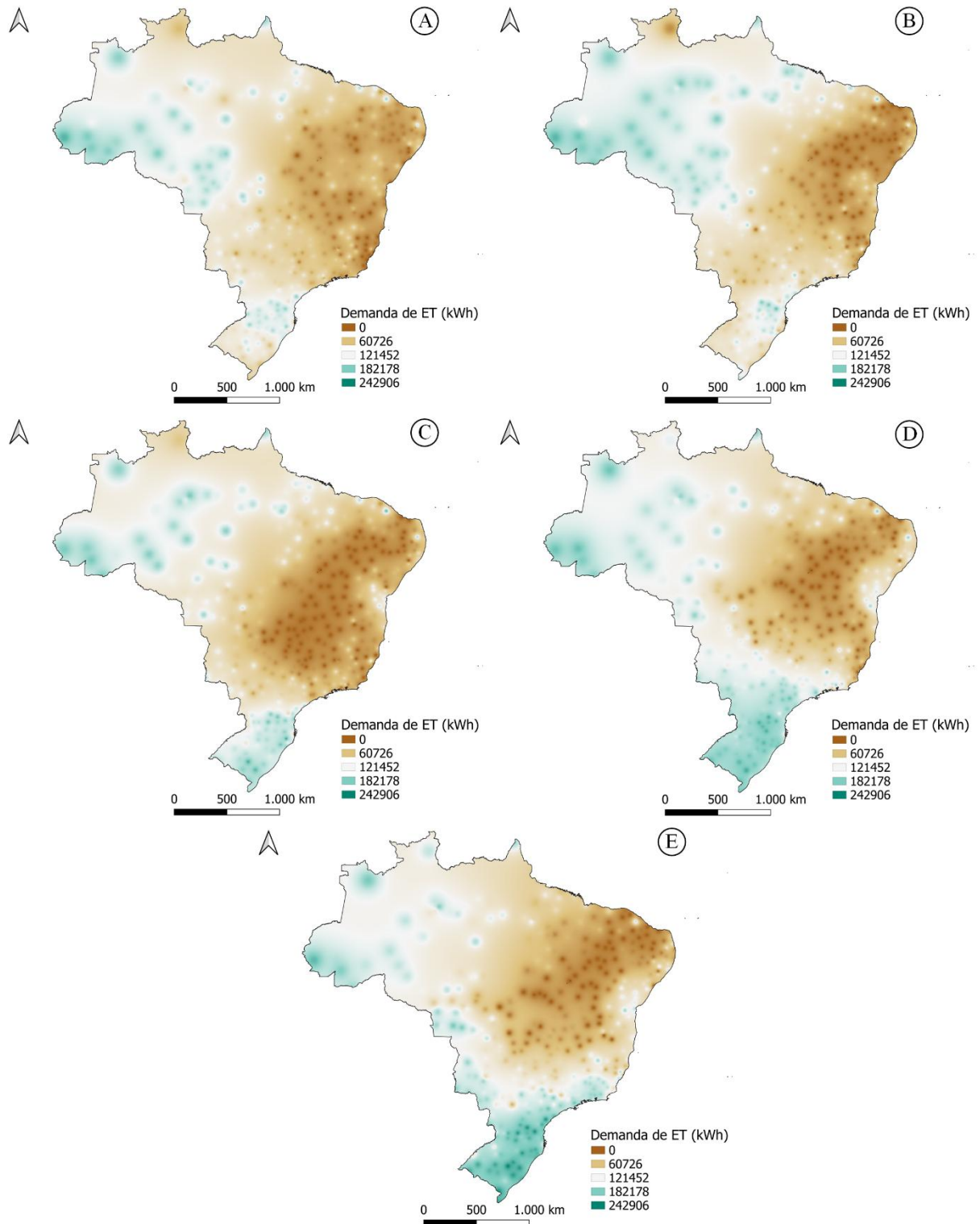


Figura 12 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2015/16. Fonte: elaborada pelo próprio autor.

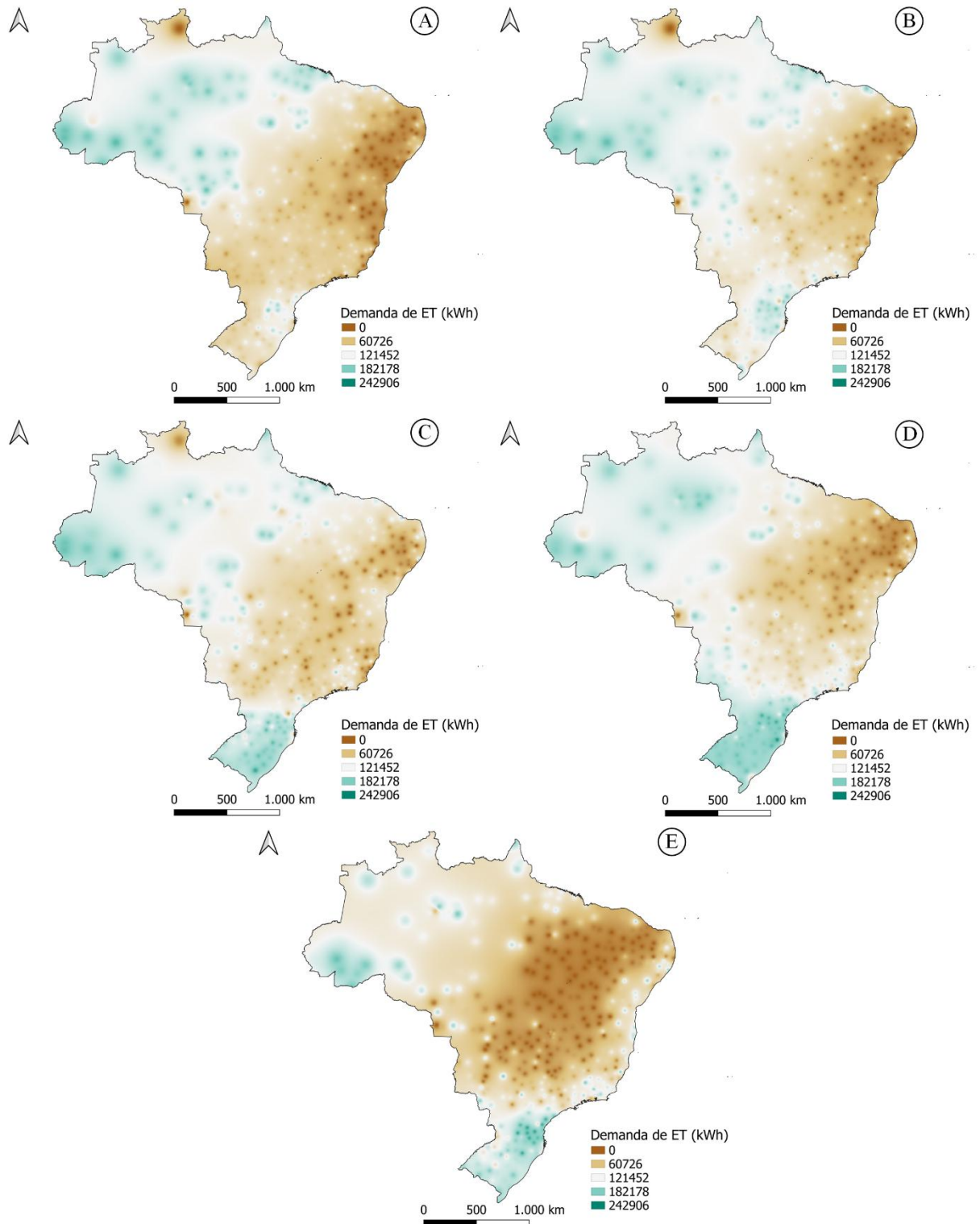


Figura 13 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2018/19. Fonte: elaborada pelo próprio autor.

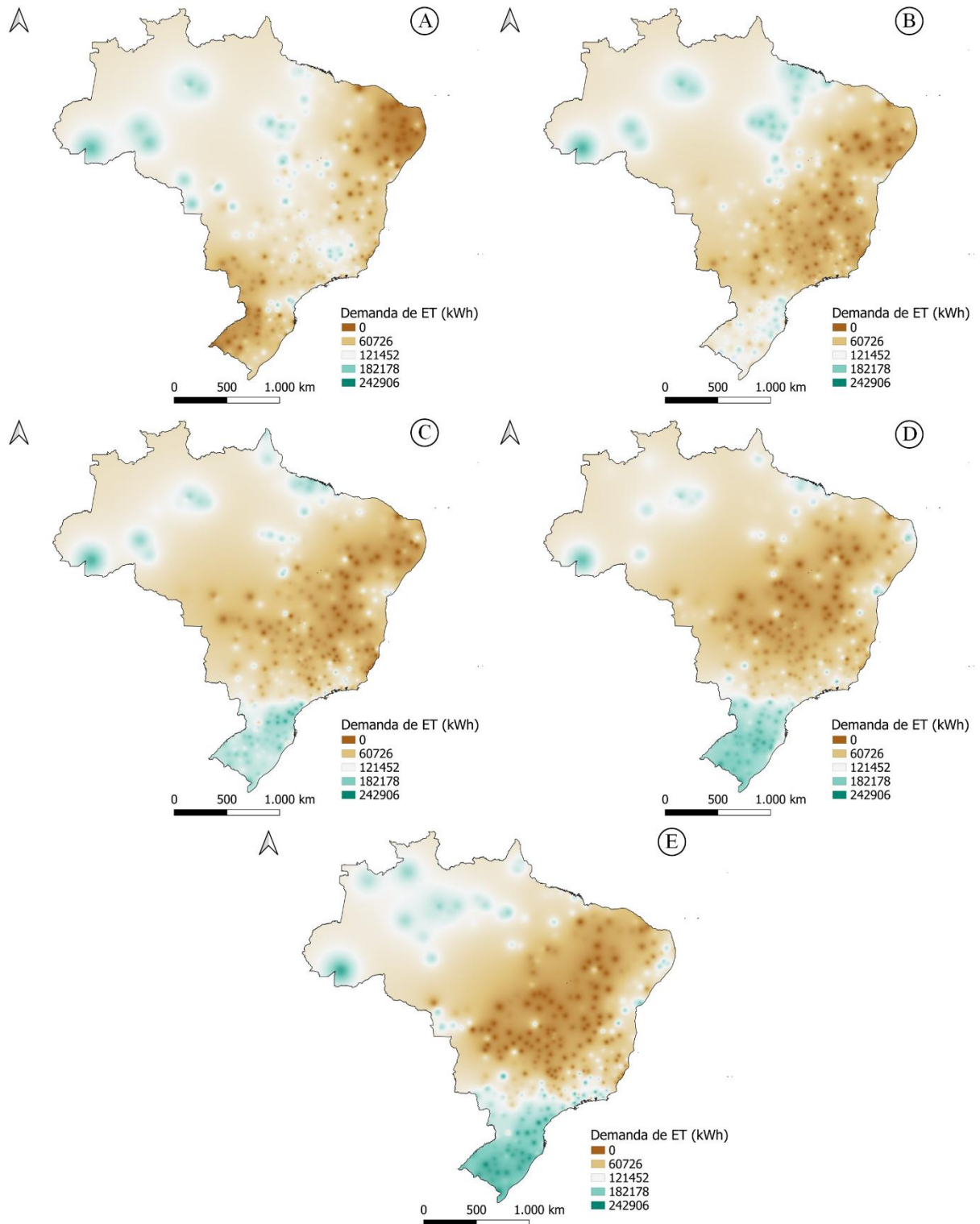


Figura 14 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 1951,24 toneladas de arroz nos meses de fevereiro (a), março (b), abril (c), maio (d) e junho (e) na safra de 2021/22. Fonte: elaborada pelo próprio autor.

As demandas máximas de energia térmica para as safras estudadas foram as seguintes: (i) junho de 2013 (safra 2012/13): 231,474MWh; (ii) junho de 2016 (safra 2015/16):

240,449MWh; (iii) maio de 2019 (safra 2018/19): 233,609MWh; e (iv) junho de 2022 (safra 2021/22): 234,440MWh. Além disso, para todas as safras simuladas, houveram demandas mínimas nulas, o que significa que para algumas localidades do país não seria necessário o uso de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) para o aquecimento do ar de secagem, devido a condições climáticas favoráveis. Embora tenha sido observada uma redução na demanda média de energia térmica em alguns estados ao longo das safras, conforme mostrado na Figura 6b, a demanda máxima de energia térmica apresentou oscilações sem uma tendência clara de aumento ou diminuição entre as safras.

Os modelos propostos para avaliar a influência das variáveis de entrada nas demandas de energia elétrica e energia térmica foram ajustados conforme as Equações 23 e 24 (presentes na Tabela 11). A análise dos resultados revelou as seguintes influências:

- Temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ): a temperatura de bulbo seco exerce uma influência negativa sobre as demandas de energia elétrica e térmica. Ou seja, quando a temperatura aumenta, a demanda de energia tende a diminuir.
- Umidade relativa do ar ( $U_{ra}$ ): a umidade relativa do ar tem uma influência positiva tanto para a demanda de energia elétrica quanto para a demanda de energia térmica. Em outras palavras, um aumento da umidade resulta em uma maior demanda de energia para deixar o ar em condições psicrométricas adequadas.
- Pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ): a pressão atmosférica influencia de forma positiva a demanda de energia elétrica e de forma negativa na demanda de energia térmica, indicando que variações na pressão também produzem impactos energéticos significativos no processo.

As variáveis temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica foram todas identificadas como estatisticamente significativas, com p-valor tendendo a zero, o que reforça a importância dessas variáveis no modelo preditivo das demandas. Em relação à precisão dos modelos ajustados: (i) o erro médio quadrático (RMSE) para o modelo de energia elétrica foi de 6,62E+3, o que corresponde a 9,10% da média dos valores simulados; e (ii) o RMSE para o modelo de energia térmica foi de 2,10E+4, com um erro relativo de 21,71% em relação à média do conjunto de dados utilizados no ajuste.

Tabela 11 - Ajustes dos modelos formulados pelas Equações 23 e 24 (arroz).

Energia	Variável	Constantes de Ajuste	Erro	Estatística de t	RMSE
Elétrica	$T_{bs}$	-1112,6	9,5378	-116,65	6,62E+03
	$U_{ra}$	301,12	3,019	99,741	
	$P_{atm}$	78,417	0,4112	190,71	
Térmica	$T_{bs}$	-1895,6	30,253	-62,658	2,10E+04
	$U_{ra}$	4523,4	9,5761	472,36	
	$P_{atm}$	-210,33	1,3043	-161,26	

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

### 3.4 Estimativa da demanda de energia elétrica e térmica por safra

A estimativa das demandas totais de energia elétrica e térmica para a secagem de arroz (SBT) foi realizada com base na produção de grãos nas safras analisadas. Esse levantamento é etapa fundamental da análise e planejamento da demanda energética total, pois a quantidade de grãos produzidos influencia diretamente na demanda de energia para secagem, seja elétrica (para ventilação) ou térmica (para aquecimento do ar de secagem). A Tabela 12 apresenta os dados de produção de arroz para as safras de 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22, permitindo calcular a quantidade média de energia necessária para atendimento à demanda de secagem por safra, considerando as variações regionais e climáticas. A produção de arroz no Distrito Federal foi nula para o período avaliado.

Tabela 12 - Produção de arroz por estado nas safras de 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22.

(continua)

Região	Estado	Produção (em mil ton)				Média
		Safra				
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22	
Sul	Paraná	174,6	120	142,1	159,7	149,1
	Rio Grande do Sul	7933,4	7356,6	7389,1	7654,4	7583,4
	Santa Catarina	1024,9	1052,3	1091	1178,3	1086,6
Sudeste	Espírito Santo	2,7	0,5	0,4	0,4	1,0
	Minas Gerais	44,6	15	9,8	8,5	19,5

Tabela 12 - Produção de arroz por estado nas safras de 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22.

(conclusão)

Região	Estado	Produção (em mil ton)				Média
		Safrá				
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22	
Sudeste	Rio de Janeiro	4,3	1,1	0,7	0,9	1,8
	São Paulo	86,9	37,9	46,8	0,4	43,0
Centro-Oeste	Distrito Federal	-	-	-	-	-
	Goiás	75,5	101,4	112,6	85,5	93,8
	Mato Grosso	528	438,6	371,5	332,1	417,6
	Mato Grosso do Sul	94,2	68	62,1	72,2	74,1
Norte	Acre	17,5	6,9	6,5	4,6	8,9
	Amapá	1,9	1,4	0,9	0,9	1,3
	Amazonas	6,1	4,4	2,7	8,1	5,3
	Pará	197,3	183,7	90,6	111	145,7
	Rondônia	132,7	145,8	137,5	105,3	130,3
	Roraima	109	60,4	73,6	88,8	83,0
	Tocantins	565,7	615,2	623,9	560,7	591,4
Nordeste	Alagoas	17,6	17,2	14,6	9,9	14,8
	Bahia	7,7	4	-	-	2,9
	Ceará	54,1	3	6,1	15,7	19,7
	Maranhão	495,7	268,3	130,3	211,8	276,5
	Paraíba	-	0,2	1,2	2,1	0,9
	Pernambuco	14,2	1,4	3,3	1,4	5,1
	Piauí	90,8	59,7	79,6	87,7	79,5
Rio Grande do Norte	2,8	2,9	2,7	2,7	2,8	
Sergipe	64,4	37	28,5	51,8	45,4	

Fonte: CONAB (2013, 2016, 2019, 2022).

Com base na produção média das safras estudadas e nas demandas específicas de energia elétrica, térmica e total estimados para cada estado (conforme mostrado na Tabela 13), foi possível calcular a demanda total de energia para cada safra (Tabela 14), utilizando as Equações 25 e 26. Esse cálculo envolveu o uso de faixas de valores para estados que

apresentaram variações significativas na demanda de energia, com médias mínimas e máximas de demanda. Os estados da região Sul, responsáveis por 81% da produção média de arroz no Brasil, destacaram-se com as maiores demandas específicas de energia, o que reflete sua alta produção e a demanda substancial para a secagem do grão. Em contrapartida, os estados do Nordeste, como o Rio Grande do Norte, apresentaram as maiores demandas específicas, embora o estado tenha uma produção menor, com cerca de 2,8 mil toneladas por safra.

Tabela 13 - Demandas específicas de energia elétrica, térmica e total por estado no processo de SBT do arroz.

(continua)

Região	Estado	Demanda específica de energia (kWh.ton <sup>-1</sup> )		
		Elétrica	Térmica	Total
Sul	Paraná	37,66-42,2	52,55-76,49	90,21-118,68
	Rio Grande do Sul	37,15-42,87	46,43-89,92	83,58-132,79
	Santa Catarina	38,79-43,64	56,62-90,11	95,41-133,74
Sudeste	Espírito Santo	34,46-38,1	33,89	68,35-71,98
	Minas Gerais	37,96	37,63	75,59
	Rio de Janeiro	35,58-39,66	34,52-66,05	70,1-105,71
	São Paulo	37,26-41,02	51,6	88,86-92,61
Centro-Oeste	Distrito Federal	38,38	31,42	69,8
	Goiás	37,2	36,54	73,74
	Mato Grosso	37,22	53,89	91,1
	Mato Grosso do Sul	36,72-39,45	52,56	89,28-92,01
Norte	Acre	36,82-37,68	79,88	116,7-117,56
	Amapá	36,23	57,42	93,65
	Amazonas	36,55-37,01	66,36	102,91-103,36
	Pará	36,45	48,62-62,27	85,07-98,71
	Rondônia	36,97-37,58	64,13	101,1-101,7
	Roraima	35,89-36,82	50,35-60,4	86,24-97,21
	Tocantins	31,98-37,18	19,28-50,15	51,25-87,33
Nordeste	Alagoas	31,98-36,2	16,98-48,17	48,96-84,37
	Bahia	35,24	25,89-33,54	61,13-68,78
	Ceará	34,16	30,32	64,49
	Maranhão	33,8-36,07	44,56	78,36-80,63

Tabela 13 - Demandas específicas de energia elétrica, térmica e total por estado no processo de SBT do arroz.

(conclusão)

Região	Estado	Demanda específica de energia (kWh.ton <sup>-1</sup> )		
		Elétrica	Térmica	Total
	Paraíba	33,84	24,85	58,69
	Pernambuco	32,58-35,66	15,41-32,23	47,99-67,89
Nordeste	Piauí	33,78	14,95-35,48	48,73-69,27
	Rio Grande do Norte	33	23,35	56,35
	Sergipe	31,9-35,73	28,86	60,76-64,59

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Segue na Tabela 14, a demanda de energia elétrica, térmica e total por safra. A elevada demanda específica dos estados do Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC), fazem com que as demandas de energia elétrica médias desses referidos estados (RS e SC) variem entre 281,741 e 325,122GWh e entre 42,151 e 47,415GWh, respectivamente. As demandas de energia elétrica estimadas para os estados do RS e SC no processo de secagem a baixa temperatura representariam de 80,71 a 81,86% das demandas que seriam necessárias para o país, percentual similar ao da produção média da região sul do país (81%), haja visto que a demanda específica de energia elétrica não apresenta grandes variações entre os estados, conforme apresentado na Tabela 13.

Em relação à demanda de energia térmica, RS e SC se destacam novamente, com quantitativos que variam entre 352,060 e 681,895GWh e entre 61,522 e 97,915GWh, respectivamente. As demandas supracitadas, somadas, representariam de 82,33% a 87,08% da demanda de energia térmica requerida para o país, um percentual que é acima do determinado para a produção média da região sul do país (81%), uma vez que as demandas específicas de GLP para esses estados são superiores ao da maioria dos demais estados, em razão das condições climáticas do período simulado (Tabela 13).

As demandas totais de energia na SBT de arroz para as regiões do Brasil e os seus respectivos dados percentuais foram iguais a: (i) Sul: 750,925 a 1170,043GWh (83,10 a 86,63%); (ii) Sudeste: 5,484 a 5,711GWh (0,61 a 0,42%); (iii) Centro-Oeste: 51,571 a 51,773GWh (5,71 a 3,83%); (iv) Norte: 64,732 a 89,057GWh (7,16 a 6,59%); e (v) Nordeste: 30,928 a 34,010GWh (3,42 a 2,52%). A estimativa total no país variou de 903,640 a 1.350,621GWh.

Tabela 14 - Demandas de energia elétrica, térmica e total para os estados brasileiros por safra (secagem de arroz).

Região	Estado	Demanda de energia por safra (GWh)		
		Elétrica	Térmica	Total
Sul	Paraná	5,616-6,291	7,835-11,404	13,45-17,696
	Rio Grande do Sul	281,741-325,122	352,061-681,895	633,802-1007,017
	Santa Catarina	42,151-47,415	61,522-97,915	103,673-145,330
Sudeste	Espírito Santo	0,034-0,038	0,034	0,068-0,072
	Minas Gerais	0,739	0,733	1,472
	Rio de Janeiro	0,062-0,069	0,06-0,116	0,123-0,185
	São Paulo	1,602-1,764	2,219	3,821-3,982
Centro-Oeste	Distrito Federal	-	-	-
	Goiás	3,487	3,426	6,913
	Mato Grosso	15,539	22,501	38,04
	Mato Grosso do Sul	2,722-2,924	3,896	6,618-6,82
Norte	Acre	0,327-0,334	0,709	1,036-1,043
	Amapá	0,046	0,073	0,119
	Amazonas	0,195-0,197	0,353	0,548-0,550
	Pará	5,308	7,081-9,069	12,39-14,378
	Rondônia	4,818-4,897	8,358	13,175-13,255
	Roraima	2,977-3,054	4,176-5,010	7,153-8,064
	Tocantins	18,912-21,989	11,399-29,659	30,311-51,648
Nordeste	Alagoas	0,474-0,537	0,252-0,714	0,726-1,251
	Bahia	0,103	0,076-0,098	0,179-0,201
	Ceará	0,674	0,598	1,272
	Maranhão	9,347-9,975	12,322	21,668-22,297
	Paraíba	0,03	0,022	0,051
	Pernambuco	0,165-0,181	0,078-0,164	0,244-0,345
	Piauí	2,684	1,188-2,819	3,872-5,503
	Rio Grande do Norte	0,092	0,065	0,156
	Sergipe	1,449-1,623	1,311	2,76-2,934

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

### 3.5 Estimativa da compensação da demanda de energia pela biomassa residual

O reaproveitamento energético da casca do arroz, conforme estimado pelas Equações 27 a 32, demonstra que a energia elétrica total disponível para cada estado está diretamente relacionada à produção média de arroz de cada região por safra. O estado com maior produção, o Rio Grande do Sul (RS), possui uma energia disponível de 2028,487GWh, enquanto o estado de menor produção, a Paraíba (PB), apresenta apenas 0,234GWh (Tabela 15). Além disso, os estados com menores demandas específicas de energia - como Pernambuco (PE) e Piauí (PI), ambos na região Nordeste - apresentaram maiores índices de atendimento, atingindo 557% e 549%, respectivamente. Isso significa que esses estados conseguem gerar uma quantidade significativa de energia a partir do reaproveitamento da casca do arroz, muito superior às suas demandas energéticas totais. Por outro lado, estados da região Sul, como Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS), embora com grande produção, apresentam índices de reaproveitamento energético menores (cerca de 200% e 201%), refletindo em uma menor quantidade de energia excedente com a inserção dessa componente de geração no balanço.

Tabela 15 - Estimativa do reaproveitamento energético da casca de arroz por estado.

(continua)

Região	Estado	Energia (GWh)			Atendimento (%)
		Elétrica	Prod. Briquete	Disponível	
Sul	Paraná	41,898	2,011	39,887	225-297
	Rio Grande do Sul	2130,769	102,282	2028,487	201-320
	Santa Catarina	305,345	14,657	290,688	200-280
Sudeste	Espírito Santo	0,281	0,013	0,267	372-391
	Minas Gerais	5,473	0,263	5,210	354
	Rio de Janeiro	0,492	0,024	0,468	253-382
	São Paulo	12,082	0,580	11,502	289-301
Centro-Oeste	Distrito Federal	-	-	-	-
	Goiás	26,345	1,265	25,080	363
	Mato Grosso	117,327	5,632	111,695	294
	Mato Grosso do Sul	20,829	1,000	19,829	291-300
Norte	Acre	2,493	0,120	2,373	227-229
	Amapá	0,358	0,017	0,341	286
	Amazonas	1,496	0,072	1,424	259-260

Tabela 15 - Estimativa do reaproveitamento energético da casca de arroz por estado.

Região	Estado	Energia (GWh)			Atendimento
		Elétrica	Prod. Briquete	Disponível	(%)
Norte	Pará	40,918	1,964	38,953	271-314
	Rondônia	36,619	1,758	34,862	263-265
	Roraima	23,305	1,119	22,186	275-310
	Tocantins	166,151	7,976	158,176	306-522
Nordeste	Alagoas	4,165	0,200	3,966	317-546
	Bahia	0,822	0,039	0,782	389-438
	Ceará	5,542	0,266	5,276	415
	Maranhão	77,694	3,730	73,965	332-341
	Paraíba	0,246	0,012	0,234	456
	Pernambuco	1,426	0,068	1,358	394-557
	Piauí	22,320	1,071	21,249	386-549
	Rio Grande do Norte	0,780	0,037	0,742	475
Sergipe	12,763	0,613	12,150	414-440	

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

As estimativas de reaproveitamento energético da casca de arroz indicam que a energia elétrica gerada a partir desse reaproveitamento pode atender uma parte significativa das demandas energéticas dos estados brasileiros envolvidos no processo de secagem de arroz. Os resultados, conforme as estimativas regionais e os percentuais de atendimento à demanda, são os seguintes: (i) Sul: a energia disponível é 2359,063GWh, com um atendimento de demanda que varia entre 200% e 320%; (ii) Sudeste: a energia disponível é de 17,447GWh, com o atendimento à demanda variando entre 253% e 391%; (iii) Centro-Oeste: a energia disponível é de 156,605GWh, com um percentual de atendimento à demanda variando de 291% a 363%; (iv) Norte: a energia disponível é 258,315GWh, com o atendimento de demanda entre 227% e 522%; e (v) Nordeste: a energia disponível é 119,721GWh, com o atendimento à demanda variando de 317% a 557%. Ressalta-se que esses valores mostram o potencial de atendimento à demanda de energia, não apenas elétrica, mas também térmica, considerando que a totalidade da demanda elétrica pode ser suprida pelo reaproveitamento descentralizado da casca de arroz.

### 3.6 Balanço da emissão de CO<sub>2</sub> durante o processo de SBT

A partir do tempo de secagem, foi calculada a perda de matéria seca (PMS), conforme a Equação 33; e, com base na PMS, foi calculada uma das parcelas de CO<sub>2</sub> emitidas durante o processo de secagem (Equação 35). Foram utilizados dados mínimos e máximos de todas as variáveis supracitadas, de modo que os resultados foram obtidos em faixas de valores (Tabela 16). O tempo de secagem máximo dentre todos os estados foi registrado para o estado de Santa Catarina (SC), 1906 horas, e o tempo de secagem mínimo para o estado de Goiás (GO), 671 horas. A PMS máxima foi estimada para o estado do Piauí (PI), 0,237%, e a PMS mínima para o Paraná (PR), 0,068%. Ressalta-se que a PMS não depende somente do tempo de secagem, mas também da temperatura da massa de grãos, não havendo, portanto, coincidência entre estados com menores e maiores tempos de secagem e PMS.

O estado do Rio Grande do Sul (RS), por ser o maior produtor de arroz, figurou como o maior emissor de CO<sub>2</sub> em decorrência de PMS, quantidades que variaram entre 7235,8 e 23060,2 toneladas por safra. Conforme dados apresentados na Tabela 16, as emissões por região do país apresentaram as seguintes faixas de valores: (i) Sul: 8409,4 a 26232,7ton; (ii) Sudeste: 65,3 a 190,7ton; (iii) Centro-Oeste: 609,4 a 1625,2ton; (iv) Norte: 1224,8 e 2794,2ton; e (v) Nordeste: 487,3 e 1357,4ton.

Tabela 16 - Dados de tempo de secagem ( $t_s$ ), perda de matéria seca (PMS) e emissão de CO<sub>2</sub> em decorrência de PMS ( $m_{CO_2(1)}$ ) na secagem de arroz.

(continua)

Região	Estado	$t_s$ (h)		PMS (%)		$m_{CO_2(1)}$ (ton)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Sul	Paraná	700	1839	0,068	0,206	137,4	413,4
	Rio Grande do Sul	706	1853	0,071	0,224	7235,8	22786,7
	Santa Catarina	874	1906	0,071	0,208	1036,1	3032,6
Sudeste	Espírito Santo	710	1518	0,096	0,204	1,3	2,7
	Minas Gerais	773	1839	0,078	0,200	20,3	52,4
	Rio de Janeiro	679	1829	0,087	0,204	2,0	4,8
	São Paulo	758	1789	0,072	0,226	41,7	130,7
Centro-Oeste	Distrito Federal	799	1540	0,084	0,174	-	-
	Goiás	671	1556	0,072	0,200	90,6	252,2
	Mato Grosso	730	1578	0,079	0,208	444,0	1169,3

Tabela 16 - Dados de tempo de secagem ( $t_s$ ), perda de matéria seca (PMS) e emissão de CO<sub>2</sub> em decorrência de PMS ( $m_{CO_2(1)}$ ) na secagem de arroz.

(conclusão)

Região	Estado	$t_s$ (h)		PMS (%)		$m_{CO_2(1)}$ (ton)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Centro-Oeste	Mato Grosso do Sul	808	1657	0,075	0,205	74,8	203,7
	Acre	1200	1341	0,130	0,205	15,5	24,4
Norte	Amapá	1151	1223	0,163	0,207	2,8	3,5
	Amazonas	989	1288	0,099	0,210	7,1	15,1
	Pará	844	1345	0,112	0,214	219,6	419,1
	Rondônia	881	1379	0,091	0,200	158,8	349,9
	Roraima	907	1248	0,123	0,190	137,1	212,3
	Tocantins	694	1355	0,086	0,223	684,0	1769,9
	Nordeste	Alagoas	697	1325	0,080	0,216	15,9
Bahia		719	1607	0,086	0,223	3,4	8,8
Ceará		713	1382	0,095	0,216	25,2	57,2
Maranhão		694	1254	0,076	0,226	284,0	841,3
Paraíba		692	1342	0,088	0,204	1,0	2,4
Pernambuco		738	1365	0,084	0,208	5,7	14,2
Piauí		682	1302	0,086	0,237	91,4	252,9
Rio Grande do Norte		758	1259	0,097	0,236	3,6	8,8
Sergipe		761	1277	0,093	0,211	57,0	129,0

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

As emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes da queima de GLP ( $m_{CO_2(2)}$ ) foram calculadas a partir da Equação 36. Os estados do Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC) apresentaram as maiores estimativas, mínimas de 75730,4 e 13233,7 e máximas de 146679,4 e 21062,0 toneladas, respectivamente (Tabela 17). Isso ocorre porque esses dois estados possuem elevadas demandas específicas de energia térmica aliadas a grandes produções por safra.

A quantidade de CO<sub>2</sub> que deixaria de ser emitida ( $m_{CO_2(NE)}$ ) se a energia elétrica demandada no processo fosse proveniente da casca do arroz foi calculada pela Equação 37. Os estados que mais produzem grãos, obviamente, são também os estados que mais emitiriam e, conseqüentemente, ao utilizarem fontes alternativas, deixariam de emitir CO<sub>2</sub>. Como visto

anteriormente, as demandas específicas de energia elétrica não apresentam grandes variações entre os estados brasileiros, diferente do que ocorre para a energia térmica. Os estados do sul do país se destacam novamente pelos elevados créditos de CO<sub>2</sub> em virtude da descarbonização da matriz elétrica brasileira: (i) Sul: 102163,8 a 117455,7ton; (ii) Sudeste: 756,0 a 809,4ton; (iii) Centro-Oeste: 6742,9 a 6805,7ton; (iv) Norte: 10102,2 a 11107,9ton; e (v) Nordeste: 4656,2 e 4929,3ton (Tabela 17).

Por fim, foi realizado um balanço das emissões de CO<sub>2</sub> na SBT ( $B_{CO_2}$ ), de modo que  $m_{CO_2(1)}$  e  $m_{CO_2(2)}$  são contribuintes para as emissões e  $m_{CO_2(NE)}$  é o crédito de CO<sub>2</sub>, conforme definido pela Equação 39. Resultados negativos de  $B_{CO_2}$  implicam que houveram sequestros de CO<sub>2</sub> da atmosfera; caso contrário para os resultados positivos. Conforme Tabela 17, para a região sul do país, apenas o estado do RS apresentou como possibilidade um balanço negativo de CO<sub>2</sub>, para todos os demais estados desta mesma região, sob a ótica analisada, a SBT contribuiu para as emissões. Na região Sudeste, apenas o estado de São Paulo (SP) que não apresentou balanços negativos, assim como ocorreu para a região nordeste para o estado do Maranhão (MA). Os estados de Goiás (GO) e Tocantins (TO) foram os únicos das regiões centro-oeste e norte, respectivamente, que sequestrariam CO<sub>2</sub> da atmosfera. No geral, o balanço de CO<sub>2</sub> a nível Brasil variou de -5567,2 a 83715,3 toneladas.

Tabela 17 - Balanço das emissões de CO<sub>2</sub> por estado (secagem de arroz).

(continua)

Região	Estado	$m_{CO_2(2)}$ (ton)		$m_{CO_2(NE)}$ (ton)		$B_{CO_2}$ (ton)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Sul	Paraná	1685,3	2453,1	1741,1	1950,7	81,6	915,9
	Rio Grande do Sul	75730,4	146679,4	87353,8	100803,9	-4387,7	68662,3
	Santa Catarina	13233,7	21062,0	13068,9	14701,1	1200,9	9393,5
Sudeste	Espírito Santo	7,3	7,3	10,7	11,8	-2,1	-1,8
	Minas Gerais	157,6	157,6	229,2	229,2	-51,2	-19,2
	Rio de Janeiro	13,0	24,9	19,3	21,5	-4,3	8,2
	São Paulo	477,3	477,3	496,8	546,8	22,1	61,2
Centro-Oeste	Distrito Federal	-	-	-	-	-	-
	Goiás	736,9	736,9	1081,2	1081,2	-253,7	-92,1
	Mato Grosso	4840,1	4840,1	4817,9	4817,9	466,1	1191,4

Tabela 17 - Balanço das emissões de CO<sub>2</sub> por estado (secagem de arroz).

		(conclusão)					
Região	Estado	$m_{CO_2(z)}$ (ton)		$m_{CO_2(NE)}$ (ton)		$B_{CO_2}$ (ton)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Centro-Oeste	Mato Grosso do Sul	838,1	838,1	843,8	906,6	69,1	135,2
	Acre	152,5	152,5	101,3	103,7	66,6	73,2
Norte	Amapá	15,7	15,7	14,3	14,3	4,2	5,0
	Amazonas	76,0	76,0	60,3	61,1	22,8	30,0
	Pará	1523,3	1950,9	1645,9	1645,9	97,0	724,1
	Rondônia	1797,8	1797,8	1493,7	1518,3	462,8	629,4
	Roraima	898,4	1077,7	923,0	946,9	112,4	343,0
	Tocantins	2452,0	6379,7	5863,6	6817,7	-2727,6	1331,9
	Nordeste	Alagoas	54,1	153,6	147,0	166,4	-76,9
Bahia		16,3	21,1	32,0	32,0	-12,3	-2,1
Ceará		128,7	128,7	208,9	208,9	-55,1	-23,1
Maranhão		2650,5	2650,5	2898,0	3092,9	36,5	398,8
Paraíba		4,7	4,7	9,2	9,2	-3,5	-2,1
Pernambuco		16,8	35,2	51,3	56,1	-28,7	-6,7
Piauí		255,4	606,4	832,2	832,2	-485,4	27,0
Rio Grande do Norte		13,9	13,9	28,4	28,4	-10,8	-5,7
Sergipe		282,0	282,0	449,2	503,2	-110,2	-92,2

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

### 3.7 Discussão dos resultados obtidos para o Estudo de Caso 1

Com o intuito de discutir a demanda de energia na secagem a baixa temperatura sob a perspectiva econômica, foram consultadas as tarifas de energia elétrica por estado no site da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e os custos de GLP por estado em relatório da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Para os custos de GLP, foi utilizado como referência o mês de maio de 2024 (ANEEL, 2024; ANP, 2024). A tarifa de energia elétrica adotada foi a tarifa branca fora de ponta, uma vez que essa modalidade pode

ser aplicada aos consumidores da classe rural, no subgrupo B2, sendo que o sistema de secagem foi operado apenas no horário fora de ponta.

A partir das demandas específicas médias de energia elétrica em kWh.ton<sup>-1</sup> e de GLP em kg.ton<sup>-1</sup>, foram estimados os custos médios de energia elétrica, GLP e total por tonelada de arroz no processo de secagem. De acordo com os dados da Tabela 18, os estados da Paraíba (PB) e do Rio de Janeiro (RJ) apresentaram os menores e maiores custos médios de energia elétrica, com valores de 16,726 e 35,187R\$.ton<sup>-1</sup>, respectivamente. Em relação aos custos de GLP, os estados de Pernambuco (PE) e Acre (AC) apresentaram os menores e maiores custos médios, com valores de 12,337 e 55,760R\$.ton<sup>-1</sup>, respectivamente. Quanto aos custos médios totais, os estados da Paraíba (PB) e Acre (AC) se destacaram positivamente e negativamente, com a variação dos custos totais de 31,894 a 80,689R\$.ton<sup>-1</sup>, respectivamente.

Os custos médios de energia elétrica, GLP e total por região do país foram, respectivamente: (i) Sul: 20,206, 44,306 e 64,512R\$.ton<sup>-1</sup>; (ii) Sudeste: 25,469, 25,163 e 50,632R\$.ton<sup>-1</sup>; (iii) Centro-Oeste: 24,611, 27,915 e 52,526R\$.ton<sup>-1</sup>; (iv) Norte: 24,671, 42,144 e 66,815R\$.ton<sup>-1</sup>; e (v) Nordeste: 21,147, 17,451 e 38,598R\$.ton<sup>-1</sup>. O ranking do custo médio total da SBT por região, do menor para o maior, é: Nordeste, Sudeste, Centro-Oeste, Sul e Norte. Embora a região Sul seja a maior produtora de arroz do Brasil, ela possui o quarto maior custo médio de secagem do produto. Quando o impacto do custo é avaliado em um pacote de 5kg, comumente comercializado no Brasil, a variação do custo é de 0,217 a 0,549 reais em um produto cujo preço gira em torno de 20 a 35 reais, conforme pesquisas realizadas em sites de supermercados e plataformas de comparação de preços. Dessa forma, o custo com energia no processo de secagem pode representar entre 0,62% e 2,75% do custo final do produto quando chega ao consumidor.

Quanto ao balanço das emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de arroz, observou-se que o estado do Rio Grande do Sul (RS) apresentou a maior faixa de valores, com balanços tanto negativos quanto positivos. Isso indica que, em determinadas áreas do estado, o processo de secagem com reaproveitamento energético da casca de arroz pode sequestrar CO<sub>2</sub> da atmosfera, enquanto em outras áreas ocorre a emissão de CO<sub>2</sub>. Os dados para o RS variaram de -0,00058 a 0,00905 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de arroz com casca submetido à secagem. Isso significa que o processo de SBT pode retirar da atmosfera até 0,80 gramas de CO<sub>2</sub> por quilograma de arroz consumido, mas também pode emitir até 12,47 gramas para a mesma quantidade.

Os balanços específicos mínimos e máximos das emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de arroz com casca submetido à secagem, para cada região do país, foram os seguintes: na região Sul,

com destaque para o Rio Grande do Sul, as emissões variaram de  $-0,00058$  a  $0,00905\text{tonCO}_2.\text{ton}^{-1}$ ; no Sudeste, os balanços foram de  $-0,00263$  a  $0,00453\text{tonCO}_2.\text{ton}^{-1}$  (Minas Gerais e Rio de Janeiro); no Centro-Oeste, as emissões variaram de  $-0,00270$  a  $0,00285\text{tonCO}_2.\text{ton}^{-1}$  (Goiás e Mato Grosso); no Norte, os valores foram de  $-0,00461$  a  $0,00823\text{tonCO}_2.\text{ton}^{-1}$  (Tocantins e Acre); e no Nordeste, as emissões oscilaram entre  $-0,00611$  e  $0,00204\text{tonCO}_2.\text{ton}^{-1}$  (Piauí e Alagoas). Observou-se que as maiores emissões de  $\text{CO}_2$  ocorreram nas regiões Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste, Norte e Sul, em ordem crescente. Enquanto isso, os maiores sequestros de  $\text{CO}_2$  foram registrados nas regiões Nordeste, Norte, Centro-Oeste, Sudeste e Sul, também em ordem decrescente (máximo 8,43 gramas por quilograma de arroz consumido).

Estudos publicados na literatura especializada sobre análise energética em processos de secagem de grãos de arroz em secadores de fluxo cruzado, considerando teores de água iniciais variados, forneceram métricas relevantes de demanda de energia por quilograma de água evaporada. Billiris (2014) registrou demandas totais de energia variando entre 7,200 e  $10,070\text{MJ.kg}^{-1}$  para grãos com teor de água inicial entre 19,0% e 21,7%, e entre 9,220 e  $10,250\text{MJ.kg}^{-1}$  para condições iniciais entre 15,4% e 18,3%. Já Billiris e Siebenmorgen (2014) obtiveram valores de demanda de energia térmica entre 2,840 e  $5,310\text{MJ.kg}^{-1}$  para teores de água iniciais entre 16,6% e 21,7%, e entre 3,730 a  $5,840\text{MJ.kg}^{-1}$  para teores iniciais de 17,4% a 18,2%.

Jittanit, Saeteaw e Charoenchaisri (2010) utilizaram secadores de fluxo contínuo para secagem de arroz com diferentes teores de águas iniciais e finais desejados. Os resultados obtidos indicaram as seguintes demandas de energia elétrica, térmica e total por quilograma de água evaporada durante o processo, respectivamente: (i) secagem de 23,6% para 12,0%: 0,292; 3,213 e  $3,972\text{MJ.kg}^{-1}$ ; (ii) secagem de 21,0 a 10,4%: 0,304; 3,630 e  $4,421\text{MJ.kg}^{-1}$ ; e (iii) secagem de 21,4 para 13,6%: 0,291; 3,118 e  $3,874\text{MJ.kg}^{-1}$ .

No presente estudo, utilizou-se o processo de secagem em camada espessa a baixa temperatura, realizado em um silo-secador com fluxo de ar ascendente e produto estacionário apresentando teor de água inicial de 20%. As demandas específicas de energia elétrica, térmica e total, conforme dados apresentados na Tabela 13, variaram entre 1,427 e  $1,953\text{MJ.kg}^{-1}$ , 1,045 e  $4,032\text{MJ.kg}^{-1}$ , e 2,147 e  $5,984\text{MJ.kg}^{-1}$ , respectivamente. Esses valores consideram que, ao término do processo, cada tonelada de produto submetida à secagem teve 80,46kg de água removidos, alcançando um teor final de água de 13%. O custo médio da energia total demandada por quilograma de água evaporada foi estimado em  $0,654\text{R}\$.kg^{-1}$ .

Embora os métodos e condições de secagem adotados neste trabalho sejam distintos dos estudos comparados, os resultados obtidos indicaram que o processo de secagem a baixa temperatura de grão de arroz apresentou maior eficiência energética quando comparada a estratégia de secagem por secadores de fluxos cruzados realizada por Billiris (2014) e Billiris e Siebenmorgen (2014), e demandas competitivas com a estratégia de secagem por secadores de fluxo contínuo realizada por Jittanit, Saeteaw e Charoenchaisri (2010).

Tabela 18 - Dados tarifários, demanda específica, custo médio e balanço de emissões por tonelada de arroz com casca submetida à secagem.

(continua)

Região	Estado	Tarifa		Demanda Específica		Custo Médio (R\$.ton <sup>-1</sup> )			Balanço de Emissões	
		Energia Elétrica (R\$.kWh <sup>-1</sup> )	GLP (R\$.kg <sup>-1</sup> )	Energia Elétrica (kWh.ton <sup>-1</sup> )	GLP (kg.ton <sup>-1</sup> )	Energia Elétrica	GLP	Total	Min (tonCO <sub>2</sub> .ton <sup>-1</sup> )	Máx (tonCO <sub>2</sub> .ton <sup>-1</sup> )
Sul	Paraná	0,486	7,509	40,007	4,998	19,456	37,529	56,985	0,00055	0,00614
	Rio Grande do Sul	0,492	8,135	40,271	5,519	19,820	44,901	64,720	-0,00058	0,00905
	Santa Catarina	0,518	8,738	41,235	5,778	21,342	50,490	71,832	0,00111	0,00864
Sudeste	Espírito Santo	0,573	7,362	36,020	2,650	20,657	19,514	40,171	-0,00211	-0,00178
	Minas Gerais	0,610	7,698	37,961	2,943	23,146	22,660	45,805	-0,00263	-0,00098
	Rio de Janeiro	0,934	7,128	37,679	3,815	35,187	27,189	62,377	-0,00237	0,00453
	São Paulo	0,586	7,753	39,023	4,036	22,887	31,289	54,176	0,00051	0,00142
Centro-Oeste	Distrito Federal	0,665	7,335	38,377	2,458	25,525	18,027	43,552	-	-
	Goiás	0,574	7,915	37,196	2,858	21,347	22,623	43,970	-0,00270	-0,00098
	Mato Grosso	0,671	8,285	38,168	4,111	25,616	34,062	59,677	0,00112	0,00285
	Mato Grosso do Sul	0,697	8,766	37,215	4,215	25,957	36,948	62,905	0,00093	0,00183
Norte	Acre	0,670	8,925	37,190	6,247	24,928	55,760	80,689	0,00749	0,00823
	Amapá	0,766	8,722	36,765	5,190	28,166	45,270	73,436	0,00324	0,00383
	Amazonas	0,744	9,405	36,227	4,491	26,943	42,238	69,181	0,00430	0,00565
	Pará	0,766	8,252	36,447	4,442	27,922	36,653	64,575	0,00067	0,00497

Tabela 18 - Dados tarifários, demanda específica, custo médio e balanço de emissões por tonelada de arroz com casca submetida à secagem.  
(conclusão)

Região	Estado	Tarifa		Demanda Específica		Custo Médio (R\$.ton <sup>-1</sup> )			Balanço de Emissões	
		Energia Elétrica (R\$.kWh <sup>-1</sup> )	GLP (R\$.kg <sup>-1</sup> )	Energia Elétrica (kWh.ton <sup>-1</sup> )	GLP (kg.ton <sup>-1</sup> )	Energia Elétrica	GLP	Total	Min (tonCO <sub>2</sub> .ton <sup>-1</sup> )	Máx (tonCO <sub>2</sub> .ton <sup>-1</sup> )
Norte	Rondônia	0,578	9,202	37,226	5,016	21,526	46,153	67,679	0,00355	0,00483
	Roraima	0,560	9,833	36,325	4,296	20,355	42,242	62,597	0,00135	0,00413
	Tocantins	0,648	9,218	35,288	2,896	22,855	26,694	49,549	-0,00461	0,00225
Nordeste	Alagoas	0,708	7,215	33,844	2,269	23,962	16,367	40,330	-0,00520	0,00204
	Bahia	0,631	8,355	35,241	2,328	22,241	19,450	41,690	-0,00423	-0,00072
	Ceará	0,598	7,667	34,164	2,372	20,431	18,183	38,614	-0,00280	-0,00117
	Maranhão	0,579	7,877	35,449	3,485	20,522	27,452	47,974	0,00013	0,00144
	Paraíba	0,494	7,805	33,840	1,943	16,726	15,168	31,894	-0,00385	-0,00233
	Pernambuco	0,633	6,831	34,006	1,806	21,532	12,337	33,869	-0,00563	-0,00132
	Piauí	0,690	7,410	33,785	2,230	23,321	16,526	39,848	-0,00611	0,00034
	Rio Grande do Norte	0,622	7,975	33,003	1,826	20,534	14,562	35,096	-0,00387	-0,00202
Sergipe	0,625	7,536	33,693	2,257	21,053	17,012	38,065	-0,00243	-0,00203	

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

### 3.8 Conclusões sobre o Estudo de Caso 1

- As análises espaciais e estatísticas identificaram variações significativas nas demandas de energia elétrica e térmica durante a secagem a baixa temperatura (SBT) de arroz ao longo das safras simuladas.
- A região Sul, que responde por 81% da produção nacional de arroz, registrou as maiores demandas específicas de energia.
- A demanda energética total para a SBT variou entre 903,640 e 1350,594GWh, com a região Sul representando entre 83,10% e 86,63% desse total.
- As emissões de CO<sub>2</sub> oscilaram entre -5.567,2 e 83.715,3 toneladas, resultado do reaproveitamento da casca de arroz e das condições climáticas observadas durante o processo.
- O custo médio de energia representou de 0,62% a 2,75% do preço de varejo do arroz seco e limpo e o custo específico médio foi estimado em 0,654R\$.kg<sup>-1</sup> de água evaporada.
- A SBT possibilitou tanto o sequestro de até 8,43 gramas de CO<sub>2</sub> quanto a emissão de até 12,47 gramas de CO<sub>2</sub> por quilograma de arroz consumido, dependendo das condições de operação no país.
- A SBT demonstrou-se uma alternativa eficiente e sustentável, com demanda específica total de energia entre 2,147 e 5,984MJ.kg<sup>-1</sup> de água evaporada.
- A região Nordeste apresentou condições climáticas favoráveis que destacam o potencial de expansão da SBT no Brasil.
- As regiões mais indicadas para o método de secagem estudado, em ordem crescente de eficiência, são Norte, Sul, Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste.
- As modelagens e análises realizadas forneceram subsídios essenciais para o planejamento estratégico do processo de secagem do arroz em nível nacional.

## 4 ESTUDO DE CASO 2: SECAGEM A BAIXA TEMPERATURA DE SOJA

### 4.1 Análise de convergência do Modelo de Thompson

Assim como no caso das simulações para a secagem a baixa temperatura do arroz, o processo de modelagem e simulação da secagem de soja utilizou bancos de dados amplos, que incluíram estações meteorológicas para as diferentes safras analisadas. O quantitativo de estações disponíveis inicialmente foram: (i) safra 2012/13: 438 estações; (ii) safra 2015/16: 459 estações; (iii) safra 2018/19: 477 estações; e (iv) safra 2021/22: 565 estações. Contudo, a modelagem proposta resultou em um número reduzido de estações válidas devido à ausência de dados ou à inconsistência nas informações disponíveis para os anos e dias simulados. Essas inconsistências dificultaram a inclusão de todas as estações meteorológicas no modelo, reduzindo o conjunto final de estações consideradas na análise (Tabela 19).

Tabela 19 - Quantidade de estações com dados convergentes para a modelagem proposta (soja).

(continua)

Mês	Dia	Safra			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Janeiro	4	429	416	428	337
	11	429	406	423	336
	18	426	407	413	334
	25	420	407	414	338
Fevereiro	1	422	404	404	337
	8	425	410	413	339
	15	419	404	413	334
	22	426	405	426	336
Março	1	428	418	419	326
	8	425	408	422	338
	15	424	416	416	334
	22	424	417	432	344
	29	425	414	438	338
Abril	5	424	414	430	351
	12	422	408	427	346
	19	424	411	418	350

Tabela 19 - Quantidade de estações com dados convergentes para a modelagem proposta (soja).  
(conclusão)

Mês	Dia	Safr			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Abril	26	429	406	424	347
	3	427	408	420	350
Maio	10	413	406	423	357
	17	425	417	427	342
	24	425	413	433	350
	31	427	408	429	344
	7	432	411	425	351
Junho	14	408	418	430	359
	21	417	406	423	366
	28	419	410	422	363
	5	431	411	403	367
Julho	12	427	401	417	375
	19	433	385	423	371
	26	431	384	412	368
	2	417	388	407	359
Agosto	9	415	348	396	356
	16	416	381	401	359
	23	411	379	391	391
	30	399	377	370	377

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

A safra de 2021/22 possuía o maior número de estações meteorológicas inicialmente disponíveis para as simulações de secagem a baixa temperatura da soja. No entanto, foi a safra com menor percentual de convergência (62,05%), seguida por 2018/19 (87,52%), 2015/16 (87,91%) e 2012/13 (96,50%), conforme a Tabela 19. Apesar dessa limitação, é importante ressaltar que as informações utilizadas na simulação foram adequadamente distribuídas ao longo do território brasileiro. Essa distribuição espacial ampla garantiu a representatividade regional dos resultados, assegurando que as análises pudessem capturar as particularidades climáticas de cada região.

## 4.2 Estatística descritiva preliminar das demandas de energia

A análise preliminar das demandas de energia elétrica e térmica para a secagem a baixa temperatura (SBT) da soja, derivada dos dados das simulações realizadas, baseou-se em métricas estatísticas descritivas, replicando o método previamente adotado para o arroz. Nessa abordagem, a média foi utilizada como medida central para caracterizar a demanda média, enquanto o desvio padrão permitiu avaliar a variabilidade dos dados em relação a essa média. Essas estatísticas foram calculadas a partir dos valores pontuais obtidos nas simulações, abrangendo diferentes cenários de demanda ao longo das safras estudadas. O cálculo dessas métricas forneceu uma visão inicial importante sobre o comportamento da demanda energética, identificando tanto padrões gerais quanto eventuais *outliers* que pudessem indicar variações significativas devido a fatores climáticos.

Os dados apresentados na Tabela 20 demonstram que, no Brasil, a demanda média de energia elétrica para a secagem a baixa temperatura (SBT) de 2674,54 toneladas de soja variou entre 72759kWh em 1º de fevereiro de 2019 e 97888kWh em 17 de maio de 2022. Observou-se que a dispersão dos dados em relação à média foi mínima em 22 de março de 2019 (12,51%) e máxima em 23 de agosto de 2013 (29,79%). As condições climáticas nos dois dias extremos de demanda indicaram que, em 1º de fevereiro de 2019, a temperatura de bulbo seco foi de 27,13°C e a umidade relativa do ar de 66,84%, enquanto em 17 de maio de 2022 esses valores foram de 18,67°C e 75,49%, respectivamente. A pressão atmosférica do ar apresentou variações menores, passando de 966,40kPa para 963,14kPa. Essa análise confirma que temperaturas mais elevadas e umidades relativas mais baixas aceleram o processo de secagem, resultando em uma redução no tempo de operação dos ventiladores, que são os principais responsáveis pela demanda de energia elétrica.

Tabela 20 - Demanda média de energia elétrica (kWh) para SBT de 2674,54 toneladas de soja.

(continua)

Mês	Dia	Safr			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Janeiro	4	81671 ± 16360	84928 ± 16868	78957 ± 17952	91107 ± 14654
	11	84052 ± 18387	84539 ± 15904	81175 ± 16397	87459 ± 15598
	18	88301 ± 13618	88370 ± 14032	81652 ± 15657	78345 ± 14816
	25	88055 ± 15932	85711 ± 14247	80037 ± 16414	80404 ± 14794
Fevereiro	1	84638 ± 17530	82779 ± 15336	72759 ± 16504	86469 ± 14844

Tabela 20 - Demanda média de energia elétrica (kWh) para SBT de 2674,54 toneladas de soja.  
(continuação)

Mês	Dia	Safr			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Fevereiro	8	87422 ± 17119	80291 ± 14949	83705 ± 15613	86800 ± 15881
	15	82510 ± 16021	84514 ± 15086	89995 ± 14569	83311 ± 16821
	22	82394 ± 17281	84186 ± 16379	86093 ± 14481	84428 ± 14541
Março	1	86631 ± 17667	82212 ± 17999	88040 ± 14988	79704 ± 16555
	8	83670 ± 16535	85347 ± 15529	83118 ± 15608	81544 ± 16392
	15	87948 ± 16791	85415 ± 15239	87328 ± 15427	89839 ± 14138
	22	90697 ± 15103	82374 ± 16018	93435 ± 11691	84738 ± 14045
	29	89084 ± 15306	83598 ± 16751	86205 ± 13508	85741 ± 14812
Abril	5	87821 ± 17178	81105 ± 15315	92447 ± 12638	83443 ± 16871
	12	89073 ± 16302	83242 ± 16046	90602 ± 12280	88808 ± 14983
	19	93842 ± 13451	76103 ± 16150	86918 ± 14079	87846 ± 15603
	26	89947 ± 14565	82131 ± 19808	85995 ± 14378	82820 ± 16277
Maio	3	85843 ± 14930	86399 ± 18423	88377 ± 14920	81609 ± 18333
	10	87541 ± 16037	84602 ± 18942	87913 ± 15971	87286 ± 16992
	17	92584 ± 18945	91543 ± 20785	94688 ± 14024	97888 ± 19624
	24	92804 ± 16660	92955 ± 21455	91506 ± 18152	86094 ± 18379
	31	93226 ± 18937	88422 ± 18471	84785 ± 17259	93873 ± 21253
Junho	7	93212 ± 16997	91059 ± 21798	88932 ± 18645	86095 ± 18482
	14	92115 ± 16513	91360 ± 22539	83888 ± 18100	92941 ± 20856
	21	90026 ± 17453	90923 ± 22477	86273 ± 19734	90306 ± 17598
	28	90516 ± 17658	87704 ± 20935	84646 ± 18267	90269 ± 19284
Julho	5	89764 ± 18120	85097 ± 19519	90055 ± 23426	84070 ± 18263
	12	89860 ± 18466	80997 ± 19502	83608 ± 19691	83469 ± 21457
	19	88178 ± 21510	90077 ± 24396	86996 ± 20582	85125 ± 19998
	26	94771 ± 23559	79764 ± 19808	86836 ± 21036	81682 ± 19596
Agosto	2	77764 ± 18572	80398 ± 22194	80713 ± 23549	80456 ± 20865
	9	81173 ± 21314	83811 ± 22142	79016 ± 19544	86914 ± 21406
	16	87224 ± 23335	85015 ± 20958	80599 ± 20801	75390 ± 22401
	23	77516 ± 23094	86039 ± 23131	85095 ± 22644	82104 ± 21967

Tabela 20 - Demanda média de energia elétrica (kWh) para SBT de 2674,54 toneladas de soja.  
(conclusão)

Mês	Dia	Safr			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Agosto	30	79734 ± 19907	84018 ± 21044	74802 ± 19538	85600 ± 23021

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

A análise da Tabela 21 indica que a demanda média de energia térmica, proveniente da queima de GLP, para a secagem a baixa temperatura (SBT) de 2674,54 toneladas de soja no Brasil, variou entre 46069kWh em 18 de janeiro de 2022 e 155662kWh em 24 de maio de 2013. As variabilidades mínima e máxima em relação à média foram observadas em 17 de maio de 2019, com 71,56%, e em 2 de agosto de 2013, com 190,89%, respectivamente. Essas flutuações refletem as condições climáticas predominantes em cada período, como temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica, que afetam diretamente a quantidade de energia térmica necessária para o aquecimento do ar durante o processo de secagem. Períodos com temperaturas mais baixas e maior umidade relativa demandam um maior quantitativo de GLP.

Tabela 21 - Demanda média de energia térmica (kWh) para SBT de 2674,54 toneladas de soja.  
(continua)

Mês	Dia	Safr			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Janeiro	4	69956 ± 100439	91869 ± 104837	66660 ± 99716	129217 ± 105354
	11	103513 ± 120343	109208 ± 117621	75263 ± 101370	104074 ± 110406
	18	100804 ± 103608	126240 ± 113222	73211 ± 101776	46069 ± 85086
	25	114044 ± 106313	80577 ± 94793	56611 ± 89943	53250 ± 88649
Fevereiro	1	105682 ± 110105	89447 ± 110892	52219 ± 94574	99134 ± 111597
	8	122934 ± 115401	52084 ± 86968	78794 ± 103085	95930 ± 105958
	15	93402 ± 110858	86006 ± 104142	140071 ± 117980	79753 ± 103183
	22	86531 ± 106390	94059 ± 109305	90664 ± 107171	70390 ± 98107
Março	1	111690 ± 110277	81678 ± 104755	118758 ± 108725	66108 ± 101400
	8	91814 ± 108334	90904 ± 104775	88722 ± 109792	73557 ± 102381
	15	116764 ± 112153	91101 ± 105631	105662 ± 106376	121204 ± 114141
	22	132019 ± 105953	95037 ± 116577	133688 ± 103847	64736 ± 96056
	29	101094 ± 110009	88627 ± 107364	85441 ± 106301	80868 ± 103688

Tabela 21 - Demanda média de energia térmica (kWh) para SBT de 2674,54 toneladas de soja.  
(conclusão)

Mês	Dia	Safrá			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Abril	5	120960 ± 111334	74445 ± 101786	149763 ± 113956	95780 ± 119160
	12	129643 ± 110698	105217 ± 116048	120592 ± 110066	117814 ± 118346
	19	121904 ± 105300	52884 ± 95003	91579 ± 104943	76101 ± 102977
	26	102592 ± 109623	101744 ± 124973	100869 ± 117002	78890 ± 114909
Maio	3	86048 ± 107236	83396 ± 108242	124306 ± 111930	83549 ± 122625
	10	94815 ± 113184	118643 ± 128712	118883 ± 119667	96283 ± 119140
	17	127001 ± 121339	110254 ± 111030	150671 ± 107816	97651 ± 112508
	24	155662 ± 123267	110606 ± 115691	103914 ± 118656	71325 ± 104705
	31	128648 ± 118889	132610 ± 125762	105284 ± 127217	142536 ± 128167
Junho	7	140809 ± 119654	138099 ± 133193	106933 ± 118275	100776 ± 130442
	14	132505 ± 120820	86287 ± 105193	77520 ± 104063	114116 ± 125768
	21	140014 ± 134136	126709 ± 127812	90419 ± 110756	119507 ± 126791
	28	153500 ± 126964	105929 ± 124963	98833 ± 118643	100054 ± 122021
Julho	5	97174 ± 108236	76520 ± 106408	108901 ± 120088	76944 ± 114951
	12	108826 ± 122783	71759 ± 109384	64798 ± 102781	78573 ± 110522
	19	99687 ± 122386	90834 ± 119106	90260 ± 116199	91600 ± 121930
	26	107367 ± 115765	63482 ± 104085	106824 ± 124309	71053 ± 108502
Agosto	2	49252 ± 94016	70629 ± 109480	73016 ± 112856	69869 ± 109544
	9	75738 ± 110930	98692 ± 127936	68361 ± 110936	120950 ± 129849
	16	60370 ± 96767	79971 ± 108004	58752 ± 100215	59677 ± 103123
	23	56981 ± 100748	58011 ± 101873	94056 ± 125244	68603 ± 106580
	30	57964 ± 100153	120508 ± 134699	48884 ± 93169	57451 ± 97358

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Ao comparar as condições do ar ambiente entre 18 de janeiro de 2022 e 24 de maio de 2013, foram observadas alterações significativas que explicam as diferenças na demanda de energia térmica para a secagem a baixa temperatura (SBT), tais como a redução da temperatura de bulbo seco de 26,51°C para 21,64°C e o aumento da umidade relativa do ar de 70,33% para 81,21%. A pressão atmosférica variou de 962,12kPa para 968,70kPa, apresentando pequenas flutuações.

A análise reforça que as condições climáticas têm um impacto direto sobre a demanda de energia térmica no processo de secagem a baixa temperatura (SBT). A redução da temperatura do ar e o aumento da umidade relativa dificultam a remoção de umidade dos grãos, exigindo fornecimento de calor por meio da queima de GLP para atingir as condições necessárias para realização da secagem. Isso explica o aumento significativo na demanda de energia térmica em condições climáticas menos favoráveis, como observado na comparação entre as condições climáticas de 18 de janeiro de 2022 e 24 de maio de 2013.

Além disso, a demanda de energia térmica apresenta maior variabilidade em relação à demanda de energia elétrica devido à sua função no sistema de secagem. A variabilidade na demanda de energia térmica durante a secagem a baixa temperatura (SBT) de soja, assim como observado no processo para o arroz, está associada principalmente a dois fatores: (i) a sensibilidade às condições climáticas: a demanda de GLP ajusta-se continuamente em resposta à temperatura e umidade do ar, resultando em flutuações mais acentuadas; e (ii) mecanismos de controle *on-off*: esses sistemas aplicam calor de maneira intermitente, reagindo às condições momentâneas, o que amplifica as variações na demanda energética. Esses fatores tornam a energia térmica um componente mais dinâmico e sujeito a oscilações, diferentemente da demanda de energia elétrica, que tende a ser mais estável ao alimentar os ventiladores responsáveis pela circulação de ar no processo de secagem.

### **4.3 Extração de dados georreferenciados e análise estatística temporal**

As informações pontuais relativas às demandas de energia elétrica e térmica foram importadas, georreferenciadas e processadas no software QGIS, utilizando o método de interpolação ponderado pelo inverso da distância (IDW), conforme definido metodologicamente na seção 2.3 deste trabalho. Realizado o processamento, foram geradas camadas *raster* para todo o território brasileiro, compostas por 71297 pixels, mesma resolução das camadas geradas para o arroz. Em seguida, com base nos mapas gerados, foram extraídas estatísticas zonais para os 27 estados da federação, possibilitando uma análise detalhada das variações espaciais e regionais das demandas energéticas.

Foram desenvolvidos delineamentos completamente casualizados baseados nas médias das 140 simulações realizadas, conforme demonstrado na Tabela 22, que utiliza o estado do Mato Grosso como exemplo, sendo este o maior produtor de soja do Brasil. As análises envolveram dois tipos de tratamentos: (i) dias simulados: considerando 35 tratamentos (dias)

com 4 repetições cada; e (ii) safras simuladas: com 4 tratamentos (safras) e 35 repetições cada. Essas análises de variância permitiram avaliar diferenças significativas entre os tratamentos dentro de cada abordagem, fornecendo subsídios importantes para compreender a variabilidade locacional e temporal da demanda energética.

Tabela 22 - Demanda média de energia elétrica (kWh) no estado do Mato Grosso para a SBT de 2674,54 toneladas de soja.

(continua)

Mês	Dia	Saфра			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Janeiro	4	89558	91120	85199	93583
	11	93858	93045	89910	91182
	18	90721	93695	84868	80168
	25	94704	90961	88905	86277
Fevereiro	1	94491	88982	81410	92282
	8	95776	85066	90729	91175
	15	88515	92999	94037	87442
	22	89120	91120	91884	88045
Março	1	94085	88913	94080	83628
	8	92288	92368	89003	86676
	15	92138	92246	92181	92801
	22	95289	90058	94220	85479
	29	92941	89832	90065	87732
Abril	5	93528	91120	96213	80294
	12	94234	89954	93059	84304
	19	95423	75474	89636	83634
	26	93552	86654	85942	77548
Maio	3	86913	83868	93043	76897
	10	88501	85960	86827	80127
	17	93911	93069	94438	92774
	24	93640	95767	95524	77981
	31	97061	87564	83214	87029
Junho	7	94392	91943	86906	79982
	14	89274	84467	78651	86708

Tabela 22 - Demanda média de energia elétrica (kWh) no estado do Mato Grosso para a SBT de 2674,54 toneladas de soja.

(conclusão)

Mês	Dia	Safrá			
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22
Junho	21	88848	92292	82785	82058
	28	87441	84271	78224	82247
Julho	5	84532	80455	90013	74577
	12	80206	77443	77361	75287
	19	84815	79138	76716	76969
	26	80447	69920	86230	72580
Agosto	2	71767	69739	69874	73448
	9	72593	75366	68973	93583
	16	73555	73623	67445	69456
	23	68479	73118	69859	72124
	30	68084	94362	67111	75927

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Com base na análise de variância e nos valores críticos das estatísticas de teste F, que são 1,642 para a análise dos dias simulados e 8,547 para a análise das safras simuladas, é possível concluir que, ao nível de significância de 5%, existem ou não variações temporais significativas tanto dentro de uma safra quanto entre diferentes safras. Ao rejeitar a hipótese de nulidade, que sugeriria a ausência de diferenças significativas entre as médias das demandas de energia, quando as estatísticas de teste F excedem aos valores críticos, o estudo indica que as demandas de energia elétrica e térmica para a secagem a baixa temperatura são impactadas pelos fatores temporais.

A análise dos dados da Tabela 23 revela que, na Região Sul (compreendendo os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná), houve variações significativas nas demandas de energia elétrica e térmica ao longo dos dias simulados, indicando que as demandas foram impactadas por fatores climáticos e temporais específicos do período de simulação. Esse comportamento sugere que as condições ambientais (como temperatura e umidade do ar) no decorrer da colheita variaram significativamente a ponto de influenciar na demanda de energia de forma acentuada nos dias analisados. Por outro lado, ao comparar as demandas entre diferentes safras, não foram observadas variações significativas para nenhum dos estados da

Região Sul. Isso indica uma certa estabilidade nas demandas energéticas ao longo dos anos simulados, devido à consistência das condições climáticas nessa região durante os períodos analisados, que proporcionaram condições de secagem semelhantes entre as safras.

Os dados apresentados na Tabela 23 indicam que, na Região Sudeste, o estado de Minas Gerais se destacou por não apresentar variações significativas na demanda de energia elétrica ao longo dos dias simulados, sugerindo que as condições climáticas e operacionais nesse estado se mantiveram relativamente estáveis durante o período de simulação, que durou cerca de oito meses. Em relação à demanda de energia térmica, a única exceção foi o estado do Rio de Janeiro, que apresentou variações significativas ao longo dos dias simulados. Essas flutuações podem ser atribuídas a mudanças nas condições climáticas durante o período de simulação, que afetaram diretamente a quantidade de GLP necessária para a secagem. No que diz respeito à comparação entre as safras, assim como na Região Sul, não foram observadas variações significativas nas demandas de energia elétrica e térmica nos estados da Região Sudeste, o que indica uma estabilidade nas condições climáticas e operacionais ao longo dos anos analisados. Isso pode ser positivo para o planejamento energético na região, pois permite uma previsão mais confiável da demanda de energia durante a secagem ao longo de diferentes safras.

Na Região Centro-Oeste, os dados apresentados na Tabela 23 revelam os seguintes padrões: (i) Goiás e Mato Grosso: em ambos os estados, houveram diferenças significativas nas demandas de energia elétrica e térmica entre os dias simulados; (ii) Mato Grosso do Sul: neste estado, somente foram constatadas diferenças significativas na demanda de energia elétrica entre os dias simulados, indicando que a demanda por eletricidade variou consideravelmente durante a colheita do grão; e (iii) Distrito Federal: apresentou uma maior estabilidade na demanda energética, com nenhuma diferença significativa observada, nem entre os dias simulados, nem entre as safras simuladas. Esse padrão sugere que o DF possui condições climáticas mais estáveis, resultando em uma menor variação na demanda de energia ao longo do tempo, tanto de forma diária quanto anual.

Na Região Norte do Brasil, os dados apresentados na Tabela 23 indicam que todos os estados dessa região apresentaram variações na demanda de energia elétrica e/ou térmica, influenciadas tanto por fatores sazonais quanto pelas flutuações de uma safra para outra.

- Variações entre safras: o Acre foi o único estado que apresentou variações significativas tanto na demanda de energia elétrica quanto de energia térmica entre as safras analisadas e o Amazonas apresentou variações significativas apenas para a demanda de energia térmica no tratamento investigado.

- Variações entre dias: com exceção do Acre, todos os demais estados da Região Norte apresentaram diferenças significativas tanto na demanda de energia elétrica quanto de energia térmica ao longo dos dias simulados. Isso reforça a ideia de que as flutuações diárias nas condições climáticas (como temperatura e umidade relativa do ar) são determinantes no comportamento da demanda energética, uma vez que esses estados enfrentam variações climáticas mais dinâmicas entre os dias simulados.

Por fim, na região Nordeste do Brasil, as análises das demandas de energia elétrica e térmica apresentaram os seguintes padrões de variação entre os estados: (i) para os estados de Alagoas, Maranhão, Pernambuco, Piauí e Sergipe, foram observadas variações significativas tanto na demanda de energia elétrica quanto de energia térmica ao longo dos dias simulados, enquanto que o estado do Ceará apresentou variações significativas apenas na demanda de energia elétrica para o tratamento em questão; (ii) o Rio Grande do Norte também apresentou variações significativas apenas na demanda de energia elétrica entre as safras; e (iii) nos estados da Bahia e Paraíba, não foram encontradas variações significativas nas demandas de energia elétrica ou térmica para os tratamentos analisados, sugerindo uma maior estabilidade nos comportamentos de demanda energética ao longo do tempo.

Tabela 23 - Resultados da análise de variância para os dados de demanda de energia elétrica e térmica na SBT para os estados brasileiros (simulações para grãos de soja).

(continua)

Região	Estado	Demanda de energia			
		Elétrica		Térmica	
		Dias	Safras	Dias	Safras
Sul	Paraná	3,085*	2,220	2,491*	0,691
	Rio Grande do Sul	5,471*	0,317	4,457*	0,194
	Santa Catarina	5,334*	1,193	4,060*	0,580
Sudeste	Espírito Santo	2,197*	4,156	1,377	3,821
	Minas Gerais	0,933	3,170	1,036	3,933
	Rio de Janeiro	2,580*	2,762	2,476*	2,930
	São Paulo	1,735*	2,610	1,470	1,344
Centro-oeste	Distrito Federal	1,623	1,193	1,507	0,766
	Goiás	2,667*	1,827	2,109*	1,492
	Mato Grosso	5,620*	2,656	3,991*	4,862
	Mato Grosso do Sul	1,790*	3,517	1,589	2,205

Tabela 23 - Resultados da análise de variância para os dados de demanda de energia elétrica e térmica na SBT para os estados brasileiros (simulações para grãos de soja).

(conclusão)

Região	Estado	Demanda de energia			
		Elétrica		Térmica	
		Dias	Safras	Dias	Safras
Norte	Acre	0,802	20,489*	1,105	21,868*
	Amapá	3,417*	8,224	4,091*	0,213
	Amazonas	2,699*	5,753	3,977*	12,729*
	Pará	6,207*	2,712	7,568*	2,789
	Rondônia	3,297*	7,443	4,645*	8,143
	Roraima	2,771*	5,410	1,829*	7,054
	Tocantins	7,464*	1,616	4,113*	2,117
Nordeste	Alagoas	6,026*	0,760	4,091*	0,213
	Bahia	0,996	2,432	1,118	1,343
	Ceará	2,565*	2,894	1,540	0,743
	Maranhão	7,158*	2,391	5,106*	2,668
	Paraíba	1,565	4,215	1,240	1,043
	Pernambuco	2,576*	1,853	2,211*	1,665
	Piauí	4,527*	3,149	2,872*	0,862
	Rio Grande do Norte	0,936	9,560*	0,796	2,274
Sergipe	4,729*	0,349	2,737*	0,784	

(\*) indica que houveram variações significativas a nível de 5%.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

A análise apresentada na Figura 15 detalha as médias mensais de demanda de energia elétrica e térmica para os estados que demonstraram diferenças significativas ao longo das safras (tratamento: dias simulados). Na Figura 15a verifica-se padrões distintos entre os estados (locaionais) para a demanda de energia elétrica de janeiro a agosto:

- Comportamentos irregulares com tendência crescente: Os estados de Alagoas (AL), Paraná (PR), Rio de Janeiro (RJ), Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC) e Sergipe (SE) apresentaram variações irregulares, mas com uma tendência geral de aumento na demanda de eletricidade. Destacam-se os três estados do Sul do país (PR, RS e SC).

- Comportamentos irregulares com tendência decrescente: Os estados do Ceará (CE), Goiás (GO), Maranhão (MA), Mato Grosso (MT), Pará (PA), Piauí (PI), Rondônia (RO) e Tocantins (TO) apresentaram variações irregulares, mas com uma tendência geral de redução da demanda de energia elétrica de janeiro a agosto.
- Comportamentos oscilatórios: Nos estados de Amapá (AP), Amazonas (AM), Espírito Santo (SC), Mato Grosso do Sul (MS), Pernambuco (PE), Roraima (RO) e São Paulo (SP), as demandas de energia elétrica não seguiram uma tendência clara de aumento ou diminuição, mas apresentaram flutuações significativas, principalmente no inverno.

Na Figura 15b, os padrões de demanda de energia térmica devido à queima de GLP também apresentam comportamentos distintos. As principais observações incluem:

- Comportamento regular e decrescente: apenas o estado de Goiás (GO), situado na região Centro-Oeste do país, apresentou um comportamento regular e decrescente para a demanda de energia térmica entre janeiro e agosto.
- Comportamento irregular e crescente: Os estados de Alagoas (AL), Paraná (PR), Pernambuco (PE), Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC) e Sergipe (SE) registraram um padrão de crescimento irregular, refletindo em uma maior demanda por energia térmica.
- Comportamento irregular e decrescente: Nos estados do Amapá (AP), Amazonas (AM), Maranhão (MA), Mato Grosso (MT), Pará (PA), Piauí (PI) e Tocantins (TO) a demanda de GLP apresentou uma tendência de queda.
- Comportamento irregular e crescente: Os estados do Pará (PA), Maranhão (MA) e Tocantins (TO) registraram um padrão de crescimento irregular, refletindo uma maior demanda por energia térmica em resposta a condições climáticas ou à dinâmica específica das safras.
- Comportamento irregular sem tendência definida: Nos estados de Rio de Janeiro (RJ), Rondônia (RO) e Roraima (RR), as flutuações na demanda de energia térmica não seguiram uma tendência clara.

A análise de variância (ANOVA) aplicada à demanda de energia elétrica e térmica durante os meses que abrangem o período de colheita (janeiro a agosto) revelou que as variações mais significativas estão associadas a este agrupamento temporal, como foi anteriormente discutido para os gráficos das Figuras 15a e 15b. Essa abordagem foi essencial para capturar tendências sazonais mais amplas, representativas do comportamento energético ao longo das safras. Contudo, pequenas discrepâncias entre os resultados das análises baseadas em dias

simulados e aquelas baseadas em meses simulados foram identificadas, destacando a influência da escala temporal utilizada nos seguintes pontos:

- Demanda de energia elétrica: embora a análise por dias simulados não tenha identificado diferenças significativas para o Distrito Federal, ao agrupar os dados em meses simulados as variações foram evidenciadas, indicando que a análise mensal captou tendências sazonais mais amplas. Para o estado do Mato Grosso o comportamento foi o inverso, uma vez que as diferenças significativas constatadas na análise diária, não foram detectadas na análise mensal, sugerindo que as médias mensais diluíram a variabilidade detectada nos dados diários.
- Demanda de energia térmica: para o Distrito Federal o comportamento foi semelhante ao observado e relatado na demanda de energia elétrica. As variações significativas ficaram evidentes apenas na análise mensal, reforçando o impacto das condições sazonais mais amplas sobre a demanda térmica.

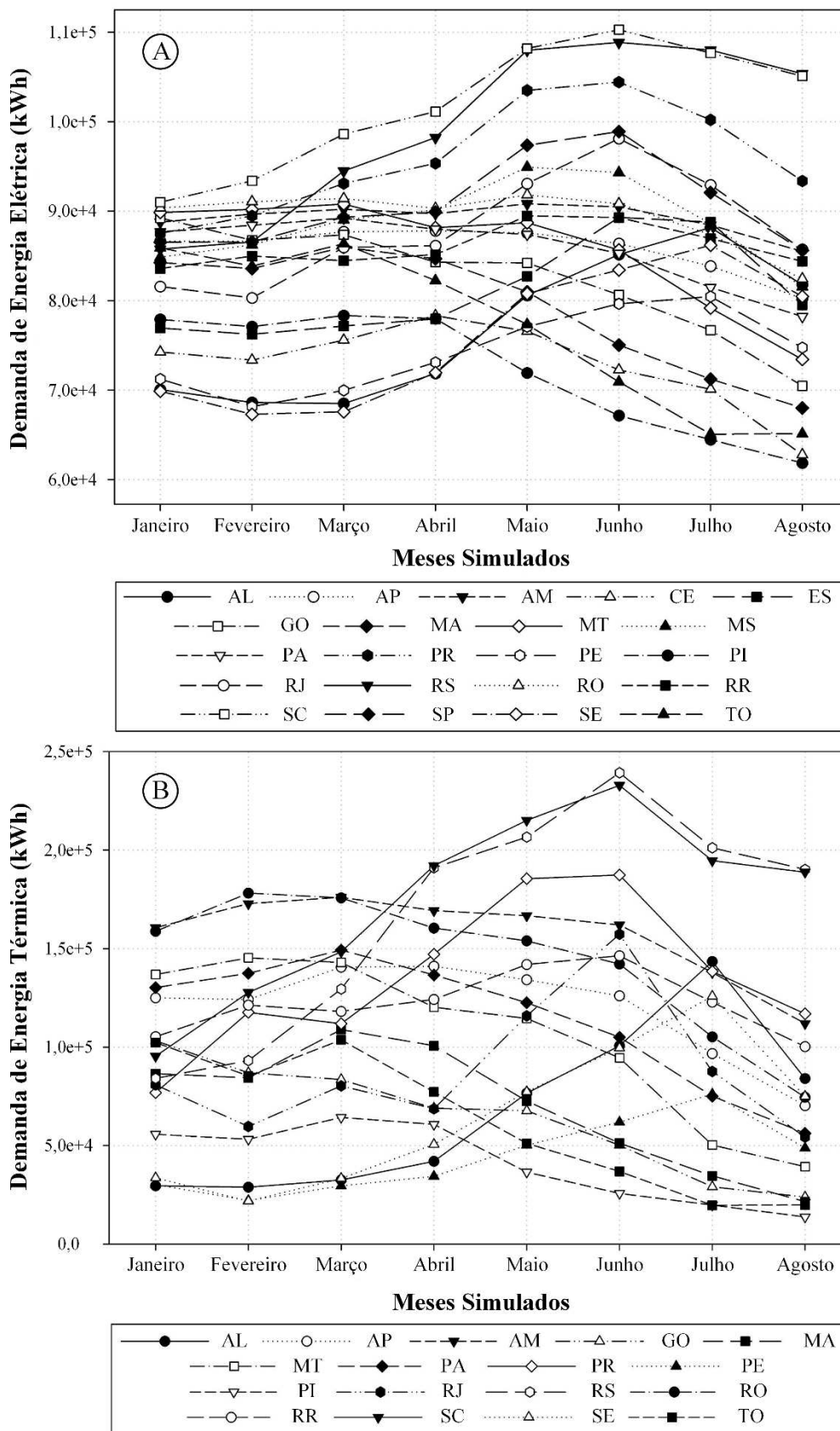


Figura 15 - Análise da variação significativa das demandas de energia elétrica (a) e térmica (b) entre os meses simulados (janeiro a agosto) para a secagem de soja.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 16a, observa-se uma análise entre as safras simuladas para os estados com variação significativa na demanda de energia elétrica. O estado do Acre apresentou um comportamento regular e praticamente constante nas safras de 2012/13, 2015/16 e 2018/19, havendo uma queda significativa na demanda de eletricidade apenas na safra de 2021/22. Enquanto isso, para o estado do Rio Grande do Norte constatou-se que a demanda de energia elétrica é crescente na medida em que as safras vão avançando, apresentando um maior salto da safra de 2018/19 para a de 2021/22, em razão de alterações das condições do ar ambiente e/ou quantidade de estações disponíveis para análise nas safras estudadas.

O comportamento da demanda de energia térmica decorrente da queima de GLP foi analisado entre as safras simuladas (Figura 16b), revelando padrões distintos para os estados: (i) Acre (AC) apresentou comportamento regular e crescente nas safras de 2012/13, 2015/16 e 2018/19, mas houve uma queda acentuada da safra de 2018/19 para a safra de 2021/22; e (ii) Amazonas (AM) demonstrou comportamento irregular com tendência decrescente, ou seja, com oscilações na demanda de GLP, porém redução da demanda de 2012/13 para 2021/22.

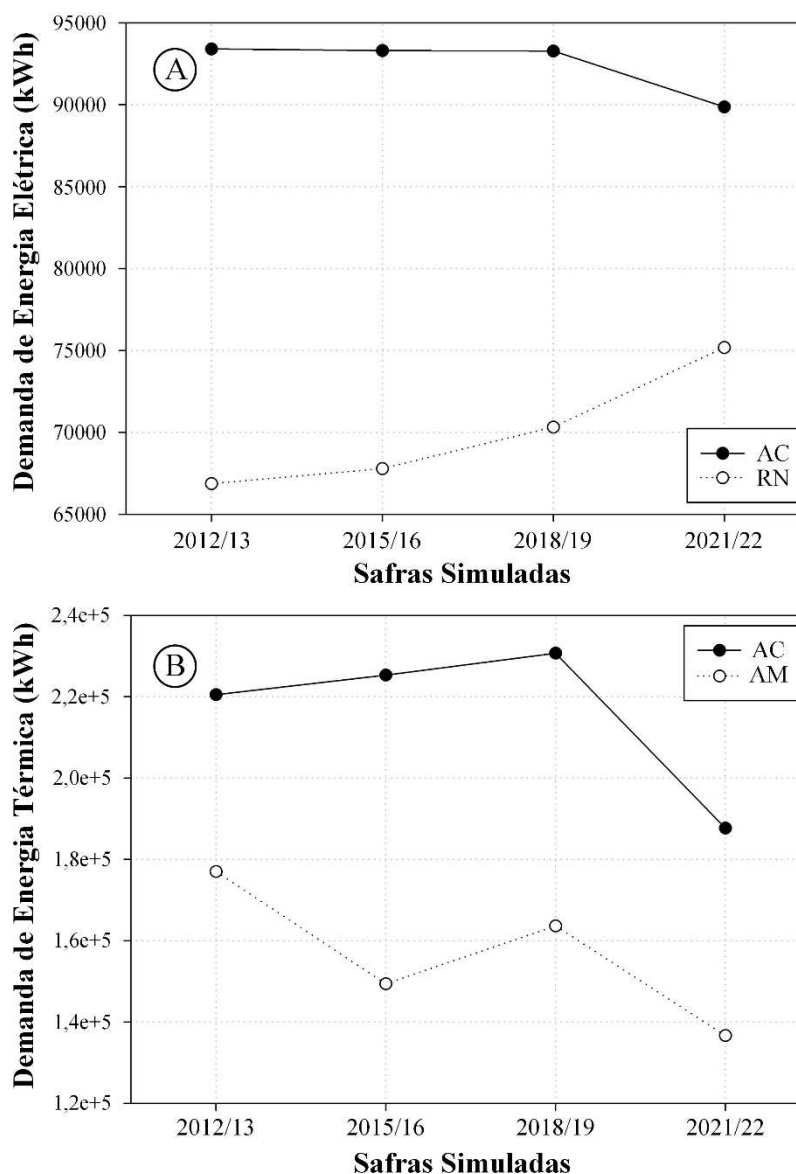


Figura 16 - Análise da variação significativa das demandas de energia elétrica (a) e térmica (b) entre as safras simuladas (2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22) para a secagem de soja.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

A partir das análises das demandas de energia elétrica e térmica, que demonstraram variações significativas no decorrer dos meses simulados, foram elaborados mapeamentos específicos para cada um dos meses de janeiro a agosto, compreendendo todo o período de colheita da soja. Esses mapeamentos refletem as médias mensais calculadas a partir das simulações realizadas, os quais foram apresentados nas Figuras 17 e 18 (safra de 2012/13), 19 e 20 (safra de 2015/16), 21 e 22 (safra de 2018/19) e 23 e 24 (safra de 2021/22), referentes à demanda de eletricidade, e nas Figuras 25 e 26 (safra de 2012/13), 27 e 28 (safra de 2015/16), 29 e 30 (safra de 2018/19) e 31 e 32 (safra de 2021/22), referentes à demanda de energia térmica.

Verifica-se que na safra de 2012/13, a demanda de energia elétrica no mês de janeiro (Figura 17a) é predominantemente baixo a médio na maior parte do Brasil. Regiões do Sul, Sudeste e Centro-Oeste mostram áreas com demanda mais elevada, sugerindo um maior tempo de secagem devido à elevada umidade do ar característica do verão, principalmente nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Goiás e Mato Grosso. Adotando os estados de Santa Catarina e Mato Grosso como exemplos, por se tratarem dos estados que apresentaram maiores densidades de demanda de energia elétrica distribuídas espacialmente para o mês em análise, constatou-se os seguintes dados médios de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar, respectivamente: (i) Santa Catarina: 21,18°C e 76,17% e (ii) Mato Grosso: 25,00°C e 85,44%. No que se refere as regiões Norte e Nordeste, verifica-se que ambas apresentaram uma demanda de média a baixa, principalmente os estados do Alagoas, Sergipe, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará (Nordeste). Para o Rio Grande do Norte, por exemplo, as médias de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar foram de 29,43°C e 56,71%, respectivamente.

Em fevereiro de 2013 (Figura 17b) o padrão geral continua, mas existe uma intensificação da demanda na região Sul e Centro-Oeste, com destaque para os estados do Paraná e Mato Grosso do Sul. Percebe-se também que há um deslocamento da porção geográfica de elevada demanda do estado de Minas Gerais para São Paulo na região sudeste. Foram registrados para o estado do Paraná os seguintes dados médios: (i) temperatura de bulbo seco de 22,53°C e (ii) umidade relativa do ar de 84,85%. As porções do mapa com demanda próxima ao mínimo permaneceram na região Nordeste do país. Em Pernambuco, por exemplo, foram registradas neste mês de fevereiro uma temperatura média de bulbo seco igual a 27,50°C e uma umidade relativa média do ar de 55,20%.

Em março de 2013 (Figura 17c) há uma expansão das áreas de alta a média demanda das regiões centro-sul em direção ao sudeste e nordeste, reduzindo as áreas de média a baixa demanda, principalmente nos estados do Rio Grande do Sul e Minas Gerais. Verifica-se que as porções de média a alta demanda preenchem todo o estado do Rio Grande do Sul neste mês, onde as condições do ar ambiente foram em média iguais a 19,68°C (temperatura de bulbo seco) e 80,77% (umidade relativa do ar). Enquanto isso, no estado de Minas Gerais, de fevereiro para março, houve um aumento da umidade relativa do ar de 69,83% para 74,47% e uma redução da temperatura de bulbo seco de 24,43°C para 23,27°C.

No mês de abril de 2013 (Figura 17d) foi constatada uma intensificação da demanda de energia elétrica em todo o Brasil. Na região Nordeste houve uma migração de porções de baixa

para média demanda (redução da intensidade da cor marrom e proliferação da cor bege no mapeamento apresentado). No estado do Ceará, por exemplo, de março para abril, as condições do ar ambiente variaram em média de 63,55% para 72,85% (umidade relativa) e de 28,42°C para 27,52°C (temperatura de bulbo seco). O mês de abril marca o fim do verão e o início do outono no Brasil.

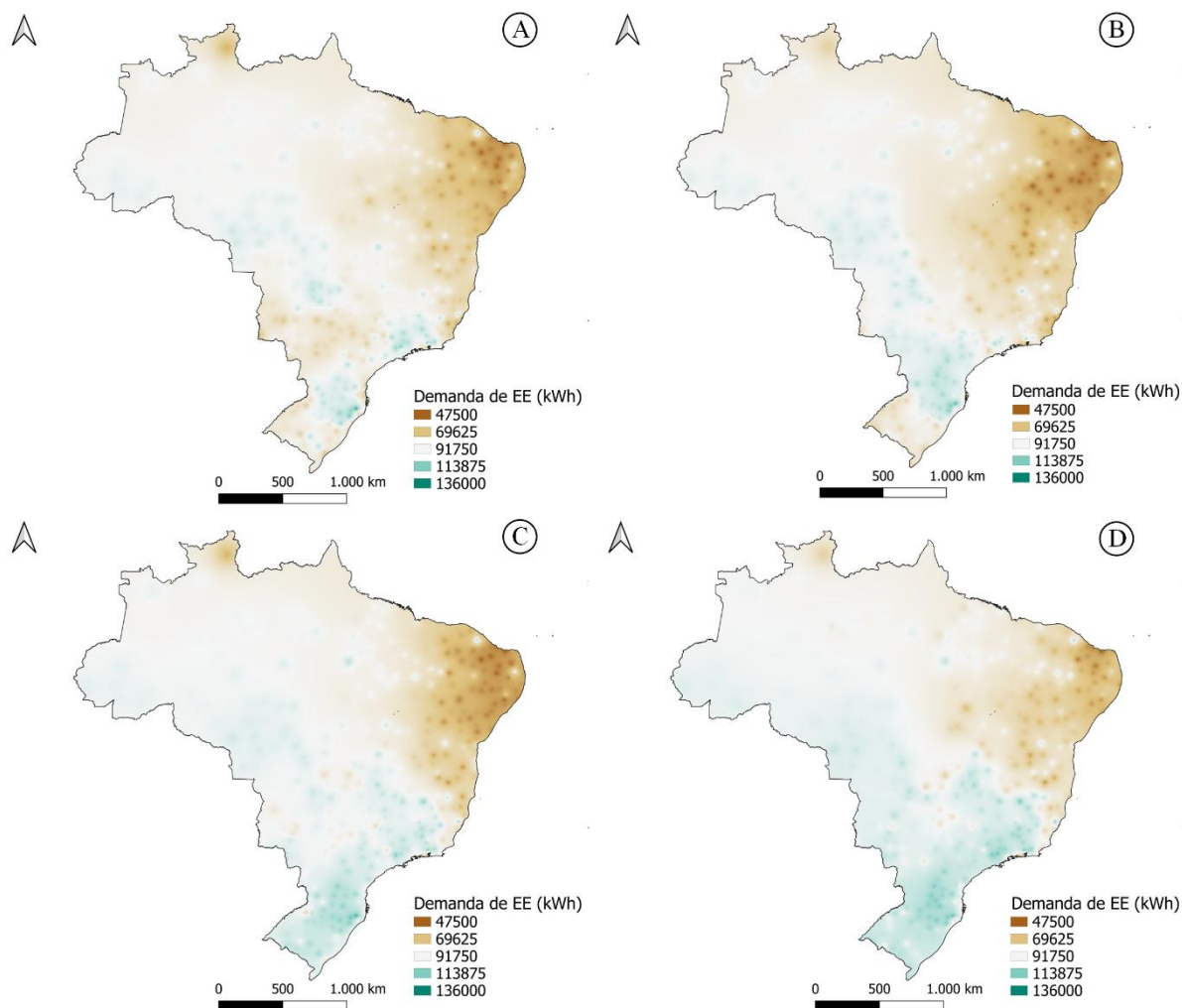


Figura 17 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2012/13.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Em maio de 2013 (Figura 18e) foi constatada uma migração das áreas de baixa demanda para o interior da região Nordeste (Piauí e norte da Bahia) e para a região Centro-Oeste (Goiás). Percebe-se também uma intensificação da demanda na região Sul (escurecimento da tonalidade da cor verde nesta região). As condições do ar ambiente para os estados do Piauí, Goiás e Rio Grande do Sul foram iguais a: (i) temperatura de bulbo seco: 27,96°C; 22,01°C e 13,31°C; e (ii) umidade relativa: 63,44%; 70,19% e 79,38%, respectivamente.

No mês de junho de 2013 (Figura 18f) observa-se o mesmo padrão do mês anterior (maio), entretanto com uma maior intensidade das áreas que já possuíam demanda elevada, haja visto que o mês de junho marca o fim do outono e início do inverno no Brasil (baixas temperaturas. No estado de Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina as condições do ar ambiente foram iguais a 90,14%; 90,83% e 91,07% (umidade relativa) e 15,74°C; 12,43°C e 13,4°C (temperatura de bulbo seco), respectivamente.

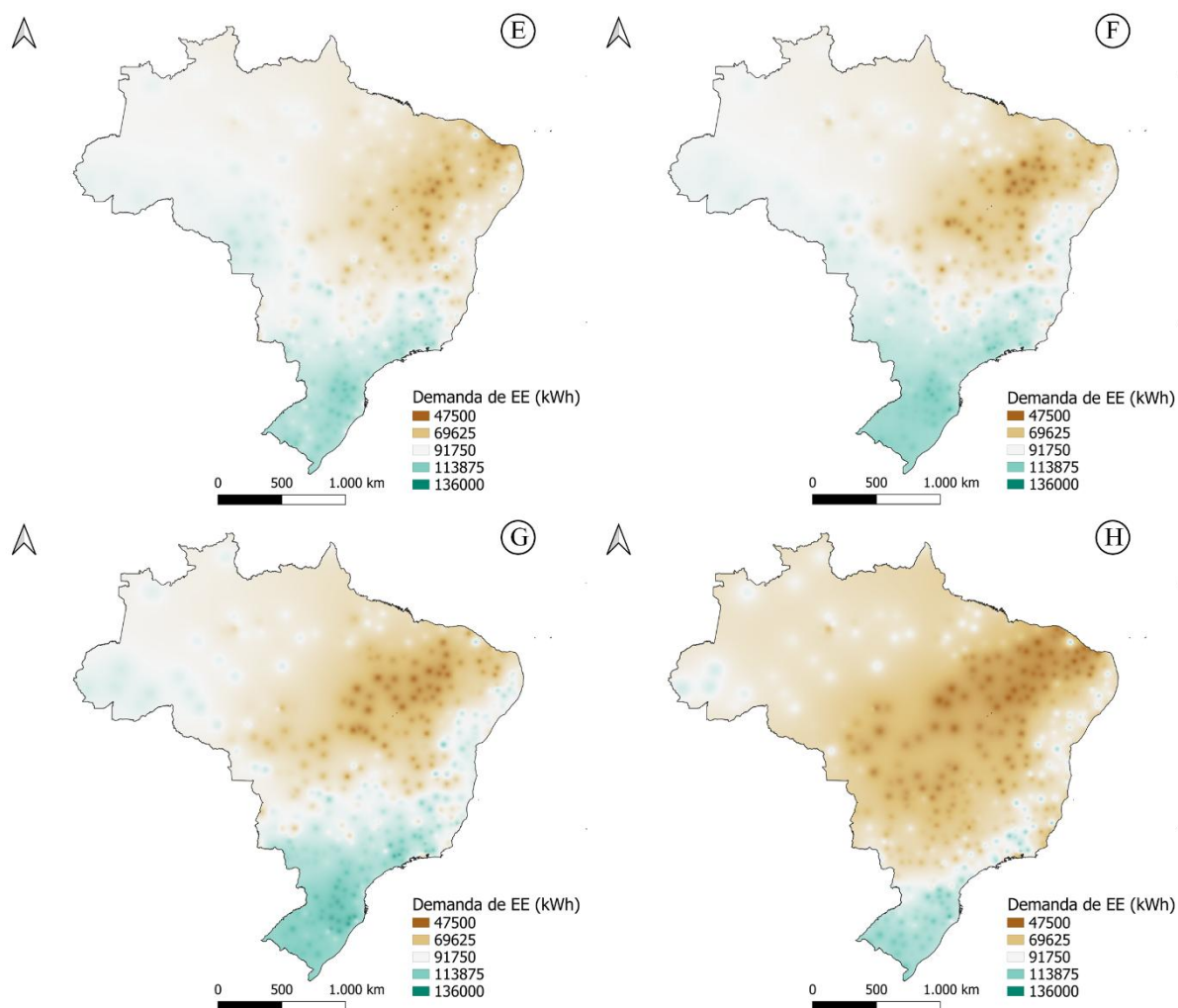


Figura 18 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2012/13.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Em julho de 2013 (Figura 18g) percebe-se a continuação do avanço das áreas de menor demanda em direção as regiões Centro-Oeste (Mato Grosso) e Norte (Piauí e Pará) e também em direção ao estado do Maranhão, que pertence à região Nordeste. Essa expansão havia sido iniciada nos meses de maio e junho. A intensificação da demanda na região Sul do país também continua (picos no estado do Rio Grande do Sul, por exemplo). A temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar no mês de julho para os estados supracitados são: (i) Mato Grosso:

22,00°C e 65,77%; (ii) Piauí: 27,25°C e 52,82%; (iii) Pará: 26,44°C e 74,99%; (iv) Maranhão: 27,10°C e 64,84%; e (v) Rio Grande do Sul: 11,96°C e 83,90%.

No mês de agosto de 2013 (Figura 18h) foi constatada uma grande expansão das áreas de menor demanda de energia elétrica em direção ao Sul do Brasil. Os estados que ainda permanecem com elevada demanda, mas com intensidade inferior ao mês anterior (julho), são Rio Grande do Sul e Santa Catarina. As condições do ar ambiente sofreram as seguintes variações de julho para agosto nos estados supracitados (i) Rio Grande do Sul: 83,90 para 80,13% e 11,96 para 11,97°C; e (ii) Santa Catarina: 86,27 para 79,23% e 12,41 para 14,69°C.

Os resultados da análise de variância apresentados na Tabela 23 indicaram que as demandas médias de energia elétrica e térmica não sofreram variações significativas entre as safras para a maioria dos estados da federação, indicando que a projeção da demanda de energia elétrica entre uma safra e outra poderia ser bem representada pela média (diferenças significativas só haviam sido constatadas para o Acre, Amazonas e Rio Grande do Norte). Entretanto, quando os dados são distribuídos espacialmente percebe-se algumas divergências entre a análise realizada e os mapeamentos devido a alterações de variabilidade entre as safras simuladas, haja visto que a métrica que melhor representa a variabilidade é o desvio padrão. Tal divergência foi mais acentuada nas simulações realizadas para a soja quando comparadas as simulações realizadas para o arroz.

Em janeiro de 2016 (Figura 19a), verificou-se que as porções do mapa com demanda de eletricidade em níveis médio-alto estavam concentrados, principalmente nos estados de Minas Gerais (região Sudeste), Goiás e Mato Grosso (região Centro-Oeste), Paraná e Santa Catarina (região Sul). A região Nordeste do Brasil e o estado do Rio Grande do Sul apresentaram demanda em níveis médio-baixo. As condições médias do ar ambiente no Brasil e nos estados do Mato Grosso e Rio Grande do Sul foram iguais a 25,53°C; 25,52°C e 25,63°C (temperatura de bulbo seco); e 76,53%; 86,11% e 68,11% (umidade relativa do ar).

No mês de fevereiro de 2016 (Figura 19b) foi constatada uma concentração das porções com alta demanda de energia elétrica na região Sul do país, principalmente no estado de Santa Catarina, e alguns picos no estado do Mato Grosso, próximo à fronteira com Rondônia. Percebe-se que há uma delimitação da demanda média a baixa para a região Nordeste. Em Santa Catarina foram registrados dados médios de temperatura e umidade relativa do ar iguais a 22,91°C e 84,15%, respectivamente. Para o mês de março (Figura 19c) foi constatada uma dinâmica semelhante.

Em abril de 2016 (Figura 19d) verificou-se uma expansão das áreas que demandavam alta demanda de energia elétrica para o estado do Rio Grande do Sul, quando comparado ao mês de março. Isso pode ser confirmado pelas condições do ar ambiente. A temperatura de bulbo seco reduziu de 21,02°C para 20,54°C e a umidade relativa do ar aumentou de 77,89% para 85,93% (dados médios). A demanda média (em torno de 91.750kWh) ficou disperso pelas regiões Centro-Oeste e Norte e a demanda média a baixa foi constatada no Sudeste e Nordeste.

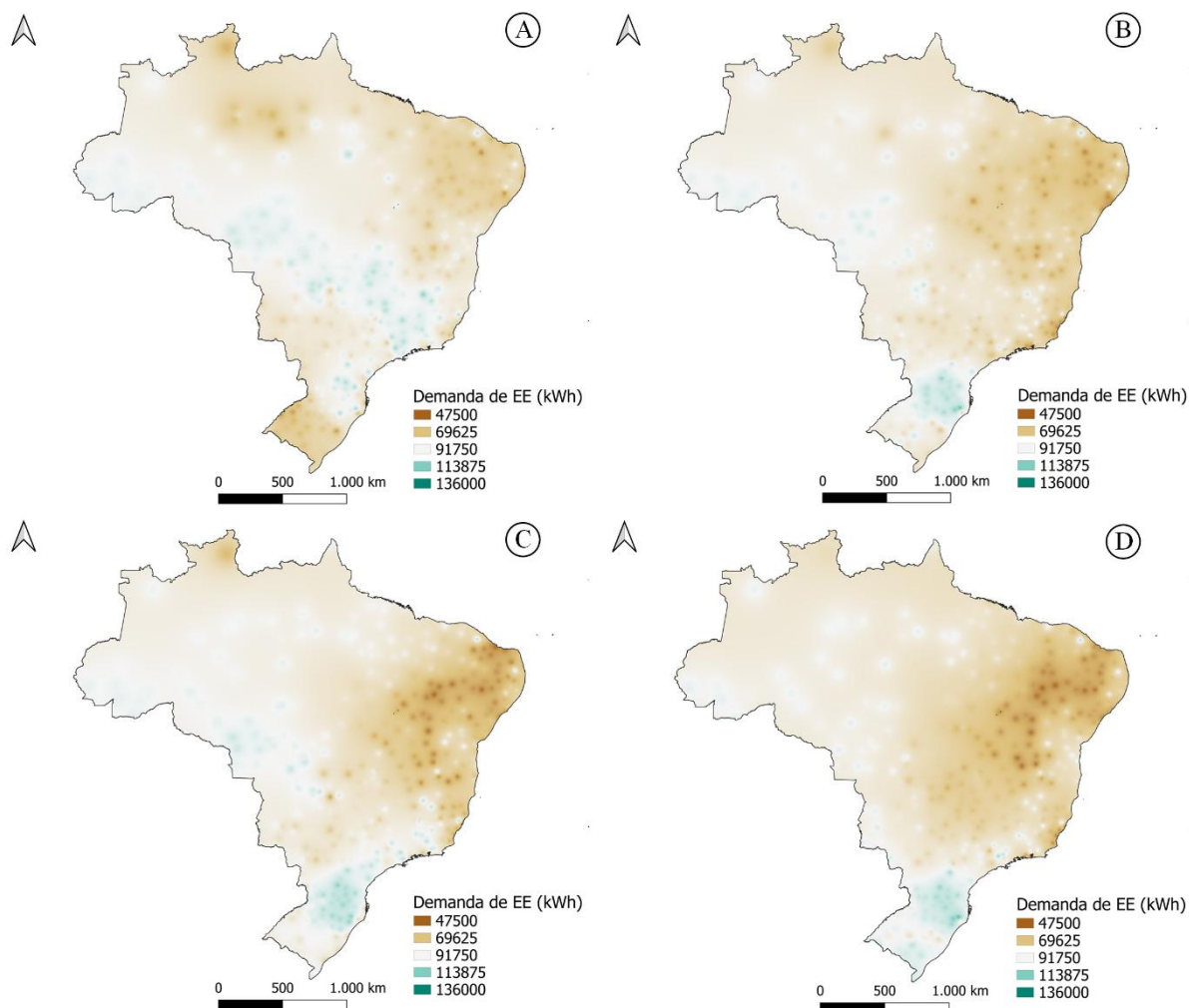


Figura 19 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2015/16.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

No mês de maio de 2016 (Figura 20e) verificou-se uma ampla expansão das áreas de alta demanda de energia elétrica partindo da região Sul em direção às regiões Sudeste e Centro-Oeste. As condições do ar ambiente nos estados de São Paulo (SP) e Mato Grosso do Sul (MS) entre os meses de abril e maio variaram de: (i) temperatura de bulbo seco: 24,01°C para 17,13°C (SP) e 24,60°C para 17,58°C (MS); e (ii) umidade relativa: 70,31% para 83,53% (SP) e 75,85% e 81,88% (MS). Para o mês de junho de 2016 (Figura 20f) foi observada dinâmica semelhante

à do mês de maio, no entanto com intensificação da demanda em praticamente todo o Brasil, principalmente no litoral do Nordeste.

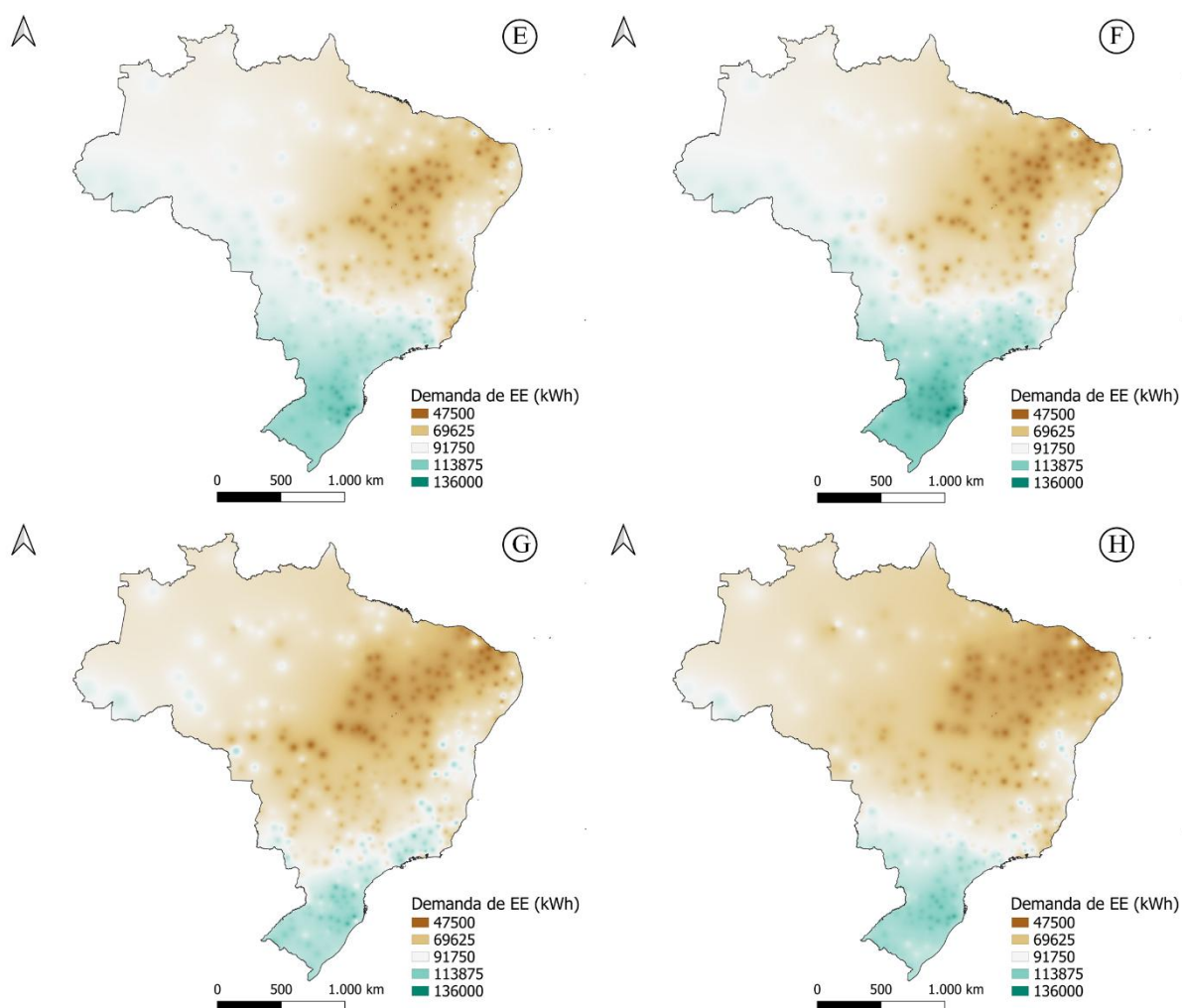


Figura 20 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2015/16.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Em julho de 2016 (Figura 20g) constatou-se o avanço das áreas de baixa demanda em direção as regiões Sul (Paraná) e Centro-Oeste (Mato Grosso e Mato Grosso do Sul) do país. Dessa forma, ocorreu uma redução das áreas indicadas como de alta demanda, que ficaram restritas a região Sul e ao litoral do Sudeste. As condições climáticas no estado do Mato Grosso variaram de 79,93% para 68,51% (umidade relativa) e de 15,24°C para 19,16°C (temperatura de bulbo seco) entre junho e julho. No estado do Mato Grosso do Sul (MT) o padrão de variação foi similar ao observado para o Mato Grosso, com a redução da umidade relativa de 76,87% para 61,98% e o aumento da temperatura de bulbo seco de 21,34°C para 22,83°C. No entanto, tal dinâmica se inverteu em agosto de 2016 (Figura 20h), com o retorno da expansão de áreas

com alta demanda de energia elétrica da região Sul em direção aos estados do Sudeste (São Paulo) e Centro-Oeste (MT).

Para a safra de 2018/19 a dinâmica de demanda de energia elétrica de janeiro a agosto é similar às observadas para as safras de 2012/13 e 2015/16, com divergências na variabilidade dos dados para alguns estados e meses simulados. Em janeiro de 2019 (Figura 21a), áreas definidas como de média demanda são predominantes em todo o país, seguida das áreas de baixa demanda na região Nordeste e de densidade de picos no Sul. No mês de fevereiro, tais picos de demanda de eletricidade se concentraram nos estados de Santa Catarina e Mato Grosso, conforme indicado na Figura 21b.

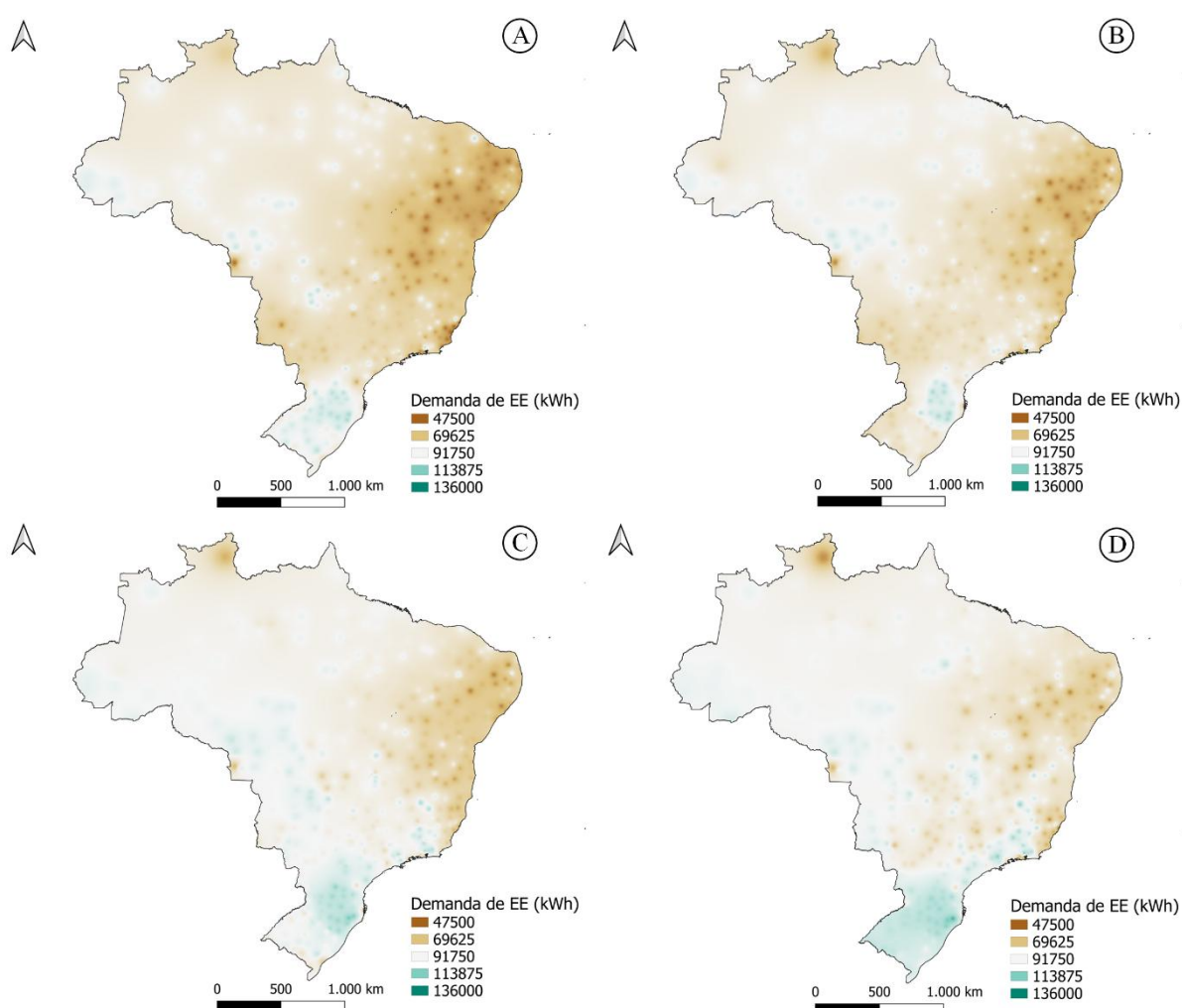


Figura 21 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2018/19.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Nos meses de março e abril de 2019 (Figura 21c e 21d) ocorreram expansões das áreas indicadas como de alta demanda de energia elétrica nos estados na região Sul país, conforme ilustrados nos mapas pelos tons de cor verde. As condições do ar ambiente para o estado do Rio

Grande do Sul variaram de 79,31% para 88,63% (umidade relativa) e de 21,11°C para 18,98°C (temperatura de bulbo seco) entre os dois meses analisados.

Em maio de 2019 (Figura 22e) verificou-se uma expansão das áreas de alta demanda de energia elétrica da região Sul do país em direção as regiões Sudeste e Centro-Oeste, com destaque para os estados de São Paulo (SP) e Mato Grosso do Sul (MS). Os registros médios de temperatura de bulbo seco e umidade relativa foram iguais a 19,81°C e 82,43% em SP e a 20,75°C e 84,23% em MS para este mês. Entretanto, em junho de 2019 (Figura 22f) ocorreu o oposto, com a expansão das áreas de baixa demanda do Nordeste em direção a região Central.

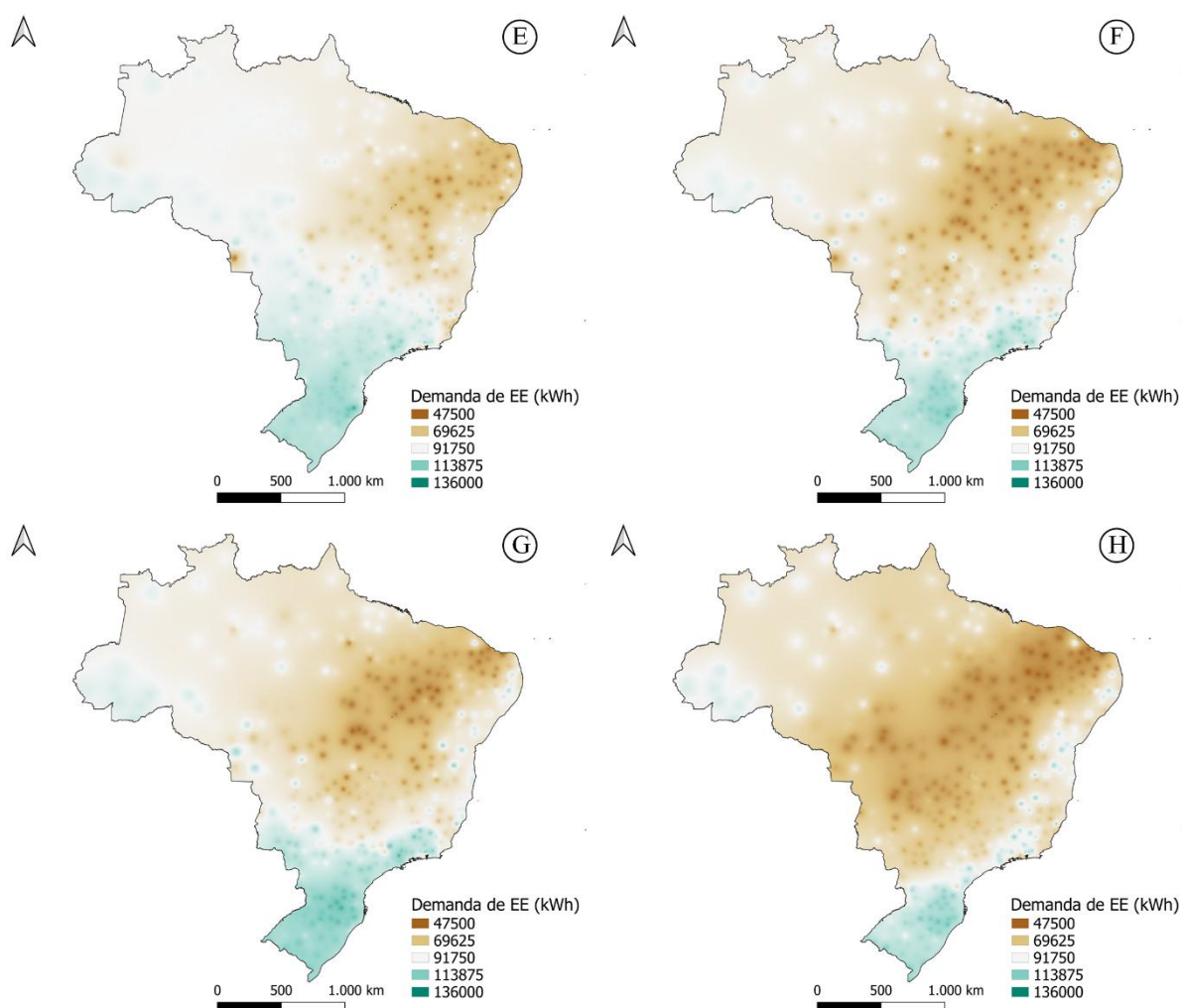


Figura 22 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2018/19.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

No mês de julho de 2019 (Figura 22g), foi constatada a expansão das áreas de alta temperatura conforme verificado para o mês de maio, mas com a intensificação da demanda (escurecimento dos tons de verde no mapa). Contudo, no mês de agosto (Figura 22h) observou-se o contrário, com o avanço das áreas de menor demanda em direção as regiões Centro-Oeste,

Sudeste e Sul. O estado do Acre tem se destacado na região Norte por apresentar condições do ar ambiente que implicam em uma demanda de energia elétrica de média a alta.

No mês de janeiro de 2022 (Figura 23a) foi constatada uma predominância das áreas com demandas médias de energia elétrica, havendo picos para os estados do Paraná (Sul), Minas Gerais (Sudeste), Goiás (Centro-Oeste); Piauí e Pará (Norte). Em fevereiro (Figura 23b) foram observados o surgimento de áreas de alta demanda principalmente nos estados de Minas Gerais e Goiás, em virtude dos avanços dos picos contatados no mês anterior. Tanto no mês de janeiro quanto no mês de fevereiro foram observadas áreas de baixa demanda de eletricidade na região nordeste (Alagoas, Sergipe, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará).

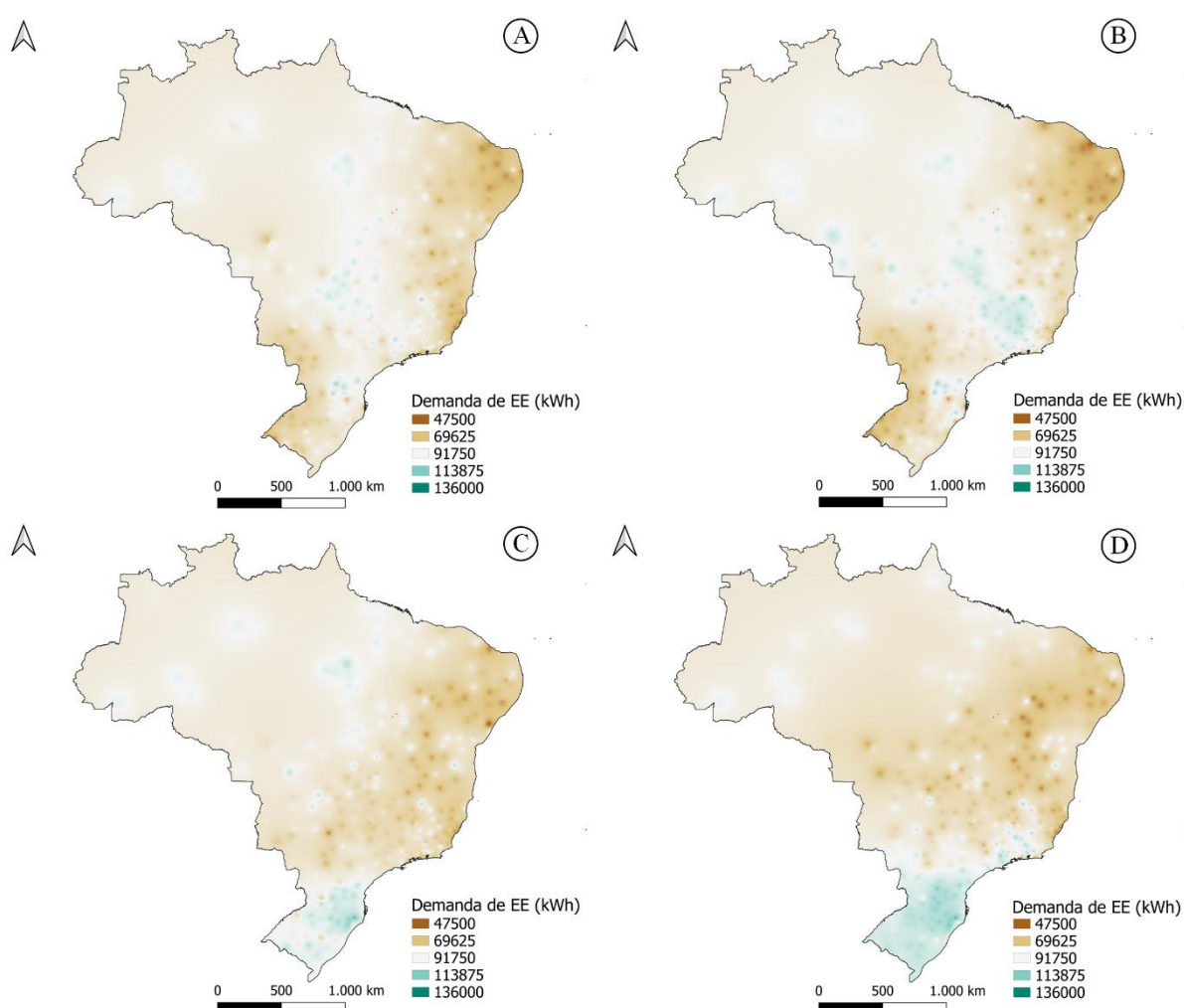


Figura 23 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2021/22.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Em março de 2022 (Figura 23c) ocorreu um deslocamento das áreas de alta demanda de energia elétrica para o Sul do Brasil, que em abril (Figura 23d) se expandiu pela região. As condições do ar ambiente nos estados do Paraná, Santa Catarina e Paraná apresentaram

variações entre 18,25°C e 20,02°C, para a temperatura de bulbo seco, e entre 83,98% e 87,17%, para a umidade relativa.

Em maio de 2022 (Figura 24e) percebe-se o avanço e a intensificação das áreas com elevada demanda de energia em direção às regiões Sudeste e Centro-Oeste, entretanto de forma mais contida, quando comparado ao mesmo mês das safras discutidas anteriormente (Figuras 18e, 20e e 22e). O referido avanço continua para o mês de junho (Figura 24f), mas com menor intensidade. As condições médias do ar ambiente no estado de Santa Catarina entre os meses de maio e junho foram, respectivamente, iguais a 13,29°C e 13,88°C, para a temperatura de bulbo seco, e a 84,35% e 89,54%, para a umidade do ar.

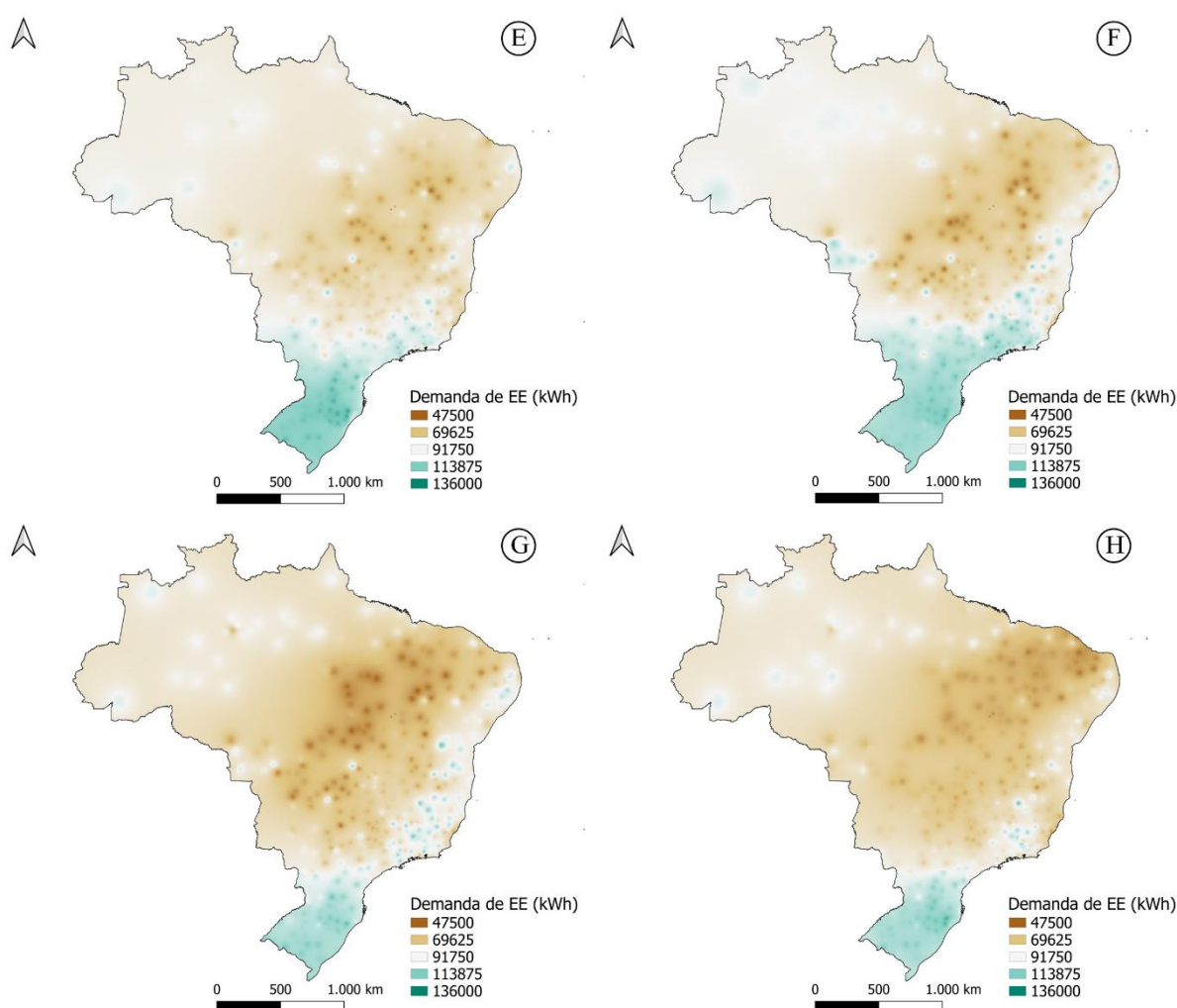


Figura 24 - Mapeamento da demanda de energia elétrica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2021/22.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Nos meses de julho (Figura 24g) e agosto (Figura 24h) foram constatadas reduções das áreas com elevada demanda de energia, que se restringiram principalmente à região Sul do Brasil. Observou-se também, nas regiões Sudeste e Nordeste, alguns picos de demanda

próximos ao litoral, bem como uma concentração da baixa demanda na região central do país. Entre os meses de julho e agosto foi constatada uma redução geral na intensidade da demanda de energia elétrica.

Em relação à demanda de energia térmica, verificou-se que no mês de janeiro de 2013 (safra de 2012/13) as áreas definidas como de alta demanda estavam concentradas nas regiões Norte (estados do Acre, Amazonas, Pará e Rondônia) e Centro-Oeste (Mato Grosso); e de baixa demanda nas regiões Sul e Nordeste (Figura 25a). As condições do ar ambiente nos estados do Acre e Rio Grande do Norte foram, respectivamente, iguais a 23,43°C e 29,43°C (temperatura de bulbo seco) e a 93,95% e 56,71% (umidade relativa). O aumento da temperatura associado à redução da umidade relativa ocasiona na redução na energia térmica utilizada no processo.

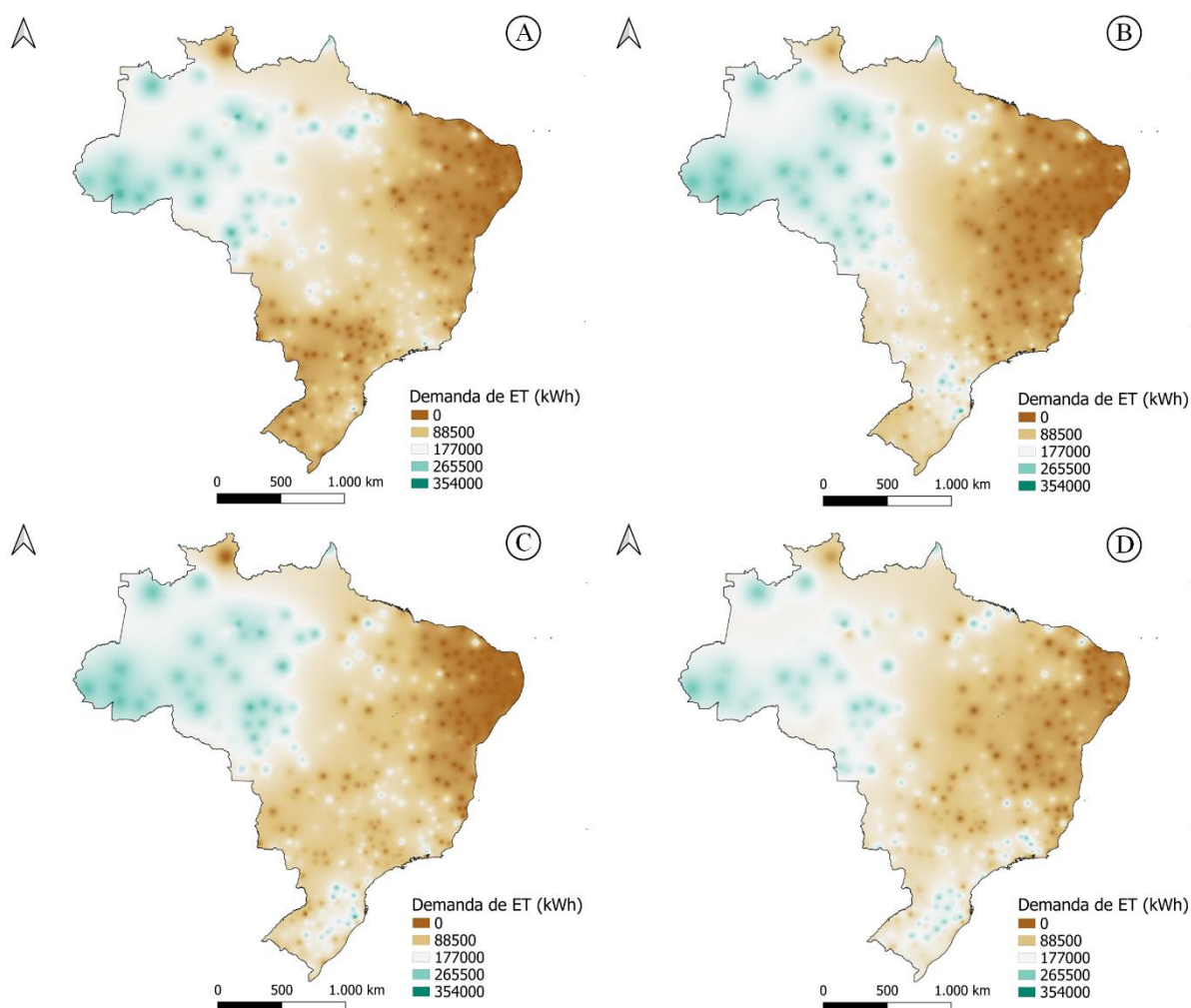


Figura 25 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2012/13.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Nos meses de fevereiro e março de 2013 (Figuras 25b e 25c) foi constatada a expansão das áreas de demanda média para região Sul do Brasil, com o surgimento de picos nos estados

do Paraná e Santa Catarina. As áreas indicadas como de baixa demanda ficaram concentradas na região Nordeste. A temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar assumiram valores médios iguais a 21,55°C e 80,45%, em março, comparados à 22,88°C e 73,91%, em janeiro.

Para abril de 2013 (Figura 25d) observou-se uma redução das áreas de alta demanda na região Norte, devido ao avanço das áreas de demanda média. Houve também uma redução da intensidade da cor marrom, indicativa de baixa demanda de energia térmica, na região Nordeste. Dados médios para o estado de Pernambuco mostram que de março para abril a temperatura de bulbo seco assumiu valores iguais a 27,74°C e 26,60°C e a umidade relativa do ar foi de 57,00% e 65,64%, respectivamente.

Em maio de 2013 (Figura 26e) observou-se um aumento da demanda de energia térmica na região Sul, principalmente no estado de Santa Catarina, e o avanço das áreas de baixa demanda no Nordeste em direção a região central do país. Temperaturas de bulbo seco e umidades relativas registradas para Santa Catarina foram, em média, iguais a 18,43°C e 81,88%, em março, e assumiram valores de 13,78°C e 82,78%, em maio (redução considerável da temperatura). No Piauí foi constatado o inverso, uma vez que houve redução da umidade relativa do ar ambiente (74,76% para 63,44%) e aumento da temperatura de bulbo seco (26,84°C para 27,96°C).

No mês de junho (Figura 26f), final do outono e início do inverno, foi observado um avanço das áreas indicativas de alta demanda de energia térmica na região Sul (Rio Grande do Sul e Paraná) e da região Sul em direção ao Centro-Oeste (Mato Grosso do Sul) e Sudeste (São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro). Em julho (Figura 26g) aconteceu o oposto, com o deslocamento e domínio das áreas de baixa demanda nas regiões centrais Brasil. Essa perspectiva de redução da demanda foi intensificada no mês de agosto, conforme retratado pelo mapa apresentado na Figura 26h.

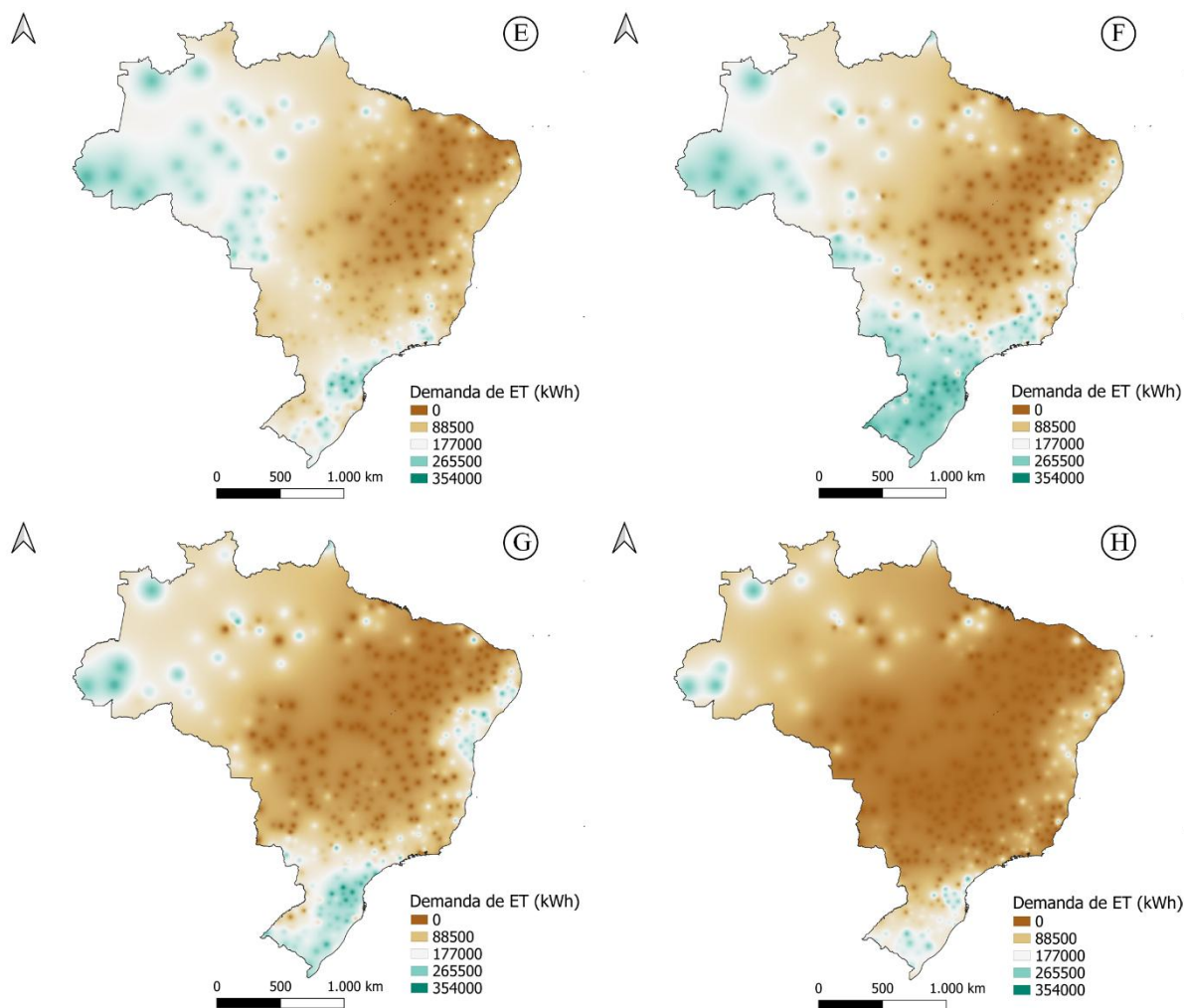


Figura 26 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2012/13.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

A dinâmica apresentada para a safra de 2012/13 é compatível com a da safra de 2015/16 (Figuras 27 e 28). No entanto, percebeu-se que as áreas indicativas de elevadas demandas de energia térmica ficaram mais restritas, principalmente na região Norte, com exceção do estado do Acre. Segue a descrição do padrão de demanda de energia térmica no Brasil de janeiro a abril do ano de 2016: (i) janeiro (Figura 27a): a demanda média a baixa de energia térmica é predominante, com exceções na região Norte; (ii) fevereiro (Figura 27b): avanço das áreas denominadas de baixa demanda da região Nordeste em direção às regiões Sudeste e Centro-Oeste; (iii) março (Figura 27c): expansão das áreas indicativas de alta demanda na região Norte; e (iv) abril (Figura 27d): redução das áreas de alta demanda no Norte e expansão dessas áreas na Sul do país.

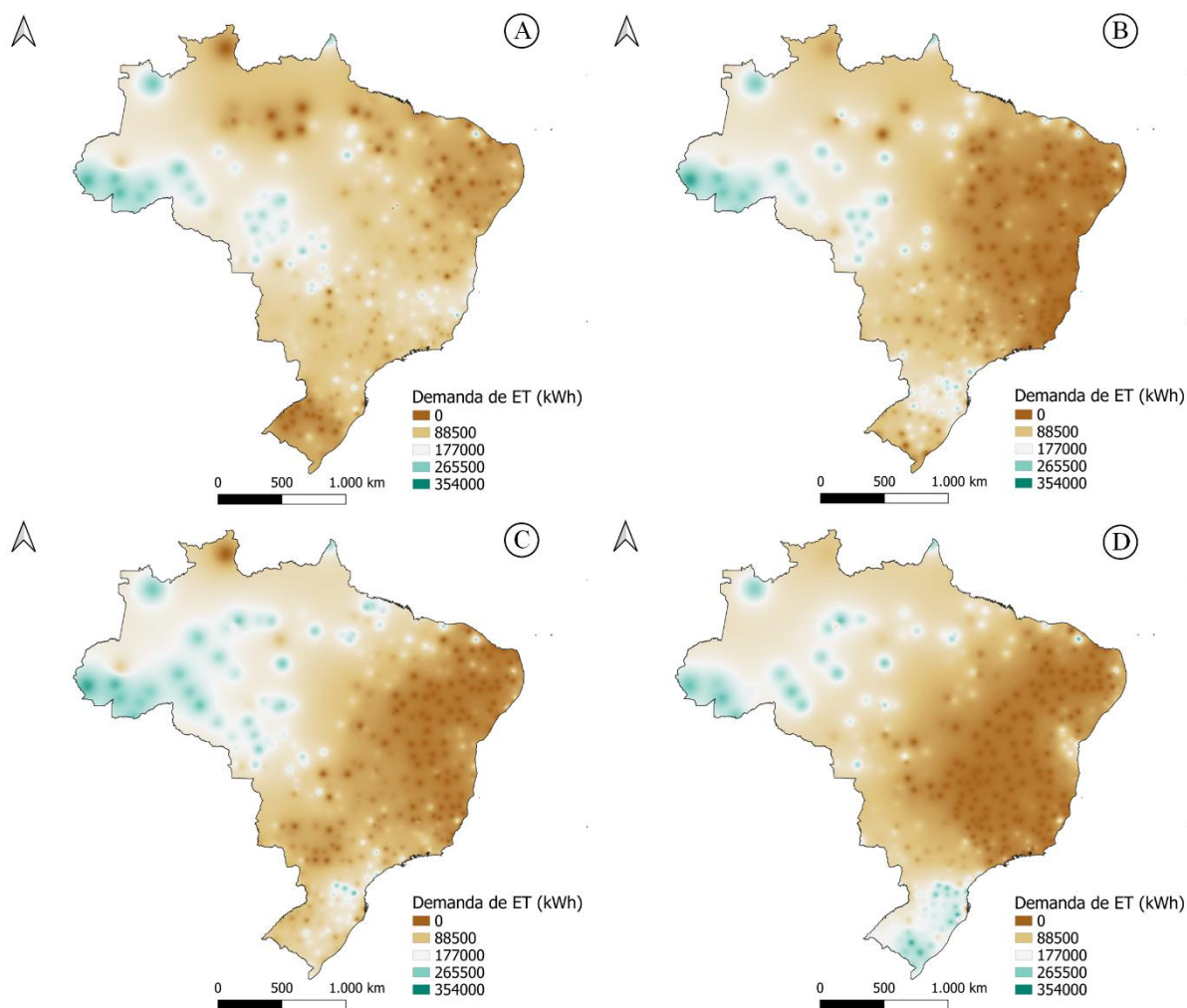


Figura 27 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2015/16.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

De abril para maio de 2016 (Figura 28e) verificou-se um aumento da demanda de energia térmica na região Sul, Sudeste e Centro-Oeste, com porções indicativas de demandas médias e altas. Em junho (Figura 28f) ocorreu uma intensificação da área da demanda, com tons de verde-escuro na região Sul, e deslocamento das áreas de baixa demanda em direção à região central do país. Nos meses de julho e agosto (Figuras 28g e 28h) uma demanda de energia térmica de média a baixa foi predominante nas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste, caso contrário ao observado para a região Sul e também para o estado do Acre.

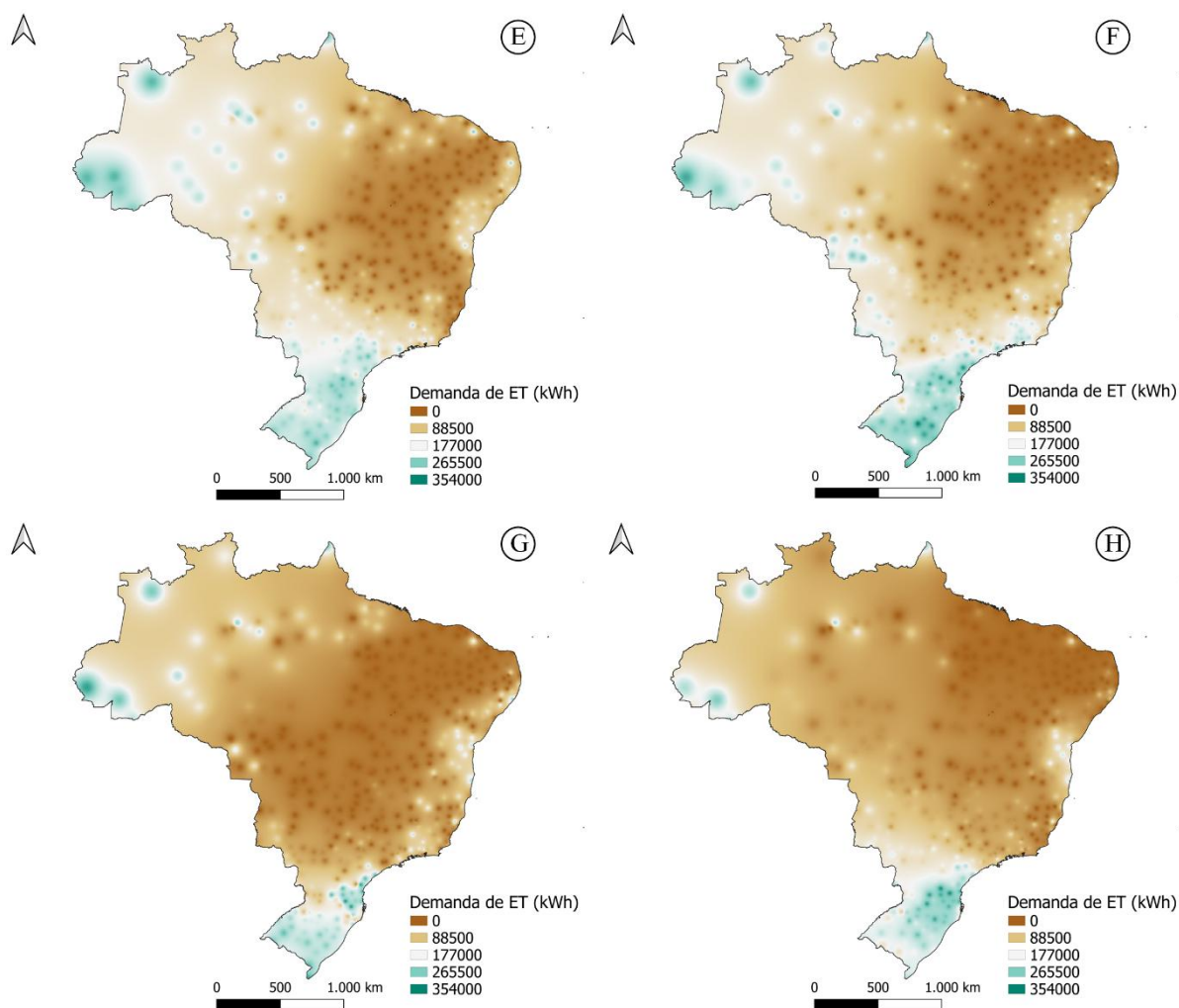


Figura 28 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2015/16.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Para a safra de 2018/19, a dinâmica da demanda de energia térmica também apresentou um padrão compatível com aqueles já descritos neste trabalho. No entanto, variações significativas devem ser discutidas, principalmente quando referentes aos estados do Acre e Amazonas, conforme determinado pelos resultados da análise de variância apresentados na Tabela 23. De janeiro para fevereiro de 2019, Figuras 29a e 29b, constatou-se o avanço das áreas indicativas de alta demanda de energia térmica do Acre para o Amazonas e a redução da intensidade da cor marrom, que indica baixa demanda, na região Nordeste.

No mês de março (Figura 29c), a expansão da demanda de energia térmica que havia sido relatada do Acre para o Amazonas contraiu, dando lugar ao surgimento de áreas com demandas elevadas para a região Sul no mês de abril (Figura 29d), com destaque para os estados do Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC). A temperatura de bulbo seco e a umidade

relativa do ar ambiente assumiram os seguintes valores médios para RS e SC, respectivamente, em abril de 2019: (i) 18,98°C e 88,63%; e (ii) 19,73°C e 86,65%.

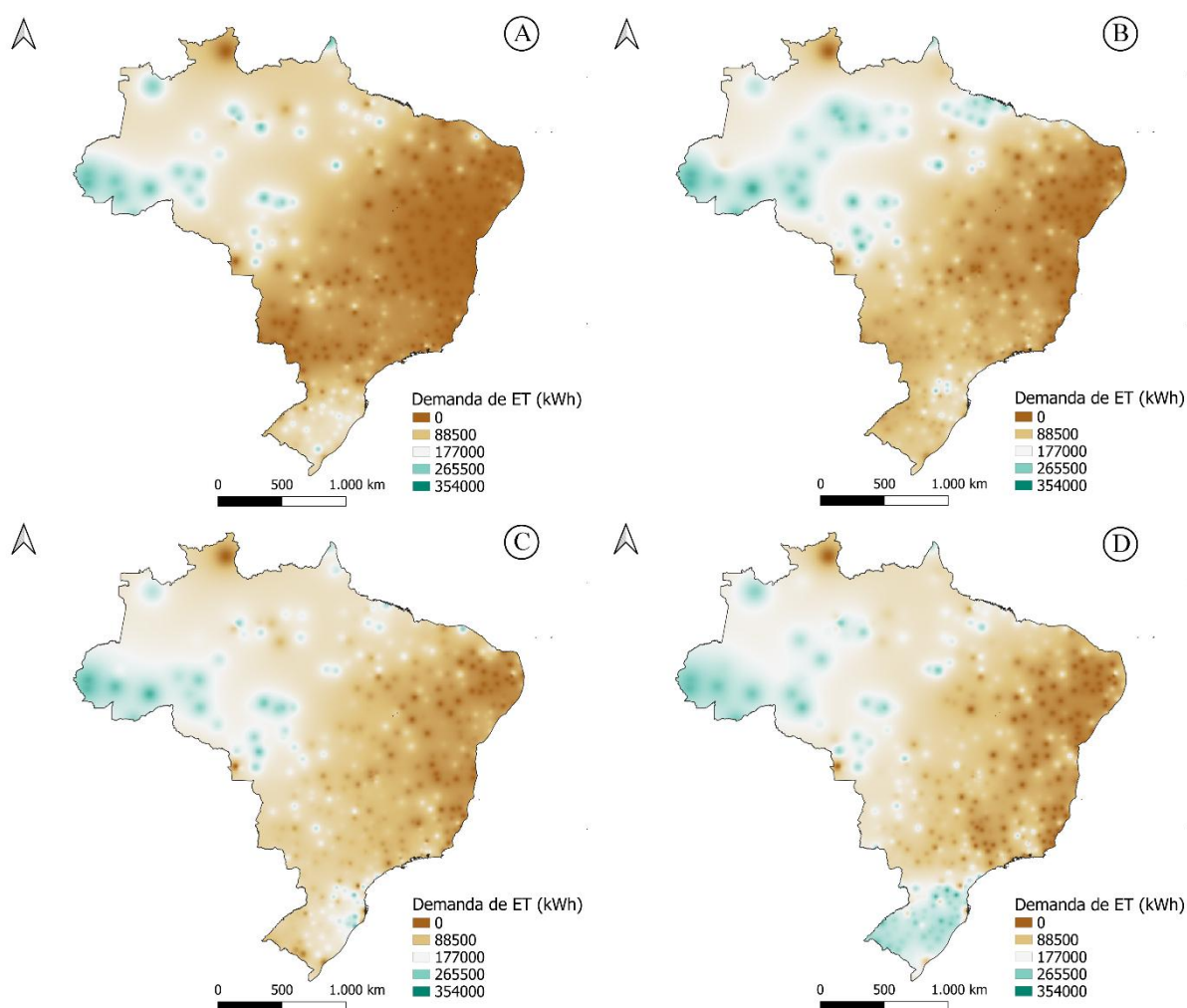


Figura 29 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2018/19.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

As distribuições da demanda de energia térmica nos meses de maio a agosto de 2019 apresentaram as seguintes características:

- Maio (Figura 30e): expansão e intensificação das áreas com alta demanda de energia térmica na região Sul do país, passando a abranger o estado do Paraná e também uma porção do estado do Mato Grosso do Sul (região Centro-Oeste).
- Junho (Figura 30f): expansão das áreas de média a baixa demanda do Nordeste em direção as demais regiões do país, principalmente a Centro-Oeste.
- Julho (Figura 30g): redução das áreas denominadas de alta demanda no estado do Rio Grande do Sul.

- Agosto (Figura 30h): intensificação das áreas de baixa demanda nas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste.

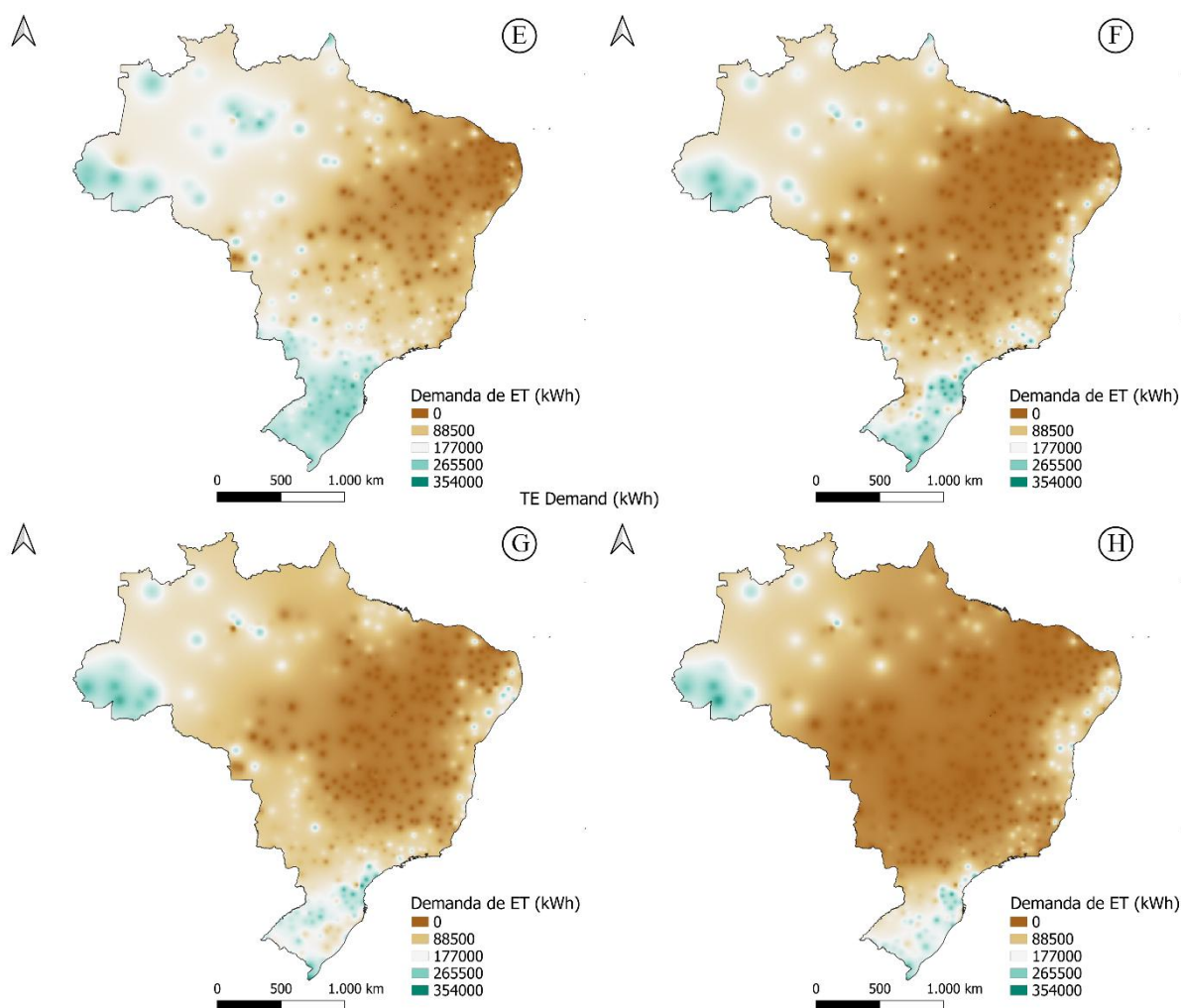


Figura 30 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2018/19.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Na safra de 2021/22 (Figuras 31 e 32) foram constatadas variações significativas na demanda de energia térmica para a região Norte, quando comparadas as demais safras estudadas. A existência de áreas isoladas, assim como observado para as simulações realizadas para o arroz, sugere que a quantidade de dados convergentes para esta região influenciou na qualidade das camadas *raster* geradas pelo método de interpolação IDW. Nas safras de 2012/13, 2015/16 e 2018/19 a quantidade de estações meteorológicas utilizadas neste processo de janeiro a abril foram, em média, iguais a 18, 12 e 14, respectivamente; enquanto na safra de 2021/22 a quantidade média neste mesmo período foi igual a 5. Apesar dessas inconsistências, os resultados obtidos para a safra de 2021/22 seguiram padrões similares aos já discutidos:

- Janeiro (Figura 31a): predominância das áreas de demanda média a baixa, com destaque para a região Nordeste.
- Fevereiro (Figura 31b): redução da demanda nos estados do Mato Grosso do Sul, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.
- Março (Figura 31c): expansão das áreas de menor demanda do Nordeste em direção as regiões Sudeste e Centro-Oeste e aumento da demanda por energia térmica nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.
- Abril (Figura 31d): intensificação da demanda na região Sul, quando comparado ao aumento já constatado para o mês de março.

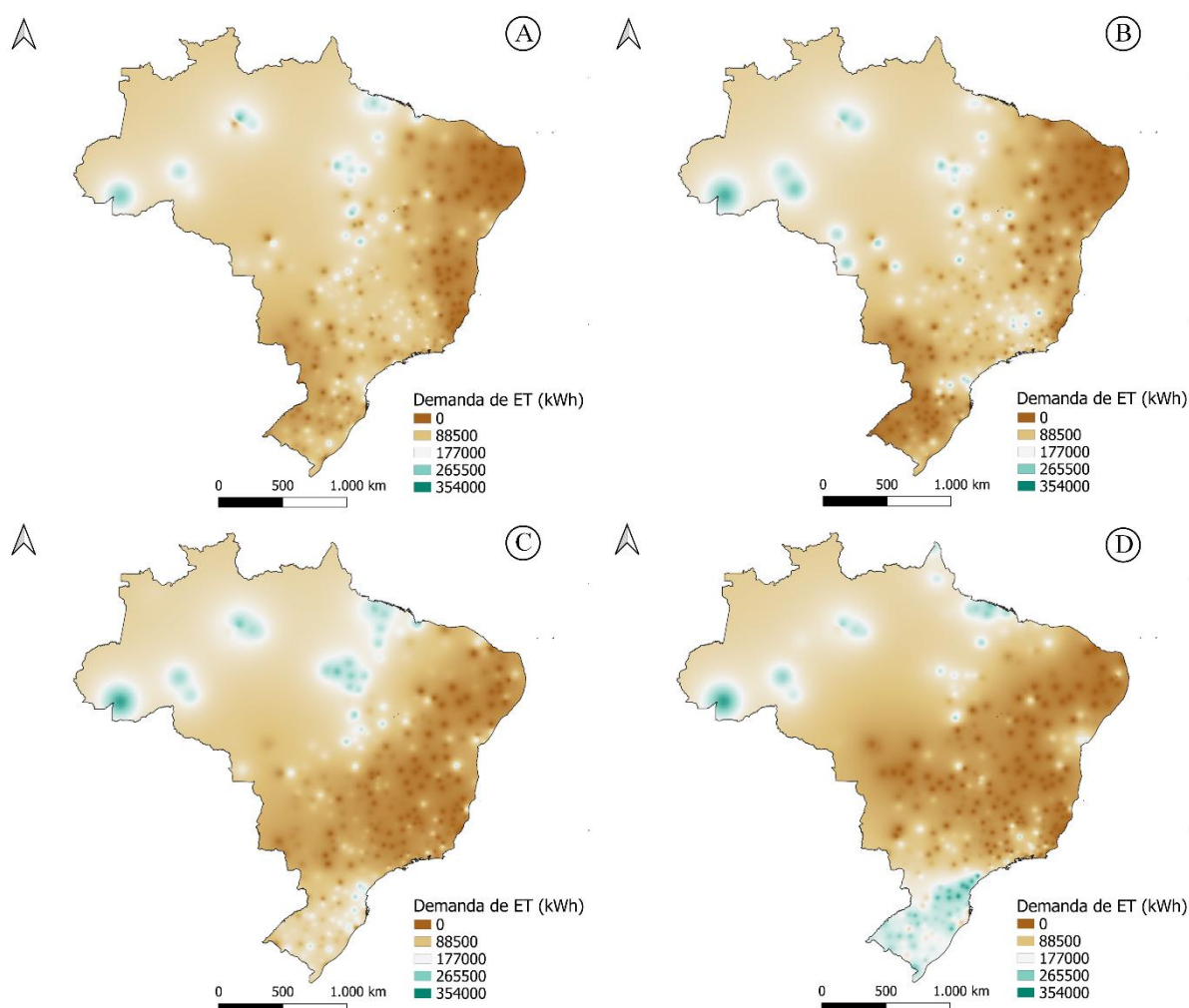


Figura 31 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) na safra de 2021/22.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

A análise espacial da demanda de energia térmica durante os meses de junho a agosto de 2022 (Figura 32e-h) destaca as mudanças sazonais na distribuição e intensidade da demanda energética no Brasil: (i) junho 2022 (Figura 32e): houve expansão significativa das áreas de alta

demanda na região Sul e, simultaneamente, observou-se o deslocamento das áreas de baixa demanda do Nordeste em direção ao Centro-Oeste; (ii) julho (Figura 32f): elevados quantitativos se intensificaram e se expandiram das regiões Sul para o Sudeste e Centro-Oeste, refletindo o aumento da demanda energética nessas localidades; e (iii) julho e agosto (Figuras 32g e 32h): foram verificadas reduções nas áreas de alta demanda na região Sul, acompanhadas pelo predomínio de áreas de média a baixa demanda nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste, que movimentaram em direção ao litoral de forma gradual.

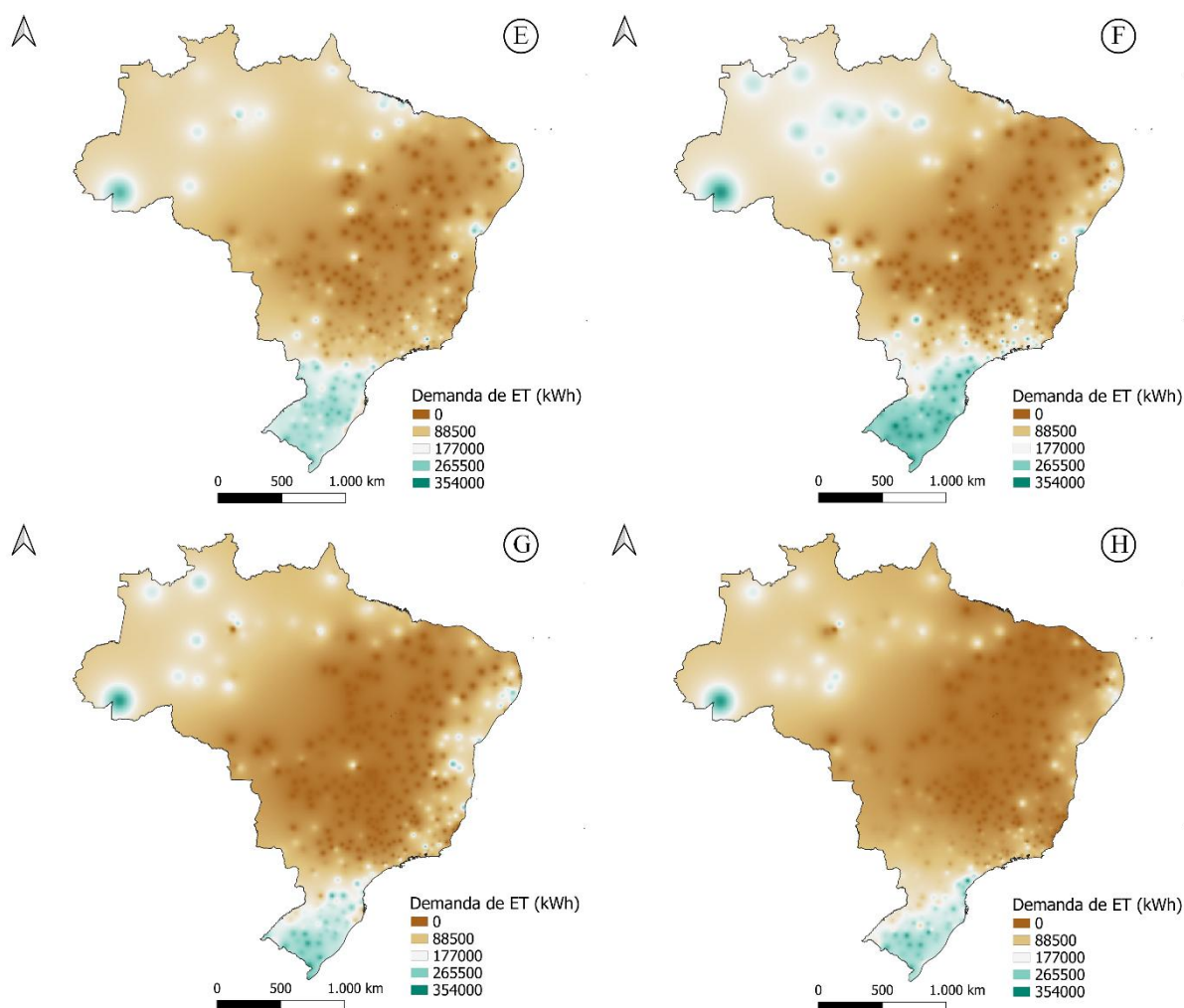


Figura 32 - Mapeamento da demanda de energia térmica para SBT de 2674,54 toneladas de soja nos meses de maio (e), junho (f), julho (g) e agosto (h) na safra de 2021/22.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Os modelos propostos para análise da influência das variáveis de entrada nas demandas de energia elétrica e energia térmica, definidos pelas Equações 23 e 24, também foram ajustados para a secagem da soja, conforme dados apresentados na Tabela 24. A análise dos resultados sugere comportamentos similares àqueles observados para as simulações de secagem do arroz:

- Temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ): a temperatura de bulbo seco exerce uma influência negativa sobre as demandas de energia elétrica e térmica, constante de ajuste com sinal negativo, indicando que se a temperatura aumenta, a demanda de energia diminui.
- Umidade relativa do ar ( $U_{ra}$ ): a umidade relativa do ar influencia positivamente na previsão das demandas de energia elétrica e térmica, de modo que o aumento da umidade resulta no crescimento da demanda por energia no processo secagem, conforme discutido durante a análise dos mapeamentos.
- Pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ): a pressão atmosférica produz comportamentos distintos na estimativa da demanda de energia elétrica e térmica, haja visto que contribui para o aumento da demanda de eletricidade e para a redução da demanda por GLP (térmica).

Todas as variáveis que definem as condições do ar ambiente (temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica) foram identificadas como estatisticamente significativas, apresentando p-valor que tendiam a zero. Isso reforça a importância dessas variáveis no modelo preditivo das demandas. Em relação à precisão dos modelos ajustados: (i) o erro médio quadrático (RMSE) para o modelo de energia elétrica foi de  $7,53E+3$ , o que corresponde a 8,64% da média dos valores simulados; e (ii) o RMSE para o modelo de energia térmica foi de  $5,55E+4$ , com um erro relativo à média do conjunto de dados igual a 57,92%.

Tabela 24 - Ajustes dos modelos formulados pelas Equações 23 e 24 (soja).

Energia	Variável	Constantes de Ajuste	Erro	Estatística de t	RMSE
Elétrica	$T_{bs}$	-1522,1	7,8218	-194,6	7,53E+03
	$U_{ra}$	933,67	2,4832	376	
	$P_{atm}$	53,658	0,32458	165,32	
Térmica	$T_{bs}$	-3025,9	57,606	-52,526	5,55E+04
	$U_{ra}$	6356,1	18,288	347,56	
	$P_{atm}$	-313,63	2,3905	-131,2	

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

#### 4.4 Estimativa da demanda de energia elétrica e térmica por safra

A estimativa das demandas totais de energia elétrica e térmica para a secagem de soja (SBT) foi realizada com base na produção de grãos nas safras analisadas. Esse levantamento é fundamental para avaliar e planejar a demanda energética total, pois a quantidade de grãos produzidos é diretamente proporcional à demanda no processo secagem, seja energia elétrica

(para ventilação) ou térmica (para aquecimento do ar de secagem). A Tabela 25 apresenta os dados de produção de soja nas safras de 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22, permitindo calcular a quantidade média de energia necessária para atendimento à demanda de secagem por safra, considerando as variações regionais e climáticas. Alguns estados das regiões Sudeste (Espírito Santo e Rio de Janeiro) e Nordeste (Ceará, Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe) não produziram soja nas safras estudadas.

Tabela 25 - Produção de soja por estado nas safras de 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22.

(continua)

Região	Estado	Produção (em mil ton)				Média
		Safra				
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22	
Sul	Paraná	15912,4	16844,5	16252,7	12250,3	15315,0
	Rio Grande do Sul	12534,9	16201,4	19187,1	9111,0	14258,6
	Santa Catarina	1555,4	2135,2	2382,6	2038,7	2028,0
Sudeste	Espírito Santo	-	-	-	-	-
	Minas Gerais	3374,8	4731,1	5074,3	7590,5	5192,7
	Rio de Janeiro	-	-	-	-	-
	São Paulo	2051,1	2843,8	3017,5	4176,5	3022,2
Centro-Oeste	Distrito Federal	186,7	231,0	241,6	313,2	243,1
	Goiás	8562,9	10249,5	11437,4	17389,9	11909,9
	Mato Grosso	23532,8	26030,7	32454,5	41490,2	30877,1
	Mato Grosso do Sul	5809,0	7241,4	8504,0	8932,7	7621,8
Norte	Acre	-	-	4,4	20,4	6,2
	Amapá	-	-	74,4	17,2	22,9
	Amazonas	-	-	5,3	13,5	4,7
	Pará	552,2	1288,0	1712,0	2497,9	1512,5
	Rondônia	539,3	765,0	1019,2	1668,8	998,1
	Roraima	14,0	79,2	122,9	285,0	125,3
	Tocantins	1536,4	1686,7	2936,7	3877,1	2509,2
Nordeste	Alagoas	-	-	7,0	6,2	3,3
	Bahia	2692,0	3211,1	5309,1	7283,1	4623,8
	Ceará	-	-	-	-	-

Tabela 25 - Produção de soja por estado nas safras de 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2021/22.

(conclusão)

Região	Estado	Produção (em mil ton)				Média
		Safrá				
		2012/13	2015/16	2018/19	2021/22	
Nordeste	Maranhão	1685,9	1250,2	2917,7	3573,6	2356,9
	Paraíba	-	-	-	-	-
	Pernambuco	-	-	-	-	-
	Piauí	916,9	645,8	2322,1	3014,0	1724,7
	Rio Grande do Norte	-	-	-	-	-
	Sergipe	-	-	-	-	-

Fonte: (CONAB, 2013, 2016, 2019, 2022).

Portanto, a partir da produção média das safras estudadas e das demandas específicas de energia elétrica, térmica e total estimados para cada estado, conforme disposto na Tabela 26), foi possível calcular a demanda média total de energia por safra (Tabela 27), utilizando as Equações 25 e 26. Para isso, foram utilizadas demandas médias mínimas e máximas para estimativa da demanda nos estados que apresentaram variações significativas. Mato Grosso (MT), responsável por 29,59% da produção total de soja no Brasil, apresentou uma demanda específica que pode ser classificado como de médio a baixo, quando comparado aos demais estados (entre 42,16 e 88,26kWh.ton<sup>-1</sup>). Estados da região Nordeste apresentaram as menores demandas específicas, mas poucos são produtores do grão: destaca-se o Piauí, com demanda entre 28,29 e 53,34kWh.ton<sup>-1</sup> e produção média de 1724,7 mil toneladas. O pico de demanda específica foi registrado para o Rio Grande do Sul, sendo este igual à 130,13kWh.ton<sup>-1</sup>.

Tabela 26 - Demandas específicas de energia elétrica, térmica e total por estado no processo de SBT da soja.

(continua)

Região	Estado	Demanda específica de energia (kWh.ton <sup>-1</sup> )		
		Elétrica	Térmica	Total
Sul	Paraná	32,72-39,05	28,74-70,04	61,47-109,08
	Rio Grande do Sul	32,06-40,7	31,44-89,43	63,51-130,13
	Santa Catarina	34,02-41,23	35,67-87,05	69,7-128,28
Sudeste	Espírito Santo	28,5-33,39	22,23	50,73-55,61

Tabela 26 - Demandas específicas de energia elétrica, térmica e total por estado no processo de SBT da soja.

(conclusão)

Região	Estado	Demanda específica de energia (kWh.ton <sup>-1</sup> )		
		Elétrica	Térmica	Total
Sudeste	Minas Gerais	31,98	24,57	56,54
	Rio de Janeiro	30,02-36,68	20,32-58,8	50,35-95,48
	São Paulo	32,01-36,98	36,68	68,69-73,66
Centro-Oeste	Distrito Federal	31,21	18,15	49,35
	Goiás	26,35-33,37	8,95-38,59	35,29-71,96
	Mato Grosso	27,45-33,95	14,7-54,31	42,16-88,26
	Mato Grosso do Sul	30,48-35,49	36,82	67,3-72,31
	Acre	34,57	80,77	115,34
Norte	Amapá	29,99-32,82	26,27-52,71	56,27-85,54
	Amazonas	31,97-33,96	41,84-65,8	73,81-99,76
	Pará	29,24-33,36	21,05-55,79	50,29-89,15
	Rondônia	30,82-34,32	27,88-66,61	58,7-100,93
	Roraima	31,25-33,45	37,49-54,71	68,73-88,16
	Tocantins	24,33-32,29	7,37-38,76	31,71-71,04
	Nordeste	Alagoas	25,61-32,96	10,81-53,63
Bahia		29,14	20,65	49,79
Ceará		23,47-29,28	17,14	40,6-46,42
Maranhão		25,42-32,14	8,06-40,7	33,48-72,83
Paraíba		27,4	16,47	43,87
Pernambuco		25,48-30,08	8,28-28,46	33,76-58,54
Piauí		23,12-29,29	5,16-24,05	28,29-53,34
Rio Grande do Norte		26,19	12,98	39,16
Sergipe		25,16-32,23	8,17-47,05	33,33-71,04

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Segue na Tabela 27, a demanda de energia elétrica, térmica e total por safra. O estado do Mato Grosso (MT) apresentou uma demanda total por energia que variou entre 1,301 e 2,725TWh, a maior do país. As demandas mínimas e máxima registradas representaram 24,47% e 29,08% da demanda total do Brasil, haja visto que o referido estado se figura como maior

produtor (29,59%). Percebe-se que o percentual de demanda reduziu em relação ao percentual de produção, pois a demanda específica de energia em MT foi inferior à demanda média ponderada para o país. Além disso, a representatividade da energia elétrica e térmica na demanda específica total de energia mínima e máximo foram iguais a 65,12% (elétrica) e 34,88% (térmica); e a 38,47% (elétrica) e 61,53% (térmica), respectivamente. Há pouca variação na demanda de energia elétrica, mas elevada variação na demanda de energia térmica no período de safra simulado.

Para o estado do Rio Grande do Sul (RS) foi estimado um pico na demanda de energia por safra igual a 1,855TWh, ultrapassando a demanda calculada para o estado do Paraná (PR), que é o segundo maior produtor do país (15315 mil toneladas, 14,68% da produção total, pico de demanda total de 1,670TWh). Observa-se que as demandas específicas de energia elétrica foram similares nos estados do RS e PR, entretanto a demanda específica de energia térmica foi superior no estado do RS, assumindo valores que variaram de 31,44 a 89,43kWh.ton<sup>-1</sup>, comparados ao PR com estimativas entre 28,74 e 70,04kWh.ton<sup>-1</sup> (Tabela 26). Dessa forma, a demanda de energia elétrica e térmica para os estados supracitados foram iguais a (i) PR: 501,18 a 597,98GWh (elétrica) e 440,19 a 1072,64GWh (térmica); e (ii) RS: 457,15 a 580,35GWh (elétrica) e 448,34 a 1275,12GWh (térmica), resultando em valores brutos de energia elétrica e térmica que foram maiores nos estados do PR e RS, respectivamente, conforme indicado na Tabela 27.

As demandas totais de energia na SBT de soja para as regiões do Brasil e os seus respectivos dados percentuais foram iguais a: (i) Sul: 1,988 a 3,786TWh (37,38 a 40,41%); (ii) Sudeste: 0,501 a 0,516TWh (9,42 a 5,51%); (iii) Centro-Oeste: 2,247 a 4,145TWh (42,23 a 44,24%); (iv) Norte: 0,225 a 0,428TWh (4,23 a 4,56%); e (v) Nordeste: 0,358 a 0,494TWh (6,74 a 5,27%). A estimativa total no país assumiu valores entre 5,319 e 9,372TWh.

Tabela 27 - Demandas de energia elétrica, térmica e total para os estados brasileiros por safra (secagem de soja).

(continua)

Região	Estado	Demanda de energia por safra (GWh)		
		Elétrica	Térmica	Total
Sul	Paraná	501,18-597,98	440,19-1072,64	941,37-1670,62
	Rio Grande do Sul	457,15-580,35	448,34-1275,12	905,47-1855,47
	Santa Catarina	68,99-83,62	72,348-176,54	141,34-260,16
Sudeste	Espírito Santo	-	-	-

Figura 27 - Demandas de energia elétrica, térmica e total para os estados brasileiros por safra (secagem de soja).

(conclusão)

Região	Estado	Demanda de energia por safra (GWh)		
		Elétrica	Térmica	Total
Sudeste	Minas Gerais	166,04	127,57	293,61
	Rio de Janeiro	-	-	-
	São Paulo	96,74-111,75	110,87	207,605-222,62
Centro-Oeste	Distrito Federal	7,587	4,412	11,999
	Goiás	313,78-397,40	106,55-459,59	420,33-856,99
	Mato Grosso	847,67-1048,281	453,97-1676,80	1301,64-2725,08
	Mato Grosso do Sul	232,32-270,50	280,631	512,95-551,13
	Acre	0,214	0,501	0,715
Norte	Amapá	0,687-0,752	0,602-1,207	1,288-1,959
	Amazonas	0,15-0,16	0,197-0,309	0,347-0,469
	Pará	44,228-50,451	31,836-84,386	76,064-134,837
	Rondônia	30,762-34,256	27,822-66,479	58,584-100,736
	Roraima	3,914-4,191	4,696-6,853	8,61-11,044
	Tocantins	61,051-81,017	18,504-97,25	79,556-178,267
	Alagoas	0,085-0,109	0,036-0,177	0,120-0,286
Nordeste	Bahia	134,75	95,47	230,22
	Ceará	-	-	-
	Maranhão	59,91-75,74	19,00-95,91	78,91-171,66
	Paraíba	-	-	-
	Pernambuco	-	-	-
	Piauí	39,88-50,51	8,91-41,48	48,79-91,99
	Rio Grande do Norte	-	-	-
Sergipe	-	-	-	

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

#### 4.5 Estimativa da compensação da demanda de energia pela biomassa residual

O estudo evidencia o potencial técnico do reaproveitamento energético da casca de soja como fonte renovável e eficiente para atendimento às demandas energéticas associadas ao processo de secagem do grão. Os resultados obtidos (Tabela 28), com base nas Equações 27 a 32, demonstram uma correlação direta entre a energia total disponível, produção média de grãos por safra e demanda específica de energia em cada estado, com destaque para as seguintes observações:

- a) Energia disponível em função da produção: o estado do Mato Grosso (MT), maior produtor nacional de soja, apresentou a maior energia disponível, estimada em 1,671TWh. Em contrapartida, estados de baixa produção, como Alagoas (AL), registraram valores significativamente inferiores, na ordem de 0,178GWh.
- b) Percentual de atendimento à demanda energética: estados do Nordeste, como Bahia (BA) e Piauí (PI), destacaram-se com os maiores índices de atendimento à demanda energética, alcançando 109% e valores na faixa de 101% - 291%, respectivamente, o que reflete uma geração energética excedente em relação à demanda total. Nos estados do Sul, como Paraná (PR) e Rio Grande do Sul (RS), os índices variaram entre 42% e 88%, evidenciando que, apesar da elevada produção de soja, a energia gerada pela biomassa residual é insuficiente para compensar integralmente a demanda do processo de secagem. No caso do Mato Grosso (MT), os percentuais de atendimento oscilaram entre 61% e 128%, dependendo das condições climáticas favoráveis, como baixa umidade relativa do ar e altas temperaturas, completa eficiência do reaproveitamento energético.
- c) Capacidade de suprimento da demanda de eletricidade: a energia gerada a partir do reaproveitamento da casca de soja apresenta capacidade técnica para suprir integralmente (100%) a demanda de energia elétrica estimada em todos os estados analisados, independentemente das condições operacionais dos sistemas.

Esses resultados ressaltam a viabilidade técnica da biomassa residual da casca de soja como fonte renovável para fins energéticos, especialmente em estados com menor demanda específica de energia. Além disso, indicam a necessidade de considerar fatores climáticos e regionais no planejamento energético, visando à maximização do aproveitamento dessa fonte sustentável.

Tabela 28 - Estimativa do reaproveitamento energético da casca de soja por estado.

Região	Estado	Energia (GWh)			Atendimento (%)
		Elétrica	Prod. Briquete	Disponível	
Sul	Paraná	877,796	49,117	828,679	50-88
	Rio Grande do Sul	815,946	45,657	770,290	42-85
	Santa Catarina	116,190	6,501	109,689	42-78
Sudeste	Espírito Santo	-	-	-	-
	Minas Gerais	297,891	16,669	281,223	96
	Rio de Janeiro	-	-	-	-
	São Paulo	172,904	9,675	163,229	73-79
Centro-Oeste	Distrito Federal	13,960	0,781	13,179	110
	Goiás	683,146	38,226	644,920	75-153
	Mato Grosso	1769,564	99,017	1670,547	61-128
	Mato Grosso do Sul	436,918	24,448	412,470	75-80
Norte	Acre	0,355	0,020	0,336	47
	Amapá	1,311	0,073	1,238	63-96
	Amazonas	0,269	0,015	0,254	54-73
	Pará	86,620	4,847	81,773	61-108
	Rondônia	57,227	3,202	54,025	54-92
	Roraima	7,186	0,402	6,784	61-79
	Tocantins	143,625	8,037	135,588	76-170
Nordeste	Alagoas	0,189	0,011	0,178	62-148
	Bahia	264,615	14,807	249,809	109
	Ceará	-	-	-	-
	Maranhão	134,811	7,543	127,268	74-161
	Paraíba	-	-	-	-
	Pernambuco	-	-	-	-
	Piauí	98,531	5,513	93,018	101-191
	Rio Grande do Norte	-	-	-	-
	Sergipe	-	-	-	-

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Dessa forma, as estimativas de reaproveitamento energético da casca de soja indicam que a energia elétrica gerada a partir do reaproveitamento da biomassa residual pode atender, de forma compensativa e descentralizada, uma parcela significativa das demandas energéticas dos estados brasileiros envolvidos no processo de secagem da soja. Os resultados no âmbito regional foram apresentados a seguir: (i) Sul: a energia disponível é 1,707TWh, com um atendimento de demanda que varia entre 42 e 88%; (ii) Sudeste: a energia disponível é de 0,444TWh, com o atendimento à demanda variando entre 73 e 96%; (iii) Centro-Oeste: a energia disponível é de 2,741TWh, com um percentual de atendimento à demanda variando de 61 a 153%; (iv) Norte: a energia disponível é 0,280TWh, com o atendimento a demanda entre 47 e 170%; e (v) Nordeste: a energia disponível é 0,470TWh, com o atendimento à demanda variando de 62% a 191% (Tabela 28).

#### **4.6 Balanço da emissão de CO<sub>2</sub> durante o processo de SBT**

A análise do processo de secagem permitiu estimar a perda de matéria seca (PMS) e calcular uma das parcelas de CO<sub>2</sub> emitido, com base nas Equações 33 e 35. Os resultados foram obtidos utilizando os valores mínimos e máximos das variáveis envolvidas, apresentados em faixas de variação conforme a Tabela 29. O maior tempo de secagem foi registrado em Santa Catarina (SC), com 2546 horas, enquanto o menor tempo foi observado no Ceará (CE), com 729 horas. A PMS máxima foi estimada no estado do Piauí (PI), alcançando 1,121%, enquanto o valor mínimo foi identificado no Rio Grande do Sul (RS), com apenas 0,002%. Portanto, a PMS não depende exclusivamente do tempo de secagem, sendo também influenciada pela temperatura da massa de grãos. Essa relação explica a ausência de coincidência entre os estados que apresentaram os maiores e menores tempos de secagem e os valores extremos de PMS, assim como anteriormente constatado para as simulações de secagem do arroz.

O estado do Mato Grosso (MT), maior produtor de soja do Brasil, destacou-se como o principal emissor de CO<sub>2</sub> decorrente da perda de matéria seca (PMS) durante o processo de secagem, com emissões variando entre 0,991 e 228,046 mil toneladas por safra (Tabela 29). Os dados regionalizados revelam faixas de emissões significativas, conforme descrito a seguir. No Sul, as emissões variaram entre 929,9 e 282347,6 toneladas, enquanto no Sudeste, os valores oscilaram entre 306,4 e 60591,1 toneladas. A região Centro-Oeste, que concentra grande parte da produção nacional, apresentou emissões entre 1736,6 e 342921,3 toneladas, configurando-

se como a maior emissora entre as regiões. No Norte, as emissões foram estimadas entre 719,1 e 46557,0 toneladas, e no Nordeste, os valores ficaram entre 1159,2 e 103593,2 toneladas.

Tabela 29 - Dados de tempo de secagem ( $t_s$ ), perda de matéria seca (PMS) e emissão de CO<sub>2</sub> em decorrência de PMS ( $m_{CO_2(1)}$ ) na secagem de soja.

(continua)

Região	Estado	$t_s$ (h)		PMS (%)		$m_{CO_2(1)}$ (ton)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Sul	Paraná	782	2440	0,002	0,532	462,8	109109,1
	Rio Grande do Sul	744	2467	0,002	0,824	404,4	156863,8
	Santa Catarina	817	2546	0,002	0,604	62,7	16374,7
Sudeste	Espírito Santo	742	1989	0,007	0,513	-	-
	Minas Gerais	779	2285	0,003	0,367	189,0	25586,9
	Rio de Janeiro	745	2422	0,003	0,599	-	-
	São Paulo	784	2312	0,003	0,868	117,4	35004,3
Centro-Oeste	Distrito Federal	854	1927	0,005	0,197	16,6	644,7
	Goiás	762	2118	0,003	0,393	485,2	62792,1
	Mato Grosso	734	2087	0,002	0,552	990,6	228046,3
	Mato Grosso do Sul	817	2225	0,002	0,504	244,3	51438,1
Norte	Acre	1250	1790	0,011	0,499	0,9	41,4
	Amapá	1152	1626	0,117	0,632	36,2	193,6
	Amazonas	920	1800	0,014	0,790	0,9	49,6
	Pará	762	1783	0,014	0,672	287,3	13591,4
	Rondônia	855	1830	0,003	0,462	42,0	6178,3
	Roraima	919	1646	0,040	0,345	67,4	579,2
	Tocantins	748	1765	0,008	0,774	284,3	25923,5
Nordeste	Alagoas	760	1690	0,011	0,746	0,5	32,9
	Bahia	760	2031	0,008	0,807	469,3	49796,6
	Ceará	729	1837	0,010	0,617	-	-
	Maranhão	754	1651	0,014	0,892	447,6	28045,9
	Paraíba	767	1766	0,012	0,527	-	-
	Pernambuco	788	1840	0,009	0,541	-	-
	Piauí	735	1702	0,010	1,121	241,8	25717,8

Tabela 29 - Dados de tempo de secagem ( $t_s$ ), perda de matéria seca (PMS) e emissão de CO<sub>2</sub> em decorrência de PMS ( $m_{CO_2(1)}$ ) na secagem de soja.

		(conclusão)					
Região	Estado	$t_s$ (h)		PMS (%)		$m_{CO_2(1)}$ (ton)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Nordeste	Rio Grande do Norte	756	1669	0,014	0,915	-	-
	Sergipe	767	1703	0,015	0,756	-	-

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

As emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à queima de GLP ( $m_{CO_2(2)}$ ) foram estimadas utilizando a Equação 36. De acordo com os dados da Tabela 30, os estados do Rio Grande do Sul (RS) e Mato Grosso (MT) registraram as maiores emissões, variando de 96441 a 274286 toneladas no RS e de 97651 a 360688 toneladas no MT. Esses resultados refletem as particularidades de cada estado. O Mato Grosso, como o maior produtor nacional de soja, concentra uma elevada demanda energética devido ao grande volume de grãos processados. Por sua vez, o Rio Grande do Sul, além de ser o terceiro maior produtor do país, destaca-se pela maior demanda específica de energia térmica no processo de secagem, que intensifica emissões.

A quantidade de CO<sub>2</sub> que poderia ser evitada ( $m_{CO_2(NE)}$ ) caso a energia elétrica demandada no processo fosse gerada a partir da casca de soja foi estimada com base na Equação 37. Os estados com maiores volumes de produção de grãos, como esperado, apresentaram os maiores potenciais de redução de emissões, refletindo o impacto direto da substituição por fontes alternativas. Diferentemente da energia térmica, as demandas específicas de energia elétrica demonstram pouca variação entre os estados brasileiros. Os estados das regiões Centro-Oeste e Sul se destacaram pelos maiores créditos de CO<sub>2</sub> obtidos por meio da descarbonização da matriz elétrica, devido à maior demanda absoluta de energia elétrica associada à elevada produção de soja. Os valores regionais de créditos de CO<sub>2</sub> foram obtidos a partir da Tabela 30, com a região Sul variando entre 318522 e 391268 toneladas, a região Sudeste entre 81474 e 86129 toneladas, a região Centro-Oeste entre 434492 e 534452 toneladas, a região Norte entre 43719 e 53031 toneladas, e a região Nordeste entre 72746 e 80959 toneladas.

Foi realizado um balanço das emissões de CO<sub>2</sub> na SBT ( $B_{CO_2}$ ), considerando que  $m_{CO_2(1)}$  e  $m_{CO_2(2)}$  são contribuintes para as emissões totais, enquanto o crédito de CO<sub>2</sub> ( $m_{CO_2(NE)}$ ) gerado pela utilização da casca de soja serve como compensação, conforme definido pela Equação 39. Vale destacar que valores negativos de  $B_{CO_2}$  indicam o sequestro de CO<sub>2</sub> da

atmosfera, enquanto resultados positivos refletem um saldo de emissões. De acordo com a Tabela 30, na região Sul, os estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina apresentaram a possibilidade de um balanço negativo de CO<sub>2</sub>, dependendo das condições ambientais favoráveis à realização do processo de secagem. A situação foi semelhante nas regiões Sudeste, Norte e Nordeste, onde o panorama indicou também a possibilidade de sequestro de CO<sub>2</sub> sob condições específicas de operação. No Centro-Oeste, observou-se que o Distrito Federal (DF) e o Mato Grosso do Sul (MS) teriam um balanço negativo de CO<sub>2</sub> em todas as condições simuladas, enquanto nos outros estados da região (Goiás e Mato Grosso) o padrão de balanço foi similar ao das demais regiões, com possibilidades tanto de emissão quanto de compensação, dependendo das variáveis envolvidas. O balanço geral de emissões de CO<sub>2</sub> em nível nacional variou entre -594,8 mil e 777,5 mil toneladas, indicando que, em algumas situações, seria possível um sequestro líquido de CO<sub>2</sub>.

Tabela 30 - Balanço das emissões de CO<sub>2</sub> por estado (secagem de soja).

		(continua)					
Região	Estado	$m_{CO_2(2)}$ (ton)		$m_{CO_2(NE)}$ (ton)		$B_{CO_2}$ (ton)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Sul	Paraná	94687	230731	155391	185403	-60241	154436
	Rio Grande do Sul	96441	274286	141740	179938	-44894	251212
	Santa Catarina	15562	37974	21391	25927	-5766	28421
Sudeste	Espírito Santo	-	-	-	-	-	-
	Minas Gerais	27442	27442	51480	51480	-51291	-25893
	Rio de Janeiro	-	-	-	-	-	-
	São Paulo	23848	23848	29994	34648	-29876	356
Centro-Oeste	Distrito Federal	949	949	2352	2352	-2336	-1708
	Goiás	22919	98860	97288	123213	-73884	38440
	Mato Grosso	97651	360688	262820	325019	-164178	263715
	Mato Grosso do Sul	60365	60365	72031	83868	-71787	-32430
Norte	Acre	108	108	66	66	-66	-25
	Amapá	129	260	213	233	-47	220
	Amazonas	42	67	47	49	-3	67
	Pará	6848	18152	13713	15642	-6577	16101
	Rondônia	5985	14300	9538	10621	-3511	9857
	Roraima	1010	1474	1214	1299	-136	754

Tabela 30 - Balanço das emissões de CO<sub>2</sub> por estado (secagem de soja).

(conclusão)

Região	Estado	$m_{CO_2(2)}$ (ton)		$m_{CO_2(NE)}$ (ton)		$B_{CO_2}$ (ton)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Norte	Tocantins	3980	20919	18929	25119	-14664	21723
	Alagoas	8	38	26	34	-18	37
	Bahia	20535	20535	41780	41780	-41311	8016
	Ceará	-	-	-	-	-	-
	Maranhão	4086	20631	18575	23484	-14041	25193
Nordeste	Paraíba	-	-	-	-	-	-
	Pernambuco	-	-	-	-	-	-
	Piauí	1916	8922	12364	15661	-10206	18978
	Rio Grande do Norte	-	-	-	-	-	-
	Sergipe	-	-	-	-	-	-

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

#### 4.7 Discussão dos resultados obtidos para o Estudo de Caso 2

A partir das tarifas de energia elétrica por estado, consultadas no endereço eletrônico da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e de custos do GLP por estado, registrados em relatórios da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) - mês de referência maio de 2024 (ANEEL, 2024; ANP, 2024) - foram realizadas discussões do ponto de vista econômico para a demanda de energia no processo de secagem da soja. A tarifa de energia elétrica utilizada foi a tarifa branca fora ponta, haja vista que essa pode ser aplicada aos consumidores da classe rural, denominada subgrupo B2, e que o sistema de secagem operou somente no horário fora ponta. Esses mesmos dados também foram utilizados para a análise e discussão dos resultados obtidos para a secagem do arroz.

Com base nas demandas médias de energia elétrica (kWh.ton<sup>-1</sup>) e de GLP (kg.ton<sup>-1</sup>), foram estimados os custos médios de energia elétrica, térmica e total por tonelada de soja submetida ao processo de secagem. A análise, apresentada na Tabela 31, revelou que o estado da Paraíba (PB) registrou o menor custo médio de energia elétrica, com 13,542R\$.ton<sup>-1</sup>, apesar de não ser produtor de soja (conforme indicado na Tabela 25). Entre os estados produtores, os custos médios de energia elétrica variaram de 17,443R\$.ton<sup>-1</sup> no Paraná a 24,795R\$.ton<sup>-1</sup> no

Amazonas. Em relação ao custo médio de energia térmica derivada da queima de GLP, o estado do Piauí (PI) apresentou o menor valor, com  $8,881\text{R}\$.ton^{-1}$ , enquanto o Acre (AC) registrou o maior custo, chegando a  $56,388\text{R}\$.ton^{-1}$ . Considerando os custos médios totais, o Piauí (PI) e o Acre (AC) se destacaram respectivamente de forma positiva e negativa, estabelecendo os limites para o custo total da SBT no Brasil, que variou entre  $23,599\text{R}\$.ton^{-1}$  e  $79,561\text{R}\$.ton^{-1}$ .

Os custos médios de energia elétrica, GLP e total por região do Brasil foram estimados conforme segue: no Sul, os custos médios foram de  $18,514\text{R}\$.ton^{-1}$  para energia elétrica,  $38,127\text{R}\$.ton^{-1}$  para GLP e no total de  $56,641\text{R}\$.ton^{-1}$ ; no Sudeste,  $21,872\text{R}\$.ton^{-1}$ ,  $17,030\text{R}\$.ton^{-1}$  e  $38,902\text{R}\$.ton^{-1}$ , respectivamente; no Centro-Oeste,  $20,749\text{R}\$.ton^{-1}$ ,  $18,980\text{R}\$.ton^{-1}$  e  $39,729\text{R}\$.ton^{-1}$ ; no Norte,  $21,867\text{R}\$.ton^{-1}$ ,  $35,369\text{R}\$.ton^{-1}$  e  $57,236\text{R}\$.ton^{-1}$ ; e no Nordeste,  $17,319\text{R}\$.ton^{-1}$ ,  $11,559\text{R}\$.ton^{-1}$  e  $28,878\text{R}\$.ton^{-1}$ . O ranking do custo médio total por região, do menor para o maior, é: Nordeste, Sudeste, Centro-Oeste, Sul e Norte. A região Nordeste destacou-se pelo menor custo médio, mas cinco dos nove estados que a compõem não são produtores de soja. Por outro lado, a região Centro-Oeste, maior produtora de soja do Brasil, apresentou um médio custo para demanda de energia no processo de secagem. Quando o impacto do custo médio de energia é analisado em relação a uma saca de soja (60 kg), verifica-se uma variação de 1,416 a 4,774 reais por unidade. Isso corresponde a um percentual de 0,99% a 3,79% do valor de mercado do produto, considerando preços que oscilam entre 126 reais e 143 reais (AGROLINK, 2024).

No balanço das emissões de  $\text{CO}_2$  por tonelada de soja submetida à secagem, verificou-se que o estado do Rio Grande do Sul (RS) apresentou a maior faixa de variação, com balanços que oscilaram entre valores negativos e positivos. Esses resultados refletem que, em determinadas áreas do estado, o processo de secagem com reaproveitamento energético do resíduo de soja pode promover o sequestro de  $\text{CO}_2$  da atmosfera, enquanto em outras, sob diferentes condições do ar ambiente, podem ocorrer as emissões. Os dados para o RS variaram entre  $-0,00315$  e  $0,01762$  toneladas de  $\text{CO}_2$  por tonelada de produto submetido a secagem. Em termos práticos, considerando uma saca de soja comercializada (60 kg), isso equivale a um sequestro de até 216,48 gramas de  $\text{CO}_2$  ou a emissões de até 1210,92 gramas de  $\text{CO}_2$ . Já no Brasil, onde o crédito de  $\text{CO}_2$  pode chegar até 0,00989 toneladas pela mesma quantidade de produto submetido à secagem, ter-se-ia um sequestro de 726,41 gramas de  $\text{CO}_2$  por saca.

A utilização da casca de soja na cogeração de energia suscita debates em virtude de um potencial conflito com seu uso consolidado no mercado de nutrição animal. A casca de soja é amplamente valorizada por sua elevada concentração de fibras e nutrientes digestíveis, sendo

um subproduto essencial na formulação de rações para animais (KIM et al., 2021). Seu valor de mercado oscila entre 600 e 900 reais por tonelada, dependendo da localização e da época do ano, especialmente em regiões próximas aos polos de produção, como Mato Grosso e Paraná (AGRÍCOLAS, 2024). No âmbito energético, de acordo com a metodologia empregada neste estudo (Seção 2.5), uma tonelada de casca de soja pode gerar cerca de 1,181MWh de energia elétrica. Considerando a tarifa média de energia elétrica no Brasil, 0,634R\$.kWh<sup>-1</sup>, essa produção corresponderia a um valor financeiro aproximado de 748,75 reais por tonelada. Esses dados revelam que o valor da energia obtida por meio da queima da casca de soja é comparável ao valor de mercado desse subproduto na nutrição animal. Além disso, a aplicação energética apresenta benefícios ambientais importantes, como a redução de emissões de CO<sub>2</sub> e a diversificação da matriz energética.

Os balanços específicos de emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de soja submetida ao processo de secagem variaram entre valores mínimos e máximos para cada região do país. No Sul, os valores oscilaram entre -0,00393 e 0,01762tonCO<sub>2</sub>.ton<sup>-1</sup>, com o Paraná e o Rio Grande do Sul representando as extremidades dessa faixa. No Sudeste, os valores foram de -0,00989 a 0,00012tonCO<sub>2</sub>.ton<sup>-1</sup>, com São Paulo registrando esses extremos. No Centro-Oeste, a variação foi de -0,00961 a 0,00854tonCO<sub>2</sub>.ton<sup>-1</sup>, com o Distrito Federal e Mato Grosso como os estados responsáveis pelos limites. No Norte, a faixa foi de -0,01057 a 0,01418tonCO<sub>2</sub>.ton<sup>-1</sup>, com os valores extremos representados por Acre e Amazonas. No Nordeste, os valores variaram de -0,00893 a 0,01100tonCO<sub>2</sub>.ton<sup>-1</sup>, com Bahia e Piauí marcando as extremidades dessa variação. Em relação às emissões, as maiores quantidades de CO<sub>2</sub> foram observadas nas regiões Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste, Norte e Sul, em ordem crescente. Por outro lado, os maiores sequestros de carbono ocorreram nas regiões Sul, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Norte, também em ordem crescente.

Por fim, estudos anteriores sobre a análise energética de processos de secagem de grão de soja fornecem um contexto interessante. Soponronnarit et al. (2001) modelaram o processo de secagem de soja em leito fluidizado a altas temperaturas (110 - 140°C) com teores de água iniciais de 31 - 49% b.s. Em condições ótimas (140°C, profundidade do leito de 18 cm, velocidade do ar de 2,9m.s<sup>-1</sup> e fração de ar recirculado de 0,9), foi registrado uma demanda de energia de 6,800MJ.kg<sup>-1</sup> de água evaporada, dos quais 15% eram referentes à energia elétrica e 85% à energia térmica, sendo a demanda específica equivalente a 0,36R\$.kg<sup>-1</sup> de água evaporada (1 US\$ ≈ R\$ 6,00).

Já Quequeto et al. (2023) investigaram a secagem industrial de soja em secadores de fluxo misto (Kepler Weber, ADS) alimentados automaticamente por cavacos de madeira, em um sistema com capacidade nominal de  $100\text{ton}\cdot\text{h}^{-1}$ . Os principais resultados obtidos indicaram um teor de água médio para os grãos úmidos de 16,59% b.u. e para os grãos secos de 12,65% b.u., sendo a demanda específica de energia no processo de secagem igual a  $8,100\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  de água evaporada.

No presente estudo, em que o processo de secagem foi realizado em camada espessa a baixa temperatura utilizando-se de um silo-secador com fluxo de ar ascendente e produto estacionário, as demandas específicas de energia elétrica, térmica e total variaram, conforme dados apresentados na Tabela 26, entre  $1,034$  e  $1,845\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $0,231$  e  $4,001\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , e  $1,266$  e  $5,822\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectivamente. Esses valores consideram que, ao término do processo, cada tonelada de produto submetida à secagem teve  $80,46\text{kg}$  de água removidos, atingindo um teor final de água de 13%. O custo médio específico da energia total demandada foi estimado em  $0,527\text{R}\$.\text{kg}^{-1}$  de água evaporada.

Embora os métodos e condições de secagem sejam distintos entre os estudos, os resultados indicam que o processo de secagem a baixa temperatura utilizado neste trabalho apresentou maior eficiência energética quando comparado à estratégia de secagem em leito fluidizado a altas temperaturas proposta por Soponronnarit et al. (2001) e também em relação à secagem em fluxo misto apresentada por Quequeto et al. (2023).

Tabela 31 - Dados tarifários, demanda específica, custo médio e balanço de emissões por tonelada de soja submetida à secagem.

(continua)

Região	Estado	Tarifa		Demanda Específica		Custo Médio (R\$.ton <sup>-1</sup> )			Balanço de Emissões	
		Energia Elétrica	GLP	Energia Elétrica	GLP	Energia Elétrica	GLP	Total	Mín	Máx
		(R\$.kWh <sup>-1</sup> )	(R\$.kg <sup>-1</sup> )	(kWh.ton <sup>-1</sup> )	(kg.ton <sup>-1</sup> )				(tonCO <sub>2</sub> .ton <sup>-1</sup> )	(tonCO <sub>2</sub> .ton <sup>-1</sup> )
Sul	Paraná	0,486	7,509	35,868	3,961	17,443	29,745	47,187	-0,00393	0,01008
	Rio Grande do Sul	0,492	8,135	37,270	4,900	18,342	39,867	58,209	-0,00315	0,01762
	Santa Catarina	0,518	8,738	38,171	5,123	19,757	44,768	64,525	-0,00284	0,01401
Sudeste	Espírito Santo	0,573	7,362	30,271	1,738	17,360	12,799	30,159	-	-
	Minas Gerais	0,610	7,698	31,975	1,922	19,496	14,794	34,290	-0,00988	-0,00499
	Rio de Janeiro	0,934	7,128	32,900	2,565	30,724	18,281	49,005	-	-
	São Paulo	0,586	7,753	33,942	2,869	19,907	22,247	42,154	-0,00989	0,00012
Centro-Oeste	Distrito Federal	0,665	7,335	31,206	1,419	20,756	10,412	31,168	-0,00961	-0,00702
	Goiás	0,574	7,915	30,771	1,863	17,660	14,746	32,406	-0,00620	0,00323
	Mato Grosso	0,697	8,766	32,014	3,068	22,329	26,898	49,228	-0,00532	0,00854
	Mato Grosso do Sul	0,671	8,285	33,157	2,880	22,252	23,862	46,115	-0,00942	-0,00425
Norte	Acre	0,670	8,925	34,570	6,318	23,172	56,388	79,561	-0,01057	-0,00403
	Amapá	0,766	8,722	32,076	3,490	24,573	30,437	55,010	-0,00207	0,00962
	Amazonas	0,744	9,405	33,339	4,581	24,795	43,086	67,881	-0,00072	0,01418
	Pará	0,766	8,252	32,021	3,324	24,532	27,424	51,956	-0,00435	0,01065

Tabela 31 - Dados tarifários, demanda específica, custo médio e balanço de emissões por tonelada de soja submetida à secagem.

(conclusão)

Região	Estado	Tarifa		Demanda Específica		Custo Médio (R\$.ton <sup>-1</sup> )			Balanço de Emissões	
		Energia Elétrica	GLP	Energia Elétrica	GLP	Energia Elétrica	GLP	Total	Mín	Máx
		(R\$.kWh <sup>-1</sup> )	(R\$.kg <sup>-1</sup> )	(kWh.ton <sup>-1</sup> )	(kg.ton <sup>-1</sup> )				(tonCO <sub>2</sub> .ton <sup>-1</sup> )	(tonCO <sub>2</sub> .ton <sup>-1</sup> )
Norte	Rondônia	0,578	9,202	33,413	4,177	19,321	38,438	57,759	-0,00352	0,00988
	Roraima	0,560	9,833	32,168	3,577	18,025	35,171	53,196	-0,00109	0,00602
	Tocantins	0,648	9,218	28,799	1,805	18,652	16,637	35,289	-0,00584	0,00866
Nordeste	Alagoas	0,708	7,215	28,731	1,960	20,342	14,137	34,480	-0,00547	0,01128
	Bahia	0,631	8,355	29,143	1,615	18,392	13,494	31,886	-0,00893	0,00173
	Ceará	0,598	7,667	27,213	1,340	16,274	10,277	26,550	-	-
	Maranhão	0,579	7,877	29,587	2,043	17,128	16,090	33,218	-0,00596	0,01069
	Paraíba	0,494	7,805	27,398	1,288	13,542	10,057	23,599	-	-
	Pernambuco	0,633	6,831	27,764	1,289	17,580	8,803	26,382	-	-
	Piauí	0,690	7,410	26,906	1,199	18,573	8,881	27,454	-0,00592	0,01100
	Rio Grande do Norte	0,622	7,975	26,186	1,015	16,293	8,094	24,387	-	-
	Sergipe	0,625	7,536	28,404	1,884	17,748	14,198	31,946	-	-

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

#### 4.8 Conclusões sobre o Estudos de Caso 2

- As análises espaciais e estatísticas identificaram variações significativas nas demandas de energia elétrica e térmica durante a secagem a baixa temperatura (SBT) de soja ao longo das safras simuladas, comportamento semelhante ao observado para o arroz.
- O estado do Mato Grosso, maior produtor de soja do Brasil, apresentou demanda específica classificada como de média a baixa, variando entre 42,16 e 88,26kWh por tonelada de produto fresco (submetido à secagem).
- A demanda total de energia para o SBT de soja no Brasil foi estimada entre 5,320 e 9,370TWh, com a região Centro-Oeste contribuindo com 42,24% a 44,24% desse total, por ser a maior produtora.
- As emissões de CO<sub>2</sub> variaram de -594,8 mil a 777,5 mil toneladas, considerando o reaproveitamento energético da casca de soja no processo, que se mostrou competitivo financeiramente quando comparado ao mercado de nutrição animal.
- O custo médio de energia representou de 0,99% a 3,79% do valor de mercado da soja seca e limpa e o custo médio específico foi de 0,527R\$.kg<sup>-1</sup> de água evaporada.
- A demanda específica de energia total para a secagem foi estimada entre 1,266 e 5,822MJ.kg<sup>-1</sup>, mostrando-se mais eficiente em comparação às estratégias de secagem por leito fluidizado e fluxos mistos.
- O Brasil apresenta boas condições para o SBT de soja, com custos energéticos classificados como médios a baixos, especialmente na região Centro-Oeste.
- As condições de ar mais adequadas para a secagem da soja ocorrem, em ordem crescente de eficiência, nas regiões Norte, Sul, Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste.
- Os resultados e análises deste estudo de caso se mostraram relevantes para o planejamento estratégico do processo de secagem a baixa temperatura de soja no Brasil.

## 5 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS ESTUDOS DE CASO 1 E 2

Os resultados obtidos entre as safras apresentaram variações significativas em apenas uma pequena parte dos estados brasileiros, conforme demonstrado pela ANOVA realizada nos Estudos de Caso 1 e 2. Assim, foi adotada a safra de 2018/19 como padrão para a análise comparativa, uma vez que esta apresentou a maior média de estações meteorológicas com dados convergentes para o modelo de Thompson, totalizando 427 estações para as simulações de secagem do arroz e 423 para as da soja no período de fevereiro a junho (Tabelas 6 e 19).

A aplicação da metodologia descrita na Seção 2.8 deste estudo resultou nas distribuições das áreas onde a eficiência energética foi maior para a secagem de arroz (representadas em branco no mapa) ou de soja (representadas em preto no mapa), conforme ilustrado na Figura 32. Observa-se uma expansão das áreas favoráveis à secagem de arroz da região Norte para a região Sul ao longo dos meses, desde fevereiro (Figura 33a) até junho (Figura 33e).

Na região Sul, principal produtora de arroz do Brasil, o percentual de áreas onde a secagem do arroz foi mais eficiente em relação à da soja apresentou uma tendência de aumento significativo ao longo do período analisado. Esse percentual passou de 0,34% em fevereiro para 3,20% em março, teve um aumento expressivo de 3,20% para 32,42% entre março e abril, continuou subindo para 39,76% em maio, mas apresentou um declínio para 27,37% em junho (crescimento foi particularmente marcante nos dois primeiros meses do outono, abril e maio). Por outro lado, na região Norte, as áreas indicadas para a secagem do arroz em relação à da soja demonstraram comportamento oscilatório. O percentual reduziu de 11,30% em fevereiro para 6,82% em março, aumentou novamente para 16,60% em abril, caiu para 4,95% em maio e voltou a crescer ligeiramente para 5,68% em junho (Tabela 32).

Na região Centro-Oeste, a maior produtora de soja do Brasil, o percentual de áreas indicadas como mais eficientes energeticamente para a secagem da soja variou entre 88,28% em abril e 99,43% em junho, com uma média de 94,23%. Já nas regiões Sudeste e Nordeste, os percentuais ficaram entre 94,97% e 99,99%, e entre 98,05% e 99,67%, respectivamente (Tabela 32). Em todas as regiões do país, os percentuais de áreas consideradas energeticamente eficientes para a secagem da soja foram superiores aos das áreas indicadas para a secagem do arroz. Isso evidencia uma tendência de maior eficiência energética no processo de secagem da soja em comparação ao arroz em todas as regiões analisadas, em razão das propriedades físicas e térmicas dos grãos, principalmente o calor específico.

No entanto, os estados do Acre e Rondônia, localizados na Região Norte, apresentaram, em alguns dos meses simulados, um percentual de áreas superior a 50%, indicando que a demanda específica de energia total exigido na secagem de arroz foi inferior ao da soja, ou seja, a secagem do arroz foi mais eficiente do que a da soja na maior parte do estado. Esse fenômeno foi observado no Acre nos meses de fevereiro, março, abril e junho, com percentuais de 59,70%, 54,61%, 91,07% e 80,74%, respectivamente. Em Rondônia, esse padrão foi identificado no mês de abril, com 72,58%, conforme ilustrado na Tabela 32.

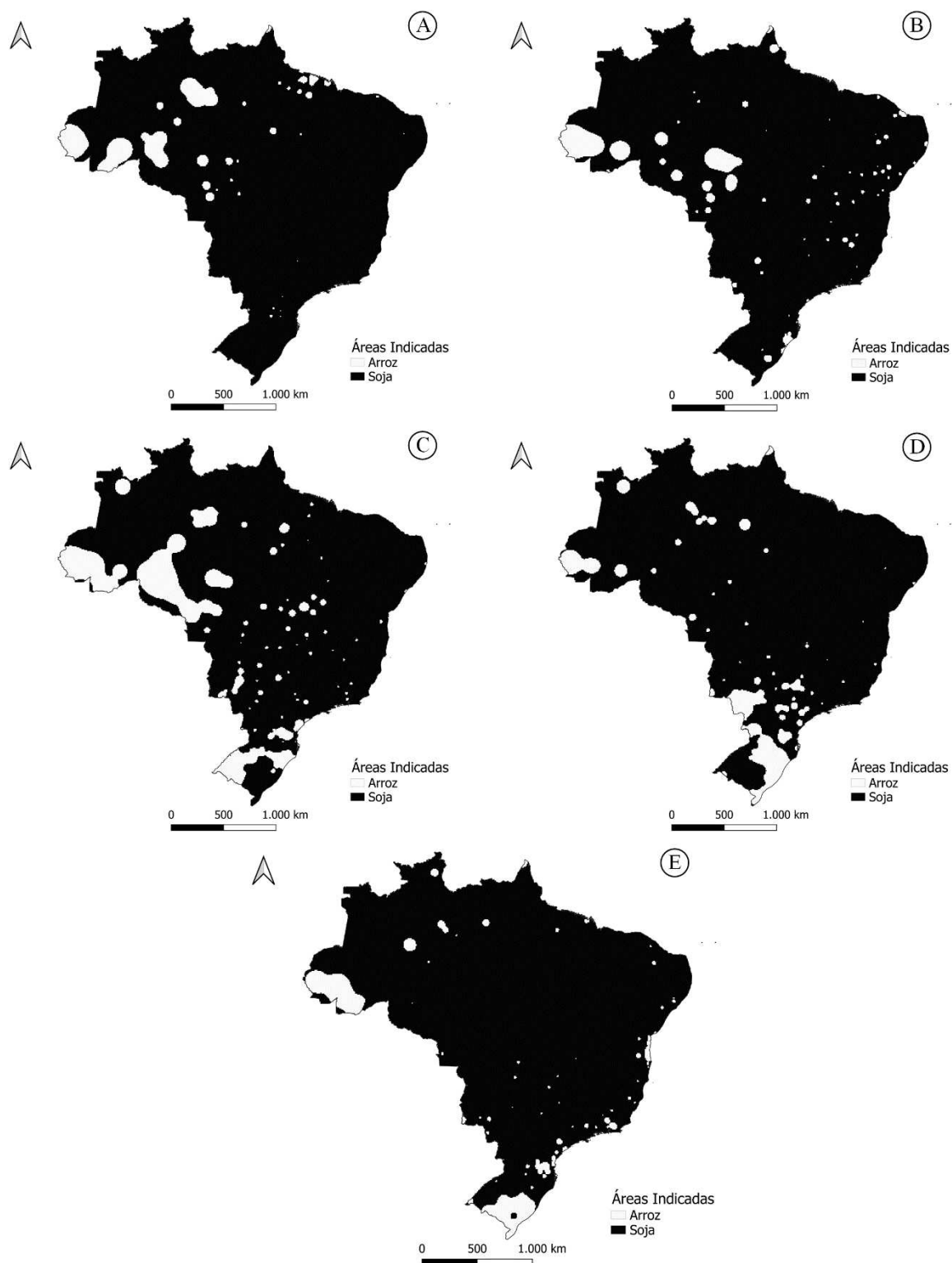


Figura 33 - Evolução, de fevereiro a junho (“a” até “e”), das áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maiores eficiências energéticas quando comparadas entre si.

Dos 135 casos investigados, correspondentes às combinações entre unidades da federação e meses simulados, 93 foram alocados nos cenários propostos, uma vez que, para essa alocação, era necessário que houvesse dados de área tanto para a soja quanto para o arroz.

Em 42 desses casos, o percentual de áreas indicadas para a secagem da soja foi de 100%. As características observadas para cada cenário foram descritas a seguir:

- Cenário 1: 7,53% dos casos; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de arroz foi mais eficiente: 23,58°C, 74,91% e 942,49kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem do arroz: 37,879; 44,877 e 82,755kWh.ton<sup>-1</sup>; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de soja foi mais eficiente: 24,31°C, 78,03% e 961,60kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem da soja: 33,511; 40,330 e 73,840kWh.ton<sup>-1</sup>.
- Cenário 2: 1,08% dos casos; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de arroz foi mais eficiente: 24,16°C, 78,87% e 967,93 kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem do arroz: 37,703; 54,433 e 92,136kWh.ton<sup>-1</sup>; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de soja foi mais eficiente: 24,45°C, 79,80% e 966,93 kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem da soja: 34,350; 45,450 e 79,800kWh.ton<sup>-1</sup>.
- Cenário 3: 4,30% dos casos; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de arroz foi mais eficiente: 26,18°C, 66,09% e 972,01kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem do arroz: 33,409; 29,305 e 62,715kWh.ton<sup>-1</sup>; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de soja foi mais eficiente: 25,36°C, 72,05% e 975,92kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem da soja: 29,957; 30,363 e 60,320kWh.ton<sup>-1</sup>.
- Cenário 4: 19,35% dos casos; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de arroz foi mais eficiente: 25,87°C, 67,65% e 973,78 kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem do arroz: 34,455; 29,172 e 63,627kWh.ton<sup>-1</sup>; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de soja foi mais eficiente: 24,75°C, 73,51% e 964,24kPa; demanda específica

- média de energia elétrica, térmica e total para secagem da soja: 31,288; 30,971 e 62,258kWh.ton<sup>-1</sup>.
- Cenário 5: 19,35% dos casos; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de arroz foi mais eficiente: 21,55°C, 81,68% e 943,53 kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem do arroz: 39,317; 58,136 e 97,453kWh.ton<sup>-1</sup>; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de soja foi mais eficiente: 22,95°C, 78,07% e 962,34kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem da soja: 33,871; 43,745 e 77,616kWh.ton<sup>-1</sup>.
  - Cenário 6: 25,81% dos casos; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de arroz foi mais eficiente: 23,00°C, 87,48% e 985,55kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem do arroz: 37,562; 73,824 e 111,386kWh.ton<sup>-1</sup>; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de soja foi mais eficiente: 23,77°C, 80,52% e 976,62kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem da soja: 33,758; 54,374 e 88,132kWh.ton<sup>-1</sup>.
  - Cenário 7: 2,15% dos casos; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de arroz foi mais eficiente: 22,94°C, 79,31% e 975,03kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem do arroz: 37,340; 33,689 e 71,029kWh.ton<sup>-1</sup>; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de soja foi mais eficiente: 22,35°C, 78,21% e 985,76kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem da soja: 32,905; 51,469 e 84,374kWh.ton<sup>-1</sup>.
  - Cenário 8: 20,43% dos casos; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de arroz foi mais eficiente: 25,23°C, 83,12% e 994,23kPa; demanda específica média de energia elétrica, térmica e total para secagem do arroz: 36,441; 58,737 e 95,178kWh.ton<sup>-1</sup>; dados médios de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica nas regiões onde a secagem de arroz foi mais eficiente: 24,69°C, 78,62% e 979,05kPa; demanda específica

média de energia elétrica, térmica e total para secagem da soja: 32,779; 47,544 e 80,323kWh.ton<sup>-1</sup>.

Nota-se que: (i) independentemente das condições do ar ambiente que delimitam os cenários, a demanda específica média de energia elétrica demandada no processo de secagem a baixa temperatura para soja é inferior ao do arroz; (ii) a demanda específica média de energia térmica demandada na secagem da soja é superior à exigida para o arroz nos cenários 3, 4 e 7, quando a temperatura média de bulbo seco é inferior nas áreas indicadas para a soja em comparação com as áreas para o arroz; (iii) o cenário 7 é o único em que a demanda específica média de energia total para a secagem da soja foi superior ao do arroz, com condições médias do ar ambiente semelhantes para as duas áreas; (iv) em 45,16% dos casos, nos cenários 5 e 6, as áreas com maior eficiência para a secagem da soja apresentaram uma umidade relativa do ar menor do que as áreas com maior eficiência energética para arroz; (v) na parcela citada em (iv), a temperatura de bulbo seco nas áreas destinadas à soja foi superior à das áreas indicadas para o arroz, sugerindo que, em condições climáticas de alta umidade relativa e baixa temperatura de bulbo seco, a secagem do arroz tende a ser mais eficiente energeticamente do que a da soja.

As características das áreas indicadas para a secagem de arroz e soja foram apresentadas por estado nas Tabelas 33 a 38. Alguns estados se destacaram por apresentarem menores e maiores demandas médias de energia elétrica, térmica e total, conforme descrito a seguir:

- Energia elétrica: a demanda específica média em kWh.ton<sup>-1</sup> variou entre 26,25 (Paraíba, mês de fevereiro, cenário 4) e 41,91 (Rio de Janeiro, mês de abril, cenário 5), para a secagem de arroz, e de 24,44 (Piauí, mês de junho) a 39,24 (Santa Catarina, mês de junho, cenário 6), para a secagem de soja.
- Energia térmica: a demanda específica média em kWh.ton<sup>-1</sup> variou entre 0,22 (Paraíba, mês de fevereiro, cenário 4) e 98,11 (Paraná, mês de junho, cenário 6), para a secagem de arroz, e de 4,51 (Distrito Federal, mês de fevereiro) e 86,82 (Santa Catarina, mês de maio, cenário 5), para a secagem da soja.
- Energia total: a demanda específica média em kWh.ton<sup>-1</sup> variou entre 26,47 (Paraíba, mês de fevereiro, cenário 4) e 139,10 (Paraná, mês de junho, cenário 6), para a secagem de arroz, e de 30,20 (Piauí, mês de junho) e 125,90 (Santa Catarina, mês de maio, cenário 5), para a secagem da soja.

Tabela 32 - Percentual de áreas por estado onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(continua)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Sul	Paraná	0,90	99,10	0,11	99,89	12,60	87,40	30,29	69,71	3,64	96,36
	Rio Grande do Sul	0,00	100,00	3,64	96,36	47,12	52,88	43,44	56,56	46,17	53,83
	Santa Catarina	0,23	99,77	8,21	91,79	28,55	71,45	48,09	51,91	19,08	80,92
Sudeste	Espírito Santo	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	1,75	98,25	1,50	98,50
	Minas Gerais	0,00	100,00	1,69	98,31	1,11	98,89	0,38	99,62	1,27	98,73
	Rio de Janeiro	0,00	100,00	1,56	98,44	2,08	97,92	0,00	100,00	15,32	84,68
	São Paulo	0,05	99,95	0,28	99,72	5,10	94,90	17,26	82,74	2,71	97,29
Centro-Oeste	Distrito Federal	0,00	100,00	0,00	100,00	21,82	78,18	0,00	100,00	0,00	100,00
	Goiás	0,00	100,00	0,76	99,24	4,45	95,55	0,90	99,10	0,56	99,44
	Mato Grosso	4,34	95,66	13,31	86,69	15,29	84,71	1,22	98,78	0,13	99,87
	Mato Grosso do Sul	0,00	100,00	2,29	97,71	9,60	90,40	22,68	77,32	1,65	98,35
Norte	Acre	59,70	40,30	54,61	45,39	91,07	8,93	38,75	61,25	80,74	19,26
	Amapá	1,90	98,10	8,39	91,61	0,00	100,00	3,89	96,11	1,90	98,10
	Amazonas	16,09	83,91	7,77	92,23	17,97	82,03	6,50	93,50	4,46	95,54
	Pará	2,71	97,29	1,34	98,66	2,47	97,53	1,34	98,66	0,54	99,46
	Rondônia	20,49	79,51	8,46	91,54	72,58	27,42	1,27	98,73	0,05	99,95

Tabela 32 - Percentual de áreas por estado onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(conclusão)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Norte	Roraima	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	2,81	97,19
	Tocantins	0,17	99,83	0,91	99,09	5,79	94,21	0,00	100,00	0,00	100,00
Nordeste	Alagoas	0,00	100,00	3,51	96,49	0,00	100,00	3,07	96,93	4,82	95,18
	Bahia	0,00	100,00	2,33	97,67	0,93	99,07	0,06	99,94	3,19	96,81
	Ceará	0,49	99,51	5,40	94,60	0,00	100,00	0,00	100,00	1,31	98,69
	Maranhão	1,29	98,71	0,07	99,93	0,29	99,71	0,00	100,00	0,59	99,41
	Paraíba	0,22	99,78	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
	Pernambuco	0,00	100,00	4,83	95,17	0,74	99,26	0,25	99,75	0,00	100,00
	Piauí	0,00	100,00	0,00	100,00	0,15	99,85	0,00	100,00	0,00	100,00
	Rio Grande do Norte	0,00	100,00	4,19	95,81	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
	Sergipe	0,00	100,00	4,40	95,60	2,75	97,25	0,00	100,00	2,75	97,25

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Tabela 33 - Umidade relativa do ar média (%) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(continua)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Sul	Paraná	79,73	76,05	77,95	79,32	85,06	80,91	84,95	86,15	93,55	79,44
	Rio Grande do Sul	-	77,15	79,28	79,13	86,28	86,56	88,08	86,93	83,42	83,41
	Santa Catarina	90,02	79,53	84,48	82,00	86,88	86,03	89,39	89,02	92,04	83,90
Sudeste	Espírito Santo	-	68,69	-	70,49	-	70,62	72,81	75,37	77,20	76,47
	Minas Gerais	-	70,08	72,29	74,00	74,83	74,71	77,05	74,99	78,38	69,85
	Rio de Janeiro	-	70,11	72,95	76,70	76,09	74,26	-	77,73	82,82	79,69
	São Paulo	76,61	73,15	86,02	77,52	75,73	75,98	80,07	81,36	84,70	74,31
Centro-Oeste	Distrito Federal	-	66,30	-	74,27	73,47	78,62	-	74,79	-	64,97
	Goiás	-	71,97	68,91	76,51	73,30	76,69	78,11	75,31	60,15	63,16
	Mato Grosso	89,70	80,64	84,51	81,92	83,25	81,91	85,20	79,33	51,29	69,64
	Mato Grosso do Sul	-	74,56	78,87	79,80	76,28	80,22	82,62	81,90	79,43	73,19
Norte	Acre	90,70	87,50	91,29	87,66	90,67	87,78	90,61	86,53	88,26	84,84
	Amapá	88,90	81,01	83,81	81,85	-	81,80	89,81	81,73	90,21	79,48
	Amazonas	89,18	83,59	89,75	83,69	86,90	84,69	89,31	83,62	85,25	80,06
	Pará	89,17	82,28	83,59	81,50	82,78	81,90	83,47	80,66	80,80	73,98
	Piauí	89,44	83,66	85,91	84,89	82,73	83,89	84,50	82,60	87,00	78,19

Tabela 33 - Umidade relativa do ar média (%) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(conclusão)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Norte	Rondônia	-	76,98	-	76,87	-	76,77	-	82,48	81,92	79,26
	Roraima	88,05	75,50	74,31	77,28	71,76	77,12	-	72,30	-	58,89
Nordeste	Alagoas	-	68,47	63,42	67,25	-	70,72	65,89	68,95	69,48	75,80
	Bahia	-	66,45	64,88	70,28	75,33	72,92	57,92	70,04	80,60	66,81
	Ceará	86,40	72,89	76,46	74,79	-	76,60	-	69,78	53,72	61,89
	Maranhão	89,20	78,78	82,86	78,78	77,85	79,27	-	74,73	79,31	65,10
	Paraíba	47,96	65,70	-	66,58	-	70,79	-	65,35	-	64,43
	Pernambuco	-	63,78	66,52	66,78	74,37	70,43	44,21	65,61	-	67,68
	Rio Grande do Norte	-	72,98	-	74,53	72,86	75,39	-	67,64	-	59,75
	Sergipe	-	66,86	74,39	70,38	-	74,06	-	65,74	-	62,51
	Tocantins	-	64,78	70,54	69,50	66,40	72,00	-	70,58	88,46	73,60

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Tabela 34 - Temperatura de bulbo seco (°C) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(continua)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Sul	Paraná	21,24	24,08	20,46	22,23	20,76	22,06	19,18	19,00	15,88	18,24
	Rio Grande do Sul	-	23,91	21,30	21,31	19,25	19,91	17,02	16,66	16,67	16,45
	Santa Catarina	19,83	22,69	20,15	20,97	19,60	19,98	16,77	17,67	15,32	16,02
Sudeste	Espírito Santo	-	26,94	-	26,48	-	26,78	26,01	24,54	20,05	22,10
	Minas Gerais	-	25,30	23,89	24,24	23,70	24,33	21,47	22,41	19,10	20,31
	Rio de Janeiro	-	25,91	26,31	24,64	20,95	25,31	-	23,10	18,01	20,83
	São Paulo	25,95	24,84	23,93	23,39	23,86	23,48	21,22	20,27	18,38	19,07
Centro-Oeste	Distrito Federal	-	24,72	-	23,62	23,75	22,95	-	21,65	-	19,64
	Goiás	-	25,57	23,37	24,52	25,87	24,35	21,36	22,65	22,03	21,52
	Mato Grosso	24,55	25,51	25,04	25,02	25,43	25,01	22,76	23,87	28,37	23,33
	Mato Grosso do Sul	-	26,29	24,16	24,45	25,08	23,93	21,07	21,40	19,54	20,99
Norte	Acre	24,17	24,40	23,93	24,33	24,31	24,39	23,20	22,84	22,22	22,59
	Amapá	25,38	25,98	26,27	25,83	-	26,24	25,64	26,02	25,62	25,45
	Amazonas	25,02	25,23	24,41	25,30	25,50	25,30	24,42	24,34	23,85	24,18
	Pará	24,97	25,55	25,36	25,79	25,72	26,02	25,11	25,62	26,43	25,38
	Rondônia	24,55	25,11	25,10	24,87	25,50	24,59	25,34	23,87	23,95	23,40

Figura 34 - Temperatura de bulbo seco (°C) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(conclusão)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Norte	Roraima	-	25,87	-	25,87	-	26,21	-	24,95	25,26	24,81
	Tocantins	24,11	26,26	25,39	26,11	26,10	26,26	-	26,29	-	25,16
Nordeste	Alagoas	-	28,04	29,59	28,40	-	28,23	28,51	27,38	25,42	24,99
	Bahia	-	27,05	26,85	26,39	26,07	26,30	25,92	25,47	22,79	23,42
	Ceará	26,22	27,16	27,68	27,18	-	27,14	-	27,13	27,38	26,14
	Maranhão	24,89	26,28	25,56	26,50	26,90	26,60	-	26,94	27,38	26,51
	Paraíba	28,81	27,45	-	27,42	-	27,15	-	26,87	-	25,52
	Pernambuco	-	27,41	28,13	26,95	28,06	26,80	26,80	26,40	-	24,54
	Piauí	-	27,10	-	26,95	26,57	26,92	-	27,14	-	26,06
	Rio Grande do Norte	-	28,11	28,11	27,90	-	27,68	-	27,92	-	26,74
Sergipe	-	28,76	28,86	28,05	28,94	28,13	-	27,41	23,89	25,33	

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Tabela 35 - Pressão atmosférica média (kPa) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(continua)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Sul	Paraná	916,76	946,27	940,80	948,33	943,01	949,49	947,85	946,97	957,58	951,84
	Rio Grande do Sul	-	970,30	972,07	973,85	967,88	974,50	960,15	980,50	986,70	965,52
	Santa Catarina	916,30	946,31	948,32	944,86	932,00	944,23	931,79	947,52	959,31	944,76
Sudeste	Espírito Santo	-	979,87	-	985,83	-	983,97	996,20	981,39	953,72	988,84
	Minas Gerais	-	939,85	922,83	941,64	929,61	941,58	921,42	941,45	938,64	945,95
	Rio de Janeiro	-	967,63	993,65	969,48	902,87	970,88	-	970,55	934,78	981,12
	São Paulo	953,25	945,63	1006,32	947,85	958,59	946,76	949,33	947,56	964,94	952,65
Centro-Oeste	Distrito Federal	-	902,89	-	904,11	905,41	903,99	-	904,30	-	907,52
	Goiás	-	939,46	899,19	940,72	954,20	939,96	918,74	941,20	944,66	944,12
	Mato Grosso	971,42	966,53	974,20	966,23	970,20	966,37	963,96	967,46	984,71	970,30
	Mato Grosso do Sul		964,06	967,93	966,93	962,59	966,60	966,78	966,19	984,00	969,29
Norte	Acre	985,11	983,33	987,61	984,58	985,95	983,53	987,13	983,16	988,00	985,29
	Amapá	1007,01	994,92	1007,50	994,75	-	994,88	1003,96	994,58	1007,42	996,88
	Amazonas	996,16	986,55	991,33	990,20	993,90	988,29	997,01	988,10	993,67	990,20
	Pará	999,76	987,58	983,38	988,88	986,14	987,73	987,52	986,44	1002,84	988,47
	Rondônia	993,11	977,09	988,88	980,75	981,89	974,57	1000,49	979,32	999,17	982,09

Tabela 35 - Pressão atmosférica média (kPa) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(conclusão)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Norte	Roraima	-	988,99	-	990,05	-	991,33	-	991,81	1003,29	993,59
	Alagoas	-	988,15	1002,09	988,20	-	988,91	1001,50	989,01	987,78	989,21
Nordeste	Bahia	-	964,94	955,50	965,44	952,53	965,61	967,44	964,96	994,88	967,24
	Ceará	999,79	982,75	995,36	986,19	-	986,33	-	982,85	982,14	982,46
	Maranhão	1003,74	988,31	995,95	989,13	988,97	988,32	-	987,87	1006,62	990,52
	Paraíba	983,42	972,98	-	974,95	-	975,48	-	975,33	-	977,65
	Pernambuco	-	968,13	982,83	967,83	1009,16	968,54	976,34	969,37	-	971,66
	Piauí	-	978,19	-	978,94	966,32	978,95	-	977,88	-	980,19
	Rio Grande do Norte	-	987,02	1001,03	989,71	-	991,61	-	991,36	-	993,71
	Sergipe	-	990,20	989,91	991,03	1008,97	990,53	-	991,33	985,89	993,66
Tocantins	987,25	971,03	938,40	973,31	962,03	973,75	-	972,34	-	974,55	

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Tabela 36 - Demanda específica média de energia elétrica (kWh.ton<sup>-1</sup>) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(continua)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Sul	Paraná	37,78	32,48	37,03	35,62	39,81	34,96	40,24	38,02	40,99	36,71
	Rio Grande do Sul	-	32,60	38,87	35,03	39,64	36,78	40,92	38,66	40,64	38,90
	Santa Catarina	40,70	34,88	40,36	37,00	40,80	37,50	41,82	39,08	41,36	39,24
Sudeste	Espírito Santo	-	27,87	-	28,79	-	29,10	36,49	31,60	38,65	33,56
	Minas Gerais	-	30,53	39,13	32,43	38,68	33,04	39,90	33,59	40,62	32,72
	Rio de Janeiro	-	29,56	36,29	33,09	41,91	31,84	-	33,85	41,60	35,20
	São Paulo	34,39	31,54	36,89	34,18	37,68	33,52	39,50	36,90	40,01	34,93
Centro-Oeste	Distrito Federal	-	31,08	-	34,08	40,65	36,12	-	34,82	-	31,93
	Goiás	-	31,49	38,97	33,35	36,92	33,29	39,28	33,59	36,22	29,24
	Mato Grosso	37,23	33,39	37,40	34,25	37,22	33,95	38,45	33,85	27,83	30,53
	Mato Grosso do Sul	-	30,79	37,70	34,35	37,67	33,98	39,20	35,86	39,02	32,78
Norte	Acre	36,74	33,88	37,00	34,53	36,99	34,60	37,32	35,11	37,31	34,15
	Amapá	36,07	33,15	36,22	33,58	-	33,72	36,06	33,47	35,78	32,26
	Amazonas	36,36	33,23	36,79	33,86	36,60	33,96	36,79	34,19	36,79	33,12
	Pará	36,46	33,40	37,05	33,62	36,79	33,74	36,81	33,32	36,35	31,05

Tabela 36 - Demanda específica média de energia elétrica (kWh.ton<sup>-1</sup>) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(conclusão)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Norte	Rondônia	36,58	33,83	36,98	34,50	36,93	34,20	36,74	34,57	37,00	33,20
	Roraima	-	30,77	-	31,27	-	30,88	-	33,95	36,66	33,06
	Tocantins	37,25	31,74	38,14	32,62	36,55	32,38	-	30,14	-	24,90
Nordeste	Alagoas	-	27,31	31,09	26,50	-	28,45	32,98	27,61	33,79	31,51
	Bahia	-	27,27	34,07	29,09	37,85	30,82	32,74	29,59	37,20	29,14
	Ceará	35,72	29,40	35,01	30,34	-	31,73	-	28,19	28,10	25,25
	Maranhão	36,26	32,63	36,92	32,82	35,99	32,92	-	30,87	35,98	26,55
	Paraíba	26,25	26,50	-	27,11	-	29,10	-	26,54	-	27,08
	Pernambuco	-	25,80	33,43	27,43	34,04	29,29	26,76	27,00	-	28,81
	Piauí	-	30,02	-	31,05	35,69	31,39	-	27,44	-	24,44
	Rio Grande do Norte	-	26,33	34,40	28,32	-	29,90	-	25,83	-	25,28
Sergipe	-	25,28	33,76	27,15	32,20	29,09	-	28,18	37,16	30,16	

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Tabela 37 - Demanda específica média de energia térmica (kWh.ton<sup>-1</sup>) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(continua)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Sul	Paraná	66,51	38,64	69,70	46,05	72,91	52,50	40,24	74,81	98,11	53,15
	Rio Grande do Sul	-	37,00	59,15	48,49	77,12	75,22	40,92	80,39	74,86	66,01
	Santa Catarina	86,11	46,64	72,84	57,39	78,11	72,80	41,82	86,82	95,88	68,46
Sudeste	Espírito Santo	-	11,15	-	16,64	-	14,50	36,49	36,03	52,52	36,13
	Minas Gerais	-	22,70	35,10	27,92	42,63	27,71	39,90	34,73	56,95	24,12
	Rio de Janeiro	-	19,19	30,18	33,53	47,97	25,46	-	37,93	69,38	47,07
	São Paulo	47,39	31,49	74,13	37,45	45,73	34,00	39,50	55,77	73,50	35,28
Centro-Oeste	Distrito Federal	-	4,51	-	22,57	42,48	40,18	-	32,89	-	11,06
	Goiás	-	25,33	26,25	35,39	39,16	37,40	39,28	33,93	3,04	12,14
	Mato Grosso	82,46	53,45	69,80	55,75	65,68	55,04	38,45	47,56	2,72	22,69
	Mato Grosso do Sul	-	30,57	54,43	45,45	47,24	49,85	39,20	57,23	60,03	33,17
Norte	Acre	84,91	80,07	86,35	79,00	84,64	79,02	37,32	76,14	80,19	73,06
	Amapá	80,65	51,87	68,13	56,61	-	53,71	36,06	56,83	83,47	51,86
	Amazonas	81,23	66,21	82,40	63,13	75,32	66,66	36,79	64,83	72,45	55,22
	Pará	81,68	59,00	67,50	53,72	63,97	54,84	36,81	51,26	61,16	33,94

Tabela 37 - Demanda específica média de energia térmica (kWh.ton<sup>-1</sup>) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(conclusão)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Norte	Rondônia	82,08	65,75	73,53	68,68	64,48	62,70	36,74	59,96	77,24	49,60
	Roraima	-	43,09	-	39,69	-	43,96	-	57,31	64,15	52,42
	Tocantins	79,38	33,17	40,92	34,46	32,71	35,50	-	20,85	-	7,74
Nordeste	Alagoas	-	17,68	5,60	13,94	-	17,47	32,98	16,71	35,22	38,53
	Bahia	-	12,89	17,59	21,86	42,84	20,73	32,74	20,30	60,13	20,07
	Ceará	72,90	28,36	41,55	29,57	-	27,76	-	14,84	17,18	11,22
	Maranhão	81,59	42,85	66,32	41,98	50,31	43,05	-	27,70	57,11	11,37
	Paraíba	0,22	10,19	-	12,52	-	14,78	-	8,39	-	14,46
	Pernambuco	-	9,99	16,58	13,44	34,64	15,50	26,76	11,19	-	19,45
	Piauí	-	25,53	-	26,66	32,35	27,76	-	14,17	-	5,76
	Rio Grande do Norte	-	10,25	36,99	20,47	-	20,21	-	5,93	-	10,44
Sergipe	-	5,80	26,46	22,55	15,88	19,38	-	17,80	80,44	35,55	

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Tabela 38 - Demanda específica média de energia total (kWh.ton<sup>-1</sup>) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(continua)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Sul	Paraná	104,29	71,12	106,73	81,67	112,72	87,46	80,48	112,83	139,10	89,86
	Rio Grande do Sul	-	69,60	98,01	83,51	116,76	112,00	81,84	119,05	115,50	104,91
	Santa Catarina	126,81	81,52	113,20	94,40	118,92	110,30	83,63	125,90	137,24	107,70
Sudeste	Espírito Santo	-	39,03	-	45,43	-	43,60	72,98	67,63	91,17	69,68
	Minas Gerais	-	53,23	74,23	60,35	81,31	60,76	79,81	68,32	97,57	56,84
	Rio de Janeiro	-	48,75	66,47	66,63	89,89	57,30	-	71,78	110,97	82,26
	São Paulo	81,78	63,03	111,02	71,63	83,41	67,53	79,01	92,67	113,51	70,21
Centro-Oeste	Distrito Federal	-	35,59	-	56,65	83,14	76,31	-	67,70	0,00	42,99
	Goiás	-	56,82	65,21	68,75	76,08	70,69	78,55	67,53	39,26	41,39
	Mato Grosso	119,70	86,85	107,19	90,01	102,90	89,00	76,90	81,41	30,55	53,23
	Mato Grosso do Sul	-	61,36	92,14	79,80	84,91	83,83	78,40	93,09	99,05	65,95
Norte	Acre	121,64	113,95	123,35	113,53	121,63	113,61	74,63	111,25	117,51	107,20
	Amapá	116,73	85,02	104,35	90,19	-	87,43	72,11	90,31	119,24	84,12
	Amazonas	117,59	99,44	119,19	96,99	111,92	100,61	73,58	99,03	109,23	88,34
	Pará	118,14	92,40	104,55	87,34	100,76	88,59	73,62	84,58	97,51	64,98

Tabela 38 - Demanda específica média de energia total (kWh.ton<sup>-1</sup>) por estado nas áreas onde a secagem de arroz e soja tiveram maior eficiência energética.

(conclusão)

Região	Estado	Meses simulados									
		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho	
		Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja	Arroz	Soja
Norte	Rondônia	118,66	99,58	110,51	103,18	101,41	96,90	73,48	94,53	114,24	82,80
	Roraima	-	73,86	-	70,96	-	74,84	-	91,25	100,81	85,48
	Tocantins	116,63	64,91	79,06	67,09	69,25	67,88	-	50,99	-	32,64
Nordeste	Alagoas	-	44,99	36,69	40,44	-	45,92	65,97	44,32	69,01	70,04
	Bahia	-	40,16	51,66	50,95	80,69	51,55	65,48	49,90	97,32	49,21
	Ceará	108,62	57,76	76,55	59,90	0,00	59,49	-	43,03	45,28	36,46
	Maranhão	117,85	75,48	103,24	74,80	86,30	75,97	-	58,57	93,09	37,92
	Paraíba	26,47	36,69	-	39,63	-	43,88	-	34,93	-	41,53
	Pernambuco	-	35,79	50,01	40,88	68,68	44,79	53,52	38,18	-	48,25
	Piauí	-	55,56	-	57,71	68,04	59,14	-	41,61	-	30,20
	Rio Grande do Norte	-	36,58	71,38	48,79	-	50,11	-	31,77	-	35,72
	Sergipe	-	31,08	60,22	49,70	48,08	48,47	-	45,98	117,61	65,71

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

## 6 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DA REDE NEURAL ARTIFICIAL PROPOSTA

A rede neural artificial *feed-forward* de duas camadas foi implementada para prever a demanda de energia elétrica, térmica e total durante o processo de secagem a baixa temperatura de arroz e soja em função das condições do ar ambiente. As variáveis de entrada utilizadas no processo de otimização foram a temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ), a umidade relativa do ar ambiente ( $U_{ra}$ ) e a pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ), parâmetros que influenciam diretamente o processo de secagem. O banco de dados utilizado para treinar e validar a rede foi montado a partir de simulações realizadas para todas as regiões do Brasil, considerando diferentes condições meteorológicas. Essas simulações foram desenvolvidas com base no Modelo de Thompson (seção 2.2).

### 6.1 Secagem de arroz

As simulações realizadas para a secagem de arroz resultaram em um banco de dados com 35.479 amostras. As variáveis de interesse no processo de otimização apresentaram as seguintes faixas de operação, representando os valores mínimo, médio e máximo, respectivamente: (i)  $T_{bs}$ : 0,9; 23,5 e 33,9°C; (ii)  $U_{ra}$ : 26; 76 e 99,99%; (iii)  $P_{atm}$ : 813,8; 967,1; 1037,6kPa; (iv) energia elétrica: 39454,800; 72593,929 e 112207,208kWh; (v) energia térmica: 0,000; 93407,040 e 296935,932kWh; e (vi) energia total: 39454,800, 166000,968 e 403491,571kWh. Assim, a faixa de operação das redes neurais artificiais (RNAs) *feed-forward* para estimativa das demandas de energia atendem os seguintes intervalos:

$$0,9 \leq T_{bs} \leq 33,9$$

$$26 \leq U_{ra} \leq 99,99$$

$$813,8 \leq P_{atm} \leq 1037,6$$

O treinamento da Rede Neural Artificial (RNA) para estimar a demanda de energia elétrica ( $EE$ ) na secagem a baixa temperatura de arroz foi conduzido variando-se o percentual de dados utilizados para treinamento (30 a 70%) e a quantidade de neurônios na camada oculta (10 a 150). Os resultados, apresentados na Tabela 39, mostraram que a arquitetura com 50 neurônios foi a mais eficiente, apresentando o menor valor médio de erro quadrático médio ( $RMSE$ ) de 0,18635%, independentemente da quantidade de dados utilizada para o treinamento. Adicionalmente, dentro desta arquitetura ideal, o menor  $RMSE$  foi obtido quando 60% dos dados foram usados para treinamento, reforçando essa configuração como a mais apropriada

(0,18359%). O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) variou entre 0,99752 e 0,99978, indicando que a RNA conseguiu capturar praticamente toda a variabilidade dos dados reais. Assim, o modelo apresentou alta precisão e confiabilidade para prever a demanda de energia elétrica no processo de secagem. No entanto, a eficiência mínima foi observada para a arquitetura com 10 neurônios, onde a média do  $RMSE$  alcançou 0,22906%, destacando a relevância do número de neurônios para a capacidade preditiva da RNA.

Tabela 39 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia elétrica na secagem de arroz.

	%	Número de neurônios							
		10	30	50	70	90	110	130	150
$RMSE$ (%)	30	0,20873	0,22360	<u>0,18659</u>	0,19122	0,19106	0,20204	0,21180	0,20293
	40	0,22343	0,18913	<u>0,18739</u>	0,19003	0,19069	0,19552	0,19827	0,20130
	50	0,23953	0,19552	<u>0,18443</u>	0,19086	0,18720	0,19412	0,18725	0,18970
	60	0,23847	0,18594	<u>0,18359</u>	0,18381	0,18674	0,18541	0,18818	0,19369
	70	0,23513	0,18528	<u>0,18977</u>	0,18289	0,19960	0,18853	0,18902	0,18251
$R^2$	30	0,99970	0,99960	<u>0,99977</u>	0,99975	0,99975	0,99973	0,99970	0,99972
	40	0,99965	0,99976	<u>0,99976</u>	0,99975	0,99752	0,99975	0,99974	0,99972
	50	0,99961	0,99976	<u>0,99977</u>	0,99975	0,99976	0,99974	0,99976	0,99975
	60	0,99961	0,99976	<u>0,99977</u>	0,99964	0,99977	0,99977	0,99976	0,99974
	70	0,99962	0,99977	<u>0,99975</u>	0,99978	0,99973	0,99976	0,99976	0,99977

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

O treinamento da RNA para estimar a demanda de energia térmica ( $ET_{GLP}$ ) seguiu o mesmo procedimento aplicado na previsão de demanda de energia elétrica. A análise indicou que a arquitetura mais adequada para esta tarefa foi a que utilizou 130 neurônios, com um valor médio de erro quadrático médio ( $RMSE$ ) de 0,92622%, conforme destacado na Tabela 40. Além disso, quando a rede com 130 neurônios foi treinada com 60% das amostras, o  $RMSE$  foi ainda menor, atingindo 0,37995%, consolidando esta configuração como a mais eficiente para a previsão da demanda de energia térmica. Os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) permaneceram elevados, variando entre 0,99566 e 0,99987 em todos os testes realizados, evidenciando, novamente, a alta capacidade explicativa da RNA em relação aos dados reais. Por outro lado, a menor eficiência foi observada na rede com arquitetura de 10 neurônios, que apresentou um  $RMSE$  médio de 1,47173%, reforçando a importância de um número adequado de neurônios para a precisão do modelo.

Tabela 40 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia térmica na secagem de arroz.

	%	Número de neurônios							
		10	30	50	70	90	110	130	150
RMSE (%)	30	1,35497	1,04181	1,05990	1,17956	1,88723	1,23667	<u>1,06715</u>	1,40583
	40	1,64366	1,09964	1,19080	1,07236	1,30719	1,08440	<u>1,06325</u>	1,04667
	50	1,56634	1,05845	1,09042	1,48912	0,84550	0,85707	<u>1,16410</u>	1,31734
	60	1,28280	1,07132	1,24088	0,86675	0,95631	1,20756	<u>0,37995</u>	1,01274
	70	1,51087	1,24852	1,17786	1,38294	1,17769	0,97455	<u>0,95667</u>	1,10421
R <sup>2</sup>	30	0,99967	0,99981	0,99980	0,99975	0,99936	0,99973	<u>0,99980</u>	0,99965
	40	0,99952	0,99978	0,99746	0,99796	0,99969	0,99979	<u>0,99980</u>	0,99980
	50	0,99566	0,99980	0,99979	0,99960	0,99987	0,99987	<u>0,99976</u>	0,99969
	60	0,99971	0,99979	0,99972	0,99987	0,99983	0,99974	<u>0,99974</u>	0,99982
	70	0,99584	0,99973	0,99975	0,99966	0,99975	0,99983	<u>0,99984</u>	0,99979

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

De forma similar aos casos anteriores, a RNA foi treinada para estimar a demanda de energia total ( $E_{TOT}$ ) durante o processo de secagem do arroz. A arquitetura mais eficiente identificada foi aquela composta por 30 neurônios, apresentando um *RMSE* médio de 0,60418%, conforme destacado na Tabela 41. Essa eficiência foi maximizada quando 60% das amostras foram utilizadas para treinamento, estabelecendo esta como a melhor configuração para a RNA. Os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) permaneceram elevados, variando entre 0,99720 e 0,99990. A menor eficiência média foi observada para 10 neurônios.

Tabela 41 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia total na secagem de arroz.

(continua)

	%	Número de neurônios							
		10	30	50	70	90	110	130	150
RMSE (%)	30	0,76387	<u>0,50823</u>	0,74886	0,55199	0,70587	0,64279	0,64511	0,70370
	40	0,66654	<u>0,63130</u>	0,56815	0,60765	0,83094	0,62432	0,72877	0,76186
	50	0,64951	<u>0,65647</u>	0,58048	0,67951	0,71602	0,78527	0,62723	0,58393
	60	0,78578	<u>0,58185</u>	0,79980	0,63016	0,60276	0,65755	0,72918	0,70210
	70	0,59843	<u>0,64302</u>	0,44992	0,60685	0,47072	0,59750	0,49250	0,53928

Tabela 41 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia total na secagem de arroz.

(conclusão)

%	Número de neurônios							
	10	30	50	70	90	110	130	150
$R^2$	0,99972	<u>0,99987</u>	0,99973	0,99985	0,99760	0,99980	0,99980	0,99976
	0,99979	<u>0,99981</u>	0,99984	0,99982	0,99967	0,99981	0,99742	0,99720
	0,99979	<u>0,99979</u>	0,99984	0,99977	0,99975	0,99971	0,99981	0,99984
	0,99970	<u>0,99984</u>	0,99969	0,99981	0,99982	0,99979	0,99974	0,99976
	0,99983	<u>0,99980</u>	0,99990	0,99982	0,99989	0,99983	0,99988	0,99986

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

As validações finais dos modelos foram realizadas para 8 amostras aleatórias extraídas do banco de dados, que buscaram representar diversas condições do ar ambiente. Segue na Tabela 42 os dados para as variáveis de entrada  $T_{bs}$ ,  $U_{ra}$  e  $P_{atm}$  em °C, % e kPa, respectivamente, e os dados esperados para as variáveis de saída,  $EE$ ,  $ET_{GLP}$  e  $E_{TOT}$ , todos em kWh, considerando a secagem de 1951,24 toneladas de arroz no silo-secador padrão. As redes neurais para previsão de demanda foram re-treinadas utilizando as configurações otimizadas e as métricas obtidas no re-treinamento foram iguais a ( $RMSE$  e  $R^2$ , respectivamente): (i) RNA - energia elétrica ( $EE$ ): 0,19283% e 0,99874; (ii) RNA - energia térmica ( $ET_{GLP}$ ): 1,03376% e 0,99981; e (iii) RNA - energia total ( $E_{TOT}$ ): 0,698714% e 0,99977.

Tabela 42 - Amostras utilizadas na validação final das RNAs para previsão das demandas de energia na secagem do arroz.

Amostras	$T_{bs}$	$U_{ra}$	$P_{atm}$	$EE$	$ET_{GLP}$	$E_{TOT}$
1	25,1	96	989,0	71233,327	189683,449	260916,776
2	23,8	90	963,9	74117,983	164989,947	239107,930
3	29,1	34	967,7	43453,200	0,000	43453,200
4	24,1	65	954,0	73029,600	0,000	73029,600
5	21,7	87	969,4	75295,393	153498,067	228793,460
6	19,1	81	921,1	80888,092	128829,461	209717,553
7	15,1	63	1029,0	85597,734	36969,243	122566,977
8	11,6	69	912,1	95193,628	85161,415	180355,043

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Os resultados da validação, apresentados na Tabela 43, indicaram que as previsões das RNAs tiveram desvios percentuais, tanto positivos quanto negativos, em relação aos valores esperados. Esses desvios situaram-se nas faixas de: (i) energia elétrica ( $EE$ ): -0,07012 e 0,31204%; (ii) energia térmica ( $ET_{GLP}$ ): -0,09057 e 0,91706%, e (iii) energia total ( $E_{TOT}$ ): -0,45614 e 0,27227%. Observa-se que os desvios constatados na previsão de energia térmica por RNA, no geral, assumiram valores maiores do que os desvios calculados para energia elétrica e total. Isso se deve ao fato da energia térmica ser uma variável mista, que assume valores contínuos, quando existe utilização, e discretos iguais a zero, quando não é utilizada, influenciando na precisão da rede, principal nos casos em que ela é nula.

Tabela 43 - Resultados obtidos para validação final da RNAs para previsão das demandas de energia na secagem do arroz.

Amostras	Previsões realizada pela RNA (kWh)			Desvios (%)		
	$EE$	$ET_{GLP}$	$E_{TOT}$	$EE$	$ET_{GLP}$	$E_{TOT}$
1	71319,149	189789,630	260926,066	0,12048	0,05598	0,00356
2	74099,106	165012,296	239078,192	-0,02547	0,01355	-0,01244
3	43503,889	-237,485	43407,881	0,11665	-	-0,10429
4	73031,212	166,830	73140,997	0,00221	-	0,15254
5	75242,598	153462,552	228724,502	-0,07012	-0,02314	-0,03014
6	81140,495	128995,993	210288,554	0,31204	0,12927	0,27227
7	85596,664	37308,273	122007,899	-0,00125	0,91706	-0,45614
8	95327,376	85084,284	180793,122	0,14050	-0,09057	0,24290

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Conforme os dados apresentados na Tabela 43, existem duas abordagens para prever a demanda total de energia no processo de secagem: a forma direta, em que a RNA prevê diretamente a demanda de energia total ( $E_{TOT}$ ), e a forma indireta, que consiste em somar os resultados previstos pelas RNAs para a demanda de energia elétrica ( $EE$ ) e térmica ( $ET_{GLP}$ ). Ao comparar os desvios entre as duas formas de previsão, observou-se que, em 50% dos casos, a forma direta foi mais precisa do que a indireta, e vice-versa. Isso evidencia que ambas as abordagens são viáveis e podem ser utilizadas. Os desvios observados para a forma indireta variaram entre -0,42988 e 0,27574%. Esses resultados evidenciam a alta precisão das RNAs no processo de validação, com pequenos desvios percentuais que reforçam a confiabilidade das redes para prever as demandas energéticas em diferentes condições do ar ambiente.

## 6.2 Secagem de soja

Em relação às simulações realizadas para a secagem de soja, criou-se um banco de dados com 55.798 amostras. Neste banco de dados as variáveis de interesse no processo de otimização apresentaram os seguintes valores mínimo, médio e máximo, respectivamente: (i)  $T_{bs}$ : 0,6; 23,1 e 34,2°C; (ii)  $U_{ra}$ : 33; 74 e 99,99%; (iii)  $P_{atm}$ : 813,8; 967,6; 1049,7kPa; (iv) energia elétrica: 42865,200; 85915,315 e 149884,340kWh; (v) energia térmica: 0,000; 95827,448 e 432882,751kWh; e energia total: 72865,200; 181742,764 e 574937,311kWh. Logo, a faixa de operação das RNAs *feed-forward* para estimativa das demandas de energia é:

$$0,6 \leq T_{bs} \leq 34,2$$

$$33 \leq U_{ra} \leq 99,99$$

$$813,8 \leq P_{atm} \leq 1049,7$$

O treinamento da RNA para estimativa da demanda de energia elétrica (*EE*) na secagem a baixa temperatura de soja foi realizado considerando diferentes percentuais de dados para treinamento da rede (30 a 70%) e diversas configurações de neurônios (10 a 150), conforme apresentado na Tabela 44.

Tabela 44 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia elétrica na secagem de soja.

	%	Número de neurônios							
		10	30	50	70	90	110	130	150
RMSE (%)	30	0,36843	0,31552	0,29896	0,30255	<u>0,28255</u>	0,29657	0,29972	0,29611
	40	0,39686	0,31141	0,29619	0,29695	<u>0,30105</u>	0,30540	0,29460	0,32549
	50	0,36586	0,30344	0,29333	0,30072	<u>0,29408</u>	0,29175	0,28471	0,28420
	60	0,36347	0,29889	0,29554	0,29074	<u>0,29340</u>	0,29685	0,28167	0,28380
	70	0,37723	0,29765	0,28990	0,30095	<u>0,27398</u>	0,30095	0,28444	0,28076
R <sup>2</sup>	30	0,99971	0,99978	0,99808	0,99980	<u>0,99983</u>	0,99981	0,99981	0,99812
	40	0,99966	0,99979	0,99981	0,99981	<u>0,99981</u>	0,99980	0,99981	0,99977
	50	0,99708	0,99980	0,99982	0,99980	<u>0,99981</u>	0,99981	0,99982	0,99983
	60	0,99971	0,99981	0,99981	0,99982	<u>0,99981</u>	0,99981	0,99983	0,99983
	70	0,99969	0,99981	0,99982	0,99980	<u>0,99983</u>	0,99804	0,99982	0,99983

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Os resultados indicaram que a arquitetura mais eficiente foi com 90 neurônios, para a qual a média dos valores de *RMSE* foi a menor registrada (0,28901%), independentemente do

percentual de dados utilizados para o treinamento. Quando utilizado 70% dos dados para treinamento, o *RMSE* foi ainda mais reduzido, atingindo 0,27398%, consolidando essa configuração como a mais adequada para previsão da demanda de energia elétrica na secagem da soja. Os valores de  $R^2$  para as diferentes configurações variaram entre 0,99708 e 0,99983, demonstrando que o modelo tem elevada capacidade explicativa em relação aos dados observados. Em contrapartida, a configuração menos eficiente foi com 10 neurônios, apresentando um *RMSE* médio de 0,37437%. Esses resultados evidenciam que a configuração da RNA com 90 neurônios treinados com 70% das amostras é a melhor neste caso.

O treinamento da RNA para estimar a demanda de energia térmica ( $ET_{GLP}$ ) na secagem a baixa temperatura de soja seguiu os mesmos procedimentos aplicados na previsão da demanda de energia elétrica. Os resultados apontaram que a configuração mais eficiente foi a rede com 90 neurônios, para a qual o *RMSE* médio foi 1,902%, como destacado na Tabela 45. Quando essa arquitetura foi treinada com 60% das amostras, o desempenho foi ainda melhor, registrando um *RMSE* de 1,668%, o que consolidou essa configuração como a mais adequada para a tarefa de prever a demanda de energia térmica no processo de secagem. Além disso, os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) permaneceram consistentemente elevados em todas as configurações testadas, variando de 0,99403 a 0,99981, indicando, novamente, a alta capacidade da RNA de explicar a variação nos dados reais. Por outro lado, a menor eficiência foi observada na configuração com 10 neurônios, que apresentou um *RMSE* médio de 2,93709%, reforçando a importância do número adequado de neurônios para garantir precisão.

Tabela 45 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia térmica na secagem de soja.

(continua)

	%	Número de neurônios							
		10	30	50	70	90	110	130	150
RMSE (%)	30	3,04770	2,16201	2,19297	2,05837	<u>1,75833</u>	1,91904	2,19448	2,84176
	40	2,92158	2,49524	1,87193	1,94982	<u>2,13663</u>	1,83107	1,65960	1,68999
	50	2,93575	1,94255	1,92582	2,25425	<u>2,22959</u>	1,88864	2,03284	1,61266
	60	3,04339	2,34852	1,66337	2,13558	<u>1,66782</u>	2,15754	1,95529	2,02645
	70	2,73704	2,55497	2,10128	1,65389	<u>1,71597</u>	1,85012	2,54510	1,75581
$R^2$	30	0,99934	0,99967	0,99966	0,99970	<u>0,99978</u>	0,99974	0,99966	0,99943
	40	0,99403	0,99956	0,99975	0,99973	<u>0,99676</u>	0,99976	0,99981	0,99980
	50	0,99940	0,99973	0,99974	0,99964	<u>0,99966</u>	0,99975	0,99971	0,99816

Tabela 45 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia térmica na secagem de soja.

(conclusão)

	%	Número de neurônios							
		10	30	50	70	90	110	130	150
$R^2$	60	0,99934	0,99961	0,99980	0,99967	<u>0,99980</u>	0,99967	0,99973	0,99710
	70	0,99948	0,99954	0,99969	0,99981	<u>0,99979</u>	0,99976	0,99954	0,99979

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Por fim, o treinamento da RNA para estimar a demanda de energia total ( $E_{TOT}$ ) no processo de secagem a baixa temperatura da soja revelou que a melhor configuração foi uma rede composta por 30 neurônios, que apresentou um  $RMSE$  médio de 1,064%, conforme destacado na Tabela 46. Essa configuração mostrou seu melhor desempenho quando 40% das amostras foram utilizadas para treinamento, o que estabeleceu esta arquitetura como a mais eficiente para prever a demanda total de energia no processo de secagem da soja ( $RMSE$  igual a 0,92604%). Os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) mantiveram-se altos, variando entre 0,99778 e 0,99985, indicando que a RNA conseguiu explicar uma elevada proporção da variação presente nos dados reais. Por outro lado, a menor eficiência foi observada na rede com 10 neurônios, que apresentou um  $RMSE$  médio de 1,69283%, reforçando a importância de uma estrutura de rede otimizada para obter maior precisão.

Tabela 46 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia total na secagem de soja.

(continua)

	%	Número de neurônios							
		10	30	50	70	90	110	130	150
$RMSE$ (%)	30	1,28302	<u>1,08308</u>	1,62468	1,09714	1,70006	1,31875	1,07799	0,98486
	40	1,73914	<u>0,92604</u>	1,15430	1,15407	1,36315	1,16599	1,09469	1,48186
	50	1,63853	<u>1,05486</u>	1,33352	0,99231	1,08175	0,89467	1,01832	1,09551
	60	1,48934	<u>1,20453</u>	0,92744	1,02047	1,03674	1,00543	1,20584	1,10178
	70	1,19373	<u>1,05118</u>	1,01788	1,09065	0,85887	1,10912	1,18053	1,08701
$R^2$	30	0,99967	<u>0,99976</u>	0,99946	0,99976	0,99941	0,99965	0,99977	0,99980
	40	0,99939	<u>0,99983</u>	0,99973	0,99973	0,99962	0,99973	0,99976	0,99956
	50	0,99946	<u>0,99977</u>	0,99964	0,99980	0,99977	0,99984	0,99979	0,99976

Tabela 46 - Resultados obtidos para o treinamento da RNA para previsão da demanda de energia total na secagem de soja.

(conclusão)

%	Número de neurônios							
	10	30	50	70	90	110	130	150
$R^2$ 60	0,99955	<u>0,99971</u>	0,99982	0,99979	0,99978	0,99980	0,99970	0,99975
$R^2$ 70	0,99972	<u>0,99778</u>	0,99979	0,99976	0,99985	0,99975	0,99972	0,99976

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

As validações finais dos modelos foram realizadas para 8 amostras aleatórias extraídas do banco de dados, que buscaram representar diversas condições do ar ambiente. Segue na Tabela 47 os dados para as variáveis de entrada  $T_{bs}$ ,  $U_{ra}$  e  $P_{atm}$  em °C, % e kPa, respectivamente, e os dados esperados para as variáveis de saída,  $EE$ ,  $ET_{GLP}$  e  $E_{TOT}$ , todos em kWh, considerando a secagem de 2674,54 toneladas de soja no silo-secador padrão. As redes neurais para previsão de demanda foram re-treinadas utilizando as configurações otimizadas e as métricas obtidas no re-treinamento das redes foram iguais a ( $RMSE$  e  $R^2$ , respectivamente): (i) RNA - energia elétrica ( $EE$ ): 0,28284% e 0,99982; (ii) RNA - energia térmica ( $ET_{GLP}$ ): 2,14581% e 0,99967; e (iii) RNA - energia total ( $E_{TOT}$ ): 1,07281% e 0,99977.

Tabela 47 - Amostras utilizadas na validação final das RNAs para previsão das demandas de energia na secagem de soja.

Amostras	$T_{bs}$	$U_{ra}$	$P_{atm}$	$EE$	$ET_{GLP}$	$E_{TOT}$
1	24,5	92	971,7	95370,240	257123,095	352493,335
2	27,8	74	965,2	82966,800	0,000	82966,800
3	29,8	64	991,7	63445,200	0,000	63445,200
4	29,4	55	967,5	56212,800	0,000	56212,800
5	19,4	77	969,6	105437,098	108357,638	213794,737
6	21,5	94	933,4	101139,551	276511,888	377651,439
7	13,6	73	967,9	115445,087	69581,561	185026,647
8	10,6	73	948,6	123981,312	77811,153	201792,464

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Os resultados da validação, apresentados na Tabela 48, indicaram que as previsões das RNAs tiveram desvios percentuais, tanto positivos quanto negativos, em relação aos valores esperados. Esses desvios situaram-se nas faixas de: (i) energia elétrica ( $EE$ ): -0,79930 e

0,21109%; (ii) energia térmica ( $ET_{GLP}$ ): -0,71516 e 0,06303%, e (iii) energia total ( $E_{TOT}$ ): -2,36549 e 1,58453%. Os desvios observados na previsão da demanda de energia térmica pela RNA foram semelhantes aos encontrados na previsão da demanda de energia elétrica.

Tabela 48 - Resultados obtidos para validação final da RNAs para previsão das demandas de energia na secagem do soja.

Amostras	Previsões realizada pela RNA (kWh)			Desvios (%)		
	$EE$	$ET_{GLP}$	$E_{TOT}$	$EE$	$ET_{GLP}$	$E_{TOT}$
1	95571,554	257285,172	353061,721	0,21109	0,06303	0,16125
2	83104,382	-170,081	82958,266	0,16583	-	-0,01029
3	63363,195	56,010	63367,058	-0,12925	-	-0,12317
4	56119,692	-61,920	55984,817	-0,16563	-	-0,40557
5	104594,340	107582,711	211881,898	-0,79930	-0,71516	-0,89471
6	100777,415	275773,470	376308,545	-0,35806	-0,26705	-0,35559
7	115376,077	71660,670	180649,853	-0,05978	2,98802	-2,36549
8	123944,660	77679,738	204989,920	-0,02956	-0,16889	1,58453

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Embora a rede tenha mostrado dificuldades em prever os casos em que a energia térmica não seria utilizada no processo de secagem, este problema pode ser minimizado quando o banco de dados é consistente e bem representativo das diferentes situações. Aproximadamente 54% das amostras no banco de dados de secagem de soja apresentavam demanda de energia térmica igual a zero. Ao treinar a rede com essas amostras, ela se torna mais apta a reconhecer e prever corretamente as condições em que a energia térmica não é demandada.

Conforme discutido na seção 6.1, existem duas abordagens para prever a demanda total de energia no processo de secagem: a forma direta, em que a RNA prevê diretamente a demanda de energia total ( $E_{TOT}$ ), e a forma indireta, que envolve somar os resultados previstos pelas RNAs correspondentes às demandas de energia elétrica ( $EE$ ) e térmica ( $ET_{GLP}$ ). Ao comparar os desvios entre as duas formas de previsão, observou-se que em 87,5% dos casos a abordagem indireta foi mais precisa do que a direta. Isso se deve ao fato de que grande parte dos dados de demanda de energia total no banco de dados não incluía a componente de energia térmica, o que reduziu a precisão da previsão direta, especialmente nos casos onde essa componente estava presente, como demonstrado na amostra 8 (Tabela 48). Os desvios observados para a forma indireta variaram entre -0,75665% e 1,08638%. No entanto, mesmo com as dificuldades relacionadas ao processo de otimização e à falta de dados completos, os resultados destacam a

alta precisão das RNAs durante o processo de validação. Os pequenos desvios percentuais indicam que as redes são confiáveis para prever as demandas energéticas em diversas condições ambientais, reforçando sua eficácia na estimativa da demanda de energia, mesmo diante de variações nos dados disponíveis.

## 7 CONCLUSÃO

### 7.1 Conclusões finais

Poucos estudos abordam a demanda de energia elétrica e térmica nos processos de secagem de grãos em unidades armazenadoras ou silo-secadores, tanto no Brasil quanto no mundo. Entre os métodos de secagem, destaca-se o processo realizado a baixa temperatura, que apresenta menores riscos de danos térmicos e mecânicos aos grãos. Contudo, suas condições operacionais são altamente dependentes das características do ar ambiente. Nesse contexto, o estudo desse processo é particularmente relevante para o Brasil, país de dimensões continentais e grande diversidade climática, onde compreender e otimizar a demanda energética na secagem de grãos pode trazer benefícios significativos tanto para a eficiência energética quanto para a qualidade do produto final.

Nesta tese, o modelo de Thompson foi empregado para avaliar a demanda de energia durante o processo de secagem a baixa temperatura de grãos de arroz e soja. O desenvolvimento do algoritmo foi realizado utilizando a linguagem de programação Python, com base em dados provenientes de estações meteorológicas distribuídas por todo o território brasileiro, representando as condições do ar ambiente. As simulações foram conduzidas para uma unidade armazenadora padrão com capacidade estática de 1951,24 toneladas para grãos de arroz e 2674,54 toneladas para grãos de soja. Os resultados iniciais, obtidos para as coordenadas específicas das estações meteorológicas, foram interpolados utilizando o método dos inversos da distância, permitindo a obtenção de dados representativos para toda a extensão do país.

O processo de simulação foi delimitado ao período de colheita de cada cultura estudada, abrangendo quatro safras ao longo de 10 anos: 2012/13, 2015/16, 2018/19 e 2020/21. Para avaliar as variações na demanda de energia elétrica e térmica, foram aplicados testes estatísticos que analisaram tanto as diferenças ao longo de uma mesma safra quanto entre diferentes safras, considerando cada unidade da federação. Os resultados indicaram variações significativas, sobretudo entre os meses simulados dentro de uma mesma safra. Entre as safras, as variações observadas em alguns estados foram atribuídas à quantidade de estações meteorológicas com dados disponíveis e à convergência desses dados para os períodos analisados.

A região Sul, responsável por 81% da produção nacional de arroz, apresentou as maiores demandas específicas de energia no processo de secagem a baixa temperatura (SBT). A demanda energética total para a secagem variou entre 903,640 e 1350,594GWh, sendo

predominantemente concentrada no Sul, que respondeu por 83,10% a 86,63% desse total. Entretanto, concluiu-se que essa demanda energética poderia ser integralmente compensada se os resíduos do beneficiamento do arroz seco fossem utilizados no processo como insumos para cogeração de energia. A demanda específica total de energia foi estimado entre 2,147 e 5,984 MJ.kg<sup>-1</sup> de água evaporada durante o processo de secagem estudado.

No que se refere à energia elétrica, a utilização da biomassa residual proveniente do beneficiamento do arroz seco poderia contribuir significativamente para a descarbonização da matriz energética nacional. Essa abordagem resultaria em balanços de emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil que variaram entre -5567,2 e 83715,3 toneladas. Os valores negativos representam sequestro de carbono, evidenciando o potencial ambientalmente sustentável dessa solução para o aproveitamento de resíduos no processo de secagem.

O custo médio de energia na secagem variou de 0,62% a 2,75% do preço final do arroz seco e limpo e o custo médio específico foi de 0,654R\$.kg<sup>-1</sup> de água evaporada. As regiões brasileiras mais indicadas para a secagem, considerando a eficiência em ordem crescente, são Norte, Sul, Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste.

No caso da soja, o estado do Mato Grosso, maior produtor do Brasil, registrou uma demanda específica de energia na secagem a baixa temperatura (SBT) classificada entre média e baixa, variando de 42,16 a 88,26kWh por tonelada de produto. A demanda total de energia para o SBT de soja no Brasil foi estimada entre 5,320 e 9,370TWh, com a região Centro-Oeste representando de 42,24% a 44,24% desse total. Destaca-se que a demanda específica de energia na SBT para o Brasil variou entre 1,266 e 5,822MJ.kg<sup>-1</sup> de água evaporada, com eficiência superior a outras estratégias de secagem como leito fluidizado e fluxos mistos.

Diferentemente do arroz, o reaproveitamento da casca da soja não é suficiente para atender toda a demanda energética do processo de secagem, mas consegue suprir integralmente a demanda de energia elétrica. Além disso, a utilização da casca como fonte energética se mostra financeiramente competitiva em relação ao valor de mercado da casca no setor de nutrição animal. Com essa estratégia de compensação energética renovável, o balanço de emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil seria de -594,8 mil a 777,5 mil toneladas, destacando o potencial de redução de emissões associadas ao processo.

O custo médio de energia no processo de secagem da soja representou de 0,99% a 3,79% do preço final do produto seco e limpo e o custo médio específico foi de 0,527R\$.kg<sup>-1</sup> de água evaporada. Em termos de condições climáticas, o Brasil apresenta características favoráveis para o SBT de soja, com custos energéticos classificados como médios a baixos, especialmente

na região Centro-Oeste. As condições de ar mais adequadas para a secagem da soja ocorrem, em ordem crescente de eficiência, nas regiões Norte, Sul, Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste.

Um estudo comparativo entre as demandas específicas de energia permitiu constatar que as condições do ar ambiente no Brasil tornam o processo de secagem a baixa temperatura mais eficiente para a soja do que para o arroz na maior parte das regiões. No entanto, em condições mais extremas, como baixa temperatura e elevada umidade relativa do ar, a secagem a baixa temperatura se mostrou mais eficiente energeticamente para o arroz em relação à soja. Esses resultados destacam a influência direta das condições climáticas sobre o desempenho energético do processo de secagem, variando conforme a cultura e o ambiente analisado.

Por fim, desenvolveu-se um modelo de rede neural artificial do tipo *feed-forward* com duas camadas para estimar as demandas de energia elétrica, térmica e total no processo de secagem a baixa temperatura, considerando as condições do ar ambiente como variáveis de entrada. O treinamento da rede foi realizado utilizando bancos de dados gerados por simulações baseadas no modelo de Thompson. Os resultados demonstraram que o modelo proposto apresenta alta eficiência na previsão das demandas energéticas, destacando-se como uma alternativa promissora ao modelo tradicional, com potencial para auxiliar no planejamento energético e na otimização do processo de secagem.

As metodologias apresentadas neste trabalho possuem caráter genérico e podem ser implementadas e estudadas em outras regiões do mundo, adaptando-se às condições climáticas e produtivas locais. Os resultados obtidos demonstram potencial para subsidiar a tomada de decisão tanto por produtores quanto por órgãos governamentais, no que tange ao manejo das culturas, planejamento da colheita e secagem dos produtos, além de auxiliar no planejamento estratégico para a expansão de sistemas de transmissão e distribuição de energia. Esse planejamento é especialmente relevante em polos produtores, visando garantir o suprimento da demanda energética e promovendo maior eficiência e sustentabilidade nos processos agrícolas.

## **7.2 Trabalhos futuros**

- Expandir a aplicação das metodologias propostas para culturas amplamente produzidas no Brasil, como milho e trigo, avaliando a eficiência energética e operacional em seus respectivos processos de secagem a baixa temperatura.

- Realizar uma análise detalhada e segregada por áreas dentro dos estados produtores, focando exclusivamente nas regiões que efetivamente cultivam as culturas estudadas, para melhor representar as condições locais.
- Investigar a viabilidade técnica e econômica de incorporar outras fontes renováveis de energia no processo de secagem, como a tecnologia de energia solar concentrada, ampliando as possibilidades de cogeração energética sustentável.
- Testar outros algoritmos para o treinamento das redes neurais artificiais *feed-forward*, como o método de gradiente conjugado, para comparar desempenho, precisão e tempo de processamento em relação aos modelos utilizados neste estudo.
- Realizar estudos sobre os impactos da alta demanda energética no processo de secagem sobre os sistemas de transmissão e distribuição de energia, especialmente nos polos produtores, a fim de propor soluções que garantam eficiência e confiabilidade.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRÍCOLAS, N. **Cotações de soja**. Disponível em:

<<https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/soja>>. Acesso em: 28 nov. 2024.

AGROLINK. **Cotações de Soja**. Disponível em:

<<https://www.agrolink.com.br/culturas/soja/cotacoes>>. Acesso em: 28 nov. 2024.

AL-ABOODI, A. H.; AL-ABADI, A. M.; T. IBRAHIM, H. A Committee Machine with Intelligent Systems for Estimating Monthly Mean Reference Evapotranspiration in an Arid Region. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 14, n. 10, p. 386–398, 15 out. 2017.

ALI, G. et al. **Utilization of rice husk and poultry wastes for renewable energy potential in Pakistan: An economic perspective**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2016.

ANEEL. **Ranking de Tarifa Residencial**. Disponível em:

<<https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/rankingtarifas>>. Acesso em: 25 jul. 2024.

ANP. **Evolução dos preços de GLP (R\$ / botijão de 13 kg)**. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/arq-precos/tabelas/2024-margens-p13-tabela-jul24.pdf>>.

ASAE. **Psychrometric data in SI units**. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1980.

ASAE. **Moisture Relationships of Plant-based Agricultural Products**. *Asae*, 1999.

BABAK, O.; DEUTSCH, C. V. Statistical approach to inverse distance interpolation.

**Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 23, n. 5, p. 543–553, 28 jul. 2009.

BARBOSA, F. D. F. et al. MANEJO TÉRMICO DO AR NA SECAGEM ESTACIONÁRIA E SEUS EFEITOS NO DESEMPENHO INDUSTRIAL DE ARROZ BRANCO E PARBOILIZADO. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 27, n. 2, 31 dez. 2009.

BÉRES, R.; JUNGINGER, M.; BROEK, M. VAN DEN. Assessing the feasibility of CO<sub>2</sub> removal strategies in achieving climate-neutral power systems: Insights from biomass, CO<sub>2</sub>

capture, and direct air capture in Europe. **Advances in Applied Energy**, v. 14, p. 100166, jul. 2024.

BRAGA, A.; CARVALHO, A.; LUDERMIR, T. Redes neurais artificiais. **Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações**, 2003.

CAMPOS, G. S. **Evaluation of the Energy Use of Rice Husk: A Case Study in the Municipality of Santo Antônio da Patrulha**. [s.l.] Federal University of Rio Grande, 2016.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Campina Grande - PB: Relatório de Pesquisa, Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, Universidade Federal da Paraíba, 1992.

CECON, P. R. et al. **Métodos Estatísticos**. Didática ed. Viçosa: Editora UFV, 2012.

COBEN, C.; SANCAKTAR, E. Use of Pyrolyzed Soybean Hulls as Fillers in Polypropylene and Linear Low Density Polyethylene. **Sustainable Chemistry**, v. 2, n. 4, p. 622–644, 12 nov. 2021.

COGEN, A. DA I. DE C. DE E. **Conceito e tecnologias**. Disponível em: <<http://www.cogen.com.br/cogeracao/conceito-e-tecnológicas>>. Acesso em: 4 maio. 2022.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: Grãos, décimo segundo levantamento 2012/13. p. 1–30, 2013.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: Grãos, décimo segundo levantamento 2015/16. v. 3, n. 12, p. 1–184, 2016.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: Grãos, décimo segundo levantamento 2018/19. v. 6, p. 1–107, 2019.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: Grãos, décimo segundo levantamento 2021/22. v. 9, p. 88, 2022.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: Grãos, décimo segundo levantamento 2022/23. v. 10, p. 1–111, 2023.

CONAB, C. N. DE A. **Primeira estimativa da safra de grãos aponta recorde e crescimento de 8,3%**. Disponível em: <<https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2024/10/primeira-estimativa-da-safra-de-graos-aponta-recorde-e-crescimento-de-8-3>>. Acesso em: 1 dez. 2024.

CORADI, P. C. et al. Effects of drying air temperature and grain initial moisture content on

soybean quality (Glycine Max (L.) Merrill). **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 5, p. 866–876, out. 2016.

CORADI, P. C. et al. Technological and sustainable strategies for reducing losses and maintaining the quality of soybean grains in real production scale storage units. **Journal of Stored Products Research**, v. 87, p. 101624, maio 2020a.

CORADI, P. C. et al. Energy-Qualitative and Sustainable Impacts on Different Soy Grain Drying Technologies. **Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 6, p. 109, 15 maio 2020b.

CORADI, P. C.; FERNANDES, C. H. P.; HELMICH, J. C. Adjustment of mathematical models and quality of soybean grains in the drying with high temperatures. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 4, p. 385–392, abr. 2016.

DE PRETTO, C.; TARDIOLI, P. W.; COSTA, C. B. B. Assessing energetic and available fuel demands from a soybean biorefinery producing refined oil, biodiesel, defatted meal and power. **Computers & Chemical Engineering**, v. 104, p. 259–270, set. 2017.

EPA, U. S. E. P. A. **Emission Factor Documentation for AP-42 Section 1.5 Liquefied Petroleum Gas Combustion**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/1.5\\_liquefied\\_petroleum\\_gas\\_combustion.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/1.5_liquefied_petroleum_gas_combustion.pdf)>.

EPE. **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 11 out. 2023a.

EPE. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas)**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 11 out. 2023b.

EUROPEAN COMMISSION. **Energy statistics Energy datasheet: EU28 countries**. Disponível em: <[https://ec.europa.eu/energy/data-analysis/energy-statistical-pocketbook\\_en](https://ec.europa.eu/energy/data-analysis/energy-statistical-pocketbook_en)>. Acesso em: 16 jul. 2024.

FERREIRA, L. R. A. et al. **Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2018.

FILHO, C. P. H. et al. Quality of second season soybean submitted to drying and storage. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 46, n. 3, p. 267–275, set. 2016.

FILHO, C. P. H. et al. Physiological potential of soybean seeds after maturation and submitted to artificial drying. **Journal of Seed Science**, v. 39, n. 4, p. 374–384, dez. 2017.

FREITAS, F. F. et al. **The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2019.

HONDA, H.; FACURE, M.; YAOHAO, P. **Os Três Tipos de Aprendizado de Máquina**. Disponível em: <<https://lamfo-unb.github.io/2017/07/27/%0Atrês-tipos-am/>>. Acesso em: 3 jun. 2019.

INMET. **Dados Históricos Anuais**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso em: 17 jul. 2024.

IRRI, I. R. R. I. **Paddy drying Postharvest Unit, CESD**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.knowledgebank.irri.org/images/docs/training-manual-paddy-drying.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2024.

Jl, C. et al. Environmental and economic assessment of crop residue competitive utilization for biochar, briquette fuel and combined heat and power generation. **Journal of Cleaner Production**, 2018.

JITTANIT, W.; SAETEAU, N.; CHAROENCHASRI, A. Industrial paddy drying and energy saving options. **Journal of Stored Products Research**, v. 46, n. 4, p. 209–213, out. 2010.

KIM, H. S. et al. Chemical composition and porcine in vitro disappearance of heat-pretreated and multi-enzyme-supplemented soybean hulls. **Animal Feed Science and Technology**, v. 277, p. 114951, jul. 2021.

LI, G.; WANG, X. Energy quota trading policy and energy efficiency: The role of government supervision and public participation. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 206, p. 123565, set. 2024.

LIMA, R. E. et al. DRYING AND STORAGE TECHNOLOGIES TO MINIMIZE QUALITY LOSSES IN SOYBEANS IN THE SOUTHERN REGIONS OF BRAZIL. **Engenharia Agrícola**, v. 44, 2024.

LOPEZ-GARCIA, T. B.; CORONADO-MENDOZA, A.; DOMÍNGUEZ-NAVARRO, J. A. Artificial neural networks in microgrids: A review. **Engineering Applications of Artificial**

**Intelligence**, v. 95, p. 103894, out. 2020.

LU, G. Y.; WONG, D. W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. **Computers & Geosciences**, v. 34, n. 9, p. 1044–1055, set. 2008.

LUO, H.; SUN, Y. The impact of energy efficiency on ecological footprint in the presence of EKC: Evidence from G20 countries. **Energy**, v. 304, p. 132081, set. 2024.

MARCO ANTONIO SEDREZ RANGEL, GILBERTO JAIME ZIMMER, F. A. V. Secagem estacionária de sementes de arroz com ar ambiente. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 1081–1090, 1997.

MARIA ALEJANDRA BILLIRIS, TERRY J SIEBENMORGEN, G. L. B. Energy Use and Efficiency of Rice-Drying Systems I. On-Farm Cross-Flow Dryer Measurements. **Applied Engineering in Agriculture**, p. 205–215, 29 maio 2014.

MARIA ALEJANDRA BILLIRIS, T. J. S. Energy Use and Efficiency of Rice-Drying Systems II. Commercial, Cross-Flow Dryer Measurements. **Applied Engineering in Agriculture**, p. 217–226, 29 maio 2014.

MCTIC. Fatores de emissão da margem de operação pelo método da análise de despacho. **2019**, 2019.

MEAS, P. et al. Relating Rice Grain Quality to Conditions during Sun Drying. **ijfe**, v. 9, n. 4, p. 385–391, 30 jul. 2013.

MENEGHETTI, V. L. et al. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 10, p. 1115–1120, out. 2012.

MENEZES, N. L. DE et al. Temperaturas de secagem na integridade física, qualidade fisiológica e composição química de sementes de arroz. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 4, p. 430–436, dez. 2012.

MIMENBAYEVA, A. et al. NEURAL NETWORK MODEL OF SOIL MOISTURE FORECAST NORTH KAZAKHSTAN REGION. **Scientific Journal of Astana IT University**, p. 149–159, 30 set. 2023.

MIRANDA, L. C.; SILVA, W. R. DA; CAVARIANI, C. SECAGEM DE SEMENTES DE SOJA EM SILO COM DISTRIBUIÇÃO RADIAL DO FLUXO DE AR: I. MONITORAMENTO FÍSICO. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 11, p. 2097–

2108, nov. 1999a.

MIRANDA, L. C.; SILVA, W. R. DA; CAVARIANI, C. SECAGEM DE SEMENTES DE SOJA EM SILO COM DISTRIBUIÇÃO RADIAL DO FLUXO DE AR: II. EFEITOS SOBRE A QUALIDADE DAS SEMENTES. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 11, p. 2109–2121, nov. 1999b.

MORAES, R. S. DE et al. Thick layer drying and storage of rice grain cultivars in silo-dryer-aerator: Quality evaluation at low drying temperature. **Heliyon**, v. 9, n. 7, p. e17962, jul. 2023.

MOTTA, W. A.; VILLELA, F. A.; ZIMMER, G. J. Adaptação do método contínuo de secagem para sementes de arroz. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 4 suppl, p. 1019–1025, 1999.

MÜLLER, A. et al. Rice Drying, Storage and Processing: Effects of Post-Harvest Operations on Grain Quality. **Rice Science**, v. 29, n. 1, p. 16–30, jan. 2022.

NORDENSTAM, L. Efficiency and renewability in energy conversion – A system perspective on policy objectives and instruments for climate change mitigation. **Energy Reports**, v. 11, p. 6126–6149, jun. 2024.

OLIVEIRA, A. C. L. DE et al. Evaluation of Brazilian potential for generating electricity through animal manure and sewage. **Biomass and Bioenergy**, v. 139, p. 105654, ago. 2020.

OLIVEIRA, A. C. L. DE et al. Evaluation and optimization of electricity generation through manure obtained from animal production chains in two Brazilian mesoregions. **Journal of Cleaner Production**, v. 316, p. 128270, set. 2021.

OLIVEIRA, A. C. L. DE et al. Spatial analysis of energy indicators and proposition of alternative generation sources for the Brazilian territory. **Journal of Cleaner Production**, v. 356, n. March, 2022.

OLIVEIRA, A. C. L. DE et al. Renewable energy solutions based on artificial intelligence for farms in the state of Minas Gerais, Brazil: Analysis and proposition. **Renewable Energy**, v. 204, p. 24–38, mar. 2023.

ONU. **Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy**. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>>. Acesso em: 16 jul. 2024.

OTSUKA, A. Industrial electricity consumption efficiency and energy policy in Japan. **Utilities Policy**, v. 81, p. 101519, abr. 2023.

- PAULO CARTERI CORADI et al. Mathematical Modeling of Drying in a New Concept of Silo-Dryer-Aerator and the Quality of Soybean Seeds (*Glycine max* (L.) Merrill). **Journal of Agricultural Science and Technology B**, v. 8, n. 8, 28 ago. 2018.
- QUEQUETO, W. D. et al. Performance of industrial drying and soybean grains quality. **Food Science and Technology**, v. 43, 2023.
- SEIB, P. A. et al. **Spoilage of rough rice measured by evolution of carbon dioxide**. Proceedings of the 3rd annual workshop on Grains Post-harvest Technology. **Anais...Kuala Lumpur**: 1980.
- SILVA, B. L. et al. Between catastrophes and politics: Unraveling the web of disasters, climate change, and public strategies for a sustainable future. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 118, p. 105210, fev. 2025.
- SILVA, L. A. et al. Rice husk energy production in Brazil: An economic and energy extensive analysis. **Journal of Cleaner Production**, 2021.
- SOPONRONNARIT, S. et al. Fluidised bed drying of soybeans. **Journal of Stored Products Research**, v. 37, n. 2, p. 133–151, abr. 2001.
- SOROUR, H.; UCHINO, T. Effect of Changing Temperature on the Deterioration of Soya Beans. **Biosystems Engineering**, v. 87, n. 4, p. 453–462, abr. 2004.
- THOMAS L. THOMPSON. Temporary Storage of High-Moisture Shelled Corn Using Continuous Aeration. **Transactions of the ASAE**, 1972.
- USDA. **World Agricultural Production**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>>.
- VENTURIN, A. C. Z. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SECAGEM EM BAIXA TEMPERATURA PARA ARROZ COM CASCA**. [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2019.
- VIEIRA, N. A. D. **Obtaining briquettes from rice husks and assessing their energy potential**. [s.l.] UNIVATES University Center, 2014.
- WANG, L.; SHAO, J.; MA, Y. Does China's low-carbon city pilot policy improve energy efficiency? **Energy**, v. 283, p. 129048, nov. 2023.
- WANG, Z.; BUI, Q.; ZHANG, B. The relationship between biomass energy consumption and human development: Empirical evidence from BRICS countries. **Energy**, 2020.

YU, W.; LIANG, W.; YAO, X. The effect of the county-to-district conversion policy on energy efficiency of enterprises: Evidence from China. **Energy Economics**, v. 134, p. 107618, jun. 2024.

ZHANG, J. et al. Measuring energy and environmental efficiency interactions towards CO<sub>2</sub> emissions reduction without slowing economic growth in central and western Europe. **Journal of Environmental Management**, v. 279, p. 111704, fev. 2021.

## APÊNDICE A

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continua)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A001	CO	DF	Brasília	-15,789	-47,926	1161
A042	CO	DF	Brazlândia	-15,600	-48,131	1143
A045	CO	DF	Aguas Emendadas	-15,596	-47,626	1030
A046	CO	DF	Gama (Ponte Alta)	-15,935	-48,137	990
A047	CO	DF	Paranoá (Coopa-Df)	-16,012	-47,557	1043
A002	CO	GO	Goiânia	-16,643	-49,220	727
A003	CO	GO	Morrinhos	-17,745	-49,102	751
A005	CO	GO	Porangatu	-13,309	-49,117	365
A011	CO	GO	São Simão	-18,969	-50,633	492
A012	CO	GO	Luziânia	-16,261	-47,967	1001
A013	CO	GO	Aragarças	-15,903	-52,245	327
A014	CO	GO	Goiás	-15,940	-50,141	513
A015	CO	GO	Itapaci	-14,980	-49,540	551
A016	CO	GO	Jatai	-17,924	-51,717	670
A017	CO	GO	Posse	-14,089	-46,366	830
A022	CO	GO	Goianésia	-15,220	-48,990	667
A023	CO	GO	Caiapônia	-16,967	-51,817	740
A024	CO	GO	Alto Paraiso De Goiás	-14,133	-47,523	1265
A025	CO	GO	Rio Verde	-17,785	-50,965	780
A026	CO	GO	Mineiros	-17,455	-52,601	862
A027	CO	GO	Paraúna	-16,963	-50,426	679
A028	CO	GO	Iporã	-16,423	-51,149	610
A029	CO	GO	Edeia	-17,337	-49,915	608
A031	CO	GO	São Miguel Do Araguaia	-12,821	-50,336	210
A032	CO	GO	Monte Alegre De Goiás	-13,254	-46,890	552
A033	CO	GO	Pires Do Rio	-17,304	-48,284	757
A034	CO	GO	Catalão	-18,155	-47,928	901
A035	CO	GO	Itumbiara	-18,410	-49,192	491

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A036	CO	GO	Cristalina	-16,785	-47,613	1211
A037	CO	GO	Silvania	-16,680	-48,618	952
A056	CO	GO	Cristalina (Fazenda Santa Monica)	-16,399	-47,626	932
A702	CO	MS	Campo Grande	-20,447	-54,723	528
A703	CO	MS	Ponta Porã	-22,553	-55,716	668
A704	CO	MS	Três Lagoas	-20,783	-51,712	329
A709	CO	MS	Ivinhema	-22,301	-53,823	377
A710	CO	MS	Paranaíba	-19,696	-51,182	408
A717	CO	MS	Nhumirim	-18,989	-56,623	102
A719	CO	MS	Aquidauana	-20,476	-55,784	151
A720	CO	MS	Coxim	-18,512	-54,736	251
A721	CO	MS	Dourados	-22,194	-54,911	463
A722	CO	MS	Miranda	-20,396	-56,432	132
A723	CO	MS	Porto Murtinho	-21,706	-57,887	79
A724	CO	MS	Corumbá	-18,997	-57,637	112
A730	CO	MS	Chapadão Do Sul	-18,802	-52,603	821
A731	CO	MS	Maracaju	-21,609	-55,177	389
A732	CO	MS	São Gabriel Do Oeste	-19,420	-54,553	646
A742	CO	MS	Cassilândia	-19,122	-51,721	495
A743	CO	MS	Rio Brilhante	-21,775	-54,528	324
A749	CO	MS	Jutí	-22,857	-54,606	375
A750	CO	MS	Amambai	-23,003	-55,329	434
A751	CO	MS	Sete Quedas	-23,967	-55,024	398
A752	CO	MS	Itaquirai	-23,449	-54,182	338
A754	CO	MS	Sidrolândia	-20,982	-54,972	471
A756	CO	MS	Agua Clara	-20,444	-52,876	324
A757	CO	MS	Bela Vista	-22,102	-56,541	206
A758	CO	MS	Jardim	-21,479	-56,138	252
A759	CO	MS	Bataguassu	-21,750	-52,471	392

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A760	CO	MS	Costa Rica	-18,493	-53,171	727
A761	CO	MS	Sonora	-17,635	-54,761	495
A901	CO	MT	Cuiabá	-15,559	-56,063	242
A902	CO	MT	Tangara Da Serra	-14,650	-57,432	440
A903	CO	MT	S.J. Do Rio Claro	-13,454	-56,677	340
A904	CO	MT	Sorriso	-12,555	-55,723	379
A905	CO	MT	Campo Novo Dos Parecis	-13,786	-57,839	525
A906	CO	MT	Guarantã Do Norte	-9,953	-54,898	284
A907	CO	MT	Rondonópolis	-16,463	-54,580	290
A908	CO	MT	Agua Boa	-14,016	-52,212	440
A909	CO	MT	Alto Araguaia	-17,339	-53,224	753
A910	CO	MT	Apiácas	-9,563	-57,394	218
A911	CO	MT	Sapezal	-13,304	-58,763	105
A912	CO	MT	Campo Verde	-15,531	-55,136	748
A913	CO	MT	Comodoro	-13,708	-59,763	577
A914	CO	MT	Juara	-11,280	-57,527	263
A915	CO	MT	Paranatinga	-14,421	-54,036	477
A916	CO	MT	Querência	-12,603	-52,163	355
A917	CO	MT	Sinop	-11,982	-55,566	367
A919	CO	MT	Cotriguaçu	-9,906	-58,572	265
A920	CO	MT	Juína	-11,375	-58,775	365
A921	CO	MT	São Felix Do Araguaia	-11,619	-50,728	201
A922	CO	MT	Vila Bela Da Santíssima Trindade	-15,063	-59,873	213
A923	CO	MT	Primavera Do Leste	-15,580	-54,381	680
A924	CO	MT	Alta Floresta	-10,077	-56,179	292
A926	CO	MT	Carlinda	-9,971	-55,827	294
A927	CO	MT	Brasnorte (Novo Mundo)	-12,522	-58,231	426
A928	CO	MT	Nova Maringá	-13,039	-57,092	334
A929	CO	MT	Nova Ubiratã	-13,411	-54,752	466

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A930	CO	MT	Gaúcha Do Norte	-13,185	-53,258	376
A931	CO	MT	Santo Antônio Do Leste	-14,928	-53,884	664
A932	CO	MT	Guiratinga	-16,342	-53,766	525
A933	CO	MT	Itiquirá	-17,175	-54,502	593
A934	CO	MT	Alto Taquari	-17,841	-53,289	862
A935	CO	MT	Porto Estrela	-15,325	-57,226	148
A936	CO	MT	Salto Do Céu	-15,125	-58,127	301
A937	CO	MT	Pontes E Lacerda	-15,234	-59,346	273
A942	CO	MT	São Jose Do Xingu	-10,484	-52,372	300
A943	CO	MT	Serra Nova Dourada	-11,988	-51,426	441
A944	CO	MT	Rosário Oeste	-14,829	-56,442	195
A102	N	AC	Parque Estadual Chandless	-9,358	-69,926	185
A104	N	AC	Rio Branco	-9,680	-68,165	163
A108	N	AC	Cruzeiro Do Sul	-7,611	-72,681	220
A136	N	AC	Porto Walter	-8,267	-72,748	205
A137	N	AC	Marechal Thaumaturgo	-8,950	-72,787	221
A138	N	AC	Feijó	-8,143	-70,344	157
A140	N	AC	Epitaciolândia	-11,024	-68,735	225
A101	N	AM	Manaus	-3,103	-60,016	61
A109	N	AM	Eirunepé	-6,650	-69,869	122
A110	N	AM	Boca Do Acre	-8,777	-67,332	112
A111	N	AM	Labrea	-7,261	-64,789	62
A112	N	AM	Humaitá	-7,553	-63,071	54
A113	N	AM	Apuí	-7,206	-59,889	157
A117	N	AM	Coari	-4,097	-63,145	34
A119	N	AM	Manacapuru	-3,295	-60,628	37
A120	N	AM	Autazes	-3,583	-59,129	20
A121	N	AM	Itacoatiara	-3,133	-58,483	42
A122	N	AM	Maués	-3,399	-57,674	25
A123	N	AM	Parintins	-2,639	-56,756	19

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A124	N	AM	Urucará	-2,535	-57,758	18
A125	N	AM	Rio Urubu	-2,634	-59,601	113
A126	N	AM	Presidente Figueiredo	-2,057	-60,026	61
A128	N	AM	Barcelos	-0,987	-62,924	30
A133	N	AM	Manicoré	-5,789	-61,288	41
A134	N	AM	S. G. Da Cachoeira	-0,125	-67,061	80
A144	N	AM	Novo Aripuana	-8,091	-60,381	45
A242	N	AP	Oiapoque	3,814	-51,863	15
A244	N	AP	Porto Grande	0,694	-51,404	85
A249	N	AP	Macapá	0,035	-51,089	17
A251	N	AP	Itaubal	0,568	-50,824	21
A201	N	PA	Belém	-1,411	-48,440	21
A202	N	PA	Castanhal	-1,301	-47,948	47
A209	N	PA	Medicilândia	-3,511	-52,963	252
A210	N	PA	Pacajá	-3,844	-50,638	89
A211	N	PA	Placas	-3,864	-54,216	100
A212	N	PA	Paragominas	-2,991	-47,356	93
A213	N	PA	Tome Açú	-2,592	-48,361	43
A214	N	PA	Rondon Do Para	-4,827	-48,174	203
A215	N	PA	Salinópolis	-0,619	-47,357	23
A216	N	PA	São Felix Do Xingu	-6,640	-51,957	211
A226	N	PA	Braganca	-1,047	-46,786	41
A227	N	PA	Soure	-0,728	-48,516	13
A228	N	PA	Breves	-1,680	-50,478	11
A229	N	PA	Tucuruí	-3,823	-49,675	138
A230	N	PA	Serra Dos Carajás	-6,077	-50,142	707
A231	N	PA	Itaituba	-4,277	-55,993	24
A232	N	PA	Obidos	-1,881	-55,520	90
A233	N	PA	Santana Do Araguaia	-9,339	-50,350	177
A234	N	PA	Tucumã	-6,743	-51,142	321

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A235	N	PA	Novo Repartimento	-4,244	-49,939	101
A236	N	PA	Cametá	-2,240	-49,500	10
A239	N	PA	Monte Alegre	-2,000	-54,076	101
A240	N	PA	Marabá	-5,366	-49,051	117
A241	N	PA	Conceição Do Araguaia	-8,304	-49,283	176
A245	N	PA	Porto De Moz	-1,822	-52,112	19
A246	N	PA	Mina Do Palito	-6,320	-55,788	260
A247	N	PA	Xinguara	-7,111	-49,926	245
A248	N	PA	Capitão Poço	-1,735	-47,058	79
A250	N	PA	Santarém	-2,503	-54,720	137
A252	N	PA	Dom Eliseu	-4,281	-47,564	251
A253	N	PA	Altamira	-3,270	-52,395	191
A254	N	PA	Redenção	-8,043	-50,007	199
A256	N	PA	Santa Maria Das Barreiras	-8,730	-49,856	165
A925	N	RO	Porto Velho	-8,794	-63,846	87
A938	N	RO	Vilhena	-12,735	-60,158	583
A939	N	RO	Cacoal	-11,446	-61,434	184
A940	N	RO	Ariquemes	-9,949	-62,962	128
A135	N	RR	Boa Vista	2,817	-60,691	82
A009	N	TO	Palmas	-10,148	-48,314	267
A010	N	TO	Paraná	-12,615	-47,872	285
A018	N	TO	Peixe	-12,015	-48,545	251
A019	N	TO	Gurupi	-11,745	-49,052	274
A020	N	TO	Pedro Afonso	-8,969	-48,177	190
A021	N	TO	Araguaína	-7,104	-48,201	231
A038	N	TO	Dianópolis	-11,594	-46,847	728
A039	N	TO	Formoso Do Araguaia	-11,887	-49,608	215
A040	N	TO	Mateiros	-10,434	-45,922	791
A041	N	TO	Marianópolis Do To	-9,576	-49,723	187
A043	N	TO	Campos Lindos	-8,155	-46,639	427

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A044	N	TO	Araguatins	-5,644	-48,112	131
A048	N	TO	Santa Fe Do Araguaia	-7,124	-48,781	171
A049	N	TO	Colinas Do Tocantins	-8,093	-48,479	200
A050	N	TO	Rio Sono	-9,793	-47,133	291
A051	N	TO	Pium	-10,477	-49,629	161
A052	N	TO	Santa Rosa Do Tocantins	-11,429	-48,185	306
A053	N	TO	Almas	-11,284	-47,212	503
A054	N	TO	Araguaçu	-12,592	-49,529	231
A055	N	TO	Lagoa Da Confusão	-10,828	-49,848	178
A303	NE	AL	Maceió	-9,551	-35,770	84
A323	NE	AL	Pão De Açúcar	-9,749	-37,431	21
A327	NE	AL	Palmeira Dos Índios	-9,420	-36,620	278
A353	NE	AL	Arapiraca	-9,804	-36,619	237
A355	NE	AL	Coruripe	-10,129	-36,286	82
A356	NE	AL	São Luís Do Quitunde	-9,287	-35,566	14
A371	NE	AL	Piranhas	-9,622	-37,767	187
A401	NE	BA	Salvador	-13,006	-38,506	48
A402	NE	BA	Barreiras	-12,125	-45,027	474
A404	NE	BA	Luiz Eduardo Magalhaes	-12,153	-45,830	761
A405	NE	BA	Caravelas	-17,739	-39,259	6
A406	NE	BA	Cruz Das Almas	-12,676	-39,089	220
A407	NE	BA	Itiruçu	-13,528	-40,120	757
A408	NE	BA	Itaberaba	-12,524	-40,300	250
A410	NE	BA	Ilhéus	-14,659	-39,181	80
A412	NE	BA	Macajuba	-12,132	-40,354	339
A413	NE	BA	Feira De Santana	-12,196	-38,967	230
A414	NE	BA	Vitoria Da Conquista	-14,886	-40,801	879
A415	NE	BA	Santa Rita De Cassia	-11,003	-44,525	450
A416	NE	BA	Correntina	-13,332	-44,617	552
A418	NE	BA	Bom Jesus Da Lapa	-13,251	-43,405	448

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A422	NE	BA	Abrolhos	-17,963	-38,703	21
A423	NE	BA	Remanso	-9,626	-42,077	397
A424	NE	BA	Irecê	-11,329	-41,865	768
A425	NE	BA	Lençóis	-12,558	-41,389	438
A426	NE	BA	Guanambi	-14,208	-42,750	552
A427	NE	BA	Porto Seguro	-16,389	-39,182	86
A428	NE	BA	Senhor Do Bonfim	-10,443	-40,148	532
A429	NE	BA	Barra	-11,085	-43,139	408
A430	NE	BA	Piatá	-13,156	-41,774	1284
A431	NE	BA	Conde	-12,036	-37,684	32
A432	NE	BA	Buritirama	-10,723	-43,651	506
A433	NE	BA	Brumado	-14,182	-41,672	473
A434	NE	BA	Amargosa	-13,009	-39,617	398
A436	NE	BA	Queimadas	-10,985	-39,617	310
A437	NE	BA	Una	-15,280	-39,091	74
A438	NE	BA	Marau	-13,907	-38,972	6
A439	NE	BA	Ibotirama	-12,193	-43,213	425
A440	NE	BA	Jacobina	-11,205	-40,465	441
A441	NE	BA	Serrinha	-11,665	-39,023	338
A442	NE	BA	Euclides Da Cunha	-10,537	-38,997	432
A443	NE	BA	Delfino	-10,455	-41,207	646
A444	NE	BA	Valença	-13,344	-39,127	93
A445	NE	BA	Ipiaú	-14,171	-39,692	132
A446	NE	BA	Itapetinga	-15,245	-40,229	271
A447	NE	BA	Belmonte	-16,088	-39,215	90
A448	NE	BA	Curaca	-9,001	-39,913	370
A449	NE	BA	Pilão Arcado	-10,018	-42,500	385
A450	NE	BA	Jeremoabo	-10,081	-38,346	261
A452	NE	BA	Formosa Do Rio Preto	-11,052	-45,201	488
A455	NE	BA	Itamaraju	-17,007	-39,558	110

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A456	NE	BA	Salvador (Radio Farol)	-12,808	-38,496	31
A458	NE	BA	Ribeira Do Amparo	-11,059	-38,444	182
A305	NE	CE	Fortaleza	-3,816	-38,538	30
A306	NE	CE	Sobral	-3,748	-40,346	92
A314	NE	CE	Guaramiranga	-4,229	-38,959	866
A315	NE	CE	Barbalha	-7,301	-39,271	409
A319	NE	CE	Iguatu	-6,396	-39,269	222
A324	NE	CE	Tauá	-6,017	-40,281	411
A325	NE	CE	Quixeramobim	-5,174	-39,289	221
A332	NE	CE	Morada Nova	-5,091	-38,365	92
A339	NE	CE	Jaguaruana	-4,787	-37,767	49
A342	NE	CE	Crateús	-5,187	-40,672	298
A347	NE	CE	Campos Sales	-7,078	-40,363	578
A358	NE	CE	Jaguaribe	-5,906	-38,628	149
A359	NE	CE	Itapipoca	-3,484	-39,589	104
A360	NE	CE	Acaraú	-3,121	-40,087	67
A368	NE	CE	Tianguá	-3,732	-41,012	756
A369	NE	CE	Quixadá	-4,979	-39,057	193
A203	NE	MA	São Luís	-2,527	-44,214	55
A204	NE	MA	Balsas	-7,456	-46,027	271
A205	NE	MA	Carolina	-7,337	-47,460	183
A206	NE	MA	Chapadinha	-3,743	-43,352	104
A207	NE	MA	Grajau	-5,816	-46,162	232
A217	NE	MA	Farol de Santana	-2,271	-43,624	10
A218	NE	MA	Preguiças	-2,592	-42,708	5
A219	NE	MA	Turialva	-1,661	-45,372	36
A220	NE	MA	Bacabal	-4,243	-44,795	22
A221	NE	MA	Barra Do Corda	-5,507	-45,237	154
A222	NE	MA	Colinas	-6,033	-44,233	175
A223	NE	MA	Alto Parnaíba	-9,108	-45,932	284

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A224	NE	MA	Estreito	-6,653	-47,418	183
A225	NE	MA	Imperatriz	-5,556	-47,460	118
A237	NE	MA	Caxias	-4,821	-43,344	85
A238	NE	MA	Buriticupu	-4,321	-46,449	175
A255	NE	MA	Zé Doca	-3,269	-45,651	46
A310	NE	PB	Areia	-6,975	-35,718	573
A313	NE	PB	Campina Grande	-7,226	-35,905	546
A320	NE	PB	Joao Pessoa	-7,165	-34,816	34
A321	NE	PB	Patos	-7,080	-37,273	264
A333	NE	PB	São Gonçalo	-6,836	-38,312	237
A334	NE	PB	Monteiro	-7,894	-37,125	606
A348	NE	PB	Cabaceiras	-7,483	-36,286	392
A352	NE	PB	Camaratuba	-6,562	-35,135	136
A373	NE	PB	Itaporanga	-7,318	-38,141	292
A301	NE	PE	Recife	-8,059	-34,959	11
A307	NE	PE	Petrolina	-9,388	-40,523	373
A309	NE	PE	Arco Verde	-8,434	-37,056	684
A322	NE	PE	Garanhuns	-8,911	-36,493	828
A328	NE	PE	Surubim	-7,840	-35,801	421
A329	NE	PE	Cabrobó	-8,504	-39,315	343
A341	NE	PE	Caruaru	-8,365	-36,028	852
A349	NE	PE	Ibimirim	-8,509	-37,712	434
A350	NE	PE	Serra Talhada	-7,954	-38,295	499
A351	NE	PE	Floresta	-8,599	-38,584	327
A357	NE	PE	Palmares	-8,667	-35,568	164
A366	NE	PE	Ouricuri	-7,886	-40,103	458
A370	NE	PE	Salgueiro	-8,058	-39,096	447
A308	NE	PI	Parnaíba	-3,087	-41,783	52
A311	NE	PI	Floriano	-6,761	-43,003	126
A312	NE	PI	Teresina	-5,035	-42,801	75

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A326	NE	PI	Bom Jesus Do Piauí	-9,083	-44,326	296
A330	NE	PI	Paulistana	-8,132	-41,143	376
A331	NE	PI	São Joao Do Piauí	-8,364	-42,253	231
A335	NE	PI	Piripiri	-4,276	-41,795	158
A336	NE	PI	Alvorada Do Gurgueia	-8,442	-43,866	261
A337	NE	PI	Caracol	-9,286	-43,324	515
A343	NE	PI	Picos	-7,071	-41,404	233
A345	NE	PI	São Raimundo Nonato	-9,033	-42,701	385
A346	NE	PI	Uruçuí	-7,441	-44,345	399
A354	NE	PI	Oeiras	-6,974	-42,147	154
A361	NE	PI	Castelo Do Piauí	-5,349	-41,512	269
A363	NE	PI	Valença Do Piauí	-6,399	-41,740	313
A364	NE	PI	Gilbués	-9,875	-45,346	425
A365	NE	PI	Canto Do Buriti	-8,118	-42,976	312
A374	NE	PI	Corrente	-10,429	-45,173	452
A375	NE	PI	Baixa Grande Do Ribeiro	-8,334	-45,095	519
A376	NE	PI	Campo Maior	-4,864	-42,146	125
A377	NE	PI	Angical Do Piauí	-6,089	-42,727	183
A304	NE	RN	Natal	-5,837	-35,208	47
A316	NE	RN	Caico	-6,467	-37,085	171
A317	NE	RN	Macau	-5,151	-36,573	17
A318	NE	RN	Mossoró	-4,904	-37,367	29
A340	NE	RN	Apodi	-5,627	-37,815	131
A344	NE	RN	Calcanhar	-5,160	-35,487	10
A367	NE	RN	Santa Cruz	-6,228	-36,027	227
A372	NE	RN	Ipanguaçu	-5,535	-36,872	19
A409	NE	SE	Aracaju	-10,953	-37,054	4
A417	NE	SE	Itabaianinha	-11,273	-37,795	205
A419	NE	SE	Poço Verde	-10,738	-38,108	367
A420	NE	SE	Carira	-10,400	-37,747	290

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A421	NE	SE	Brejo Grande	-10,474	-36,482	6
A451	NE	SE	Itabaiana	-10,672	-37,471	213
A453	NE	SE	Nossa Senhora Da Gloria	-10,208	-37,432	271
A807	S	PR	Curitiba	-25,449	-49,231	923
A818	S	PR	Ivaí	-25,011	-50,854	804
A820	S	PR	Mal. Candido Rondon	-24,533	-54,019	392
A821	S	PR	Joaquim Távora	-23,505	-49,946	513
A823	S	PR	Inácio Martins	-25,568	-51,078	1209
A824	S	PR	Icaraíma	-23,390	-53,636	381
A825	S	PR	Goioerê	-24,184	-53,049	481
A835	S	PR	Maringá	-23,405	-51,933	549
A842	S	PR	Nova Fatima	-23,415	-50,578	664
A843	S	PR	Dois Vizinhos	-25,699	-53,095	546
A846	S	PR	Foz Do Iguaçu	-25,602	-54,483	235
A849	S	PR	Diamante Do Norte	-22,639	-52,890	368
A850	S	PR	Paranapoema	-22,658	-52,134	309
A855	S	PR	Planalto	-25,722	-53,748	399
A869	S	PR	Cidade Gaúcha	-23,359	-52,932	366
A871	S	PR	Japuira	-23,773	-50,181	693
A872	S	PR	Ventania	-24,280	-50,210	1093
A873	S	PR	Morrentes	-25,509	-48,809	50
A874	S	PR	São Mateus Do Sul	-25,836	-50,369	780
A875	S	PR	General Carneiro	-26,399	-51,354	1009
A876	S	PR	Clevelândia	-26,417	-52,349	966
B803	S	PR	Campina Da Lagoa	-24,571	-52,800	598
B804	S	PR	Laranjeiras Do Sul	-25,369	-52,392	835
B806	S	PR	Colombo	-25,322	-49,158	950
A801	S	RS	Porto Alegre - Jardim Botânico	-30,054	-51,175	41
A802	S	RS	Rio Grande	-32,079	-52,168	5

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A803	S	RS	Santa Maria	-29,725	-53,721	103
A804	S	RS	Santana Do Livramento	-30,751	-55,401	196
A805	S	RS	Santo Augusto	-27,854	-53,791	490
A808	S	RS	Torres	-29,350	-49,733	8
A809	S	RS	Uruguaiana	-29,840	-57,082	74
A810	S	RS	Santa Rosa	-27,891	-54,480	273
A811	S	RS	Canguçu	-31,403	-52,701	447
A812	S	RS	Caçapava Do Sul	-30,545	-53,467	421
A813	S	RS	Rio Pardo	-29,872	-52,382	107
A826	S	RS	Alegrete	-29,709	-55,526	121
A827	S	RS	Baje	-31,348	-54,013	226
A828	S	RS	Erechim	-27,658	-52,306	777
A829	S	RS	São Jose Dos Ausentes	-28,749	-50,058	1229
A830	S	RS	São Borja	-28,650	-56,016	81
A831	S	RS	Quarai	-30,369	-56,437	113
A832	S	RS	São Gabriel	-30,341	-54,311	115
A833	S	RS	Santiago	-29,192	-54,886	390
A834	S	RS	Tramandaí	-30,010	-50,136	5
A836	S	RS	Jaguarão	-32,535	-53,376	31
A837	S	RS	Soledade	-28,859	-52,542	660
A838	S	RS	Camaquã	-30,808	-51,834	92
A839	S	RS	Passo Fundo	-28,227	-52,404	681
A840	S	RS	Bento Goncalves	-29,165	-51,534	623
A844	S	RS	Lagoa Vermelha	-28,222	-51,513	834
A852	S	RS	São Luiz Gonzaga	-28,417	-54,963	246
A853	S	RS	Cruz Alta	-28,603	-53,674	427
A854	S	RS	Frederico Westphalen	-27,396	-53,429	489
A856	S	RS	Palmeira Das Missões	-27,920	-53,318	614
A878	S	RS	Mostardas	-31,248	-50,906	4
A879	S	RS	Canela	-29,369	-50,827	831

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A880	S	RS	Vacaria	-28,514	-50,883	970
A881	S	RS	Dom Pedrito	-31,003	-54,618	150
A882	S	RS	Teutônia	-29,449	-51,823	81
A883	S	RS	Ibirubá	-28,653	-53,112	455
A884	S	RS	Campo Bom	-29,674	-51,064	23
A886	S	RS	Tupanciretã	-29,089	-53,827	462
A887	S	RS	Capão Do Leão (Pelotas)	-31,803	-52,407	13
A889	S	RS	São Vicente Do Sul	-29,702	-54,694	134
A893	S	RS	Encruzilhada Do Sul	-30,543	-52,525	428
A894	S	RS	Serafina Correa	-28,705	-51,871	545
A897	S	RS	Cambara Do Sul	-29,049	-50,150	1017
A899	S	RS	Santa Vitoria Do Palmar - Barra Do Chuí	-33,742	-53,372	7
B807	S	RS	Porto Alegre- Belém Novo	-30,186	-51,178	3
A806	S	SC	Florianópolis	-27,603	-48,620	5
A814	S	SC	Urussanga	-28,532	-49,315	41
A815	S	SC	São Joaquim	-28,276	-49,935	1400
A816	S	SC	Novo Horizonte	-26,406	-52,850	944
A817	S	SC	Indaial	-26,914	-49,268	72
A841	S	SC	Joaçaba	-27,169	-51,559	768
A845	S	SC	Bom Jardim Da Serra - Morro Da Igreja	-28,127	-49,480	1790
A848	S	SC	Dionísio Cerqueira	-26,287	-53,633	808
A851	S	SC	Itapoá	-26,081	-48,642	6
A857	S	SC	São Miguel Do Oeste	-26,776	-53,504	700
A858	S	SC	Xanxerê	-26,939	-52,398	879
A859	S	SC	Caçador	-26,819	-50,986	944
A860	S	SC	Curitibanos	-27,289	-50,604	978
A861	S	SC	Rio Do Campo	-26,937	-50,146	592
A862	S	SC	Rio Negrinho	-26,249	-49,574	800

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A863	S	SC	Ituporanga	-27,418	-49,647	480
A864	S	SC	Major Vieira	-26,394	-50,363	800
A865	S	SC	Lages	-27,802	-50,336	953
A866	S	SC	Laguna - Farol De Santa Marta	-28,604	-48,813	34
A867	S	SC	Araranguá	-28,931	-49,498	2
A868	S	SC	Itajaí	-26,951	-48,762	10
A870	S	SC	Rancho Queimado	-27,679	-49,042	881
A895	S	SC	Chapeco	-27,085	-52,636	679
A898	S	SC	Campos Novos	-27,389	-51,216	963
A612	SE	ES	Vitoria	-20,271	-40,306	9
A613	SE	ES	Santa Teresa	-19,988	-40,580	976
A614	SE	ES	Linhares	-19,357	-40,069	40
A615	SE	ES	Alfredo Chaves	-20,636	-40,742	14
A616	SE	ES	São Mateus	-18,676	-39,864	29
A617	SE	ES	Alegre	-20,751	-41,489	138
A622	SE	ES	Presidente Kennedy	-21,101	-41,039	69
A623	SE	ES	Nova Venécia	-18,695	-40,391	156
A631	SE	ES	Ecoporanga	-18,291	-40,736	224
A632	SE	ES	Marilândia	-19,407	-40,540	95
A633	SE	ES	Venda Nova Do Imigrante	-20,386	-41,190	722
A634	SE	ES	Vila Velha	-20,467	-40,404	25
A657	SE	ES	Afonso Claudio	-20,104	-41,107	507
A502	SE	MG	Barbacena	-21,228	-43,768	1169
A505	SE	MG	Araxá	-19,606	-46,950	1018
A506	SE	MG	Montes Claros	-16,686	-43,844	646
A507	SE	MG	Uberlândia	-18,917	-48,256	875
A508	SE	MG	Almenara	-16,167	-40,688	189
A509	SE	MG	Monte Verde	-22,862	-46,043	1545
A510	SE	MG	Viçosa	-20,763	-42,864	698

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A511	SE	MG	Timóteo	-19,574	-42,622	493
A512	SE	MG	Ituiutaba	-18,953	-49,525	540
A513	SE	MG	Ouro Branco	-20,557	-43,756	1048
A514	SE	MG	São Joao Del Rei	-21,107	-44,251	930
A515	SE	MG	Varginha	-21,566	-45,404	950
A516	SE	MG	Passos	-20,745	-46,634	782
A517	SE	MG	Muriaé	-21,105	-42,376	283
A518	SE	MG	Juiz De Fora	-21,770	-43,364	937
A519	SE	MG	Campina Verde	-19,539	-49,518	559
A520	SE	MG	Conceição Das Alagoas	-19,986	-48,152	573
A521	SE	MG	Belo Horizonte (Pampulha)	-19,884	-43,969	854
A522	SE	MG	Serra Dos Aimorés	-17,799	-40,250	212
A523	SE	MG	Patrocínio	-18,997	-46,986	978
A524	SE	MG	Formiga	-20,455	-45,454	878
A525	SE	MG	Sacramento	-19,875	-47,434	913
A526	SE	MG	Montalvânia	-14,408	-44,404	520
A527	SE	MG	Teofilo Otoni	-17,893	-41,515	467
A528	SE	MG	Três Marias	-18,201	-45,460	931
A529	SE	MG	Passa Quatro	-22,396	-44,962	1017
A530	SE	MG	Caldas	-21,918	-46,383	1077
A531	SE	MG	Maria Da Fe	-22,315	-45,373	1281
A532	SE	MG	Governador Valadares	-18,830	-41,977	198
A533	SE	MG	Guanhães	-18,787	-42,943	853
A534	SE	MG	Aimorés	-19,533	-41,091	288
A535	SE	MG	Florestal	-19,885	-44,417	754
A536	SE	MG	Dores Do Indaiá	-19,482	-45,594	721
A537	SE	MG	Diamantina	-18,231	-43,648	1359
A538	SE	MG	Curvelo	-18,748	-44,454	669
A539	SE	MG	Moçambinho	-15,086	-44,016	454
A540	SE	MG	Mantena	-18,781	-40,987	255

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A541	SE	MG	Capelinha	-17,706	-42,389	932
A542	SE	MG	Unaí	-16,554	-46,882	641
A543	SE	MG	Espinosa	-14,912	-42,809	565
A544	SE	MG	Buritis	-15,524	-46,436	894
A545	SE	MG	Pirapora	-17,258	-44,836	505
A546	SE	MG	Guarda-Mor	-17,561	-47,199	997
A547	SE	MG	São Romão	-16,363	-45,124	490
A548	SE	MG	Chapada Gaúcha	-15,300	-45,617	873
A549	SE	MG	Aguas Vermelhas	-15,752	-41,458	754
A550	SE	MG	Itaobim	-16,576	-41,486	272
A551	SE	MG	Rio Pardo De Minas	-15,723	-42,436	850
A552	SE	MG	Salinas	-16,160	-42,310	487
A553	SE	MG	Joao Pinheiro	-17,784	-46,119	877
A554	SE	MG	Caratinga	-19,736	-42,137	609
A555	SE	MG	Ibirité (Rola Moca)	-20,031	-44,011	1199
A556	SE	MG	Manhuacu	-20,263	-42,183	819
A557	SE	MG	Coronel Pacheco	-21,547	-43,261	411
A559	SE	MG	Januária	-15,448	-44,366	468
A560	SE	MG	Pompeu	-19,232	-44,964	705
A561	SE	MG	São Sebastiao Do Paraiso	-20,910	-47,114	845
A562	SE	MG	Patos De Minas	-18,521	-46,441	950
A563	SE	MG	Nova Porteirinha (Janaúba)	-15,803	-43,297	532
A564	SE	MG	Divinópolis	-20,173	-44,875	796
A565	SE	MG	Bambuí	-20,031	-46,009	697
A566	SE	MG	Araçuaí	-16,849	-42,035	308
A567	SE	MG	Machado	-21,681	-45,944	969
A568	SE	MG	Uberaba	-19,710	-47,962	778
A569	SE	MG	Sete Lagoas	-19,455	-44,173	719
A570	SE	MG	Oliveira	-20,715	-44,864	1025
A571	SE	MG	Paracatu	-17,244	-46,882	705

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
F501	SE	MG	Belo Horizonte - Cercadinho	-19,980	-43,959	1200
A601	SE	RJ	Seropédica-Ecologia Agrícola	-22,758	-43,685	35
A602	SE	RJ	Rio De Janeiro-Marambaia	-23,050	-43,596	12
A603	SE	RJ	Duque De Caxias - Xerém	-22,590	-43,282	22
A604	SE	RJ	Cambuci	-21,587	-41,958	46
A606	SE	RJ	Arraial Do Cabo	-22,975	-42,021	5
A607	SE	RJ	Campos Dos Goytacazes	-21,715	-41,344	17
A608	SE	RJ	Macaé	-22,376	-41,812	28
A609	SE	RJ	Resende	-22,451	-44,445	439
A610	SE	RJ	Pico Do Couto	-22,465	-43,291	1777
A611	SE	RJ	Valença	-22,358	-43,696	370
A618	SE	RJ	Teresópolis-Parque Nacional	-22,449	-42,987	981
A619	SE	RJ	Paraty	-23,224	-44,727	3
A620	SE	RJ	Campos Dos Goytacazes - São Tome	-22,042	-41,052	7
A621	SE	RJ	Rio De Janeiro - Vila Militar	-22,861	-43,411	30
A624	SE	RJ	Nova Friburgo - Salinas	-22,335	-42,677	1070
A625	SE	RJ	Três Rios	-22,098	-43,208	295
A626	SE	RJ	Rio Claro	-22,654	-44,041	516
A627	SE	RJ	Niterói	-22,867	-43,102	6
A628	SE	RJ	Angra Dos Reis	-22,976	-44,303	6
A629	SE	RJ	Carmo	-21,939	-42,601	293
A630	SE	RJ	Santa Maria Madalena	-21,951	-42,010	517
A636	SE	RJ	Rio De Janeiro - Jacarepaguá	-22,940	-43,403	20
A637	SE	RJ	Paty Do Alferes - Avelar	-22,347	-43,418	508
A652	SE	RJ	Rio De Janeiro - Forte De Copacabana	-22,988	-43,191	26
A659	SE	RJ	Silva Jardim	-22,646	-42,416	19

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(continuação)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A667	SE	RJ	Saquarema - Sampaio Correia	-22,871	-42,609	26
A701	SE	SP	São Paulo - Mirante	-23,496	-46,620	786
A705	SE	SP	Bauru	-22,358	-49,029	636
A706	SE	SP	Campos Do Jordao	-22,750	-45,604	1663
A707	SE	SP	Presidente Prudente	-22,120	-51,409	432
A708	SE	SP	Franca	-20,584	-47,382	1003
A711	SE	SP	São Carlos	-21,980	-47,884	859
A712	SE	SP	Iguape	-24,672	-47,546	3
A713	SE	SP	Sorocaba	-23,426	-47,586	609
A714	SE	SP	Itapeva	-23,982	-48,886	743
A715	SE	SP	São Miguel Arcanjo	-23,852	-48,165	676
A718	SE	SP	Rancharia	-22,373	-50,975	399
A725	SE	SP	Avaré	-23,102	-48,941	776
A726	SE	SP	Piracicaba	-22,703	-47,623	566
A727	SE	SP	Lins	-21,666	-49,735	461
A728	SE	SP	Taubaté	-23,042	-45,521	582
A733	SE	SP	Jales	-20,165	-50,595	460
A734	SE	SP	Valparaíso	-21,319	-50,930	382
A735	SE	SP	Jose Bonifácio	-21,086	-49,920	408
A736	SE	SP	Ariranha	-21,133	-48,841	525
A737	SE	SP	Ibitinga	-21,856	-48,800	497
A738	SE	SP	Casa Branca	-21,781	-47,075	734
A739	SE	SP	Itapira	-22,415	-46,805	635
A740	SE	SP	São Luiz Do Paraitinga	-23,228	-45,417	862
A741	SE	SP	Barra Bonita	-22,471	-48,558	534
A744	SE	SP	Braganca Paulista	-22,952	-46,531	891
A746	SE	SP	Barra Do Turvo	-24,963	-48,416	660
A747	SE	SP	Pradópolis	-21,338	-48,114	540
A748	SE	SP	Barretos	-20,559	-48,545	534

Tabela 49 - Dados das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

(conclusão)

Código	Região	Estado	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
A753	SE	SP	Ituverava	-20,360	-47,775	611
A755	SE	SP	Barueri	-23,524	-46,869	777
A762	SE	SP	Dracena	-21,458	-51,552	720
A763	SE	SP	Marília	-22,235	-49,965	660
A765	SE	SP	Bertioga	-23,845	-46,143	5
A766	SE	SP	Registro	-24,533	-47,864	35
A768	SE	SP	Tupã	-21,927	-50,490	498
A769	SE	SP	Cachoeira Paulista	-22,689	-45,006	586
A770	SE	SP	São Simão	-21,461	-47,579	620
A771	SE	SP	São Paulo - Interlagos	-23,725	-46,678	771

Fonte: INMET (2024).

## APÊNDICE B



Figura 34 - Distribuição espacial das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

Fonte: elaborada pelo próprio autor.