

OPORTUNIDADES DA BIORREFINARIA FLORESTAL: TENDÊNCIAS E DESAFIOS

Autores: José Henrique Camargo Pace, Fernando José Borges Gomes, Roberto Carlos Costa Lelis, Julia de Cristo Figueiredo, Dalila Batista Albertassi, Geraldo Ferreira David, Larisse Aparecida Ribas Batalha¹

¹ Departamento de Produtos Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Brasil

RESUMO

A demanda por produtos alternativos e sustentáveis tem se tornado uma premissa para o setor de Celulose & Papel, que possui grande potencial, pois tem como principal matéria-prima a madeira e como seus principais produtos a celulose – que já é amplamente comercializada – e os licores de cozimento, rico em diversos componentes que podem ser úteis para caminharmos em busca de processos industriais mais ambientalmente corretos. Praticando a assim chamada Biorrefinaria Florestal, a utilização desses derivados da madeira pode apresentar alternativas em sua utilização. Mas o conhecimento de quanto ainda estamos longe ou perto de consolidarmos essas estratégias é uma pergunta recorrente da sociedade e necessária para as empresas e institutos de pesquisas que têm foco nessas aplicações. Com o objetivo de entender o estado da arte de como estão sendo conduzidas as pesquisas e validações das plantas de biorrefinaria em escala piloto ou mesmo insutrial, o presente trabalho apresenta um sucinto panorama sobre as pesquisas para alguns possíveis subprodutos da indústria de Celulose & Papel. Dessa forma, foram analisados o quantitativo desses trabalhos para os últimos cinco anos, vinculados à plataformas de pesquisa e de modo qualitativo. O país que mais apareceu no levantamento foi a China, com mais de 35% dos trabalhos avaliados, seguido do Brasil e Canadá. A maior parte dos trabalhos brasileiros avaliados apresentaram ligações com a produção ou utilização da lignina Kraft, nanoceluloses e lignosulfonatos. Muitas iniciativas em escala piloto têm sido registradas no mundo, principalmente para nanoceluloses e lignina kraft.

INTRODUÇÃO

O rápido crescimento dos mercados e da industrialização, o aumento dos preços dos combustíveis e o potencial esgotamento dos recursos fósseis, bem como o aumento da taxa de emissão de gases de efeito estufa, são algumas das motivações que direcionam à necessidade de se explorar fontes alternativas de energia e produtos químicos que sejam sustentáveis (Yogalakshmi *et al.*, 2023). Na Conferência do Clima da ONU, realizada em 2021 (COP26), foram discutidas as mudanças climáticas e as emissões de gases de efeito estufa, onde se indicou

que a taxa atual de emissões de gases de efeito estufa afeta negativamente o clima mundial (Gundupalli *et al.* 2022). A busca por processos de valorização dos subprodutos e resíduos bem como a necessidade de otimização do uso de recursos renováveis, faz com que o conceito de biorrefinaria lignocelulósica seja considerado como uma das alternativas para o futuro das indústrias de base florestal, uma vez que vai ao encontro das premissas de sustentabilidade demandadas pela sociedade, além de ser uma alternativa para ampliar o portfólio de produtos bem como as receitas dessas empresas. A biorrefinaria engloba processos que convertem a biomassa em biocombustíveis, alimentos, materiais, químicos e energia, sendo seu objetivo principal a utilização eficiente de toda a matéria-prima e insumos utilizados no processo para gerar os compostos de interesse, minimizando os resíduos e maximizando os lucros e benefícios em geral (Kaur *et al.*, 2019; Okolie *et al.*, 2021).

A biomassa lignocelulósica é abundante na natureza e destaca-se de forma a contribuir para uma economia global mais sustentável. Embora o uso das matrizes lignocelulósicas como fonte energética seja bastante viável, estão sendo desenvolvidos outros materiais e compostos utilizando essa biomassa e os resíduos industriais (Carvalhoes, 2016). A partir de transformações químicas ou biológicas é possível obter uma grande gama de compostos chamados de químicos plataformas (*chemical building blocks*) que irão atender a múltiplos setores industriais (Galaverna & Pastre, 2017).

A indústria de Celulose & Papel processa grandes quantidades de materiais lignocelulósicos, e possui grande interesse no uso racional destes, com estratégias de aproveitamento dos subprodutos gerados. Um dos principais interesses nas últimas duas décadas é a produção de bioenergia que empregaram abordagens seletivas e se concentram na conversão de polissacarídeos vegetais em biocombustíveis (Abu-Omar *et al.*, 2021). Porém, há uma vasta variedade de produtos que podem ser gerados além dos biocombustíveis, desde materiais químicos até alimentícios (Alvim *et al.*, 2014).

Um exemplo é o potencial do licor de cozimento, com a aplicação da lignina residual proveniente dos processos de polpação. Atualmente, esse resíduo é queimado com intuito energético e

também de recuperação de reagentes químicos, porém é cada vez mais reconhecido como imprudente ignorar seu valor potencial, já que se trata da maior fonte de aromáticos sustentáveis do planeta (Zakzeski *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2015). Portanto, muitos pesquisadores hoje estão buscando estratégias mais holísticas para utilização de biomassa que atribuem valor substancial tanto à lignina quanto aos polissacarídeos (Abu-Omar *et al.*, 2021). O principal desafio das grandes indústrias é tornar economicamente viável o processo de aproveitamento desses recursos disponíveis (Yogalakshmi *et al.*, 2023).

Com esse intuito, a pesquisa proposta nesse trabalho é estabelecer os principais objetos de estudo na área de biorrefinaria lignocelulósica, e as diversas formas de aproveitamento da matéria-prima lignocelulósica e os produtos de interesse comercial que podem ser gerados.

MÉTODOS

O presente trabalho utilizou os dados disponíveis da plataforma de artigos científicos na internet, a “Science Direct” (www.sciencedirect.com). A metodologia se embasou na utilização de filtros para a procura dos artigos, obtendo um panorama das publicações científicas sobre produtos lignocelulósicos de biorrefinaria. A procura foi dividida em etapas, sendo a primeira quantitativa e a segunda qualitativa.

1. Levantamento quantitativo

Foram estabelecidas sete palavras-chave para direcionar a busca dos artigos, de modo que, todas elas fossem subprodutos lignocelulósicos relacionados com a biorrefinaria. As palavras-chave foram: *Dissolving Pulp*, *Nanocellulose*, *MFC*, *Hemicelluloses*, *Nanolignin*, *Kraft Lignin* e *Lignossulfonates* (polpa solúvel, nanocelulose, MFC, nanolignina, lignina kraft e lignossulfonatos, respectivamente). Se optou por utilizar as palavras em inglês, pois dessa forma a abrangência seria maior, além de ser considerada como língua universal

científica. Visando saber sobre as publicações mais recentes, também se optou por utilizar o filtro dos últimos cinco anos (de 2019 a 2023).

O levantamento desse quantitativo de artigos vinculados à plataforma foi separado em três grupos: i) quantitativo total de artigos publicados para cada ano do filtro (contemplando todo material científico que constava na plataforma vinculada a palavra-chave); ii) o quantitativo total de artigos de revisão bibliográfica e iii) o quantitativo de artigos de cunho experimental para cada ano, sendo os últimos cinco anos.

2. Levantamento qualitativo

O levantamento qualitativo se embasou em algumas informações contidas nos artigos. Após a quantificação do número dos artigos publicados, para as categorias selecionadas, com seus respectivos filtros, foram escolhidos os primeiros trabalhos que apareciam na ordem da plataforma de cada palavra-chave em cada ano. Esse levantamento considerou uma média dos cinco primeiros trabalhos que tratassem a palavra-chave como produto inicial, e que, no decorrer do trabalho, esse produto inicial tivesse uma possível utilização em outro material ou uma melhoria, ou ativação desse produto inicial. Dessa maneira, os trabalhos que se enquadravam nessa condução da pesquisa foram agrupados nas pesquisas experimentais. Trabalhos de revisão bibliográfica ou que tivessem relação com processos produtivos dos produtos, não foram avaliados qualitativamente, pois não tinham como objetivo um produto.

Após selecionar os trabalhos, foram colhidas as informações qualitativas como: a) em qual revista foi publicado; b) qual o fator de impacto da revista; c) qual era a instituição de pesquisa do autor correspondente; d) qual o país da instituição do autor correspondente; e) qual é o continente; f) se o trabalho tinha alguma indústria parceira que forneceu o produto inicial; g) qual o país da empresa e h) qual era o objetivo com produto final do trabalho. A Figura 1 ilustra o fluxograma da pesquisa.

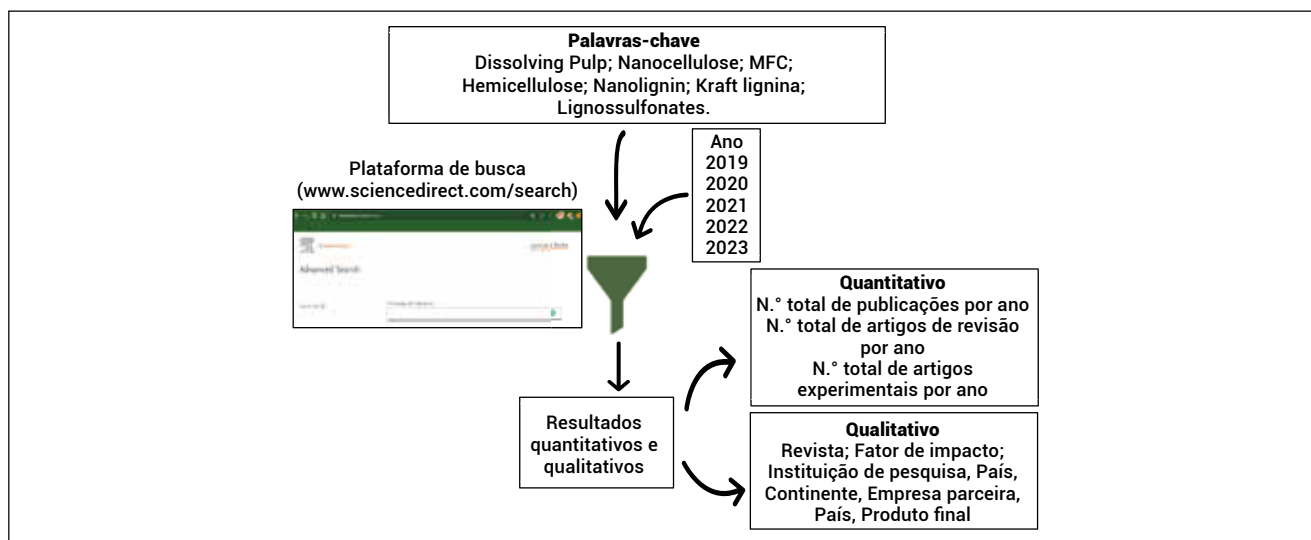


Figura 1. Esquema explicando como funcionou o filtro, utilizando a plataforma ScienceDirect, aplicado para todas as palavras-chave e todos os anos de interesse

Tabela 1. Quantitativo de trabalhos publicados para cada palavra-chave nos últimos cinco anos

Palavras-chave	Ano				
	2019	2020	2021	2022	2023
Polpa Solúvel	5	4	5	3	5
Lignina Kraft	7	7	8	7	5
Lignossulfonatos	5	5	5	5	5
Hemicelulose	7	5	5	6	5
Nanolignina	4	3	4	4	5
Nanocelulose	5	5	5	5	5
MFC	5	5	6	5	5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultados dos dados levantados neste estudo os cinco artigos com pesquisas originais e classificados como mais acessados mundialmente foram analisados para se extrair as linhas de atuação e parcerias com empresas e instituições, dentre os temas de interesse descrito previamente na metodologia. Assim, no levantamento realizado para este trabalho foram analisados integralmente 178 artigos, considerando os últimos cinco anos e as palavras-chave adotadas. Sendo esse quantitativo dos trabalhos analisados apresentado na Tabela 1. Contudo, é relevante observar que o total de artigos publicados para o período foi um número expressivamente superior, com milhares de artigos publicados para cada linha de interesse avaliada nesse estudo, e será apresentado no item 1. A seguir.

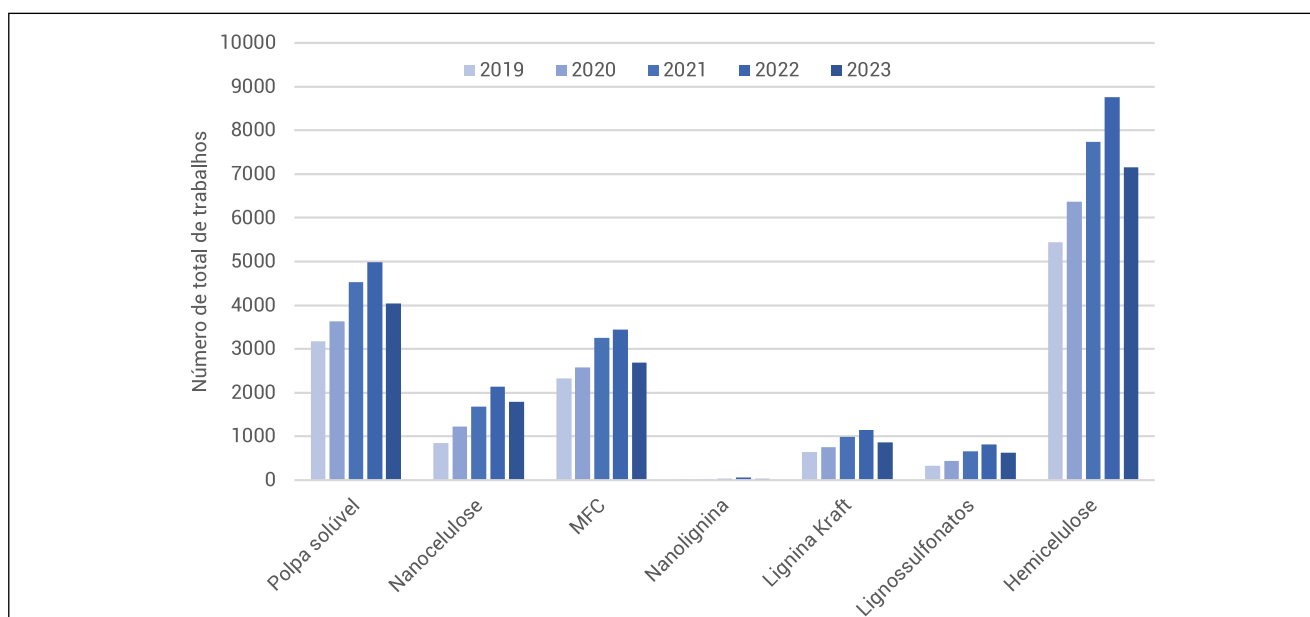
1. Avaliação quantitativa

No levantamento quantitativo foi possível analisar que a palavra-chave que mais apresentou trabalhos na plataforma, independente do ano, foi a Hemicelulose, com total de 35.463 trabalhos, seguida pela Polpa Solúvel, com 20.360, seguidos pela MFC com um total de 14.307 trabalhos publicados nos últimos

cinco anos. A Figura 2 ilustra o quantitativo total dos trabalhos vinculados na plataforma para os últimos cinco anos.

Uma das motivações desse estudo foi, além de estabelecermos as linhas de pesquisa que vêm sendo consideradas como prioritárias no mundo, também entender se a pandemia da Covid-19, que afetou o mundo, impactou o desenvolvimento dessas áreas do conhecimento. Observando o gráfico apresentado na Figura 2, pode-se concluir que as publicações científicas nesse período de pandemia da Covid-19 não reduziram, pois todos os anos superaram os anteriores, de tal forma que o ano de 2022 apresentou um quantitativo igual ou maior que anos anteriores, e o ano de 2023, com os dados analisados para o primeiro semestre apresenta quantitativo de produções significativas. Espera-se que ao final do ano esse quantitativo siga a tendência dos anos anteriores e apresente números superiores aos anos anteriores.

Ao analisar o quantitativo por tema, pode-se observar que a tendência crescente foi a mesma para todas as palavras-chave, ou seja, evidenciam a demanda latente por pesquisas que utilizem materiais renováveis ou produtos biodegradáveis. Esse quantitativo expressa vários trabalhos publicados mundialmente, variando de livros, artigos científicos a *reports*.

**Figura 2.** Quantitativo total de trabalhos publicados para todas as sete palavras-chave, contabilizando os últimos cinco anos

Os trabalhos foram separados em revisão bibliográfica e artigos experimentais (artigos considerados originais e que versam sobre a obtenção de processos ou produtos). Pode-se observar que em todos os anos, o quantitativo de trabalhos que geraram algum tipo de produto foi três vezes maior quando comparados aos trabalhos de revisão bibliográfica, exceto para Nanolignina. Esse resultado pode ser devido à utilização do produto ainda ser considerado recente em meio à indústria, bem como revis-

tas vinculadas à plataforma não terem uma ampla ligação com esta palavra-chave, diferente de todas as outras linhas avaliadas que podem ser classificadas como já consolidadas. Os trabalhos experimentais para Nanolignina em 2021 parearam-se aos trabalhos de revisão bibliográfica e se superaram em 2022 e 2023, expressando o desafio que é trabalhar com lignina em escalas nano estruturais. A Figura 3 ilustra o comportamento quantitativo dos trabalhos vinculados a cada linha avaliada neste estudo.

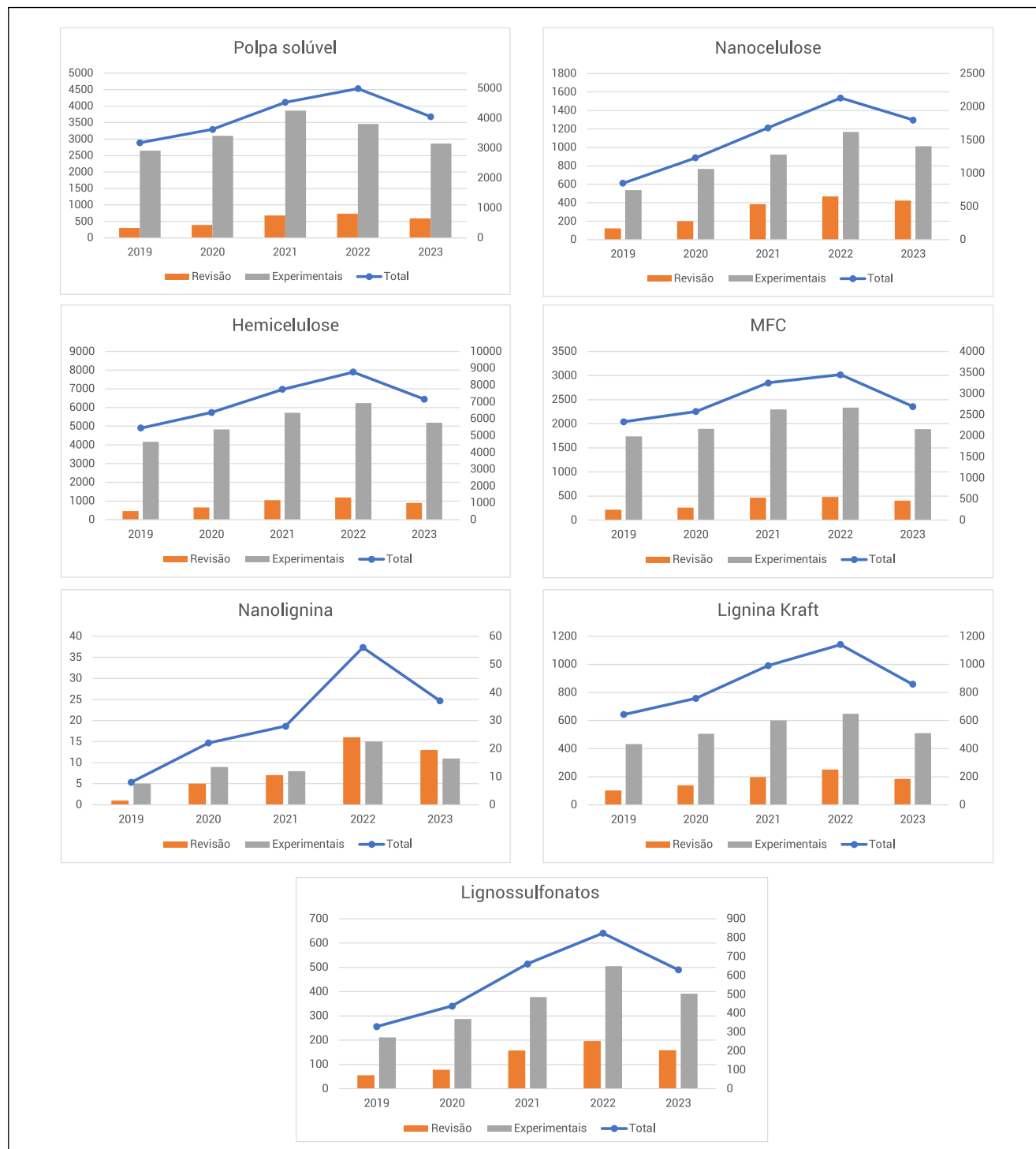


Figura 3. Quantitativo total de publicações na plataforma Science Direct para todas as palavras-chave, com todos os anos, e as duas categorias dos trabalhos, revisão ou experimentais

Importante também observar ainda que, embora os trabalhos experimentais sejam maiores, o quantitativo de publicações bibliográficas é de suma importância, podendo ser notada pela quantidade ser crescente com o passar dos anos. Pesquisas dessa forma podem nortear e sanar dúvidas sobre possíveis experimentações futuras, ajudando em muitos casos no entendimento do produto e suas possíveis aplicações.

2. Avaliação qualitativa

A análise qualitativa proposta nesse trabalho gerou informações importantes tanto para os centros de pesquisas científicas quanto para as empresas produtoras, pois demonstram a sinergia do setor com as instituições de pesquisa.

Foram observados um total de 76 empresas parceiras dos trabalhos analisados. Entre os países que mais se destacam na realização dessas parcerias, aparecem as empresas chinesas em maior sinergia, totalizando 53 citações nos trabalhos selecionados neste estudo.

Avaliando a presença das empresas em nível mundial, pode-se observar que as nacionalidades das empresas que mais participaram dos trabalhos estão entre os maiores produtores de celulose do mundo, Estados Unidos (USA), Brasil, Canadá e China (IBA, 2021). A Figura 4 apresenta por coloração a participação das empresas e seus respectivos países.

A coloração do Brasil (Figura 4) possui uma tonalidade mais intensa, pois além de ser um dos maiores produtores de celulose do mundo, as empresas também participam dos trabalhos desenvolvidos. Isso evidencia a prioridade das inovações, e o protagonismo que o setor de celulose e papel exerce no País. Sendo o Brasil, o terceiro país a apresentar a maior sinergia.

No entanto, numa análise mais crítica percebe-se que, no gráfico da Figura 5, a segunda maior barra, logo após a China, é o dado “não informado”. Isso porque muitos dos trabalhos analisados não apresentaram ou divulgaram ou não tiveram indústria que participasse ativamente. Outra observação é que, dentro desses trabalhos, foi a própria instituição de pesquisa que gerou ou desenvolveu o material inicial de suas pesquisas, e ela mesmo o utilizou em uma outra aplicação. Isso denota que ainda pode ser muito maior a parceria das empresas com os



Figura 4. Mapa de sinergia das empresas com os trabalhos avaliados

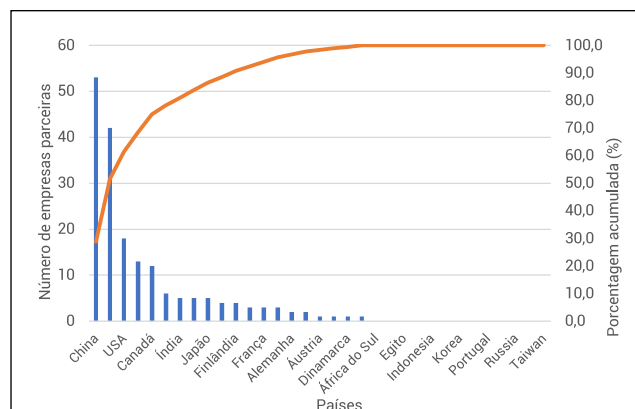


Figura 5. Dados do quantitativos da participação das empresas nos trabalhos, pelos seus respectivos países, indicando o total observado para os últimos cinco anos

centros de pesquisas, para que de fato o que se pesquise nessas instituições venham a atender as demandas da sociedade.

Ao analisar os trabalhos, foi quantificado um total de 121 instituições de pesquisas, presentes em todos os continentes. A maior parte das instituições se encontra no continente asiático, devido à grande quantidade de trabalhos produzidos em instituições e empresas chinesas (Figura 6). Dentre os 76 trabalhos em que os autores correspondentes estavam vinculados a algumas instituições chinesas de pesquisa, temas a Beijing Forestry University como a mais atuante.

Pode-se observar que em todos os anos analisados, a Ásia apresentou mais de 40% do quantitativo. Porém, ao observar a presença da América do Sul em termos de porcentagem, ela reduziu nos últimos anos (2020, 2021, 2022 e 2023) comparados com 2019, assim como a América do Norte.

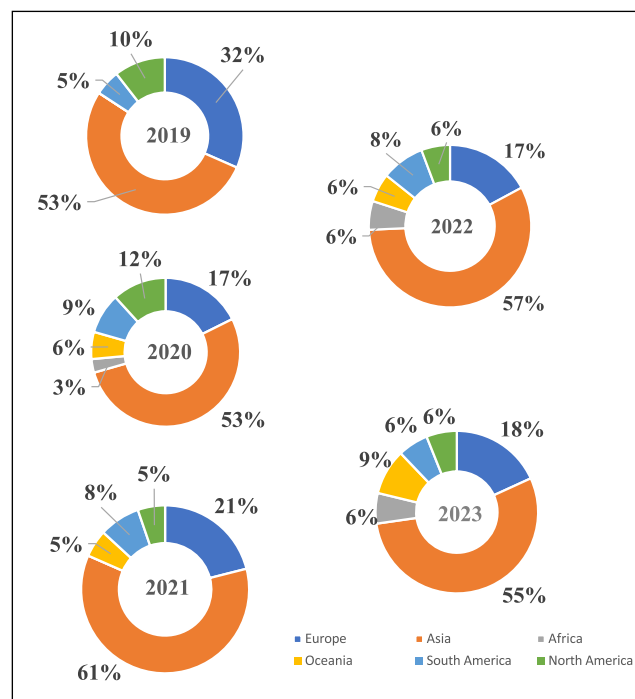


Figura 6. Localização das instituições de pesquisas ao nível de continentes

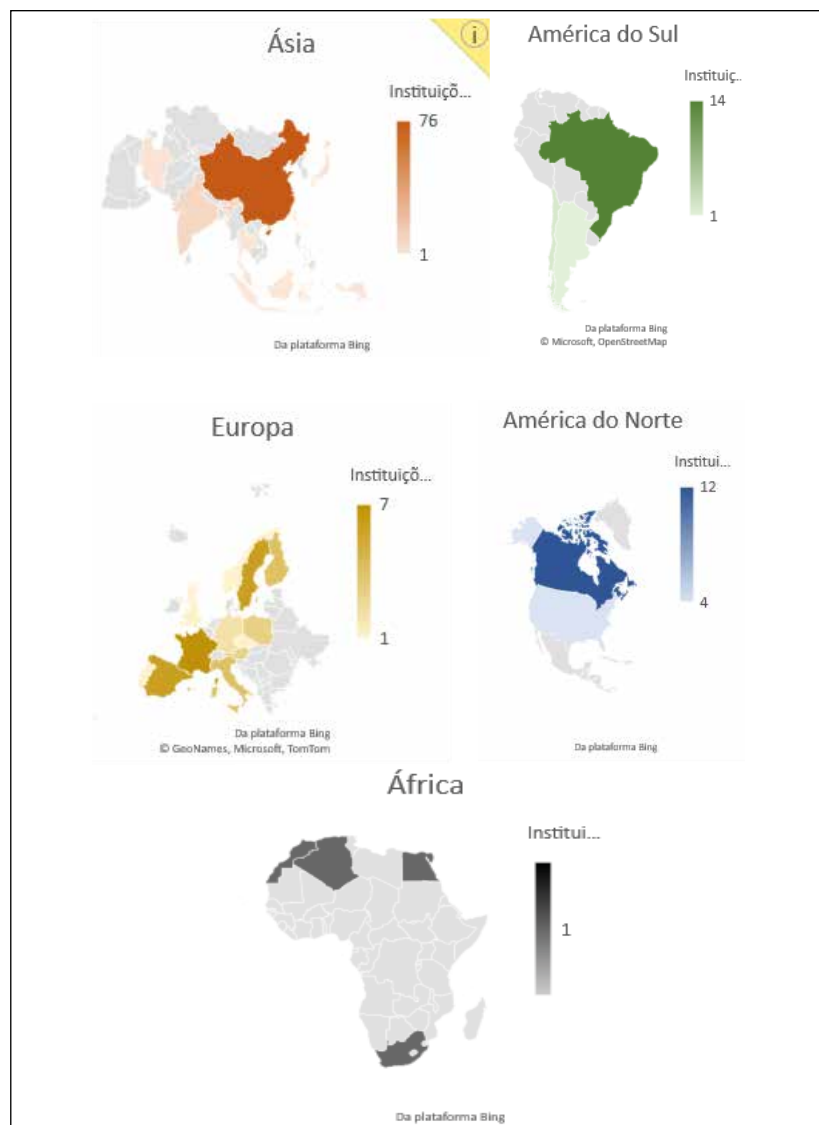


Figura 7. Participação da nacionalidade das instituições de pesquisas pelas regiões e continentes

Tabela 2. Produto final e a frequência de ocorrência nos trabalhos avaliados

Produto	Freq.	Produtos	Freq.	Produtos	Freq.	Produtos	Freq.
Filmes	27	Embalagens	4	Lignossulfonatos	2	Combustível	1
Polímero	25	Fibra de carbono	4	Nanolignina	2	Espuma expansiva	1
Polpa solúvel modificada	16	Vanilina	4	Nanopartículas	2	Floculante	1
Hemicelulose modificada	15	Carvão ativado	3	Resina	2	Furfural	1
Hidrogel	14	Catalizador	3	Revestimento de papel	2	Lignina	1
Bio-óleo	8	Membrana	3	Ácido carboxílico	1	Papel	1
Material adsorventes	6	Agente dispersante	2	Aditivo de concreto	1	Rayon	1
Capacitores	6	Eletrodo de bateria	2	Aditivo de combustível	1	Revestimento de tecido	1
Adesivo	4	Estabilizante	2	Agente emulsificante	1	Absorventes	1
Aerogel	4	Grafeno	2	Celulose regenerada	1		

Quando analisado em nível de país, em cada continente, a nacionalidade das instituições de pesquisa revela algumas informações. Por exemplo, na Ásia, a China apresentou a maioria das instituições, seguida pela Índia. No continente africano não tivemos nenhuma instituição ou nacionalidade que sobressaísse, tendo todas aparecendo uma única vez. Assim como a Oceania, com a participação da Austrália, com cinco trabalhos, e Indonésia com um trabalho dentre o levantamento feito neste estudo. A Figura 7 ilustra por tonalidade das cores, a participação dos países em suas regiões e continentes.

Analisando os produtos desenvolvidos nos artigos avaliados neste estudo, vislumbra-se um potencial portfólio que o setor de Celulose & Papel pode atingir com a aplicação dos conceitos e produtos oriundos das biorrefinarias lignocelulósicas. Foram mais de 40 diferentes produtos encontrados nesta pesquisa. Os dois produtos que apresentaram a maior frequência de estudos nos trabalhos foram os Filmes e os Polímeros, como apresentado na Tabela 2.

Nota-se, no diagrama apresentado no Figura 8, que há uma associação dos produtos com os países das instituições de pesquisa. Mais uma vez, a China se sobressai, pois aparece vinculada com a maior gama de produtos, como era de se esperar. Ao analisar o Brasil, a conclusão é o País tem

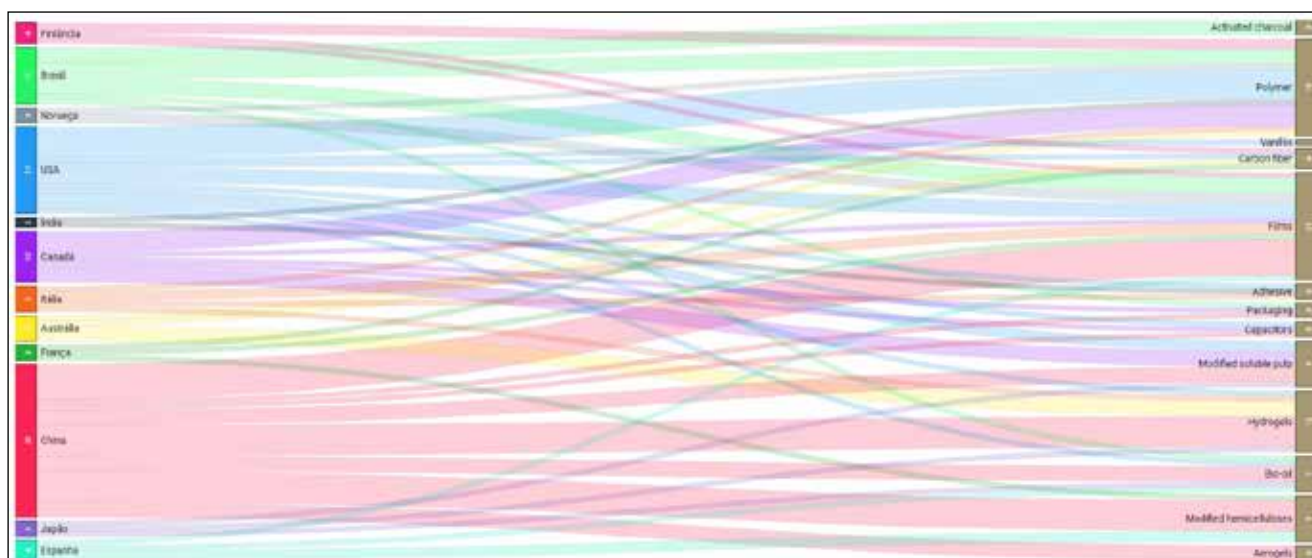


Figura 8. Ilustra o diagrama de Sankey com os dez países que apresentaram maior frequência na base de dados com seus respectivos produtos, como constam nos trabalhos analisados

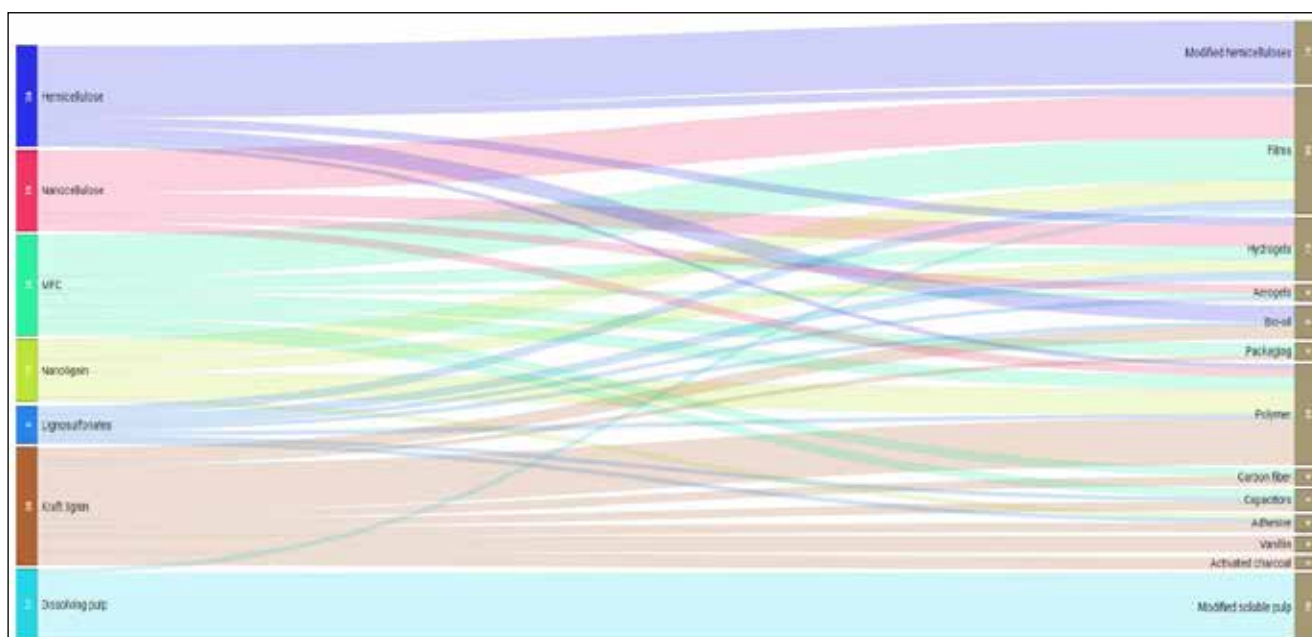


Figura 9. Esquema das palavras-chave para produtos finais, seguindo as informações contidas nos trabalhos analisados

investido esforços na produção de Filmes, Polímeros, Bio-óleo, Carvão ativado, Embalagens e Polpa solúvel modificada. A Figura 8 ilustra a associação dos produtos com os países.

Ao analisar os dados levantados neste estudo, correlacionando a matéria-prima com a obtenção dos produtos de interesse, tem-se que a Lignina Kraft foi a matéria-prima aplicada em um maior número de destinações diferentes, como: bio-óleo, polímero, adesivo, capacitores, carvão ativado, embalagens, fibra de carbono, vanilina, entre outros. Essa gama de produtos pode ser observada na Figura 9, onde são indicados os dez produtos finais com maior frequência na base de dados.

Outra matéria-prima que demonstrou várias aplicações para obtenção de produtos diversos foi a celulose micro fibrilada-MFC.

Com base nos dados levantados por este estudo, ressaltasse a potencialidade das biorrefinarias lignocelulósicas, pois tendo como sua base o setor de Celulose & Papel, o qual é um setor muito estruturado tanto em nível nacional quanto internacional, o setor pode se apresentar como agente modificador da sociedade em sua busca pela sustentabilidade. Ainda ficou evidenciado pela literaturas levantadas que existem muitas iniciativas em escala piloto e até mesmo industrial para aplicações de nanoceluloses e lignina kraft. Portanto, esse trabalho demonstrou que já existem produtos

que podem ser aplicados, empresas que podem alinhar-se com novas rotas produtivas e países que provavelmente irão liderar essas mudanças.

CONCLUSÕES

O presente trabalho concluiu que independente do momento pandêmico que passamos, o número de publicações de trabalhos científicos com o tema Biorrefinaria Lignocelulósica tende a aumentar, visto que 2022 o número já ultrapassou alguns números de anos anteriores, e segue na mesma tendência para o ano de 2023. Em relação aos países, a China se apresenta como o *player* de mercado de maior destaque tanto para as empresas que auxiliam os estudos quanto nas instituições de pesquisas que realizam nesses tra-

balhos. Quanto ao Brasil, ele se coloca na vanguarda dos estudos que pesquisam e fazem aplicações com esses produtos, o que demonstra desta forma que com mais investimentos e parcerias entre empresas e instituições de pesquisas nacionais, podemos nos tornar uma potência mundial em nível de produção e comercialização de produtos oriundos de biorrefinarias lignocelulósicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Finanças 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ). ■

REFERÊNCIAS

ABU-OMAR, M. M., BARTA, K., BECKHAM, G. T., LUTERBACHER, J. S., RALPH, J., RINALDI, R., ... & WANG, F. Guidelines for performing lignin-first biorefining. *Energy & Environmental Science*, 14(1), p. 262-292, 2021.

ALVIM, J. C.; ALVIM, F. A. L. S.; SALES, V. H. G.; OLIVEIRA, E. M.; SALES, P. V. G. COSTA, A. C. R. Biorrefinarias: Conceitos, classificação, matérias primas e produtos. *Journal of Bioenergy and Food Science*. v.1, p. 71-86, 2015.

CARVALHAES, E. de. A importância e o potencial de uso da madeira plantada. *O Papel*, São Paulo, v. 77, n. 10, p. 35, 2016.

GALAVARNA, R.; PASTRE, J. C. Produção de 5-(Hidroximetil) furfural a partir de Biomassa: desafios sintéticos e aplicações como bloco de construção na produção de polímeros e combustíveis líquidos. *Revista Virtual de Química*, Ribeirão Preto, v. 9, n. 1, p. 248-273, 2017.

GUNDUPALLI, M. P.; SRIARIYANUN, M. Recent Trends and Updates for Chemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *Appl. Sci. Eng. Prog.*, 16, p. 5842, 2022.

IBA, Indústria Brasileira de Árvores. *Relatório Annual 2021*, 2022.

KAUR, M., KUMAR, M., SINGH, D., SACHDEVA, S., & PURI, S. K. A sustainable biorefinery approach for efficient conversion of aquatic weeds into bioethanol and biomethane. *Energy Conversion and Management*, 187, p. 133-147, 2019.

LI, C., ZHAO, X., WANG, A., HUBER, G. W., & ZHANG, T. Catalytic transformation of lignin for the production of chemicals and fuels. *Chemical reviews*, 115(21), p. 11559-11624, 2015.

OKOLIE, J. A.; NANDA, S.; DALAI, A. K.; KOZINSKI, J. A. Chemistry and Specialty Industrial Applications of Lignocellulosic Biomass. *Waste Biomass Valorization*, 12, p. 2145-2169, 2021.

K. N, Y.; USMAN T. M, M.; S., K.; SACHDEVA, S.; THAKUR, S.; S, A. K.; J, R. B. Lignocellulosic Biorefinery Technologies: A Perception into Recent Advances in Biomass Fractionation, Biorefineries, Economic Hurdles and Market Outlook. *Fermentation*, 9, p. 238, 2023.

ZAKZESKI, J., BRUIJNINCX, P. C., JONGERIUS, A. L., & WECKHUYSEN, B. M. The catalytic valorization of lignin for the production of renewable chemicals. *Chemical reviews*, 110(6), 3552-3599, 2010.