

Evidências da análise espacial na bioenergia florestal para geração eletricidade: uma revisão *

Evidencia de análisis espacial en bioenergía forestal para generación de electricidad: una revisión

Evidence of Spatial Analysis in Forest Bioenergy for Electricity Generation: A Review

Edvaldo Pereira Santos Júnior , Rômulo Simões Cezar Menezes ,
Paulo Rotella Junior , Flávio José Simioni ,
Magno Vamberto Batista da Silva  e Luiz Moreira Coelho Junior  **

Este artigo analisou as evidências da análise espacial na bioenergia florestal para geração de eletricidade, no período de 1980 a 2019. Realizou-se uma análise bibliométrica e revisão sistemática de literatura utilizando os bancos de dados da ISI Web of Knowledge e Scopus. Os resultados mostraram que no período estudado houveram 28 publicações distribuídas em artigos científicos (92,85%) e em artigos de revisão (7,14%). Na análise de conteúdo, destacaram três áreas principais presentes na literatura, foram elas: ambiental, econômico-financeira, e disponibilidade de biomassa. O primeiro estudo foi publicado em 1989, tratando do uso energético biomassa florestal na Zâmbia; todavia observou-se aumento significativo das publicações durante a década de 2010, sendo os Estados Unidos o país com maior contribuição (11 trabalhos). Observou que as análises espaciais podem contribuir como ferramenta de apoio para tomadores de decisão, fornecendo orientação explícita sobre custos, eficiência e localizações ideais para o uso da bioeletricidade florestal.

175

Palavras-chave: energia renovável; bioeletricidade; biomassa

* Recebimento do artigo: 02/05/2022. Entrega da avaliação final: 30/08/2022.

** *Edvaldo Pereira Santos Júnior*: mestre no Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil, e doutorando no Programa de Pós Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN) pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Brasil. Correio eletrônico: edvaldo.junior@cear.ufpb.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1316-2247>. *Rômulo Simões Cezar Menezes*: professor do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Brasil. Correio eletrônico: romulo.menezes@ufpe.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8740-366X>. *Paulo Rotella Junior*: professor do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil. Correio eletrônico: paulo.rotela@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4692-7800>. *Flávio José Simioni*: professor do Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Brasil. Correio eletrônico: flavio.simioni@udesc.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6392-5073>. *Magno Vamberto Batista da Silva*: professor do Departamento de Economia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil. Correio eletrônico: magnovbs@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7196-4139>. *Luiz Moreira Coelho Junior*: professor do Departamento de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil. Correio eletrônico: luiz@cear.ufpb.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5528-7799>.

Este artículo explora la evidencia del análisis espacial en bioenergía forestal para la generación de electricidad desde 1980 hasta 2019. Se realizó un análisis bibliométrico y una revisión sistemática de la literatura utilizando las bases de datos ISI Web of Knowledge y Scopus. Los resultados mostraron que, en el período estudiado, hubo 28 publicaciones distribuidas en artículos científicos (92,85%) y reseñas (7,14%). En el análisis de contenido se destacaron tres áreas principales presentes en la literatura: ambiental, económico-financiera y disponibilidad de biomasa. El primer estudio se publicó en 1989 y trata sobre el uso energético de la biomasa forestal en Zambia. Sin embargo, hubo un aumento significativo de publicaciones durante la década de 2010, siendo Estados Unidos el país con mayor aporte (11 estudios). Se señala que los análisis espaciales pueden contribuir como una herramienta de apoyo para los tomadores de decisiones, brindando orientación explícita sobre costos, eficiencia y ubicaciones ideales para el uso de la bioelectricidad forestal.

Palabras clave: energías renovables; bioelectricidad; biomasa

This article explores the evidence of spatial analysis in forest bioenergy for electricity generation from 1980 to 2019. Bibliometric analysis and systematic literature review were carried out using the ISI Web of Knowledge and Scopus databases. The results showed that, in the period studied, there were 28 publications distributed in scientific articles (92.85%) and review articles (7.14%). Through content analysis, three main areas were highlighted: environmental, economic and financial, and availability of biomass. The first study was published in 1989, dealing with the energy use of forest biomass in Zambia; however, there was a significant increase in publications during the 2010s, with the United States being the country with the most contributions (11 studies). It is concluded that spatial analyzes can contribute as a support tool for decision-makers, providing explicit guidance on costs, efficiency, and ideal locations for the use of forest bioelectricity.

Keywords: renewable energy; bioelectricity; biomass

Introdução

Nas últimas décadas, um dos principais desafios do desenvolvimento econômico está associado à demanda energética, com segurança e sustentabilidade. Além das soluções de eficiência energética, a inserção das fontes renováveis auxilia na garantia desta necessidade global. A bioenergia vem como uma alternativa para complementar o suprimento energético e mitigar às emissões de gases do efeito estufa (GEE). A geração de eletricidade a partir da biomassa promove agregação de valor, proporcionando emprego e renda no setor florestal (Akhtari, Sowlati & Day, 2014; Sánchez-García, Canga, Tolosana & Majada, 2015). Em 2018, o suprimento mundial energético foi 14.2795,69 milhões de tonelada equivalentes de petróleo (tep), onde 13,84% oriundos das energias renováveis, com 1,33 milhões tep (9,30%) da biomassa. A geração de eletricidade foi 26.730,06 Tera Watts hora (TWh) a biomassa apresentou 637,23 TWh (2,38% da geração mundial) com crescimento de 7,14% a.a. (2010 a 2018). Os principais produtos da biomassa para fins energéticos (agroindustriais e florestais) são destinados diretamente, para o aquecimento ou eletricidade e, indiretamente, na cogeração de energia nos processos industriais (International Energy Agency - IEA, 2020; Sun *et al.*, 2013).

Abiomassa florestal para fins energéticos pode ser obtida dos resíduos das atividades madeireiras e arborização urbana. Apresenta vantagens como fácil armazenamento, multiplicidade de conversões (sólido, líquido e gás) e renovabilidade, promovendo o desenvolvimento local na geração de emprego e renda (Demirbaş, 2001; Hall & Scrase, 1998; Openshaw, 2010; Solomon & Luzadis, 2008). Os estudos da biomassa florestal vão além do desenvolvimento das tecnologias de transformação, uma vez que tem efeitos econômicos, sociais e ambientais. Apesar dos diversos campos de pesquisa serem observados, várias lacunas, associadas à bioeletricidade florestal ainda persistem. A literatura apresenta estudos voltados às tecnologias da biomassa para geração de calor como Demirbaş, Balat & Balat (2009), Hu *et al.* (2018) e Tillman (2000) e de eletricidade conforme Bridgwater (2003), González, Riba, Puig & Navarro (2015) e Upreti & Van der Horst (2004). Há outras áreas como os estudos econômicos de acordo Bridgwater, Toft & Brammer (2002), Cardoso, Silva & Eusébio (2019) e Sadhukhan *et al.* (2018) e ambientais com Lewtas (2007) e Randerson *et al.* (2012).

Embora em menor proporção, as análises espaciais estão associadas, principalmente, à disponibilidade e à qualidade da biomassa, também, são abordagens relevantes, contribuindo na compreensão do potencial de utilização em vários setores (Kumar, Sinha, Taylor & Alqurashi, 2015). A existências de lacunas sugerem que a literatura da bioeletricidade florestal pode ser aperfeiçoada. Dane (1990) afirmou que a revisão bibliográfica é uma ferramenta indispensável para avaliação dos limites e lacunas atuais de uma determinada área de estudo. Para tanto, é necessário o conhecimento de palavras-chave, autores e periódicos, associados à pesquisa. Para Linde e Willich (2003), uma revisão sistemática da literatura disponibiliza um conjunto de evidências relacionadas a um processo específico, mediante a aplicação de métodos explícitos e sistematizados de busca, apreciação crítica e síntese da informação selecionada. A análise bibliométrica, assim como a revisão sistemática, fornece informações do crescimento da literatura e do fluxo de conhecimento ao longo do tempo (De Bellis, 2009; Van Raan, 2005).

A revisão sistemática literatura e a análise bibliométrica mapeiam e identificam as possíveis vacâncias na pesquisa de uma determinada temática, além de destacar as fronteiras do conhecimento em que estão associadas (Tranfield, Denyer & Smart, 2003). Saberi, Sahebi & Zerehsaz (2020) afirmaram que a revisão da literatura deve ser realizada através de um ciclo iterativo de palavras-chave apropriadas, pesquisa da literatura e avaliação dos temas estudados. Para a bioenergia florestal os artigos de revisão estiveram voltados a duas temáticas principais: processos tecnológicos para combustíveis energéticos conforme Mazaheri, Akbarzadeh, Madadian & Lefsrud (2019), Mohan, Pittman & Steele (2006), Pradhan, Arora & Mahajani (2018) e a ecologia e as ciências ambientais como Baldocchi (2003), Ingrao *et al.* (2018), Paredes-Sánchez *et al.* (2019), Ranius *et al.* (2018), sendo as análises espaciais para bioeletricidade ainda negligenciados. Em busca de identificar o impacto, o desenvolvimento e as lacunas existentes das questões espaciais associadas aos recursos florestais para fins energéticos. Para tal, analisou as evidências análise espacial na bioenergia florestal para geração eletricidade, de 1980 a 2019.

1. Material e métodos

1.1. Bibliometria e revisão sistemática

Os processos metodológicos da revisão sistemática (**Figura 1**) em planejamento, execução e divulgação, seguindo as orientações de Tranfield *et al.* (2003)

178

1.1.1. Etapa 1. Planejamento da revisão sistemática

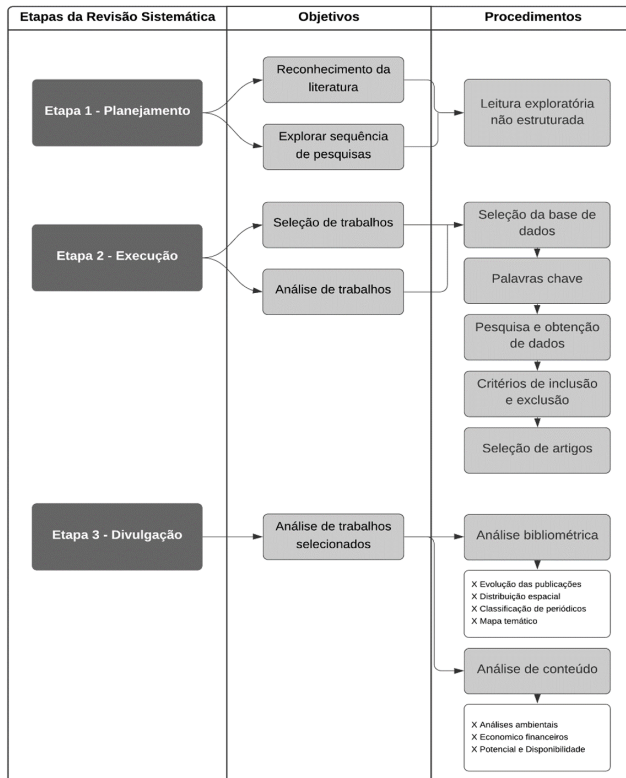
Para reconhecimento das principais abordagens e palavras-chave associadas realizou-se, inicialmente, uma leitura exploratória não estruturada. Observou na literatura os termos recorrentes para a biomassa florestal e foram executadas pesquisas em sequência, para avaliar sua aplicabilidade.

1.1.2. Etapa 2. Execução da revisão sistemática

Essa etapa contemplou a definição da amostra de artigos em periódicos relacionados às análises espaciais da bioeletricidade florestal por meio da consulta nas bases ISI Web of Knowledge (Web of Science - WoS) e Scopus, em abril de 2020, conforme Wang & Waltman (2016). As palavras-chave e o sequenciamento de refino utilizados são apresentadas na **Figura 2** e a busca foi realizada por “Tópicos”.

Foi formado um conjunto de palavras com a lógica Booleana “OR”, favorecendo a identificação de estudos mais estritos, com as seguintes palavras-chave: i) *forest biomass + electricity + spatial analysis*; ii) *forestry biomass + electricity + spatial analysis*; iii) *wood biomass + electricity + spatial analysis*; iv) *forest waste + electricity + spatial analysis*; v) *charcoal + electricity + spatial analysis*; vi) *firewood + electricity + spatial analysis*; vii) *black liquor biomass + electricity + spatial analysis*; e viii) *biomass blast furnace gas + electricity + spatial analysis*.

Figura 1. Resumo descritivo das etapas de revisão sistemática



Fonte: adaptado de Tranfield, Denyer & Smart (2003).

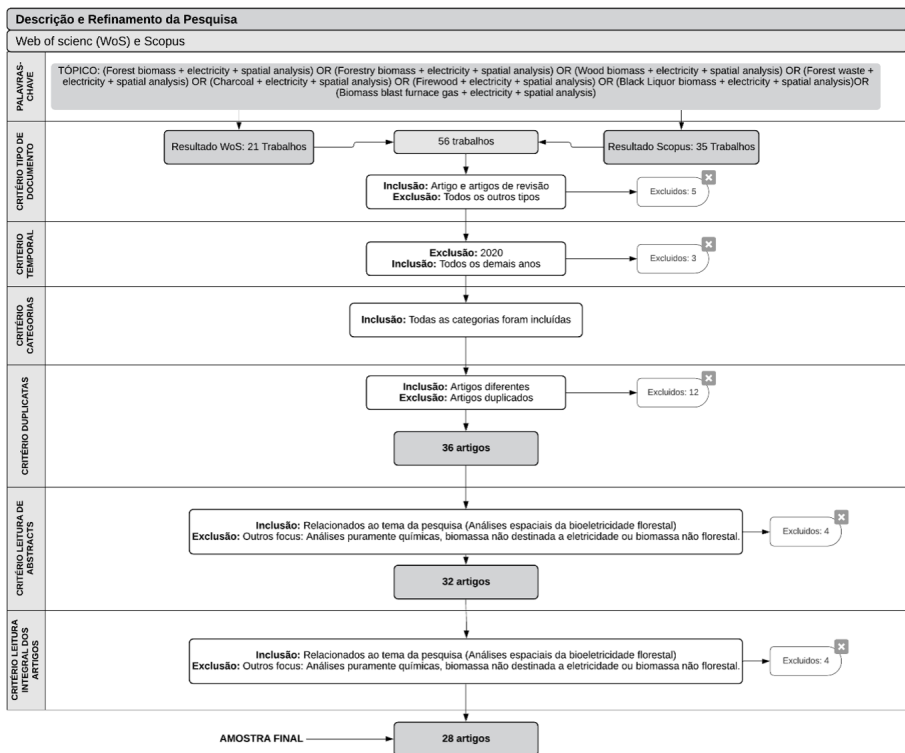
Os critérios de exclusão foram: i) tipo de documento: artigos e artigos de revisão; ii) temporal: de 1989 a 2019; iii) categoria (não houve exclusão para este critério); iv) duplicatas: foram removidos trabalhos em duplicidade nas bases consultadas; v) leitura de abstracts; e vi) leitura integral de artigos: excluiu os artigos estritamente químicas, não destinados a eletricidade e avaliações que utilizaram, exclusivamente, biomassa não florestal. Para Tranfield *et al.* (2003) apenas os trabalhos que atenderam aos critérios de inclusão devem ser mantidos na amostra, sendo importante documentar as pesquisas excluídas em cada critério, chegando à amostra final. Realizou a tabulação e conexão manual dos dados das plataformas WoS e Scopus, em MS Excel, considerando os parâmetros: título, autores, tipo do documento, ano de publicação, país, instituições participantes, área temática, palavras-chave, número de citações e periódicos.

1.1.3. Etapa 3. Divulgação da revisão sistemática

Os resultados da pesquisa tiveram abordagem quantitativa e qualitativas, trazendo a evolução das publicações, distribuição espacial das pesquisas, classificação de

periódicos e mapa temático de palavras-chave. A evolução das publicações (anual e acumulada) de 1989 a 2019, considerando artigo e artigos de revisão. Para a distribuição espacial dos países foram categorizados em quartis: Q1 ($0 < Q1 \leq 25\%$), Q2 ($25\% < Q2 \leq 50\%$), Q3 ($50\% < Q3 \leq 75\%$) e Q4 ($75\% < Q4 \leq 100\%$) (Dawson, 2011; White & Marsh, 2006). Os mapas foram elaborados com o *software* QGIS 3.10.1. Observou a classificação dos periódicos pelo fator de impacto (JCR - Journal Citation Reports e SJR - Scientific Journal Rankings) e citações. Montou-se os clusters temáticos, por meio do *software* VOSViewer 1.6.11.

Figura 2. Etapas da pesquisa para análises espaciais da bioeletricidade florestal



Fonte: os autores.

Na análise de conteúdo, de forma flexível, identificou as áreas com maior impacto para os estudos espaciais da bioeletricidade florestal. Bezerra, Gohr & Morioka (2020) ressaltaram a necessidade de uma boa interpretação no processo de categorização que complementam a temática observada, ficou distribuída em Análises ambientais (AA); Estudos econômico financeiros (EF); potencial e/ou disponibilidade (PD), de acordo com a **Tabela 1** e utilizando o diagrama de Venn. Na avaliação de conteúdo,

buscou-se realizar uma descrição dos objetivos e das principais conclusões dos estudos, observando o impacto na área de classificação e sua contribuição sob o ponto de vista espacial.

2. Resultados e discussão

A **Figura 3** apresenta a evolução das publicações de análises espaciais para a bioeletricidade florestal, de 1989 a 2019. Contabilizou-se 28 artigos na amostra final, sendo 92,86% artigos e 7,14% revisões. Na década de 1980, Chidumayo (1989), com 12 citações, abordou a evolução do desmatamento nas florestas da Zâmbia, atribuindo o uso irrestrito madeira para geração de calor de processo e eletricidade nas indústrias de mineração. O segundo estudo foi identificado apenas na década de 2000, Bryan, Ward & Hobbs (2008), com 43 citações apresentaram um estudo econômico com base em análises espaciais com GIS. A década de 2010 apresentou a maior concentração de publicações, com 26 artigos. O crescimento de novos trabalhos foi em razão da importância do uso sustentável da madeira, das políticas de incentivos ao uso de energias renováveis, da diversificação da matriz energética e pela busca por eficiência energética, principalmente nos países da União Europeia e Estados Unidos. Os trabalhos mais citados foram Cambero, Sowlati, Marinescu & Röser (2015) (56 citações), Schmidt, Leduc, Dotzauer, Kindermann & Schmid (2010) (43 citações) e Steubing *et al.* (2014) (42 citações) e 2018 foi que teve mais publicações (6 artigos).

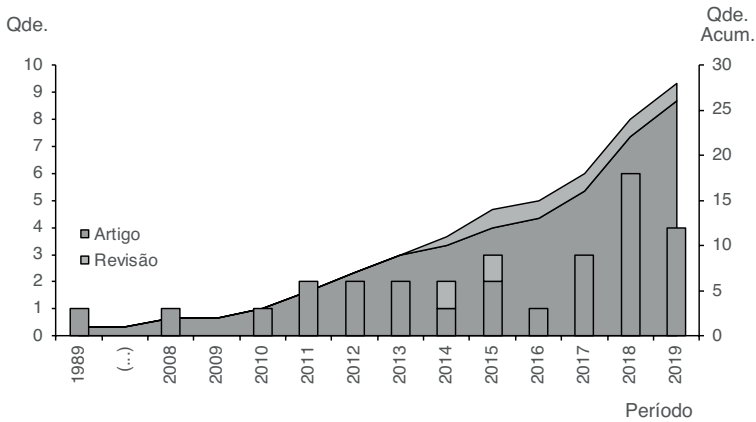
Tabela 1. Classificação das análises espaciais da bioeletricidade florestal

181

Classificação	Definição
Análises ambientais (AA)	Estudos relacionados aos impactos ambientais: desmatamento florestal, erosão e emissões de gases do efeito estufa (GEE).
Estudos econômico-financeiros (EF)	Avaliação de investimentos e/ou custos para bioeletricidade florestal, seleção de porte e localizações ótimas para instalação de termelétricas.
Potencial e/ou disponibilidade (PD)	Avaliação de cobertura vegetal disponível para utilização na bioeletricidade florestal.

Fonte: os autores.

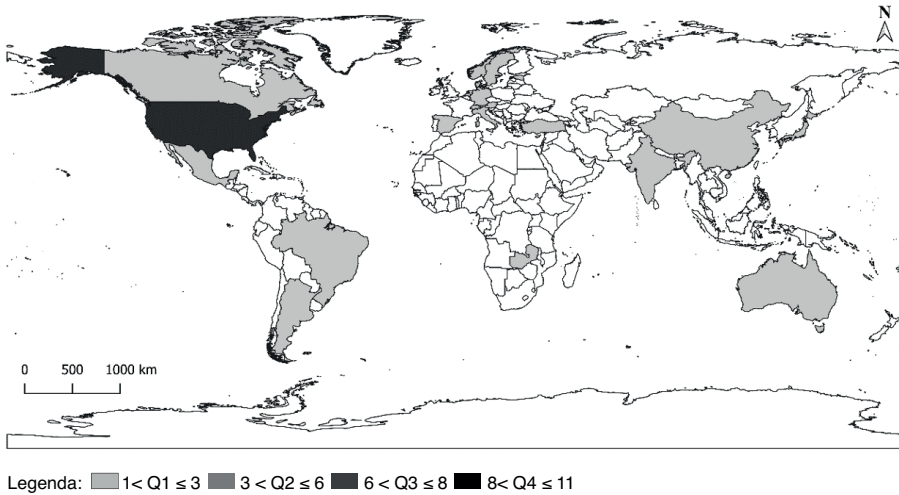
Figura 3. Evolução das publicações para análises espaciais da bioeletricidade florestal, de 1989 a 2019



Fonte: os autores.

A **Figura 4** apresenta o quartil das publicações para análises espaciais da bioeletricidade florestal. Ao todo, 20 países participaram das publicações das análises espaciais. O Q4 foi apenas, sendo a Universidade do Missouri a com mais publicações (3 artigos) e dentre os principais financiadores estiveram a United States Department of Agriculture - USDA (2 artigos) e o Instituto Nacional de Alimentos e Agricultura americano (NIFA) (2 publicações). A hegemonia norte americana se dá pelas vigentes políticas energéticas que buscam a renovabilidade e descarbonização da matriz energética. Não houve participantes para o Q2 e Q3. No Q1 com 3 publicações estiveram a Áustria, Canadá e Suécia, sendo os principais centros de pesquisa foram a Universidade Técnica da Lulea – Suécia, a Universidade da Colúmbia Britânica – Canadá (2 publicações) e a Universidade de Recursos Naturais e Ciências da Vida da Áustria. Com 2 publicações estiveram a China, Alemanha, Itália, Países Baixos e a Suíça, que tiveram a Universidade de Wageningen e a Academia Chinesa de Ciências. Com apenas uma publicação registrou 11 países, como Argentina, Austrália, Brasil, Dinamarca, Índia, Israel, Japão, México, Noruega, Espanha e Zâmbia.

Figura 4. Distribuição espacial, por países, em quartis, da quantidade de publicações científicas, para análises espaciais da bioeletricidade florestal, nas plataformas Web of Science e Scopus, de 1989 a 2019



Fonte: os autores.

A **Tabela 2** apresenta os periódicos de publicação científica e indicadores de fator de impacto e citações, para análises espaciais da bioeletricidade florestal, das plataformas Web of Science e Scopus, de 1989 a 2019. A revista *Biomass and Bioenergy*, contou com 4 artigos e apresentou JCR 3,551 (1.068 citações) e SJR de 1,110 (3.847 citações), para o ano de 2018. O periódico esteve classificado no principal quartil (Q1) da área de estudos florestais (SJR). Os artigos publicados nesta revista foram Stasko *et al.* (2011), Goerndt, Aguilar e Skog (2013), Lundmark, Athanassiadis e Wetterlund (2015) e Jin e Sutherland (2018).

A *Global Change Biology (GCB) Bioenergy* apresentou três artigos nesta área: Verón *et al.* (2012), Oliver & Khanna (2017) e Kalt *et al.* (2018), teve JCR de 5,316, com 364 citações e SJR de 1,810, com 1.613 citações, alcançando o quartil um (Q1) para área florestal e de energia renovável. Com dois artigos, a *Applied Energy* apresentou o segundo maior valor de JCR (8,848), com 29.226 citações e com o maior SJR (3,607) da série, 53.715 citações e pertenceu ao quartil principal na área de energia; os artigos publicados nesse periódico foram: Sun *et al.* (2013) e Sánchez-García *et al.* (2015). Em seguida esteve a *International Journal of Energy Research*, também com duas publicações, com JCR de 3,741 (2.276 citações), SJR de 0,785 (2.824 citações) e ocupou o Q2 para estudos da energia renovável, os trabalhos foram: Schmidt *et al.*

(2010) e Cambero *et al.* (2015). A Sustainability (Switzerland) apresentou os artigos de Viccaro *et al.* (2017) e Hernández, Jaeger & Samperio (2018) e contou com: JCR = 2,576 e SJR = 0,581.

Entre as revistas com apenas uma publicação, a Renewable & Sustainable Energy Review apresentou o maior JCR (12,110), com classificação no primeiro quartil da área de energias renováveis (Q1), o artigo apresentado foi a revisão sistemática de Akhtari *et al.* (2014). A Forest Science foi a revista com menor fator de impacto (JCR =1,693 e SJR =0,556), o periódico apresentou-se no quartil 2 (SJR) dos estudos em silvicultura e em ecologia, registrou o estudo de Pokharel, Grala, Grebner & Cooke, (2019).

Tabela 2. Periódicos de publicação científica e indicadores de fator de impacto e citações, para análises espaciais da bioeletricidade florestal, das plataformas Web of Science e Scopus, de 1989 a 2019

Periódicos	Qde	JCR		SJR	
		Índice	Citações	Índice	Citações
<i>Biomass and Bioenergy</i>	4	3,551	1.068	1,110	3.847
<i>GCB Bioenergy</i>	3	5,316	364	1,810	1.613
<i>Applied Energy</i>	2	8,848	29.226	3,607	53.715
<i>International Journal of Energy Research Sustainability (Switzerland)</i>	2	3,741	2.276	0,785	2.824
<i>Biofuels, Bioproducts and Biorefining</i>	1	4,528	248	1,140	975
<i>Carbon Balance and Management</i>	1	4,067	22	1,475	277
<i>Croatian Journal of Forest Engineering</i>	1	2,500	41	0,733	183
<i>Energy</i>	1	6,082	11.823	2,166	39.993
<i>Energy Science and Engineering</i>	1	2,631	790	0,716	394
<i>Energy Strategy Reviews</i>	1	3,895	399	1,336	694
<i>Forest Science</i>	1	1,693	64	0,556	305
<i>Journal of Cleaner Production</i>	1	7,246	25.176	1,886	72.709
<i>Journal of Forestry</i>	1	2,342	59	0,800	392
<i>Land Degradation & Development</i>	1	3,775	478	1,331	3.440
<i>Land Use Policy</i>	1	3,682	1.666	1,479	6.848
<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	1	12,110	5.629	3,632	58.856
<i>Renewable Energy</i>	1	6,274	9.377	2,052	24.010
<i>Science of the Total Environment</i>	1	6,551	36.482	1,661	66.632
<i>Waste Management</i>	1	5,448	2.494	1,634	11.322

* Nota: Ano base de indicadores: 2019.

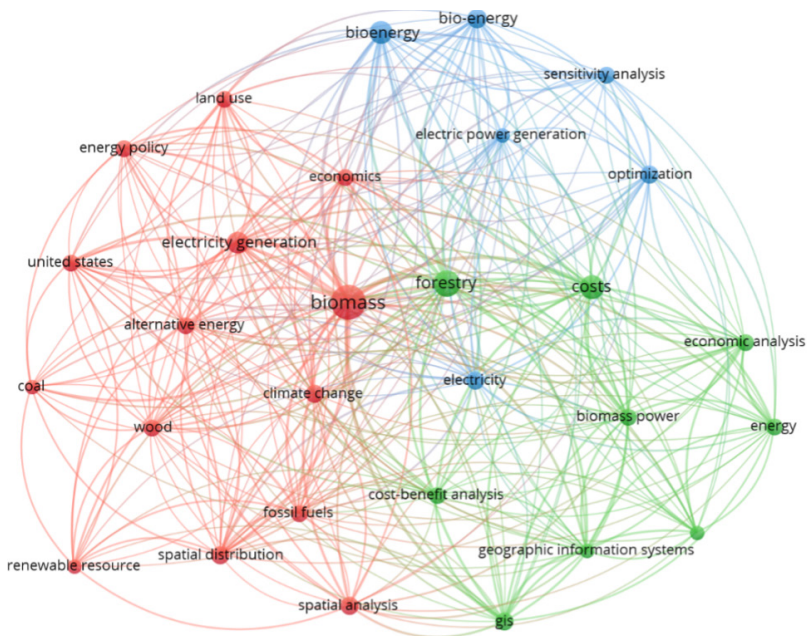
Legenda: Qde = quantidade de artigo; JCR = Journal Citation Reports e SJR = Scientific Journal Rankings

Fonte: os autores (2020).

A **Figura 5** apresenta os clusters temáticos das análises espaciais da bioeletricidade florestal, no período de 1976 a 2019. Embora alguns estudos tenham relação com múltiplas áreas, três grupos principais foram identificados: avaliação do uso da biomassa florestal para cumprimento de políticas de energia e ambiente, otimização da utilização de recursos de bioenergia e análises de custo. A análise das palavras-chave destacou a biomassa (21 ocorrências) como foco das pesquisas e apontou a principal origem do recurso como sendo a silvicultura (12 ocorrências), aumentando a

relevância ambiental das análises. Outro conjunto de relevância foram os custos (10 ocorrências) da produção de madeira para eletricidade e os métodos de exploração do espaço que utilizou dos sistemas de informações geográficas – GIS (10 ocorrências).

Figura 5. Visualização de clústers temáticos, para análises espaciais da bioeletricidade florestal, das plataformas Web of Science e Scopus, de 1989 a 2019



185

Fonte: os autores (2020).

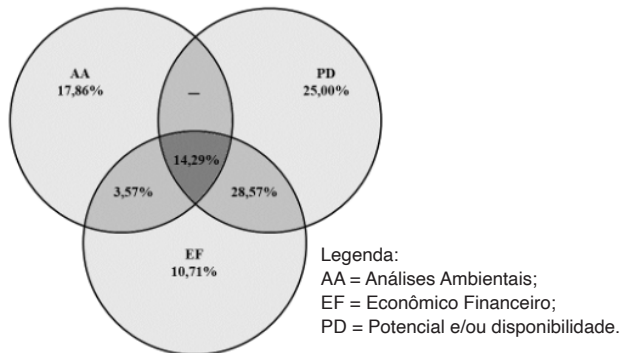
A **Figura 6** apresenta o diagrama de Venn da classificação para análise espacial da bioeletricidade florestal. As análises do potencial e disponibilidade da biomassa representaram 25,00% dos artigos selecionados, seguido das análises ambientais (17,86%) e estudos econômico-financeiros (10,71%). Diversos trabalhos apresentaram mais de uma classificação: 28,57% para EF e PD, 3,57% para AA e EF e 14,29% para todas as categorias.

Foram observados nove trabalhos que retrataram as análises ambientais. Para esta finalidade, o trabalho precursor foi o de Chidumayo (1989), que embora não estabelecesse avaliações de emissões dos GEE, retratou a evolução do desmatamento de florestas nativas no cinturão de cobre a Zâmbia. O autor apontou que a exploração das florestas para produção de lenha e carvão vegetal, destinadas à geração de calor e eletricidade nas usinas siderúrgicas, foi a causa inicial (1931 a 1962) para a retirada de cobertura vegetal na região, porém com o avanço tecnológico

no setor e o uso da hidroeletricidade, a demanda residencial passou a ser o principal passivo ambiental. O estudo trouxe contribuições importantes para análise espacial, utilizando-se de fotografias aéreas para análise de florestas e categorização da área de estudo. Os resultados foram complementados por dados da literatura e consultas feitas em instituições relevantes para determinar as mudanças na cobertura vegetal durante o período de 1937-1984.

Com o avanço tecnológico, as análises ambientais da década de 2000 e 2010 apresentaram avaliações da diminuição de emissões de GEE associadas as práticas de manejo florestal e destinação à bioeletricidade. O uso dos resíduos florestais com finalidade elétrica apresentou-se como viável ambientalmente (Smyth *et al.*, 2018). Todavia, essa utilização ainda é negligenciada em diversas partes do mundo (Kalt *et al.*, 2019) ou altamente dependente do incentivo à descarbonização da matriz elétrica, como em alguns países europeus (Mesfun *et al.*, 2018).

Figura 6. Diagrama de Venn da classificação para análise espacial da bioeletricidade florestal



186

Fonte: os autores.

2.1. Análises ambientais (AA)

Bryan *et al.* (2008) (AA+EF) destacaram ainda que, na Austrália, a produção de biomassa para geração de eletricidade tem o potencial de reduzir a salinidade de rios e erosão eólica, contribuindo para os objetivos ambientais regionais, cujo efeito pode ser extrapolado para diferentes partes do mundo. Em uma análise mais específica, Wang & Luo (2018) investigaram as relações espaciais entre a expectativa de vida de recém-nascidos e a utilização de energia da biomassa na China. Embora não contabilizassem as emissões, os autores foram capazes de identificar que o uso residencial da biomassa florestal para aquecimento causou mais impactos à saúde do que as centrais termelétricas de geração de calor e eletricidade. Os autores indicaram também que sistemas com maior potência (MW) tendem a ter menor impacto ambiental.

Dentre as múltiplas áreas, alguns trabalhos apresentaram integração com as análises ambientais (AA+EF+PD), Aruga, Murakami, Nakahata, Yamaguchi & Yoshioka (2011) destacaram que o uso da bioeletricidade florestal em pequenos sistemas de combustão direta ou de gaseificação apresentam redução significativa nas emissões comparadas aos combustíveis fósseis. Steubing *et al.* (2014) também apontaram que plantas de até 140 MW apresentam redução significativa nas emissões de CO₂ e CHF, sendo a conversão, o processo de maior emissão de poluentes, seguido do custo de transporte de insumos e de colheita. Por sua vez, Jin & Sutherland (2018) indicaram a importância da co-queima da biomassa florestal com carvão mineral em termelétricas e destacaram a utilização de florestas energéticas como positivas para sequestro de carbono no solo. Segundo os autores, a remoção de resíduos de exploração para uso de energia pode evitar as emissões de metano dos processos de decomposição da matéria orgânica. A **Tabela 3** evidencia os autores que contribuíram com estudos acerca da análise espacial da bioeletricidade florestal considerando as áreas de análise de conteúdo.

2.2. Econômico financeiro (EF)

Das análises econômicas foram identificados 16 artigos. A análise econômico-financeira aponta a importância da espacialização de usinas termelétricas sobre a viabilidade de projetos, associado aos elevados gastos com transporte. Stasko *et al.* (2011) apresentaram em sua análise espacial da localização de termelétricas sobre o preço da biomassa florestal para geração de eletricidade no sudeste dos Estados Unidos, a partir de um modelo de programação linear. Os resultados demonstraram que os custos variam significativamente no espaço, implicando na viabilidade (ou não) da usina. Segundo os autores, em algumas localidades as despesas com transporte podem exceder 25% de todo investimento na bioeletricidade florestal.

187

Tabela 3. Referências e citações dos artigos da análise espacial da bioeletricidade florestal, por áreas de análise de conteúdo, de 1989 a 2019

Classificação	Referências	Citações
AA	Chidumayo (1989), Smyth <i>et al.</i> (2018), Mesfun <i>et al.</i> (2018), Wang & Luo (2018) e Kalt <i>et al.</i> (2019).	38
EF	Stasko <i>et al.</i> (2011), Jiang, Searle & Siddiqui (2017), Raviv, Broitman, Ayalon & Kan (2018).	24
PD	Goerndt <i>et al.</i> (2012), Verón <i>et al.</i> (2012), Sánchez-García, Canga, Tolosana & Majada (2015), Oliver & Khanna (2017); Pokharel, Grala, Grebner & Cooke, (2019), Romero <i>et al.</i> (2019), Ruiz <i>et al.</i> (2019).	66
AA+EF	Bryan, Ward & Hobbs (2008).	43
AA+PD	-	-
EF+PD	Schmidt <i>et al.</i> (2010), Sun <i>et al.</i> (2013), Goerndt, Aguilar & Skog (2013), Akhtari <i>et al.</i> (2014), Cambero, Sowlati, Marinescu & Röser (2015), Lundmark, Athanassiadis & Wetterlund (2015), Liu, Johnson & Altman (2016), Viccaro <i>et al.</i> (2017), Hernández, Jaeger & Samperio (2018).	166
AA+EF+PD	Aruga <i>et al.</i> (2011), Steubing <i>et al.</i> (2014), Jin & Sutherland (2018).	114

Legenda: AA = Análises Ambientais; EF = Econômico Financeiro; PD = Potencial e/ou disponibilidade.
Fonte: os autores.

Hernández *et al.* (2018) (AA+EF) realizaram análise de viabilidade para a bioenergia no México e apontaram os gastos com transporte como os principais responsáveis pelo aumento no tempo de retorno do investimento. Os autores destacaram que os altos investimentos podem ser explicados pela compra ou aluguel de caminhões e tratores, distâncias entre florestas e destino final, baixa integração entre áreas florestais e centros de transformação e más condições de infraestrutura rodoviária. Os autores constataram que uma diminuição de 10% no valor destinado ao transporte da madeira, reduziria o custo geral de abastecimento da biomassa para energia, resultando em receitas totais de 13,69 USD/m³ e 0,75 USD/m³ para colheita de resíduos na porção norte do país. Para a região centro-sul, os resultados identificaram um fluxo econômico negativo, com exceção dos resíduos da serraria.

Lundmark *et al.* (2015) apontaram que o desenvolvimento da bioeletricidade florestal esbarra nas incertezas e custos da extração e transporte de matéria-prima. Em estudo de caso para Suécia e com base em dados geograficamente explícitos, os autores notaram maiores investimentos para a extração de madeira para geração de energia (23 a 25 €/m³) do que para a produção de madeira em tora (21 a 24 €/m³). Sun *et al.* (2013) também elaboraram análises considerando investimentos iniciais, operação e manutenção, compra de matéria-prima e de transporte para instalação de termelétricas na província de Fujian, na China. Os autores apontaram resultados positivos para a implementação, com custo médio dos resíduos florestais para geração de eletricidade em 0,43 RMBkW/h (0,15 US\$kW/h). Por sua vez, Schmidt *et al.* (2009) notaram potencial considerável para a produção de calor e eletricidade a partir da biomassa florestal, a níveis de preço entre 52 e 57 €/MWh na Áustria, e destacaram os preços de energia, nível de emissões, bem como os custos de aquecimento urbano, como os parâmetros com maior impacto na produção.

188

Cambero *et al.* (2015) indicaram que a demanda por calor e eletricidade, e o preço que o mercado está disposto a pagar por eles, têm papel importante na decisão de qual tecnologia de bioenergia instalar. Os autores identificaram a combustão em caldeira e a planta de pirólise como as tecnologias mais viáveis e estimaram o Valor Presente Líquido (VPL) de US\$ 565.488.983, para produção de bio-óleo, calor e eletricidade a partir de resíduos de colheita disponíveis e resíduos de serraria, em um intervalo temporal de 20 anos, para o Columbia Britânica no Canadá. O trabalho evidenciou que a questão espacial tem impacto sobre o investimento em bioeletricidade, através dos custos de aquisição de matéria-prima. Em casos específicos, o cultivo de biomassa florestal pode ser mais rentável do que a prática agrícola. Bryan *et al.* (2008) contabilizaram que o uso da biomassa florestal (E. Oleosa), no Corredor Murray na Austrália, poderia retornar um VPL de até US\$ 88 milhões a mais do que o uso do terreno para a agricultura. Outra prática que pode apresentar grande rentabilidade é a co-queima (carvão mineral + biomassa florestal) em usinas pré-existentes. Jin & Sutherland (2018) afirmaram que para os Estados Unidos, usinas híbridas gerarão, até 2042, US\$ 1,86 bilhões em produção bruta, US\$ 0,63 bilhões em atividade de valor agregado e 11.390 empregos em todo o país.

Goerndt, Aguilar & Stasko (2013) realizaram uma análise de custo para o uso da biomassa para queima combinada com o carvão mineral nos EUA. O estudo apontou que metas personalizadas em nível estadual ou municipal são ideais para utilização

do recurso, o que pode servir de base para desenvolvimento em outras regiões do mundo. O trabalho destacou que devido aos elevados custos de aquisição e transporte da madeira, a maioria das termelétricas teria que limitar a distância máxima de transporte de biomassa em 80 a 90 km, o que resulta em elevada competição entre as empresas e diminuição da capacidade de substituição do carvão mineral (menos de 10% poderia ser substituído). Viccaro *et al.* (2017) realizaram estudo de viabilidade sobre o uso de água residual para cultivo de florestas e posterior destinação para geração de bioeletricidade, na região da Basilicata – Itália. Os autores notaram que o processo é economicamente vantajoso para cultivar até 1.606 ha de florestas de rápido crescimento, contribuindo para alcançar os objetivos do plano de políticas energéticas renováveis, com até 90 MW de potência para usinas termelétricas.

Além do problema do transporte, a tecnologia utilizada esteve correlacionada com a viabilidade de projetos das termelétricas. Raviv *et al.* (2018) buscaram a otimização econômica de sistemas de biomassa florestal para eletricidade, em Israel. Os autores identificaram que o custo tecnológico e de transporte eram as variáveis de maior significância. Dentre os processos para geração de eletricidade, a pirólise e a combustão de resíduos apresentaram maior retorno financeiro para região. De forma semelhante, Liu *et al.* (2016) realizaram análise de sensibilidade para investigar como o investimento na queima de biomassa combinada é afetado pela escala da usina, nível de biomassa usada como matéria-prima, disponibilidade local de matéria-prima e investimento financeiro na colheita e transporte, no Missouri – EUA. Os autores observaram que os custos totais de geração são mais altos quando há utilização da co-queima, para todos os locais e cenários analisados. Assim, concluíram que seria necessária uma intervenção política para aumentar significativamente a geração de eletricidade a biomassa.

189

Aruga *et al.* (2011) ressaltaram que a escala selecionada também pode inviabilizar a instalação de sistemas, ao apontar que para a província japonesa de Tochigi, o uso de bioeletricidade é sugerido apenas em nível residencial. Todavia, em estudo de caso para a Suíça & Steubing *et al.* (2014) apontaram que as escalas ótimas econômicas estariam (com algumas exceções) entre 100 e 200 MW, o que demonstra que a viabilidade econômica por escala encontra associação com o espaço estudado. Em escala global, Jiang *et al.* (2017) apresentaram um modelo de equilíbrio de preços espaciais (SPE) sobre o comércio de madeira destinada à geração de eletricidade. Os autores destacaram que o aumento da demanda de biocombustível florestal nos EUA (2,37 milhões de toneladas de biocombustível) e EU (34,78 milhões de toneladas de biocombustível) resultaria em aumento no fluxo de exportações dos países da América Latina, sudeste da Ásia e a antiga União Soviética, explicitando a relação da oferta com condições edafoclimáticas favoráveis.

2.3. Disponibilidade e potencialidade (PD)

A disponibilidade ou potencialidade de recursos é fundamental para o desenvolvimento da bioeletricidade florestal em escala global. Diferentes estudos buscaram compreender a dinâmica e a disposição de biomassa florestal com o destino energético, com base em anuários nacionais e, principalmente, a partir de ferramentas de análises GIS, incorporando em alguns casos, o volume existente e a taxa de crescimento anual

de resíduos. Em escala global, Verón *et al.* (2012) destacaram a importância e o potencial da madeira suscetível a incêndios nas florestas mundiais, que evidenciou elevada quantidade de incêndios nos países tropicais. Os autores destacaram que a África e a América do Sul, foram responsáveis por 48% e 24%, respectivamente, da liberação de energia vinda de incêndios florestais, evidenciando potencial para geração de bioenergia nas regiões; todavia destacou que os custos de operação e transporte para retirada da madeira tendem a desmotivar a utilização energética. Este estudo colaborou com as conclusões de Jiang *et al.* (2017).

Por tratar-se de disponibilidade de recurso, os demais trabalhos foram para estudos de caso, como Goerndt *et al.* (2012) que mapearam a disponibilidade da biomassa florestal nos Estados Unidos e associaram este recurso às termelétricas existentes de carvão mineral, garantindo quantidades mínimas de suprimento para compensar até 19% da geração elétrica a carvão, ou 11% da bioeletricidade total nos estados do norte dos EUA. Associando a disponibilidade de resíduos florestais com a localização de termelétricas, Pokharel *et al.* (2019) avaliaram a probabilidade de uma usina estar disposta a utilizar resíduos florestais como matéria-prima, com base em sua localização, utilizou um modelo de regressão logística espacial ajustado, nos Estados Unidos. Os resultados apontaram que os principais segmentos propensos a utilização dos resíduos seriam os de papel e celulose e as serrarias, se associados a uma malha rodoviária bem desenvolvida ao seu entorno. Aproximadamente 67% das fábricas de produtos compósitos de madeira, 40% das fábricas de celulose, papel e papelão, 11% das fábricas de folheados, 10% das fábricas de post e poste e 7% das serrarias estavam dispostas a usar resíduos adicionais de madeira para produzir eletricidade, o que ressalta a importância de um setor florestal bem consolidado para o desenvolvimento da bioeletricidade.

Sánchez-García *et al.* (2015) criaram um banco de dados geográficos, para contribuir com uma ferramenta de apoio à investigação do potencial do combustível para madeira, na região das Astúrias (norte da Espanha). Registrou-se potencial regional de 438.954,40 t/ano de madeira, considerando condições físicas e legais de exploração, o que ressalta alto potencial para geração de eletricidade e calor, tendo em vista que nas Astúrias a demanda de lenha no setor residencial e industrial foi de 33.009 t/ano e 218.063 t/ano, respectivamente. Os autores trouxeram sua principal contribuição nas múltiplas escalas analisadas: região completa, microrregiões, municípios e áreas especificadas por grandes indústrias da madeira. Embora este trabalho se concentre, necessariamente, em uma região específica, as etapas seguidas e as informações incorporadas podem ser adaptadas para refletir as necessidades particulares de qualquer área, em qualquer escala.

Romero *et al.* (2019) avaliaram a disponibilidade de biomassa florestal (com ênfase na madeira do eucalipto) e agroindustrial em região do estado de São Paulo, Brasil. Os autores estimaram que a produção de madeira, a partir do eucalipto, poderiam fornecer 18% da eletricidade demandada pela região administrativa de Campinas – SP, ressaltando a importância no uso combinado da biomassa florestal com os resíduos de culturas agrícolas, como o bagaço de cana-de-açúcar. Os resultados ampliaram as análises espaciais da bioeletricidade florestal, ao demonstrar os

benefícios da transição de uma economia baseada em combustíveis fósseis para uma bioeconomia.

Ruiz *et al.* (2019) realizaram um estudo para a União Europeia, o trabalho abordou diversas fontes energéticas. Para a biomassa florestal, os potenciais foram estimados em três cenários (alta, média e baixa disponibilidade), relacionados ao uso da terra, práticas agrícolas e áreas de preservação ambiental. A avaliação do potencial de resíduos florestais baseou-se nas estatísticas do Eurostat sobre a geração nacional de resíduos. Os autores ressaltaram que a biomassa da silvicultura ainda apresenta baixa competitividade, mas que por seu aumento de disponibilidade, deve ser um recurso importante para a matriz elétrica dos países europeus (ênfase para a França e a Alemanha), alcançando, para 2030, potencial energético de 2.300 TWh. Embora apresentaram um levantamento de custos, Oliver & Khanna (2017) focaram suas análises, majoritariamente, no potencial da biomassa na matriz energética dos Estados Unidos. A principal contribuição do estudo foi identificar que a biomassa (florestal e agroindustrial) poderia fornecer até 20% da eletricidade renovável necessária para atender programa estaduais de implementação das energias renováveis (RPS - renewable portfolio standards), até 2030.

As análises de potencial e disponibilidade apresentaram as principais contribuições sobre o ponto de vista espacial, pela associação entre oferta e demanda de insumos. Os estudos destacaram abordagens espaciais associadas a diferentes aspectos, tais como a localização de florestas (Romero *et al.*, 2019), áreas de reserva ambiental (Ruiz *et al.*, 2019), existência de indústrias madeireiras e/ou usinas termelétricas (Goerdnt *et al.*, 2012; Pokharel *et al.*, 2019; Sanchez-García *et al.*, 2015), as políticas regionais ou estaduais implementadas (Oliver & Khanna, 2017) e a vulnerabilidade à incêndios (Verón *et al.*, 2012). Diversas análises mostraram com clareza como atribuir os locais das usinas de biomassa, a fim de minimizar o custo e maximizar a segurança do fornecimento de matéria-prima. Sun *et al.* (2013), de forma semelhante ao elaborado por Goerdnt *et al.* (2012), avaliaram o potencial de geração de eletricidade a partir de recursos da biomassa florestal, considerando as florestas existentes e a taxa de crescimento anual de resíduos na província de Fujian na China. Os resultados indicaram que o potencial técnico total do uso combinado de resíduos agrícolas e florestais poderia fornecer até 21,87 TWh/ano, equivalente a aproximadamente 16,6% do consumo total de eletricidade da província, em 2010. O estudo de caso demonstrou eficácia no apoio à tomada de decisão, no planejamento da estratégia espacial da energia de biomassa e sugeriu que os sistemas de energia de biomassa utilizados na região fossem de pequena escala (até 61 MW) e descentralizados (Aruga *et al.*, 2011).

Schmidt *et al.* (2010), a partir de um modelo de programação linear mista (MIP) avaliaram a localização ótima para usinas termoelétricas na Áustria, com base na disponibilidade da madeira, custos de transporte, investimento em plantas de potência e na demanda local de calor e eletricidade, identificando que a utilização da biomassa florestal permitiria produzir até 3,6% do consumo total de energia. O mesmo método foi aplicado por Cambero *et al.* (2015) para otimização da cadeia de suprimento de resíduos florestais na British Columbia, Canadá. O método determinou a localização, tipo e tamanho das térmicas, e supriu uma lacuna sobre a proporção

ideal de biomassa para geração de eletricidade, fabricação de biocombustíveis e geração de calor. Observou-se que os sistemas de caldeiras acopladas a um ciclo Rankine podem ser mais atraentes que a gaseificação, para regiões onde a demanda de calor é pequena comparada à de eletricidade. Com base nos planos de extração de madeira da região para os próximos 20 anos, um VPL de \$ 565.488.983 poderia ser gerado pela produção de bio-óleo, calor e energia a partir de resíduos de colheita disponíveis e resíduos de serraria. Para atingir taxas de produção significativas da biomassa florestal, também é necessária a irrigação e uso mais eficiente do solo. A análise de potencialidade de Viccaro *et al.* (2017) buscou identificar áreas adequadas para a criação de sistemas de filtragem de vegetação para dimensionar plantas. Os resultados indicaram 156 áreas de rotação florestal de rápido crescimento com um VPL positivo, dentro das 39 áreas de estações de tratamento de água, o que indicou aumento da disponibilidade com associação a estas técnicas.

Aruga *et al.* (2011) realizaram levantamento de disponibilidade sobre a pequena região de Tochigi-Japão e foram capazes de dimensionar o tamanho da usina de recurso florestal que poderia ser instalada na localidade (5 MW). A análise de disponibilidade de Steubing *et al.* (2014) consistiu em dois modelos distintos: o primeiro que estimou o potencial espacial da madeira (MASSIMO) e os critérios de sustentabilidade, como restrições biológicas, sociais e econômicas, todavia os autores não admitiram esta análise como o principal fator para instalação de usinas. Por sua vez, Jin & Sutherland (2018) ponderaram que o potencial de resíduos florestais para o EUA, que chegou a 371 milhões de toneladas até 2042, o que poderia suprir a demanda do cenário básico (políticas atuais) para a bioeletricidade florestal, estimado em 3,2 milhões de toneladas. Estudos de Goerndt, Aguilar & Stasko (2013), para o norte dos EUA, Liu *et al.* (2016) para o Missouri - EUA, Lundmark *et al.* (2015) para a Suécia & Hernández *et al.* (2018) para o México, contribuíram com o desenvolvimento das análises de disponibilidade, ressaltando o forte impacto do transporte sobre o uso da biomassa florestal, mesmo em localizações com elevada oferta do recurso. Também deve-se destacar a revisão realizada por Akhtari *et al.* (2014), os autores realizaram avaliação da literatura do uso da biomassa florestal para sistemas distritais, com foco nas análises econômicas das transformações tecnológicas da biomassa. Assim como neste trabalho, destacaram forte impacto da tecnologia de conversão utilizada e dos custos de obtenção da madeira para bioenergia.

Conclusão

Este estudo sistematizou a literatura associada ao uso da biomassa florestal para geração de eletricidade no mundo. Os resultados forneceram uma visão sobre a evolução das pesquisas na área, indicando lacunas para novos estudos com ênfase, nas análises do padrão e distribuição espacial de termelétricas existentes. As análises espaciais podem contribuir como uma ferramenta de apoio aos tomadores de decisão, fornecendo orientação explícita sobre eficiência no uso da bioeletricidade florestal.

A partir das análises realizadas se observou que os estudos da bioeletricidade florestal iniciaram em 1989, porém, a partir de 2010 houve uma maior intensificação dos estudos nesta temática. Foram contabilizados 28 trabalhos para a área, sendo

26 artigos (92,86%) e dois revisões (7,14%). As principais contribuições foram o fornecimento de recurso para geração de eletricidade em termelétricas nos Estados Unidos, Áustria e Canadá. As avaliações do espaço estiveram diretamente ligadas as análises ambientais, econômico-financeiras e de disponibilidade e potencialidade da biomassa florestal.

As análises ambientais associadas ao espaço evidenciaram eficiência do uso da biomassa florestal para diminuição das emissões de GEE, além de ser alternativa viável para o cumprimento de políticas energéticas para os países desenvolvidos. Constatou-se que o processo tecnológico de conversão representa o maior expoente das emissões de poluentes, seguido do custo de transporte de insumos e de colheita. A variável espacial esteve inserida na observação do desmatamento florestal e nas avaliações da diminuição de emissões a partir das práticas de manejo florestal e destinação à bioeletricidade.

As análises econômico-financeiras apontaram que embora o uso da biomassa florestal para geração de eletricidade tenha retorno econômico positivo, os custos de transporte apresentam-se como uma barreira ao seu desenvolvimento; assim como, os processos de colheita e tecnologias de conversão da biomassa florestal. De forma geral percebeu-se que pequenas plantas podem ser ideais, considerando a disponibilidade espacial de recursos. As avaliações espaciais mostraram-se importantes para o aspecto econômico, tendo em vista que a viabilidade de implementação dos sistemas, mostrada nos estudos, variou no espaço.

Associada diretamente à viabilidade econômica, a avaliação de potencial ou disponibilidade, também inferiu sobre a importância do espaço na bioeletricidade florestal. Os estudos apontaram existência de correlação entre a localização dos geradores de energia e áreas com maior desenvolvimento de florestas. Os sistemas de informações georreferenciadas, associados a anuários estatísticos florestais, foram capazes de prever localizações ótimas para o uso do recurso para bioeletricidade.

193

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq por Bolsas de Pesquisa em Produtividade, nº: 310871/2021-2, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES, por meio da bolsa de mestrado nº 88882.440994/2019-01.

Referências bibliográficas

Akhtari, S., Sowlati, T. & Day, K. (2014). Economic feasibility of utilizing forest biomass in district energy systems—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 33, 117-127.

Aruga, K., Murakami, A., Nakahata, C., Yamaguchi, R. & Yoshioka, T. (2011). Discussion on economic and energy balances of forest biomass utilization for small-scale power generation in Kanuma, Tochigi prefecture, Japan. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 32(2), 571-586.

Baldocchi, D. D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global change biology*, 9(4), 479-492.

Bezerra, M. C., Gohr, C. F. & Morioka, S. N. (2020). Organizational capabilities towards corporate sustainability benefits: A systematic literature review and an integrative framework proposal. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119114.

Bridgwater, A. V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical engineering journal*, 91(2-3), 87-102.

Bridgwater, A. V., Toft, A. J. & Brammer, J. G. (2002). A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(3), 181-246.

Bryan, B. A., Ward, J. & Hobbs, T. (2008). An assessment of the economic and environmental potential of biomass production in an agricultural region. *Land Use Policy*, 25(4), 533-549.

Cambero, C., Sowlati, T., Marinescu, M. & Röser, D. (2015). Strategic optimization of forest residues to bioenergy and biofuel supply chain. *International Journal of Energy Research*, 39(4), 439-452.

Cardoso, J., Silva, V. & Eusebio, D. (2019). Techno-economic analysis of a biomass gasification power plant dealing with forestry residues blends for electricity production in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 212, 741-753.

Chidumayo, E. N. (1989). Land use, deforestation and reforestation in the Zambian Copperbelt. *Land Degradation & Development*, 1(3), 209-216.

Dane, F. C. (1990). *Research Methods*. Pacific Grove: Brooks/Cole Publishing Company.

Dawson, R. (2011). How Significant Is A Boxplot Outlier? *Journal Of Statistics Education*, 19(2), 1-13.

De Bellis, N. (2009). *Bibliometrics And Citation Analysis: From The Science Citation Index To Cybermetrics*. Lanham: Scarecrow Press.

Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy conversion and Management*, 42(11), 1357-1378.

Demirbas, M. F., Balat, M. & Balat, H. (2009). Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1746-1760.

Goerndt, M. E., Aguilar, F. X., Miles, P., Shifley, S., Song, N. & Stelzer, H. (2012). Regional assessment of woody biomass physical availability as an energy feedstock for combined combustion in the US northern region. *Journal of Forestry*, 110(3), 138-148.

Goerndt, M. E., Aguilar, F. X. & Sko, K. (2013). Resource potential for renewable energy generation from co-firing of woody biomass with coal in the Northern US. *Biomass and bioenergy*, 59, 348-361.

González, A., Riba, J. R., Puig, R. & Navarro, P. (2015). Review of micro-and small-scale technologies to produce electricity and heat from Mediterranean forests' wood chips. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 143-155.

Hall, D. O. & Scrase, J. I. (1998). Will biomass be the environmentally friendly fuel of the future? *Biomass and Bioenergy*, 15(4-5), 357-367.

Hernández, U., Jaeger, D. & Islas Samperio, J. (2018). Evaluating economic alternatives for wood energy supply based on stochastic simulation. *Sustainability*, 10(4), 1161.

Hu, Q., Yang, H., Xu, H., Wu, Z., Lim, C. J., Bi, X. T. & Chen, H. (2018). Thermal behavior and reaction kinetics analysis of pyrolysis and subsequent in-situ gasification of torrefied biomass pellets. *Energy Conversion and Management*, 161, 205-214.

195

Ingrao, C., Bacenetti, J., Bezama, A., Blok, V., Goglio, P., Koukios, E. G. & Huisingsh, D. (2018). The potential roles of bio-economy in the transition to equitable, sustainable, post fossil-carbon societies: Findings from this virtual special issue. *Journal of Cleaner Production*, 204, 471-488.

International Energy Agency (2020). Data And Statistics 2020. Disponible em: <https://www.iea.org/Data-And-Statistics>.

Jiang, W., Searle, S. & Siddiqui, S. (2017). Analysis of the global wood-chip trade's response to renewable energy policies using a spatial price equilibrium model. *Biofuels, bioproducts and biorefining*, 11(3), 505-520.

Jin, E. & Sutherland, J. W. (2018). An integrated sustainability model for a bioenergy system: Forest residues for electricity generation. *Biomass and Bioenergy*, 119, 10-21.

Kalt, G., Mayer, A., Theurl, M. C., Lauk, C., Erb, K. H. & Haberl, H. (2019). Natural climate solutions versus bioenergy: Can carbon benefits of natural succession compete with bioenergy from short rotation coppice? *GCB Bioenergy*, 11(11), 1283-1297.

Kumar, L., Sinha, P., Taylor, S. & Alqurashi, A. F. (2015). Review of the use of remote sensing for biomass estimation to support renewable energy generation. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1), 097696.

Lewtas, J. (2007). Air pollution combustion emissions: characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 636(1-3), 95-133.

Linde, K. & Willich, S. N. (2003). How objective are systematic reviews? Differences between reviews on complementary medicine. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 96(1), 17-22.

Liu, Z., Johnson, T. G. & Altman, I. (2016). The moderating role of biomass availability in biopower co-firing—A sensitivity analysis. *Journal of cleaner production*, 135, 523-532.

Lundmark, R., Athanassiadis, D. & Wetterlund, E. (2015). Supply assessment of forest biomass—a bottom-up approach for Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 75, 213-226.

Mazaheri, N., Akbarzadeh, A. H., Madadian, E. & Lefsrud, M. (2019). Systematic review of research guidelines for numerical simulation of biomass gasification for bioenergy production. *Energy Conversion and Management*, 183, 671-688.

Mesfun, S., Leduc, S., Patrizio, P., Wetterlund, E., Mendoza-Ponce, A., Lammens, T. & Kraxner, F. (2018). Spatio-temporal assessment of integrating intermittent electricity in the EU and Western Balkans power sector under ambitious CO2 emission policies. *Energy*, 164, 676-693.

196

Mohan, D., Pittman Jr, C. U. & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848-889.

Oliver, A. & Khanna, M. (2017). Demand for biomass to meet renewable energy targets in the United States: Implications for land use. *Gcb Bioenergy*, 9(9), 1476-1488.

Openshaw, K. (2010). Biomass energy: employment generation and its contribution to poverty alleviation. *Biomass and bioenergy*, 34(3), 365-378.

Paredes-Sánchez, J. P., López-Ochoa, L. M., López-González, L. M., Las-Heras-Casas, J. & Xiberta-Bernat, J. (2019). Evolution and perspectives of the bioenergy applications in Spain. *Journal of cleaner production*, 213, 553-568.

Pokharel, R., Grala, R. K., Grebner, D. L. & Cooke, W. H. (2019). Mill willingness to use logging residues to produce electricity: A spatial logistic regression approach. *Forest Science*, 65(3), 277-288.

Pradhan, P., Arora, A. & Mahajani, S. M. (2018). Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass. *Energy for sustainable development*, 43, 1-14.

Randerson, J. T., Chen, Y., Van Der Werf, G. R., Rogers, B. M. & Morton, D. C. (2012). Global burned area and biomass burning emissions from small fires. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117(G4).

Ranius, T., Hämäläinen, A., Egnell, G., Olsson, B., Eklöf, K., Stendahl, J. & Rudolphi, J. (2018). The Effects Of Logging Residue Extraction For Energy On Ecosystem Services And Biodiversity: A Synthesis. *Journal Of Environmental Management*, 209, 409-425.

Raviv, O., Broitman, D., Ayalon, O. & Kan, I. (2018). A regional optimization model for waste-to-energy generation using agricultural vegetative residuals. *Waste Management*, 73, 546-555.

Romero, C. W. D. S., Berni, M. D., Figueiredo, G. K. D. A., Franco, T. T. & Lamparelli, R. A. C. (2019). Assessment of agricultural biomass residues to replace fossil fuel and hydroelectric power energy: A spatial approach. *Energy Science & Engineering*, 7(6), 2287-2305.

Ruiz, P., Nijs, W., Tarvydas, D., Sgobbi, A., Zucker, A., Pilli, R. & Thrän, D. (2019). ENSPRESO-an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100379.

Saberi, M. K., Sahebi, S. & Zerehsaz, M. (2020). Visualization of the Koomesh journal between 2006 and 2017: A bibliometric study. *Koomesh*, 22(1), 1-9.

Sadhukhan, J., Martinez-Hernandez, E., Murphy, R. J., Ng, D. K., Hassim, M. H., Ng, K. S. & Andiappan, V. (2018). Role of bioenergy, biorefinery and bioeconomy in sustainable development: Strategic pathways for Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1966-1987.

Sánchez-García, S., Canga, E., Tolosana, E. & Majada, J. (2015). A spatial analysis of woodfuel based on WISDOM GIS methodology: Multiscale approach in Northern Spain. *Applied Energy*, 144, 193-203.

Schmidt, J., Leduc, S., Dotzauer, E., Kindermann, G. & Schmid, E. (2010). Potential of biomass-fired combined heat and power plants considering the spatial distribution of biomass supply and heat demand. *International Journal of Energy Research*, 34(11), 970-985.

Smyth, C. E., Smiley, B. P., Magnan, M., Birdsey, R., Dugan, A. J., Olguin, M. & Kurz, W. A. (2018). Climate change mitigation in Canada's forest sector: a spatially explicit case study for two regions. *Carbon balance and management*, 13(1), 1-12.

Solomon, B. & Luzadis, V. A. (2008). *Renewable energy from forest resources in the United States*. Routledge.

Stasko, T. H., Conrado, R. J., Wankerl, A., Labatut, R., Tasseff, R., Mannion, J. T. & Knott, G. (2011). Mapping woody-biomass supply costs using forest inventory and competing industry data. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 263-271.

Steubing, B., Ballmer, I., Gassner, M., Gerber, L., Pampuri, L., Bischof, S. & Zah, R. (2014). Identifying environmentally and economically optimal bioenergy plant sizes and locations: A spatial model of wood-based SNG value chains. *Renewable Energy*, 61, 57-68.

Sun, Y., Wang, R., Liu, J., Xiao, L., Lin, Y. & Kao, W. (2013). Spatial planning framework for biomass resources for power production at regional level: A case study for Fujian Province, China. *Applied energy*, 106, 391-406.

Tillman, D. A. (2000). Biomass cofiring: the technology, the experience, the combustion consequences. *Biomass and bioenergy*, 19(6), 365-384.

Tranfield, D., Denyer, D. & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14(3), 207-222.

Upreti, B. R. & van der Horst, D. (2004). National renewable energy policy and local opposition in the UK: the failed development of a biomass electricity plant. *Biomass and Bioenergy*, 26(1), 61-69.

Van Raan, A. F. J. (2005). For your citations only? Hot topics in bibliometric analysis. *Measurement: interdisciplinary research and perspectives*, 3(1), 50-62.

198 Verón, S. R., Jobbágy, E. G., Di Bella, C. M., Paruelo, J. M. & Jackson, R. B. (2012). Assessing the potential of wildfires as a sustainable bioenergy opportunity. *GCB Bioenergy*, 4(6), 634-641.

Viccaro, M., Cozzi, M., Caniani, D., Masi, S., Mancini, I. M., Caivano, M. & Romano, S. (2017). Wastewater reuse: An economic perspective to identify suitable areas for poplar vegetation filter systems for energy production. *Sustainability*, 9(12), 2161.

Wang, Q. & Waltman, L. (2016). Large-scale analysis of the accuracy of the journal classification systems of Web of Science and Scopus. *Journal of informetrics*, 10(2), 347-364.

Wang, S. & Luo, K. (2018). Life expectancy impacts due to heating energy utilization in China: Distribution, relations, and policy implications. *Science of the Total Environment*, 610, 1047-1056.

White, M. D. & Marsh, E. E. (2006). Content analysis: A flexible methodology. *Library Trends*, 55(1), 22-45.