

MAPEAMENTO CIENTÍFICO DA PESQUISA SOBRE ÍMÃS PERMANENTES DE TERRAS RARAS: UMA ABORDAGEM BIBLIOMÉTRICA DA LITERATURA INTERNACIONAL

**SCIENTIFIC MAPPING OF RESEARCH ON RARE EARTH PERMANENT
MAGNETS: A BIBLIOMETRIC APPROACH TO THE INTERNATIONAL
LITERATURE**

Ciências Sociais Aplicadas • 09/08/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/786314489](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/786314489)

Ana Claudia Galvão Xavier¹

Suzana Leitão Russo²

Gabriel Francisco da Silva³

Jonas Pedro Fabris⁴

RESUMO

Este estudo teve como objetivo analisar a produção científica sobre ímãs permanentes de terras raras indexada na Web of Science no período de 1993 a 2023, identificando autores, instituições, países, periódicos e tendências de pesquisa. Para isso, foi realizada uma análise bibliométrica de artigos de acesso aberto, empregando indicadores bibliométricos, as leis de Bradford, Lotka e Zipf, além do software Biblioshiny para o tratamento, análise e visualização dos dados. Foram identificados 104 artigos, evidenciando crescimento das publicações principalmente a partir de 2010. Japão, Estados Unidos e China destacaram-se como os países com maior produção científica, refletindo sua relevância no desenvolvimento de tecnologias baseadas em terras raras. As análises também revelaram redes de colaboração científica e a predominância de pesquisas voltadas ao desempenho magnético, microestrutura, coercividade e sustentabilidade. Conclui-se que a literatura sobre ímãs permanentes de terras raras apresenta expansão contínua e crescente importância estratégica para tecnologias relacionadas à transição energética. Além de sistematizar a estrutura científica da área, o estudo identifica tendências e oportunidades que podem orientar futuras pesquisas.

Palavras-chave: Ímãs permanentes de terras raras; Bibliometria; Produção científica; Web of Science; Biblioshiny.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the scientific production on rare earth permanent magnets indexed in the Web of Science between 1993 and 2023, identifying the main authors, institutions, countries, journals, and research trends. A bibliometric analysis of open-access articles was conducted using bibliometric indicators, Bradford's, Lotka's, and Zipf's laws, as well as the Biblioshiny software for data

processing, analysis, and visualization. A total of 104 articles were identified, revealing a significant increase in scientific output, particularly after 2010. Japan, the United States, and China emerged as the leading contributors, reflecting their prominent role in the development of rare earth-based technologies. The analysis also highlighted scientific collaboration networks and the predominance of research focused on magnetic performance, microstructure, coercivity, and sustainability. The findings indicate that the scientific literature on rare earth permanent magnets has expanded steadily and plays a strategic role in technologies related to the energy transition. Furthermore, the study systematizes the scientific structure of the field and identifies trends and research opportunities for future investigations.

Keywords: Rare earth permanent magnets; Bibliometrics; Scientific production; Web of Science; Biblioshiny.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Filho *et al.* (2023), as terras raras são consideradas matérias-primas críticas para o desenvolvimento de diversas tecnologias modernas, desempenhando papel relevante em setores como energia renovável, eletrônica, telecomunicações, defesa e mobilidade elétrica. A crescente dependência desses elementos em aplicações estratégicas tem ampliado sua importância econômica, científica e tecnológica, especialmente no contexto da transição energética e da busca por sistemas produtivos de baixo carbono.

As terras raras constituem um grupo de dezessete elementos químicos formado pelos quinze lantanídeos, além do escândio (Sc) e do ítrio (Y). Embora relativamente abundantes na crosta terrestre, esses elementos apresentam características químicas semelhantes,

o que torna seus processos de separação e purificação tecnicamente complexos. Conforme destacam McNulty *et al.* (2022) e Pathapati *et al.* (2023), essa similaridade química representa um dos principais desafios associados à produção e ao processamento industrial das terras raras.

Entre as diversas aplicações desses elementos, destacam-se os ímãs permanentes de alto desempenho, especialmente aqueles baseados em neodímio-ferro-boro (NdFeB) e samário-cobalto (Sm-Co). Esses materiais são amplamente empregados em motores de veículos elétricos, turbinas eólicas, equipamentos eletrônicos e sistemas de armazenamento de energia, sendo considerados componentes essenciais para tecnologias associadas à transição energética e à eletrificação da mobilidade (Fujita; McCall; Ginosar, 2022; Alguacil, 2024).

Conforme Julapong *et al.* (2023), a concentração das reservas e da produção mundial de terras raras em um número reduzido de países tem estimulado pesquisas voltadas à segurança do abastecimento e à recuperação desses elementos a partir de fontes secundárias. Nesse contexto, temas relacionados à reciclagem, recuperação de resíduos e reaproveitamento de materiais têm recebido crescente atenção da comunidade científica, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis para a cadeia produtiva das terras raras (Elbashier *et al.*, 2021).

O aumento da relevância científica e tecnológica das terras raras também tem impulsionado estudos voltados à compreensão da evolução da produção científica relacionada ao tema. Xiao *et al.* (2023), ao analisarem a literatura internacional sobre terras raras, identificaram um crescimento contínuo das publicações e

destacaram a forte interdisciplinaridade das pesquisas desenvolvidas nessa área. De forma semelhante, Butu *et al.* (2023) observaram uma expansão significativa das investigações relacionadas aos metais críticos, impulsionada pelas demandas associadas à transição energética, à mobilidade elétrica e à segurança no fornecimento de recursos minerais.

Embora estudos bibliométricos anteriores tenham contribuído para a compreensão da dinâmica científica das terras raras e dos materiais críticos, ainda são escassas as investigações voltadas especificamente aos ímãs permanentes de terras raras. Como consequência, aspectos relacionados à evolução das publicações, aos autores mais influentes, às instituições de pesquisa, aos periódicos de destaque, às redes de colaboração científica e às tendências temáticas permanecem pouco explorados na literatura.

A bibliometria tem sido amplamente empregada para analisar a evolução de campos científicos, identificar redes de colaboração e revelar lacunas de pesquisa. Medeiros Filho e Russo (2018), ao investigarem a literatura sobre marcas como indicadores de inovação, demonstraram que a combinação entre revisão sistemática e análise bibliométrica possibilita mapear a estrutura do conhecimento de uma área e identificar oportunidades para o desenvolvimento de novas pesquisas. Nesse sentido, a aplicação dessas técnicas ao campo dos ímãs permanentes de terras raras pode contribuir para uma compreensão mais abrangente da evolução científica e tecnológica do tema.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo realizar uma análise bibliométrica da produção científica sobre ímãs permanentes de terras raras indexada na Web of Science no período

de 1993 a 2023, utilizando indicadores bibliométricos e os fundamentos das leis de Bradford, Lotka e Zipf.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Terras Raras

As terras raras constituem um grupo de dezessete elementos químicos formado pelos quinze lantanídeos, além do escândio (Sc) e do ítrio (Y). Para McNulty *et al.* (2022), esses elementos são encontrados principalmente em minerais como bastnasita, monazita e xenotímio, que representam as principais fontes de exploração econômica em nível mundial. Embora o termo “terras raras” sugira escassez, esses elementos são relativamente abundantes na crosta terrestre.

Conforme Pathapati *et al.* (2023), a principal dificuldade associada às terras raras não está em sua disponibilidade geológica, mas na elevada similaridade química entre os elementos, que torna os processos de separação e purificação tecnicamente complexos. Essa característica exige o emprego de tecnologias avançadas de processamento para obtenção de elementos com elevado grau de pureza, necessários para aplicações industriais e tecnológicas.

De acordo com Filho *et al.* (2023), a crescente utilização das terras raras em setores estratégicos tem levado esses elementos a serem classificados como matérias-primas críticas em diversos países. Sua importância está relacionada ao uso em equipamentos eletrônicos, sistemas de geração de energia renovável, tecnologias digitais, dispositivos ópticos, catalisadores industriais e aplicações militares, reforçando seu papel na economia contemporânea.

Além das fontes primárias provenientes da mineração, pesquisas recentes têm direcionado atenção crescente para a recuperação de terras raras a partir de fontes secundárias. Nesse contexto, Julapong *et al.* (2023) destacam que a reciclagem e o reaproveitamento desses elementos representam alternativas importantes para reduzir pressões sobre a mineração convencional e ampliar a segurança do abastecimento global.

2.2. Ímãs Permanentes de Terras Raras

Entre as aplicações de maior valor agregado das terras raras destacam-se os ímãs permanentes de alto desempenho. De acordo com Fujita, McCall e Ginosar (2022), esses materiais desempenham papel fundamental em diversas tecnologias modernas devido à elevada densidade de energia magnética e à capacidade de operar com alta eficiência energética.

Os principais representantes dessa classe são os ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB) e os ímãs de samário-cobalto (SmCo). Conforme McNulty *et al.* (2022), esses materiais apresentam propriedades magnéticas superiores às dos ímãs convencionais, possibilitando sua utilização em equipamentos que demandam elevada potência, miniaturização e eficiência operacional.

De acordo com Alguacil (2024), os ímãs permanentes de terras raras são componentes essenciais para motores de veículos elétricos, geradores de turbinas eólicas, discos rígidos, dispositivos eletrônicos e sistemas utilizados nos setores aeroespacial e de defesa. Em especial, os ímãs NdFeB são amplamente empregados em tecnologias relacionadas à transição energética devido ao seu elevado desempenho magnético.

O crescimento da mobilidade elétrica e da geração de energia renovável tem ampliado significativamente a demanda por elementos como neodímio, praseodímio, disprósio e térbio. Nesse cenário, Fujita, McCall e Ginosar (2022) ressaltam que a expansão dessas tecnologias tende a intensificar a necessidade de investimentos em mineração, processamento e reciclagem de terras raras para garantir o suprimento desses materiais nas próximas décadas.

2.3. Evolução Científica e Tendências de Pesquisa

Nas últimas décadas, a pesquisa sobre terras raras e materiais derivados tem apresentado crescimento contínuo em diferentes áreas do conhecimento. De acordo com Hatje *et al.* (2024), o interesse científico por esses elementos tem se ampliado em função de sua relevância para processos industriais, tecnologias emergentes e aplicações relacionadas à sustentabilidade.

De acordo com Jadhav *et al.* (2025), o desenvolvimento de novos materiais contendo terras raras tem impulsionado investigações voltadas ao aprimoramento de propriedades magnéticas, ópticas e eletrônicas. Esse movimento acompanha a crescente demanda por tecnologias mais eficientes, especialmente nos setores de energia, transporte e eletrônica avançada.

No campo dos ímãs permanentes de terras raras, Rezaei, Sanchez-Lecuona e Abdolazimi (2025) destacam que as pesquisas recentes têm se concentrado na melhoria do desempenho magnético, no aumento da estabilidade térmica e na redução da dependência de elementos considerados críticos para a cadeia produtiva. Essas

iniciativas buscam ampliar a eficiência dos materiais e reduzir vulnerabilidades relacionadas ao fornecimento de matérias-primas.

Paralelamente, a sustentabilidade tornou-se uma das principais linhas de investigação na área. Conforme Salfate e Sánchez (2022), o desenvolvimento de tecnologias voltadas à recuperação, reciclagem e reaproveitamento de terras raras tem ganhado destaque devido à necessidade de reduzir impactos ambientais e fortalecer a economia circular. Essa tendência também é observada em estudos que buscam alternativas para diminuir a dependência de fontes primárias de produção e ampliar a resiliência da cadeia de suprimentos global.

2.4. Estudos Bibliométricos na Área

O aumento da importância econômica e tecnológica das terras raras tem sido acompanhado pelo crescimento da produção científica relacionada ao tema, estimulando a realização de estudos bibliométricos voltados à compreensão da evolução da literatura, dos principais atores científicos e das tendências de pesquisa. Essas investigações permitem identificar padrões de publicação, redes de colaboração e temas emergentes, contribuindo para o entendimento da dinâmica científica de áreas estratégicas.

Xiao *et al.* (2023) analisaram a literatura internacional sobre terras raras indexada na Web of Science e identificaram um crescimento contínuo das publicações ao longo das últimas décadas. Os autores destacaram a liderança da China na produção científica e evidenciaram a forte interdisciplinaridade do tema, envolvendo áreas como ciência dos materiais, química, geologia, engenharia e meio ambiente.

De forma semelhante, Butu *et al.* (2023) investigaram a evolução das pesquisas relacionadas aos metais críticos e observaram um aumento expressivo das publicações impulsionado pela expansão das tecnologias de energia limpa, da mobilidade elétrica e das estratégias voltadas à segurança do abastecimento de matérias-primas minerais. Os resultados indicaram que a transição energética tem influenciado diretamente a definição das agendas de pesquisa internacionais.

No contexto da sustentabilidade dos recursos minerais, Schüller *et al.* (2011) destacaram a importância da reciclagem e da recuperação de terras raras como alternativas para reduzir a dependência de fontes primárias e ampliar a segurança do suprimento desses elementos. Essa temática permanece presente em estudos recentes voltados à economia circular, ao reaproveitamento de materiais e à recuperação de elementos terras raras a partir de resíduos tecnológicos e industriais.

Os estudos bibliométricos disponíveis contribuíram para ampliar a compreensão da evolução científica relacionada às terras raras, aos metais críticos e às tecnologias estratégicas. Entretanto, a maior parte dessas investigações concentra-se em temas amplos, envolvendo recursos minerais críticos, sustentabilidade ou cadeias de suprimento. Em comparação, observa-se uma quantidade mais limitada de análises bibliométricas especificamente direcionadas aos ímãs permanentes de terras raras.

Dessa forma, aspectos relacionados à evolução temporal das publicações, aos autores mais influentes, às instituições de destaque, às redes de colaboração científica e às tendências temáticas associadas aos ímãs permanentes de terras raras permanecem

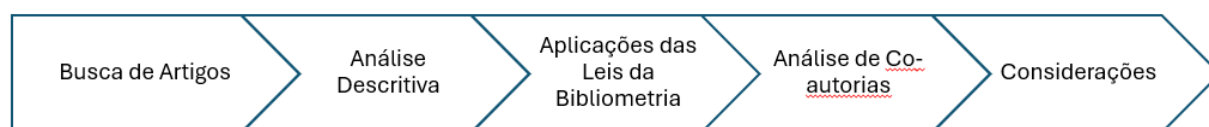
relativamente pouco explorados na literatura. Nesse contexto, estudos bibliométricos específicos podem contribuir para uma compreensão mais aprofundada da estrutura e da evolução desse campo de pesquisa.

3. METODOLOGIA

A pesquisa bibliométrica foi conduzida utilizando métodos descritivos e exploratórios com uma abordagem quantitativa. Os artigos científicos foram coletados no Web of Science, abrangendo o período de janeiro de 1993 a dezembro de 2023. Para essa pesquisa analisou-se os artigos “Open Access”, ou seja, de acesso livre.

Sob a ótica das leis de Bradford (1934), Lotka (1926) e Zipf (1949), a pesquisa foi estruturada em várias etapas (Figura 1), que incluem: a) a busca de informações de artigos nas bases de dados, análise descritiva dos resultados, análise de autores e instituições, análise dos periódicos, análise de palavras-chave e termos relevantes, análise coautorias e considerações finais.

Figura 1. Etapas da pesquisa



Fonte: Elaborada pelos autores

A busca bibliográfica foi realizada na base de dados Web of Science, acessada por meio do Portal de Periódicos da Capes. A estratégia de busca foi aplicada nos campos de título, resumo e palavras-chave, utilizando a expressão ("rare earth") AND ("permanent magnet") AND (neodymium OR Nd). Para o refinamento dos resultados, foram considerados apenas documentos classificados como artigos e

artigos de revisão, com acesso aberto (Open Access). A aplicação desses critérios resultou na recuperação de 104 publicações. A análise bibliométrica dos registros foi realizada com o auxílio do software Biblioshiny, interface gráfica do pacote Bibliometrix desenvolvido para o ambiente R.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os principais indicadores de autoria e produção científica da amostra analisada, permitindo caracterizar o perfil colaborativo das pesquisas sobre ímãs permanentes de terras raras.

Tabela 1. Análise descritiva sobre os autores e tipos de documentos

Autores	Resultados
Nº de Autores	454
Documentos de autoria única	6
Média de Coautores por Documento	5,31
Coautorias Internacionais %	24,04
Média de Citações por Documento	23,5
Palavras-chave dos Autores	420

Fonte: Elaborado pelos autores

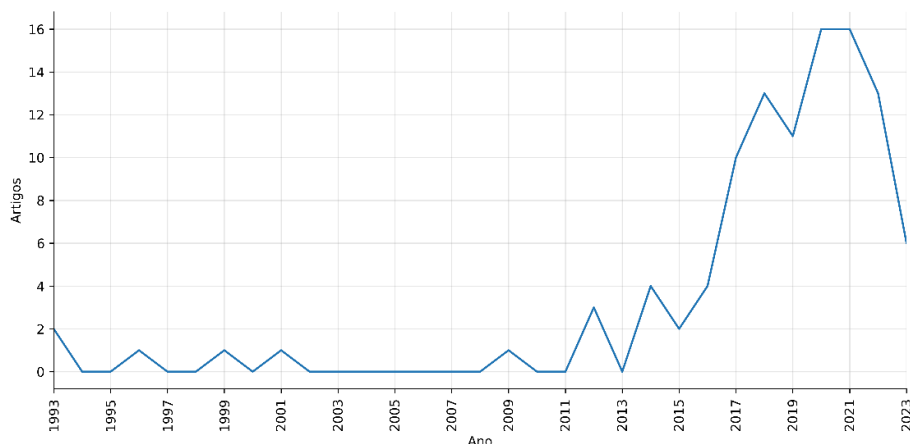
Foram identificados 454 autores para um conjunto de 104 artigos, resultando em uma média de 5,31 coautores por documento, o que demonstra que as pesquisas sobre ímãs permanentes de terras raras são desenvolvidas predominantemente em equipes de pesquisa. Além disso, a taxa de 24,04% de coautorias internacionais indica

uma participação significativa de colaborações entre diferentes países.

A compreensão das tendências e do crescimento da pesquisa na área ao longo das últimas três décadas é facilitada pela Figura 3, que permite identificar a evolução anual do número de publicações sobre terras raras entre 1993 e 2023. Observa-se um aumento progressivo no volume de publicações a partir de 2011, culminando no pico máximo registrado em 2021.

A Figura 2 apresenta a distribuição geográfica das publicações científicas sobre ímãs permanentes de terras raras, permitindo identificar os países que mais contribuem para o desenvolvimento desse campo de pesquisa.

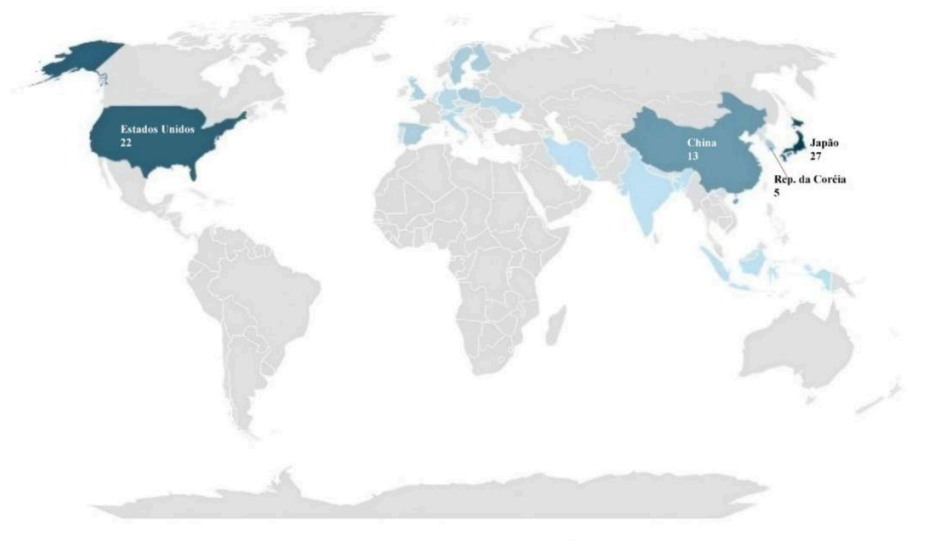
Figura 2. Evolução anual da produção científica sobre terras raras (ano de 1993 a 2023)



Fonte: Elaborado pelos autores

Observa-se uma concentração da produção científica em países com tradição em ciência dos materiais, tecnologias magnéticas e aplicações voltadas à transição energética. Destacam-se Japão, Estados Unidos, China e Coreia do Sul, que registram os maiores volumes de publicações entre os países analisados.

Figura 3. Número de artigos por país

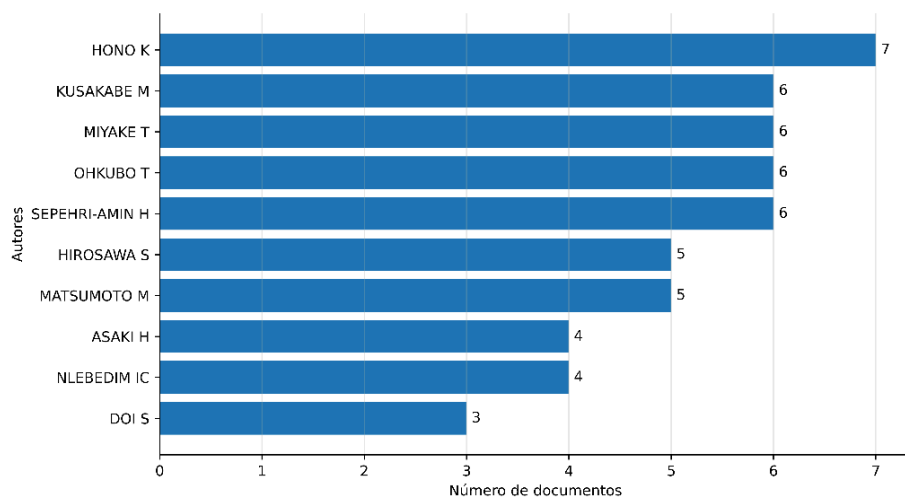


Fonte: Mapa elaborado pelos autores (2026).

A distribuição das publicações por país evidencia a liderança do Japão, com 27 artigos publicados, seguido pelos Estados Unidos, com 22 publicações, e pela China, com 13 artigos. A Coreia do Sul também se destaca entre os principais contribuintes, com cinco publicações. Os demais países apresentam participação menos expressiva, indicando que a pesquisa sobre ímãs permanentes de terras raras está concentrada em um número reduzido de nações. Esse cenário reflete a relevância estratégica desses materiais para países que possuem forte capacidade tecnológica e investimentos em pesquisa e desenvolvimento relacionados à mobilidade elétrica, energia renovável e materiais avançados.

A análise da produtividade dos autores na pesquisa sobre ímãs permanentes de terras raras é apresentada na Figura 4, permitindo identificar os principais pesquisadores da área e seus respectivos níveis de produção científica. Foram considerados os 10 autores mais relevantes, destacando-se Hono K., com sete artigos publicados.

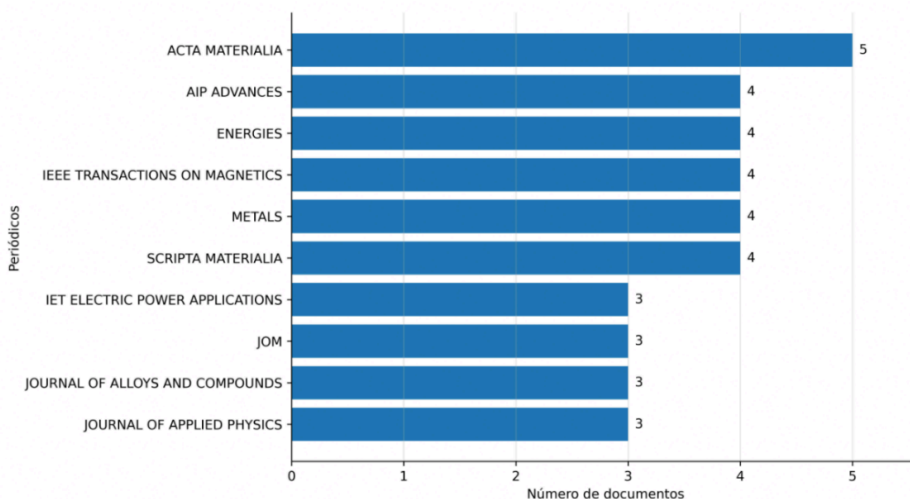
Figura 4. Número de artigos por Autor



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 5 destaca dos 62 periódicos, os 10 periódicos com maior número de publicações em acesso aberto na área de pesquisa sobre terras raras.

Figura 5. Periódicos com maior número de publicações sobre terras raras de acesso aberto



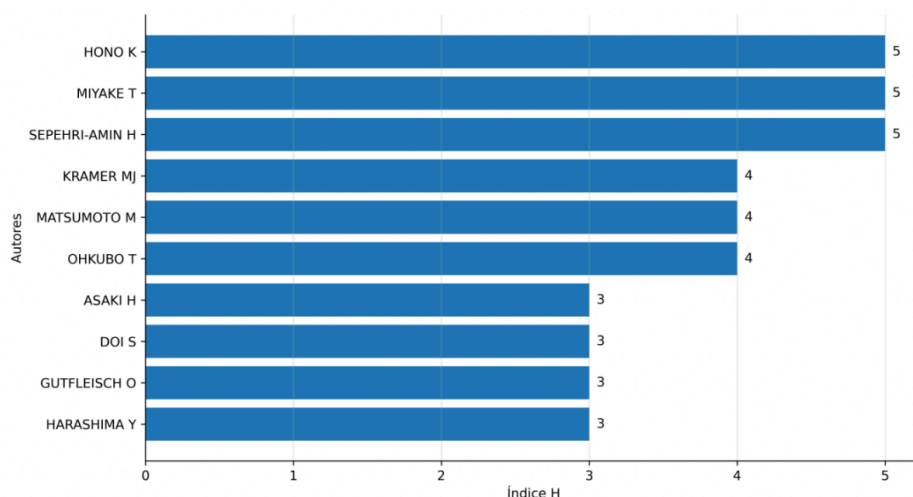
Fonte: Elaborado pelos autores.

Entre os 62 periódicos identificados, destaca-se o Acta Materialia, com cinco publicações. Em seguida, AIP Advances, Energies, IEEE Transactions on Magnetism, Metals e Scripta Materialia aparecem com quatro publicações cada. Os demais periódicos do ranking registraram três publicações, evidenciando uma distribuição

relativamente equilibrada da produção científica entre os principais veículos da área.

A Figura 6 mostra o índice H de cada autor na pesquisa sobre terras raras, indicando a produtividade e o impacto de seus trabalhos.

Figura 6. Desempenho dos principais autores com base no índice H



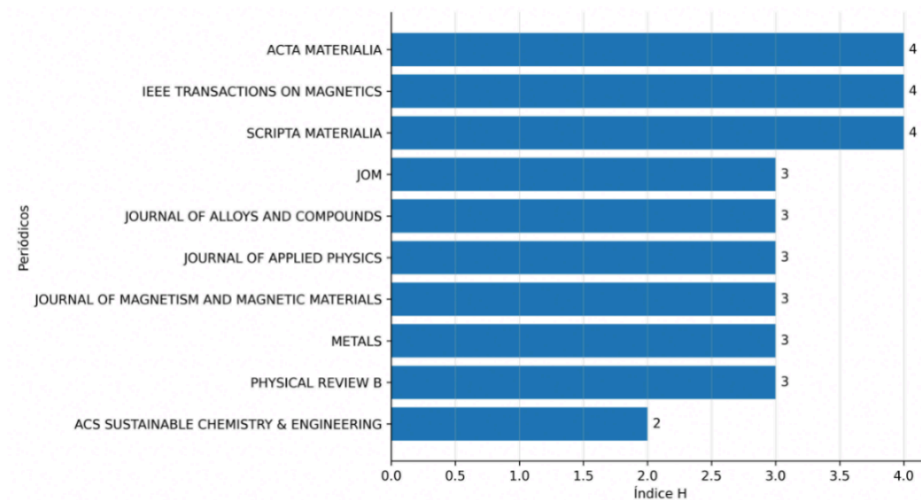
Fonte: Elaborado pelos autores.

O desempenho dos principais autores, avaliado com base no índice H, é apresentado na Figura 7. Observa-se que Hono K., Miyake T. e Sepehri-Amin H. se destacam com índice H igual a 5, indicando maior impacto científico entre os autores analisados. Kramer M.J., Matsumoto M. e Ohkubo T. apresentam índice H de 4, enquanto os demais autores registram índice H de 3. Esses resultados evidenciam a relevância e a influência desses pesquisadores na área de ímãs permanentes de terras raras.

A Figura 8 ilustra os 10 periódicos com os maiores fatores de impacto H. O impacto H mede a produtividade e o impacto das publicações dos autores envolvidos na pesquisa sobre ímãs permanentes de terras raras. É uma métrica importante que reflete tanto a

quantidade de trabalhos publicados quanto a frequência com que esses trabalhos são citados.

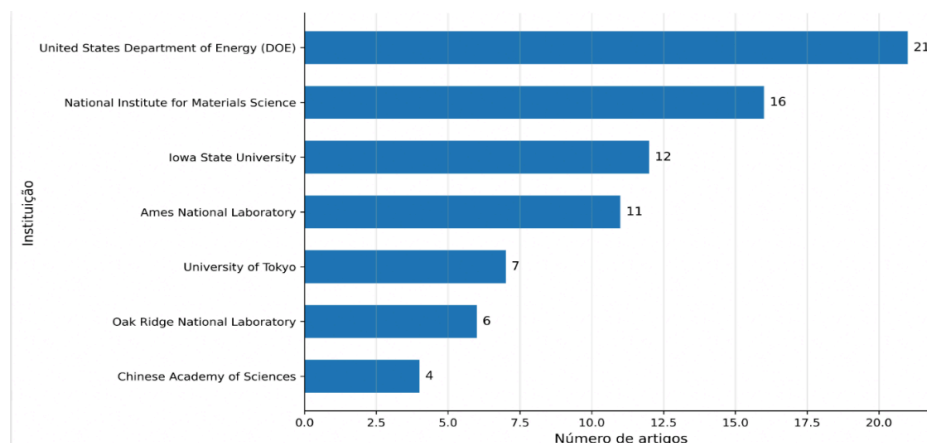
Figura 7. Fator de impacto H



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 8 apresenta o número de artigos publicados sobre terras raras por diferentes instituições, evidenciando aquelas que se destacam na produção científica e no desenvolvimento de pesquisas relacionadas à temática.

Figura 8. Instituições x Número de artigos



Fonte: Elaborado pelos autores.

A distribuição das publicações por instituição evidencia a liderança do United States Department of Energy (DOE), com 21 artigos publicados, seguido pelo National Institute for Materials Science,

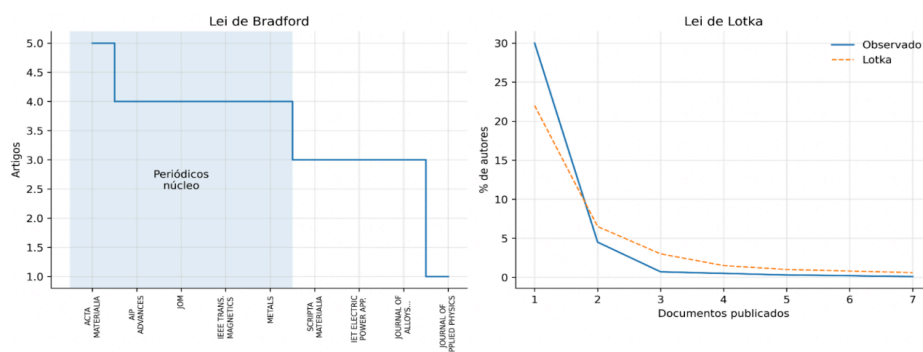
com 16 publicações. Também se destacam a Iowa State University e o Ames National Laboratory, com 12 e 11 artigos, respectivamente. Os resultados demonstram a forte participação de instituições norte-americanas e japonesas no avanço das pesquisas sobre terras raras, refletindo sua relevância científica e tecnológica nesse campo de estudo.

4.1. Análise da Lei de Bradford, da Lei de Lotka e da Lei de Zipf

A Lei de Bradford descreve como os artigos estão concentrados em um pequeno número de periódicos, enquanto o restante se dispersa em muitos periódicos. Enquanto a Lei de Lotka descreve a distribuição da produtividade científica entre os pesquisadores.

A Figura 9(a) apresenta a distribuição dos artigos sobre ímãs permanentes de terras raras entre diferentes periódicos científicos, conforme a Lei de Bradford. E a Figura 9(b) ilustra a produção dos autores sobre terras raras conforme a Lei de Lotka.

Figura 9. N° de artigos versus periódicos (Lei de Bradford) e produção dos autores de acordo com a Lei de Lotka



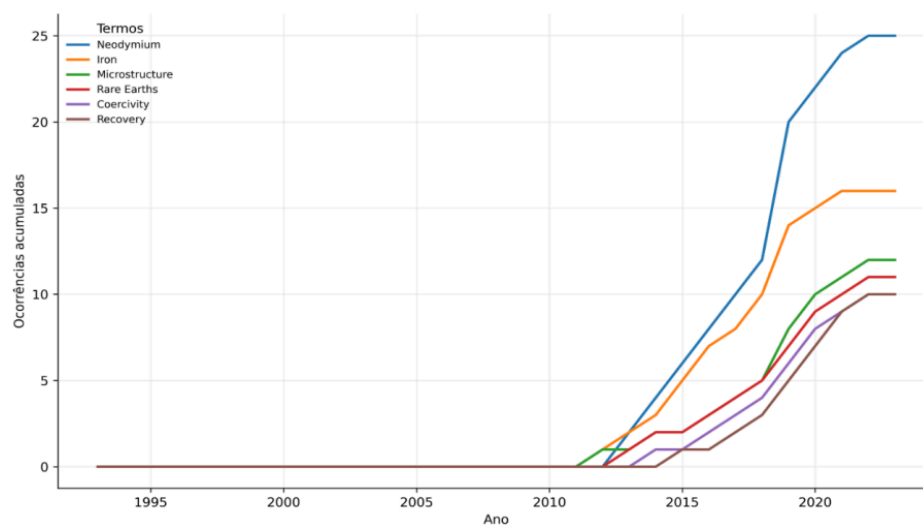
Fonte: Elaborado pelos autores.

A Lei de Zipf pode ser aplicada para analisar a distribuição e a frequência das palavras-chave nos artigos científicos sobre ímãs permanentes de terras raras. Segundo esta lei, a frequência de uma

palavra é inversamente proporcional à sua posição no ranking de frequência.

A Figura 10 apresenta a frequência (rank) das principais palavras-chave usadas nos artigos sobre terras raras por ano. Isso ajuda a identificar quais tópicos foram mais pesquisados e como o foco da pesquisa mudou ao longo do tempo. Observa-se que até o ano de 2011 os termos permanecem similares em frequência e após 2011, houve uma tendência de uso dos termos: Neodímio (ND) (24), Ferro (16), Microestrutura (12), Terras Raras (11), Coercividade (10), Recuperação (10), Liga (8), Design (6), Anisotropia (6) e Aumento de Coercividade (5).

Figura 10. Frequência das palavras-chave por ano



Fonte: Elaborado pelos autores

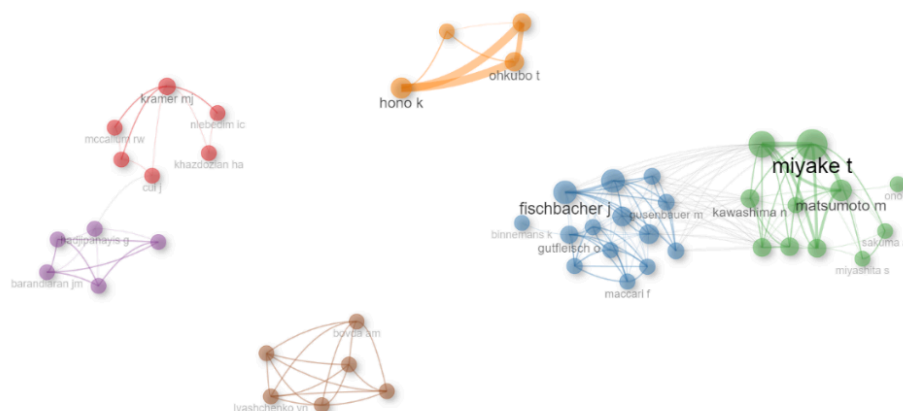
4.2. Análise da Rede de Colaboração Entre os Autores e das Citações

A análise das redes de colaboração científica permite identificar como os pesquisadores se organizam e interagem em determinada área do conhecimento. A partir das relações de coautoria e das conexões estabelecidas entre os autores, é possível reconhecer os

principais grupos de pesquisa e os pesquisadores de maior influência. Além disso, a análise das citações auxilia na identificação dos autores e trabalhos de maior impacto na literatura sobre ímãs permanentes de terras raras.

A Figura 11 apresenta a rede de colaboração entre os autores da amostra analisada, evidenciando os principais grupos de pesquisa e as relações de coautoria estabelecidas no campo dos ímãs permanentes de terras raras.

Figura 11. Rede de colaboração entre autores



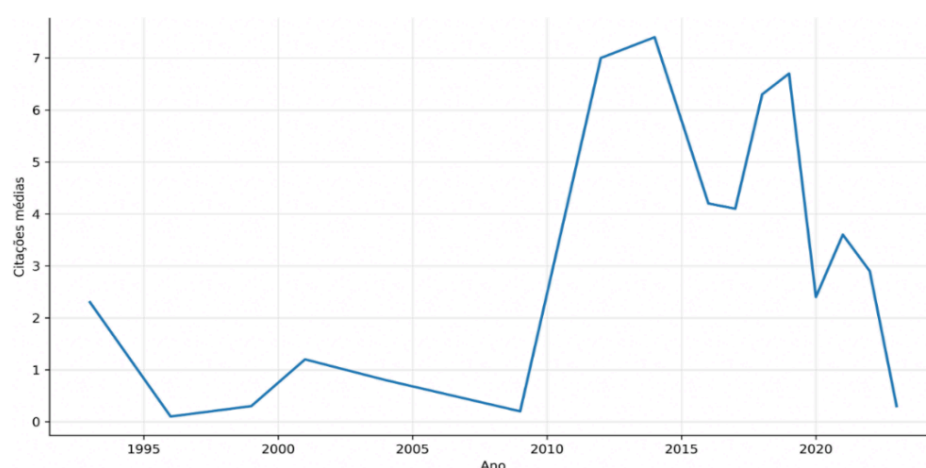
Fonte: Elaborado pelos autores

Observa-se a formação de distintos grupos de colaboração, indicando que a produção científica sobre ímãs permanentes de terras raras está estruturada em núcleos de pesquisa relativamente consolidados. Destacam-se os agrupamentos associados aos autores Miyake T., Fischbacher J., Hono K. e Ohkubo T., que apresentam maior número de conexões e interação com outros pesquisadores da rede. O grupo liderado por Miyake T. constitui o maior cluster identificado, evidenciando sua relevância na produção científica da área. De modo geral, a rede apresenta uma estrutura fragmentada, caracterizada pela existência de múltiplos grupos de colaboração com limitada interação entre si, sugerindo que o desenvolvimento

das pesquisas ocorre predominantemente em equipes especializadas e com forte cooperação interna.

A Figura 12 apresenta a média de citações por ano dos artigos sobre terras raras, evidenciando a evolução de seu impacto científico ao longo do período analisado.

Figura 12. Número médio de citações por ano



Fonte: Elaborado pelos autores

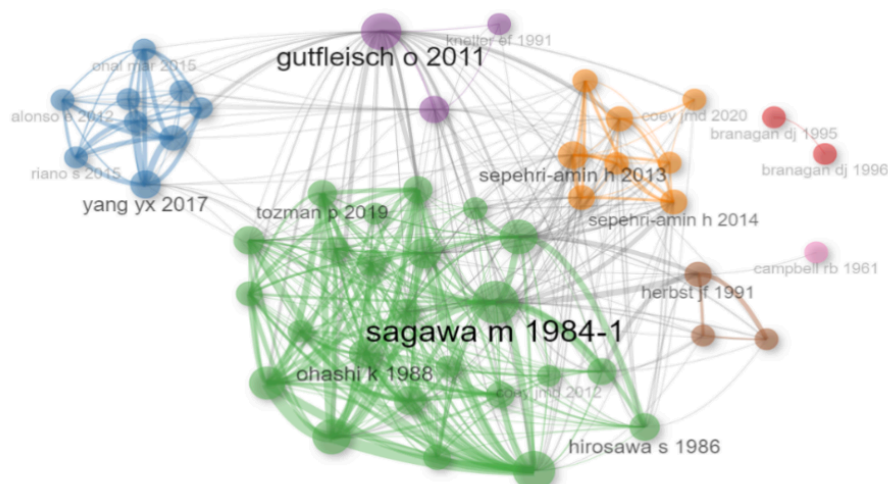
A evolução das citações médias por ano evidencia o crescente impacto científico das pesquisas sobre ímãs permanentes de terras raras ao longo do período analisado. Observa-se um aumento expressivo das citações a partir de 2010, com os maiores valores registrados entre 2012 e 2015, indicando a publicação de trabalhos de elevada relevância para a área. Nos anos mais recentes, verifica-se uma redução no número médio de citações, o que pode ser explicado pelo menor tempo disponível para que os artigos acumulem citações na literatura científica.

A Figura 13 apresenta a rede de cocitações dos documentos mais influentes na literatura sobre ímãs permanentes de terras raras. Observa-se a formação de diferentes agrupamentos temáticos,

indicando a existência de núcleos de conhecimento que servem como base para o desenvolvimento das pesquisas na área.

O maior agrupamento da rede é centrado nos trabalhos de Sagawa M. (1984), reconhecidos como marcos no desenvolvimento dos ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (NdFeB). A elevada centralidade e o número de conexões associadas ao autor evidenciam sua relevância como referência fundamental para as pesquisas relacionadas ao desempenho magnético, propriedades microestruturais e aplicações tecnológicas desses materiais. Também se destacam trabalhos clássicos de Hirosawa S. (1986) e Ohashi K. (1988), frequentemente co-citados com os estudos de Sagawa, reforçando sua importância na consolidação do conhecimento científico sobre ímãs de terras raras.

Figura 13. Rede de cocitações



Fonte: Elaborado pelos autores

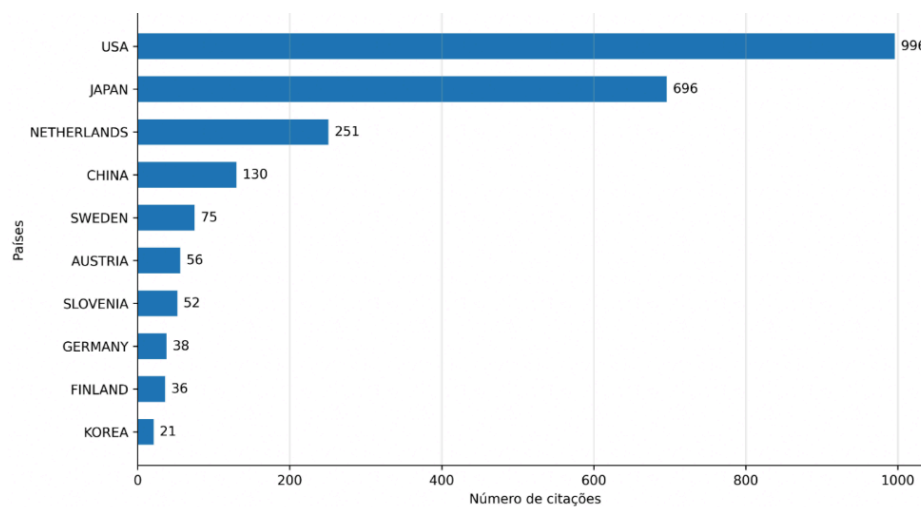
Outro agrupamento relevante está associado aos trabalhos de Gutfleisch O. (2011), que apresentam forte conexão com pesquisas voltadas à sustentabilidade, materiais avançados e desenvolvimento de tecnologias magnéticas para aplicações energéticas. Da mesma forma, os estudos de Sepehri-Amin H. (2013; 2014) formam um

núcleo específico relacionado à microestrutura, coercividade e otimização do desempenho magnético dos ímãs NdFeB.

De modo geral, a rede evidencia que a literatura da área está estruturada em torno de trabalhos clássicos sobre o desenvolvimento dos ímãs permanentes e de pesquisas mais recentes voltadas ao aprimoramento de suas propriedades e aplicações. A presença de conexões entre os diferentes agrupamentos demonstra a integração entre estudos fundamentais e avanços tecnológicos contemporâneos, caracterizando uma base científica consolidada e altamente inter-relacionada.

A Figura 14 mostra a quantidade de citações que os artigos de cada país receberam. Isso indica a influência e o impacto das pesquisas realizadas em diferentes países.

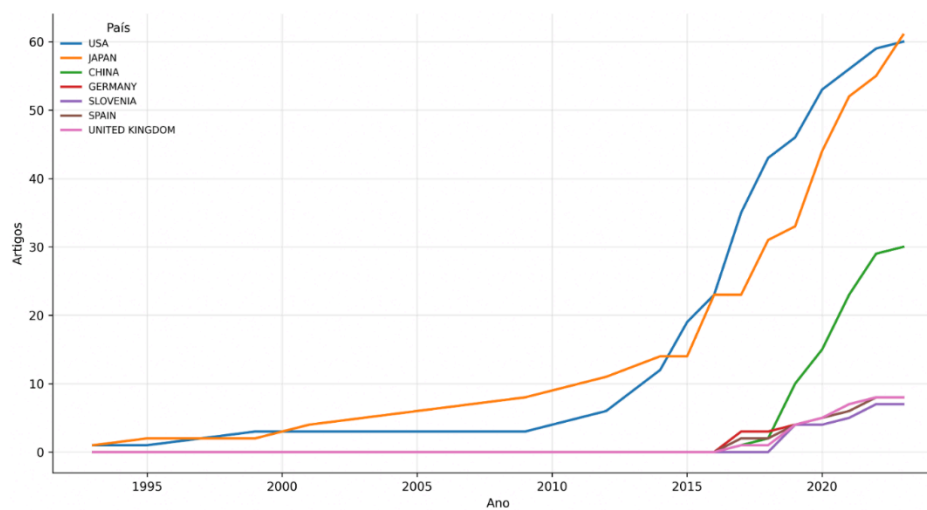
Figura 14. Distribuição das citações por país



Fonte: Elaborado pelos autores

A Figura 15 mostra a evolução anual do número de artigos sobre terras raras publicados por país.

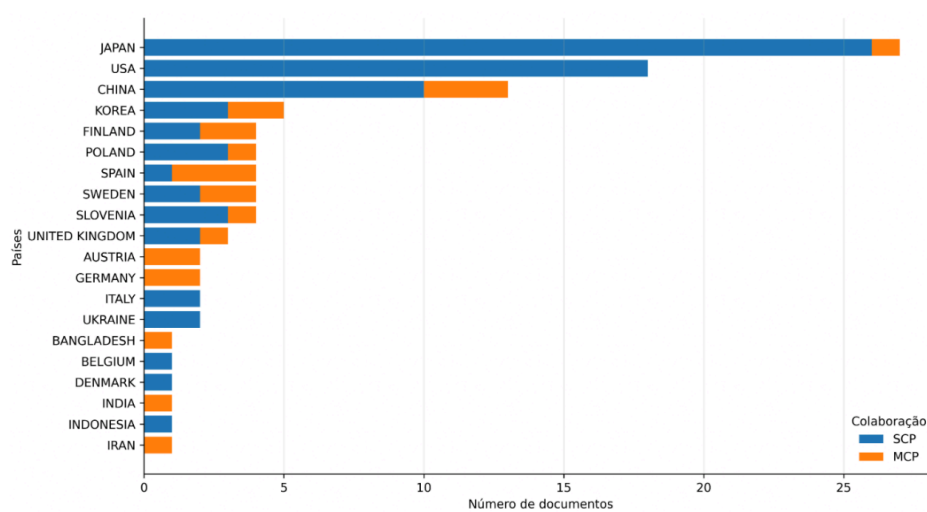
Figura 15. Evolução anual do número de artigos por país



Fonte: Elaborado pelos autores

A Figura 16 apresenta o número de publicações sobre terras raras por país, levando em consideração a quantidade de países participantes em cada publicação. Ele ajuda a entender a colaboração internacional na pesquisa.

Figura 16. Número de Publicações por País



Fonte: Elaborado pelos autores

A distribuição das publicações por país do autor correspondente, considerando trabalhos desenvolvidos em colaboração nacional (SCP) e internacional (MCP), evidencia a liderança do Japão na produção científica da área, com ampla predominância de estudos realizados por pesquisadores vinculados ao próprio país. Em seguida, destacam-se os Estados Unidos e a China, reforçando a

concentração das pesquisas sobre ímãs permanentes de terras raras em nações com tradição em ciência dos materiais e tecnologias magnéticas.

De modo geral, observa-se que as publicações de país único (SCP) superam aquelas desenvolvidas em colaboração internacional (MCP), indicando que grande parte da produção científica é conduzida por grupos nacionais consolidados. Entretanto, países como China, Coreia do Sul e Espanha apresentam participação mais expressiva em pesquisas colaborativas, sugerindo maior inserção em redes internacionais de pesquisa. Esses resultados demonstram que, embora a área seja fortemente concentrada em centros de excelência nacionais, a cooperação internacional desempenha papel relevante na ampliação e disseminação do conhecimento científico.

5. CONCLUSÕES

A análise bibliométrica permitiu caracterizar a evolução das publicações, identificar os principais autores, instituições, periódicos, países e tendências temáticas associadas ao campo de pesquisa, no período de 1993 a 2023.

Os resultados evidenciaram um crescimento significativo da produção científica a partir da década de 2010, acompanhando a expansão das aplicações dos ímãs permanentes de terras raras em veículos elétricos, sistemas de energia renovável e outras tecnologias estratégicas. Também foi observada a concentração da produção científica em instituições e grupos de pesquisa localizados principalmente nos Estados Unidos, Japão e China, países que se destacam tanto pelo volume de publicações quanto pelo impacto das pesquisas desenvolvidas.

A aplicação das Leis de Bradford e Lotka permitiu identificar a concentração das publicações em um núcleo reduzido de periódicos e a predominância de poucos autores com elevada produtividade científica, características típicas de áreas de pesquisa em processo de consolidação e especialização.

As análises de colaboração e cocitação revelaram a existência de grupos de pesquisa consolidados e de trabalhos de referência que estruturam o desenvolvimento científico da área, especialmente aqueles relacionados aos ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB). Além disso, a análise das palavras-chave indicou a crescente relevância de temas relacionados ao neodímio, à microestrutura, à coercividade e à recuperação de materiais, refletindo a busca por maior desempenho tecnológico e sustentabilidade.

Como contribuição, o estudo oferece uma visão integrada da literatura de acesso aberto sobre ímãs permanentes de terras raras, permitindo compreender a estrutura da produção científica, os principais atores envolvidos e as tendências de pesquisa observadas ao longo das últimas três décadas. Os resultados podem servir como referência para pesquisadores interessados no tema e para futuras investigações relacionadas ao desenvolvimento de materiais magnéticos avançados e tecnologias baseadas em terras raras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGUACIL, F. J. Utilizing deep eutectic solvents in the recycle, recovery, purification and miscellaneous uses of rare earth elements. **Molecules**, v. 29, n. 6, p. 1356, 2024.

BRADFORD, S. C. Sources of information on specific subjects. **Engineering**, London, v. 137, p. 85-86, 1934.

BUTU, A.; RODINO, S.; BUTU, M. Global research progress and trends on critical metals. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 4834, 2023.

ELBASHIER, E.; MUSSA, A.; HAFIZ, M. A.; HAWARI, A. H. Recovery of rare earth elements from waste streams using membrane processes: an overview. **Hydrometallurgy**, v. 204, p. 105706, 2021.

FILHO, W. L.; KOTTER, R.; ÖZUYAR, P. G.; ABUBAKAR, I. R.; EUSTACHIO, J. H. P. P.; MATANDIROTYA, N. R. Understanding Rare Earth Elements as Critical Raw Materials. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 1919, 2023.

FUJITA, Y.; MCCALL, S. K.; GINOSAR, D. Recycling rare earths: perspectives and recent advances. **MRS Bulletin**, v. 47, n. 3, p. 283–288, 2022.

HATJE, V.; SCHIJF, J.; JOHANNESSON, K. H.; ANDRADE, R.; CAETANO, M.; BRITO, P.; HALEY, B. A.; LAGARDE, M.; JEANDEL, C. The global biogeochemical cycle of the rare earth elements. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 38, e2024GB008125, 2024.

JADHAV, S. B.; MALAVEKAR, D. B.; MOHITE, R. A.; SHAIKH, S. B.; KADAM, K. V.; PAWASKAR, P. N.; KIM, J. H.; LEE, N. E. A Critical review of lanthanum and lanthanum-based materials: synthesis, applications, and challenges. **Rare Metals**, v. 44, n. 8, p. 5201–5232, 2025.

JULAPONG, P.; NUMPRASANTHAI, A.; TANGWATTANANUKUL, L.; JUNTARASAKUL, O.; SRICHONPHAISARN, P.; AIKAWA, K.; PARK, I.; ITO, M.; TABELIN, C. B.; PHENGSAART, T. Rare earth elements recovery from primary and secondary resources using flotation: a systematic review. **Applied Sciences**, v. 13, n. 14, p. 8364, 2023.

LOTKA, A. J. The frequency distribution of scientific productivity. **Journal of the Washington Academy of Sciences**, Washington, v. 16, n. 12, p. 317-323, 1926.

MCNULTY, T.; HAZEN, N.; PARK, S. Processing the ores of rare-earth elements. **MRS Bulletin**, v. 47, n. 3, p. 258–266, 2022.

MEDEIROS FILHO, A. R.; RUSSO, S. L. Marcas como um indicador: revisão sistemática e análise bibliométrica da literatura. **Biblios: Journal of Librarianship and Information Science**, n. 71, p. 50-67, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5195/biblios.2018.464>.

PATHAPATI, S. V. S. H.; FREE, M. L.; SARSWAT, P. K. A comparative study on recent developments for individual rare earth elements separation. **Processes**, v. 11, n. 7, p. 2070, 2023.

REZAEI, M.; SANCHEZ-LECUONA, G.; ABDOLAZIMI, O. A cross-disciplinary review of rare earth elements: deposit types, mineralogy, machine learning, environmental impact, and recycling. **Minerals**, v. 15, n. 7, p. 720, 2025.

SALFATE, G.; SÁNCHEZ, J. Rare earth elements uptake by synthetic polymeric and cellulose-based materials: a review. **Polymers**, v. 14, n. 21, p. 4786, 2022.

SCHÜLER, D.; BUCHERT, M.; LIU, R.; DITTRICH, S.; MERZ, C. **Study on rare earths and their recycling**. Darmstadt: Öko-Institut, 2011.

XIAO, W.; ZHOU, L.; YANG, P.; YAN, N.; WEI, C. An international comparative study of rare earth research from the perspective of bibliometrics. **Heliyon**, v. 9, n. 5, e16075, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16075.

ZIPF, G. K. **Human behavior and the principle of least effort: an introduction to human ecology**. Cambridge: Addison-Wesley Press, 1949.

¹ Doutoranda e Mestra em Ciência da Propriedade Intelectual pela Universidade federal de Sergipe (UFS), Especialista na Programação do Ensino de Pedagogia pela Universidade de Pernambuco (UPE) e Engenheira Civil pela universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Professora do Instituto Federal do Piauí (IFPI). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2300-0340>.

² Pós-Doutorado em Transferência de Tecnologia pela University of South Florida (USA), Pós-Doutorado em Métodos Quantitativos Aplicados à Gestão pela Universidade de Algarve em Faro/Portugal, Doutora em Engenharia de Produção pela UFSC, Mestra em Estatística pela PUC/RJ. Foi Professora Associada da Universidade Federal de Sergipe e, atualmente, é professora do Programa de Pós-graduação Profissional em Propriedade Intelectual do Instituto Federal do Piauí (IFPI). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9810-274X>

³ Engenheiro Químico pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e doutor em Engenharia de Alimentos pela Universidade Estadual de Campinas - FEA. Atualmente, é professor titular da Universidade Federal de Sergipe e participa dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Química - PEQ e Programa de Pós-Graduação em Ciência da Propriedade Intelectual (PPGPI). E-

mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9622-2518>

⁴ Engenheiro Civil pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina, doutor em Ciência da Propriedade Intelectual (PPGPI/UFS) e research scholar na University of South Florida (USA). Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação Profissional em Propriedade Intelectual do Instituto Federal do Piauí (IFPI). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8467-6424>