



CLUSTERS DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL PARA O SETOR SUCROENERGÉTICO BRASILEIRO

RENEWABLE ENERGY GENERATION CLUSTERS FOR THE BRAZILIAN SUGAR-ENERGY SECTOR

CLÚSTERES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE PARA EL SECTOR AZUCARERO-ENERGÉTICO BRASILEÑO

Arno Paulo Schmitz¹Gustavo Ortigara²

RESUMO

O setor sucroenergético é relevante para o desenvolvimento sustentável do Brasil, dentre outros motivos pelos benefícios ambientais gerados especialmente na geração de energias renováveis. Visando o enfrentamento de desafios deste setor, este trabalho objetivou agrupar espacialmente as usinas sucroenergéticas por meio da metodologia de *clusterização Skater* e com isso propor uma política de *clusters* industriais para o setor. Para tanto, se utilizou de dados de geração de energia elétrica via bagaço da cana-de-açúcar no Brasil, além de dados da localização de universidades e centros de pesquisa vinculados ao setor, as distâncias das usinas às subestações de transmissão de energia e outras variáveis que representam a logística do setor sucroenergético. Como resultado, foi estimado em sete o número ótimo de *clusters*. Com base nos resultados obtidos verificou-se que os maiores *clusters*, em número de empresas, abrangem as regiões tradicionais de produção de cana-de-açúcar, onde estão localizadas grande parte das empresas sucroenergéticas. Estes *clusters* maiores ocupam: a) a região sul, parte oeste da região sudeste e sul do Estado do Mato Grosso do Sul; b) parte leste da região Sudeste; c) litoral da região nordeste. Os demais *clusters* estão distribuídos pelo restante do território brasileiro, porém com igual importância sob o ponto de vista econômico e tecnológico, apesar de agruparem um menor número de empresas. Alguns gargalos com respeito à modernização tecnológica, de logística e despacho de energia foram identificados. Neste sentido, a *clusterização* é importante para a resolução de problemas do setor observando as diversas características regionais.

Palavras-chave: *cluster* espacial; bioenergia; sustentabilidade; política energética.

¹ Doutor em Desenvolvimento Econômico (UFPR). Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba. Paraná. Brasil. E-mail: arno@ufpr.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6924-9611>.

² Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial (UFPR). Companhia Paranaense de Energia (COPEL). Curitiba. PR. Brasil. E-mail: gortigara@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3504-9932>.

ABSTRACT

The sugarcane-energy sector is crucial to Brazil's sustainable development, among other reasons, due to the environmental benefits generated, especially in renewable energy generation. To address the challenges facing this sector, this study aimed to spatially group sugarcane-energy plants using the Skater clustering methodology and, thus, propose an industrial cluster policy for the industry. To this end, data on electricity generation from sugarcane bagasse in Brazil were used, as well as data on the location of universities and research centers linked to the sector, the distances between plants and power transmission substations, and other variables representing the logistics of the sugarcane-energy sector. As a result, the optimal number of clusters was estimated at seven. Based on the results obtained, it was found that the largest clusters, in terms of number of companies, encompass the traditional sugarcane-producing regions, where most sugarcane-energy companies are located. These larger clusters are in: a) the southern region, the western part of the southeastern region, and the south of the state of Mato Grosso do Sul; b) the eastern part of the southeastern region; c) the coast of the northeastern region. The remaining clusters are distributed throughout the rest of Brazil but are equally important from an economic and technological perspective, despite having a smaller number of companies. Some bottlenecks regarding technological modernization, logistics, and energy dispatch have been identified. Therefore, clustering is important for solving sector problems by considering the diverse regional characteristics.

Keywords: spatial *cluster*; bioenergy; sustainable development; energy policy.

RESUMEN

El sector sucroenergético es crucial para el desarrollo sostenible de Brasil, entre otras razones debido a los beneficios ambientales generados, especialmente en la generación de energía renovable. Para abordar los desafíos que enfrenta este sector, este estudio tuvo como objetivo agrupar en términos espaciales las plantas de energía de caña de azúcar utilizando la metodología de agrupamiento Skater y, de esta manera, proponer una política de clústeres industriales para el sector. Para este fin, se utilizaron datos sobre la generación de electricidad a partir del bagazo de caña de azúcar en Brasil, así como datos sobre la ubicación de universidades y centros de investigación vinculados al sector, las distancias entre plantas y subestaciones de transmisión de energía, y otras variables que representan la logística del sector sucroenergético. Como resultado, el número óptimo de clústeres se estimó en siete. Con base en los resultados obtenidos, se encontró que los clústeres más grandes, en términos de número de empresas, abarcan las regiones productoras de caña de azúcar tradicionales, donde se ubican la mayoría de las empresas de energía de caña de azúcar. Estos clústeres más grandes ocupan: a) la región sur, la parte oeste de la región sureste y el sur del estado de Mato Grosso do Sul; b) la parte oriental de la región sureste; c) la costa de la región noreste. Los clústeres restantes se distribuyen por el resto de Brasil, pero son igualmente importantes desde una perspectiva económica y tecnológica, a pesar de contar con un menor número de empresas. Se han identificado algunos obstáculos en materia de modernización tecnológica, logística y despacho de energía. Por lo tanto, la agrupación en clústeres es importante para resolver los problemas del sector, considerando las diversas características regionales.

Palabras clave: clúster espacial; bioenergía; desarrollo sostenible; política energética.

Como citar este artigo: SCHMITZ, A. P.; ORTIGARA, G. Clusters de geração de energia renovável para o setor sucroenergético brasileiro. **DRd – Desenvolvimento Regional em debate**, v. 15, p. 1062-1087, 04 nov. 2025. Doi: <https://doi.org/10.24302/drd.v15.6033>.

Artigo recebido em: 02/08/2025

Artigo aprovado em: 15/10/2025

Artigo publicado em: 04/11/2025

1 INTRODUÇÃO

A energia, nas suas diferentes formas, é um produto importante para uma vida confortável dos seres humanos. Neste sentido, a segurança energética é fundamental para as sociedades e o desenvolvimento das nações. No curto prazo, ela garante o suprimento de energia (oferta) frente a demanda dos mercados consumidores, inclusive caso ocorram alterações inesperadas no lado da demanda. No longo prazo, o planejamento do fornecimento de energia visa atender à demanda necessária ao crescimento econômico e deve obedecer aos requisitos ambientais (Santos, 2016).

O ser humano, ao utilizar os combustíveis fósseis como fonte de energia, ampliou as emissões de dióxido de carbono (CO₂), o que resultou no aquecimento global e as alterações no clima. Adicionalmente, o crescente desmatamento de florestas, a impermeabilização do solo para a expansão das cidades e o crescimento do setor de transportes (baseado em combustíveis fósseis), contribuem para agravar este cenário. Para conter o avanço das mudanças climáticas, parte importante dos países e setores produtivos têm implementado ações para acelerar a descarbonização. Este movimento é motivado pelos impactos climáticos observáveis atualmente e pelas perspectivas para o futuro, bem como pelos acordos mundiais sobre o clima (Gutierrez, 2020).

As fontes renováveis de energia são importantes para o processo de descarbonização e pode ser produzida a partir de diversas fontes. Para a geração de energia elétrica pode-se citar as seguintes fontes: hidráulica; eólica; solar fotovoltaica; termelétricas a partir de biomassas ou biogás; maremotriz; e geotérmica. Para outros usos, tais como o industrial, transportes ou agropecuária, uma das fontes renováveis de energia podem ser os derivados da cana-de-açúcar (etanol e bagaço da cana-de-açúcar), outros resíduos agropecuários, dentre outras fontes possíveis como o biodiesel que é um energético secundário (Bondarik *et al.*, 2018). As energias renováveis podem ter os mais diferentes usos, tais como: produção de eletricidade; geração de calor; insumo para atividades industriais; combustível para movimentação de máquinas e meios de transporte (veículos, aeronaves, etc.) (Qazi *et al.*, 2019).

O setor sucroenergético é importante para o desenvolvimento sustentável brasileiro, além da influência econômica como produtor de açúcar e a sua contribuição para a segurança energética, este setor também possui influência na questão ambiental (Neves e Kalaki, 2020). Existe ainda a contribuição social na geração de emprego e renda. Apesar disso, permanecem algumas controvérsias sobre o uso do solo e água (Silva *et al.*, 2021).

Na história do Brasil, a indústria vinculada a cana-de-açúcar tem sido um setor importante, o que começou com a produção e exportação de açúcar. Nos últimos 50 anos, o setor passou por uma completa transformação, quando suas atividades incorporaram a produção

do etanol em larga escala. Mais recentemente, por conta das oportunidades econômicas e considerando os ganhos em termos de eficiência dos processos, foi introduzida a produção de energia elétrica. Esta energia, produzida a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar, se tornou um produto importante para esta indústria, além do açúcar e do álcool (Neves e Kalaki, 2020).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar (40% do total mundial), bem como é o maior produtor de açúcar, 22% do total mundial (FAO, 2021). Adicionalmente, é o segundo maior produtor mundial de etanol, 30% do total (RFA, 2021). O setor sucroenergético ainda tem grande importância na matriz energética brasileira, com o etanol e a bioeletricidade, pois é responsável por 19,1% da oferta interna de energia em 2020 (EPE, 2021). O Brasil é importante na geração de energia renovável. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2021) e da IEA (2021), a participação das energias renováveis na matriz energética nacional foi de 48,4% em 2020, acima da média mundial que é de 17,1%; essa matriz é três vezes mais renovável que a média mundial (Montoya *et al.*, 2021).

Além do bagaço, o processamento da cana-de-açúcar também gera biomassa residual composta por palhas e pontas, as quais, com a crescente mecanização da colheita nos canaviais, tornaram-se insumos importantes para a geração de energia. Do mesmo modo, resíduos da produção (p. ex. vinhaça) e subprodutos (p. ex. torta de filtro), também possuem potencial energético. Esses insumos ainda são pouco utilizados, mas podem dar origem ao biogás como resultado da digestão anaeróbia. O biogás, ao ser queimado em turbinas ou motogeradores gera energia elétrica, ou se refinado dá origem ao biometano e então pode ser utilizado como substituto do gás natural (CIBIOGÁS, 2019). Logo, sob o olhar ambiental, o setor sucroenergético é parte do processo de diversificação e fortalecimento da geração de energias renováveis que compõem a matriz energética brasileira, além de auxiliar na promoção da segurança energética por meio da oferta de energia (Neves e Kalaki, 2020).

As empresas do setor sucroenergético brasileiro, tal como se encontram atualmente em termos de localização geográfica, resultam da localização da produção de cana-de-açúcar, a qual depende da adaptação da planta aos microclimas e tipos de solos. Estas características favorecem a produção em escala econômica em várias regiões do país, praticamente o ano todo. Sendo assim, pode-se dizer que as usinas sucroenergéticas são orientadas (estão próximas) à sua principal matéria-prima, por questões econômicas (Stenner, 2017).

Em relação aos objetivos socioeconômicos e ambientais de ampliar as possibilidades de geração de energia mais limpa e fortalecimento das empresas do setor, as aglomerações do tipo “*clusters* industriais” são um instrumento eficaz para a implementação de políticas públicas e privadas de desenvolvimento setorial. Essas políticas podem contribuir para o desenvolvimento tecnológico e de gestão das empresas do setor. Além disso, podem favorecer a eliminação de gargalos à produção, distribuição e consumo de produtos ofertados no mercado. Em outras palavras, uma política pública e privada implementada via *clusters* visa juntar esforços para superar barreiras e potencializar virtudes técnico-econômicas (Porter, 1998).

Neste cenário, este estudo tem por objetivo geral estimar *clusters* espaciais a partir de dados da geração de energia de biomassa residual da cana-de-açúcar no Brasil e outros dados de interesse do setor. Para tanto, visando atingir este objetivo, em termos específicos tornou-se necessário: entender aspectos históricos e técnicos importantes do setor sucroenergético; revisar a literatura sobre *clusters* de energias renováveis, descrever os problemas e oportunidades

socioeconômicas e ambientais as quais os *clusters* industriais podem contribuir; obter dados da geração termelétrica do setor sucroenergético brasileiro e outros dados de variáveis que influenciam na atividade produtiva do setor sucroenergético; estimar os *clusters* por meio do método *Skater*; analisar os *clusters* estimados a partir das suas características.

Este texto está estruturado em, além desta Introdução, uma seção que apresenta aspectos históricos e técnicos da geração de energia elétrica pelo setor sucroenergético. Após, tem-se uma seção que expõe a literatura das políticas públicas de *clusters* para geração de energias renováveis. Outra seção que expõe os desafios e oportunidades do setor sucroenergético brasileiro. Na continuação, encontra-se a seção de Materiais e Métodos na qual é apresentada a metodologia da pesquisa, os dados e o software utilizados. Após tem-se a seção de Resultados e Discussões, na qual são apresentados os *clusters* estimados e estabelece-se uma reflexão sobre esses resultados. Por fim, a seção de Considerações finais apresenta uma reflexão baseada nos principais resultados da pesquisa e demonstra algumas possibilidades em termos de políticas para os *clusters* industriais estimados.

2 A GERAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR SUCROENERGÉTICO

As usinas de cana-de-açúcar têm suas necessidades de energia térmica, mecânica e elétrica atendidas pela cogeração de energia viabilizada por biomassa residual da cana-de-açúcar. O processo de produção combinada de calor e potência, também conhecido como cogeração, tem a propriedade de transformar biomassa em formas de energia diferentes (Oddone, 2001). Em uma usina sucroenergética, a energia contida no bagaço e palha da cana-de-açúcar é convertida em energia térmica, mecânica e elétrica. A queima do bagaço em caldeira produz vapor e calor. O vapor é utilizado para acionar turbinas para produção de energia elétrica e para fornecer energia mecânica para picadores, desfibradores, ternos de moendas e outros equipamentos. O vapor, que é uma fonte de calor, é empregado no tratamento e evaporação do caldo, bem como na destilação do etanol (Novacana, 2021).

Apesar da geração de energia via bagaço de cana-de-açúcar já existir nos anos 1980, foi a partir da década de 1990 que algumas empresas do setor atingiram a autossuficiência energética. As empresas foram motivadas em parte pelo desejo de reduzir o custo com energia elétrica e pelas novas tecnologias disponíveis de caldeiras (Camargo *et al.*, 1990). Essa estratégia possibilitou a produção de excedentes de energia elétrica gerada. A comercialização desses excedentes ocorreu a partir de meados dos anos 1990 como resultado da regulamentação do mercado de energia. No início dos anos 2000, com a crise energética brasileira vivenciada na época houve benefício às empresas via PROINFA (Programa do Governo Federal que estabelece a contratação de 3.300 MW de energia no Sistema Interligado Nacional, produzidos por fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas, sendo 1.100 MW de cada fonte), bem como pelos leilões de energia regulados pelo governo federal. Com isso, possuiu-se a ter uma utilização mais racional do bagaço de cana-de-açúcar (Pellegrini; Oliveira Júnior, 2011).

O processo de cogeração de energia nas usinas sucroenergéticas ocorre pelo Ciclo *Rankine*, no qual a energia térmica, produzida em caldeiras como resultado da queima do bagaço da cana-de-açúcar, aquece a água que se torna vapor e superaquece. O vapor superaquecido e em alta pressão é expandido em uma turbina que aciona geradores elétricos e/ou dispositivos mecânicos. Após isso, o vapor que perde energia é extraído da turbina nas

condições de temperatura e pressão requeridas para o processo industrial e, após seu uso, retorna à caldeira na forma condensada para reiniciar o ciclo térmico (Carvalho, 2015).

O setor sucroenergético se moderniza constantemente, especialmente no que se refere a inovações tecnológicas que visam maior eficiência nos processos produtivos e nos sistemas de cogeração. Além disso, muitas pesquisas visam o melhor aproveitamento de outros subprodutos gerados no processo produtivo para a produção de outros bens, inclusive energéticos. Dentre estes processos, existe o *Retrofit* que consiste em: implantação de caldeiras de maiores níveis de temperatura (520-°C) e pressão (60, 80, 100 bar); na substituição das turbinas de contrapressão por turbinas de condensação ou de múltiplas extrações (ou o acréscimo de turbina específica para a geração de eletricidade); troca do acionamento mecânico de moendas para motores elétricos e consequente redução da demanda de vapor; e ajuste de escape de vapor (Souto *et al.*, 2018).

Outro aspecto importante é que na região Centro-Sul a safra ocorre entre os meses de abril e novembro e, nas regiões Norte e Nordeste, de novembro e abril, e consequentemente tem-se maior disponibilidade de bagaço nestes períodos do ano. Porém, com a adição da palha da cana-de-açúcar ao processo de queima, a modernização do sistema de geração e a implantação de unidades de geração de eletricidade via biogás (produzidos por digestão anaeróbica a partir de outros resíduos tais como vinhaça e torta de filtro), algumas usinas têm gerado energia elétrica praticamente o ano inteiro. Além disso, com o aumento da pressão e temperatura do vapor, e a redução da demanda por vapor no processo produtivo é possível economizar bagaço (Carvalho, 2015; Abiogás, 2021).

3 AS POLÍTICAS PÚBLICAS ORIENTADAS PARA *CLUSTERS*

A discussão sobre *cluster* se tornou popular nas universidades e agentes políticos sob o argumento de que a concentração regional das atividades de um setor promove o avanço tecnológico e o desenvolvimento regional (Schmidt, 2020). Um *cluster* é uma concentração de empresas e instituições interconectadas a um mesmo setor (Porter, 1998). Estes aglomerados possuem características naturais dadas pelas ações dos próprios agentes ou como resultado de uma política governamental. Portanto, os *clusters* podem ter o seu desenho institucional e serem criados de forma *ad hoc*, mas também podem ser baseados em algum estudo no qual foi utilizada alguma metodologia estatística/matemática.

Os *clusters* são estruturas nas quais as instituições de ensino, pesquisa e suporte técnico e os governos auxiliam no desenvolvimento dos *clusters* via incentivos e programas (Leite e Awad, 2012). Embora a estruturação de um *cluster* possa ser natural, o seu fortalecimento geralmente ocorre com a contribuição dos governos, por meio de políticas de incentivos que vão desde a criação de infraestrutura até o fornecimento de treinamento técnico aos trabalhadores (Porter, 1998). Alguns exemplos de instrumentos de políticas públicas para *clusters* são a eliminação barreiras e criação de vantagens fiscais, a regulamentação da atividade setorial e a manutenção e melhorias na infraestrutura (Faustino, 2013).

Considerando as políticas públicas, os governos podem propiciar um ambiente adequado para o desenvolvimento dos *clusters* (Andersson *et al.*, 2004). Isto resulta em melhorias na competitividade das empresas e obtenção de vantagens que são mais difíceis de se conseguir se as empresas estão agindo isoladamente. As políticas públicas para *clusters*

podem ter os seguintes princípios básicos: i) evitar o favorecimento de alguma empresa específica, exceto quando existem defasagens tecnológicas ou de mercado; ii) promover uma abordagem integradora nos *clusters*, a partir de uma política econômica nacional; iii) implantar programas econômicos nacionais para o *cluster*; iv) estabelecer o *cluster* como critério de qualificação para o financiamento dos investimentos privados coletivos (Porter, 2009).

As políticas para o desenvolvimento dos *clusters* podem ainda objetivar a facilitação da disponibilidade de crédito (Barros, 2002). O desenvolvimento econômico de um *cluster* depende da organização de uma agenda política que visa o desenvolvimento, respeitando as especificidades dos agentes envolvidos da região e estabelecendo metas e estratégias de curto e longo prazo (Schmidt, 2020). Ou seja, a implementação de *clusters* busca acentuar a competitividade das empresas de cada *cluster* por meio da cooperação, visando o desenvolvimento e a disseminação de inovações tecnológicas, o aumento da produtividade, o uso compartilhado de infraestrutura, bem como a capacitação da força de trabalho e a potencialização dos ganhos no comércio dos produtos (Aquino; Bresciani, 2005).

3.1 A LITERATURA DE *CLUSTERS* DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

A literatura inerente a estudos aplicados sobre energias renováveis é vasta, assim como existe um número expressivo de estudos sobre *clusters*. Portanto, seria muito difícil listar todos esses estudos e mais ainda descrever resumidamente do que trata cada um deles. Se feito isso, o resultado seria um estudo muito extenso e que poderia ser caracterizado como uma revisão bibliográfica completa sobre o tema, e este não é o objetivo deste artigo. Sendo assim, considerando que o presente estudo se dedica a estimar *clusters* de empresas do setor sucroenergético que geram energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar, optou-se por apresentar as publicações acadêmicas que possuem como temática a geração de energia renovável e que se utilizam de algum método de clusterização na análise.

Em um estudo de caso cujo objetivo era pesquisar iniciativas de desenvolvimento da região noroeste da Romênia a partir de *clusters* de energias renováveis, Benedek *et al.* (2013) analisaram uma aglomeração voltada para a energia geotérmica no norte da Transilvânia (que está incluída na região noroeste da Romênia). Os autores sugerem uma série de políticas públicas e iniciativas como medidas para desenvolver o *cluster* de geração descentralizada de energia renovável e contribuir para o desenvolvimento regional, a coesão territorial e a criação de renda e oportunidades de empregos.

No que se refere à estrutura de *clusters* municipais de bioenergia, uma pesquisa de Poggi *et al.* (2018) propôs uma aglomeração para o aproveitamento da biomassa florestal para a produção de energia renovável e mitigação do risco de incêndios florestais em Portugal. O estudo revisou alguns conceitos como biomassa, bioenergia e apresentou um exemplo exploratório de *cluster* municipal, para o município de Pampilhosa da Serra. Observando a definição de *clusterização*, foi sugerida a cooperação entre alguns municípios contíguos daquela região. Isto se daria a partir de uma política pública territorial com objetivo na limpeza e recolhimento de resíduos florestais que seriam encaminhados para a produção de energia elétrica. Esta ação também constituiu em uma estratégia de mitigação do risco de incêndios florestais.

Em um estudo de Jesus (2021) foi proposto um modelo para estimar *clusters* de geração de bioenergia, bem como a localização de um biodigestor anaeróbico em uma região do estado do Paraná, Brasil (por motivo de sigilo empresarial encontra-se omitida a localização exata). Esta região possui relevante produção pecuária e com isso uma quantidade expressiva de produção de dejetos que é um insumo para a geração de energia por digestão anaeróbica. O trabalho consistiu em escolher a melhor localização do biodigestor por meio da aplicação de um método de clusterização que visou agrupar propriedades rurais abrangidas por uma cooperativa, as quais são as produtoras dos dejetos de animais. Considerando o potencial de produção de biogás, bem como as distâncias do gasoduto, rodovias, etc, os resultados do modelo proposto propuseram a criação de dois *clusters*. Além disso, os resultados obtidos reforçam que a escolha da localização ideal do biodigestor contribui para a viabilidade econômica e operacional da geração de energia. Isto porque a biomassa se encontra espacialmente dispersa, bem como existem outros aspectos técnicos (transporte, distribuição da energia, etc.) e socioambientais.

Alvarez *et al.* (2020) pesquisaram a gestão do conhecimento no *cluster* de energia solar de Arequipa, no Peru, foi aplicado um questionário às empresas para identificar as dificuldades e limitações para seu aperfeiçoamento. Os entraves consistiam em questões vinculadas à gestão e o acesso às tecnologias. Para equacionar estas barreiras foi sugerida uma proposta de política de ciência, tecnologia e inovação para o desenvolvimento do *cluster*.

Uma pesquisa de Jaegersberg e Ure (2011) destacou as deficiências e dificuldades enfrentadas pelas pequenas e médias empresas produtoras de eletricidade por energia solar em cinco *clusters* em diferentes fases de desenvolvimento: dois em fase inicial (Portugal e EUA), dois *clusters* em fase de crescimento (Espanha e Itália) e um *cluster* desenvolvido (Alemanha). Entre os problemas, os autores identificaram falhas de comunicação entre empresas dos *clusters* não desenvolvidos e formuladores de políticas, universidades ou centros de formação de mão de obra.

Ao analisar os conglomerados de termelétricas a licor negro (unidades de cogeração em indústrias de celulose ou celulose a papel) no Brasil, em 2018, Coelho Júnior *et al.* (2021) estimaram *clusters* de empresas e *clusters* para a potência instalada por varredura *Scan* espacial. Além disso, calcularam índices de concentração e desigualdade do setor (Razão de concentração, Coeficiente de Gini, Índice Herfindahl-Hirschman e Entropia de Theil). Os principais resultados da pesquisa são: Identificou-se quatro *clusters* (dois para o número de empresas e dois para potência instalada); foi identificado alto potencial de oferta de energia no sul do país e no sul da região nordeste. Os autores destacaram que esses resultados podem sinalizar aos investidores o local mais relevante para instalação de unidades de geração de energia, o que contribuiria para o aumento da geração distribuída e a diversificação da matriz elétrica nacional.

Coelho Júnior *et al.* (2020) realizaram no Brasil, em 2018, uma pesquisa similar (em termos metodológicos) sobre concentração e desigualdade em *clusters* espaciais das empresas termelétricas de processamento de biomassa florestal e suas fontes de insumos. Neste estudo identificou-se que a maioria das usinas termelétricas à base de insumo florestal estão localizadas na área centro-sul do país, onde o setor florestal é importante. A região sul agrupava 32,65% das usinas à base de licor negro e resíduos florestais. Com relação aos indicadores de concentração e desigualdade os resultados foram divergentes ou não significativos. Dos resultados das estimativas de *clusters*, foram identificados 4 *clusters*, mas apenas um deles foi

estatisticamente significativo (localizado na região sul). Quanto aos *clusters* das fontes de insumos florestais, apenas um (de carvão vegetal) foi estatisticamente significativo, cujo centróide localizou-se em Açailândia (Maranhão). Nas conclusões, os autores ressaltaram que os *clusters* podem auxiliar nos processos decisórios da indústria e que ajudam a orientar as políticas públicas para a ampliação da produção de bioeletricidade via biomassa florestal e contribuem para a segurança energética do país.

Um estudo de Barbosa (2018) objetivou identificar alternativas de parcerias estratégicas, via *clusters*, para a geração de bioenergia em propriedades rurais de criação de bovinos e suínos na região de Castro, estado do Paraná (Brasil). Para tanto, foram estabelecidos cenários de parcerias por meio da *clusterização* das variáveis consumo de energia, potencial de geração de bioenergia e localização das propriedades. O método utilizado para identificação de *clusters* foi o *k-means* com análise Elbow. Como resultado, para o cenário de três parcerias, estimou-se três *clusters* como o arranjo ideal para geração de eletricidade.

Grigoras e Scarlatache (2015) avaliaram o potencial de geração de energia renovável na Romênia por meio do método de *clusterização k-means*. Neste estudo foram utilizados, para a estimativa dos *clusters*, os dados de capacidade instalada, nível de tensão, tipo de fonte renovável (eólica, solar, hidrelétrica, biogás, biomassa e cogeração) e localização geográfica. As conclusões, a partir de 6 *clusters* estimados, ressaltam que o agrupamento pode ser útil para a modernização de linhas de transmissão e distribuição de energia e “*Retrofit*” de subestações. Isto facilitaria o planejamento, ampliação e modernização das redes elétricas na Romênia.

Outro estudo de Laasasenaho *et al.* (2019) desenvolveu um modelo para encontrar a melhor localização de usinas de produção de bioenergia via biogás e um terminal de depósito de madeira, na área rural da Finlândia, baseada na minimização da distância do transporte da biomassa. As localizações ótimas das usinas de biogás foram determinadas utilizando um algoritmo de *clusterização* hierárquico (para um raio máximo de 10 quilômetros) e, para a localização do terminal de depósito de madeira foi empregada a análise de densidade espacial *Kernel*. Especificamente em relação aos *clusters*, foram estimadas 43 aglomerações e os resultados gerais mostraram que as metodologias usadas e os resultados obtidos no estudo auxiliam os tomadores de decisão e gestores de negócios no planejamento da localização de usinas de produção de bioenergia.

Ma *et al.* (2005) fizeram um estudo para identificar a melhor localização de usinas de bioenergia por digestão anaeróbica de dejetos de gado leiteiro em *clusters* de fazendas na região de Tompkins, estado de New York. Para tanto, os autores utilizaram o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), em conjunto com um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Como resultados, identificaram que a viabilidade econômica e técnica de uma usina de bioenergia se daria com um rebanho de no mínimo 400 cabeças e a área de estudo teria potencial para 20 usinas localizadas em pontos geográficos estratégicos, ou seja, vinte *clusters*.

Uma pesquisa de Kaundinya *et al.* (2013) propôs, a partir da utilização de um método de *clusterização*, a melhor localização e a potência instalada de usinas de produção descentralizada de bioenergia via biomassa, na área rural do distrito de Tumkur na Índia. O estudo estimou a melhor localização de algumas usinas que atenderiam 2700 vilas. O método de análise utilizou dados de potência instalada necessária, demanda de energia local e menores custos de transporte da biomassa e de distribuição de energia. Para tanto, foi utilizado o algoritmo PAM (Partitioning Around Medoids) em conjunto com SIG. Nas conclusões

identificou-se que o principal custo para produção de bioenergia era o custo de transporte da biomassa até a usina. Considerando esta constatação, a potência instalada estimada foi de 71 MW em 96 *clusters*.

4 DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA OS *CLUSTERS* SUCROENERGÉTICOS

Uma política de clusterização, em qualquer cenário (tal como descrito nos estudos da seção anterior), objetiva a implementação de políticas públicas e/ou privadas para os agentes que compõem os *clusters*. Estas políticas visam a superação de certos problemas identificados *ex-ante* tais como dificuldades conjunturais, mas especialmente estruturais e aproveitar oportunidades que representem ganhos ambientais, econômicos e sociais (uma ou mais dessas esferas do desenvolvimento). Sendo assim, sem esgotar o tema, esta seção tem por finalidade elencar os principais desafios e oportunidades aos quais o setor sucroenergético se defronta na atualidade e que uma política de *clusters* poderia contribuir.

Para Neves e Trombin (2014), na produção industrial do setor sucroenergético, em muitos casos existe defasagem tecnológica, o que ocasiona um aumento nos custos de manutenção e perda de eficiência na utilização dos insumos, inclusive para a geração de energia elétrica. Adicionalmente, a falta de investimento em tecnologias específicas para o aproveitamento dos subprodutos dos processos industriais e agrícolas também se configura como uma dificuldade, inclusive para produção de energia. Neste sentido, Castro *et al.* (2010) ressaltam que se torna necessária a instituição de centros de pesquisa específicos para o setor sucroenergético, isto para desenvolver tecnologias adequadas às regiões produtoras de cana-de-açúcar e para superar as dificuldades e/ou obter benefícios com novos processos produtivos e novos produtos.

Ainda para Neves e Trombin (2014), em termos da relação entre as usinas, frequentemente observa-se a falta de compartilhamento de ativos (plantas produtivas, logística, suprimentos, comércio, etc.) e de informações relativas às boas práticas de gestão e treinamento da força de trabalho. Além disso, existem algumas dificuldades de integração entre o setor industrial e a produção agrícola, devido à ausência de parcerias. Também pode ser identificada, especialmente em empresas menores, a falta de planejamento da produção em relação às expectativas e o que é realizado nas safras.

No que se refere à logística, o desperdício observado no transporte da cana-de-açúcar até as usinas eleva os custos. No aspecto financeiro, algumas usinas ainda se encontram em processo de recuperação judicial ou com elevado nível de endividamento, apesar desse fato ser mais comum em décadas passadas. Esta condição financeira inibe o investimento em capacitação de mão de obra, modernização e inovação tecnológica e pesquisa aplicada (Milanez *et al.*, 2017).

Feitas estas considerações, algumas propostas de ações para os *clusters* que são baseadas em oportunidades e problemas relevantes para as empresas do setor são: a) Modernização tecnológica - integração de tecnologias (biorrefinarias) para conversão de biomassa e biogás em outros produtos (biocombustíveis; bioenergia; biofertilizantes, hidrogênio verde; biomateriais; e bioquímicos); b) Emissões de certificados ambientais tais como: Créditos de Carbono – RCE; Certificados de Energias Renováveis - I-REC; Certificados de Biocombustíveis – CBIO; Certificado de Gás Renovável – GAS-REC. c) Criação e/ou fomento

a institutos de pesquisa e inovação voltados às empresas do setor; d) Oferta de programas específicos de treinamento de mão de obra (inclusive gerencial); e) Parcerias entre as empresas do setor para a produção e distribuição dos produtos; f) Melhorias e manutenção da infraestrutura de transporte (escoamento da safra e produtos).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A clusterização é uma forma de encontrar grupos nos dados, ou seja, impor uma estrutura de agrupamento para um conjunto de dados (Kaufman; Rousseeuw, 2009). A clusterização é uma técnica da estatística multivariada que procura agrupar um conjunto de elementos em subgrupos homogêneos, denominados agrupamentos (Ferreira *et al.*, 2020). Existem várias técnicas de *clusterização*, mas a presente pesquisa se utilizou do método *skater*. Isto se justifica pela característica do método, que permite a identificação de *clusters* espaciais, que consideram a localização geográfica e vários outros atributos.

Na formação dos *clusters* as vezes torna-se necessário considerar a questão geográfica (localização), que é muito importante em certas aplicações, tal como na geração de energia por bagaço de cana-de-açúcar. Portanto, como a localização geográfica é importante, deve-se considerar uma metodologia de clusterização espacial das usinas, tal como o método *Skater*. Com isso, objetiva-se que os resultados obtidos na *clusterização* sejam os mais robustos em termos empíricos, para que a implementação de políticas para os *clusters* faça sentido prático.

5.1 O MÉTODO SKATER

O método *skater* tem como premissa a poda ótima de uma árvore geradora mínima. Esta árvore reflete a estrutura de contiguidade entre as observações espacialmente distribuídas. Inicialmente, parte-se de uma matriz de dissimilaridade que contém apenas pesos para observações contíguas, no caso de polígonos, e pontos mais próximos - no caso de dados espaciais por pontos no espaço (Assunção *et al.*, 2006). Para tanto, considera-se a distância d_{ij} entre os pontos i e j dispostos no espaço, mas apenas para os pares em que $W_{ij} = 1$ (ou, seja, dois pontos contíguas ou mais próximos). Esta matriz de dissimilaridade é representada como um grafo cujas observações são os nós e as relações de contiguidade são as arestas (Anselin, 2020).

Este grafo completo pode ser entendido como uma árvore geradora mínima (MST – *Minimum Spanning Tree*) de tal forma que exista um caminho que conecta todos os nós (as observações), mas cada nó é visitado apenas uma vez (Assunção *et al.*, 2006). Dito de outra forma, os “ n ” nós são conectados por “ $n-1$ ” arestas e a dissimilaridade geral entre os nós seja minimizada. Isso produz uma soma dos desvios quadráticos (SSD), que é expressa por:

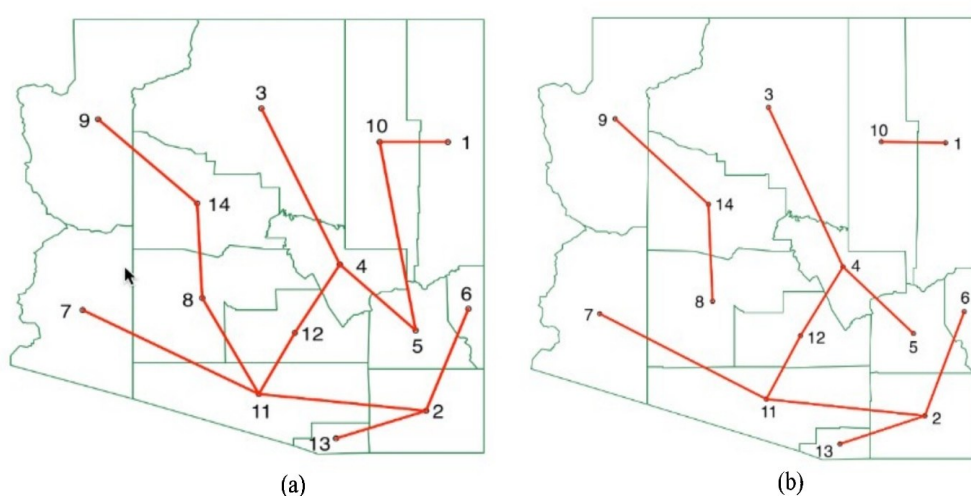
$$SSD = \sum_i (x_i - \bar{x})^2$$

Em que:

\bar{x} = valor médio geral das observações das variáveis x ; e x_i = valor de cada observação das variáveis x .

Paralelamente, uma função objetivo busca a geração de *clusters* que reduzam a SSD geral por meio da maximização da SSD entre cada *cluster* ou, alternativamente, pela minimização das SSD dentro dos *clusters*. A MST é podada (o grafo geral é subdividido) selecionando a aresta cuja remoção aumenta mais a função objetivo, que gera maior dissimilaridade intergrupos e menor dissimilaridade intragrupo (Chein *et al.*, 2007). Um exemplo de árvore de extensão espacial pode ser representado como (Figura 1):

Figura 1 - Árvore de extensão espacial (exemplo), antes da poda (a) e depois de duas podas (b)



Fonte: Baseado em Anselin (2020)

Essa é uma *clusterização* hierárquica com abordagem divisiva e não aglomerativa, ou seja, procura separar as observações geográficas, em vez de agrupá-las. Em outras palavras, inicia-se com um único agrupamento de dados e encontra-se a divisão ótima em subgrupos. Devido a esta natureza hierárquica, uma vez que a árvore é cortada num ponto, todos os cortes subsequentes são limitados às sub-árvores resultantes. A primeira etapa consiste em reduzir a informação dos pares contíguos na matriz de distâncias da árvore de extensão mínima (MST). Depois, tem-se que avaliar cada corte possível na MST em termos de sua contribuição para reduzir a soma geral dos desvios quadrados (SSD) (Assunção *et al.*, 2006).

Os dados são padronizados, portanto a média é zero por definição. Como resultado, a soma total dos desvios quadrados é a soma dos quadrados. A ideia do algoritmo *Skater* é encontrar pontos nesta árvore de extensão espacial e podá-la para encontrar os *clusters* de forma que minimize o SSD interno aos *clusters*. Para tanto, para cada sub-árvore é preciso calcular o seu SSD correspondente. O passo seguinte implementa o corte ótimo de modo que a SSD total diminua o máximo possível, ou seja, $\max[SSDT - (SSDa + SSDb)]$, em que SSDT é o SSD para a árvore correspondente, e SSDa e SSDb são os totais das sub-árvores correspondentes ao corte (Anselin, 2020).

Operacionalmente, começa-se calculando a média dos valores associados aos vértices de cada sub-árvore e, em seguida, calcula-se o SSD para cada sub-árvore k como:

$$SSD = \sum_i x_i^2 - n_k \bar{x}_k^2$$

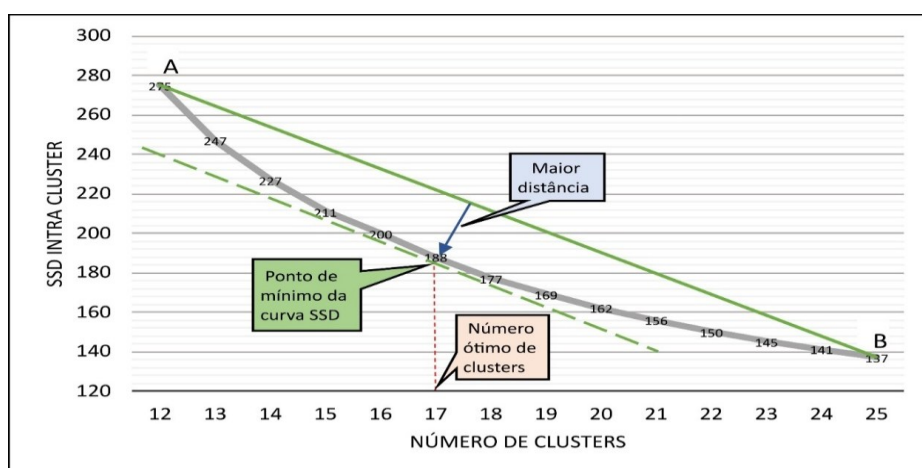
Em que:

\bar{x}_k = média do valor médio para a subárvore, e n_k = o número de elementos na subárvore.

5.2 A ESCOLHA DO NÚMERO ÓTIMO DE CLUSTERS – ELBOW

Para o estabelecimento do número ótimo de clusters foi utilizada a análise Elbow. Este método consiste na análise dos SSD intra clusters em cada número de clusters estimados. Como o método skater calcula o SSD das observações distribuídas espacialmente, considerando as variáveis incluídas no modelo, busca-se então a quantidade de clusters em que os SSD intra clusters seja menor. Em outras palavras, calcula-se os SSD intra clusters para diferentes quantidades de clusters (valores de k). O valor ótimo de k corresponde ao cotovelo (Elbow) da curva SSD x k , neste ponto verifica-se pouca variação na curva SSD (Cui, 2020). A Figura 2 representa um exemplo de gráfico Elbow.

Figura 2 – Exemplo de exposição gráfica da abordagem matemática da análise *Elbow*



Fonte: Elaborado pelos autores

Visualmente pode-se inferir o número ótimo de *clusters* exatamente no cotovelo do gráfico. Entretanto, quando a curva é bastante suave nem sempre é possível identificar o *Elbow* visualmente (Shi *et al.*, 2021). Neste caso, pode-se utilizar uma abordagem matemática para encontrar o ponto ótimo, que é a maior distância entre o segmento de reta AB e a curva SSD. Esta maior distância representa o ponto de mínimo da curva SSD e, portanto, onde a reta paralela tangencia a curva SSD x k (Anton; Rorres, 2013).

Com os valores de SSD intra *cluster* para cada número de *clusters*, pode-se encontrar o ponto na curva SSD x k que possui a maior distância perpendicular à reta AB. Este ponto indica o equilíbrio entre a maior diferença entre o número de *clusters* e a maior homogeneidade intra *cluster* (Anton; Rorres, 2013). Esta distância (d) pode ser calculada algebricamente por:

$$d(P1, P2, (x, y)) = \frac{|(x_2 - x_1)(y_1 - y_0) - (x_1 - x_0)(y_2 - y_1)|}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}$$

Em que x_2, x_1, y_2, y_1 são as coordenadas dos pontos P1 e P2 (pares ordenados de SSD e número de *clusters* em A e B); x_0 e y_0 são as coordenadas dos pontos os quais se deseja calcular a distância à reta, que são diferentes pontos sobre a SSD x k (Anton; Rorres, 2013).

5.3 OS DADOS E O SOFTWARE

A amostra é composta por 436 empresas sucroenergéticas registradas na ANNEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) distribuídas geograficamente no território brasileiro. Os dados disponíveis e utilizados na geração dos *clusters* são:

Quadro 1 – Variáveis utilizadas na *clusterização* das empresas sucroenergéticas, segundo fonte

Variável	Descrição	Fonte
Potência	Potência instalada/Capacidade de produção de energia de cada usina (em kW)	ANEEL (2022)
Localização	Localização geográfica das usinas (latitude e longitude)	ANEEL (2022)
Subestação	Distância (em km) da usina até a subestação de energia mais próxima (<i>Shapefile</i>)	EPE (2022)
IES	Distância (em km) da usina até o centro de pesquisa e Universidade mais próxima (latitude e longitude)	MEC (2023)
Rodovia	Distância (em km) da usina até a rodovia federal mais próxima (<i>Shapefile</i>)	IBGE (2022)
Portos	Distância (em km) da usina até o porto (marítimo ou fluvial) mais próximo (<i>Shapefile</i>)	IBGE (2022)
Hidrovia	Distância (em km) da usina até a hidrovia mais próxima (<i>Shapefile</i>)	IBGE (2022)
Ferrovia	Distância (em km) da usina até a ferrovia mais próxima (<i>Shapefile</i>)	IBGE (2022)

A variável “Potência” tem a função de identificar o volume de energia elétrica produzido. A variável “Localização” identifica no espaço a localização geográfica de cada usina. A variável “Subestação” é útil para identificar a proximidade espacial entre as usinas e as subestações que servem para a distribuição da energia elétrica gerada. A variável “IES” (Instituição de Ensino Superior) localiza espacialmente as universidades e os centros de pesquisa aplicada mais próximos que são locais onde são desenvolvidas pesquisas para o avanço tecnológico do setor (pelo aspecto pesquisa aplicada não foram consideradas as faculdades).

As variáveis “Rodovia”, “Portos”, “Hidrovia” e “Ferrovia” têm a função de localizar geograficamente os pontos mais próximos de escoamento da produção física de produtos, tal como açúcar e outros produtos produzidos pelas usinas. Estas variáveis são importantes na localização das usinas pois estas empresas são produtoras de outros produtos, além da energia

elétrica, o que torna necessária a identificação geográfica destas variáveis de distribuição desta produção.

Para calcular as distâncias entre as usinas e as subestações de distribuição de energia elétrica, os centros de pesquisa e os pontos de escoamento da produção física, utilizou-se o QGIS “versão 3.28” (QGIS, 2022). Isto se fez por meio das localizações geográficas dos pontos mais próximos e dos *shapefiles* disponíveis. As estimativas dos *clusters* foram calculadas utilizando-se o software GEODA “versão 1.20.0.22”, por meio do algoritmo *Skater* (Anselin *et al.*, 2006). Além das estimativas dos *clusters*, foi possível produzir os mapas e os indicadores importantes para a escolha do número ótimo de *clusters*.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da base de dados, inicialmente calculou-se algumas estatísticas descritivas que são importantes para uma análise exploratória dos dados. Conforme Tabela 1, as unidades de geração quanto à potência podem variar entre 302 kW até 150.000 kW, ou seja, existem usinas com pequena capacidade de geração de energia, bem como outras usinas com elevada capacidade. A distribuição da energia elétrica produzida pelas empresas sucroenergéticas, que é feita via uma subestação da rede de distribuição de energia, tem distância para a subestação mais próxima em média 37,2 km, mas pode chegar a 185,1 km.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas da base de dados, sem *clusterização*

Variável	Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo	Desvio Padrão
Potência (kW)	302,0	5.000,0	20.000,0	29.535,0	44.000,0	150.000,0	28.541,2
IES (km)	0,8	40,1	65,0	82,7	114,7	397,1	59,0
Rodovia (km)	0,1	3,3	6,2	7,9	11,1	40,7	6,3
Portos (km)	23,9	276,0	413,3	400,1	520,3	1.003,7	201,2
Hidrovia (km)	0,2	30,5	78,9	137,2	159,1	626,0	158,5
Ferrovias (km)	0,1	9,9	24,2	49,3	54,1	483,2	68,4
Subestação (km)	0,4	19,8	33,9	37,2	50,6	185,1	23,1

Fonte: Resultados da pesquisa

Como as unidades de geração de energia elétrica são voltadas para a fonte de matéria prima, as suas localizações se caracterizam por não serem, na maioria das vezes, próximas a grandes centros urbanos, onde se encontram, por exemplo, universidades e centros de pesquisa. Neste contexto, pode-se perceber que a média de distância para as universidades e centros de pesquisa é maior do que para rodovias e ferrovias. Em relação aos portos e hidrovias, a depender da localização de cada empresa, é comum que as distâncias podem ser maiores, isto por conta das questões geográficas e da natureza (proximidade de rios navegáveis e mar, e acesso aos portos).

Os indicadores de SSD intra e inter *clusters* encontram-se na Tabela 2. Pode-se observar que conforme o número de *clusters* estimados aumenta, a SSD intra *cluster* diminui e a SSD inter *cluster* aumenta. O número de *clusters* em que a SSD intra *cluster* se torna menor que a SSD inter *cluster* é com sete *clusters*, como se pode verificar pelo indicador “Razão SSD intra

clusters e SSD inter *clusters*”, cujo valor passa a ser 0,93. Isto também é corroborado pelos indicadores “Razão SSD inter *clusters* e SSD total” e “Razão SSD intra *clusters* e SSD total”, em que o valor deste último passa a ser menor que do primeiro.

Tabela 2 – Indicadores de SSD intra e inter *cluster*, e distância entre a reta projetada e a curva SSD

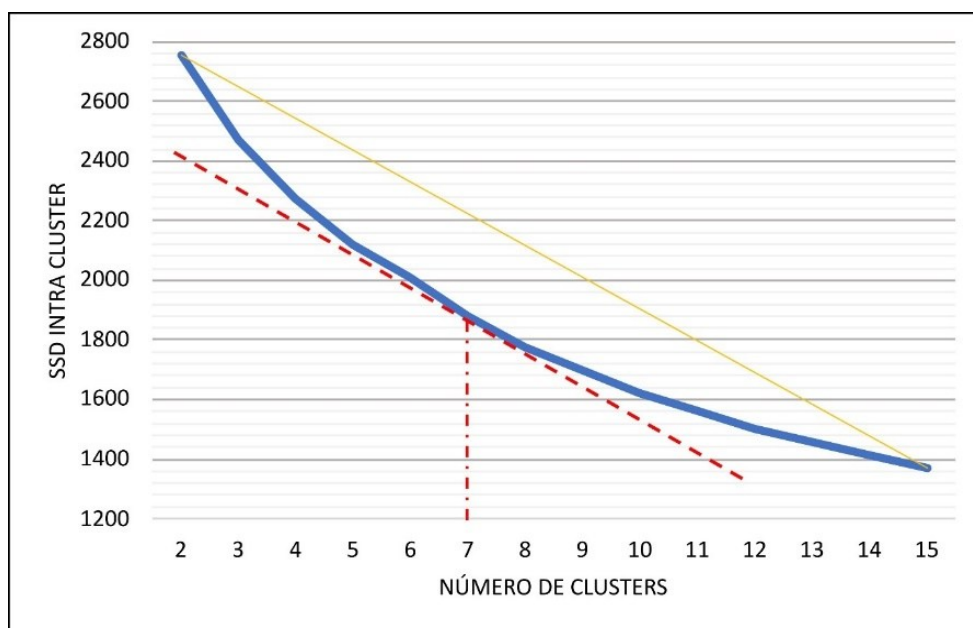
Número de Clusters	Soma SSD intra clusters	Soma SSD inter clusters	Razão SSD inter clusters e SSD total	Razão SSD intra clusters e SSD total	Razão SSD intra e inter clusters	Distância entre a reta e a curva SSD
2	2.755	1.159	0,30	0,70	2,38	0,00
3	2.470	1.444	0,37	0,63	1,71	1,68
4	2.275	1.639	0,42	0,58	1,39	2,51
5	2.118	1.796	0,46	0,54	1,18	2,98
6	2.009	1.905	0,49	0,51	1,05	3,00
7	1.881	2.033	0,52	0,48	0,93	3,20
8	1.776	2.138	0,55	0,45	0,83	3,19
9	1.696	2.218	0,57	0,43	0,76	2,94
10	1.621	2.293	0,59	0,41	0,71	2,64
11	1.562	2.352	0,60	0,40	0,66	2,20
12	1.501	2.413	0,62	0,38	0,62	1,77
13	1.455	2.459	0,63	0,37	0,59	1,20
14	1.411	2.503	0,64	0,36	0,56	0,62
15	1.370	2.544	0,65	0,35	0,54	0,00

SSD Total (intra + inter) = 3.914

Fonte: Resultados da pesquisa

A distância entre a reta projetada a partir das extremidades da curva SSD e a curva SSD propriamente dita é maior com sete *clusters*. Isto indica que a quantidade ótima de *clusters* é sete. A partir dos dados de SSD intra-*clusters* e o número de *clusters* estimados foi possível construir o gráfico Elbow, conforme Figura 3.

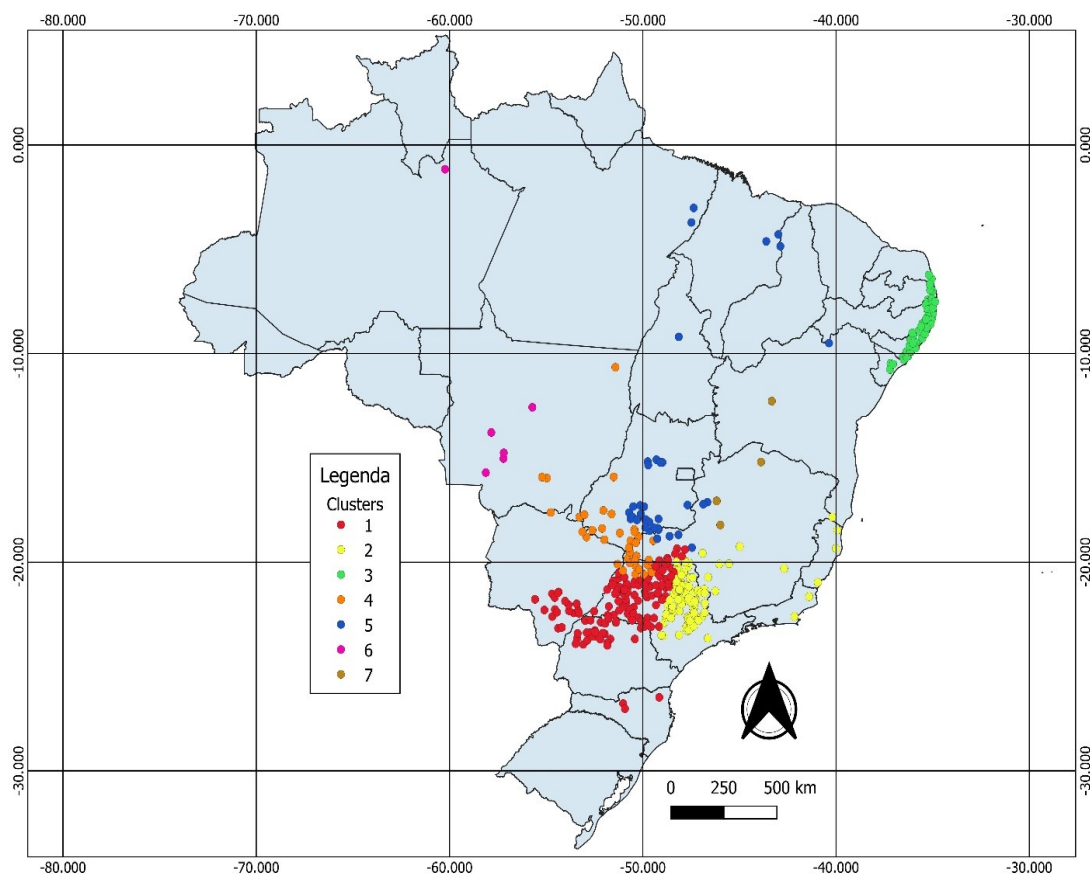
Figura 3 – Gráfico Elbow, Curva SSD intra-*clusters* e número ótimo de *clusters* estimados



Fonte: Resultados da pesquisa

Neste gráfico, verifica-se que a reta tangencia a curva SSD no ponto de mínimo com sete *clusters*, esta é a representação gráfica do exposto na Tabela 2. A estimativa ótima de *clusterização* com sete *clusters* produziu aglomerações diferentes no que se refere ao tamanho dos *clusters* (em quantidade de empresas). As diferenças locais entre os *clusters* estimados podem ser vistas na Figura 4.

Figura 4 – Mapa temático da localização geográfica das empresas sucroenergéticas, segundo *clusterização* estimada em sete *clusters*.



Fonte: Resultados da pesquisa.

Dentre as aglomerações estimadas, é possível ver uma grande quantidade de empresas nos *clusters* 1 e 2. Pode-se destacar que o *cluster* 1 é composto por empresas da região sul do Brasil, bem como de empresas localizadas na região oeste do estado de São Paulo, algumas da região sul de Minas Gerais e Sul do Estado de Mato Grosso do Sul. O *cluster* 2 é composto por empresas da região leste do Estado de São Paulo, leste do Estado de Minas Gerais, e Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. O *cluster* 3 é composto apenas por empresas localizadas na faixa litorânea da região nordeste. Destaca-se que grande parte das regiões geográficas desses *clusters* representam regiões tradicionais de produção sucroenergética (que produzem cana-de-açúcar a muito tempo, para produção de açúcar e mais tarde os álcoois).

O *cluster* 4 é composto por empresas situadas na região extrema do noroeste do Estado de São Paulo, sul e oeste de Goiás, norte de Mato Grosso do Sul e leste de Mato Grosso. O *cluster* 5 é composto por algumas empresas da região leste de Minas Gerais, leste de Goiás, Tocantins e interior da região Nordeste. O *cluster* 6 é composto por empresas da região oeste de Mato Grosso e uma empresa situada no Estado do Amazonas. O *cluster* 7 contém empresas da região centro-leste de Minas Gerais e interior do Estado da Bahia. Estes *clusters* representam regiões de produção sucroenergética mais recente segundo o banco de dados da ANNEL (2022), o qual disponibiliza a data de início do funcionamento da usina de geração de energia elétrica.

Dadas as características locais dos *clusters*, para a implementação de políticas para o setor sucroenergético, torna-se importante considerar as especificidades regionais (por

exemplo: modais e infraestrutura de transporte de insumos e produtos, tecnologias, etc.). A depender das necessidades das empresas de cada *cluster* e do ponto de vista estratégico da gestão destas empresas, devem ser definidas as prioridades em termos de políticas privadas e/ou públicas a serem implementadas. Estas prioridades precisam considerar a modernização tecnológica e/ou outras ações cujo objetivo seja o fortalecimento da atividade produtiva nos *clusters*. Ou seja, os gestores dos *clusters* devem elaborar um rol de prioridades e as diretrizes das políticas de inovação tecnológica, investimentos e de melhorias na gestão. Estas políticas têm a função de impulsionar as atividades do setor (aumento da produção e/ou incremento da produtividade) e a respectiva geração de energia elétrica nas diversas regiões do país.

Paralelamente, os gestores dos *clusters* podem demandar políticas estritamente públicas, tais como políticas de tributos, crédito e investimento (via bancos de fomento). Todas essas ações têm a função de alavancar os negócios em termos financeiros e viabilizar a produção. Isto é importante no cenário atual de demanda crescente por energia elétrica, tanto com respeito a demanda das famílias quanto das empresas (fundamental para o crescimento econômico).

Em termos mais específicos, as necessidades dos *clusters* podem não ser coincidentes na totalidade ou podem ser diferentes em termos de ordenamento (ranking). Para tanto, ao observarmos os indicadores de cada *cluster* na tabela 3, pode-se fazer algumas considerações.

Tabela 3 – Número de empresas, potência total produzida por *cluster* e demais estatísticas dos *clusters*

Cluster	Número de Empresas	Potência Total (MW/ano)	Centros de Agrupamento						
			Potência (MW/ano)	IES (km)	Rodovia (km)	Portos (km)	Hidrovias (km)	Ferrovias (km)	Subestações (km)
1	163	5.015.801	30.772	85	8	444	67	39	39
2	122	3.604.222	29.543	47	6	304	120	19	30
3	53	890.117	16.795	40	6	62	497	21	28
4	44	1.813.638	41.219	175	12	603	81	85	49
5	43	1.217.790	28.321	102	9	682	74	108	37
6	6	121.396	20.233	172	14	469	146	417	75
7	5	214.500	42.900	231	15	604	35	160	91

Fonte: Resultados da pesquisa

Quanto as regiões tradicionalmente produtoras de cana-de-açúcar, açúcar, álcool, energia elétrica e demais produtos deste setor (por exemplo: biogás, biofertilizante, etc.) que são os 1, 2 e 3, situadas nas regiões sul, sudeste e litoral do nordeste, juntos possuem o maior número de empresas. Nota-se que apesar de possuírem conjuntamente a maior potência total (produção total anual de energia elétrica, 9.510.140 MW/ano), quando analisadas a potência por centros de agrupamento (potência média por empresa) percebe-se que os *clusters* 4 e 7, possuem produtividades muito maiores. Talvez isso se deva a defasagem tecnológica das plantas produtivas. Neste caso, seria necessária uma política de modernização tecnológica para estes *clusters*, que poderia também atender os *clusters* 5 e 6, dado que também possuem produtividade reduzida ou eficiência técnica limitada.

Segundo estudo de Braga (2016) sobre a eficiência técnica das usinas sucroenergéticas, muitas empresas não adotam novas tecnologias de produção em razão do custo de adoção das tecnologias. Na análise a autora se utiliza da DEA (Análise Envoltória de Dados) e conclui que existem empresas ineficientes em todo território nacional, dentre as regiões pesquisadas a proporção de empresas ineficientes varia entre 76% à 90%, e que o percentual de empresas mais eficientes se encontra entre as grandes empresas (segundo o estudo, empresas que possuem

capacidade de moagem maior que 2.500.000 ton.). A região tradicional (assim denominada no estudo) é composta pelos estados do Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo, e é a região com maior proporção de empresas ineficientes.

Portanto, pode-se concluir que a ausência da melhor tecnologia produz ineficiência técnica em grande parte das empresas. Isto pode ser equacionado com fomento à inovação tecnológica, pesquisa e desenvolvimento de tecnologias mais acessíveis em termos financeiros às empresas no território como um todo e políticas de acesso às tecnologias mais modernas. Considerando este cenário, para viabilizar a modernização das usinas pode-se instituir políticas públicas com respeito à tributação das empresas (especialmente nos âmbitos estadual e federal), uma vez que são empresas que contribuem para descarbonização da matriz energética brasileira. Outras políticas possíveis são a disponibilidade de crédito e de investimento via BNDES e outros bancos de fomento públicos para que as empresas possam se modernizar.

Com respeito à necessidade de capacitação de mão de obra e pesquisa tecnológica, as IES não estão muito distantes das empresas, com exceção dos *clusters* 4, 6 e 7, onde as universidades e centros de pesquisa estão mais distantes. Isto pode dificultar a capacitação de mão de obra técnica e de gestão. Neste sentido, seria benéfica a implantação de unidades de ensino técnico e tecnológico, tal como os institutos federais de ensino que se dedicam ao ensino técnico e superior com atenção especial às atividades produtivas.

Paralelamente, no que se refere as inovações tecnológicas, existem alguns centros de pesquisa aplicada, este é o exemplo da RIDESA – Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético, que são unidades de desenvolvimento tecnológico na UFSCAR, UFRRJ e UFV no Sudeste, na UFMT e UFG na região Centro-Oeste, na UFPR na região Sul, e na UFPI, UFAL, UFRPE e UFS na região Nordeste. Estas universidades fazem pesquisas em rede, o que sugere o desenvolvimento de tecnologias em parceria.

Outras unidades de pesquisa, tal como, o IAC – Instituto Agrônomo de Campinas, o CTC, Centro Tecnológico Canavieiro, em Piracicaba, e a EMBRAPA (especialmente a unidade Agroenergia), além de outros centros de pesquisa, que também desenvolvem pesquisas e novas tecnologias. No entanto, essas iniciativas estão preponderantemente nas regiões maiores produtoras do setor sucroenergético e podem eventualmente, se fomentadas, contribuir para a inovação tecnológica dos *clusters* onde se localizam e dos demais *clusters*.

Com respeito aos indicadores que estão relacionados à logística (Rodovia, Portos, Hidrovia e Ferrovia), a presença de rios e mar são uma condição natural, mas para o escoamento dos produtos a modernização dos portos é importante para diminuir especialmente os custos de exportação. No mais, para as empresas pertencentes aos *clusters* que se situam distantes dos portos torna-se importante a conservação das rodovias, visto que as empresas não se localizam a longas distâncias das principais rodovias do país. Por outro lado, deve-se destacar que a ampliação da malha ferroviária é ação importante, especialmente por ser um modal sabidamente mais barato que o rodoviário para o transporte de cargas em médias distâncias (tal como levar produtos para os portos). Neste caso, observa-se que no *cluster* 6 a ferrovia mais próxima se encontra muito distante, e portanto, uma ampliação deste modal nesta direção geográfica seria benéfica para o setor sucroenergético. Neste sentido, políticas públicas de conservação de rodovias, ampliação e modernização de portos e ampliação da linha ferroviária são importantes.

Para a viabilização da produção de energia elétrica nas empresas sucroenergéticas, também é necessária a presença do Estado para estabelecer melhorias na infraestrutura de distribuição da energia elétrica produzida pelas empresas deste setor. Nos *clusters* 6 e 7, as distâncias das usinas até as subestações é muito elevada, o que dificulta o despacho da energia elétrica gerada pelas usinas. Portanto, uma política pública de ampliação da rede de subestações é importante para incorporar mais fontes geradoras de energia à oferta nacional.

Sob o aspecto das políticas privadas para os *clusters*, é possível a adoção de modelos de investimento, gestão compartilhada de ativos e demais formas de cooperação entre as empresas. Estas formas de investimento, gestão e cooperação são facilitadas quando se tem em mente quais são as empresas que pertencem a um mesmo *cluster* e, portanto, todas tendem a visar objetivos estratégicos similares. Isto faz sentido para grupos de empresas próximas e que pertencem ao mesmo *cluster* (por exemplo os *clusters* 1, 2 e 3). Para esta finalidade as universidades também podem desempenhar um papel importante como suporte no planejamento das ações das empresas isoladamente e em conjunto em cada *cluster*. As universidades e centros de pesquisa também podem auxiliar as empresas na modelagem inerente as emissões de “títulos verdes” que podem trazer recursos financeiros para as empresas.

7 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo estimar *clusters* para o setor sucroenergético brasileiro, a partir de dados da produção de energia elétrica das empresas do setor, bem como outras variáveis importantes que determinam a localização destas empresas e algumas das suas relações setoriais. Como resultado foram estimados sete *clusters* no território brasileiro como uma quantidade ótima de aglomerações. Estas aglomerações não são coincidentes com os limites administrativos dos estados brasileiros. A disposição espacial dos *clusters* estimados faz sentido analítico, além de técnico, uma vez que as aglomerações geradas coincidem com as regiões tradicionais, em termos de produção sucroenergética, e outras aglomerações que estão na fronteira da produção sucroenergética (regiões produtoras mais recentes). Esta *clusterização* também faz sentido sob o aspecto de políticas públicas e privadas, pois as características regionais ou geográficas observadas na *clusterização* estimada guardam algumas características regionais.

A *clusterização* espacial classificou as empresas por *clusters* conforme a Figura 4, talvez outros modelos de *clusterização* sem o viés espacial poderiam produzir agrupamentos similares, mas não se teria certeza da influência do fator geográfico na *clusterização*. Neste caso, as políticas implementadas nos *clusters* poderiam eventualmente ser menos eficazes. Neste contexto, tem-se uma oportunidade para estudos futuros; comparar *clusters* produzidos por outros métodos de *clusterização* com o método *Skater*.

Os *clusters* 1, 2 e 3, conjuntamente, são espaços geográficos brasileiros nos quais a muito tempo (tradicionalmente) se produz cana-de-açúcar, onde se localizam a maioria das empresas sucroenergéticas e onde é produzida a maior quantidade de energia elétrica (potência total produzida - MW/ano). Os demais *clusters* estão localizados em regiões de produção de energia elétrica mais recente com menor número de empresas e menor quantidade de energia elétrica produzida. Entretanto, os *clusters* 4 e 7 possuem maior potência (em MW/ano) produzida por agrupamento, ou seja, maior produtividade por empresa. Isto traz indícios de

alguma ineficiência técnica nas empresas do setor, corroborada em outros estudos, especialmente pela ausência de modernização das usinas, em todas as regiões produtoras.

Neste sentido, as políticas públicas e privadas para o setor são importantes para alavancar a produção e/ou a produtividade inclusive sob o aspecto de incentivar a constituição de biorrefinarias e aproveitar melhor os subprodutos da indústria. Para tanto, o acesso ao crédito para investimento e modernização tecnológica torna-se importante. Paralelamente, e em igual importância, deve-se fomentar pesquisas para inovação tecnológica, inclusive de tecnologias mais baratas para o setor.

Outra questão importante é o incentivo às parcerias entre as empresas dos *clusters*, seja para a produção, comercialização ou distribuição dos produtos, considerando os gargalos de cada *cluster*. Isto inclui compartilhamento de ativos e investimentos futuros. No aspecto privado as políticas de cooperação e de gestão são importantes para todos os *clusters*, mas especialmente para os *clusters* 1, 2 e 3 uma vez que existe uma proximidade geográfica maior entre as empresas.

As parcerias com universidades são importantes para a qualificação da mão de obra técnica e de gestão, isto especialmente no *clusters* 4, 6 e 7, nos quais as universidades estão mais distantes. Neste caso, a implantação de campus de institutos federais poderia contribuir para o treinamento especializado da mão de obra. Por outro lado, fomentar os centros de pesquisa é importante para desenvolver novas tecnologias adaptadas as realidades regionais.

Quanto às políticas públicas, em primeira análise, sua amplitude deve alcançar a todos os *clusters* dependendo das especificidades e necessidades locais. Estas políticas devem se dedicar a resolver os problemas inerentes aos gargalos no recebimento de insumos (tal como a cana-de-açúcar e outros) e na distribuição dos produtos, inclusive a energia elétrica produzida. Uma atenção especial deve ser dada à manutenção de estradas em todos os *clusters* e a ampliação da malha ferroviária na direção do *cluster* 6. Outra questão importante é a o acesso das usinas às subestações de energia elétrica, que servem para o despacho da energia elétrica, o que pode ser um problema em alguns *clusters*, notadamente os *clusters* 6 e 7.

Uma forma de obtenção de recursos para investimentos nas empresas são as emissões de papéis verdes (títulos) que permitem captar recursos financeiros para empresas que contribuem para o meio ambiente. Neste sentido, tem-se a necessidade de orientar (em termos públicos e privados) as ações das empresas para aproveitar esta oportunidade. Igualmente poderia ser importante algum incentivo tributário uma vez que a geração de energia elétrica nas usinas contribui para a redução de emissões de gases de efeito estufa.

Espera-se que este estudo sirva de incentivo à reflexão sobre as necessidades deste setor produtivo, colocando a questão ambiental como importante. Neste sentido, uma política de *clusters* para o setor sucroenergético pode representar uma alternativa para fortalecer o setor e contribuir para o aumento da oferta de energia elétrica, necessária no longo prazo.

As maiores dificuldades do presente trabalho foram encontrar variáveis que representem o estágio atual de desenvolvimento tecnológico de cada empresa, bem como as fragilidades as quais as empresas estão submetidas na produção, gestão e os gargalos na distribuição dos produtos e energia. Sendo assim, em estudos futuros pode-se implementar pesquisas diretas com as empresas do setor e obter informações que possibilitem identificar características tecnológicas e problemas de gestão, logística, investimentos, etc. Como o presente estudo se

concentrou nas empresas (atividade industrial), os aspectos inerentes a atividade agrícola (produção de cana-de-açúcar), portanto fora da atividade industrial, foram excluídos da presente análise. No entanto, sabe-se que existe influência da atividade agrícola na atividade industrial. Sendo assim, resta mais esta lacuna de pesquisa para estudos futuros.

REFERÊNCIAS

ABIOGÁS. Associação Brasileira de Biogás e Biometano. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano**. 2021. Disponível em: https://assets-global.website-files.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390dd3aaa9ca8211589e557_PNBB.pdf. Acesso em: 13 mai. 2025.

ALVAREZ, J. C. *et al.* Proposta de política de ciência, tecnologia e inovação baseada na gestão do conhecimento para um *cluster* de pequenas empresas de energia solar. **Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação**, n. E37, p. 65-77. 2020.

ANDERSSON, T. *et al.* **Cluster Policies Whitebook**. 2004. Disponível em: <https://lucris.lub.lu.se/ws/files/5954460/1304064.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2025.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA**. 2022. Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração – SCG. 2022. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>. Acesso em: 29 jan. 2025.

ANSELIN, L.; SYABRI, I.; KHO, Y. **GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis**. *Geographical Analysis* 38 (1), 5-22. 2006.

ANSELIN, L. **An introduction to spatial data science: Spatially Constrained clustering - Hierarchical Methods**. 2020. Disponível em: https://geodacenter.github.io/workbook/9c_spatial3/lab9c.html#appendix. Acesso em: 25 jul. 2023.

ANTON, H.; RORRES, C. **Elementary linear algebra: applications version**. John Wiley & Sons. 2013.

AQUINO, A. L.; BRESCIANI, L. P. Arranjos produtivos locais: uma abordagem conceitual. **Revista Organizações em Contexto**, Instituto Metodista de Ensino Superior. v. 1, n. 2, p. 153-167, 2005.

ASSUNÇÃO, R. M. *et al.* Efficient Regionalization Techniques for Socio-Economic Geographical Units Using Minimum Spanning Trees. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 7, p. 797–811, 2006.

BARBOSA, G. D. **Parcerias estratégicas entre propriedades rurais para a geração de bioenergia**. Ponta Grossa. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa. 2018.

BARROS, A. R. Raízes históricas das idéias que subsidiam as políticas de *clustering*. **Brazilian Journal of Political Economy**, 22, 136-155. 2002.

- BENEDEK, J.; CRISTEA, M.; BARTÓK, B. Regional Development and Establishment of Renewable Energy *clusters* in North-West Region of Romania. **Environmental Engineering & Management Journal** (EEMJ), v. 12, n. 2. 2013.
- BONDARIK, R.; PILATTI, L.A.; HORST, D.J. Uma Visão Geral sobre o Potencial de Geração de Energias Renováveis no Brasil. **Interciencia**, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018.
- BRAGA, L. A. M. **A eficiência técnica das usinas sucroenergéticas**: determinantes e impactos para economia brasileira. Viçosa. 2016. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2016.
- CAMARGO, C. A. (Coord.). **Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Alcool**, Manual de Recomendações. 1 ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 1990.
- CARVALHO, D. J. **Geração de bioeletricidade em usina sucroalcooleira utilizando bagaço, palha de cana e sorgo biomassa**. Campinas. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2015.
- CASTRO, N.; DANTAS, G. D. A.; BRANDÃO, R. A dinâmica estrutural do setor sucroenergético como elemento indutor de investimentos em bioeletricidade. In: Congresso Sobre Geração Distribuída e Energia (AGRENER), 2010. Campinas. **Anais [...]**. Campinas. 2010.
- CHEIN, F.; LEMOS, M. B.; ASSUNÇÃO, J. J. Desenvolvimento desigual: evidências para o Brasil. **Revista brasileira de economia**, v. 61, p. 301-330. 2007.
- CIBIOGÁS. Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. **Panorama do Biogás no Brasil em 2019**. Disponível em: <https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2022/04/NT-PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2021.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2025.
- COELHO JUNIOR, L. M. *et al.* Concentration and Spatial *clustering* of Forest-Based Thermoelectric Plants in Brazil. **IEEE Access**, vol. 8, pp. 221932–221941, 2020.
- COELHO JUNIOR, L. M. *et al.* Concentração e *clusters* de termelétricas de licor negro no Brasil. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 12, p. 2122-2129. 2021.
- CUI, M. Introduction to the K-Means *clustering* Algorithm Based on the Elbow Method. **Geoscience and Remote Sensing**, v. 3, p. 9-16, 2020.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2021**: Ano base 2020 Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2025.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>. Acesso em 12 jun. 2025.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World Food and Agriculture. Statistical Yearbook 2021**. Roma: FAO, 2021. Disponível em:

<https://openknowledge.fao.org/items/3bd1ea1c-6865-4e1a-b1a1-dd4ce7266a7c>. Acesso em 25 jan. 2025.

FERREIRA, R. R. M. *et al.* **Análise de *cluster* não supervisionado em R**: agrupamento hierárquico. Documentos 133. Campinas: Embrapa. 2020.

FAUSTINO, P. **Indústrias criativas, media e *clusters***. Lisboa: Media XXI. 2013.

GRIGORAS, G.; SCARLATACHE, F. An assessment of the renewable energy potential using a *clustering* based data mining method. Case study in România. **Energy**, v. 81, p. 416-429, 2015.

GUTIERREZ, M. B. S. A Comunicação Corporativa e as Políticas de Combate às Mudanças Climáticas: Teorias, Perspectivas e uma Avaliação do Uso das Redes Sociais no Caso do Brasil. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). **Boletim regional, urbano e ambiental**, n. 24, jul.- dez. 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Logística de Transportes**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15793-logistica-dos-transportes.html>. Acesso em 20 abr. 2025.

IEA. International Energy Agency. **World Energy Outlook 2021**. IEA, 2024. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf>. Acesso em: 25 out. 2024.

JAEGERSBERG, G.; URE, J. Barriers to knowledge sharing and stakeholder alignment in solar energy clusters: Learning from other sectors and regions. 2011. **The Journal of Strategic Information Systems**, v. 20, n. 4, p. 343-354. 2011.

JESUS, R. H. G. **Modelo de localização de biodigestor com ênfase em *cluster* de parceria estratégica para geração de bioenergia**. Ponta Grossa. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa. 2021.

KAUFMAN, L.; ROUSSEEUW, P. J. **Finding groups in data**: an introduction to *cluster* analysis. John Wiley & Sons, 2009.

KAUNDINYA, D. P. *et al.* GIS (geographical information system)-based spatial data mining approach for optimal location and capacity planning of distributed biomass power generation facilities: A case study of Tumkur district, India. **Energy**, v. 52, p. 77-88, 2013.

LAASASENAHO, K. *et al.* GIS-data related route optimization, hierarchical *clustering*, location optimization, and kernel density methods are useful for promoting distributed bioenergy plant planning in rural areas. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 32, p. 47-57. 2019.

LEITE, C.; AWAD, J. C. M. **Cidades sustentáveis, cidades inteligentes**: desenvolvimento sustentável num planeta urbano. Porto Alegre: Bookman. 2012.

MA, J.; SCOTT, N. R.; DEGLORIA, S. D.; LEMBO, A. J. Siting analysis of farm-based centralized anaerobic digester systems for distributed generation using GIS. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 6, p. 591-600, 2005.

MEC. Ministério da Educação. **Cadastro Nacional de Cursos e Instituições de Educação Superior Cadastro e-MEC**. 2022. Disponível em: <https://emec.mec.gov.br/>. Acesso em 03 fev. 2024.

MILANEZ, A. Y.; SOUZA, J. A. P.; MANCUSO, R. V. Panoramas setoriais 2030: sucroenergético. In: **Panoramas setoriais 2030: desafios e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, p. 107-121. 2017. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14245/2/Panoramas%20Setoriais%202030%20-%20Sucroenergetico%20P_BD.pdf. Acesso em: 29 fev. 2025.

MONTOYA, M.A. *et al.* Renewable and Non-renewable in the energy-emissions-climate nexus: Brazilian contributions to climate change via international trade. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, e127700. 2021.

NEVES, M. F.; KALAKI, R. B. **Bioenergy from sugarcane**. Guariba, SP: Socicana. 2020.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G. **A dimensão do setor sucroenergetico**. Ribeirão Preto: Markestrat, 2014. Disponível em: <https://unica.com.br/wp-content/uploads/2019/06/A-Dimensao-do-Setor-Sucroenergetico.pdf>. Acesso em 23 jun. 2025.

NOCACANA. **Cogeração: como funciona a produção de energia elétrica numa usina sucroalcooleira**, 2021. Disponível em: <https://www.novacana.com/usina/cogeracao-como-funciona-producao-energia-eletrica>. Acesso em: 26 jan. 2025.

ODDONE, D. C. **Cogeração: uma alternativa para produção de eletricidade**. São Paulo. 2001. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PELLEGRINI, L. F.; OLIVEIRA JUNIOR, S. Combined production of sugar, ethanol and electricity: Thermo-economic and environmental analysis and optimization. **Energy**, v. 36, p. 3704-3715. 2011.

POGGI, F.; FIRMINO, A.; AMADO, M. *Clusters* municipais de bioenergia: um contributo para a prevenção de incêndios florestais. **Finisterra**, v. 53, n. 108, p. 39-52, 2018.

PORTER, M. E. **Clusters and the New Economics of Competition**. Cambridge, MA: Harvard Business School Press, 1998.

PORTER, M. E. **Clusters and Economic Policy: Aligning Public Policy with the New Economics of Competition**. Institute for Strategy and Competitiveness. 2009. Disponível em: https://www.hbs.edu/ris/Publication%20Files/Clusters_and_Economic_Policy_White_Paper_8e844243-aa23-449d-a7c1-5ef76c74236f.pdf. Acesso em: 09 mar. 2025.

QAZI, A. *et al.* Towards Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinions. **IEEE Access**, v. 7, p. 63837-63851, 2019.

QGIS. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. 2022. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 02 out 2022.

RFA. Renewable Fuels Association. **World Fuel Ethanol Production by Region**. Markets & Statistics. 2021. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>. Acesso em: 25 jul. 2023.

SANTOS, G. R. (Org.). **Quarenta anos de etanol em larga escala no Brasil: desafios, crises e perspectivas**. 1. ed. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/17b6a57a-b136-4af3-a449-45ea0ea384b4/content>. Acesso em: 16 jun. 2025.

SCHMIDT, V.K. **Resiliência de cluster**: um estudo no *cluster* vinícola da Serra Gaúcha. Porto Alegre. 2020. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

SHI, C. *et al.* A quantitative discriminant method of elbow point for the optimal number of *clusters* in *clustering* algorithm. **Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking**, n. 31, p. 1-16. 2021.

SILVA, D. L. G. *et al.* Cana-de-açúcar: Aspectos econômicos, sociais, ambientais, subprodutos e sustentabilidade. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e44410714163, 2021.

SOUTO, T. J. M. P. *et al.* Viabilidade da Bioeletricidade a Partir da Cana-de-Açúcar. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá. v. 11, n. 2, p. 409-429, abr./jun. 2018.

STENNER, C. **A Geografia da cana-de-açúcar. Dinâmica territorial da produção agropecuária**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Coordenação de Geografia. - Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101436.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.