

**VII Prêmio** de  
Serviço Florestal Brasileiro  
em Estudos de Economia e  
Mercado Florestal

Menção honrosa na categoria profissional

**Concentração, polarização e dependência  
espacial da bioeletricidade florestal no  
Brasil (2000 - 2019)**

Edvaldo Pereira Santos Júnior  
Luiz Moreira Coelho Junior



**VII PRÊMIO SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO EM ESTUDOS DE  
ECONOMIA E MERCADO FLORESTAL**

**CATEGORIA PROFISSIONAL**

**TEMA: A economia e o mercado florestal**

**SUBTEMA: Bioeconomia e as termelétricas de base florestal**

**TÍTULO DA MONOGRAFIA: Concentração, Polarização e dependência espacial da  
bioeletricidade florestal no Brasil (2000 - 2019)**

**CONCENTRAÇÃO, POLARIZAÇÃO E DEPENDÊNCIA ESPACIAL DA  
BIOELETRICIDADE FLORESTAL NO BRASIL (2000 – 2019)**

**JOÃO PESSOA - PB  
2022**

## RESUMO

A geração de eletricidade por meio da biomassa florestal está relacionada com a dinâmica do mercado florestal, esta biomassa é um recurso importante tanto no suprimento energético mundial, quanto na mitigação das emissões de gases do efeito estufa. O Brasil apresenta vantagens comparativas para que os recursos florestais sejam uma alternativa viável para incrementar a oferta interna de energia. Assim, em busca de compreender os aspectos regionais das termelétricas de base florestal, auxiliar investimentos e a orientação de políticas públicas, este trabalho analisou a concentração, a polarização e a dependência espacial da bioeletricidade florestal no Brasil, de 2000 a 2019. Os dados da outorga das termelétricas de biomassa florestal foram obtidos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Para economia regional, utilizaram-se os indicadores de concentração, de polarização e a análise exploratória de dados espaciais. No Brasil, a oferta outorgada de eletricidade de biomassa florestal cresceu de 562,90 MW e 11 termelétricas, em 2000, para 3.532,61 MW e 115 termelétricas, em 2019, com uma taxa média anual de 13,20% a.a. para quantidade de termelétricas e 10,15% a.a. para potência outorgada. Os principais estados produtores foram: Paraná, Bahia, Espírito Santo e Mato Grosso do Sul. Para a concentração estadual, o CR(4) e o CR(8) apontaram concentração média a moderadamente alta e o *HHI* inferiu uma distribuição atomizada. Houve um aumento na polarização estadual e entre usinas, proporcionado pela outorga das térmicas à licor negro, a partir de 2013. Nas análises exploratórias de dados espaciais, o índice local ( $I_{Moran\_Local}$ ) evidenciou a existência *clusters* de alta potência, destacando-se o eixo Bahia, Espírito Santo e Minas Gerais, e as térmicas do Paraná e do Mato Grosso do Sul. Pode-se concluir que o desenvolvimento deste trabalho contribuiu para uma melhor compreensão espacial do mercado da bioeletricidade florestal brasileira.

**Palavra-chave:** bioenergia; biomassa florestal; economia florestal.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
2.1. OBJETIVO GERAL	11
2.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. REFERENCIAL TEÓRICO	11
3.1. ENERGIA NO MUNDO	11
3.2. ENERGIA NO BRASIL	13
3.3. BIOMASSA	16
3.3.1. BIOMASSA FLORESTAL	16
3.4. SETOR FLORESTAL	17
3.4.1. SETOR FLORESTAL MUNDIAL	17
3.4.2. SETOR FLORESTAL NO BRASIL	20
3.5. BIOMASSA FLORESTAL PARA ELETRICIDADE	22
3.6. ECONOMIA REGIONAL E ESPACIAL	25
3.6.1. QUOCIENTE LOCACIONAL	27
3.6.2. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS ESPACIAIS (AEDE)	27
3.7. ECONOMIA INDUSTRIAL	28
3.7.1. CONCENTRAÇÃO INDUSTRIAL	29
3.7.2. POLARIZAÇÃO E DESIGUALDADE	30
4. MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1. OBJETO DE ESTUDO	31
4.2. MEDIDAS LOCACIONAIS, DE CONCENTRAÇÃO E DE DESIGUALDADE	31
4.4. MEDIDAS DE POLARIZAÇÃO	35
4.5. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS ESPACIAIS	37
4.5.1. INDICADORES DE AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
6. CONCLUSÃO	65
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	66

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Oferta energética mundial por tipo de fonte, em  $\times 10^6$  tep, para 1990, 1995, 2000, 2010, 2015 e 2018. 12
- Tabela 2.** Oferta mundial de eletricidade por tipo de fonte, em TWh, para 1990, 1995, 2000, 2010, 2015 e 2018. 12
- Tabela 3.** Oferta energética por tipo de fonte no Brasil, em  $\times 10^3$  tep, para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019. 13
- Tabela 4.** Geração de eletricidade por tipo de fonte no Brasil, em GWh, para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019. 14
- Tabela 5.** Evolução do consumo final setorial de biomassa no Brasil, em  $\times 10^3$  tep, para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019. 16
- Tabela 6.** Produção madeireira dos 10 maiores países com base em 2019 ( $\times 10^6$  m<sup>3</sup>), para 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2019. 18
- Tabela 7.** Produção de madeira para uso combustível ( $\times 10^6$  m<sup>3</sup>) dos 10 maiores países, com base em 2019, para os anos de 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2019. 19
- Tabela 8.** Classificação da Razão Concentração dos quatro maiores [CR(4)] e dos oito maiores [CR(8)] participantes. 33
- Tabela 9.** Evolução das termelétricas de base florestal (fontes nível 1 e 2) e potência outorgada (MW), para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019. 43
- Tabela 10.** Índices de Moran global da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1 e 2, para matriz de k-vizinhos mais próximos (2, 4, 6, 8 e 10) e para distância (Km), para 2000, 2010 e 2019. 56

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Produção madeireira continental, no mundo ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ ), de 1970 a 2019. 18
- Figura 2.** Participação dos biomas (a) e das espécies plantadas (b) no território brasileiro, em 2018. 20
- Figura 3.** Evolução da produção anual de madeira, por tipo de floresta (extrativismo vegetal e silvicultura), em milhões de metros cúbicos ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ ), no Brasil, de 1998 a 2017. 21
- Figura 4.** Evolução da produção anual de madeira por tipo de produto no Brasil ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ ), a) extrativismo vegetal e b) silvicultura, de 1998 a 2017. 22
- Figura 5.** Evolução da produção madeireira por finalidade de uso no Brasil ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ ), de 1998 a 2017. 23
- Figura 6.** Evolução das principais teorias em economia regional. 26
- Figura 7.** Curva de Lorenz. 35
- Figura 8.** Diagrama de dispersão de Moran. 39
- Figura 9.** Distribuição espacial brasileira das termelétricas e os quartis da potência outorgada (MW) para a bioeletricidade florestal, para 2000, 2010 e 2019. 40
- Figura 10.** Evolução do Quociente Locacional (QL) nos estados brasileiros para potência outorgada da biomassa florestal (nível 2), para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019. 44
- Figura 11.** Evolução dos indicadores de concentração da potência outorgada dos estados brasileiros para bioeletricidade florestal, de 2000 a 2019. Razão de Concentração (a), índice Herfindahl-Hirschman (b), índice de Hoover (c) e índice de Gini (d). 47
- Figura 12.** Evolução dos indicadores de concentração da potência outorgada nas termelétricas da bioeletricidade florestal, de 2000 a 2019. Razão de Concentração (a), índice Herfindahl-Hirschman (b), índice de Hoover (c) e índice de Gini (d). 48
- Figura 13.** Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nas regiões brasileiras, de 2000 a 2019. Curva de Lorenz (a), Índice de Gini (b); Foster e Wolfson (c) e Esteban e Ray (d). 50
- Figura 14.** Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nos estados brasileiros. a) Curva de Lorenz, b) Índice de Gini; c) Foster e Wolfson e d) Esteban e Ray, de 2000 a 2019. 52
- Figura 15.** Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nas termelétricas brasileiras, de 2000 a 2019. Curva de Lorenz (a), Índice de Gini (b); Foster e Wolfson (c) e Esteban e Ray (d). 53
- Figura 16.** Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal brasileiras, entre as fontes nível 2, de 2000 a 2019. Curva de Lorenz (a), Índice de Gini (b); Foster e Wolfson (c) e Esteban e Ray (d). 55

**Figura 17.** Diagrama de dispersão do  $I_{Moran\_Global}$  da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1 e 2, para a matriz de 2 vizinhos mais próximos, para 2000, 2010 e 2019. 58

**Figura 18.** Distribuição espacial do  $I_{Moran\_Global}$  da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1, para a matriz de 2 vizinhos mais próximos, para 2000, 2010 e 2019. 60

**Figura 19.** Distribuição espacial do  $I_{Moran\_Local}$  da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 2, para a matriz de contiguidade “rainha”, para 2000, 2010 e 2019. 62

## 1. INTRODUÇÃO

A biomassa é o recurso energético mais antigo utilizado pela humanidade. Seu aproveitamento na forma de energia acompanhou o desenvolvimento civil, também evoluindo em sua finalidade e forma de obtenção. Alguns exemplos são a extração da lenha para cocção e aquecimento ou práticas modernas de extrativismo vegetal e de silvicultura, para obtenção de madeira para as indústrias de transformação, geração de calor, força motriz e eletricidade (SHIMELMITZ et al., 2014).

Para Perlin e Jordan (1983), a biomassa foi fundamental no desenvolvimento de cidades nas civilizações antigas, principalmente a partir das florestas, que foram utilizadas para construção e aquecimento. Os primeiros passos para a industrialização também foram baseados em recursos florestais; em meados do século XIX, a biomassa da madeira era uma importante fonte de energia para os países que iniciavam seu processo de industrialização (ROSILLO—CALLE; HALL, 2002).

A partir do século XX, diversas usinas de biomassa passaram a gerar energia elétrica, diretamente ou do processo combinado de calor e eletricidade, a partir da cogeração. A utilização sustentável da biomassa apresentou elevado crescimento em escala global, dado o aumento populacional, a melhoria dos padrões de vida e a conseqüente demanda energética da população. Dentre as vantagens do uso estão a rápida reposição, adaptação regional e capacidade de redução das emissões de gases do efeito estufa (ROSILLI-CALLE; WOODS, 2012).

De acordo com Looney (2020), em 2019, o consumo energético mundial foi 13.946,21 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), considerando-se um aumento de 1,34%, em comparação a 2018 (13.763,02 milhões tep). Os combustíveis exauríveis representaram 12.354,54 milhões tep (88,59%) e os renováveis 1.591,67 milhões tep (11,41%). Para a eletricidade, em 2019, a produção mundial foi 26.691 TWh (Tera Watts hora), o continente asiático apresentou a maior produção, com 12.391 TWh (45,16%), seguido das Américas (6.679 TWh) e da Europa (3.831 TWh). Os países com maior produção foram a China (7.482 TWh), os Estados Unidos (4.385 TWh) e a Índia (1.614 TWh). A partir das fontes renováveis foram gerados 7.105,14 TWh (26,62%) (ENERDATA, 2020).

A biomassa foi a terceira principal fonte renovável para eletricidade no mundo, com 595,60 TWh gerados, em 2018. Estima-se que com o estabelecimento de políticas públicas voltadas à bioeletricidade, a potência mundial a partir da biomassa possa chegar a 1.600 TWh, até o ano de 2040, com aumento da participação de 9% para 12% na matriz elétrica renovável. O país com maior crescimento deve ser a China, com incremento de 2.200 TWh de potência renovável, onde 15% (330 TWh) deverá ser a partir de biomassa; com relação à capacidade instalada este valor deve ser de 3.700 GW, com 250 GW (7%) para a biomassa (ENERDATA, 2019; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY — IEA, 2019).

No Brasil, a oferta de bioeletricidade é resultado, principalmente, do processo de cogeração, ou seja, do aproveitamento do calor e resíduos nas indústrias, tanto as sucroalcooleiras quanto as de papel e celulose. Ressalta-se que para empresas de grande porte e com elevada eficiência energética é comum a geração de excedente de eletricidade, sendo este comercializado no mercado regulado, mercado livre ou de curto prazo (TOLMASQUIM, 2016).

Dentre os recursos utilizados para bioeletricidade no Brasil, destacam-se o bagaço de cana de açúcar, o licor negro, os resíduos florestais, o biogás de resíduos urbanos e o gás de alto forno da biomassa. Dos principais recursos, três resultam das florestas (licor negro, resíduos florestais

e gás de alto forno); a potência instalada de bioeletricidade florestal no Brasil, em 2019, foi 3,24 GW, correspondente a 1,88% da oferta nacional de eletricidade, e contou com 105 termelétricas em operação (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA — ANEEL, 2020).

O território brasileiro apresenta extensão de aproximadamente 851,57 milhões de hectares (Mha), dos quais 7,83 Mha (0,92% do território nacional) são destinadas às florestas plantadas (silvicultura) (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ 2019). Para Tolmasquim (2016), a produtividade florestal brasileira é uma das maiores do mundo, dada as condições edafoclimáticas e o aprimoramento técnico de seu setor florestal. Em 2019, o Brasil apresentou produção madeireira de  $281,52 \times 10^6$  metros cúbicos ( $m^3$ ), sendo o quarto maior produtor mundial de madeira (FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION — FAO, 2020). As duas principais espécies da silvicultura nacional são o eucalipto e o pinus, as quais são destinadas, principalmente, para as indústrias de celulose e papel, serrarias, produção do carvão vegetal e siderúrgicas (IBÁ, 2019).

Diante a relevância do uso da biomassa florestal no Brasil, da capacidade para geração de eletricidade, principalmente a partir de sistemas integrados de cogeração nos setores industriais, e para compreender a dimensão e distribuição da oferta brasileira da bioeletricidade florestal utilizou-se medidas de localização, concentração, polarização e distribuição espaço temporal aplicadas a bioeletricidade florestal no Brasil.

De acordo com Suzigan et al. (2003) a utilização de indicadores de localização regional e de concentração industrial permite verificar a distribuição espacial, identificar a localização e mapear movimentos de deslocamento regional do mercado, sejam do processo de concentração ou de descentralização econômica. Por sua vez, a polarização tende a auxiliar a compreensão da disposição de atividades. O fenômeno da polarização pode ser compreendido como o grau no qual uma distribuição se agrupa em polos homogêneos, distantes um do outro; sendo um setor altamente polarizado aquele onde há poucos polos com grande número de participantes e alto grau de oposição entre grupos (DURO; PADILLA, 2013). Por sua vez, a análise exploratória de dados espaciais (AEDE) fornece medidas de autocorrelação espacial global e local, fundamentais para delinear a distribuição espacial, detectando a correlação de amostras (YANG; WONG, 2013).

O trabalho foi desenvolvido em duas partes, a primeira composta de um referencial teórico e a segunda apresentação metodológica e de resultados. O referencial teórico apresentou os principais conceitos relativos à biomassa florestal e o panorama de sua utilização mundial, processos de conversão bioenergética, apresentação e descrição do setor florestal e uma breve revisão das ferramentas metodológicas utilizadas. Como proposta metodológica analisou-se a localização e concentração na bioeletricidade florestal brasileira, de 2000 a 2019. Para mensurar a localização regional e a concentração industrial foram utilizados o Quociente Locacional ( $QL$ ), a Razão de Concentração [ $CR(k)$ ], Índice de Herfindahl-Hirschman ( $HHI$ ), o Índice de Hoover ( $H$ ), e o coeficiente de desigualdade de Gini ( $G$ ).

Em seguida observou-se a polarização da bioeletricidade florestal, no Brasil, no período de 2000 a 2019; a partir das medidas de bipolarização de Foster e Wolfson e da polarização de múltiplos grupos de Esteban e Ray. Por fim, analisou-se a distribuição e a dependência espacial da bioeletricidade florestal no Brasil, no período, de 2000 a 2019, por meio da análise exploratória de dados espaciais (AEDE).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Analisar a concentração, a polarização e a dependência espacial da bioeletricidade florestal no Brasil, no período de 2000 a 2019.

#### **2.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a. Analisar a localização e concentração brasileira da bioeletricidade florestal, no período de 2000 a 2019;
- b. Analisar a polarização da bioeletricidade florestal no Brasil, de 2000 a 2019;
- c. Analisar a distribuição e a dependência espacial da bioeletricidade florestal no Brasil, de 2000 a 2019.

## **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

O Referencial Teórico foi estruturado em tópicos relevantes à bioeletricidade florestal no Brasil e nas teorias científicas utilizadas como método nesta dissertação. Descreveu-se sobre a oferta energética mundial e brasileira, a temática da biomassa e suas formas de conversão, a apresentação do setor florestal (mundial e brasileiro) e da biomassa voltada à geração de eletricidade. Foram expostas algumas teorias como economia industrial, regional e espacial, com foco nas medidas de concentração, polarização e análise exploratória de dados espaciais.

### **3.1. ENERGIA NO MUNDO**

A Tabela 1 apresenta a evolução da oferta energética global por fonte de energia, em  $\times 10^6$  tep, para 1990, 1995, 2000, 2010, 2015 e 2018 (IEA, 2020). Em 1990, a oferta energética foi 8,76 bilhões tep e cresceu para 14,28 bilhões tep, em 2017, o que representou crescimento médio anual de 196,92 milhões tep. O óleo combustível foi o principal recurso energético, associado majoritariamente aos processos industriais. Apesar do aumento do uso das energias renováveis, o consumo de óleo cresceu, saltando de 3,23 bilhões tep (1990) para 4,50 bilhões tep (2018), com crescimento médio de 1,18% a.a.

A biomassa foi o recurso renovável que apresentou maior participação na matriz energética. Em 1990, com 902,38 milhões tep fornecidos, representou 10,29% do suprimento mundial. Em 2018, a participação do recurso na oferta mundial foi de 9,29%, com disponibilidade de 1,33 bilhões tep, o crescimento foi 1,38% a.a. (1990 – 2018). A energia hidráulica foi a segunda renovável mais significativa. As fontes renováveis de energia apresentaram maior participação no fornecimento de eletricidade, comparado à oferta energética primária.

**Tabela 1.** Oferta energética mundial por tipo de fonte, em x10<sup>6</sup> tep, para 1990, 1995, 2000, 2010, 2015 e 2018.

Fonte	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018
Óleo diesel	3.232,74	3.373,48	3.662,67	3.998,70	4.135,58	4.329,22	4.496,70
Carvão mineral	2.220,47	2.207,27	2.316,67	2.994,44	3.653,11	3.852,54	3.838,33
Gás natural	1.663,61	1.807,79	2.072,29	2.360,51	2.733,10	2.949,91	3.261,60
Biomassa	902,37	978,74	1.011,99	1.081,53	1.202,12	1.286,06	1.327,13
Nuclear	525,52	608,10	675,47	721,71	718,83	670,30	706,81
Hídrica	184,10	212,82	224,69	252,35	296,07	335,52	362,33
Outras	36,56	42,38	60,05	70,02	110,08	204,19	286,38
Total	8.765,36	9.230,56	10.023,83	11.479,25	12.848,87	13.627,74	14.279,28

Fonte: IEA, 2020.

A Tabela 2 apresenta a evolução da oferta mundial de eletricidade por tipo de fonte, em Tera Watts hora (TWh), para 1990, 1995, 2000, 2010, 2015 e 2018. Os recursos não renováveis representaram a maior parcela da matriz elétrica mundial. Em 1990, as fontes fósseis geraram 9.517,49 TWh (80,11%), sendo o carvão mineral (4.429,51 TWh) o recurso com maior participação (37,22%). Para o mesmo ano, as fontes renováveis forneceram 2.382,84 TWh (20,02%) e o recurso hidráulico foi o principal, com 2.191,69 TWh (18,42%) (IEA, 2020).

**Tabela 2.** Oferta mundial de eletricidade por tipo de fonte, em TWh, para 1990, 1995, 2000, 2010, 2015 e 2018.

Fonte	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018
Não renováveis	9.517,50	10.580,48	12.551,61	14.929,10	17.238,59	18.675,83	19.803,98
Carvão mineral	4.429,51	4.992,43	5.994,50	7.321,70	8.666,20	9.553,50	10.159,65
Óleo combustível	1.324,82	1.235,83	1.206,77	1.135,31	977,33	975,91	783,70
Gás natural	1.750,27	2.020,27	2.759,72	3.704,14	4.838,77	5.576,26	6.150,20
Nuclear	2.012,90	2.331,95	2.590,62	2.767,95	2.756,29	2.570,17	2.710,43
Renováveis	2.362,89	2.725,40	2.945,21	3.415,45	4.343,73	5.689,25	6.926,09
Biomassa	129,62	130,02	163,95	228,70	369,59	519,36	637,24

Fonte	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018
Hídrica	2.191,68	2.545,97	2.695,85	3.019,50	3.530,27	3.989,83	4.325,11
Geotérmica	36,43	39,90	51,99	58,28	68,11	80,56	88,96
Fotovoltaica	0,09	0,20	0,99	3,93	32,22	250,57	554,38
Térmica solar	0,66	0,82	0,53	0,60	1,65	9,61	11,32
Eólica	3,88	7,96	31,35	103,92	341,38	838,31	1.273,41
Maré motriz	0,54	0,55	0,55	0,52	0,51	1,01	1,05
Outras	37,72	41,46	54,06	63,33	102,49	341,75	34,62
Total	11.880,39	13.305,88	15.496,82	18.344,55	21.582,32	24.365,08	26.730,07

Fonte: IEA, 2019.

A participação das fontes de energia renovável apresentou aumento anual médio de 3,91% a.a. (1990 a 2018), superior ao de recursos fósseis que cresceram em 2,65% a.a.. Em 2018, a geração renovável foi 6.926,09 TWh, com participação de 25,91% do produzido, destacando-se a energia hidrelétrica (16,18%), a eólica (4,76%) e a biomassa (2,38%). O fornecimento da bioeletricidade foi 129,62 TWh (1990), passando a 637,24 TWh (2018); a utilização da biomassa apresentou crescimento médio de 5,85% a.a..

### 3.2. ENERGIA NO BRASIL

A Tabela 3 apresenta a oferta energética no Brasil por tipo de fonte, em x10<sup>3</sup> tep, para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019. No Brasil, a partir de 1970, houve um aumento significativo na oferta, devido crescimento da participação das fontes fósseis na matriz energética. A oferta total de energia, no Brasil, passou de 66,95 para 294 294 milhões tep, com crescimento de 3,06% a.a., entre 1970 e 2019. As fontes não renováveis cresceram 3,60% a.a., saltando de 27,92 (1970) para 158,40 milhões tep (2019); destacaram-se o petróleo e seus derivados, com média de 71,93 milhões tep (40,60% do total) e o gás natural, com média de 12,50 milhões tep e crescimento de 11,54% a.a. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA — EPE, 2020).

**Tabela 3.** Oferta energética por tipo de fonte no Brasil, em x10<sup>3</sup> tep, para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019.

Fonte	1970	1980	1990	2000	2010	2019
Não renováveis	27.918	62.541	72.672	112.782	148.644	158.395
Petróleo e derivados	25.251	55.418	57.749	86.743	101.714	101.051
Gás natural	170	1.092	4.337	10.256	27.536	35.909
Carvão mineral e coque	2.437	5.902	9.598	12.999	14.462	15.480
Urânio			598	1.806	3.857	4.174

Fonte	1970	1980	1990	2000	2010	2019
Outras não renováveis	60	129	391	978	1.075	1.780
Renováveis	39.028	52.157	69.368	77.261	120.062	135.642
Hidráulica	3.420	11.063	20.051	29.980	37.663	36.364
Lenha e carvão vegetal	31.852	31.083	28.537	23.060	25.998	25.725
Derivados da cana	3.593	9.129	18.988	20.761	47.102	52.841
Eólica					187	4.815
Solar						572
Outras	163	881	1.793	3.460	9.112	15.325
Total	66.946	114.698	142.041	190.043	268.706	294.036

Fonte: EPE, 2020.

As fontes renováveis apresentaram crescimento de 2,57% a.a., saltando de 39,03 (1970) para 135,64 milhões tep (2019). Destas, destacou-se a biomassa da cana (agroindústria), que apresentou o maior crescimento anual na oferta, com 5,64% a.a. e fornecimento energético médio de 24,57 milhões tep. Por sua vez, o uso da madeira mostrou-se mais constante, utilizada principalmente para processos de fornecimento de calor na indústria, o carvão vegetal e a lenha tiveram decréscimo de apenas 0,43% a.a., entre 1970 e 2019. Embora a biomassa florestal tenha apresentado pouca diminuição, em termos absolutos, o aumento das demais fontes fez com que sua participação decrescesse de 47,57% (31.852 x10<sup>3</sup> tep), em 1970, para 8,75% (24.146 x10<sup>3</sup> tep), em 2019 (EPE, 2019).

A Tabela 4 apresenta a geração de eletricidade por tipo de fonte no Brasil, em GWh (Giga Watts hora), para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019. Em 1970, o fornecimento de eletricidade nacional foi 49.455,29 GWh, onde 85,37% obtidos de fontes renováveis de energia. Em 2019, obteve-se 683.664,77 GWh, com um aumento médio de 5,62% a.a.

**Tabela 4.** Geração de eletricidade por tipo de fonte no Brasil, em GWh, para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019.

Fonte	1970	1980	1990	2000	2010	2019
Não renováveis	7.237,00	12.404,74	17.187,25	47.271,85	97.395,83	137.092,58
Gás natural	0,00	0,00	639,22	6.506,83	46.217,45	72.963,52
Carvão vapor	1.416,99	2.721,20	2.917,37	7.877,24	7.830,81	16.734,10
Óleo diesel	700,60	1.371,87	2.428,62	7.016,86	9.861,17	5.857,71
Óleo combustível	4.457,27	6.596,63	4.839,62	9.716,50	6.444,66	3.119,04
Gás de coqueria	91,74	362,79	875,52	1.107,70	2.299,50	2.758,90

Fonte	1970	1980	1990	2000	2010	2019
Outras secundárias	0,00	30,00	379,28	3.041,39	3.484,61	5.708,69
Outras	570,40	1.322,25	2.870,62	5.959,34	6.734,48	13.821,80
Urânio	0,00	0,00	2.237,00	6.046,00	14.523,16	16.128,82
<b>Renováveis</b>						
Renováveis	42.218,29	135.321,02	217.540,13	322.796,78	461.867,34	546.572,19
Lenha	109,78	403,19	1.223,04	1.426,81	2.894,89	3.854,39
Bagaço de cana	721,66	2.001,00	3.728,10	6.962,29	34.689,65	51.090,69
Licor negro	197,54	1.206,82	2.206,33	5.801,58	13.933,89	23.453,39
Biodiesel	0,00	0,00	0,00	0,00	416,64	457,23
Eólica	0,00	0,00	0,00	1,00	2.177,00	55.999,61
Solar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7.317,41
Hidráulica	41.188,91	131.710,0	209.822,0	307.790,64	407.171,74	401.030,01
Outras	0,40	0,00	560,66	814,46	583,52	3.369,46
<b>Total</b>	<b>49.455,29</b>	<b>147.725,76</b>	<b>234.727,37</b>	<b>370.068,63</b>	<b>559.263,16</b>	<b>683.664,77</b>

Fonte: EPE, 2020.

O intervalo de maior crescimento na produção de eletricidade foi 2000 a 2010, com aumento absoluto de 124.401,61 TWh, dos quais 68,09% foram acrescidos dos recursos renováveis e 31,91% dos exauríveis devido à globalização e o progresso tecnológico das indústrias.

Embora a energia hidráulica ser a principal recurso de geração de eletricidade no Brasil, durante todo período analisado, apresentou decréscimo em sua participação, caindo de 83,25% (1970) para 58,65% (2019). Por sua vez, a biomassa apresentou aumento médio de 9,26% a.a., com participação de 2,08% (1970), 2,44% (1980), 3,05% (1990), 3,83% (2000), 9,29% (2010) e 11,53% (2019); parte do crescimento pode ser atribuído ao aumento da demanda energética industrial, as crises energéticas enfrentadas em 2001 e 2002 e ao Programa de incentivo as fontes alternativas (PROINFA).

A Tabela 5 apresenta a evolução do consumo final setorial da biomassa no Brasil, em  $\times 10^3$  tep, para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019. O uso da biomassa aumentou de forma significativa para os setores energético (11,04% a.a.) e de transporte (10,78% a.a.), devido os programas de incentivo, como o Programa Nacional de Álcool (Proálcool), criado em 1975, e a busca por aumento da eficiência energética, principalmente no setor sucroalcooleiro e de celulose e papel (EPE, 2019). O uso residencial apresentou a maior queda, com -1,93% a.a., influenciado pela intensificação da urbanização nos anos de 1970 e os subsídios ao preço do GLP, a partir de 1973 (ESTEVES; BICALHO; OLIVEIRA FILHA, 2009). Dentre os setores industriais, os com maior crescimento foram o de ferro-ligas e ferro-gusa e aço, com aumento médio de 4,78% a.a. e 2,11% a.a., respectivamente. Estes segmentos apresentaram elevado consumo do carvão vegetal (em substituição ao coque de petróleo) e do gás de alto forno de biomassa, resultante de etapas industriais (CARVALHO; DE ASSIS, 2007).

**Tabela 5.** Evolução do consumo final setorial de biomassa no Brasil, em  $\times 10^3$  tep, para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019.

Setores	1970	1980	1990	2000	2010	2019
Setor energético	8,92	201,28	670,65	552,27	1.277,69	1.513,92
Residencial	1.950,76	1.580,43	859,91	697,94	778,50	748,53
Comercial e público	23,90	22,90	17,33	13,86	17,72	16,48
Agropecuário	492,01	324,20	218,08	164,25	280,60	384,97
Transportes	14,13	142,50	585,75	582,02	1.358,93	2.129,01
Industrial	842,68	1.239,28	1.684,58	2.031,90	3.428,83	3.160,21
Total	3.332,39	3.510,58	4.036,30	4.042,23	7.142,28	7.953,12

Fonte: EPE, 2020.

### 3.3. BIOMASSA

A biomassa pode ser entendida como todo material orgânico proveniente de plantas ou animais. Para McKendry (2002), a biomassa é um produto dos sistemas agrícolas, florestais ou de vegetação aquática, bem como todos os resíduos orgânicos, com energia armazenada em suas ligações químicas. O conceito agrupa uma infinita quantidade de recursos, todavia, nem todos são adequados à produção de calor e eletricidade (WOLF, 2013).

Cesprini et al. (2020) afirmaram que mesmo o suprimento de biomassa envolvendo um grande número de matérias-primas, os recursos de maior importância para geração de energia podem ser classificados em biomassa florestal, agroindustrial e de resíduos urbanos.

#### 3.3.1. BIOMASSA FLORESTAL

A biomassa florestal corresponde a dois terços da biomassa total disponível para produção de energia e, aproximadamente, metade de todo o potencial renovável do mundo. Os produtos energéticos das florestas incluem resíduos florestais, a lenha, resíduos de madeira urbana e resíduos de processamento industrial, como o licor negro e o gás de alto forno de biomassa (MANTAU et al., 2010; SEDJO, 1997). Woo et al. (2019) classificaram a cadeia produtiva da biomassa florestal em três níveis: primário, secundário e terciário. O primário inclui os resíduos madeireiros convencionais da retirada de madeira para fins industriais e energéticos de áreas florestais. Os resíduos do processamento industrial são as fontes secundárias. E o terceiro associa-se aos resíduos urbanos, sejam de podas, consumo humano, detritos de construção ou demolição.

Os subprodutos de biomassa florestal variam de acordo com a localização geográfica dos países. No continente americano, de forma geral, a biomassa florestal mais utilizada são os resíduos madeireiros, gerados por operações de colheita comercial da madeira, retirada de material com risco de incêndio, corte de madeira, recuperação de madeira e restauração florestal (GHAFFARIYAN; ACUNA; BROWN, 2013; KIZHA; HAN, 2015). A biomassa dos resíduos pode ser utilizada na produção de painéis de partículas ou destinada à geração de energia, na forma de calor e eletricidade (WOLF, 2013).

### 3.4. SETOR FLORESTAL

O setor florestal compreende a relação de produção, comércio e uso final dos recursos silvestres ou florestal, relacionando-se à fauna (exceto peixe) e aos recursos da flora, seja de florestas naturais ou plantadas (CARVALHO; SOARES; VALVERDE, 2005). O setor destaca-se por sua importância econômica, sendo objeto de investimentos e transações comerciais de elevado valor (JUVENAL; MATTOS, 2002).

A produção florestal é a transformação da matéria-prima das florestas, em produtos, madeireiros ou não-madeireiros, dividindo-se em três categorias: a produção de florestas plantadas, florestas nativas e atividades de apoio. Esta divisão engloba o cultivo de espécies florestais, produção de madeira em toras e de produtos florestais não-madeireiros, de mudas florestais, os produtos da madeira resultantes de pequeno processamento (lenha, carvão vegetal, lascas de madeira e outros) e a madeira não processada (moirões, estacas e postes) (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2020).

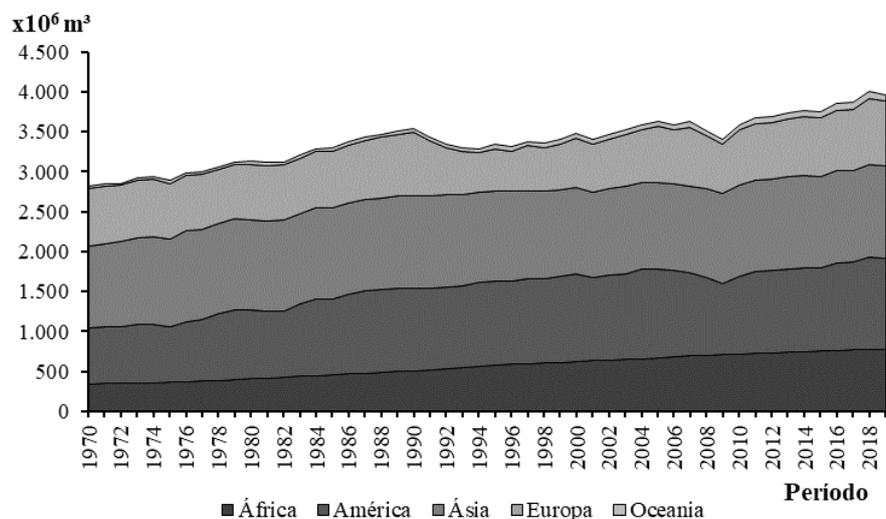
#### 3.4.1. SETOR FLORESTAL MUNDIAL

As florestas são um dos recursos renováveis com maior disponibilidade no mundo. Em 2016, a cobertura florestal mundial foi 39,99 milhões de km<sup>2</sup>, que representava 26,72% da extensão territorial. Entre os países com maior área florestal estiveram a Rússia com 8,15 milhões de km<sup>2</sup>, seguida do Brasil (4,93 milhões de km<sup>2</sup>), Canadá (3,47 milhões de km<sup>2</sup>) e Estados Unidos (3,10 milhões de km<sup>2</sup>) (WORLD BANK, 2019).

A Figura 1 apresenta a produção madeireira continental no mundo ( $\times 10^6$  m<sup>3</sup>), de 1970 a 2019. Em escala global, a produção de madeira, para diversos fins, apresentou média de 3.682,90  $\times 10^6$  m<sup>3</sup> e incremento médio anual de 0,69%, partindo de 2.818,82  $\times 10^6$  m<sup>3</sup> (1970) para 3.964,35  $\times 10^6$  m<sup>3</sup> (2019). Entre os continentes, a Ásia apresentou a maior produção média com 1.121,13  $\times 10^6$  m<sup>3</sup>, com aumento de 0,24% a.a. A região com maior crescimento na produção foi a Oceania, com aumento de 12,35% a.a., porém apresentou a menor média de produção com apenas 51,02  $\times 10^6$  m<sup>3</sup>.

A Tabela 6 apresenta a produção madeireira dos 10 maiores países com base em 2019 ( $\times 10^6$  m<sup>3</sup>), para 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2019. Entre os dez países com maior produção estiveram 3 países da Ásia (Índia, China e Indonésia), 3 da América (Estados Unidos, Brasil e Canadá), 3 da África (Etiópia, Congo e Nigéria) e 1 da Europa (Rússia, que apresenta parte de seu território nos continentes da Europa e da Ásia). Em 2019, os Estados Unidos foram o país com maior produção madeireira. A média americana foi 427,96  $\times 10^6$  m<sup>3</sup> e crescimento médio de 0,56% a.a., motivado pelo elevado consumo para geração de energia (GOERNDT; AGUILAR; SKOG, 2013).

**Figura 1.** Produção madeireira continental, no mundo ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ ), de 1970 a 2019.



Fonte: FAO, 2020.

**Tabela 6.** Produção madeireira dos 10 maiores países com base em 2019 ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ ), para 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2019.

	Países	1970	1980	1990	2000	2010	2019
1°	Estados Unidos	348,47	398,17	509,32	466,55	376,57	459,13
2°	Índia	200,12	251,56	311,29	318,55	358,07	352,86
3°	China	339,17	395,64	378,56	323,65	350,63	344,71
4°	Brasil	119,84	167,44	194,58	235,40	235,43	281,52
5°	Rússia	0,00	0,00	0,00	158,10	175,50	218,40
6°	Canadá	121,63	155,62	162,13	201,85	142,01	145,17
7°	Indonésia	212,48	196,68	164,41	137,83	113,85	116,32
8°	Etiópia	0,00	0,00	0,00	89,93	104,21	114,81
9°	Congo	25,80	34,46	47,24	68,47	81,13	90,24
10°	Nigéria	42,09	49,51	59,18	68,77	72,63	76,23
	Outros	1.411,64	1.481,74	1.717,57	1.417,35	1.577,76	1.764,97
	Mundo	2.818,82	3.129,01	3.542,58	3.484,86	3.586,24	3.964,35

Fonte: FAO, 2020.

Em 2019, a produção dos Estados Unidos foram 459,13 milhões de m<sup>3</sup>, sendo destinado 15,56% para uso como combustível e 84,44% para uso industrial (48,28% da madeira em tora, 48,21% para indústria de celulose e 0,35% para outros usos industriais). Os países com maior crescimento médio produtivo foram o Congo (2,58% a.a.) e Brasil (1,75% a.a.), com produção média de 57,67 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> e 203,54 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, respectivamente. Em 2019, a produção madeireira, do Brasil, alcançou 281,52 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, destinada principalmente para o uso energético (43,85%), seguida da madeira para celulose (32,92%), madeira em tora (20,04%) e outros usos industriais (3,19%).

A Tabela 7 apresenta a produção de madeira para uso combustível (x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) dos 10 maiores países, com base em 2018, para 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2019. A produção mundial apresentou aumento para esta finalidade, com média de 1.781,40 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, o acréscimo foi de 0,47% a.a. A Índia, China e Brasil foram os países com maior produção de madeira para energia, denotando a importância do setor florestal para matriz energética de países em desenvolvimento (BRITO, 2007).

A produção média na Índia foi 269,72 milhões de m<sup>3</sup>, que representou 88,78% de toda madeira produzida pelo país, entre 1970 e 2019. O único país desenvolvido entre os maiores produtores foram os Estados Unidos, com produção média de 57,91 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, que correspondeu a 13,33% da produção total. Os demais países do ranking apresentam economia subdesenvolvida. Gana foi o país com maior crescimento médio (3,77% a.a.), com média 22,99 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

**Tabela 7.** Produção de madeira para uso combustível (x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) dos 10 maiores países, com base em 2019, para os anos de 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2019.

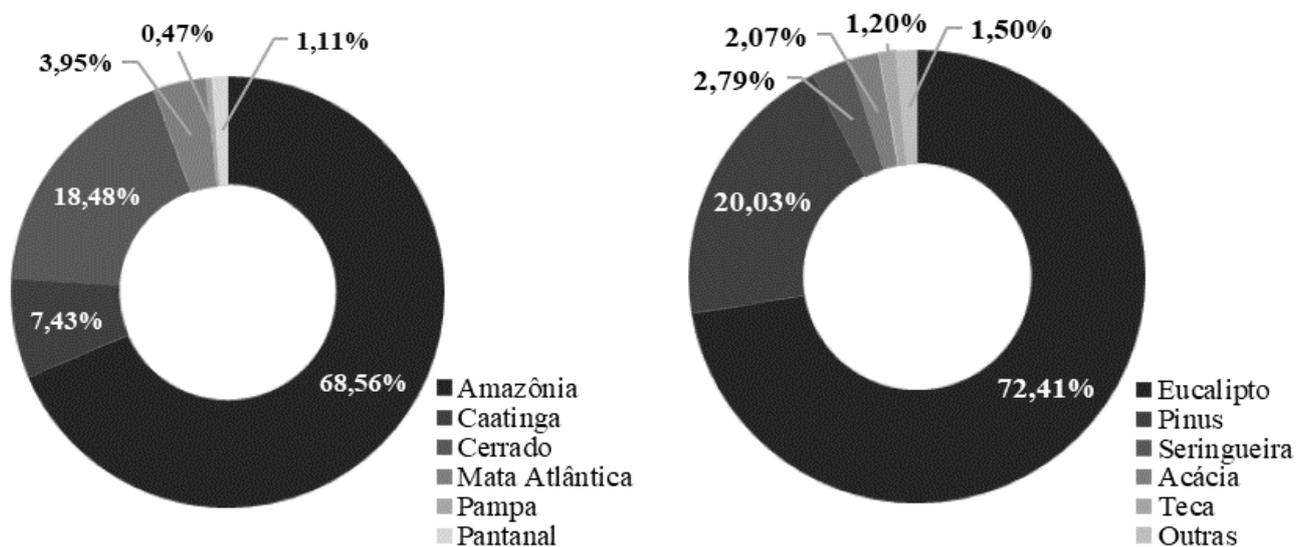
	Países	1970	1980	1990	2000	2010	2019
1°	Índia	187,42	231,88	276,24	277,38	309,31	303,34
2°	China	297,02	316,44	287,34	2 27,63	188,82	163,01
3°	Brasil	95,90	105,72	120,30	132,41	107,03	123,44
4°	Etiópia	0,00	0,00	0,00	87,47	101,27	111,88
5°	Congo	23,86	32,24	44,18	64,90	76,60	85,62
6°	Estados Unidos	35,82	71,08	82,12	45,93	40,44	71,43
7°	Nigéria	38,93	42,15	50,92	59,35	63,21	66,21
8°	Gana	7,75	9,65	12,87	26,73	37,79	47,64
9°	Uganda	18,68	25,77	29,27	34,09	39,64	43,73
10°	Indonésia	199,81	165,76	126,04	88,98	59,74	42,28
	Outros	637,19	681,62	803,81	750,36	839,24	885,88
	Mundo	1.542,39	1.682,30	1.833,08	1.795,22	1.863,10	1.944,45

Fonte: FAO, 2020.

### 3.4.2. SETOR FLORESTAL NO BRASIL

O setor florestal brasileiro apresenta elevado potencial produtivo, devido às condições físicas e naturais convenientes ao desenvolvimento das florestas, como a elevada extensão territorial, disponibilidade de mão de obra, clima e solo propícios e tecnologia (SOUSA et al., 2010). Em 2018, 495,85 milhões de hectare (ha), do território brasileiro apresentava-se coberto por florestas, embora nem todas fossem passíveis de exploração (IBÁ, 2019). Das florestas nacionais, 98,42% são nativas e 1,58% da silvicultura, os biomas e espécies que participam desta composição, no território brasileiro, em 2018, são apresentados na Figura 2.

**Figura 2.** Participação dos biomas (a) e das espécies plantadas (b) no território brasileiro, em 2018.

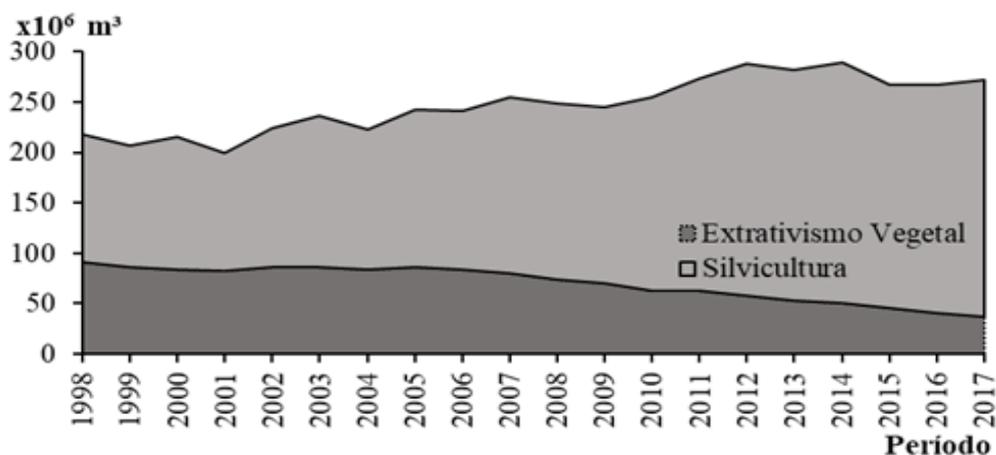


Fonte: IBÁ, 2019.

Das florestas naturais, o maior destaque é para região amazônica com 3.346.120 km<sup>2</sup> de cobertura vegetal, em seguida estiveram o cerrado (902.078 km<sup>2</sup>) e caatinga (362.688 km<sup>2</sup>), sendo apenas pequenas reservas disponíveis para utilização através de planos de manejo florestal sustentável (PMFS). Para as florestas plantadas destacou-se a produção do eucalipto (*Eucalyptus*) com área de cobertura de 56.724 km<sup>2</sup>, correspondente a área do estado da Paraíba. Os estados com maior número de plantios foram Minas Gerais (24,06%), São Paulo (16,51%) e Mato Grosso do Sul (15,90%). Em seguida ao eucalipto estiveram as florestas de pinus (15.693 km<sup>2</sup>), seringueira (2.183 km<sup>2</sup>) e acácia (1.619 km<sup>2</sup>) (IBÁ, 2019).

A Figura 3 apresenta a evolução da produção anual de madeira, por tipo de floresta (extrativismo vegetal e silvicultura), no Brasil, de 1998 a 2017. A produção madeireira nacional aumentou de 217,95 milhões de m<sup>3</sup>, em 1998, para 271,86 milhões de m<sup>3</sup>, em 2017, com média de 247,75 milhões de m<sup>3</sup> e crescimento médio de 1,17% a.a. Quanto a exploração dos recursos da madeira no Brasil, em 2017, 13,67% da madeira utilizada no país foi do extrativismo vegetal (florestas nativas) e 86,33% da silvicultura (florestas plantadas) (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS – SNIF, 2019).

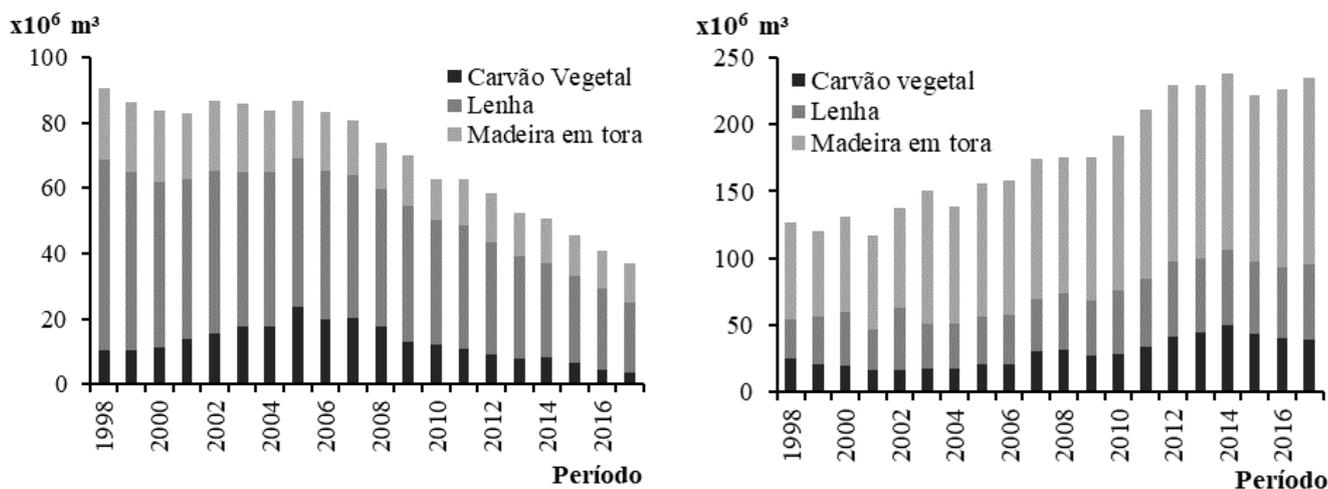
**Figura 3.** Evolução da produção anual de madeira, por tipo de floresta (extrativismo vegetal e silvicultura), em milhões de metros cúbicos (x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>), no Brasil, de 1998 a 2017.



A maior produção foi registrada em 2012, 287,94 milhões de m<sup>3</sup>, sendo considerado um cenário atípico por Zerbini (2014). O extrativismo vegetal decresceu para o mesmo período com uma taxa média de -4,59% a.a., a média de produção foi 140,47 milhões de m<sup>3</sup> e a queda mais intensa ocorreu entre 2006 e 2017 (-7,06% a.a.). A produção de madeira da silvicultura apresentou aumento significativo para o período (3,28% a.a.), crescendo de 127,18 milhões de m<sup>3</sup>, em 1998, para 234,69 milhões de m<sup>3</sup>, em 2017. Cerca de 35% da área de florestas plantadas são destinadas às indústrias de papel e celulose, 30% para produtores independentes, 13% para empresas de siderurgia e 22% para outras atividades (IBÁ, 2019).

O produto madeireiro mais comum no país Brasil foi a lenha através do extrativismo vegetal e a madeira em tora para a silvicultura (Figura 4). No extrativismo vegetal a produção média foi de 58,33% da madeira para lenha, 24,16% para a madeira em tora e 17,51% carvão vegetal. A partir da silvicultura, o recurso com maior média de produção foi a madeira em tora com 59,01%, seguida da lenha com 25,01% e do carvão vegetal com 15,97%.

**Figura 4.** Evolução da produção anual de madeira por tipo de produto no Brasil ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ ), a) extrativismo vegetal e b) silvicultura, de 1998 a 2017.



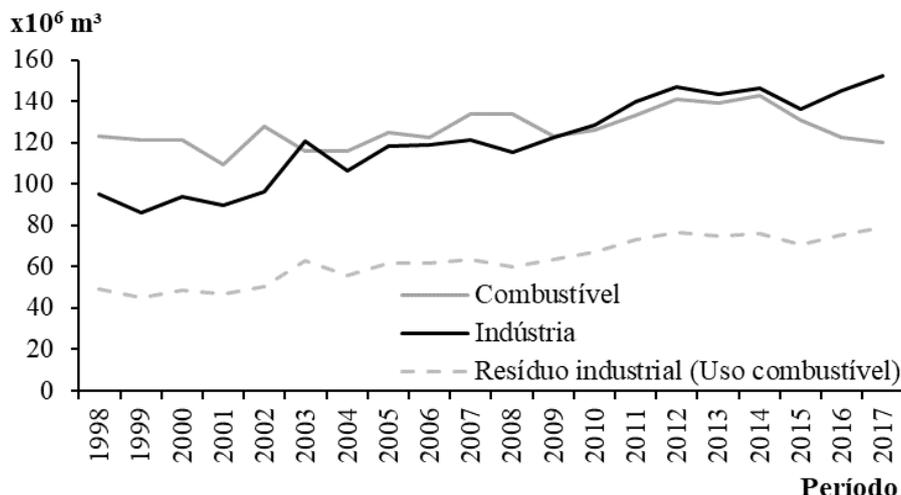
Fonte: SNIF, 2020.

A finalidade da madeira e o potencial de resíduos energéticos é apresentada na Figura 5. Conforme a EPE (2018) até 50% da madeira utilizada no setor industrial pode ser reaproveitada como recurso energético, todavia este potencial ainda é pouco utilizado. A destinação da madeira para uso combustível apresentou decréscimo médio (-0,1% a.a.), enquanto o uso para fins industriais aumentou a uma média de 2,52% a.a. Em 1998, 123,20 milhões de  $\text{m}^3$  (56,53%) da madeira produzida foi direcionada ao uso combustível e 94,74 milhões de  $\text{m}^3$  (43,47%) ao segmento industrial, o que rendeu de 49,26 milhões de  $\text{m}^3$  de resíduos com potencial de reuso. A partir de 2010, o uso industrial superou a destinação da madeira para combustível e este aumento propiciou um crescimento na produção de madeira da silvicultura. Em 2017, 55,93% da madeira foi destinada às indústrias, o que rendeu 79,07 milhões de  $\text{m}^3$  de madeira residual energética.

### 3.5. BIOMASSA FLORESTAL PARA ELETRICIDADE

A biomassa florestal para geração de energia pode impactar sob diferentes níveis geográficos. Ao nível local, pode substituir o consumo de combustíveis fósseis, no aquecimento e no fornecimento de eletricidade. Em escala nacional ou global, diminui consideravelmente a dependência dos combustíveis fósseis, diversificando a matriz energética e elétrica (WOLF, 2007). A eletricidade pode ser obtida a partir de diversos produtos da madeira. A ANEEL (2020) classifica a biomassa florestal (fonte nível 1) para eletricidade em seis subníveis (fonte nível 2), conforme o Quadro 1.

**Figura 5.** Evolução da produção madeireira por finalidade de uso no Brasil ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ ), de 1998 a 2017.



Fonte: SNIF, 2017.

**Quadro 1.** Classificação da biomassa florestal (fonte nível 2).

Biomassa Florestal	Lenha
	Carvão Vegetal
	Biogás Floresta
	Gás de Alto Forno (Biomassa)
	Licor Negro
	Resíduos florestais

Fonte: ANEEL, 2020.

A lenha foi uma das primeiras fontes de energia utilizadas pela humanidade, com objetivo principal de gerar calor e mostrou-se muito participativa na matriz energética mundial, usada principalmente em processos industriais. Nas últimas décadas, o uso da lenha variou de acordo com desenvolvimento econômico de cada país, das questões ambientais, disponibilidade de florestas e competição com outras fontes de energia, sendo cada vez mais utilizada para a eletricidade (BONASSA et al., 2018).

Miranda, Bailis e Vilela (2013) destacaram a cogeração de eletricidade do carvão vegetal, como uma tecnologia promissora para aplicação mundial. O uso do carvão para gerar potência elétrica pode proporcionar vantagens comparativas a outras fontes de energia, como oportunidades empreendedoras, diversificação de meios de subsistência, aumento da renda nas áreas rurais, redução de emissões de gases de efeito estufa e diversificação da matriz elétrica. Além da eletricidade a partir da combustão do carvão vegetal (comum no setor siderúrgico), o processo controlado de pirólise também pode realizar cogeração, com potencial de 500 a 600 kWh de energia por tonelada de carvão produzido, entretanto, há uma necessidade de alto investimento tecnológico (MIRANDA; BAILIS; VILELA, 2013; SAMPAIO, 2008).

O biogás florestal apresenta pouco uso na oferta da bioeletricidade, principalmente no Brasil, onde há apenas uma usina termelétrica instalada. Este, é um recurso importante na cadeia energética da biomassa por sua alta eficiência energética e pelas diversas formas de obtenção (MURPHY; POWER, 2009). As grandes porções de lignocelulose presente na biomassa florestal o tornam um recurso potencial. Todavia, as dificuldades tecnológicas associadas a estrutura recalcitrante das lignocelulose, à cristalinidade da celulose e à presença de lignina, são limitações para a hidrólise, primeira etapa da degradação anaeróbia, demonstrando necessidade de avanço técnico para seu uso em escala industrial (KABIR et al., 2015).

O gás de alto forno de biomassa é obtido da gaseificação do carvão vegetal nos fornos das indústrias siderúrgicas e pode ser utilizado como combustível para geração de calor e eletricidade (EPE, 2009). Em geral, as termelétricas de gás de alto forno funcionam com um queimador seco de biomassa, em paralelo, para viabilização do uso. No Brasil, o gás de alto-forno movido a biomassa é usado principalmente no Estado de Minas Gerais (PEDROSO et al., 2018).

O licor negro (também chamado lixívia) é um subproduto do segmento industrial de papel e celulose, um líquido denso e de cor preta, composto na base seca, por 60% de matéria orgânica (RAMESH et al., 2013). Trata-se de um resíduo com elevada alcalinidade, que pode ocasionar impactos ambientais, assim seu uso torna-se econômico e ambientalmente viável, podendo ser utilizado como combustível em caldeiras de combustão para geração de energia elétrica (NAQVI; YAN; DAHLQUIST, 2010). Darmawan et al. (2017) destacou que uma fábrica de celulose produz de 1,7 a 1,8 toneladas de base seca do licor negro por tonelada de celulose, o que representaria uma energia potencial de 250 a 500 MW para uma produção de 1000 a 2000 toneladas de celulose seca ao ar (Adt) por dia.

Os resíduos florestais são compostos de partes de árvores (copas e galhos), madeira de pequeno diâmetro, tocos, madeira morta e espécies rasteiras de baixo valor econômico. Os resíduos podem representar até 50% da biomassa total da floresta, todavia ainda são subutilizados (ROSILLO—CALLE; WOODS, 2012). A preparação dos resíduos de madeira envolve remoção de sujeiras, desidratação, peneiramento, redução de tamanho, armazenamento a granel, mistura e secagem antes da combustão, de modo a garantir um fornecimento confiável e consistente de combustível de qualidade aos queimadores (DEMIRBAS, 2009).

Os principais limitantes do uso de resíduos florestais para o fornecimento de eletricidade estão no manuseio, tratamento, armazenamento, conteúdo energético e principalmente os custos de transporte. A geração a partir dos resíduos de madeira torna-se mais atraente à medida que os preços dos combustíveis tradicionais aumentam ou para aplicações próximas à obtenção do recurso (DEMIRBAS, 2009).

Incluso na categoria de resíduos florestais da ANEEL, também encontram-se os resíduos florestais industriais. Dentre os produtos residuais das indústrias estão: cavaco, serragem, licor negro, aparas de papel, cinzas de caldeira e compostos químicos; os quais podem ser destinados para geração de energia (cavaco, serragem e licor negro) a partir da queima em caldeiras, reutilizados como matéria-prima (aparas de papel e cinza de caldeira) ou encaminhados para aterros legais (compostos químicos).

Além da classificação da ANNEL, outro tipo de biomassa para eletricidade são os briquetes, amplamente utilizados nos segmentos industriais, trata-se de um material renovável com finalidade apenas energética. Os briquetes contam com alta densidade de energia em seu conteúdo, elevada resistência a compressão, durabilidade e baixo custo de produção (DINESHA; KUMAR; ROSEN, 2019). Briquetes, de alta qualidade, podem ser produzidos a partir da casca de arroz, espigas de milho, refugo de azeitona, papel usado, palha de trigo, pedúnculo de algodão, bagaço, carvão, resíduos florestais, lenhito e casca de palmeira (OLUGBADE; OJO; MOHAMMED, 2019).

Dinesha, Kumar e Rosen (2019) destacam que os principais insumos utilizados na fabricação dos briquetes são de duas categorias: resíduos de colheitas agrícolas e resíduos madeireiros. O material residual de colheitas agrícolas engloba cascas de grãos, palha de arroz, trigo, coco e outros; enquanto os da madeira estão as lascas de madeira, resíduos de papel, serragem, etc.

A biomassa densificada também pode ser utilizada na forma de *pellets*, que são pequenos blocos de madeira em formato cilíndrico (2 a 3 cm de comprimento). A produção dos *pellets* utiliza serragem de madeira, gramíneas e desperdício de colheitas energéticas, submetidos a elevadas pressões e temperaturas, a fim de que a lignina se torne um composto aglutinante (BONASSA et al., 2018). Segundo Guo, Song e Buhain (2015) o processo de pelletização pode elevar o potencial energético da biomassa natural de 9 para 18 MJ m<sup>3</sup>, com redução de volume de até dez vezes.

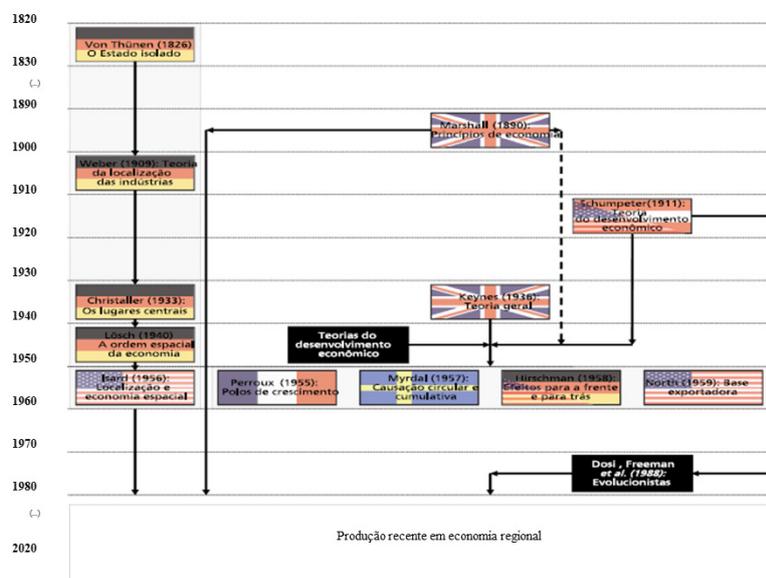
### 3.6. ECONOMIA REGIONAL E ESPACIAL

A Economia Regional está associada à identificação de elementos relevantes para a compreensão dos processos produtivos de uma região. Segundo Souza (1981) os estudos regionais foram negligenciados das análises econômicas tradicionais (teoria clássica e neoclássica), tendo em vista que as análises consideravam um mundo estático e sem dimensões, apenas com variação temporal.

As análises regionais foram iniciadas no século XIX, tendo sido classificadas em dois grupos teóricos. O primeiro deles abordou um conjunto de conceitos clássicos da localização, a partir da introdução da teoria da localização agrícola apresentada por Thünen (1826) e que se estendeu até aos ensaios de Isard (1956), em sua obra sobre o espaço e a localização na economia. O segundo grupo reuniu um conjunto de princípios de desenvolvimento regional, norteados pelos fatores de aglomeração, reconhecidos nos estudos de Hirschman (1958), Myrdal (1957), North (1959) e Perroux (1955) (MONASTÉRIO; CAVALCANTE, 2011).

Os estudos clássicos, também chamados de teorias neoclássicas da localização, procuram abordar os aspectos regionais através da determinação de localizações ótimas, considerando os custos de transporte e desprezando as externalidades decorrentes da aglomeração de atividades regionais. Por sua vez, as análises que envolvem os fatores de aglomeração tratam das externalidades resultantes da relação entre firmas localizadas próximas umas das outras. Marshall (1920) destacou que em regiões conglomeradas há três características indispensáveis: a mão de obra qualificada, os fornecedores de bens e serviços, e o acesso à tecnologia (CAVALCANTE, 2008). Os principais autores e sua nacionalidade para a economia regional é apresentado na Figura 6.

**Figura 6.** Evolução das principais teorias em economia regional.



Fonte: Adaptado de Monastério e Cavalcante, 2011.

Na atualidade, diversos economistas detalharam as questões espaciais, para identificar as causas de padrões de localização ou para avaliação de seus efeitos (ZHENG; LIN, 2018). Souza (1981) destacou que as análises regionais e locacionais fornecem suporte para compreender estruturas de parques industriais locais e regionais; dos meios de comunicação entre dois ou mais centros urbanos; de empregos; de finanças municipais e regionais, e do aproveitamento de recursos naturais, podendo ser aplicado em outros diversos setores, como o energético.

A observação da localização de atividades e dos fatores econômicos são determinantes para o entendimento do desenvolvimento de regiões (HARIHARAN; BISWAS, 2019). De acordo com Thisse (2011), a economia espacial pode ser considerada um mecanismo que motiva a troca para diferentes economias de escala e custos de mobilidade, seja de bens, pessoas ou informação. Os primeiros estudos que associaram o espaço e a economia foram observados por Marshall (1920), na Inglaterra, a partir da teoria dos rendimentos crescentes de escala. Estes rendimentos foram entendidos como economia “externa”, que reflete as vantagens de uma aglomeração espacial no desenvolvimento industrial e econômico de uma região.

Os trabalhos precursores de Von Thünen (1826), Weber (1929), Christaller (1933) e Lösch (1940) atribuíram aos aspectos geográficos o controle das forças de equilíbrio de mercado, destacando as despesas de transporte para mercados físicos. Von Thünen a partir do trabalho “O Estado Isolado” apontou que áreas produtivas próximas à demanda apresentam baixos custos de transporte e valores mais elevados de custo da terra, sendo o oposto verdadeiro. Assim, a teoria da localização teve foco em identificar uma zona ótima para otimização de produção e custos (RÍOS, 2010; THISSE, 2011). Alonso (1964) adaptou o conceito criado por Thünen para o contexto urbano, sendo a demanda associada a um centro de emprego. A distância ao centro da cidade tornou-se a principal característica espacial para escolha do local de produção (moradias, fábricas e serviços), a partir deste ponto o objetivo tornou-se explicar a estrutura interna de cidades.

A partir da década de 1950, a pesquisa econômica regional tomou mais força e passou a destacar a importância dos fatores locais sobre as vantagens comparativas de determinados processos, conforme idealizado por Marshall, em 1920. Outros cientistas que contribuíram para os estudos do espaço associado a economia foram: Porter (1990), Scott (2005) e Krugman (1991), precursor da nova geografia econômica. Conforme Allen Scott, empresas ou atividades econômicas agrupadas espacialmente geram economia de custos a partir de múltiplas vantagens de um mercado concentrado de forma espacial (SCOTT, 2005).

Para Almeida (2012), de forma geral, os estudos econômicos convencionais falhavam ao explicar eventos associados ao espaço. Para tal, o autor ressalta a importância das medidas que trabalham com os efeitos da autocorrelação e heterogeneidade espacial, como a análise exploratória de dados espaciais (AEDE), que engloba a compreensão da relação entre economias e o espaço, seja ele, nacional, regional ou estadual.

### **3.6.1. QUOCIENTE LOCACIONAL**

A Economia Regional utiliza das medidas de localização, entre elas o quociente locacional, para identificar os padrões de concentração ou dispersão espacial de atividades em um determinado período. As medidas de localização e especialização são métodos de análise regional utilizados na formulação de políticas de descentralização industrial e para o conhecimento dos padrões regionais do crescimento econômico (HADDAD, 1989). As medidas voltam-se a verificar o grau de especialização de regiões com relação a algum critério de referência (MONASTÉRIO, 2011).

Dentre as medidas de localização, o quociente de locacional (*QL*) é uma das estatísticas descritivas mais utilizadas na análise regional (CROMLEY; HANINK, 2012). De acordo Fotheringham (1997) o uso deste índice, na literatura, cresceu com o desenvolvimento dos sistemas de informação geográfica (SIG), sendo aplicado na análise de localização de atividades econômicas.

De forma geral, o índice *QL* apresenta limitação na identificação de causa e efeito das associações, apontando apenas o comportamento e não identificando as forças econômicas que resultam no agrupamento. Todavia, trata-se de uma ferramenta importante para compreender o funcionamento de setores (LODDER, 1974).

### **3.6.2. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS ESPACIAIS (AEDE)**

Como já apresentado, os estudos econômicos, mais especificamente a econometria convencional, não apresenta suporte para elucidar problemas espaciais. Para superação dessa impossibilidade a econometria espacial engloba os efeitos da autocorrelação espacial e da heterogeneidade espacial na análise de dados (ANSELIN, 1996).

O efeito da autocorrelação espacial é resultante da interação de uma variável observada entre regiões vizinhas, ou seja, ocorre como consequência de uma relação funcional entre o que ocorre na região, ou espaço *i*, e o que ocorre em outro local do espaço; tornando o comportamento da variável observada dependente não só de fatores internos a região estudada, mas também pelos fatores espaciais externos (ANSELIN, 1988; SILVA et al., 2011).

O conceito de autocorrelação espacial reflete a Lei de Tobler, conhecida como a Primeira Lei da Geografia, onde se encontra uma simples e completa definição sobre as relações espaciais, em que se entende que tudo depende de todas as coisas ao seu redor, mas as coisas próximas estão mais relacionadas do que as coisas distantes (TOBLER, 1970). Por sua vez, o efeito da heterogeneidade espacial está associado a Segunda Lei da Geografia e é resultante do uso de dados de unidades espaciais distintas para tentar explicar um fenômeno, o que resulta em instabilidade estrutural (GOODCHILD, 2004; SILVA et al., 2011).

Dessa forma, a análise exploratória de dados espaciais trata-se de um conjunto de técnicas utilizadas para descrição das distribuições espaciais de um fenômeno, voltadas a compreender a associação ou dependência espacial de uma atividade ou característica regional e/ou sua heterogeneidade espacial. Silva et al. (2011) indica que o maior uso das técnicas espaciais na literatura iniciou-se a partir dos trabalhos de Anselin (1992), com a disponibilidade de softwares para análises dos dados espaciais.

A utilização do método é fundada na capacidade de identificar localidades atípicas (*outliers*) e pontos de alavancagem, evidenciar padrões de associação espacial (*clusters*) e indicar instabilidades no espaço. A AEDE apresenta utilização em dados espaciais poligonais ou na forma de pontos, podendo ser estudada, também, sob perspectiva geoestatística (ALMEIDA, 2012).

### **3.7. ECONOMIA INDUSTRIAL**

Segundo Kon (2017) os estudos dedicados a Teoria da Economia Industrial apresentaram desenvolvimento na década de 1950. Todavia as análises precursoras estiveram associadas aos tópicos de microeconomia, sendo denominada de Economia da Indústria, Organização Industrial, Economia de Negócios, Indústria e Comércio e outros. A economia industrial apresenta uma relação aos conceitos da teoria microeconômica neoclássica e avalia como firmas e mercados estão organizados e as relações existentes entre eles. Para sua aplicação podem ser utilizadas informações de número de participantes, existência de barreiras à entrada de firmas, concentração de mercado e integração vertical (PALAURO, 2015).

Segundo Bain (1959), as estruturas de mercado são parte indispensável da organização industrial, tendo em vista que abarcam o desenvolvimento econômico setorial e definem condições de entrada de concorrentes. A análise econômica considerando as barreiras a novas entradas foi idealizada a partir dos estudos de Hall e Hitch (1939), onde considerou-se a Teoria do Custo Total. A entrada de participantes caracteriza-se pelo estabelecimento de novas firmas produtoras, excetuando a expansão da produção de empresas anteriormente participantes do mercado desta definição. Consequentemente, o conceito de barreira à entrada torna-se os obstáculos impostos às novas empresas ingressantes em determinados mercados. As principais barreiras são devidas à economia de escala, diferenciação de produtos, vantagens absolutas em custos, integração vertical de firmas existentes e restrições governamentais (BAIN, 1959).

As barreiras por economias de escala caracterizam a queda dos custos de produção de um bem com o aumento da planta industrial, implicando em dificuldades a implementação de firmas com plantas inferiores a escala eficiente mínima. Quanto a diferenciação de produtos, a barreira existe com relação à preferência de compradores por produtos específicos com relação aos demais ou a qualquer outro novo, implicando na obrigatoriedade de preços inferiores às novas empresas ou em gastos excessivos com publicidade (PALAURO, 2015).

Para as vantagens absolutas de custos, as barreiras associam-se aos custos médios enfrentados por novas empresas, quando observado um maior custo para os insumos e menor nível tecnológico nos entrantes. A integração vertical das empresas já instaladas, ou seja, o domínio de um ou mais processos posteriores relativos ao produto final, também dificultam a integração de novas empresas, assim, uma firma não integrada pode estabelecer contratos de longo prazo com as empresas com as quais realiza negócios. A decisão da firma em se integrar verticalmente e estabelecer contratos com restrições verticais é uma decisão estratégica, uma vez que isso afeta os preços e comportamentos da própria firma e de outras a ela relacionada. Um último fator são as restrições governamentais à entrada de novas firmas, que ocorre quando o Estado garante direitos exclusivos ou isenções fiscais superiores às empresas já instaladas (PERLOFF; CARLTON, 2005).

A partir de Labini (1980) e Possas (1999) notou-se a insuficiência da teoria neoclássica e então adotou-se o conhecimento das estruturas de mercado para maior dinamicidade do modelo da Teoria do Oligopólio. O conceito das estruturas de mercado é apresentado por Possas (1999), a partir de três perspectivas. A primeira engloba as características do mercado: o número de concorrentes e a existência de monopólio, oligopólio ou concorrência. A segunda análise leva em consideração à concentração e as barreiras de entradas a novos participantes, sendo incluso também, os custos e integração vertical entre as empresas. A última abordagem diz respeito à evolução da estrutura de mercado, com base no tipo de concorrência, no grau de concentração e o desenvolvimento tecnológico setorial.

Da necessidade de conhecer as estruturas de mercado, a análise da concentração pode ser observada como uma ferramenta importante, sendo capaz de relacionar número e participação de empresas.

### **3.7.1. CONCENTRAÇÃO INDUSTRIAL**

A concentração industrial é uma das principais características da competição industrial; sugerindo que uma indústria concentrada, ou seja, controlada por um pequeno número de firmas, prejudica a competição. De acordo com Kon (2017) a concentração pode ser observada de maneira estática ou em seus aspectos dinâmicos, com base no seu crescimento ou decréscimo no tempo. A análise temporal da concentração pode inferir o impacto do número de participantes na estrutura de mercado, a desigualdade no tamanho de firmas, a capacidade de inovação e a intensidade das barreiras de entrada.

As medidas de concentração são ferramentas importantes para determinação de estruturas de mercado, sendo capazes de avaliar o domínio de uma empresa ou o conjunto delas sobre as atividades econômicas de uma região. A partir deste ponto, as medidas são indispensáveis para avaliar as participações dos agentes, com base em parcelas de participação (*market share*) (RESENDE, 1994; LIU; MIRZAEI; VANDOROS, 2014).

A análise da concentração leva em consideração a quantidade e o potencial produtivo das empresas, e pode fornecer resultados para observação de políticas públicas (*antitrust*), avaliação de fusões e avaliação do poder de mercado dos participantes (GEORGE; JOLL, 1983; VARUM et al., 2016). O poder de mercado, está associado a representatividade de uma empresa (ou um grupo econômico) sobre o setor, ou seja, a capacidade de aumentar o preço de um bem mantendo-se sob um nível competitivo (LANDES; POSNER, 1981). Dentre os índices mais usuais estão: a curva de concentração, razão de concentração, índice de Herfindahl-Hirschman e o índice de Hoover, todos com uso recorrente na literatura (VARUM et al., 2016).

### 3.7.2. POLARIZAÇÃO E DESIGUALDADE

A análise da polarização é uma ferramenta capaz de auxiliar aos tradicionais índices de desigualdade, como o Gini e Theil. Segundo Jenkins (1995) e Burtless (1997), estes indicadores não possibilitam a visualização de agrupamentos dentro de grupos específicos, seja no centro ou extremos da distribuição. Embora a polarização e desigualdade estejam associados à concentração, esta não pode ser compreendida como uma medida idêntica (HOFFMAN, 2008).

De acordo com Fantinel (2017), as medidas de polarização apresentam especificações que dependem da quantidade de grupos participantes. A primeira delas diz respeito ao fato que, quanto maior o número de grupos menor será a polarização. A segunda especificação mostra que quanto maior for a dispersão dentro de um mesmo grupo, menor será a polarização total e a última de que quanto maior a distância entre os grupos, maior será a polarização.

Os estudos de polarização de renda são regidos a partir de duas abordagens principais. A primeira de Wolfson (1994) que descreve a polarização com ocorrência entre apenas dois grupos (bipolarização), a segunda de Esteban e Ray (1994) estabelece que a polarização pode ocorrer entre diversos grupos, a qual pode ser mensurada para diversas variáveis, além da renda (BRZEZINSKI, 2017).

O índice de bipolarização foi iniciado nos estudos de Wolfson (1994) e tem como princípio básico a divisão da população em apenas dois grupos, sendo um maior distanciamento entre estes, resultado de uma elevada polarização. Para a construção do índice de polarização, Foster e Wolfson (2010) optaram por uma medida baseada em uma curva de polarização que atua de forma semelhante ao coeficiente de Gini e a curva de Lorenz (FANTINEL, 2017).

Dois movimentos podem conduzir ao aumento da polarização. O primeiro deles é resultante do afastamento de grupos do centro da distribuição (aumento na dispersão), o que é resultado do aumento da variável de estudo para categoria com mais recurso ou diminuição desta para categoria com menos recurso. O segundo é decorrente do aumento da bipolaridade, ou seja, o centro de massa não muda (FANTINEL, 2017).

Por sua vez, o conceito de polarização em grupos foi estabelecido nos trabalhos de Esteban e Ray (1994). Trata-se de uma noção mais geral de polarização, em que busca-se entender a separação ou aproximação entre grupos, considerando o grau de identidade entre participantes de um mesmo grupo e o grau de alienação em relação a outros (HOFFMAN; NEY, 2008). A medida foi discutida também nos estudos de Duclos, Esteban e Ray (2004) e Esteban, Gradín e Ray (2007).

De acordo com Esteban, Gradín e Ray (2007), a análise da polarização de múltiplos grupos é apropriada para grupos com formação pré-definida, seguindo características qualitativas, e não sendo estabelecido critério de separação quantitativo. Ainda segundo os autores, é indispensável que para o cálculo da polarização, a população de estudo esteja previamente definida em agrupamentos, com o objetivo de que se mensure a estrutura de identificação dos grupos.

A alienação entre os grupos, está associada a distância entre os participantes. Para o exemplo de renda, torna-se mais alienado, grupos com grandes distâncias de rendimentos. Por sua vez, a identificação apresenta sentido inverso, sendo manifestada em grupos bem definidos (HOFFMANN; NEY, 2009).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. OBJETO DE ESTUDO

As termelétricas de biomassa florestal estão disponíveis no Sistema de Informações da ANEEL (SIGA), no período de 2000 a 2019. As usinas estão classificadas em nível 1 (biomassa florestal) e nível 2 (lenha, carvão vegetal, gás de alto forno, licor negro e resíduos florestais). As informações das outorgas dessas térmicas foram obtidas da biblioteca digital (Sophia) da ANEEL.

Realizou-se uma análise de conjuntura da quantidade e da potência outorgada (MW) das termelétricas da bioeletricidade florestal (nível 1 e 2) para 2000, 2010 e 2019. Utilizou-se a Taxa de crescimento geométrica (TGC), Equação 1, para observar as alterações (aumento e diminuição) na oferta entre 2000 e 2019 (CUENCA; DOMPIERI, 2016).

$$TGC [\%] = \left[ \sqrt{\frac{V_F}{V_0}} - 1 \right] \times 100$$

Em que,  $V_F$  = quantidade ou potência outorgada (MW) da biomassa florestal no ano final;  $V_0$  = a quantidade ou potência do ano inicial;  $\Delta t$  é a variação temporal (expressa em anos).

Foram estabelecidos níveis (em quartis) da oferta para os estados brasileiros. As categorias foram de potência baixa (Quartil um — Q1), média (Quartil dois — Q2), alta (Quartil três — Q3) e muito alta (Quartil quatro — Q4). Os quartis foram categorizados pela primeira quarta parte da potência outorgada (MW), o Q1 ( $0 < Q1 \leq 25\%$ ), segunda quarta parte, o Q2 ( $25\% < Q2 \leq 50\%$ ), terceira quarta parte, o Q3 ( $50\% < Q3 \leq 75\%$ ) e quarta parte final, o Q4 ( $75\% < Q4 \leq 100\%$ ) (DAWSON, 2011).

### 4.2. MEDIDAS LOCACIONAIS, DE CONCENTRAÇÃO E DE DESIGUALDADE

Crawley, Beynon e Munday (2013) destacaram que as análises locacionais são importantes para a identificação de complexos industriais e demais atividades econômicas no espaço. Assim, foi aplicado o Quociente Locacional (QL) para verificação da localização da oferta de bioeletricidade florestal no Brasil. Para a concentração industrial, foram utilizados diversos indicadores, abordando a

complexidade e as dimensões associadas ao mercado. As medidas de concentração são importantes na determinação de estruturas de mercado, sendo capazes de avaliar o domínio de uma empresa ou o conjunto delas sobre as atividades econômicas de uma região específica (CHARUMBIRA; SUNDE, 2010). Estas podem ser classificadas como parciais [CR(k)] e sumárias (HHI, H e G). Os índices parciais consideram uma parcela dos dados, enquanto os sumários utilizam todos os valores envolvidos no estudo (COELHO JUNIOR *et al.*, 2019). Para medida de desigualdade utilizou-se o coeficiente de Gini, usual na análise de renda entre populações.

### QUOCIENTE LOCACIONAL (QL)

O quociente locacional (QL) (Equação 2) relaciona a participação relativa do segmento produtivo na economia de uma dada região com a participação relativa desse mesmo segmento em uma região de referência; tendo em vista que o quociente está em função da potência outorgada da bioeletricidade florestal (nível 1 e 2), ele aponta a localização relativa da potência em determinadas regiões (PIACENTI; ALVES; LIMA, 2008). Piacenti, Alves e Lima (2008) classificaram o índice: oferta muito relevante ( $QL \geq 1,00$ ), de relevância média ( $0,50 \leq QL < 1,00$ ) ou de relevância fraca ( $QL < 0,50$ ) (PIACENTI; ALVES; LIMA, 2008).

$$QL = \frac{\frac{E_{ij}}{E_j}}{\frac{E_i}{E}}$$

Em que,  $E_{ij}$  = Potência outorgada da biomassa florestal nível 2, no estado j;  $E_j$  = Potência outorgada da biomassa florestal nível 1, no estado j;  $E_i$  = Potência outorgada da biomassa florestal nível 2, no Brasil e  $E$  = Potência outorgada da biomassa florestal nível 1, no Brasil.

### RAZÃO DE CONCENTRAÇÃO [CR(K)]

A Razão de Concentração [CR(k)], Equação 3, analisa a participação de mercado dos k (k = 1, 2, ..., n) estados ou termelétricas de base florestal no Brasil (BAIN, 1959).

$$CR(K) = \sum_{i=1}^k S_i$$

Em que, i = Estado ou termelétrica da biomassa florestal observada;  $S_i$  = participação i dos Estados (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal) ou a participação i das termelétricas (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal).

Calculou a concentração dos quatro maiores [CR(4)] e dos oito maiores [CR(8)] estados e termelétricas de base florestal, de 2000 a 2019, e classificou-se conforme a Tabela 8. Também, foi avaliado o principal [CR(1)] e os dois principais [CR(2)].

**Tabela 8.** Classificação da Razão Concentração dos quatro maiores [CR(4)] e dos oito maiores [CR(8)] participantes.

Nível de concentração	Quatro maiores	Oito Maiores
Muito Alto	CR(4) > 75%	CR(8) > 90%
Alto	65% ≤ CR(4) < 75%	85% ≤ CR(8) < 90%
Moderadamente Alto	50% ≤ CR(4) < 65%	70% ≤ CR(8) < 85%
Moderadamente Baixo	35% ≤ CR(4) < 50%	45% ≤ CR(8) < 70%
Baixo	CR(4) < 35%	CR(8) < 45%

Fonte: Bain, 1959.

### ÍNDICE DE HERFINDAHL-HIRSCHMAN (HHI)

O Índice Herfindahl-Hirschman (HHI), Equação 4, avaliou a concentração, com base na participação dos estados ou termelétricas ao quadrado, atribuindo-se peso maior para os estados com parcela mais representativa. Para  $HHI = 1/n$  (Limite Inferior – LI), há um mercado atomizado, enquanto  $HHI = 1$ , indica monopólio (HIRSCHMAN, 1964; SLEUWAEGEN; DEHANDSCHUTTER, 1986; TUSHAJ, 2010).

$$HHI = \sum_{i=1}^n S_i^2$$

Em que,  $n$  = número de participantes;  $i$  = Estado ou termelétrica da biomassa florestal observada;  $S_i$  = participação  $i$  dos Estados (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal) ou a participação  $i$  das termelétricas (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal). Resende (1994) propôs o HHI ajustado (HHI') para avaliações intertemporais (Equação 5) que varia de 0 a 1. Para valores de  $HHI' < 0,10$  mercado atomizado,  $0,10 \leq HHI' \leq 0,15$  mercado não concentrado,  $0,15 \leq HHI' \leq 0,25$  moderadamente concentrado e  $HHI' > 0,25$  concentrado.

$$HHI' = \frac{1}{n-1} (n \times HHI - 1); n > 1$$

### ÍNDICE DE HOOVER (H)

O índice de Hoover (H), Equação 6, também conhecido como índice Robin Hood em estudos de desigualdade de renda, é empregado para identificar e medir o processo de concentração econômica em um determinado espaço (ISARD, 1960; MULLIGAN, 1991).

$$H = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N |S_i - (1/n)| \right]}{2}$$

Em que,  $n$  = número de participantes;  $i$  = Estado ou termelétrica da biomassa florestal observada;  $S_i$  = participação  $i$  dos Estados (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal) ou a participação  $i$  das termelétricas (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal). O índice de concentração de Hoover varia entre 0 e 1. Para  $H = 0$ , há uma distribuição uniforme, ou seja, baixa concentração; enquanto,  $H = 1$ , indica distribuição concentração elevada (monopólio) (HUANG; LEUNG, 2009; WENG, 1998).

### COEFICIENTE DE GINI (G)

O Índice de Gini ( $G$ ), proposto por Gini (1912), na sua origem foi utilizado para análises de desigualdade social, com base na renda populacional. Atualmente, o  $G$  (Equação 7) aplica-se em diferentes áreas do conhecimento e pode ser utilizado para verificar a desigualdade da oferta de geração de eletricidade a partir da biomassa florestal.

$$G = 1 - \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (S_{ij} + S_i) \right]}{n}$$

Em que,  $n$  = número de participantes;  $i$  = Estado ou termelétrica da biomassa floresta observada;  $S_i$  = participação  $i$  dos Estados (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal) ou a participação  $i$  das termelétricas (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal);  $S_{ij}$  = participação cumulativa dos Estados (com base no quantitativo total de termelétricas de base florestal) ou a participação  $i$  das termelétricas (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal).

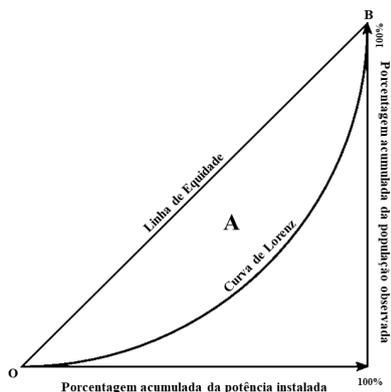
O  $G$  pode ser classificado como de desigualdade nula a fraca ( $0,00 \leq G \leq 0,25$ ), desigualdade fraca a média ( $0,25 < G \leq 0,50$ ), desigualdade média a forte ( $0,50 < G \leq 0,70$ ), desigualdade forte a muito forte ( $0,70 < G \leq 0,90$ ) e desigualdade muito forte a absoluta ( $0,90 < G \leq 1,00$ ) (GINI, 1912).

### 4.3. CURVA DE LORENZ E O COEFICIENTE DE GINI

A curva de Lorenz, Figura 7, idealizada por Max Otto Lorenz (1905), trata-se da forma gráfica utilizada para representação de uma distribuição de desigualdade. Apresenta em sua abcissa (eixo X) a participação acumulada das termelétricas ou estados brasileiros com oferta de bioeletricidade florestal, enquanto o eixo das ordenadas (eixo Y) representa a participação da potência outorgada (MEDEIROS, 2012).

O comportamento da curva de Lorenz varia de desigualdade completa (potência outorgada centrada em um único participante) até uma distribuição perfeita (potência outorgada igual para os participantes), neste ponto, a “curva” de Lorenz seria o segmento de reta OB na Figura 8, ou seja, linha da perfeita igualdade. A representação gráfica auxilia a determinação das medidas de polarização, com base no cálculo do índice de Gini e na discrepância da amostra.

**Figura 7.** Curva de Lorenz.



Fonte: Adaptado de Coulter (2019).

O Índice de Gini ( $G$ ), proposto por Gini (1912), na sua origem foi utilizado para análises de desigualdade social, com base na renda populacional e encontra-se relacionado a curva de Lorenz. De acordo com Medina (2001) o índice de Gini compara a distribuição da potência outorgada (termelétricas ou estados) com a linha de perfeita igualdade, sendo o quociente entre a área de desigualdade ( $A$ ) e a área formada pelos vértices OBC (0,5), Equação 8.

$$G = \frac{A}{0,5}$$

Além da mensuração pela curva de Lorenz, a desigualdade de Gini também pode ser calculada de forma algébrica, atingindo um maior rigor matemático. Neste trabalho foi utilizada a formulação, Equação 9, apresentada para o Stata SE/15.

$$G(Y) = -2 \text{Cov}\left(\frac{Y}{\mu(Y)}, (1 - F(Y))\right)$$

Em que,  $Y$  = potência outorgada (para regiões, estados, termelétricas ou fontes de nível 2),  $\mu(Y)$  = média da potência outorgada e  $F(Y)$  = a distribuição acumulativa da potência outorgada ( $Y$ ) (LERMAN, 1984; VAN KERM, 2009).

#### 4.4. MEDIDAS DE POLARIZAÇÃO

De acordo com Wang, Caminada e Wang (2017) as medidas de polarização podem ser classificadas em dois grupos principais: bipolarização e polarização multigrupo. A bipolarização descreve o processo no qual a classe média diminui enquanto os aglomerados se movem para os dois polos opostos, sendo a principal medida a polarização de Foster e Wolfson (FOSTER; WOLFSON, 2010). Os indicadores multigrupo buscam expressar a formação de polarização em grupos arbitrários, sendo o principal modelo apresentado por Esteban e Ray (1994).

## POLARIZAÇÃO DE FOSTER E WOLFSON ( $P_{FW}$ )

A bipolarização de Foster e Wolfson (2010) trata-se de uma das principais formulações para o desenvolvimento das medidas de polarização, o índice de Foster e Wolfson pode ser modelado a partir da mediana como sua separatriz (Equação 10).

$$P = 4 \frac{\mu(Y)}{m(Y)} \left( \frac{1}{2} - L(0,5) - \frac{G}{2} \right)$$

Em que,  $\mu(Y)$  = a média da potência outorgada de bioeletricidade florestal (regiões, termelétricas ou fontes nível 2);  $m(Y)$  = a mediana da distribuição de potência outorgada de bioeletricidade florestal (regiões, termelétricas ou fontes nível 2);  $L(0,5)$  = o valor acumulado da curva de Lorenz para a mediana da distribuição e  $G$  = o índice de Gini de toda a distribuição.

Para um melhor ajuste da polarização, Foster e Wolfson (2010) afirmaram que se os grupos são definidos por faixas não sobrepostas, pode decompor o índice de Gini em dois componentes,  $G = G^B + G^W$ . Onde,  $G^B$  = o índice de Gini entre os grupos, separados pela mediana  $[L(0,5)]G^W$   $G$  = o coeficiente no interior dos grupos. Os índices de Gini ( $G^W$  e  $G^B$ ) podem ser calculados pelas Equações 11 e 12, respectivamente. A bipolarização de Foster e Wolfson,  $P_{FW}$ , é apresentada na Equação 13. Ambas medidas de polarização variam entre 0 (zero) e 1 (um), sendo valores próximos a 1 a máxima polarização.

$$G^W = \frac{1}{4} \left( \frac{\mu(Y_B)}{\mu(Y)} G(Y_B) + \frac{\mu(Y_R)}{\mu(Y)} G(Y_R) \right)$$

$$G^B = \frac{1}{4} \left( \frac{\mu(Y_R)}{\mu(Y)} - \frac{\mu(Y_P)}{\mu(Y)} \right)$$

Em que,  $\mu(Y_B)$  = a potência média entre as regiões, termelétricas ou fontes nível 2 do grupo de baixa e  $\mu(Y_A)$  = a potência média entre as regiões, termelétricas ou fontes nível 2 do grupo de alta,  $G(Y_B)$  o coeficiente de Gini entre o grupo de baixa oferta,  $G(Y_A)$  o coeficiente de Gini entre o grupo de alta e  $G(Y)$  é o Gini geral.

$$P_{FW} = (G^B - G^W) \frac{\mu(Y)}{m(Y)}$$

## POLARIZAÇÃO DE ESTEBAN E RAY

Esteban e Ray (1994) apresentaram o conceito de polarização em grupos (Equação 14), atribuindo uma relação do grau de identificação entre participantes de um mesmo nível e uma alienação aos demais grupos distintos.

$$P_{ER} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Pi_i^{1+\alpha} \Pi_j |\mu_i - \mu_j|$$

Em que,  $\alpha$  = parâmetro de sensibilidade,  $0 \leq \alpha \leq 1,6$ , sendo  $\alpha = 1,6$ , resultado de alta homogeneidade intra grupo,  $n$  = o número de níveis de potência da biomassa florestal,  $\Pi_i^{1+\alpha}$  = parcela de identificação (ID) intra grupo, e  $|\mu_i - \mu_j|$  parcela de alienação intergrupo (WANG; CAMINADA; WANG, 2017).

Deve-se registrar que a  $P_{ER}$  foi avaliada com amplitude de 0,05 no logaritmo do rendimento real. Calculou-se o índice para os parâmetros de sensibilidade ( $\alpha = 1,00, 1,30$  e  $1,60$ ). A formação de grupos ocorreu de forma exógena: foram utilizados os quartis de potência outorgada, tomando grupos de potência baixa (Q1), média (Q2), alta (Q3) e muito alta (Q4); este ajuste foi utilizado para análise de polarização por estados e por termelétricas. Para evitar inúmeros grupos, foram utilizados agrupamentos para os quartis de potência outorgada. Para todos os estados ou termelétricas pertencentes ao mesmo quartil foi utilizado o valor médio do intervalo.

Estabeleceu-se níveis de oferta baixa (Quartil um – Q1), média (Quartil dois – Q2), alta (Quartil três – Q3) e muito alta (Quartil quatro – Q4). Os quartis foram categorizados pela primeira quarta parte da potência outorgada (MW), o Q1 ( $0 < Q1 \leq 25\%$ ), segunda quarta parte, o Q2 ( $25\% < Q2 \leq 50\%$ ), terceira quarta parte, o Q3 ( $50\% < Q3 \leq 75\%$ ) e quarta parte final, o Q4 ( $75\% < Q4 \leq 100\%$ ) (DAWSON, 2011).

#### 4.5. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS ESPACIAIS

A análise exploratória de dados espaciais (AEDE) é um método utilizado para a avaliação de autocorrelação espacial, verificação de instabilidades espaciais e a identificação de *outliers* (COELHO JUNIOR et al., 2018). Segundo Jing e Cai (2010) as análises de dados em zonas geográficas geralmente implica na identificação de resíduos autocorrelacionados positivamente, ou seja, resíduos altos agrupando-se em uma região.

A autocorrelação espacial representa o quanto uma dada variável da região  $i$  (potência outorgada da bioeletricidade florestal) encontra-se relacionada com a mesma variável em uma região vizinha  $j$ . Para este trabalho foram considerados como unidades espaciais as localizações das usinas termelétricas da biomassa florestal (nível 1 e 2), a partir de coordenadas geográficas; assim, cada empreendimento representou uma unidade territorial. O método utilizado para análise de vizinhos foi baseado na distância entre as usinas, sendo considerado o  $k$ -vizinhos, observando-se o comportamento espacial para os 2, 4, 6, 8 e 10 vizinhos mais próximos. Também se observou a vizinhança com base na distância radial, ou seja, considerando vizinhos, localizações no interior de um raio mínimo em quilômetros (Km); desta forma não foram admitidos pontos isolados na análise. Para verificar o padrão espacial com base nos  $k$ -vizinhos foram construídas matrizes de ponderação  $W$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{ij}(k) = 0 \text{ se } i = j \\ W_{ij}(k) = 1 \text{ se } d_{ij} \leq D_i(k) \text{ e } W_{ij}(k) = \frac{W_{ij}(k)}{\sum_j W_{ij}(k)} \text{ para } k = 1, 2, \dots, n \\ W_{ij}(k) = 0 \text{ se } d_{ij} > D_i(k) \end{array} \right.$$

Em que:  $d_{ij}$  é a distância entre as termelétricas  $i$  e  $j$ .  $D_i(k)$  é um valor crítico que define o valor de corte, ou seja, a distância máxima para considerar regiões vizinhas à região  $i$  (PEROBELLI et al., 2007).

#### 4.5.1. INDICADORES DE AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL

A AEDE fornece medidas de autocorrelação espacial global e local, que são fundamentais para delinear a desigualdade espacial. As medidas globais detectam a correlação incorporando todas as amostras de estudo, enquanto índices locais concentram-se apenas no relacionamento específico em um local no espaço (YANG; WONG, 2013).

##### I MORAN GLOBAL ( $I_{Moran\_Global}$ )

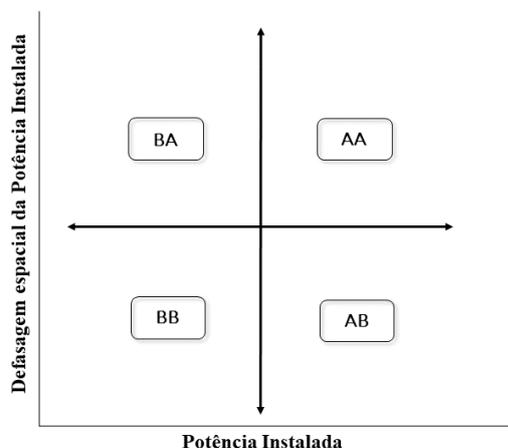
A autocorrelação espacial global é uma medida do agrupamento geral e é avaliada por um teste de uma hipótese nula de localização aleatória (ANSELIN, 2001). Druck et al. (2004) citaram que a caracterização da dependência espacial permite identificar valores correlacionados em uma região, constituindo um aspecto fundamental da análise espacial. As funções utilizadas para estimar o impacto da variável de estudo em uma região são dependentes dos valores das mesmas nas localizações vizinhas, ou seja, há uma autocorrelação espacial. Para mensuração desta autocorrelação utilizou-se o índice global de Moran ( $I_{Moran\_Global}$ ) (Equação 15).

$$I_{Moran\ Global} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Em que,  $n$  = número de termelétricas da biomassa florestal,  $W_{ij}$  = valor da matriz de ponderação,  $Y_i$  = potência outorgada da bioeletricidade florestal (nvl. 1 ou 2) no ponto  $i$ ;  $Y_j$  = potência outorgada da bioeletricidade florestal (nvl. 1 ou 2) no ponto  $j$ ;  $\bar{Y}$  = média da potência outorgada da bioeletricidade florestal (nvl. 1 ou 2) na região de estudo. Quando as variáveis são espacialmente independentes, o valor esperado de  $I_{Moran\_Global}$  é zero. Quando as variáveis são espacialmente dependentes, poderá ser apresentada similaridade entre áreas próximas, em que  $I_{Moran\_Global}$  será positivo ( $I_{Moran\_Global} > 0$ ), ou dissimilaridade, em que  $I_{Moran\_Global}$  será negativo ( $I_{Moran\_Global} < 0$ ) (SILVA et al., 2011). Os resultados foram apresentados em um diagrama de espalhamento (Figura 8).

A interpretação do diagrama indica que para elevada potência outorgada, com vizinhança alta tem-se o padrão AA (Alto–Alto), enquanto baixos valores de potência, com vizinhança baixa tem-se o BB (Baixo–Baixo). Por sua vez, os valores dissimilares entre a termelétrica observada e seus vizinhos, pode ser observado no AB (Alto–Baixo) para termelétricas de alta oferta, com vizinhos de baixa ou no BA (Baixo–Alto) em termelétricas de baixa oferta, com vizinhos de alta. Considerou o valor de significância para o  $I_{Moran\_Global}$  a 10% ( $p\text{-valor} \leq 0,1$ ).

**Figura 8.** Diagrama de dispersão de Moran.



Fonte: Adaptado de Coelho Junior et al., 2018.

### **I MORAN LOCAL ( $I_{Moran\_Local}$ )**

Para Druck et al. (2004), quando se tem um grande número de áreas em uma determinada região em estudo, é muito provável que ocorra diferentes regimes de associação espacial, e que apareçam vários locais de autocorrelação espacial. Ainda que o índice  $I_{Moran\_Global}$  seja útil para fornecer uma indicação de agrupamento global dos dados, esta medida precisa ser complementada por estatísticas locais. Segundo Anselin (2001), o  $I_{Moran\_Local}$  (Equação 16), atende as condições de identificação de padrões de associação espacial significativa, para cada área da região observada, e constitui uma decomposição do índice global de associação espacial. A soma dos indicadores de associação espacial local para todas as observações é proporcional ao indicador de associação espacial global.

$$I_{Moran\_Local} = (Y_i - \bar{Y}) \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_j - \bar{y})}{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n}}$$

Em que,  $n$  = número de termelétricas da biomassa florestal,  $W_{ij}$ = valor da matriz de ponderação,  $Y_i$  = potência outorgada da bioeletricidade florestal (nvl. 1 ou 2) no ponto  $i$ ;  $Y_j$  = potência outorgada da bioeletricidade florestal (nvl. 1 ou 2) no ponto  $j$ ;  $\bar{Y}$  = média da potência outorgada da bioeletricidade florestal (nvl. 1 ou 2) na região de estudo. De acordo com Silva et al. (2011), assim como no diagrama de dispersão do  $I_{Moran\_Global}$ , valores positivos do Índice de Moran local significam que existem clusters espaciais com valores similares (alto ou baixo) da variável observada. Valores negativos significam que existem clusters espaciais com valores dissimilares da variável entre as áreas e seus vizinhos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### ANÁLISE DE CONJUNTURA

A Figura 9 apresenta a distribuição espacial brasileira das termelétricas e da potência outorgada (MW), em quartis, da bioeletricidade florestal, em 2000, 2010 e 2019. Em 2000, Figura 9.a, havia 11 termelétricas da biomassa florestal, no território nacional, com 562,90 MW outorgados, onde 9 usinas foram do licor negro (546,10 MW) e 2 dos resíduos florestais (18,80 MW). Apenas a região Centro-Oeste não apresentou disponibilidade da bioeletricidade florestal. Entre os estados houve 8 participantes; para o quartil 4 (muito alto), esteve o Espírito Santo (142,90 MW); embora tenha sido registrada elevada disponibilidade, apenas a Aracruz foi responsável pela oferta, utilizando o licor negro como combustível.

Participaram do terceiro quartil (alto), a Bahia (105,60 MW) e Minas Gerais (100,00 MW). O estado baiano contou com 2 térmicas, a Suzano Mucuri (92,00 MW) e a Bahia Pulp (13,60 MW), ambas a licor negro e do setor de celulose; para MG a oferta ocorreu a partir da termelétrica Cenibra (100,00 MW), também do segmento de celulose. O segundo quartil (média) apresentou o maior número de participantes, com 4 estados. O Pará contou com a maior potência outorgada para o quartil, com 55,00 MW, a partir da Jari Celulose; em seguida estiveram: o Paraná (48,85 MW), o Rio Grande do Sul (48,80 MW) e Santa Catarina (46,75 MW), quase todo potencial obtido do licor negro, exceto pela Central Termelétrica de Geração (RS) que usou os resíduos florestais. O primeiro quartil (baixa) apresentou São Paulo com 15,00 MW, obtidos dos resíduos florestais da termelétrica Ripasa.

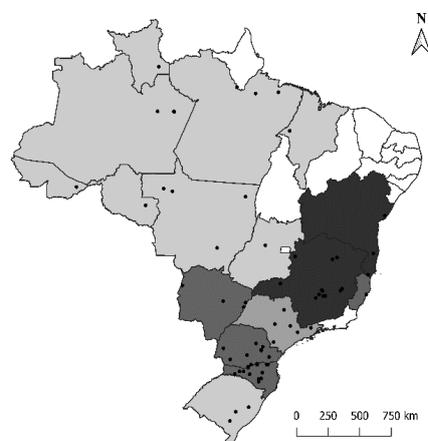
Em 2010, Figura 9.b, o Brasil apresentou 71 termelétricas e 1.690,93 MW outorgados da bioeletricidade florestal, que representou crescimento médio anual de 23,02% no número de termelétricas e de 13,00% para a potência outorgada, em comparativo a 2000.

**Figura 9.** Distribuição espacial brasileira das termelétricas e os quartis da potência outorgada (MW) para a bioeletricidade florestal, para 2000, 2010 e 2019.

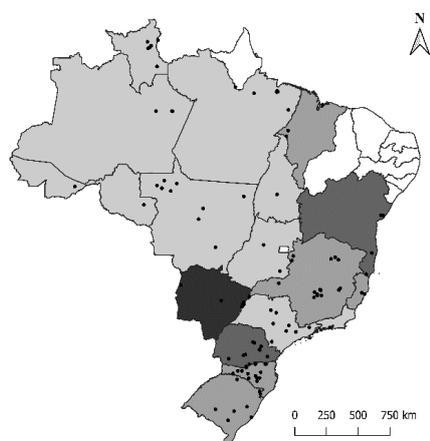
(a) 2000



(b) 2010



(c) 2019



Legenda;

0,01 < Q1 ≤ 35,73 MW  
35,73 < Q2 ≤ 71,45 MW

0,01 < Q1 ≤ 81,80 MW  
81,80 < Q2 ≤ 163,60 MW

0,01 < Q1 ≤ 182,93 MW  
182,93 < Q2 ≤ 365,86 MW

● Termelétricas da biomassa florestal

2000

71,45 < Q3 ≤ 107,18 MW  
107,18 < Q4 ≤ 142,90 MW

2010

163,60 < Q3 ≤ 245,40 MW  
245,40 < Q4 ≤ 327,20 MW

2019

365,86 < Q3 ≤ 548,79 MW  
548,79 < Q4 ≤ 731,12 MW

Fonte: ANEEL, 2020.

Dentre as fontes de nível 2, os resíduos florestais apresentaram o maior crescimento para quantidade de empreendimentos, passando de 2 para 42 termelétricas (40,25% a.a.), enquanto as térmicas de licor negro tiveram o maior aumento de potência outorgada, chegando a 1.151,68 MW (8,64% a.a.). Durante o intervalo de 2000 – 2010, houve inserção de três novas fontes energéticas, a lenha (2 termelétricas e 9,00 MW), o carvão vegetal (5 termelétricas e 40,10 MW) e o gás de alto forno – biomassa (GAF) (9 termelétricas e 119,10 MW).

Entre os quartis estaduais, a Bahia (327,20 MW) e Minas Gerais (249,18 MW) mantiveram-se no Q4. A Bahia contou com 3 termelétricas, ambas à base do licor negro (Veracel, Bahia Pulp e Suzano Mucuri), com elevado potencial das indústrias de papel e celulose, ao Sul do estado e no polo industrial de Camaçari – Bahia (Bahia Pulp). O estado baiano, com ênfase na porção Sul, apresenta elevada viabilidade econômica para de produção florestas, o que auxilia o desenvolvimento de indústrias e termelétricas associadas (VALDETARO *et al.*, 2011). Para Minas Gerais foram 13 térmicas (7 do GAF, 4 de resíduos florestais, 1 do licor negro e 1 do carvão vegetal), a usina com maior potencial foi, novamente, a Cenibra (100,00 MW); o estado mineiro despontou no uso do carvão vegetal e GAF, principalmente, pelas indústrias siderúrgicas e metalúrgicas existentes no território (SILVA; MATHIAS; BAJAY, 2018).

No Q3 (alto) estiveram os estados do Espírito Santo (210,40 MW), Mato Grosso do Sul (192,04 MW), Paraná (180,58 MW) e Santa Catarina (175,62 MW), este quartil estabeleceu a importância da zona centro-sul do Brasil na oferta, que pode ser associado a elevada produção florestal destas regiões (IBÁ, 2019). Apenas São Paulo compôs o Q2 (média) para 2010, o estado contou com 6 termelétricas e 125,21 MW, com destaque para a expansão de potência da Ripasa (53,48 MW) e para a Lwarcel (38,00 MW), principal usina de licor negro do estado. O quartil 1 (baixo) apresentou o maior número de participantes (9 estados), o de maior disponibilidade foram o Rio Grande do Sul (69,76 MW) e o Pará (55,61 MW), para a quantidade destacou o Mato Grosso com 4 termelétricas e 11,80 MW.

Para 2019 (Figura 9.c) foram registradas 115 termelétricas e 3.532,61 MW outorgados, com participação de 18 estados. O crescimento da bioeletricidade florestal no Brasil (2000 a 2019) foi 13,15% a.a. para a quantidade de termelétricas e de 10,15% a.a. para a capacidade outorgada. O quartil 4 (muito alta) apresentou o Mato Grosso do Sul como único participante, com 7 termelétricas e 731,32 MW outorgados (20,71% da capacidade outorgada nacional). As fontes participantes foram o licor negro (3 termelétricas e 658,78 MW), os resíduos florestais (2 termelétricas e 56,00 MW) e o gás de alto forno (2 termelétricas e 16,94 MW). O estado deteve a segunda e a quinta maiores usinas do país, a Fibria MS II (269,58 MW) e a Eldorado Celulose (214,10 MW). Para o quartil 3 (alta) estiveram os estados do Paraná (513,98 MW) e da Bahia (456,51 MW), que reforça a associação entre a bioeletricidade florestal e as maiores indústrias de papel e celulose do Brasil. A maior usina do país esteve no Q3, a Klabin Celulose, com 330,00 MW ofertados a partir do licor negro.

Para o Q2 (média) houve cinco estados participantes, o Rio Grande do Sul (354,51 MW), Minas Gerais (314,23 MW), Maranhão (287,44 MW), Espírito Santo (213,90 MW) e Santa Catarina (193,02 MW). A usina com maior disponibilidade para este quartil foi a Suzano Maranhão - MA, com 245,84 MW outorgados, seguida da CMPC - RS (254,84 MW) e a Aracruz - ES (210,40 MW), todas à base do licor negro. No quartil 1 (baixa) participaram: São Paulo (116,59 MW), Mato Grosso (109,20 MW), Pará (78,31 MW), Roraima (59,30 MW), Acre (30,47 MW), Rondônia (24,00 MW), Goiás (18,20 MW), Amazonas (17,03 MW), Tocantins (11,50 MW) e Rio de Janeiro (2,70 MW), as principais usinas foram a Jari Celulose – PA (55,00 MW) e a Ripasa – SP (53,48 MW).

A Tabela 9 apresenta a evolução das termelétricas de base florestal (fontes nível 1 e 2) e potência outorgada (MegaWatts – MW), para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019. Em 2000, a oferta brasileira de bioeletricidade florestal foi 562,90 MW, sendo 9 termelétricas de licor negro (546,10 MW) e 2 de resíduos florestais (16,80 MW). O licor negro foi a primeira fonte de biomassa florestal a ser outorgada, no Brasil, com o registro da Klabin Correia Pinto, em Santa Catarina (1,56 MW). Em 2005, registrou-se 1.065,65 MW outorgados, com aumento de 17,30% a.a., em relação a 2000. Destacou os resíduos florestais com incremento de 97,05% a.a. A capacidade outorgada foi dividida em: LN (71,28%), RF (23,77%), GAF (2,32%), Le (0,38%) e CV (2,26%). Para a quantidade foram 50 termelétricas distribuídas entre: LN (24,00%), RF (60,00%), GAF (8,00%), Le (2,00%) e CV (6,00%).

Para 2010 registrou-se 1.690,93 MW, com aumento de 12,23% a.a., com relação a 2005. A potência esteve distribuída em: LN (68,11%), RF (21,94%), GAF (7,04%), Le (0,5%) e CV (2,37%). Da quantidade, foram 71 termelétricas: LN (18,31%), RF (59,15%), GAF (12,68%), Le (2,82%) e CV (7,04 %). Para o intervalo (2005-2010) destacou a incorporação da Fibria MS, em 2008, com 175,10 MW de capacidade a base do licor negro e a instalação de 12 novas usinas de resíduos florestais. Fracaro et al. (2012) ressaltaram que entre 1994 e 2010 a autoprodução de eletricidade nas indústrias de celulose e papel aumentaram em 11%, chegando a 51,0% da demanda elétrica do setor, em 2010. Do gás de alto forno contabilizou-se instalação de 5 usinas, sendo a Usipar (63,15 MW) a principal; também houve expansão de potência das usinas Vetorial e Siderpa.

**Tabela 9.** Evolução das termelétricas de base florestal (fontes nível 1 e 2) e potência outorgada (MW), para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019.

	2000		2005		2010		2015		2019	
	Pot	Qde	Pot	Qde	Pot	Qde	Pot	Qde	Pot	Qde
LN	546,10	9	759,55	12	1.151,68	13	2.276,05	16	2.545,63	17
RF	16,80	2	253,30	30	371,05	42	518,81	56	745,81	70
GAF			24,70	4	119,10	9	124,10	10	127,70	12
Le			4,00	1	9,00	2	9,00	2	86,71	8
CV			24,10	3	40,10	5	56,10	9	48,20	8
Floresta	562,90	11	1.065,65	50	1.690,93	71	2.984,06	93	3.532,61	115

**Legenda:** Pot = Potência outorgada, Qde = Quantidade, LN = Licor Negro, RF = Resíduos Florestais, GAF = Gás de Alto Forno, Le = Lenha, CV = Carvão Vegetal.

Fonte: ANEEL, 2020.

Em 2015, a potência da bioeletricidade florestal alcançou 2.984,06 MW, no intervalo 2010 a 2015, observou o maior aumento da potência, com acréscimo de 1.293,13 MW (15,26% a.a.). A capacidade outorgada esteve dividida entre: LN (76,27%), RF (17,39%), GAF (4,16%), Le (0,3%), e CV (1,88%). Para quantidade, foram 93 termelétricas, sendo: LN (17,20%), RF (60,22%), GAF (10,75%), Le (2,15%) e CV (9,68%). Para 2019 a capacidade outorgada foi 3.532,61 MW, com aumento de 4,31% a.a., em relação a 2015. A geração esteve dividida em: LN (72,06%), RF (21,11%), GAF (3,61%), Le (2,45%) e CV (1,36%). Foram 115 termelétricas outorgadas, que estiveram distribuídas entre LN (14,78%), RF (60,87%), GAF (10,43%), Le (6,96%) e CV (6,96%).

O intervalo 2000 a 2019 registrou crescimento de 13,15% a.a. para a quantidade de termelétricas e de 10,15% a.a. para a potência outorgada. Do nível 2, os resíduos florestais apresentaram o maior acréscimo do número de térmicas (20,58% a.a.), seguido do gás de alto forno (15,74% a.a., de 2002 a 2019) e do carvão vegetal e lenha, ambos com crescimento de 13,01% a.a. (2002 a 2019). Para a capacidade outorgada os resíduos florestais também apresentaram o maior crescimento (22,09% a.a.), seguido da lenha com 19,84% a.a. (2002 a 2019), do gás de alto forno (11,79% a.a., de 2002 a 2019), do licor negro (8,44% a.a., de 2000 a 2019) e do carvão vegetal (8,06% a.a., de 2002 a 2019).

## MEDIDAS LOCACIONAS, DE CONCENTRAÇÃO E DE DESIGUALDADE

Para entender o padrão de oferta da bioeletricidade, a Figura 10 apresenta a evolução do Quociente Locacional (QL) nos estados brasileiros para potência outorgada da biomassa florestal, para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019. O QL evidenciou alto grau de localização da oferta, com destaque para os resíduos florestais e licor negro. Os anos iniciais da análise não registraram muitos participantes, que tornou a localização mais alta nos poucos estados geradores. Em 2000, sete estados já apresentavam participação para o licor negro: ES (142,90 MW), BA (105,60 MW), MG (100,00 MW), PA (55,00 MW), PR (48,85 MW), RS (47,00 MW) e SC (46,75 MW). A unidade com maior QL médio foi o Espírito Santo, 1,31 (2000 – 2019), resultante da baixa oferta de outras fontes florestais,

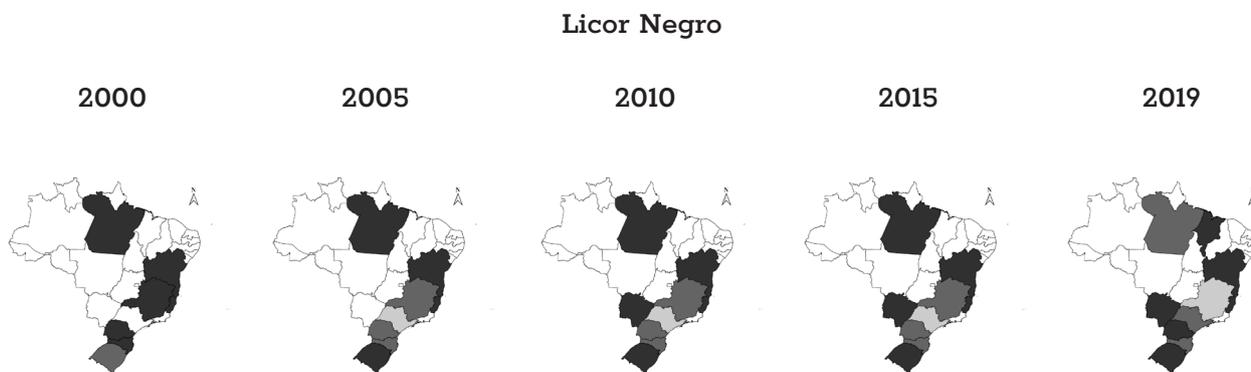
comparado com a disponibilidade da usina Aracruz Celulose. Em seguida ao ES, o ranking do QL foi composto por: BA (1,30, de 2000 a 2019), MS (1,25, de 2008 a 2019), PA (1,20, de 2000 a 2019), MA (1,19, de 2012 a 2019) e RS (1,13, de 2000 a 2019).

A localização da bioeletricidade do licor negro esteve associada à distribuição das grandes indústrias do setor de papel e celulose, como apontado por Marques (2015) e a produção de madeira das florestas plantadas. Segundo o Instituto Brasileiro de Árvores - IBA (2018) cerca de 80% das florestas plantadas de eucalipto e 100% das de pinus estiveram localizadas na porção centro sul do país, com destinação focada na produção de papel e celulose, painéis de madeira e pisos laminados, madeira serrada e carvão vegetal.

Para os resíduos florestais, foram registrados o maior número de estados com localização forte, em razão da grande quantidade de usinas. Em 2000, apenas São Paulo (15,00 MW) e o Rio Grande do Sul (18,00 MW) apresentaram oferta de bioeletricidade dos resíduos, a partir das térmicas Ripasa e Central Termelétrica de Geração do RS, dessa forma o QL para os estados foi 33,50 (SP) e 1,23 (RS). O Amazonas foi o estado que apresentou maior localização para este recurso, com QL médio foi 5,84 (2001 a 2019); em seguida estiveram: Roraima (5,44, de 2008 a 2019), Acre (5,44, de 2009 a 2019), São Paulo (5,36, de 2000 a 2019) e Mato Grosso (5,29, de 2002 a 2019). A Bahia (0,20, de 2012 a 2019) e o Mato Grosso do Sul (0,26, de 2012 a 2019) foram os únicos a apresentar relevância baixa, devido ao pequeno número de usinas, contraposto a elevada potência outorgada a partir do licor negro.

A geração com o gás de alto forno encontra relação com as indústrias metalúrgicas e siderúrgicas (SANTOS JÚNIOR, 2019). Nesse contexto, Minas Gerais apresentou os maiores valores de QL, com média de 7,58 (2002-2019) e valor máximo de 9,84, em 2013. Os estudos de Andrade e Cunha (2003) e Santos e Diniz (2013) apontaram o setor siderúrgico mineiro como o mais dinâmico do Brasil e um dos mais competitivos do mundo. Outro destaque foi o Mato Grosso do Sul, mesmo com um baixo número de usinas apresentou QL médio de 5,32, em razão da elevada participação entre 2005 e 2007.

**Figura 10.** Evolução do Quociente Locacional (QL) nos estados brasileiros para potência outorgada da biomassa florestal (nível 2), para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019.



## Resíduos Florestais

2000



2005



2010



2015



2019



## GAF

2000



2005



2010



2015



2019



## Lenha

2000



2005



2010



2015



2019



## Carvão Vegetal

2000



2005



2010



2015



2019



Legenda: ■  $QL \geq 1,0$  ■  $0,5 \leq QL < 1,0$  ■  $QL < 0,5$

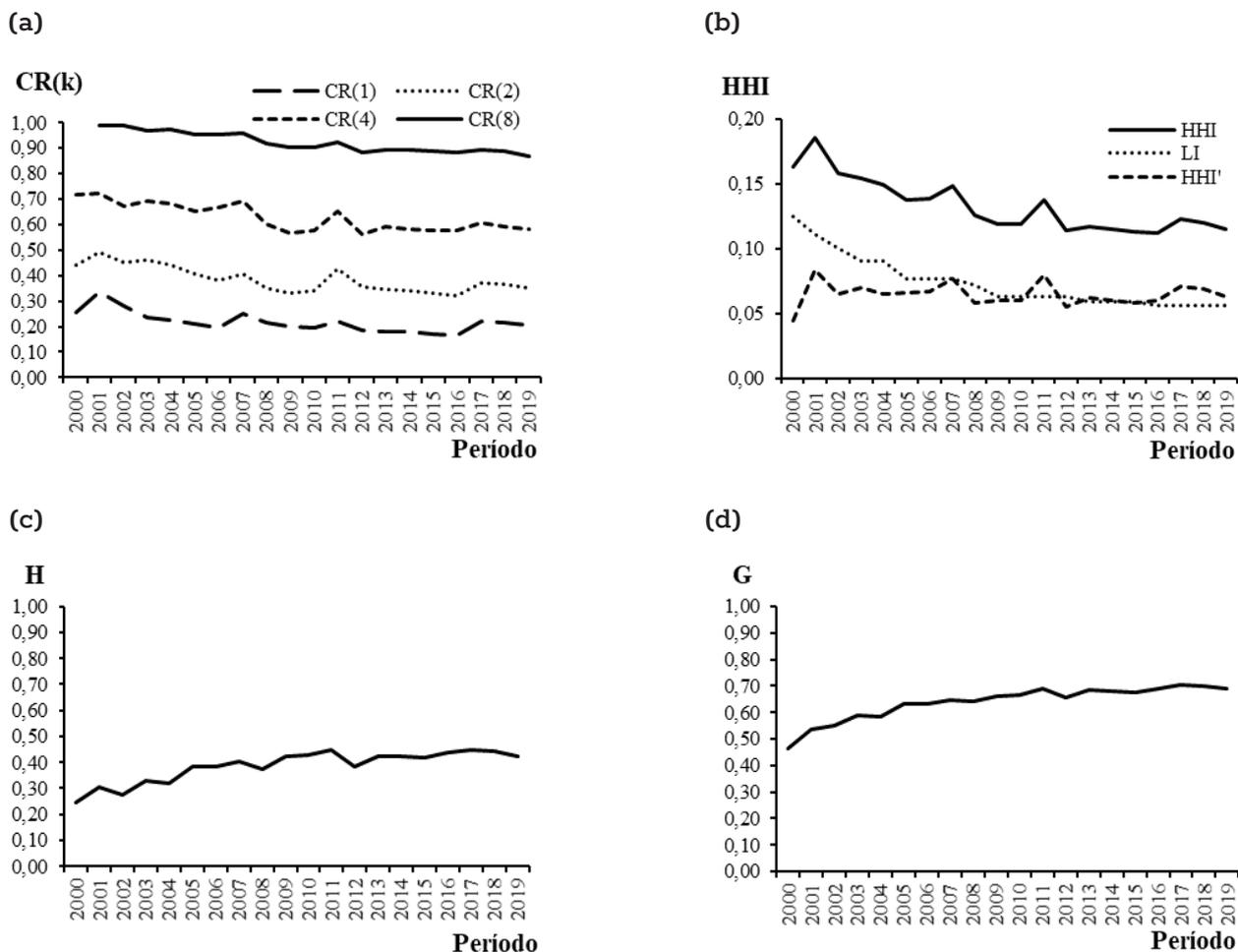
Para a lenha, apenas na porção Centro-Sul apresentou relevância para a oferta, o que está associado aos plantios das florestas plantadas. Entre 2002 e 2008, o estado de Santa Catarina apresentou a única termelétrica para lenha, no Brasil, a usina Chapecó, com 4,00 MW outorgados; como resultado o *QL* médio da unidade federativa foi 10,63 (2002–2008). A partir de 2009, com a outorga da Caramuru Itaperi, no Goiás, houve uma queda no valor de *QL* (4,85, de 2009 a 2015) do estado catarinense. Novas entradas foram registradas em 2016 (Citrus - SP), 2017 (Alga Agro - MG), 2018 (Orsa – SP, Caramuru Itaperi – GO e Marfrig São Gabriel - RS) e 2019 (Impasa - MT). O Goiás, com média de *QL* = 209,37 (2009 a 2019), foi o estado com maior relevância para a bioeletricidade da lenha. Também constituíram o ranking: MT (15,80, em 2019), SC (7,10, de 2002 a 2019), SP (6,99, de 2016 a 2019) e MG (2,52, de 2017 a 2019). O Rio Grande do Sul foi o único estado com localização fraca, com *QL* inferior 0,01, em 2018 e 2019.

Para o carvão vegetal, apenas 4 unidades federativas participaram da oferta: Espírito Santo, Maranhão, Minas Gerais e Rio de Janeiro. O Rio de Janeiro foi o estado com maior *QL* médio (61,63), de 2013 a 2019, e com apenas uma termelétrica de base florestal. O Maranhão e Minas Gerais, ambos com 3 termelétricas de carvão vegetal, indicaram localização elevada; justificada pela existência de polos siderúrgicos e metalúrgicos. Norgate et al. (2012) ressaltaram a importância da cogeração a partir da biomassa florestal nestes setores, com foco na diminuição do impacto ambiental. O *QL* médio do Maranhão foi 26,42 (2003-2019), com decréscimo a partir de 2012, com a instalação da Suzano Maranhão (termelétrica a licor negro) que dominou grande parte da oferta de bioeletricidade florestal no estado. Para Minas Gerais, o *QL* médio foi 3,97 (2002-2019) e para o Espírito Santo 0,99 (2014-2019).

Além da localização da potência outorgada da bioeletricidade florestal, também foi realizada uma análise da concentração entre os estados e termelétricas. A Figura 11 apresenta a evolução dos indicadores de concentração da potência outorgada dos estados brasileiros para bioeletricidade florestal, de 2000 a 2019. O *CR(1)* e *CR(2)* apontaram a elevada importância dos estados com termelétricas de licor negro na oferta da bioeletricidade florestal (Figura 11.a). O valor médio do *CR(1)* foi 0,2167, enquanto do *CR(2)* teve média de 0,3847. Dentre os estados destacaram-se Paraná, Bahia, Espírito Santo e Mato Grosso do Sul, que reversaram o posto da maior oferta durante os anos analisados. Estiveram instaladas nessas unidades federativas, usinas do grupo Klabin, Aracruz e Suzano.

O *CR(4)* apresentou média de 0,6285, que indicou concentração moderadamente alta, entre os estados (BAIN, 1959). Observou tendência de oligopólio, sendo o Paraná, a Bahia, o Espírito Santo e o Mato Grosso do Sul, os estados que dominaram a participação no índice (SCHERER; ROSS, 1990). O maior *CR(4)* foi 0,7248 (concentração alta), em 2001, e o menor de 0,5767 (concentração moderadamente alta), em 2015. A entrada de pequenas usinas entre os anos de 2010 a 2016 criou um período de queda na concentração, que voltou a crescer a partir de 2017, com a outorga da Fibria MS-II (269,58 MW) e Onça Pintada (50,00 MW), ambas no MS.

**Figura 11.** Evolução dos indicadores de concentração da potência outorgada dos estados brasileiros para bioeletricidade florestal, de 2000 a 2019. Razão de Concentração (a), índice Herfindahl-Hirschman (b), índice de Hoover (c) e índice de Gini (d).



O CR(8) apresentou valores altos, dado o baixo número de participantes no mercado. A média do índice foi 0,9219 (2001-2019), com maior registro em 2002 (0,9869) e menor em 2015 (0,8902). A queda registrada em todos os níveis de CR(k) resultou da melhor distribuição das térmicas a licor negro, com grandes usinas no MS, BA, MA e PR, o aumento do número de usinas de resíduos florestais, com destaque para o Norte, e a elevada densidade energética das termelétricas de gás de alto forno (MG e MS).

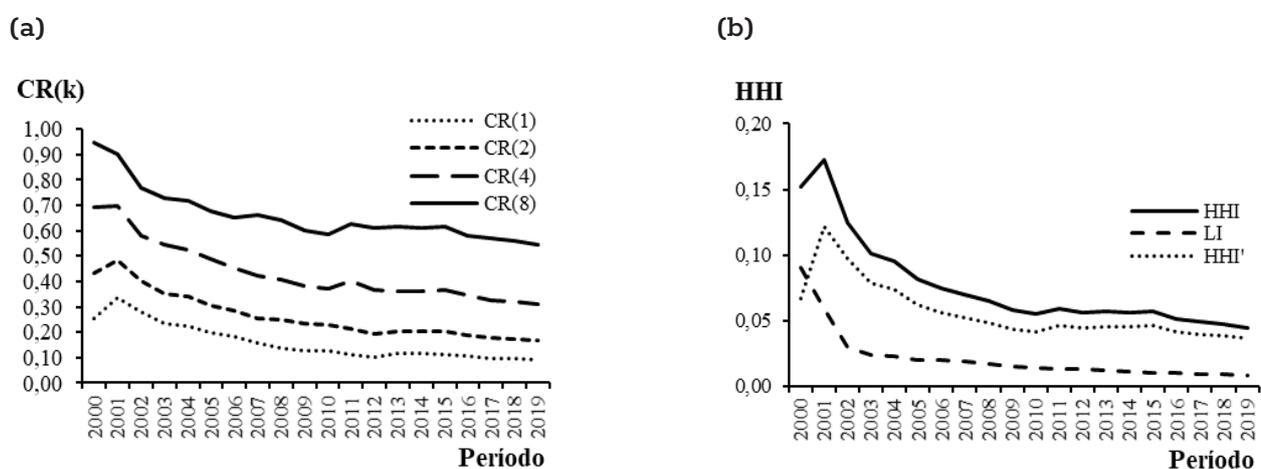
Dentre os índices sumários, a Figura 11.b mostra que o HHI e LI registraram queda na concentração estadual da oferta de bioeletricidade florestal, devido a entrada de novos participantes; a média do HHI foi 0,1333 e 0,073 para o LI. A maior diferença (0,0749) entre os índices foi registrada em 2011, quando apenas a Bahia e o Mato Grosso do Sul detiveram 42,47% da oferta nacional, enquanto a menor diferença foi em 2000 (0,0384), todavia esse foi o ano com maior número de estados participantes. O HHI médio (0,0646) apontou uma distribuição atomizada (REZENDE, 1994), o ano de menor concentração foi 2000 ( $HHI = 0,0439$ ) e a maior em 2001 ( $HHI = 0,0838$ ). O índice de Hoover (H), Figura 11.c, apontou concentração fraca a média apesar de um pequeno aumento do indicador, de  $H = 0,2441$  (2000) para  $H = 0,4230$  (2019), por sua proximidade de zero (HUANG; LEUNG, 2009). O índice de desigualdade de Gini (Figura 11.d), para o período de 2000 a 2019 foi 0,6344 que apontou desigualdade média a forte entre os estados.

A Figura 12 apresenta a evolução dos indicadores de concentração da potência outorgada nas termelétricas da bioeletricidade florestal, de 2000 a 2019. O CR(1) mostrou o comportamento da maior termelétrica nacional, a média do índice foi 0,1605 (Figura 12.a). O maior CR(1) foi 0,3372 (2001), com controle da Aracruz – ES (231,88 MW) e a menor esteve com 0,1668 (2016), com a Klabin Celulose (330,00 MW). Compuseram o CR(1): Aracruz (2000 – 2010), Eldorado Celulose (2011), Suzano Mucuri (2012) e Klabin Celulose (2013 – 2019), todas as empresas utilizaram o licor negro para geração de eletricidade. O CR(2) apresentou média de 0,2648 e demonstrou elevada disparidade entre as maiores indústrias do setor. A maior concentração foi 0,4827 (2001), contando com a Aracruz – ES (231,88 MW) e Cenibra – MG (100,00 MW), enquanto a menor teve CR(2) de 0,1695, em 2019; foram participantes a Klabin Celulose (330,00 MW) e a Fibria MS II (269,58 MW). A queda da concentração nos anos finais esteve associada a entrada de participantes na oferta.

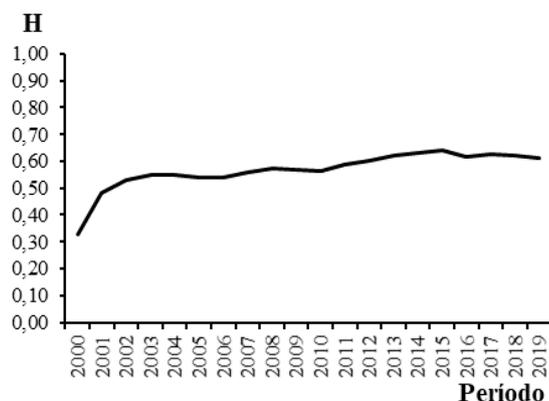
Para o CR(4) a média de 0,4362 (2000–2019), representou concentração moderadamente baixa. O índice apresentou decréscimo acelerado com média -4,10% a.a., o que foi motivado pela entrada de novas empresas no mercado. A partir de 2008, a oferta deixou de ter características de oligopólio, estando abaixo de 0,40. O maior valor de CR(4) foi 0,6965 (2000) e o menor de 0,3210 (2018). As principais geradoras estiveram associadas aos grupos Suzano (responsável pelas térmicas Fibria), Klabin e Celulose Irani, Dos Santos et al. (2019) destacou que estes grupos representaram cerca de 85% da participação de mercado da indústria celulose e papel no Brasil.

O CR(8) médio foi 0,6610, que indicou concentração moderadamente baixa. O valor mais alto foi 0,9460 (2000), composto pelas termelétricas Aracruz, Cenibra, Suzano Mucuri, Jari Celulose, Klabin, CMPC, Klabin Otacílio Costa, Klabin Correia Pinto, todas utilizavam o licor negro como fonte motriz. O menor valor do CR(8) foi 0,5425, para 2019, e indicou concentração moderadamente baixa. Participaram as usinas Klabin Celulose, Fibria MS II, Suzano Maranhão, CMPC, Eldorado Celulose, Suzano Mucuri, Aracruz e Fibria MS, todas à base de licor negro (apenas a Eldorado Celulose também utilizou resíduos florestais). A análise combinada com o CR(4) e CR(8) inferiu características de um oligopólio com extremidade competitiva.

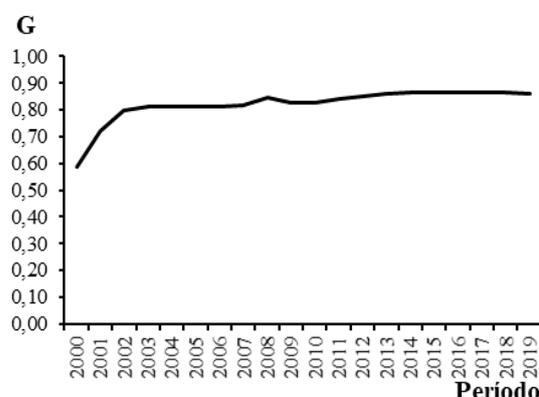
**Figura 12.** Evolução dos indicadores de concentração da potência outorgada nas termelétricas da bioeletricidade florestal, de 2000 a 2019. Razão de Concentração (a), índice Herfindahl-Hirschman (b), índice de Hoover (c) e índice de Gini (d).



(c)



(d)



Assim como nos estados, a Figura 12.b mostra que a diferença entre o *HHI* e o limite inferior, para as termelétricas de biomassa florestal, registraram diminuição da concentração no setor. O efeito dos novos participantes tornou-o mais relevante, com média de 0,0763 para o *HHI* e 0,0214 para o *LI*, para uma concentração baixa. O *HHI* médio (0,0563) apontou a um mercado atomizado. O maior *HHI* foi 0,1213 (2001) e o menor de 0,0363 (2019) (REZENDE, 1994).

O índice de Hoover (Figura 12.c) e de Gini (Figura 12.d) apontaram comportamento distinto do *HHI*, com aumento na concentração durante o período de estudo, o que pode ser compreendido pela participação elevada ao quadrado para o *HHI*, resultando em menor sensibilidade a entrada de novos participantes no mercado. A média de *H* foi 0,5675, estimando concentração média a forte. A menor concentração foi registrada em 2000 ( $H = 0,3290$ ) e a maior em 2015 ( $H = 0,6384$ ). O coeficiente de Gini apresentou comportamento similar a medida de Hoover, com média de 0,8215, e classificou a oferta como de desigualdade forte a muito forte.

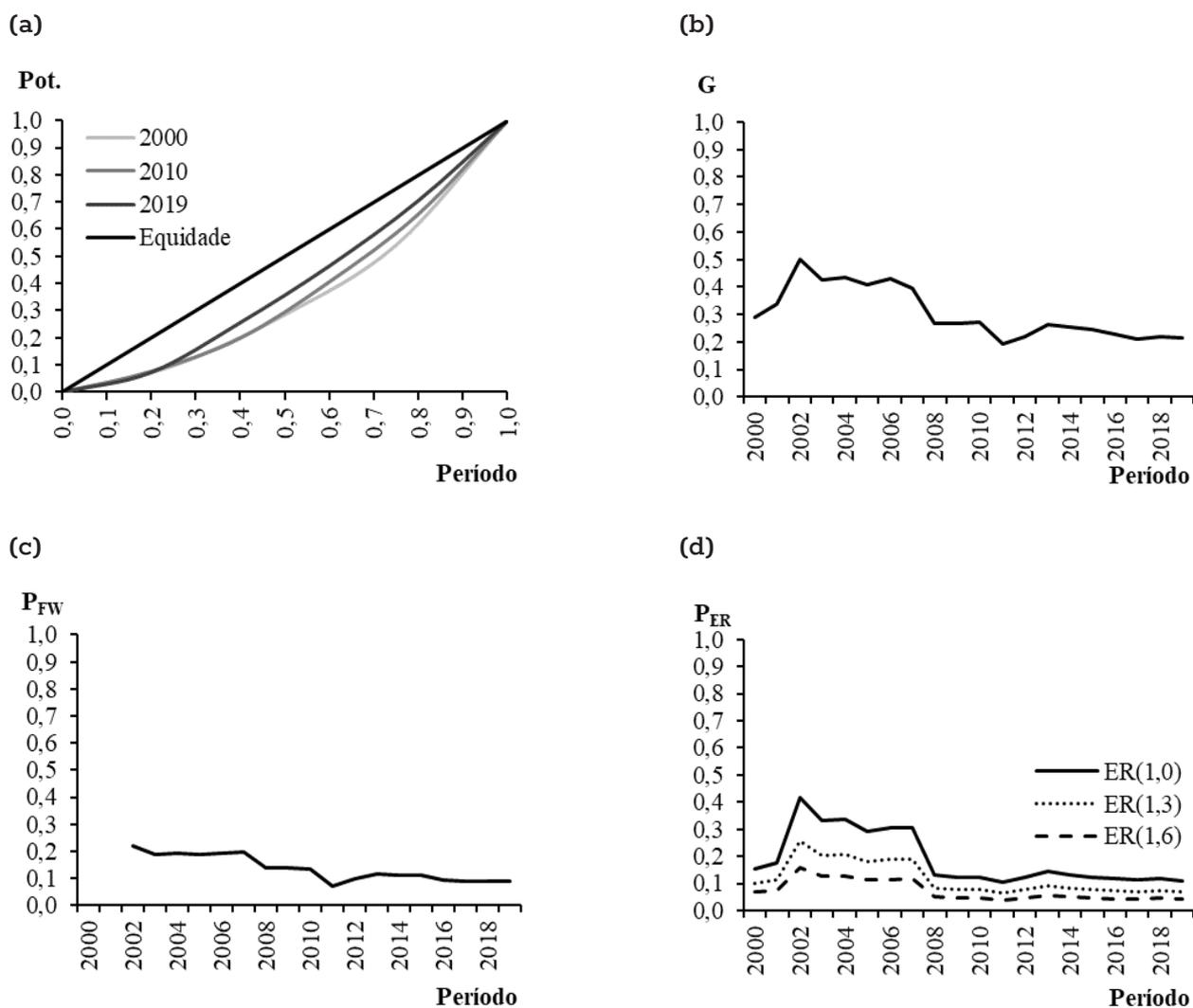
## MEDIDAS DE POLARIZAÇÃO

Além das medidas de concentração, o setor também pode ser avaliado com base em seu nível de polarização, seja este: regional, estadual, entre empresas ou fontes da biomassa. A Figura 13 apresenta a evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nas regiões brasileiras. a) Curva de Lorenz, b) Índice de Gini; c) Foster e Wolfson e d) Esteban e Ray, de 2000 a 2019.

A curva de Lorenz, Figura 14.a, permite inferir uma queda na desigualdade entre as regiões. Em 2000, quando apenas quatro regiões participavam da oferta, apenas o Sudeste foi responsável por 55,82% da oferta, enquanto as outras 3 regiões (75% da distribuição) eram responsáveis por 54,18% da potência outorgada. A partir de 2010, com 5 participantes, a disparidade apresentou diminuição. As regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste, apresentavam 40,22% da potência outorgada, sendo os outros 59,78% fornecidos pelo Sul e Sudeste. Em 2019, apresentou a maior proximidade da linha de equidade; as regiões com menor participação apresentaram elevado aumento da oferta, com destaque para o Centro-Oeste que teve potência quatro vezes superior à apresentada em 2010. O Sudeste apresentou pouco aumento e a região Sul tornou-se o principal polo nacional.

O índice de Gini, Figura 13.b, auxilia no entendimento da polarização no setor de bioeletricidade florestal. O índice teve média de 0,3034, o que indicou desigualdade fraca a média. O período entre 2000 e 2007 apresentou a maior desigualdade, tendo em vista o elevado domínio da região Sudeste sobre a oferta; a partir de 2008, com o aumento da disponibilidade na região Centro-Oeste a desigualdade teve queda. O maior  $G$  foi 0,50, em 2002, justificado pela entrada do Centro-Oeste, com apenas 1,20 MW outorgado e pelo aumento de 91,75 MW na capacidade outorgada do Sudeste, entre 2001 e 2002. A menor desigualdade ocorreu em 2017,  $G = 0,2080$ , onde a principal região, o Sul, apresentou participação de 28,95% (977,79 MW), evidenciando distribuição mais igualitária.

**Figura 13.** Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nas regiões brasileiras, de 2000 a 2019. Curva de Lorenz (a), Índice de Gini (b); Foster e Wolfson (c) e Esteban e Ray (d).



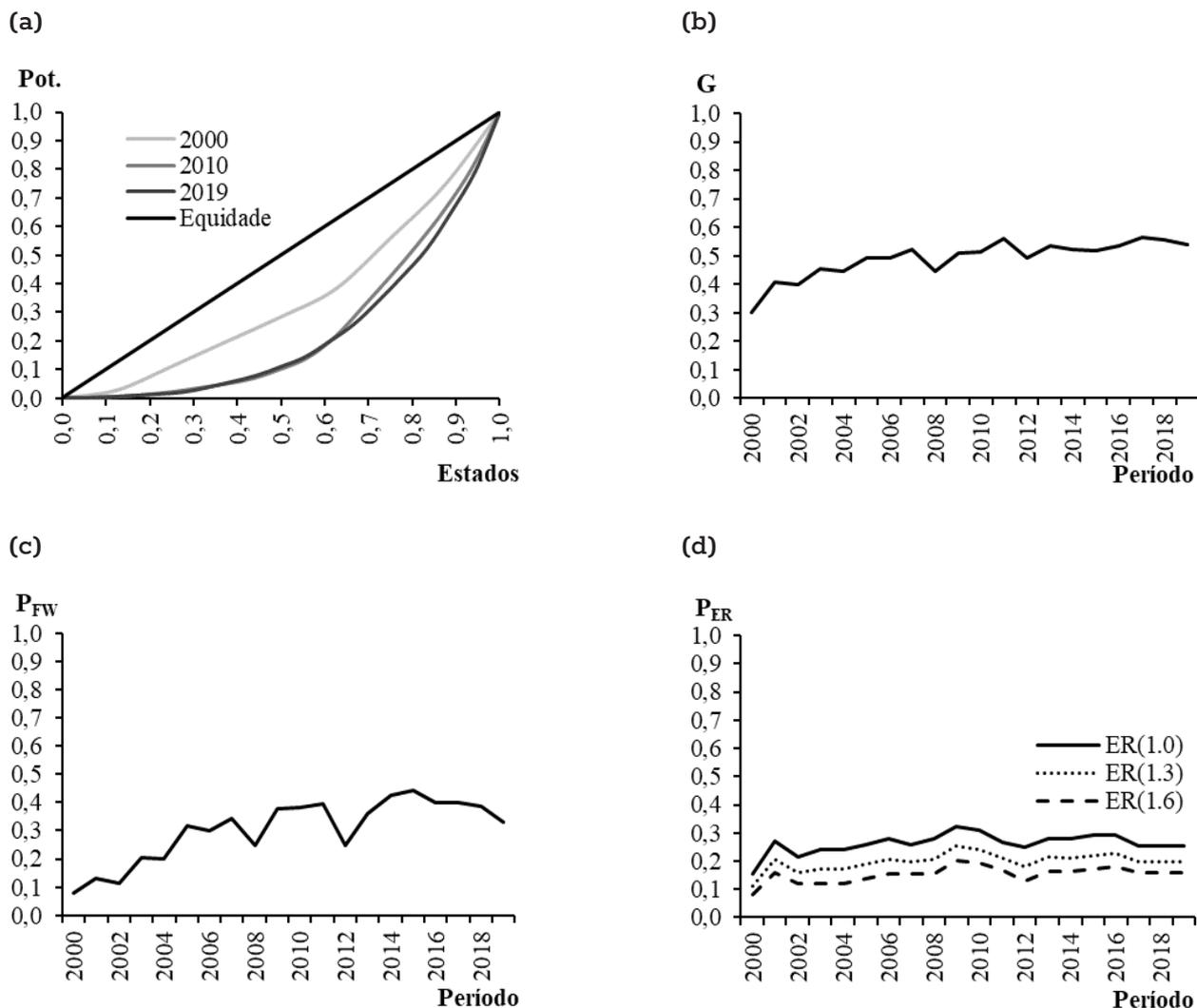
A Figura 13.c representa a bipolarização de Foster e Wolfson. Observou-se queda na polarização entre as regiões, considerando a existência de um grupo de alta potência e um de baixa, todavia não houve polarização alta. Para 2000 e 2001 os resultados foram inconsistentes, dado o número de participantes. Entre 2002 e 2006, a bipolarização apresentou os maiores valores para a série, devido ao incremento de potência nas regiões Sul e Sudeste e a estagnação, principalmente, no Norte do país; além da entrada do Centro-Oeste, com potência muito baixa. A construção de novas usinas entre 2007 e 2008, e a partir de 2017 resultou em breve queda para a bipolarização. A  $P_{FW}$  apresentou média de 0,1345 (2002 a 2019), sendo a maior polarização registrada em 2013 ( $P_{FW} = 0,1366$ ), ocasionada por forte aumento de potência outorgada no Sul do país. O menor registro foi em 2011 ( $P_{FW} = 0,069$ ), ano em que houve aumento na capacidade outorgada nas regiões, exceto no Norte [Sudeste (587,00 MW - 28,75%), Nordeste (474,48 MW - 23,24%), Centro-Oeste (434,84 MW - 21,29%), Sul (425,96 MW - 20,86%) e Norte (119,74 MW - 5,86%)].

A Figura 13.d apresenta a polarização de Esteban e Ray para a potência outorgada da bioeletricidade florestal, entre regiões brasileira, de 2000 a 2019. Observou-se um comportamento semelhante ao obtido pela medida de Foster e Wolfson, todavia com valores elevados de polarização entre os anos de 2002 e 2008, resultante do domínio da região Sudeste sobre a oferta de bioeletricidade nacional. Outro destaque diz respeito ao fator de sensibilidade ( $\alpha$ ), para a análise regional, cada observação foi tratada como um grupo específico, portanto, o segmento ER(1,6), que sugere alta coesão intra-grupo, pode ser indicado como o mais representativo (WANG, J.; CAMINADA; WANG, C., 2017). A média da  $P_{ER}$  (1,6) foi 0,0730 (2000 a 2019), a maior polarização ocorreu em 2002 ( $P_{ER} = 0,1584$ ), ano de entrada da região Centro-Oeste e teve aumento de potência para o Sudeste. Assim como para a  $P_{FW}$ , o menor valor da  $P_{ER}$  foi 0,0400, em 2011.

A Figura 14 apresenta a evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nos estados brasileiros, de 2000 a 2019. Da curva de Lorenz, Figura 14.a, foi possível notar aumento da desigualdade entre os estados. Em 2000, os 3 maiores estados (37,50%) (ES, BA e MG), representaram 61,91% (348,50 MW) do potencial outorgado no país. Para 2010, a distribuição tornou ainda mais concentrada para as unidades com maior disponibilidade, os últimos 25% da distribuição (BA, MG, ES e MS), representaram 68,56% (978,82 MW) da potência outorgada. Em 2019, notou-se aumento ainda mais significativo para a extremidade de maior recurso, 57,41% (2.041,73 MW) da capacidade nacional esteve associada aos 22,22% estados mais importantes (MS, PR, BA e RS).

O índice de Gini, Figura 14.b, teve média de 0,4846 e apresentou classificação de desigualdade fraca a média, com aumento do índice no período de estudo; isto evidenciou que o agrupamento em grandes regiões pode proporcionar uma falsa inferência quanto a desigualdade espacial da oferta brasileira de bioeletricidade florestal. Em 2017, registrou o maior valor para o Gini ( $G = 0,5600$ ), associado ao aumento de potência outorgada no estado do Mato Grosso do Sul, que cresceu de 192,04 MW (2010) para 418,04 MW (2011). A menor desigualdade ocorreu em 2000 ( $G = 0,3000$ ), sendo apenas 8 estados participantes. A avaliação da bipolarização de Foster e Wolfson entre os estados brasileiros, Figura 14.c, inferiu aumento da polarização. Nos anos iniciais a bipolarização apresentou valores baixos; entre 2000 e 2004, a  $P_{FW}$  teve média de 0,1454, resultado do baixo número de unidades federativas participantes. A partir de 2004, a inserção de novos recursos como a lenha, carvão vegetal e GAF em estados com baixa capacidade outorgada, ocasionou aumento ao índice.

**Figura 14.** Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nos estados brasileiros. a) Curva de Lorenz, b) Índice de Gini; c) Foster e Wolfson e d) Esteban e Ray, de 2000 a 2019.

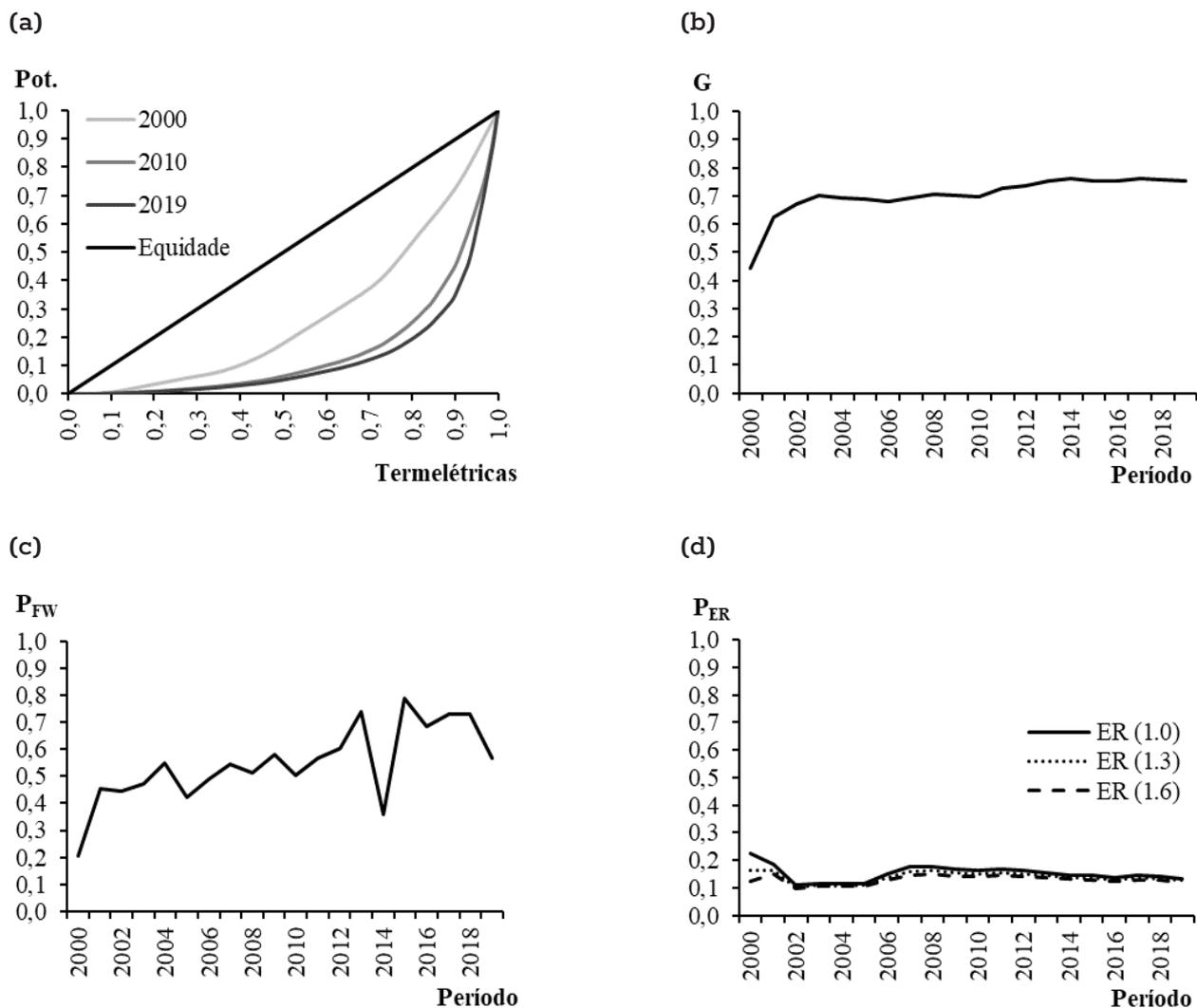


O aumento a partir de 2008 foi ocasionado pela elevada potência nos estados do Mato Grosso do Sul, Paraná e Bahia. Entre os anos de 2010 e 2012 houve nova diminuição para a bipolarização, ocasionada pelo aumento da participação dos estados do Mato Grosso do Sul e Maranhão na oferta nacional. A partir de 2013, a outorga de grandes usinas do licor negro resultou no segundo grande aumento da polarização no período estudado. A bipolarização apresentou média de 0,3002 (2000 a 2019), com maior registro em 2011 ( $P_{FW} = 0,4550$ ) e o menor em 2000 ( $P_{FW} = 0,078$ ).

A Figura 14.d apresenta a medida de polarização de Esteban e Ray para a oferta de bioeletricidade florestal entre os estados brasileiros, de 2000 a 2019. Entre os estados, a  $P_{ER}$  apresentou comportamento semelhante ao índice de Gini, embora a desigualdade e polarização não estejam diretamente correlacionadas. Ao mesmo exposto pela bipolarização, a  $P_{ER}$  apresentou os menores valores nos anos iniciais (2000 a 2002). O fator de sensibilidade  $\alpha = 1,6$  apresentou a menor média ( $P_{ER} = 0,1530$ ) e menor desvio padrão ( $P_{ER} = 0,0260$ ), os fatores que impactaram nas variações da

medida foram os mesmos apontados para a  $P_{FW}$ . Além da análise espacial, a avaliação da polarização na oferta brasileira de bioeletricidade florestal foi realizada para as termelétricas nacionais, conforme apresentado na Figura 15.

**Figura 15.** Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nas termelétricas brasileiras, de 2000 a 2019. Curva de Lorenz (a), Índice de Gini (b); Foster e Wolfson (c) e Esteban e Ray (d).



A curva de Lorenz (Figura 15.a) demonstrou aumento no controle da oferta de bioeletricidade, no período estudado, por parte das térmicas com maior capacidade outorgada. A partir do ano 2000, já houve elevado domínio sobre a oferta de bioeletricidade, com 59,49% da potência outorgada pertencentes a 27,27% das termelétricas (Aracruz, Cenibra e Suzano Mucuri). Em 2010, houve aumento do domínio da potência para as maiores usinas, a primeira metade das térmicas nacionais (50,07%) detiveram apenas 6,51% da potência outorgada (107,68 MW), enquanto as últimas 9,86% termelétricas da distribuição apresentaram 54,76% da capacidade (925,95 MW). Para 2019, o término da distribuição, notou-se um comportamento semelhante ao de 2010; as últimas 9,48% das termelétricas da distribuição (Klabin Celulose, Fibria MS II, Suzano Maranhão, CMPC, Eldorado Celulose, Suzano Mucuri, Aracruz, Fibria MS, Veracel, Klabin e Bahia Pulp) apresentaram 63,92% da capacidade (2.257,99 MW).

O índice de Gini (Figura 15.b) apresentou crescimento para o período estudado, com destaque para o intervalo 2000 a 2002, com a entrada de 22 novas termelétricas, que resultou em aumento da desigualdade. A média do índice de Gini foi 0,7029, que segundo Gini (1912) caracteriza desigualdade forte a muito forte. Concordante com a curva de Lorenz e com o índice de Gini, a  $P_{FW}$  apresentou valores elevados da bipolarização entre as termelétricas, destacando um polo de potência muito alta (>100 MW) e um de baixa.

A  $P_{FW}$  (Figura 15.c) apresentou aumento significativo após o ano 2000, como apontado pelo  $G$ . A média para a  $P_{FW}$  foi de 0,5477, com valor máximo de 0,790, em 2015, e mínimo de 0,207, em 2000. A entrada de novas empresas elevou a desigualdade e, neste caso, resultou em aumento da polarização. Outro ponto de destaque foi a queda da polarização ocorrida em 2014, o que pode ser creditado a retirada da usina PIE – RP (30,00 MW). O aumento da polarização entre as termelétricas na última década de análise ocorreu da elevada densidade energética das termelétricas do licor negro. Darmawan et al. (2017) constataram o grande potencial desse recurso para cogeração de eletricidade. Os autores afirmaram que uma fábrica do setor de celulose e papel gera 1,7-1,8 t-LN / t-celulose (teor em seco), o que resulta em potencial médio de 250 a 500 MW de capacidade. A recuperação de energia do licor negro é suficiente para auto produção de eletricidade e vapor, além da geração de excedentes, os quais podem ser comercializados.

A Figura 15.d apresenta a evolução da polarização de Esteban e Ray entre as termelétricas brasileiras da biomassa florestal. Selecionou-se um agrupamento semelhante ao utilizado para a polarização entre os estados, resultando em quatro grupos (potência outorgada baixa, média, alta e muito alta). O comportamento da  $P_{ER}$  foi distinto do obtido para bipolarização, apresentando pouca variação, os valores médio da polarização (2000 a 2019) foram:  $P_{ER}(1.0) = 0,1520$ ,  $P_{ER}(1.3) = 0,1387$  e  $P_{ER}(1.6) = 0,1294$ . O intervalo com menor polarização ocorreu de 2002 a 2006, neste período os grupos de potência muito alta e alta apresentaram apenas um participante, o fenômeno ocorreu pela entrada da Veracel (BA), termelétrica de licor negro, com 117,04 MW outorgados. Os anos de 2000 e 2001 apresentaram as maiores polarizações, obtidos pelo baixo número de participantes do mercado.

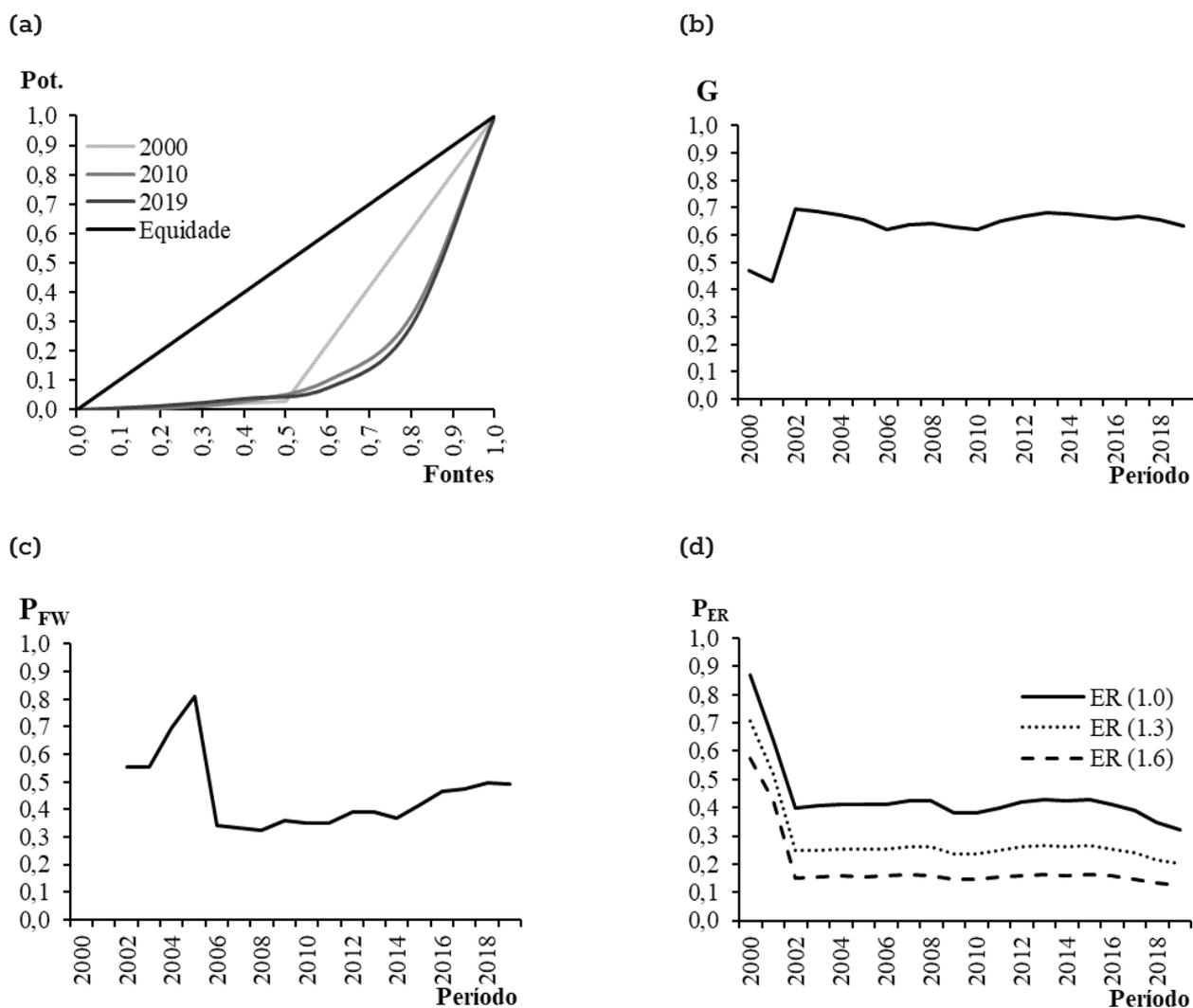
Como observado na análise da polarização entre as termelétricas nacionais, a fonte de nível 2 utilizada para geração apresenta bastante impacto no potencial outorgado, sendo o recurso de maior oferta o licor negro. Com base nessa observação, a Figura 16 apresenta a evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal brasileiras, entre as fontes nível 2. a) Curva de Lorenz, b) Índice de Gini; c) Foster e Wolfson e d) Esteban e Ray, de 2000 a 2019.

A curva de Lorenz, Figura 16.a, mostrou aumento na desigualdade entre as fontes energéticas; em 2000, havia usinas apenas do licor negro e de resíduos florestais. Para 2010 houve registro de 5 fontes da biomassa (lenha, carvão vegetal, GAF, licor negro e resíduos florestais), a maior parte da potência outorgada esteve contida no licor negro (68,10% - 1.151,68 MW). Para 2019, a curva apresentou ainda mais distanciamento da equidade, a última parcela da distribuição, representada pelo licor negro, representou 71,45% (2.524,18 MW) da oferta nacional.

O índice de Gini (Figura 16.b) apresentou valores elevados para todo o período, com média de 0,6358 e desigualdade de média a forte. O ano com maior  $G$  foi 2002 (0,6950), ocorrido devido a entrada de três novas fontes, em um cenário estável para o licor negro e resíduos florestais. Excetuando os dois anos iniciais, onde houve apenas duas fontes, em 2010, registrou-se a menor desigualdade, observada pelo aumento substancial na potência para o carvão vegetal, com destaque para entrada das usinas Gusa Nordeste (10,00 MW) e Simasa (8,00 MW), ambas no Maranhão, e para os resíduos florestais com a Berneck (12,00 MW).

A Figura 16c apresenta a polarização de Foster e Wolfson para as fontes de nível 2, a  $P_{FW}$  alcançou seu pico no ano de 2005 e em seguida apresentou decréscimo, com novo aumento a partir de 2013, a  $P_{FW}$  média foi de 0,5349 (2002 a 2019). Para o ano de 2000 e 2001 não houve resultados relevantes para a bipolarização tendo em vista a existência de apenas 2 recursos da biomassa florestal. Até 2005, a contribuição do polo de baixa potência, composto pelo carvão vegetal, lenha e GAF apresentou participação de apenas 4,95% da oferta nacional. A partir de 2013, com a entrada da Klabin (PR), Eldorado Celulose e (MS) e Suzano Maranhão (MA) a  $P_{FW}$  apresentou novo aumento. O mesmo efeito apontado para a análise entre as termelétricas pode ser notado para o nível de fontes, reflexo do já apresentado por Darmawan et al. (2017).

**Figura 16.** Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal brasileiras, entre as fontes nível 2, de 2000 a 2019. Curva de Lorenz (a), Índice de Gini (b); Foster e Wolfson (c) e Esteban e Ray (d).



Para a  $P_{ER(1,6)}$ , Figura 16.d, que incorpora maior interação entre os dados, observou-se polarização muito elevada para 2000 e 2001, resultante da existência de apenas dois grupos. A partir de 2002 houve pouca variação, evidenciando o constante controle do licor negro sobre a oferta. A  $P_{ER(1,6)}$  médio foi 0,1870, que infere uma elevada polarização, com destaque para o licor e resíduos florestais como grupo de alta.

## ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS ESPACIAIS

Para testar a dependência espacial da oferta da bioeletricidade florestal no Brasil foram calculados os índices de autocorrelação espacial global ( $I_{Moran\_Global}$ ) e local ( $I_{Moran\_Local}$ ). A Tabela 10 apresenta o  $I_{Moran\_Global}$  da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1 e 2, para matriz de k-vizinhos mais próximos (2, 4, 6, 8 e 10) e para distância (Km), para 2000, 2010 e 2019. O arranjo de 2 vizinhos mais próximos apresentou o maior número de resultados estatisticamente significativos, com o p valor  $\leq 0,1$ , foram oito observações, seguido das convenções de 4 e 6 vizinhos, cada qual com 7 resultados significativos. Para 2000, notou-se resultados mais relevantes para a matriz de 2 vizinhos, indicando autocorrelação positiva para as termelétricas florestais e de licor negro. As matrizes de 8 e 10 vizinhos e a vizinhança baseada na distância apresentaram resultados negativos para autocorrelação espacial, todavia estes arranjos utilizaram quase a totalidade das usinas instaladas em 2000 (11 termelétricas), sendo os resultados de pouca relevância estatística.

**Tabela 10.** Índices de Moran global da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1 e 2, para matriz de k-vizinhos mais próximos (2, 4, 6, 8 e 10) e para distância (Km), para 2000, 2010 e 2019.

Ano	Biomassa	k-vizinhos					Distância	Raio Viz. (Km)
		2	4	6	8	10		
2000	Flor.	0,528**	0,133**	0,017**	-0,115	-0,100**	-0,188	1997,09
	LN	0,486**	0,012	-0,228**	-0,125***		-0,239	1997,09
	RF							
	GAF							
	CV							
	Le							
2010	Flor.	0,257**	0,279***	0,262***	0,194***	0,151***	0,042**	808,93
	LN	0,229**	-0,038	-0,096	-0,034	-0,081	-0,092	1997,09
	RF	0,088	0,014	-0,05	-0,002	-0,022	-0,041	808,93
	GAF	0,162**	0,089**	-0,133	-0,125		-0,145	425,23
	CV	-0,48	-0,25**				-0,934***	63,945
	Le							

Ano	Biomassa	k-vizinhos					Distância	Raio Viz. (Km)
		2	4	6	8	10		
2019	Flor.	0,202***	0,216***	0,135***	0,098**	0,098	0,132**	431,74
	LN	-0,147	-0,178	-0,151	-0,154	-0,092	-0,191	698,98
	RF	-0,087	-0,046	-0,028	-0,043	-0,035	-0,071	598,55
	GAF	0,176**	0,024*	0,033**	-0,114	-0,098	-0,08	1875,09
	CV	0,744*	0,459***	0,038***			0,728**	411,84
	Le	-0,038	-0,062	-0,037**			-0,081	726,05

**Nota:** \*\*\* p-valor  $\leq$  0,01; \*\* p-valor  $\leq$  0,05; \* p-valor  $\leq$  0,10.

**Legenda:** Raio Viz. = Raio de vizinhança, Flor. = Floresta, LN = Licor negro, RF = Resíduo florestal, GAF = Gás de alto forno, CV = Carvão vegetal e Le = lenha.

Em 2010, todas as matrizes utilizadas apresentaram autocorrelação positiva significativa para o nível florestal, a um nível de 10,00%. Para as fontes de nível 2, identificou-se correlação positiva para o gás de alto forno e negativa para o carvão vegetal. Para 2019, também se observou autocorrelação positiva para o nível florestal em todos os modelos matriciais. Segundo Almeida (2012) a escolha da matriz de ponderação utilizada para um determinado objeto de estudo pode ser embasada no arranjo de vizinhança com maiores valores para o  $I_{Moran\_Global}$ , sendo então apresentado o detalhamento para 2 vizinhos.

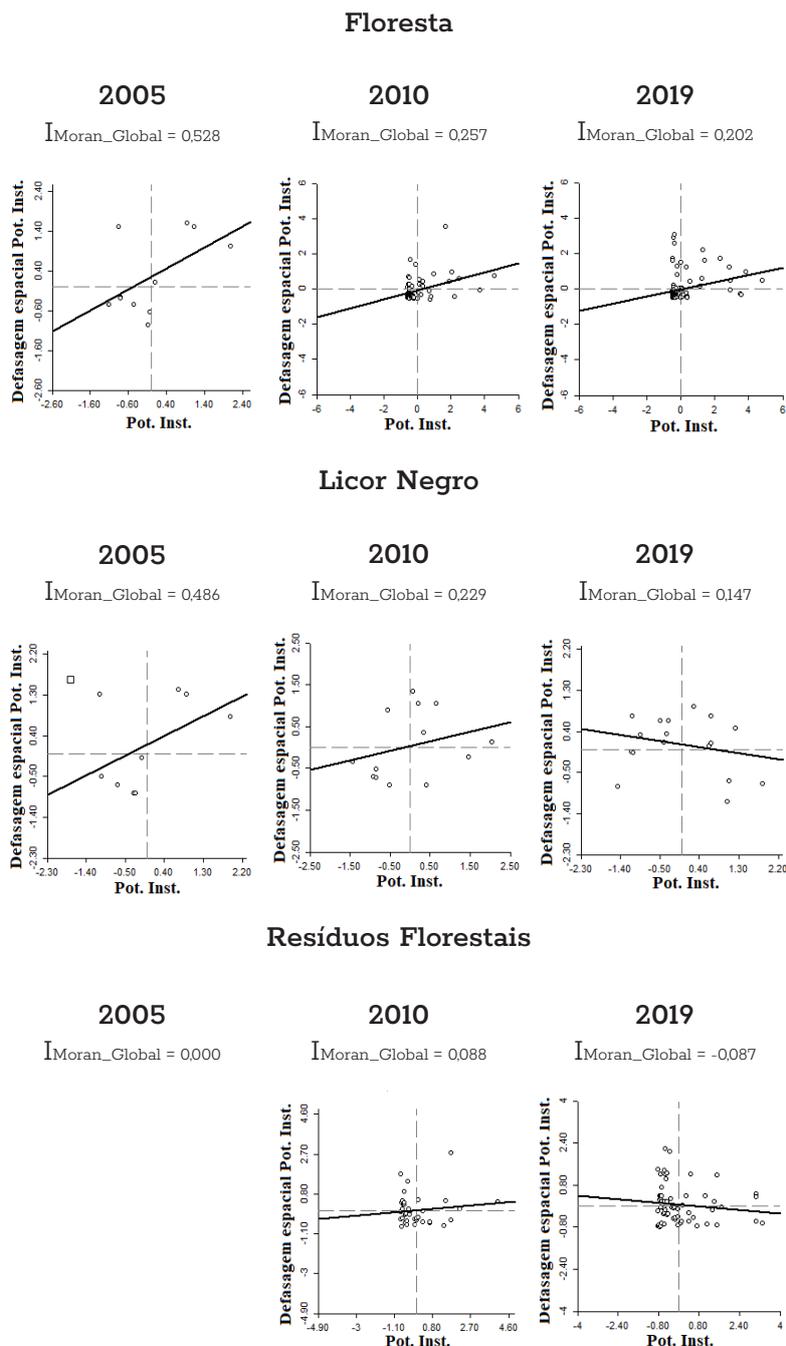
A Figura 17 que apresenta o diagrama de dispersão do  $I_{Moran\_Global}$  da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1 e 2, para a matriz de 2 vizinhos mais próximos, para 2000, 2010 e 2019. Para o nível 1 (florestal), em 2000, o  $I_{Moran\_Global}$  foi 0,528, apontando tendências de autocorrelação espacial positiva, com elevada significância estatística. Nas observações AA estiveram as usinas Suzano Mucuri – Bahia (92,00 MW), Aracruz – ES (142,90 MW) e Cenibra – MG (100,00 MW), formando um complexo na região do sul da Bahia e do norte do Espírito Santo e Minas Gerais. Para 2010, com a entrada de 60 novas termelétricas, houve diminuição na autocorrelação ( $I_{Moran\_Global} = 0,257$ ).

Os principais pontos de alavancagem para o índice foram identificados como as usinas Suzano Mucuri – Bahia (92,00 MW) e Veracel - Bahia (126,60 MW), indicando um novo conglomerado no estado baiano. Em 2019, o  $I_{Moran\_Global}$  foi 0,202, a maior parte das observações apresentaram centralidade no plano, com poucos pontos de alavancagem no quadrante 1, todos associados as usinas de licor negro.

Para o nível de licor negro houve decréscimo no  $I_{Moran\_Global}$  para todos os anos; apenas em 2000, a existência do complexo de alta entre MG-BA-ES, como observado para o nível florestal, elevou o valor do índice. Durante a década de 2010, a expansão e implementação de novos sistemas, pelos grupos Klabin S.A. e Suzano Celulose S.A., no estado do Paraná, Mato Grosso do Sul e Maranhão, ocasionou a queda na autocorrelação espacial. O nível de resíduos florestais só apresentou 2 termelétricas para 2000, dessa forma o  $I_{Moran\_Global}$  não foi calculado. Para 2010, a

autocorrelação foi praticamente nula, assim como em 2019. Os principais pontos de alta foram as térmicas Onça Pintada – MS (50,00 MW) e Ripasa – SP (53,48 MW), as quais participam de um conglomerado entre a região de Três Lagoas – MS e o estado de São Paulo.

**Figura 17.** Diagrama de dispersão do IMoran\_Global da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1 e 2, para a matriz de 2 vizinhos mais próximos, para 2000, 2010 e 2019.



## Gás de Alto Forno

2005

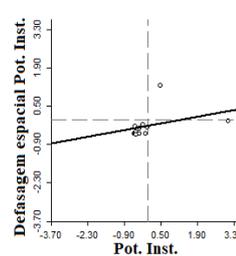
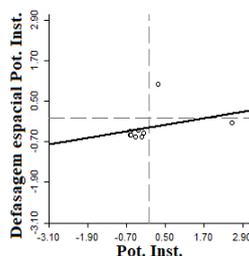
$I_{\text{Moran\_Global}} = 0,000$

2010

$I_{\text{Moran\_Global}} = 0,162$

2019

$I_{\text{Moran\_Global}} = 0,176$



## Carvão Vegetal

2005

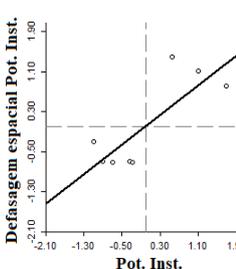
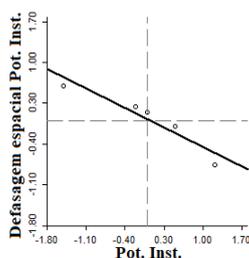
$I_{\text{Moran\_Global}} = 0,000$

2010

$I_{\text{Moran\_Global}} = 0,480$

2019

$I_{\text{Moran\_Global}} = 0,744$



## Lenha

2005

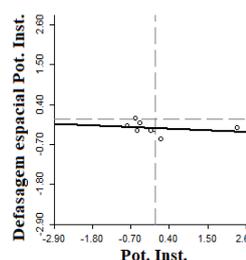
$I_{\text{Moran\_Global}} = 0,000$

2010

$I_{\text{Moran\_Global}} = 0,000$

2019

$I_{\text{Moran\_Global}} = 0,038$



Para o gás de alto forno houve autocorrelação espacial positiva significativa, com destaque para pontos de alavancagem das termelétricas Usiminas e Usiminas 2, ambas localizadas no estado de Minas Gerais e relacionadas ao setor siderúrgico. O carvão vegetal foi o recurso com menor valor para o  $I_{\text{Moran\_Global}}$ , em 2010, indicando autocorrelação espacial negativa, resultado da descentralização da oferta do recurso, com usinas de alta potência no estado do Maranhão e térmicas, com baixa disponibilidade, no estado de Minas Gerais.

Em 2019, a correlação tornou-se positiva, principalmente com a implementação de termelétricas nos polos mineiro e maranhense. Para a lenha, o índice foi calculado apenas em 2019, dado o baixo número de participantes, com valor de  $-0,038$ , sem significância estatística; assim, notou inexistência de autocorrelação espacial.

A Figura 18 apresenta a distribuição espacial do  $I_{Moran\_Local}$  da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1, para a matriz de 2 vizinhos mais próximos, para 2000, 2010 e 2019. Em 2000, Figura 18.a, observou-se 5 localizações (termelétricas) significativas para aglomeração espacial. Para configuração AA, anotou-se 2 termelétricas: a Suzano Mucuri – Bahia (92,00 MW), Cenibra – MG (100,00 MW) e Aracruz Celulose (210,40 MW) as quais apresentaram uso do licor negro na geração de eletricidade. Para o padrão BA, houve uma observação, a Central Termelétrica de Geração (1,8 MW), a qual apresentou vizinhança com a CMPC (47,00 MW) e a Klabin Correia Pinto (37,82 MW). Para a associação BB também se notou apenas uma usina, a CMPC (47,00 MW), localizada em Gaíba – RS, este empreendimento apresentou expansão durante a década de 2000, embora tenham apresentado significância estatística, estes resultados estiveram relacionados a apenas 11 termelétricas instaladas, o que resulta em influência na análise do  $I_{Moran\_Local}$ .

Em 2010, Figura 18.b, foram identificadas oito termelétricas com associação espacial significativa. Para a associação AA houve 3 termelétricas destacadas, o agrupamento esteve sobre os estados da Bahia e Minas Gerais, com três termelétricas: Usiminas II (63,15 MW), para o gás de alto forno e a Bahia Pulp (13,60 MW) e Suzano Mucuri (92,00 MW), utilizando licor negro e associadas as indústrias de celulose e papel. Marques (2015) destacou a importância dos estados da Bahia como um dos grandes polos brasileiros para as indústrias de papel e celulose, o que pode justificar o *cluster* de alta potência.

Apenas a Brasil Bio Fuels (16,00 MW), localizada em São João da Baliza – RR, apresentou classificação de baixa capacidade outorgada com vizinhança baixa (padrão BB) A associação de BA apresentou 2 usinas, foram: a Vetorial - MS (6,94 MW) e vizinhança com a PIE-RP – SP (27,80 MW) e Vetorial Corumbá – MS (10,00 MW); e a e Usiminas (18,81 MW), com vizinhança com a Usiminas II – MG (63,15 MW) e Cenibra - MG (100,00 MW). A associação espacial AB foi identificada para as usinas Rondon II – RO (24,00 MW) e a Jari Celulose – PA (55,00 MW), as quais representaram 66,42% da oferta da bioeletricidade florestal do Norte do país.

**Figura 18.** Distribuição espacial do  $I_{Moran\_Global}$  da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1, para a matriz de 2 vizinhos mais próximos, para 2000, 2010 e 2019.

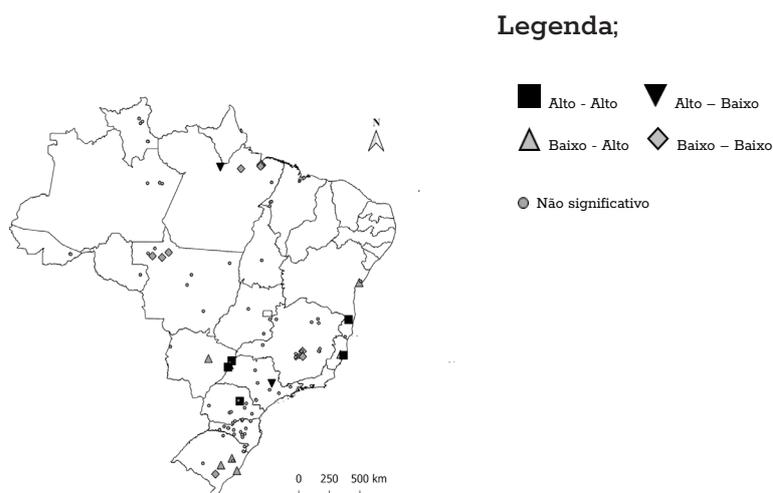
(a)



(b)



(c)



No ano de 2019, Figura 18.c, foi identificada associação espacial significativa para 26 usinas. O padrão espacial BB foi o com maior quantidade de casos, 11 termelétricas apresentaram este nível de associação. Destacou-se como *clusters* de baixa potência, o conglomerado no estado do Pará (Breves, Juruá Florestal, Pampa, Ebata e Tramontina), o do Mato Grosso (Egídio, Atos e Guaçu), além das termelétricas Siderpa e Metalsider, localizadas em Minas Gerais e a Piratini, do Rio Grande do Sul.

Para configuração AA destacaram-se as usinas Fibria MS (175,10 MW) e Fibria MS-II (269,58 MW), ambas do município de Três Lagoas – MS, a Onça Pintada (50,00 MW), localizada em Aparecida do Taboado, também no estado do MS, e a Klabin (132,50 MW), situada no estado do Paraná. Observou-se duas usinas para este padrão, a Veracel (117,04 MW), na Bahia e a Aracruz (210,40 MW), no Espírito Santo, ambas utilizando o licor negro como recurso energético.

Para 2019, notou-se sete agrupamentos do tipo BA: Madem – RS (1,00 MW), Central Termelétrica da Geração – RS (1,80 MW), João Neiva – ES (3,50 MW), Cargill-Três Lagoas (6,00 MW), Vetorial – MS (6,94 MW), ERB Candeias – BA (16,79 MW), CGVE Innova – RS (30,00 MW), de forma geral, a vizinhança com grandes empresas do setor de celulose e papel provocaram este efeito sobre a distribuição. Para o padrão AB estiveram as termelétricas: Ripasa (53,48 MW), utilizando resíduos florestais e localizada em Limeira – SP, e a Jari Celulose, do município de Almeirim – PA, com uso de licor negro.

A Figura 19 apresenta a distribuição espacial do  $I_{Moran\_Local}$  da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 2, para a matriz de contiguidade “rainha”, para 2000, 2010 e 2019. O nível de licor negro apresentou resultados significativos para todo o período analisado. Em 2000, observou-se o padrão espacial AA, com as usinas da Suzano Mucuri, Cenibra e Aracruz, assim como notado para o nível 1 – floresta. Para o padrão BB estiveram a CMPC – RS (47,00 MW) e a Klabin – PR (48,85 MW), usinas com pequeno potencial no ano de 2000. Para 2010, a Suzano Mucuri e Veracel, ambas na Bahia, e a Cenibra constituíram como localizações de alta (padrão AA). A entrada de usinas entre 2010 e 2019 dissolveu os clusters de alta potência, encontrados nos anos anteriores.

**Figura 19.** Distribuição espacial do  $I_{Moran\_Local}$  da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 2, para a matriz de contiguidade "rainha", para 2000, 2010 e 2019.

### Licor Negro

2000



2010



2019



### Resíduos Florestais

2000



2010



2019

### Gás de Alto Forno

2000



2010



2019

## Carvão Vegetal

2000

2010

2019



Legenda: ■ Alto - Alto ▼ Alto – Baixo ▲ Baixo - Alto ◆ Baixo – Baixo ● Não significativo

Em 2019, observou-se apenas uma usina para o padrão AA, a Fibria MS – MS, com 175,10 MW outorgados, com vizinhança com a Lwarcel (36,42 MW) e a Fibria MS II – MS (269,58 MW). Para o padrão espacial BB esteve a Nobrecel – SP (3,20 MW) e de associação AB, com a usina CMPC–RS, que apresentou expansão tecnológica, alcançando 250,99 MW. Para o nível de resíduos florestais foram encontrados padrões espaciais significativos em 2010 e 2019. Em 2010, identificou-se para o padrão AA, a usina de resíduos florestais PIE-RP – SP (27,80 MW) e para o nível BB estiveram as usinas Pampa – PA (0,55 MW), Primavera do Leste – MT (8,00 MW) e Fazenda Santa Marta (3,60 MW).

Os *outliers* de baixa potência, ou seja, usinas de baixa potência outorgada, com vizinhança alta foram: a Gaseifamaz I – SP (0,03 MW), a Energia Madeira – SC (4,00 MW) e a Sguario Itapeva – SP (2,81 MW). O padrão espacial AB apresentou a térmica Rondon II – RO (24,00 MW), como destacado para o nível floresta.

Em 2019, observou-se padrão espacial AA para as termelétricas ERB Candeias – Bahia (16,79 MW), e CGVE Innova – RS (50,00 MW). Para a relação BB, observou-se 7 termelétricas, as observações foram semelhantes ao nível floresta, tendo em vista que a grande quantidade de usinas de resíduos florestais para potência outorgada da bioeletricidade florestal no Brasil. As usinas foram: Santo Antônio – PA (0,06 MW), Juruá Floresta - PA (0,40 MW), Pampa – PA (0,55 MW), Ebata (0,80 MW) e Tramontina (1,50 MW), indicando um polo de baixa oferta no estado do Pará; completaram as usinas: Egídio – MT (2,00 MW) e a Piratini – RS (10,00 MW).

Foram identificados *outliers* do tipo BA e AB. Para o padrão BA estiveram as termelétricas: Gaseifamaz – SP (0,03 MW), Laminados – AC (1,50 MW), Florevale – MG (2,52 MW), Rações Patense – MG (3,00 MW), Fazenda Santa Marta – MG (3,60 MW), Forespel – RS (3,70 MW), Lanxess Cogeração – SP (4,50 MW) e a Cargill – Três Lagoas (6,00 MW). Dentre as localizações BB e BA foi possível notar que, em geral, as usinas do sul do país apresentaram maior potencial outorgado médio para a bioeletricidade dos resíduos florestais. Para o AB estiveram a Floraplac – PA (20,00 MW), a Guaçu – MT (30,00 MW), a Granol – PO e a Cargill Uberlândia – MG (25,00 MW) outorgada, com as térmicas Madem – RS (1,00 MW), Iguaçu-Ibicuí-Termo-1-2-4 – RS (3,10 MW) e Cargill Três Lagoas – MS (6,00 MW).

Para o nível do gás de alto forno, em 2010, identificou-se um conglomerado de baixa, onde estiveram as usinas: Plantar – MG (5,00 MW), Calsete – MG (2,00 MW), Siderpa - MG (2,4 MW), todas no município de Sete Lagoas, e a Metalsider - MG (8,8 MW). Houve domínio do estado de

Minas Gerais sobre a oferta nacional a partir deste recurso. Em 2019, as termelétricas Calsete, Siderpa e Plantar continuaram com o mesmo padrão espacial, sendo adicionada Siderúrgica Barão de Mauá – MG (1,20 MW) e a Usitrar Eco – Energy – MA (2,40 MW).

Para o carvão vegetal, em 2010, identificou-se *outliers*, para configuração AB esteve a termelétrica Barreiro - MG (12,20 MW). Para o nível BA esteve a Cisam – MG (2,00MW), embora sob significância de 10%, os resultados para 2010 foram associadas apenas 5 termelétricas, o que pode ocasionar a observação de todo o universo amostral pela matriz de contiguidade rainha. Para 2019 houve um cluster de alta (AA) localizado no estado do Maranhão, participaram a Simasa – MA (8,00 MW), a Gusa Nordeste – MA (10,00 MW) e a Viena – MA (12,20 MW). Para o padrão espacial BB registrou-se a João Neiva - ES (3,50 MW). Não houve padrão espacial significativo para a oferta da lenha.

## 6. CONCLUSÃO

O estudo realizado apresentou a importância da biomassa florestal na oferta de eletricidade no Brasil, a qual demonstrou grande crescimento nas duas últimas décadas (2000 a 2019). Após as análises chegou as seguintes conclusões:

Há um alta localização para a oferta a partir do licor negro (Sul, Bahia, Maranhão, Pará e Mato Grosso do Sul) e de resíduos florestais, em diversos estados, com destaque para a região Norte e Sudeste. Para a concentração em nível estadual, os índices CR(4) e CR(8) apontaram média de concentração moderadamente alta, com diminuição no período analisado e o *HHI* apontou baixa concentração, indicando distribuição atomizada. Destacaram como principais estados o Paraná, Bahia, Espírito Santo e Mato Grosso do Sul. Dentre as firmas observou-se destaque das termelétricas de licor negro, sendo a Aracruz e Suzano Mucuri (2000 a 2012) e a Klabin Celulose a partir de 2013. O ingresso de novas térmicas resultou um cenário de baixa concentração para o CR(4), CR(8) e *HHI*; o *H* e *G* indicaram um leve aumento na desigualdade. Este estudo possibilitou o entendimento da disponibilidade brasileira de bioeletricidade florestal e de sua organização mercado.

Observou-se também aumento na polarização entre os estados e as termelétricas para a biomassa florestal, com ênfase no crescimento da bipolarização. Entre as fontes de nível 2, notou o domínio do licor negro e dos resíduos florestais sobre a oferta nacional, acarretando a existência de polos na oferta.

A AEDE apontou diminuição da autocorrelação espacial para a potência outorgada da bioeletricidade florestal de 2000 a 2019. Para o nível floresta os principais pontos de alavancagem estiveram no estado da Bahia, associado as usinas de licor negro. Para as fontes de nível 2, o carvão vegetal apresentou os maiores valores para o índice, com elevada autocorrelação espacial negativa, em 2010 e positiva, em 2019. Destacou-se também o gás de alto forno, com  $I_{Moran\_Global}$  positivo e com pontos de alavancagem no estado de Minas Gerais. Da análise local notou a existência de algumas regiões de alta potência, principalmente, destacando: o eixo Bahia, Espírito Santo e Minas Gerais, as térmicas do Paraná e as do Mato Grosso do Sul.

De maneira geral, este trabalho pode auxiliar o desenvolvimento científico das análises espaciais da bioeletricidade florestal, identificando os centros de oferta da bioeletricidade florestal e destacando as termelétricas que utilizam da cogeração. Esta pesquisa pode auxiliar estudos de viabilidade de implementação de empreendimentos de energia e contribui com os investidores e formuladores de políticas, principalmente da indústria da madeira, a partir do destaque das regiões e polos industriais com maior desenvolvimento da bioeletricidade florestal. Assim, será possível obter melhores tomadas de decisão sobre a localização de futuras instalações, auxiliando na diversificação da matriz elétrica nacional e favorecendo o aumento da segurança e eficiência energética do Brasil.

## 7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: fev. 2020.

ALMEIDA, E. **Econometria espacial**. Campinas–SP. Alínea, 2012.

ALONSO, W. **Location and land use**. Toward a general theory of land rent. Cambridge, Mass.: Harvard Univ. Pr. 1964.

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S. **BNDES 50 Anos** - Histórias Setoriais: O Setor Siderúrgico. 2003.

ANSELIN, L. **Spatial Econometrics: methods and models**. Boston: Kluwer Academic, 1988.

ANSELIN, L. **The Moran Scatterplot as an ESDA tool to assess local instability in spatial association**. California: Santa Barbara, 1996.

BAIN, J. **Industrial organization**. New York: J. Wiley, 1959. 274 p.

BONASSA, G.; SCHNEIDER, L. T.; CANEVER, V. B.; CREMONEZ, P. A.; FRIGO, E. P.; DIETER, J.; TELEKEN, J. G. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2365-2378, 2018.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos avançados**, v. 21, n. 59, p. 185-193, 2007.

BRZEZINSKI, M. Income polarization and economic growth. **National Bank of Poland working paper**, n.147, p. 1 – 38, 2013.

BURTLESS, G. The progress and distribution of US living standards, 1959–1995. **The North American Journal of Economics and Finance**, v. 8, n. 2, p. 111-133, 1997.

CARVALHO, R. L.; DE ASSIS, P. C. L. **Coque Verde de Petróleo**: Uma visão geral sobre qualidade, produção no Brasil e exterior e suas aplicações. PETROBRAS SA. 2007.

CARVALHO, R.M. M. A.; SOARES, T. S.; VALVERDE, S. R. Caracterização do setor florestal: uma abordagem comparativa com outros setores da economia. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 1, p. 105-118, 2005.

CAVALCANTE, L. R. Produção teórica em economia regional: uma proposta de sistematização. **Revista brasileira de estudos regionais e urbanos**, v. 2, p. 9-32, 2008.

CESPRINI, E.; RESENTE, G.; CAUSIN, V.; URSO, T.; CAVALLI, R.; ZANETTI, M. Energy recovery of glued wood waste—A review. **Fuel**, v. 262, p. 116520, 2020.

CHARUMBIRA, M.; SUNDLE, T. Seller Concentration in the Grain Milling Industry. **American Journal of Economics and Business Administration**, v. 2, n. 3, p. 247-252, 2010.

CHRISTALLER, W. **Central places in southern Germany**. Trans. Charlisle W. Baskin. London: Prentice Hall, 1933.

- COELHO JUNIOR, L. M.; BURGOS, M. C.; SANTOS JÚNIOR, E. P. Concentração regional da produção de lenha da Paraíba. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 4, p. 1729-1740, out./dez. 2018.
- COELHO JUNIOR, L. M.; BURGOS, M. C.; SANTOS JUNIOR, E. P.; PINTO, P. A. L. A. Regional Concentration of The Gross Production Value of Firewood in Paraíba. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 3, p. e20170887, 2019.
- COULTER, P. B. **Measuring inequality: A methodological handbook**. Routledge, 2019.
- CRAWLEY, A.; BEYNON, M.; MUNDAY, M. Making Location Quotients More Relevant as a Policy Aid in Regional Spatial Analysis. **Urban Studies**, v. 50, n. 9, p. 1854–1869, 20 jul. 2013.
- CROMLEY, R. G.; HANINK, D. M. Focal location quotients: Specification and applications. **Geographical Analysis**, v. 44, n. 4, p. 398-410, 2012.
- CUENCA, G. M. A.; DOMPIERI, M. H. G. Dinâmica espacial da canavicultura e análise dos efeitos sobre o valor bruto da produção, na região dos tabuleiros costeiros da Paraíba, Pernambuco e Alagoas. **Rev. Econ. NE**, v. 47, n. 4, p. 91–106, 2016.
- DARMAWAN, A.; HARDI, F.; YOSHIKAWA, K.; AZIZ, M.; TOKIMATSU, K. Electricity production from black liquor: A novel integrated system. **Energy Procedia**, v. 142, p. 23–28, 2017.
- DEMIRBAS, A. Reuse of wood wastes for energy generation. **Energy Sources, Part A**, v. 31, n. 19, p. 1687-1693, 2009.
- DINESHA, P.; KUMAR, S.; ROSEN, M. A. Biomass Briquettes as an Alternative Fuel: A Comprehensive Review. **Energy Technology**, v. 7, n. 5, p. 1801011, 2019.
- DAWSON, R. How significant is a boxplot outlier? **Journal of Statistics Education**, v. 19, n. 2, p. 1–13, 2011.
- DOS SANTOS, D. R.; ROCHA, P. M.; COSTA, V. G.; SOARES, Y. L. S. Economic and Financial Performance of the Brazilian Pulp and Paper Industry. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, n. 7, p. 622 – 634, 2019.
- DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; C MARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Planautina, DF, EMBRAPA Cerrados, 2004. 209 p.
- DUCLOS, J. Y.; ESTEBAN, J.; RAY, D. Polarization: concepts, measurement, estimation. **Econometrica**, v. 72, n. 6, p. 1737-1772, 2004.
- DURO, J. A.; PADILLA, E. Cross-Country Polarisation in CO2 Emissions Per Capita in the European Union: Changes and Explanatory Factors. **Environmental and Resource Economics**, v. 54, n. 4, p. 571–591, 10 abr. 2013.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Nota técnica DEA 02/09 – **Caracterização do uso da energia no setor siderúrgico brasileiro**. Brasília – DF, 2009.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Brazilian Energy Balance 2019 Year 2018. **EPE - Empresa de Pesquisa Energética**, p. 303, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Séries Históricas**. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>. Acesso em: 20 jan. 2020.

ENERDATA. **Global Statistical Yearbook 2019**. Enerdata itelligence + Consulting, 2019. Disponível em: <https://yearbook.enerdata.net/>. Acesso em: 06 fev. 2020.

ENERDATA. **Global Statistical Yearbook 2020**. Enerdata itelligence + Consulting, 2020. Disponível em: <https://yearbook.enerdata.net/>. Acesso em: 06 set. 2020.

ESTEBAN, J.; RAY, D. On the measurement of polarization. **Econometrica**. v. 62, n. 4, p. 819-851, 1994.

ESTEBAN, J.; GRADÍN, C.; RAY, D. An extension of a measure of polarization, with an application to the income distribution of five OECD countries. **The Journal of Economic Inequality**, v. 5, n. 1, p. 1-19, 2007.

ESTEVEVES, H. B. B.; BICALHO, L. M. N. O.; OLIVEIRA FILHA, M. T. A. A Diferenciação de Preços na Comercialização de GLP: Um Problema Regulatório ou de Política Pública? **Agência Nacional do Petróleo**, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2009.

FANTINEL, V. D. **Ensaio sobre polarização de renda do Brasil**. 2017. 126 f. Dissertação (Doutorado em Economia) - Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **FAO Data**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em: 20 ago. 2020.

FOSTER, J. E.; WOLFSON, M. C. Polarization and the decline of the middle class: Canada and the U.S. **The Journal of Economic Inequality**, v. 8, n. 2, p. 247–273, 2010.

FOTHERINGHAM, A. S. Trends in quantitative methods I: stressing the local. **Progress in Human Geography**, v. 21, n.1, p. 88-96, 1997.

FRACARO, G.; VAKKILAINEN, E.; HAMAGUCHI, M.; SOUZA, S. N. M. Energy efficiency in the Brazilian pulp and paper industry. **Energies**, v. 5, n. 9, p. 3550-3572, 2012.

GEORGE, K.; JOLL C. **Organização industrial: crescimento e mudança estrutural**. Rio de Janeiro: Zahar, 1983.

GHAFFARIYAN, M. R.; ACUNA, M.; BROWN, M. Analysing the effect of five operational factors on forest residue supply chain costs: A case study in Western Australia. **Biomass and Bioenergy**, v. 59, p. 486-493, 2013.

GINI, C. Variabilità e mutabilità (1912). In: PIZETTI, E.; SALVEMINI, T. (Ed.). **Reprinted in memorie di metodologica statistica**. Rome: Libreria Eredi Virgilio Veschi, 1955.

GOERNDT, M. E.; AGUILAR, F. X.; SKOG, K. Resource potential for renewable energy generation from co-firing of woody biomass with coal in the Northern U.S. Biomass and **Bioenergy**, v. 59, p. 348–361, 2013.

- GOODCHILD, M. The validity and usefulness of laws in geographic information Science and geography. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 94, n. 2, p.300- 303, 2004.
- GUO, M.; SONG, W.; BUHAIN, J. Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 712–725, 2015.
- HADDAD, P. R. **Medidas de localização e de especialização**. In: HADDAD, P. R. et al. (Org.). *Economia regional: teorias e métodos de análise*. Fortaleza: BNB-ETENE, 1989.
- HALL, R. L.; HITCH, C. J. Price theory and business behavior. **Economic Papers**, Oxford, v. 2, n. 1, p. 12-45, 1939.
- HARIHARAN, A. N.; BISWAS, A. A. Critical review of the Indian Knowledge-based industry location policy against its theoretical arguments. **Regional Science Policy & Practice**. p. 1-24, 2019.
- HIRSCHMAN, A. O. **Estratégia do desenvolvimento econômico**. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1961. Edição original de 1958.
- HOFFMANN, R.; NEY, M. G. A recente queda da desigualdade de renda no Brasil: análise de dados da PNAD, do Censo Demográfico e das Contas Nacionais. **Econômica**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, p. 7-39, jun. 2008.
- HUANG, Y.; LEUNG, Y. Measuring regional inequality: a comparison of coefficient of variation and Hoover concentration index. **The Open Geography Journal**, v. 2, n. 1, p. 25-34, 2009.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2019**. [s.l: s.n.]. Brasília: IBÁ, 2019. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: jun. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Classificação nacional de atividades econômicas**. Disponível em: <https://cnae.ibge.gov.br/?view=divisao&tipo=cnae&versao=9&divisao=02>. Acesso em: jan. 2020.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics>, Acesso em: jul. 2020.
- ISARD, W. **Location and space economy**: a general theory relation to industrial location, market areas, land use trade and urban structure. Cambridge: MIT Press, 1956.
- ISARD, W. **Methods of regional analysis**. The M.I.T. Press, Massachusetts,1960.
- JENKINS, S. P. Did the middle class shrink during the 1980s? UK evidence from kernel density estimates. **Economics letters**, v. 49, n. 4, p. 407-413, 1995.
- JING, N.; CAI, W. Analysis on the spatial distribution of logistics industry in the developed East Coast Area in China. **The Annals of Regional Science**, v. 45, n. 2, p. 331-350, 2010.
- JUVENAL, T.L.; MATTOS, R.L.G. O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 16, p. 3-29, 2002.

- KABIR, M. M.; RAJENDRAN, K.; TAHERZADEH, M. J.; HORVÁTH, I. S. Experimental and economical evaluation of bioconversion of forest residues to biogas using organosolv pretreatment. **Bioresource Technology**, v. 178, p. 201–208, 2015.
- KIZHA, A. R.; HAN, H. S. Forest residues recovered from whole-tree timber harvesting operations. **European Journal of Forest Engineering**, v. 1, n. 2, p. 46-55, 2015.
- KON, A. **Economia Industrial: teoria e estratégias**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2017. 256p.
- KRUGMAN, P. Increasing returns and economic geography. **Journal of Political Economy**, v. 99, n. 3, p. 483–499, 1991.
- LABINI, P.S. **Oligopólio e progresso técnico**. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1980. 360p.
- LANDES, W. M.; POSNER, R. A. Market power in antitrust cases. **Harvard Law Review**, v. 94, n. 5, p. 937-996, 1981.
- LODDER, C. A. Padrões locacionais e desenvolvimento regional. **Revista Brasileira de Economia**, v. 28, n.1, p. 3-128, 1974.
- LOONEY, B. **BP statistical review of world energy 2020**. BP Statistical Review, London, UK. Disponível em: <https://www.bp.com/>. Acesso em: 1 set. 2020.
- LÖSCH, A. **The Economics of Location**. Translated in 1954 by WH Woglom and WF Stolper. Yale University, New Haven, CT. 1940.
- LIU, G.; MIRZAEI, A.; VANDOROS, S. The impact of bank competition and concentration on industrial growth. **Economics Letters**, v. 124, n. 1, p. 60-63, 2014.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002.
- MANTAU, U.; SAAL, U.; PRINS, K.; STEIERER, F.; LINDNER, M.; VERKERK, H.; EGGERS, J.; LEEK, N.; OLDENBURGER, J.; ASIKAIEN, A.; ANTTILA, P. Real potential for changes in growth and use of EU forests. Hamburg: EUwood, **Methodology report**, 2010.
- MARSHALL, A. (1920). **Princípios de economia**. São Paulo: Nova Cultural, 1984.
- MEDEIROS, M. **Medidas de desigualdade e pobreza**. Editora Universidade de Brasília, 2012.
- MEDINA, H. **Consideraciones sobre el índice de Gini para medir la concentración del ingreso**. Cepal, 2001.
- MIRANDA, R. C.; BAILIS, R.; VILELA, A. O. Cogenerating electricity from charcoaling: A promising new advanced technology. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 2, p. 171-176, 2013.
- MONASTÉRIO, L. Indicadores de análise regional e espacial. In: CRUZ, B. O.; FURTADO, B. A.; MONASTERIO, L.; JÚNIOR, W. R. **Economia Regional e Urbana: Teorias e Métodos com ênfase no Brasil**. Brasília: IPEA, 2011. p. 17-42.

- MULLIGAN, G. F. Equality measures and facility location. **Papers in Regional Science: The Journal of the RSAI**, v.70, n.4, p. 345–65, 1991.
- MURPHY, J. D.; POWER, N. M. An argument for using biomethane generated from grass as a biofuel in Ireland. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 504–512, 2009.
- MYRDAL, G. Teoria econômica e regiões subdesenvolvidas. Belo Horizonte: Biblioteca Universitária – UFMG, 1960. Edição original de 1957.
- NAQVI, M.; YAN, J.; DAHLQUIST, E. Black liquor gasification integrated in pulp and paper mills: A critical review. **Bioresource technology**, v. 101, n. 21, p. 8001-8015, 2010.
- NORGATE, T.; HAQUE, N.; SOMERVILLE, M.; JAHANSHAH, S. Biomass as a source of renewable carbon for iron and steelmaking. **ISIJ international**, v. 52, n. 8, p. 1472-1481, 2012.
- NORTH, D. **Agriculture in regional economic growth**. **Journal of Farm Economics**, v. 41, n. 5, p. 943-51, 1959.
- OLUGBADE, T.; OJO, O.; MOHAMMED, T. Influence of binders on combustion properties of biomass briquettes: a recent review. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 2, p. 241-259, 2019.
- PALAURO, G. R. **Caracterização do mercado de combustível de aviação: um estudo de Organização Industrial**. 2015. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, 2015. Acesso em: 21 de fevereiro de 2020.
- PEDROSO, L. L. A.; SILVA, F. F.; SILVA, F. F.; MELO, A. M.; ERTHAL JUNIOR, M.; SHIMOYA, A.; MATIAS, I. O.; SOUZA, C. L. M. Current and future demands for biomass and renewable energy in Brazil and worldwide. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 5, p. 1980-1996, 2018.
- PERLIN, J.; JORDAN, P. Running out: 4200 years of wood shortages. **The Convolution Quarterly** (Spring), Sausalito, p. 18-25, 1983.
- PERLOFF, J.; CARLTON, D. **Modern industrial organization**. Pearson/Addison Wesley, 2005.
- PEROBELLI, F. S.; ALMEIDA, E. S.; ALVIM, M. I. S. A.; FERREIRA, P. G. C. Produtividade do setor agrícola brasileiro (1991-2003): uma análise espacial. **Nova Economia**, v. 17, n. 1, p. 65–91, abr. 2007.
- PERROUX, F. O conceito de polo de desenvolvimento. In: SCHWARTZMAN, J. (Org.). **Economia regional: textos escolhidos**. Belo Horizonte: Cedeplar, p. 145-156, 1977. Edição original de 1955.
- PIACENTI, C.; ALVES, L. R.; LIMA, J. F. O Perfil Locacional do Emprego Setorial no Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 39, n.3, p. 482-502, jul./set. 2008.
- PORTER, M. E. **The Competitive Advantage of Nations** (London and Basingstoke). Basingstoke, Macmillan, 1990.
- POSSAS, M. L. **Estruturas de Mercado em Oligopólio: economia e planejamento**. 2ª ed. São Paulo: Hucitec, 1999. 191 p.

- RAMESH, S.; CHAURASIA, A. S.; MAHALINGAM, H.; RAO, N. J. Kinetics of Devolatilization of Black Liquor Droplets in Chemical Recovery Boilers-Pyrolysis of Dry Black Liquor Solids. **Int J Chem Eng Appl**, v. 4, p. 1–5, 2013.
- RESENDE, M. Medidas de concentração industrial: uma resenha. **Revista Análise Econômica**, Porto Alegre, v. 12, n. 21, p. 24-33, jul./set. 1994.
- RÍOS, M. A. G. **Apuntes de economía regional**. Chile: PNUD, 2010.
- ROSILLO-CALLE, F.; HALL, D. O. Biomass energy, forests and global warming. **Energy Policy**, v. 20, n. 2 pp124–136, 2002.
- ROSILLO-CALLE, F.; WOODS, J. **The biomass assessment handbook**. Routledge. 2012
- SAMPAIO, R.S. **Conversão da biomassa em carvão vegetal**. Situação Atual com Tendências 2025. CGEE- Centro De Gestão e Estudos Estratégicos. Belo Horizonte, 2008.
- SANTOS JÚNIOR, E. P. **Categoria Graduando 1º Lugar**: Concentração e distribuição espacial da oferta brasileira de bioeletricidade florestal. 2019.
- SANTOS, U. P.; DINIZ, C. C. A interação universidade-empresa na siderurgia de Minas Gerais. **Nova Economia**, v. 23, n. 2, p. 279-306, 2013.
- SCOTT, A. J. **On Hollywood**: The place, the industry. Princeton, Princeton University Press, 2005.
- SEDJO, R. A. The economics of forest-based biomass supply. **Energy Policy**, v. 25, n. 6, p. 559-566, 1997.
- SHIMELMITZ, R.; KUHN, S. L.; JELINEK, A. J.; RONEN, A.; CLARK, A. E.; WEINSTEIN-EVRON, M. Ron et al. 'Fire at will': The emergence of habitual fire use 350,000 years ago. **Journal of Human Evolution**, v. 77, p. 196-203, 2014.
- SILVA, I. M.; SANTANA, A. C.; GOMES, S. C.; TOURINHO, M. M. Associação de dados espaciais: uma análise exploratória para desenvolvimento econômico do estado do Pará. **Revista Teoria e Evidência Econômica**, v. 17, n. 36, 2011.
- SILVA, R. R.; MATHIAS, F. R. DE C.; BAJAY, S. V. Potential energy efficiency improvements for the Brazilian iron and steel industry: Fuel and electricity conservation supply curves for integrated steel mills. **Energy**, v. 153, p. 816–824, 2018.
- SLEUWAEGEN SILVA, I. M.; SANTANA, A. C.; GOMES, S. C.; TOURINHO, M. M. Associação de dados espaciais: uma análise exploratória para desenvolvimento econômico do estado do Pará. **Revista Teoria e Evidência Econômica**, v. 17, n. 36, 2011.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **Produção florestal**. 2017. Disponível: <http://www.florestal.gov.br/snif/producao-florestal/producao>. Acesso em: 05 nov. 2019.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **Boletim SNIF 2019**. Disponível em: <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/producao/94-producao-economia-e-mercado-florestal>. Acesso em: jun. 2020.

- SOUSA, E. P.; SOARES, N. S.; SILVA, M. L.; VALVERDE, S. R. Desempenho do setor florestal para a economia brasileira: uma abordagem da matriz insumo-produto. **Revista Árvore**, v. 34, n. 6, p. 1129-1138, 2010.
- SOUZA, N. J. Economia Regional: Conceitos e Fundamentos Teóricos. **Revista Perspectiva Econômica**, Universidade Vale do Rio dos Sinos, Ano XVI, v. 11, n.º. 32, p. 67-102, 1981.
- SUZIGAN, W.; FURTADO, J.; GARCIA, R.; SAMPAIO, S. E. Coeficientes de Gini locacionais–GL: aplicação à indústria de calçados do Estado de São Paulo. **Nova Economia**, v. 13, n. 2, 2003.
- THISSE, J. F. Geografia Econômica. In: CRUZ, B. O; FURTADO, B. A; MONASTERIO, L; JÚNIOR, W. R. **Economia Regional e Urbana: Teorias e Métodos com ênfase no Brasil**. Brasília: IPEA, 2011. p. 17-42.
- THÜNEN, J. H. V. **The isolated state**. New York: Pergamon Press, 1966. Edição original de 1826.
- TOBLER, W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. **Economic Geography**, v. 46, p. 234–40, 1970.
- TOLMASQUIM, M. T. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear** / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord). – EPE: Rio de Janeiro, 2016.
- VALDETARO, E. B.; SILVA, F. L.; RIBEIRO, S. C.; JACOVINE, L. A. G. GONÇALVES, L. A. Contribuição dos créditos de carbono na viabilidade econômica dos contratos de fomento florestal no sul da Bahia. **Revista Árvore**, v. 35, n. 6, p. 1307–1317, 2011.
- VAN KERM, P. Generalized Gini and Concentration coefficients (with factor decomposition) in Stata. **CEPS/INSTEAD**, Di erdange, v. 1, p. 1–12, 2009.
- VARUM, C.; VALENTE, H.; RESENDE, J.; PINHO, M., SARMENTO, P.; JORGE, S. **Economia Industrial: Teoria e exercícios práticos**. 1ª ed. Lisboa: Silabo, 2016.
- WANG, J.; CAMINADA, K.; WANG, C. Measuring Income Polarization for Twenty European Countries, 2004–13: A Shapley Growth-Redistribution Decomposition. **Eastern European Economics**, v. 55, n. 6, p. 477–499, 2017.
- WEBER, A. **Theory of the location of industries**. Chicago: University of Chicago Press, 1929.
- WENG, Q. Local impacts of the post-Mao development strategy: the case of the Zhujiang Delta, southern China. **International Journal of Urban and Regional Research**, v. 22, n. 3, p. 425-442, 1998.
- WOLF, J. P. Biomass combustion for power generation: an introduction. In: ROSENDAHL, L. **Biomass combustion science**, technology and engineering. Woodhead, 2013. p. 3-8.
- WOLFSON, M. C. When inequalities diverge. **American Economic Review**, v. 84, n. 2, p. 353-358, 1994.
- WOO, H.; ACUNA, M.; CHO, S.; PARK, J. Assessment Techniques in Forest Biomass along the Timber Supply Chain. **Forests**, v. 10, n. 11, p. 1018, 2019.

WORLD BANK. **Forest area** (% of land area). World Bank, 2019. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.FRST.ZS>. Acesso em: 2 jan. 2020.

YANG, Y.; WONG, K. K. F. Spatial distribution of tourist flows to China's cities. **Tourism Geographies**, v. 15, n. 2, p. 338-363, 2013.

ZERBINI, F. **Cenário da Madeira FSC no Brasil 2012 – 2013**. São Paulo, SP: FSC Brasil, 2014. p.80.

ZHENG, Q.; LIN, B. Impact of industrial agglomeration on energy efficiency in China's paper industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 1072–1080, maio 2018.