

DO REFINO CONVENCIONAL À BIOECONOMIA: PATENTES EVIDENCIAM NOVAS ROTAS TECNOLÓGICAS EM BIORREFINARIAS *FROM CONVENTIONAL REFINING TO THE BIOECONOMY: PATENTS REVEAL NEW TECHNOLOGICAL PATHWAYS IN BIOREFINERIES*

Diego Durante Mühl¹; Letícia de Oliveira^{1,2}

¹ Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios (CEPAN), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

² Departamento de Economia e Relações Internacionais (DERI), Faculdade de Economia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

E-mail: diegomihl@live.com; leticiaoliveira@ufrgs.br

Grupo de Trabalho GT12: Impactos socioambientais das novas tecnologias no agronegócio

Resumo

O crescimento da demanda mundial por fontes de energia renováveis e a urgência em reduzir a dependência de combustíveis fósseis têm impulsionado o desenvolvimento de rotas tecnológicas mais sustentáveis. Pesquisas recentes têm enfatizado a relevância das biorrefinarias para produção de biocombustíveis e compostos de interesse industrial, com ênfase na importância de integrar esses processos com tecnologias de tratamento de efluentes. Apesar do volume de conhecimento produzido, ainda há uma lacuna em termos de sistematização e análise detalhada do panorama de patentes que envolvam diferentes rotas de biorrefinaria. Assim, objetivo deste estudo é examinar as patentes relacionadas a biorrefinarias e identificar rotas de desenvolvimento tecnológico. Para tanto, estabeleceu-se um conjunto de procedimentos metodológicos que abrangeu desde a busca sistemática de documentos na Google Patents até a aplicação de análises estatísticas e de visualização no ambiente R. Os resultados revelam uma tendência de convergência entre a química tradicional e as novas demandas de sustentabilidade. Diversas patentes estão relacionadas a biomassa e lignina indicando um crescente interesse na valorização de biomassa e na exploração de rotas tecnológicas mais limpas. Em particular, subclasses CPC relacionadas a processos físico-químicos (B01, C07) e à biotecnologia ou mitigação de mudanças climáticas (C12, Y02) concentram boa parte dos depósitos mais recentes, sugerindo uma sinergia entre catálise avançada, desenvolvimento de novos materiais e a adoção de biorrefinarias. O presente estudo reforça o potencial de criação de cadeias produtivas sustentáveis e fornece subsídios para decisões estratégicas em P&D, políticas públicas e investimentos em tecnologia.

Palavras-chave: Biorrefinarias; Patentes; Biomassa; Sustentabilidade; Bioeconomia.

Abstract

The global demand for renewable energy sources and the urgency to reduce reliance on fossil fuels have driven the development of more sustainable technological pathways. Recent research has emphasised the significance of biorefineries for the production of biofuels and industrially relevant compounds, stressing the importance of integrating these processes with effluent treatment technologies. Despite the existing body of knowledge, there remains a gap in systematically and thoroughly analysing the patent landscape surrounding different biorefinery routes. Therefore, this study aims to examine patents related to biorefineries and identify technological development pathways. To this end, a methodological framework was established, ranging from a systematic search of documents on Google Patents to the application of statistical and visualisation analyses in the R environment. The findings reveal a convergence between traditional chemistry and new sustainability demands. Numerous patents focus on biomass and lignin, indicating a growing interest in biomass valorisation and the exploration of cleaner technological routes. In particular, CPC subclasses linked to physicochemical processes (B01, C07) and to biotechnology or climate-change mitigation (C12, Y02) account for a significant share of recent filings, suggesting synergy between advanced catalysis, the development of new materials and the adoption of biorefineries. This study underscores the potential to establish sustainable production chains and provides a basis for strategic decisions in R&D, public policy, and technology investments.

Key words: Biorefineries; Patents; Biomass; Sustainability; Bioeconomy.

1. Introdução

O crescimento da demanda mundial por fontes de energia renováveis e a urgência em reduzir a dependência de combustíveis fósseis têm impulsionado o desenvolvimento de rotas tecnológicas mais sustentáveis. Nesse contexto, biorrefinarias surgem como uma abordagem promissora para produzir bioenergia, combustíveis e produtos químicos de alto valor agregado a partir de biomassas diversas, como resíduos lignocelulósicos, microalgas, resíduos de atividades agrícolas e de pecuária ou resíduos industriais. A possibilidade de integrar múltiplos processos em uma única planta torna as biorrefinarias atrativas tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, contribuindo para uma economia circular e de baixo carbono.

Pesquisas recentes têm enfatizado a relevância das biorrefinarias para produção de biocombustíveis e compostos de interesse industrial, com ênfase na importância de integrar esses processos com tecnologias de tratamento de efluentes (Khoshnevisan *et al.*, 2021; Pessoa *et al.*, 2021). Os esforços de inovação também abrangem metodologias de alta taxa de vermicompostagem, destinadas ao tratamento de resíduos sólidos (Tauseef *et al.*, 2023), e rotas catalíticas ou bioquímicas para converter lignina em hidrocarbonetos de alto valor, como o querosene de aviação (Shen; Tao; Yang, 2019). Diversos trabalhos destacam ainda a viabilidade de rotas híbridas que produzem tanto combustíveis quanto outros produtos químicos, como ácidos orgânicos, poliamidas e monômeros (Dimian *et al.*, 2019), exemplificando a adoção de arranjos multi-produto que exploram ao máximo a biomassa disponível.

Além disso, análises tecnoeconômicas mostram como a cooprodução de bioquerosene e etanol em biorrefinarias lignocelulósicas pode melhorar a viabilidade econômica de plantas existentes (Shen; Tao; Yang, 2019). Enquanto isso, outras pesquisas discutem a aplicação de biotecnologias em larga escala para valorização de resíduos e subprodutos, como no caso de processos baseados em microalgas (Moscoviz *et al.*, 2018; Yadav *et al.*, 2022). Patentes relacionadas ao setor de biorrefinarias mostram avanços na conversão de açúcares derivados de biomassas em compostos de interesse, no desenvolvimento de reatores especializados para vermicompostagem de resíduos e em métodos de recuperação de subprodutos que antes eram descartados (Barragan-Ocana *et al.*, 2023; Tauseef *et al.*, 2023). No conjunto, tais estudos indicam um movimento global de convergência entre disciplinas, visando agregar valor a cada fração da biomassa e reforçar a competitividade das biorrefinarias (Faba; Diaz; Ordóñez, 2015; Tsvetanova; Rennings; Broering, 2024).

Apesar do volume de conhecimento produzido, ainda há uma lacuna em termos de sistematização e análise detalhada do panorama de patentes que envolvam diferentes rotas de biorrefinaria. A literatura, embora robusta, está muitas vezes fragmentada em estudos de caso específicos ou em análises pontuais de tecnologias individuais, não oferecendo uma visão ampla dos principais atores, subclasses de patentes e padrões de distribuição geográfica e temporal que estão moldando o setor. Falta, portanto, um mapeamento que permita identificar tendências tecnológicas transversais e identifique a concentração de esforços em determinadas áreas.

Diante disso, quais são os problemas que as patentes de biorrefinarias estão tentando resolver? Quais são as tendências tecnológicas ao longo do tempo? Para responder a essas perguntas, o objetivo deste estudo é examinar as patentes relacionadas a biorrefinarias e identificar rotas de desenvolvimento tecnológico, descrevendo como esses depósitos se organizam ao longo do tempo, em diferentes países, e sob distintas classificações CPC. Pretende-se, dessa forma, verificar a concentração ou dispersão de autores, depositantes e

países. Adicionalmente, objetiva-se evidenciar as principais rotas tecnológicas emergentes e a intensidade de depósitos e os conceitos relacionados a cada família CPC.

A motivação para este trabalho reside no potencial impacto que as biorrefinarias exercem na construção de cadeias produtivas sustentáveis, possibilitando a geração de combustíveis, insumos químicos e materiais de alto valor sem esgotar recursos naturais (Amidon *et al.*, 2011; Mühl; da Silva; de Oliveira, 2024). Uma visão integrada sobre quem inova, quais tecnologias recebem maior investimento e como evoluem suas aplicações pode nortear iniciativas de fomento, parcerias público-privadas e políticas industriais. Com isso, espera-se contribuir para que novas estratégias de P&D em biorrefinarias encontrem caminhos mais claros para escalonamento e penetração de mercado, beneficiando tanto o setor produtivo quanto a sociedade em geral.

2. Metodologia

Para caracterizar a produção de patentes em biorrefinarias, estabeleceu-se um conjunto de procedimentos metodológicos que abrangeu desde a busca sistemática de documentos na *Google Patents* até a aplicação de análises estatísticas e de visualização no ambiente R. A abordagem adotada contemplou a definição de parâmetros de busca por palavra-chave, a obtenção de resultados segmentados por subclasses CPC, a limpeza e padronização dos dados, bem como o desenvolvimento de rotinas para verificação de qualidade. Os passos seguintes evidenciam como a coleta e análise de dados foram conduzidas, cobrindo a organização do banco unificado e as técnicas utilizadas para examinar aspectos linguísticos, temporais, geográficos e de classificação tecnológica.

2.1 Coleta de Dados

A pesquisa tomou como ponto de partida uma consulta na plataforma *Google Patents*, onde a palavra-chave “*biorefinery*” foi utilizada para cobrir de modo abrangente as diversas tecnologias relacionadas. A busca resultante foi filtrada em 19 subclasses de acordo com a classificação CPC (*Cooperative Patent Classification*). Cada uma dessas 19 pesquisas combinou a palavra “*biorefinery*” com o respectivo código de subclasse, gerando um conjunto inicial de 13.639 patentes e 11 variáveis, incluindo identificador (id), título, depositante, inventores e datas (prioridade, depósito, publicação e concessão), além de links para o documento original e para a figura representativa. Após a organização preliminar e a eliminação de duplicidades, permaneceram 8.882 registros, que passaram a conter 20 variáveis em virtude da reorganização das classes CPC.

Cada resultado extraído da plataforma foi convertido em arquivo *CSV* e armazenado em um diretório definido previamente. Em seguida, esses arquivos foram lidos de modo automatizado no ambiente estatístico R (Field; Miles; Field, 2012), com o uso das bibliotecas *dplyr*, *tidyr*, *textcat* e *writexl* (Hornik *et al.*, 2013; Wickham, 2016). Todos os *data frames* resultantes foram consolidados em um único banco, no qual se executaram limpezas textuais para suprimir parênteses, padronizar nomes de colunas (Wickham *et al.*, 2016) e remover redundâncias ou inconsistências (Field *et al.*, 2012). A consolidação final assegurou a disponibilidade de metadados como título, inventores, depositantes, datas de prioridade, depósito, publicação, concessão e códigos CPC.

2.2 Análise de Dados

O primeiro passo envolveu transformações para reorganizar as informações de formato longo para formato largo, de modo que cada patente pudesse receber colunas relativas a distintos códigos CPC (Wickham, 2016). Também se aplicou a detecção de idioma dos títulos por métodos probabilísticos (Hornik *et al.*, 2013), seguida de padronização de variantes linguísticas e de estatísticas descritivas sobre a ocorrência de cada idioma. Em relação às datas, as colunas de prioridade, depósito, publicação e concessão foram convertidas para o tipo *Date* e tiveram seus anos extraídos, permitindo a geração de séries históricas e o cálculo de médias móveis para realçar tendências (Chatfield, 2004).

Prosseguindo a análise, investigou-se a produtividade de autores, depositantes e países, mediante correções de caracteres, padronizações de abreviações institucionais e tradução de nomes. As contagens foram apresentadas em gráficos de barras, revelando concentrações de depósitos e mapeando atores-chave do setor. Paralelamente, aplicou-se a Lei de Lotka para verificação de como se distribuía a produtividade, empregando ajustes em escala log-log (Lotka, 1926; Potter, 1981). Também se construíram *heatmaps* de co-ocorrência, relacionando autores, depositantes e países a códigos CPC, a fim de destacar possíveis sinergias tecnológicas (Wilkinson; Friendly, 2009).

No que se refere à classificação CPC, os registros foram novamente transformados para formato longo, a fim de quantificar, por ano, o aparecimento de cada código e permitir a construção de gráficos de linha, barras empilhadas e áreas que ilustrassem a evolução das subclasses (WIPO, 2025). Visualizações adicionais com o pacote *ggplot2* (Wickham, 2016) realçaram a relevância de cada família CPC.

Para identificar as tendências tecnológicas em cada subclasse CPC foram usados os títulos das patentes. Esse processo incluiu a normalização dos textos (conversão para minúsculas, remoção de pontuação e números, eliminação de espaços extras e lematização), seguido pela *tokenização* e remoção de *stop words*. Tais etapas são fundamentais em técnicas de Processamento de Linguagem Natural (NLP) e estão respaldadas na literatura, como demonstrado por Manning (et al. 2008) e Feldman e Sanger (2006), garantindo uma representação consistente e minimizando ruídos que possam afetar a análise subsequente dos dados.

Os períodos ou ciclos de publicação foram definidos com base nas oscilações observadas no gráfico temporal de publicações. Os intervalos foram determinados a partir dos grandes vales nas publicações, ou seja, as quedas significativas na contagem anual de publicações seguidas de uma inversão da tendência foram consideradas como os pontos de transição entre diferentes ondas de pesquisa. Esses vales são interpretados como o fim de um período e o início de outro, pois indicam momentos em que houve uma mudança no padrão de atividade inovadora. Foram atribuídos os seguintes períodos:

- Ciclo 1 (1900 – 1950) período inicial de maior estabilidade no número de publicações;
- Ciclo 2 (1951 – 1970) período de crescimento pouco expressivo;
- Ciclo 3 (1971 – 1998) primeira grande onda de publicações;
- Ciclo 4 (1999 – 2019) segunda grande onda de publicações;
- Ciclo 5 (2020 – 2025) enfoque atual.

Posteriormente, os termos extraídos dos títulos foram agregados e contabilizados por período e por subclasse CPC, permitindo identificar as palavras com maior frequência, bem como distinguir entre termos comuns a várias subclasses e aqueles específicos de uma única subclasse. A partir desta agregação, os termos foram visualizados por meio de gráficos de barras e matrizes (*tile plots*), possibilitando a comparação dos padrões de inovação e tendências tecnológicas ao longo do tempo. Essa abordagem, que combina técnicas de mineração de texto com análise estatística e visualização de dados, encontra respaldo em estudos clássicos de análise de patentes (Griliches, 1990) e na literatura de gestão da inovação

(Breschi; Malerba, 2023), fornecendo uma ferramenta robusta para a identificação e monitoramento de tendências tecnológicas. Por fim, gráficos e tabelas de frequência, classificações de idioma e estatísticas temporais, foram organizados e exportados para posterior redação do manuscrito (Ooms, 2017).

Os resultados estão dispostos do geral ao específico. Primeiro discute-se a distribuição de idiomas, dando uma ideia global de onde e como as patentes são publicadas, em seguida a caracterização dos atores, depositantes e países, passando então à análise de produtividade (Lei de Lotka) e ao comportamento temporal dos depósitos. Por fim, são explorados os códigos CPC em detalhe, sintetizando como as subclasses tecnológicas evoluíram ao longo do tempo.

3. Resultados

A detecção de idioma foi realizada por meio da biblioteca textcat utilizando-se um modelo probabilístico que analisa as cadeias de caracteres nos títulos das patentes. O inglês compõe 85,98% (7.637 títulos), seguido de alemão (3,68%), catalão (2,89%) e dinamarquês (2,44%). Línguas como francês, escocês e latim aparecem em níveis intermediários, enquanto português, esloveno e romeno apresentam participações menores.

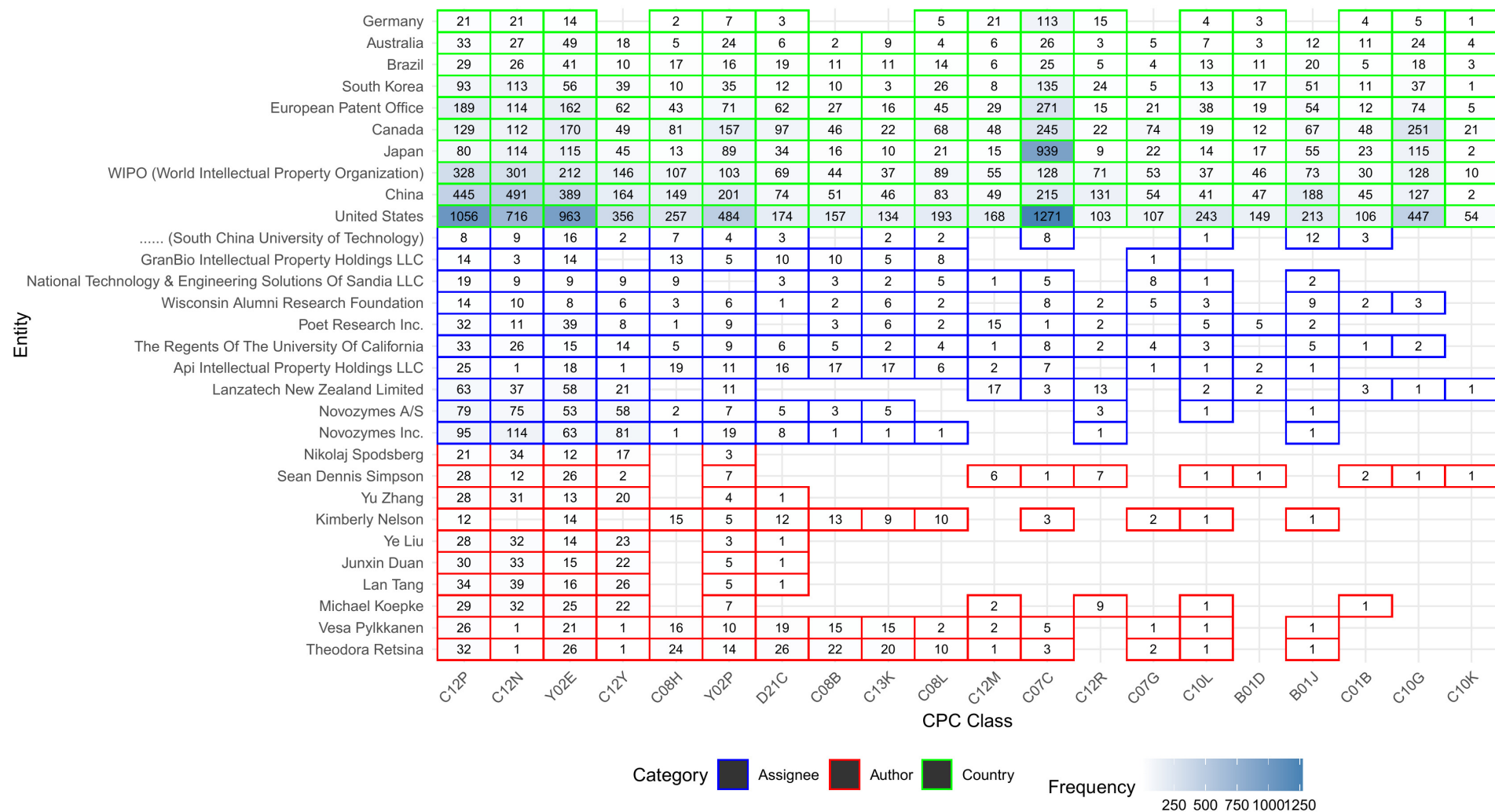
O predomínio do inglês pode estar associado ao fato de ser o idioma amplamente adotado em documentos técnicos e científicos, além de ser uma língua-padrão para depósitos internacionais de patentes. A presença de alemão, catalão, dinamarquês e francês sinaliza a existência de polos de pesquisa e inovação em países onde essas línguas são oficiais ou predominantes. As participações ainda mais baixas de línguas como português e romeno sugerem que, apesar de haver contribuições de outros contextos culturais, o núcleo principal da produção se concentra em países que adotam o inglês ou que publicam suas patentes nesse idioma para alcançar maior divulgação.

A ampliação do uso do inglês, tanto em patentes quanto em artigos científicos, é frequentemente assinalada como fator que facilita a difusão internacional dos resultados (Pessoa *et al.*, 2021). Autores que investigam depósitos de patentes em energias renováveis também ressaltam que o inglês tende a ser empregado para maximizar a visibilidade e a proteção em múltiplos mercados, coerente com o que encontramos nesta distribuição (Barragan-Ocana *et al.*, 2023; Tauseef *et al.*, 2023).

A consolidação de informações sobre autores, depositantes (assignees) e países foi conduzida por meio de estratégias de padronização (correção de abreviações, unificação de nomenclaturas e traduções), seguindo a abordagem descrita anteriormente para a reorganização de dados em formato longo. Em seguida, gerou-se uma matriz de co-ocorrência que relaciona cada entidade (autor, depositante ou país) às classes CPC em que figurava, resultando em um heatmap unificado. Essa visualização evidencia a frequência de participação das entidades nas subclasses mais relevantes de biorefinarias, facilitando a identificação dos principais atores e de possíveis convergências tecnológicas.

Na figura 1, é possível observar que os países (em verde) exibem blocos maiores de frequência, especialmente no caso de Estados Unidos, China, WIPO (que representa depósitos internacionais), além de outros locais com presença significativa, como Coreia do Sul e Japão. Em termos de depositantes (em azul), destacam-se organizações e universidades como *The Regents of the University of California*, *Poet Research Inc.* e várias empresas de biotecnologia, apontando para sua atuação em distintas áreas CPC. Já os autores individuais (em vermelho) aparecem em maior número (foram 19.926 no total), porém as frequências ficam, em geral, distribuídas em faixas menores, sugerindo um aporte pulverizado de inventores em diferentes subclasses.

Figura 1. Coocorrência entre autores, depositantes ou países e classes CPC

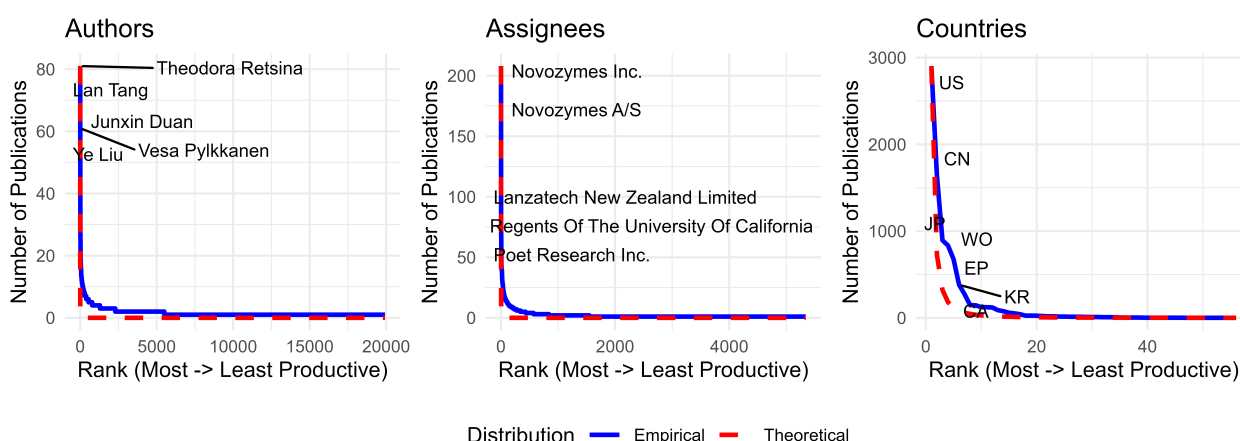


A comparação entre as três categorias reforça a ideia de que a dinâmica de patentes em biorrefinarias envolve tanto grandes centros de pesquisa e empresas consolidadas (EUA, China e importantes corporações) quanto uma ampla participação de inventores dispersos. A presença de 56 países distintos demonstra a natureza globalizada dessa tecnologia, enquanto os 5.341 depositantes indicam diversidade institucional. O elevado número de autores revela ainda o grau de colaboração no desenvolvimento de patentes, já que equipes de pesquisa e inventores individuais podem se concentrar em classes CPC específicas. Esse panorama geral sugere que as biorrefinarias mobilizam múltiplos atores em nível internacional, com áreas de sobreposição que refletem tanto inovações químicas e biotecnológicas quanto iniciativas de sustentabilidade.

Estudos prévios apontam a relevância de polos consolidados (EUA, China, Europa) para alavancar tecnologias limpas (Tsvetanova; Rennings; Broering, 2024; Yadav *et al.*, 2022), corroborando a concentração observada. No âmbito empresarial, iniciativas como *The Regents of the University of California* e *LanzaTech* têm sido citadas em trabalhos que mostram a relevância de empresas e universidades na transferência de conhecimento (Amidon *et al.*, 2011; Dimian *et al.*, 2019). A ampla dispersão de autores, por sua vez, está em linha com pesquisas que destacam a participação de diversos grupos de pesquisa e a necessidade de colaboração interdisciplinar (Khemthong *et al.*, 2021; Moscoviz *et al.*, 2018).

A avaliação da produtividade de autores, depositantes e países foi conduzida a partir de contagens individuais de publicações, classificando-se cada entidade (autor, empresa ou país) em ordem decrescente segundo o número de patentes. Posteriormente, comparou-se a frequência empírica de cada posição no ranking à distribuição teórica prevista pela Lei de Lotka, a qual sugere que poucos agentes são responsáveis por muitas publicações científicas, enquanto a maior parte contribui com poucos registros. As curvas observadas foram traçadas em relação a uma linha de referência (exponente igual a 2), típica da modelagem lotkiana (Lotka, 1926; Potter, 1981).

Figura 2. Produtividade de autores, depositantes e países



Fonte: Autores 2025

Na figura 2, os autores apresentam um pico de produtividade para poucos indivíduos (por exemplo, Theodora Retsina, Lan Tang, Junxin Duan), com queda abrupta conforme se avança no ranking, em consonância com a hipótese de concentração. Entre os depositantes, destaca-se a alta frequência de patentes associadas a *Novozymes Inc.* e *Novozymes A/S*, seguidas por *LanzaTech New Zealand* e *The Regents of the University of California*, também evidenciando o padrão em que um pequeno conjunto de organizações se sobressai. Em

relação aos países, a liderança dos Estados Unidos (2903 patentes), seguida por China (1641 patentes), Japão (895 patentes) e WIPO (*World Intellectual Property Organization*), sinaliza um alto grau de concentração geográfica. Embora haja uma cauda longa de países com menor número de depósitos, as publicações de patentes se concentram em 56 países, ou seja, a maioria dos países não possui sequer uma única patente publicada.

Autores e depositantes apresentam um nível menor de concentração no topo; já para países, há maior concentração de produtividade (alguns poucos países representam a maior fatia de depósitos), o que remete a um padrão mais próximo ou até mais intenso que o previsto pela Lei de Lotka. A convergência das curvas empíricas com a linha de Lotka reforça a ideia de que a pesquisa em biorrefinarias segue uma lei de potência, isto é, que poucas entidades dominam a maior parcela das publicações. Esse comportamento está relacionado à existência de centros de excelência, corporações consolidadas e políticas de fomento em países líderes, enquanto diversos outros agentes têm contribuições esparsas e pontuais. Em termos práticos, a concentração sugere que colaborações ou parcerias com esses atores de ponta podem exercer papel relevante na difusão e desenvolvimento de tecnologias de biorrefinaria, embora exista espaço para maior participação de novos pesquisadores, organizações e nações no cenário global.

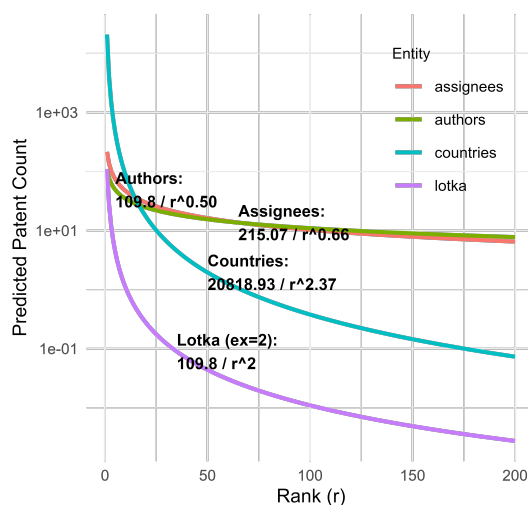
Essa característica de grande disparidade entre países e uma distribuição mais equilibrada entre autores e empresas reforça os achados de Tsvetanova (et al., 2024) e Shen (et al., 2019), que indicam a existência de fortes hubs tecnológicos em nações líderes, mas ampla pulverização de pesquisadores e corporações atuantes em subáreas (Amidon *et al.*, 2011; Yadav *et al.*, 2022). A convergência parcial com a Lei de Lotka coincide com o debate de Moscoviz (et al., 2018) sobre a concentração geográfica de inovações, e sugere a necessidade de fomentar políticas que envolvam regiões emergentes.

Para um enfoque mais preciso a modelagem por lei de potência foi conduzida a partir de uma regressão linear em escala logarítmica sobre as contagens de patentes por rank, onde cada entidade (autor, depositante ou país) foi ordenada segundo sua produtividade e, em seguida, ajustou-se a função:

$$\bullet \text{ patent_count} = K / \text{rank}^\beta.$$

Esse processo permitiu comparar os coeficientes estimados β com o parâmetro clássico da Lei de Lotka ($\beta \approx 2$), que pressupõe alta concentração de publicações em poucos agentes.

Figura 3. Produtividades comparadas com a Lei de Lotka ($\beta \approx 2$)



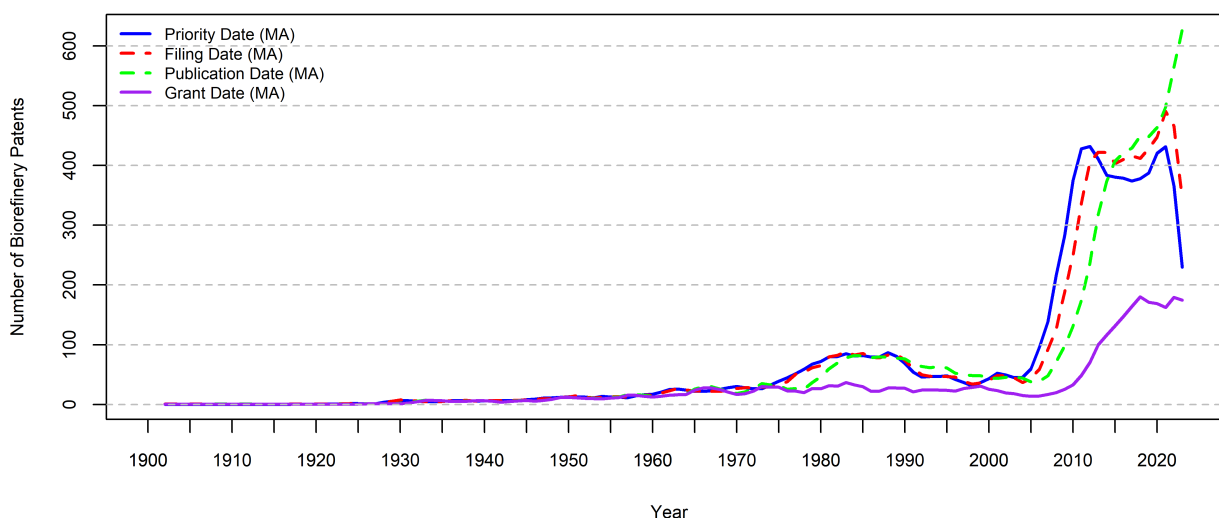
Fonte: Autores 2025

Os resultados revelaram que, para autores ($\beta \approx 0,50$) e depositantes ($\beta \approx 0,66$), o decaimento na produtividade conforme o ranking cresce é relativamente lento, o que indica menor concentração no topo e maior dispersão de inventores e organizações com quantidades moderadas de patentes. Já no caso de países ($\beta \approx 2,37$), a curva acentua-se além do valor 2, sugerindo uma queda mais rápida na produtividade após os primeiros colocados e, consequentemente, um núcleo muito concentrado de nações que lideram o depósito de patentes. Em outras palavras, há muito mais equilíbrio entre indivíduos e empresas do que entre nações, onde a dominância de alguns poucos países é marcante.

Diversas publicações destacam que a concentração em poucas nações é superior ao que ocorre entre atores individuais (Tsvetanova et al., 2024; Yadav et al., 2022). Isso confirma a tese de que países líderes possuem maior infraestrutura e políticas de fomento que permitem alto volume de patentes (Amidon et al., 2011). Em contrapartida, a dispersão entre empresas e inventores está associada a múltiplas rotas tecnológicas simultâneas e a um universo heterogêneo de laboratórios e *startups* (Faba; Diaz; Ordonez, 2015; Silva et al., 2020).

A etapa de análise temporal baseou-se na extração e padronização das datas de prioridade, depósito, publicação e concessão, convertendo-as para o formato *date* e extraindo-se o ano de cada evento. Em seguida, aplicou-se um cálculo de médias móveis para atenuar oscilações pontuais e realçar tendências ao longo do tempo. As séries resultantes foram plotadas em linhas distintas, permitindo comparar a evolução de cada marco temporal das patentes de biorrefinarias. Figura 4.

Figura 4. Datas de publicação, de prioridade, depósito e concessão de patentes de biorrefinarias



Fonte: Autores 2025

Observa-se uma estabilidade no número de depósitos até meados da década de 1970, seguida por um crescimento moderado na década de 1980 e um salto considerável após o início dos anos 2000. A curva de datas de publicação (em verde) tende a apresentar volumes ligeiramente superiores aos de prioridade (azul) e depósito (vermelho) em períodos mais recentes, enquanto a linha de datas de concessão (roxa) fica um pouco aquém em termos quantitativos. Chamam atenção os picos próximos de 2020, quando a publicação atinge valores máximos acima de 500 registros, ao passo que prioridade e depósito apresentam oscilações similares entre 400 e 600 documentos.

A curva mais acentuada a partir dos anos 2000 indica um crescente esforço de pesquisa e desenvolvimento em biorrefinarias, possivelmente motivado por políticas de incentivo à energia renovável e avanços na engenharia de processos. O descolamento entre as linhas de publicação e concessão reflete o intervalo de tempo natural entre o pedido de patente e a concessão oficial, além de possíveis atrasos no processamento. Por fim, as oscilações após 2020 podem estar relacionadas a dados ainda incompletos ou a um atraso na disponibilização de documentos, mas já ilustram a manutenção de um interesse expressivo no tema.

Diversas revisões corroboram esse fortalecimento do tema em torno dos anos 2000, em decorrência de políticas de energia renovável e avanços tecnológicos (Barbosa *et al.*, 2024; Faba; Diaz; Ordonez, 2015). Amidon (et al., 2011), enfatiza a integração de múltiplos produtos como fator-chave para a viabilidade econômica das biorrefinarias, o que coincide com o aumento acentuado de patentes detectado nesse período. A estabilidade recente pode refletir maior maturidade ou mesmo transição para novas rotas de pesquisa (Tsvetanova et al., 2024; Yadav et al., 2022).

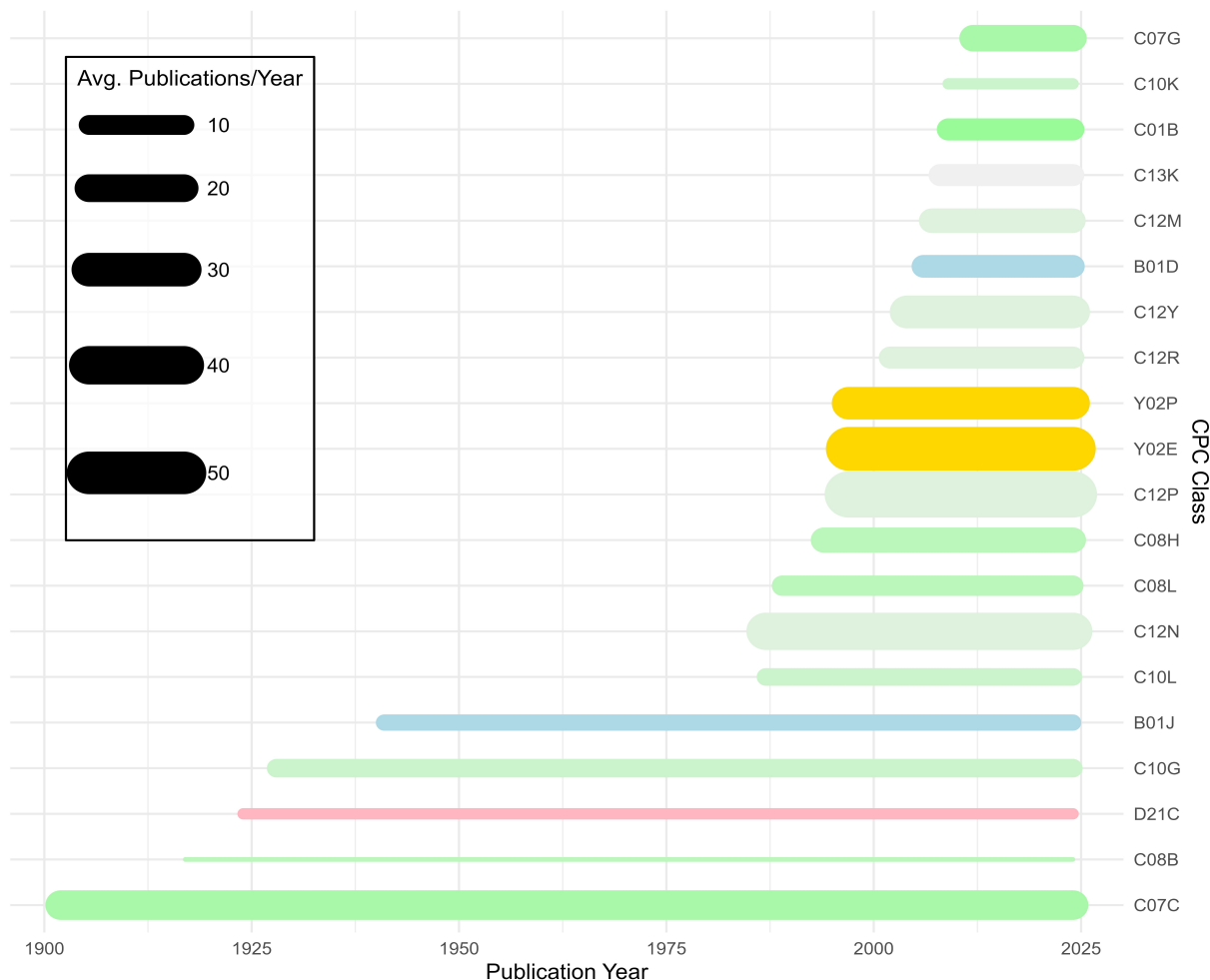
A classificação CPC foi estudada a partir de uma reorganização dos dados em formato longo, em que se consolidaram tanto o primeiro quanto o último ano de publicação de cada subclasse. Esse procedimento envolveu identificar a relação entre patente e código CPC, além de realizar filtragens temporais (por exemplo, a partir de 1950) para evidenciar os períodos com maior quantidade de registros. Na sequência, aplicou-se uma análise de séries históricas e suavização (média móvel centrada), o que possibilitou comparar de forma cronológica a intensidade das publicações em cada classe (Figura 5).

Subclasses como C07C e D21C surgem historicamente, mas outras como Y02E e Y02P despontam em períodos mais recentes, exibindo maior espessura de barras (alta média anual de publicações). Observa-se que as classes de base química (C07, C08, C12) e voltadas a processos físico-químicos (B01) estão presentes há mais tempo, mas ganham novo ímpeto a partir dos anos 2000, quando se intensifica a pesquisa em biotecnologia e sustentabilidade. Essa expansão coincide com as curvas de prioridade, depósito, publicação e concessão (figura 4), indicando que as tecnologias de mitigação ambiental (Y02) e de aproveitamento de biomassas se destacaram na última década, resultando em um notório salto de depósitos.

Para o período de 2006 a 2024, fica evidente um rápido incremento de praticamente todas as subclasses até meados de 2015. Classes como Y02E (energias limpas), C07G (transformação de compostos orgânicos) e C12 (processos biotecnológicos) lideram o volume total de publicações. A estabilização ou leve queda após 2020 pode tanto refletir um grau de maturidade tecnológica quanto eventuais atrasos ou lacunas na indexação de novas patentes. Em síntese, a análise conjunta revela um processo de crescimento histórico alinhado a pressões econômicas, ambientais e políticas, que impulsionam o desenvolvimento de soluções inovadoras em biorrefinarias.

Esses achados convergem com estudos que ressaltam a importância de inovações em processos químicos (C07, C08, B01) e a crescente centralidade das tecnologias de mitigação de impactos ambientais (Y02) (Moscoviz et al., 2018; Tsvetanova et al., 2024). Além disso, o surgimento tardio, porém intenso, de Y02E e Y02P confirma a tendência de buscar energias limpas e eficiência no uso de biomassas (Shen et al., 2019; Yadav et al., 2022). A estabilização recente pode indicar maturidade em algumas rotas e maior seletividade dos depósitos (Barbosa *et al.*, 2024). Em síntese, essas classificações CPC evidenciam o papel multifacetado das biorrefinarias, que integram processos químicos consolidados a soluções emergentes de bioeconomia (Mühl; da Silva; de Oliveira, 2024).

Figura 5. Intensidade das publicações em cada classe CPC

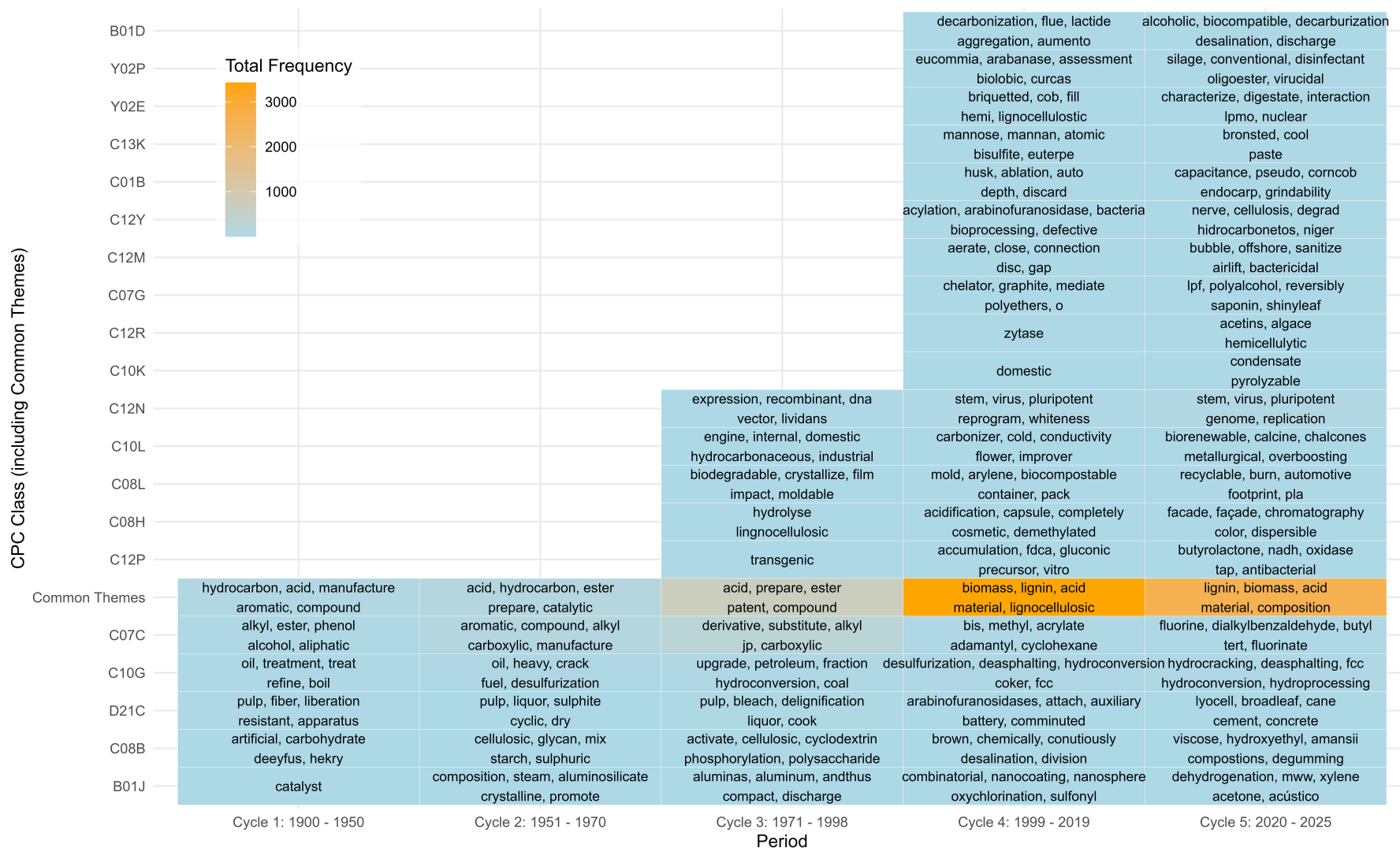


C07C – Heterocyclic compounds containing one or more heteroatoms (e.g. nitrogen, oxygen, sulphur) in a ring structure.
C08B – Synthetic resins, particularly those produced by condensation reactions and used in the manufacture of plastics.
D21C – Processes for the production of pulp and paper, including various chemical or mechanical pulping methods.
C10G – Processes for the treatment or refining of hydrocarbon oils, focusing on separation and purification techniques.
B01J – Catalytic processes and the use of catalysts in chemical reactions, especially for industrial chemical synthesis.
C10L – Fuel compositions and combustion processes, relating to the formulation, preparation, and performance of fuels.
C12N – Processes involving micro-organisms or enzymes, including fermentation and other biotechnological applications.
C08L – Synthetic resins and plastics, particularly thermoplastic polymers derived from condensation reactions.
C08H – Organic polymers not otherwise classified within synthetic resins, including certain polyvinyl compounds and related materials.
C12P – Fermentation processes for the production of organic compounds using micro-organisms.
Y02E – Technologies aimed at enhancing energy efficiency and conservation in industrial production processes.
Y02P – Climate change mitigation technologies in the production or processing of goods.
C12R – Biotechnological processes for producing or modifying biological products (such as enzymes or micro-organisms) not classified elsewhere.
C12Y – Genetic engineering and the manipulation of genetic material to create novel micro-organisms or biomolecules.
B01D – Separation processes used in chemical engineering, focusing on physical or chemical separation techniques.
C12M – Apparatus for enzymology or microbiology, including devices designed for the study or application of enzymes and micro-organisms.
C13K – Saccharides obtained from natural sources or by hydrolysis of naturally occurring disaccharides, oligosaccharides, or polysaccharides.
C01B – Non-metallic elements and compounds thereof, especially those involved in the synthesis of organic compounds.
C10K – Processes for purifying or modifying the chemical composition of combustible gases containing carbon monoxide.
C07G – Compounds of unknown constitution, typically referring to organic compounds whose precise molecular structure is not fully determined.

Fonte: Autores 2025

Para identificar as tendências tecnológicas em cada subclasse CPC foram usados os títulos das patentes. Os termos extraídos dos títulos foram agregados e contabilizados por período e por subclasse CPC, permitindo identificar as palavras com maior frequência, bem como distinguir entre termos comuns a várias subclasses e aqueles específicos de uma única subclasse. A figura 6 apresenta de forma sintética esses resultados.

Figura 6. Tendências Tecnológicas por período e por subclasse CPC com termos extraídos dos títulos das patentes de biorrefinarias



Fonte: Autores 2025

No primeiro período (1900–1950), as palavras-chave recorrentes incluem *hydrocarbon*, *acid*, *manufacture*, *aromatic*, *compound*, indicando um foco em processos químicos fundamentais, sobretudo voltados à produção de compostos orgânicos básicos e ao refino de petróleo em estágios iniciais. Nesse mesmo intervalo, surgem também termos como *alkyl*, *ester*, *phenol* (C07C) e *oil*, *treatment*, *refine* (C10G), alinhados à expansão da indústria petroquímica, conforme discutido por Weissermel e Arpe (2003).

Já no ciclo seguinte (1951–1970), os termos comuns passam a ser *acid*, *hydrocarbon*, *ester*, *prepare*, *catalytic*, sugerindo uma maior sofisticação nas rotas de síntese e refino, incluindo o uso de catalisadores heterogêneos, em linha com o advento de zeólitas e outros sólidos catalíticos de alta eficiência (Thomas, 2003). Subclasses como B01J e C10G reforçam esse avanço, apresentando palavras como *aluminosilicate*, *crystalline* (para catálise) e *heavy*, *crack*, *desulfurization* (para refino).

Na fase de 1971 a 1998, os temas comuns continuam a destacar *acid e ester*, mas agora acompanhados de *prepare*, *patent*, *compound*, indicando não apenas a continuidade de processos de química orgânica, mas também uma expansão na proteção intelectual (“*patent*”) e o surgimento de inúmeros compostos derivados (sobretudo em C07C, com *derivative*, *substitute*, *carboxylic*). Em paralelo, surge maior atenção a polímeros e materiais oriundos de biomassa (C08B, C08H, C08L), caracterizados por termos como *cyclodextrin*, *biodegradable*, *polysaccharide*, conforme também relatado na literatura sobre inovações na química verde (Clark; Deswarte, 2015).

A transição mais marcante, porém, ocorre a partir de 1999 a 2019, quando os temas comuns e transversais entre as patentes se voltam para *biomass*, *lignin*, *acid*, *material*, *lignocellulosic*. Fica evidente o crescente interesse na valorização de biomassa lignocelulósica, seja para produção de combustíveis avançados (C10G, C10L) ou para novos materiais biocompostáveis (C08L). A relevância de enzimas e rotas biotecnológicas também se intensifica (C12N, C12P), alinhando-se à incorporação de biorrefinarias e processos enzimáticos em larga escala (Sheldon, 2017).

No ciclo mais recente (2020–2025), os termos comuns reiteram o foco em *lignin*, *biomass*, *acid*, *material*, *composition*, confirmando a consolidação de estratégias baseadas em biomassa. Observa-se, por exemplo, uma ênfase em tecnologias para conversão de lignina e celulose, bem como no desenvolvimento de novos compósitos e formulações (C10L, C08L) de menor impacto ambiental. Em paralelo, áreas como B01D e B01J evidenciam processos inovadores de purificação, catálise e desalinação, enquanto C12N e C12P reforçam a interface com engenharia genética (e.g. *virus*, *pluripotent*, *genome*).

Em síntese, os dados mostram um percurso que se inicia na química de base (com ênfase em ácidos, hidrocarbonetos e compostos aromáticos) e avança para processos sofisticados de catálise e síntese de compostos, culminando na adoção massiva de biomassa lignocelulósica e no desenvolvimento de materiais renováveis. Isso corrobora as tendências apontadas por Clark & Deswarte (2015), que destacam a transição para uma economia circular fundamentada em biorrefinarias e produtos de alto valor agregado derivados de fontes renováveis incluindo a gestão cíclicas de recursos e resíduos alinhadas a estratégias de bioeconomia (Mühl; da Silva; de Oliveira, 2024).

4. Considerações Finais

O presente trabalho consolidou e analisou um amplo conjunto de patentes sobre biorrefinarias, evidenciando a evolução temporal das publicações e o perfil de concentração em determinados países, autores e depositantes, bem como as subclasses CPC com maior crescimento ao longo dos últimos anos. Existe uma tendência de convergência entre a química

tradicional e as novas demandas de sustentabilidade que se reflete nos temas comuns dos ciclos mais recentes (1999–2019 e 2020–2025). Termos como *biomass*, *lignin*, *lignocellulosic*, *acid*, *material*, *composition* passaram a predominar, indicando o crescente interesse na valorização de biomassa e na exploração de rotas tecnológicas mais limpas. Em particular, subclasses CPC relacionadas a processos físico-químicos (B01, C07) e à biotecnologia (C12, Y02) concentram boa parte dos depósitos, sugerindo uma sinergia entre catálise avançada, desenvolvimento de novos materiais e a adoção de biorrefinarias. As análises temporais mostram um salto em depósitos e complexidade tecnológica a partir dos anos 2000, quando políticas de incentivo às energias renováveis ganham força e estimulam a pesquisa de fontes alternativas.

Embora poucos países ainda concentrem a maior parte dos depósitos, a ampla dispersão entre autores e depositantes reforça a ideia de um ecossistema inovador plural, no qual diferentes atores podem agregar valor em cada etapa da cadeia de biorrefinaria. No entanto, a análise bibliométrica e de prospecção patentária se baseia na disponibilidade e na qualidade dos dados nos bancos consultados, sujeitando-se a lacunas ou atrasos na contagem. Além disso, a complexidade multidisciplinar das patentes pode levar a vieses em sua categorização por classes CPC, uma vez que muitos documentos abarcam aspectos simultâneos de química, biotecnologia e engenharia de processos.

Perspectivas futuras incluem a realização de análises de citações entre patentes, permitindo captar a difusão efetiva do conhecimento e a formação de redes de colaboração tecnológica. Também seria valioso ampliar a abrangência para incluir patentes depositadas em escritórios menores ou regionais, a fim de verificar se inovações relevantes permanecem sub-representadas em bases internacionais. Em paralelo, estudos de caso qualitativos podem aprofundar a compreensão da eficácia dos processos de transferência de tecnologia e o impacto econômico e ambiental de rotas específicas de biorrefinaria.

A análise integrada de grandes volumes de patentes e a identificação das principais tendências tecnológicas e geográficas fornecem subsídios para decisões estratégicas em P&D, políticas públicas e investimentos em tecnologia. Os resultados atualizados reforçam o potencial de criação de cadeias produtivas sustentáveis e a integração de tecnologias químicas e biotecnológicas. Em última instância, o fortalecimento de biorrefinarias e a aposta em rotas baseadas em biomassa e lignina podem contribuir não apenas para a redução dos impactos ambientais, mas também para a segurança energética global, beneficiando tanto a comunidade acadêmica quanto a sociedade em geral.

Agradecimentos: Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil, por meio de bolsas de doutorado com números de processo 140931/2022-8.

5. Referências

AMIDON, Thomas E. *et al.* **Commercializing Biorefinery Technology: A Case for the Multi-Product Pathway to a Viable Biorefinery.** FORESTSST ALBAN-ANLAGE 66, CH-4052 BASEL, SWITZERLANDMDPI, , 2011.

BARBOSA, Arthur V. L. *et al.* **Continuous design and technoeconomic assessment of commercial-scale biorefinery processes for the production of succinic acid.** BIOFUELS BIOPRODUCTS & BIOREFINING-BIOFPR111 RIVER ST, HOBOKEN 07030-5774, NJ USAWILEY, , 2024.

BARRAGAN-OCANA, Alejandro *et al.* **Biorefinery and sustainability for the production of biofuels and value-added products: A trends analysis based on network and patent analysis.** PLOS ONE1160 BATTERY STREET, STE 100, SAN FRANCISCO, CA 94111 USAPUBLIC LIBRARY SCIENCE, , 2023.

BRESCHI, Stefano; MALERBA, Franco. **Clusters, networks, and innovation.** Oxford: Oxford University Press, 2023.

CHATFIELD, Christopher. **The analysis of time series: an introduction.** 6th eded. Boca Raton, Fla.: Chapman & Hall/CRC, 2004.

CLARK, James; DESWARTE, Fabien. The Biorefinery Concept. *In*: INTRODUCTION TO CHEMICALS FROM BIOMASS. [S. l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2015. p. 1–29. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118714478.ch1>. Acesso em: 26 mar. 2025.

DIMIAN, Alexandre C. *et al.* **Castor oil biorefinery: Conceptual process design, simulation and economic analysis.** CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH & DESIGN165-189 RAILWAY TERRACE, DAVIS BLDG, RUGBY CV21 3HQ, ENGLANDINST CHEMICAL ENGINEERS, , 2019.

FABA, Laura; DIAZ, Eva; ORDONEZ, Salvador. **Recent developments on the catalytic technologies for the transformation of biomass into biofuels: A patent survey.** RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWSTHE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLANDPERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, , 2015.

FELDMAN, Ronen; SANGER, James. **The Text Mining Handbook: Advanced Approaches in Analyzing Unstructured Data.** Cambridge: Cambridge University Press, 2006. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/text-mining-handbook/0634B1DF14259CB43FCCF28972AE4382>. Acesso em: 26 mar. 2025.

FIELD, Andy P.; MILES, Jeremy; FIELD, Zoë. **Discovering statistics using R.** London ; Thousand Oaks, Calif: Sage, 2012.

GRILICHES, Zvi. Patent Statistics as Economic Indicators: A Survey. **Journal of Economic Literature**, [s. l.], v. 28, n. 4, p. 1661–1707, 1990.

HORNIK, Kurt *et al.* The textcat Package for n-Gram Based Text Categorization in R. **Journal of Statistical Software**, [s. l.], v. 52, p. 1–17, 2013.

KHEMTHONG, Pongtanawat *et al.* **Advances in catalytic production of value-added biochemicals and biofuels via furfural platform derived lignocellulosic biomass.** BIOMASS & BIOENERGYTHE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLANDPERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, , 2021.

KHOSHNEVISAN, Benyamin *et al.* A critical review on livestock manure biorefinery technologies: Sustainability, challenges, and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 135, p. 110033, 2021.

LOTKA, Alfred J. The frequency distribution of scientific productivity. **Journal of the Washington Academy of Sciences**, [s. l.], v. 16, n. 12, p. 317–323, 1926.

MANNING, Christopher D.; RAGHAVAN, Prabhakar; SCHÜTZE, Hinrich. **Introduction to information retrieval**. Cambridge: Cambridge university press, 2008.

MOSCOVIZ, Roman *et al.* **The environmental biorefinery: state-of-the-art on the production of hydrogen and value-added biomolecules in mixed-culture fermentation. GREEN CHEMISTRY** THOMAS GRAHAM HOUSE, SCIENCE PARK, MILTON RD, CAMBRIDGE CB4 0WF, CAMBS, ENGLAND ROYAL SOC CHEMISTRY, , 2018.

MÜHL, Diego Durante; DA SILVA, Mariana Vargas Braga; DE OLIVEIRA, Letícia. How to Build a Bioeconomic Food System: A Thematic Review. **Circular Economy and Sustainability**, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43615-024-00387-1>. Acesso em: 19 jun. 2024.

OOMS, Jeroen. writexl: Export Data Frames to Excel “xlsx” Format. , 2017. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=writexl>. Acesso em: 31 jan. 2025.

PESSOA, Luigi Cavalcanti *et al.* **Technological prospection of microalgae-based biorefinery approach for effluent treatment. ALGAL RESEARCH-BIOMASS BIOFUELS AND BIOPRODUCTS** RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS ELSEVIER, , 2021.

POTTER, W. Lotka’s Law Revisited. **Library Trends**, [s. l.], 1981. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Lotka's-Law-Revisited-Potter/e7703e0d6b7b0a9bd14d49f11daf949e584590b5>. Acesso em: 31 jan. 2025.

SHELDON, Roger A. The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability. **Green Chemistry**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 18–43, 2017.

SHEN, Rongchun; TAO, Ling; YANG, Bin. **Techno-economic analysis of jet-fuel production from biorefinery waste lignin. BIOFUELS BIOPRODUCTS & BIOREFINING** 111 RIVER ST, HOBOKEN 07030-5774, NJ USA WILEY, , 2019.

SILVA, Samara C. *et al.* **Microalgae-Derived Pigments: A 10-Year Bibliometric Review and Industry and Market Trend Analysis. MOLECULES** ST ALBAN-ANLAGE 66, CH-4052 BASEL, SWITZERLAND MDPI, , 2020.

TAUSEEF, S. M. *et al.* **A novel high-rate vermicomposting machine for downstream processing of biorefinery waste and other forms of organic solid waste. BIOMASS CONVERSION AND BIOREFINERY** TIERGARTENSTRASSE 17, D-69121 HEIDELBERG, GERMANY SPRINGER HEIDELBERG, , 2023.

THOMAS, Valerie M. **Product Self-Management: Evolution in Recycling and Reuse. Environmental Science and Technology**, 2003.

TSVETANOVA, Lora; RENNINGS, Michael; BROERING, Stefanie. **Actors and sectors in technological innovation systems: patterns of knowledge development in the field of second generation biorefineries. TECHNOLOGY ANALYSIS & STRATEGIC**

MANAGEMENT2-4 PARK SQUARE, MILTON PARK, ABINGDON OX14 4RN, OXON, ENGLANDROUTLEDGE JOURNALS, TAYLOR & FRANCIS LTD, , 2024.

WEISSERMEL, Klaus; ARPE, Hans-Jürgen (org.). **Industrial organic chemistry**. 4th completely rev. eded. Weinheim: Wiley-VCH, 2003.

WICKHAM, Hadley. **ggplot2: elegant graphics for data analysis**. Second editioned. Cham: Springer international publishing, 2016. (Use R!).

WILKINSON, Leland; FRIENDLY, Michael. The History of the Cluster Heat Map. **The American Statistician**, [s. l.], v. 63, n. 2, p. 179–184, 2009.

WIPO, World Intellectual Property Organization. **IPC/CPC Definitions**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://ipcpub.wipo.int/?notion=scheme&version=20250101&symbol=none&menulang=en&lang=en&viewmode=f&fipcp=no&showdeleted=yes&indexes=no&headings=yes¬es=yes&direction=o2n&initial=A&cwid=none&tree=no&searchmode=smart>. Acesso em: 31 jan. 2025.

YADAV, Kushi *et al.* **Algal biorefinery culminating multiple value-added products: recent advances, emerging trends, opportunities, and challenges**. 3 **BIOTECHTIERGARTENSTRASSE 17, D-69121 HEIDELBERG, GERMANYSPRINGER HEIDELBERG**, , 2022.