EVENTO ON-LINE
ConBRepro
XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
02 a 04 de dezembro de 2026
Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

O Caminho Pouco Explorado do Hidrogênio Verde à Ureia: Análise Bibliométrica Sistemática da Amônia Verde na Cadeia de Fertilizantes Nitrogenados

Danilo Inácio
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Karen Avalos Zanoni Inácio
Escola de Educação e Humanidades - Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Giane Gonçalves Lenzi
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Angelo Marcelo Tusset
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo: A crescente relevância do hidrogênio verde como vetor de descarbonização industrial tem impulsionado o interesse científico pela produção de amônia verde e suas aplicações na cadeia de fertilizantes nitrogenados. Contudo, a extensão da lacuna de pesquisa sobre a cadeia completa Hidrogênio verde, Amônia Verde e ureia ainda não havia sido documentada de forma sistemática e quantitativamente rigorosa. Este estudo objetiva mapear e analisar a distribuição da literatura científica sobre essa cadeia produtiva, identificando e quantificando lacunas em cada nível temático. Para tanto, foi desenvolvido o *Hierarchical Taxonomic Bibliometric Funnel (HTBF)*, método original estruturado em sete camadas hierárquicas e executado nas bases *Scopus* e *Web of Science* por meio de 27 combinações de *strings* booleanas, para o período de 2011 a 2026. Os resultados demonstram expressivo afunilamento bibliométrico: das 23.986 publicações sobre hidrogênio verde, apenas 788 (3,3%) abordam a indústria química, 127 (0,53%) associam a cadeia à amônia verde, 25 (0,10%) tratam da aplicação em fertilizantes e apenas 2 documentos únicos (0,01%) abordam a cadeia completa até a ureia. A análise qualitativa dos 25 artigos do corpus analítico central revelou lacunas em seis dimensões distintas. O *HTBF* é apresentado como contribuição metodológica original aplicável ao mapeamento bibliométrico de cadeias produtivas industriais com múltiplos níveis de desagregação temática.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde, Amônia Verde, Fertilizantes Nitrogenados, Ureia, Revisão Bibliométrica Sistemática.

The Underexplored Path from Green Hydrogen to Urea: A Systematic Bibliometric Analysis of Green Ammonia in the Nitrogen Fertilizer Chain

Abstract: The growing relevance of green hydrogen as a vector for industrial decarbonization has driven scientific interest in green ammonia production and its applications in the nitrogen fertilizer chain. However, the extent of the research gap in the scientific literature on the complete Green Hydrogen, Green Ammonia and urea chain had not yet been documented in a systematic and quantitatively rigorous manner. This study aims to map and analyze the distribution of the scientific literature on this production chain, identifying and quantifying gaps at each thematic level. To this end, the Hierarchical Taxonomic Bibliometric Funnel (HTBF) was developed, an original method

structured in seven hierarchical layers and executed in the Scopus and Web of Science databases through 27 Boolean string combinations, covering the period from 2011 to 2026. The results demonstrate an expressive bibliometric funneling trajectory: of the 23,986 publications on green hydrogen, only 788 (3.3%) address the chemical industry, 127 (0.53%) associate the chain with green ammonia, 25 (0.10%) address the application in fertilizers, and only 2 unique documents (0.01%) address the complete chain through to urea. The qualitative analysis of the 25 articles in the central analytical corpus revealed gaps across six distinct dimensions. The HTBF is presented as an original methodological contribution applicable to the bibliometric mapping of industrial production chains with multiple levels of thematic disaggregation.

Keywords: Green Hydrogen, Green Ammonia, Nitrogen Fertilizers, Urea, Systematic Bibliometric Review.

1. Introdução

A transição energética global tem impulsionado o interesse crescente pelo hidrogênio verde como vetor estratégico para a descarbonização de setores industriais de difícil abatimento, posicionando-se como alternativa viável à medida que os custos das tecnologias de eletrólise e de geração renovável continuam em trajetória de redução (DAWOOD *et al*., 2020; GLENK; REICHELSTEIN, 2019). Relatórios de organismos internacionais indicam que o hidrogênio verde poderá desempenhar papel central na descarbonização industrial, no transporte, na geração de energia elétrica e em edificações, configurando um espectro amplo de aplicações que justifica o crescimento expressivo da literatura científica sobre o tema (IEA, 2025; OLIVEIRA *et al*., 2021).

Dentre as aplicações industriais do hidrogênio verde, a produção de amônia verde ocupa posição de destaque. A amônia, com produção estimada em aproximadamente 183 milhões de toneladas em 2020 (IRENA, 2022), é destinada predominantemente à fabricação de fertilizantes nitrogenados, além de aplicações como combustível marítimo, vetor de hidrogênio e insumo químico. O processo convencional Haber-Bosch emite aproximadamente 1,6 t CO_2 por tonelada produzida, consumindo cerca de 1% da energia primária global (RIBEIRO; SANTOS, 2025; SMITH *et al*., 2020), tornando a amônia verde uma das rotas mais promissoras para a descarbonização da indústria química (BORA *et al.*, 2024; IRENA, 2022).

No contexto da segurança alimentar global, a amônia verde ganha relevância adicional pela sua aplicação na cadeia de fertilizantes nitrogenados. A ureia, principal produto nitrogenado derivado da amônia, representa aproximadamente 57% desse mercado, sendo insumo crítico para a produção agrícola mundial (KHAN *et al*., 2024; MAO *et al.*, 2024). A ureia verde, obtida a partir de amônia verde e CO_2 capturado, configura o elo final de uma cadeia estratégica que conecta energia renovável, hidrogênio verde, amônia verde e fertilizantes nitrogenados sustentáveis (IEA, 2025).

Apesar dessa relevância, a literatura concentra-se nos estágios iniciais da cadeia, com escassa atenção às etapas *downstream*, sobretudo à aplicação da amônia verde na produção de fertilizantes nitrogenados e, particularmente, de ureia, lacuna ainda não documentada quantitativamente de forma sistemática. Este estudo objetiva mapear e analisar essa distribuição da literatura científica, identificando e quantificando as lacunas de pesquisa por nível de especificidade temática, por meio do *Hierarchical Taxonomic Bibliometric Funnel (HTBF)*, método original de sete camadas hierárquicas executado nas bases *Scopus* e *Web of Science* para o período 2011–2026.

Este artigo está organizado em cinco seções. A primeira apresenta a contextualização e o objetivo do estudo. A segunda traz a fundamentação teórica sobre hidrogênio verde, amônia verde e fertilizantes nitrogenados. A terceira descreve o método *HTBF* e os procedimentos de análise. A quarta apresenta os resultados e a discussão das lacunas identificadas. A quinta expõe as conclusões, limitações e sugestões de pesquisas futuras.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Hidrogênio verde: contexto global e panorama de aplicações

O hidrogênio verde é produzido por meio da eletrólise da água utilizando eletricidade gerada exclusivamente a partir de fontes renováveis, resultando em emissões diretas de carbono nulas ou negligenciáveis, diferenciando-se das rotas convencionais baseadas no *Steam Methane Reforming (SMR)* e na gaseificação do carvão, responsáveis por cerca de 2% das emissões globais de CO_2 relacionadas à energia (DAWOOD *et al*., 2020; IEA, 2025). Projeções indicam que seu custo poderá atingir patamares competitivos antes de 2030 (GLENK; REICHELSTEIN, 2019; IEA, 2025). Suas aplicações abrangem quatro macrossetores, indústria, geração de energia elétrica, transporte e edificações, sendo a indústria o campo com maior potencial imediato de impacto na redução de emissões (IEA, 2025; OLIVEIRA *et al*., 2021; YUE *et al.*, 2021).

2.2. Amônia verde: papel industrial na cadeia do hidrogênio verde

A amônia (NH_3) é um dos principais produtos químicos industriais, com produção global estimada em 183 milhões de toneladas em 2020, cerca de 70% destinada a fertilizantes nitrogenados, além de aplicações como combustível marítimo, vetor de hidrogênio e insumo químico (BORA *et al.*, 2024; IRENA, 2022; VALERA-MEDINA *et al.*, 2018). O processo convencional *Haber-Bosch* emite aproximadamente 1,6 t CO_2/t NH_3, representando cerca de 1,8% das emissões globais de GEE (GHAVAM *et al.*, 2021; RIBEIRO; SANTOS, 2025; SMITH *et al*., 2020). A amônia verde substitui o hidrogênio fóssil por hidrogênio verde, eliminando as emissões diretas de carbono, com perspectivas de competitividade nesta década, sobretudo em regiões com recursos renováveis abundantes e políticas de precificação de carbono (IRENA, 2022; MINGOLLA *et al.*, 2025).

2.3. Amônia verde como matéria-prima para fertilizantes nitrogenados

Os fertilizantes nitrogenados são pilares da agricultura moderna, estima-se que metade do nitrogênio nas proteínas consumidas pela humanidade seja proveniente de fertilizantes sintéticos derivados da amônia (IEA, 2025; SMITH *et al*., 2020). A amônia é a matéria-prima de toda a cadeia: dela derivam a ureia, o nitrato de amônio, o sulfato de amônio, o CAN e o UAN (IEA, 2025; NEUMANN *et al.*, 2024). A transição para a amônia verde pode resultar em reduções de até 100% das emissões de CO_2 na produção local de fertilizantes nitrogenados (MUHSEN *et al*., 2025), embora enfrente desafios econômicos, logísticos e regulatórios que se refletem na escassez de estudos integrados sobre a cadeia completa (BORA *et al.*, 2024; IEA, 2025; IRENA, 2022).

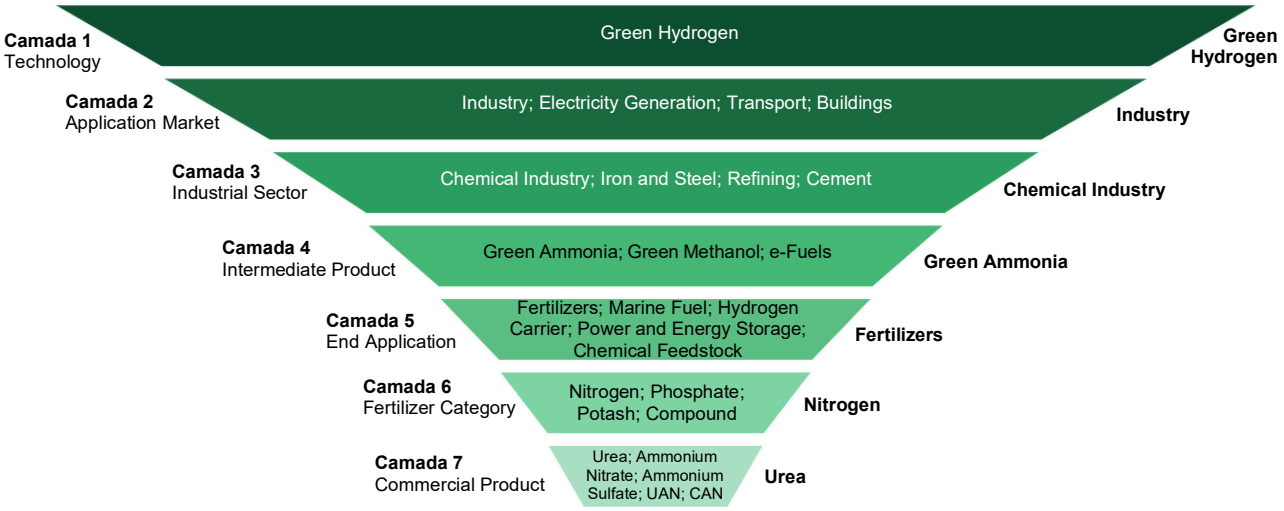
2.4. Ureia: fertilizante nitrogenado central na cadeia produtiva

A ureia (CH_4N_2O) é o fertilizante nitrogenado sólido mais produzido mundialmente, representando cerca de 57% do consumo global de fertilizantes nitrogenados, devido ao seu alto teor de nitrogênio (46%) e versatilidade (KHAN *et al*., 2024; MAO *et al*., 2024), Produzida pela reação entre amônia e CO_2 via processo *Bosch-Meiser,* a ureia verde utiliza amônia verde e CO_2 de fontes biogênicas, captura direta do ar (DAC) ou fontes industriais de baixo carbono, constituindo o elo final da cadeia investigada (MILANI *et al.*, 2022). Mao *et al.,* (2024) indicam que a ureia verde poderá alcançar competitividade econômica antes do final desta década, reforçando seu papel estratégico na descarbonização industrial e na sustentabilidade do sistema alimentar (IEA, 2025). Apesar dessa relevância, apenas dois registros científicos abordam diretamente a cadeia completa até a ureia no período 2011–2026, evidenciando a lacuna central documentada.

2.5. Estrutura hierárquica das aplicações do Hidrogênio verde

Para o mapeamento bibliométrico da cadeia investigada, as aplicações do hidrogênio verde foram organizadas em uma estrutura hierárquica de sete camadas progressivas, conforme ilustrado na Figura 1, que constitui a base conceitual do *HTBF* desenvolvido (OLIVEIRA *et al*., 2021; YUE *et al.*, 2021). As camadas progridem da tecnologia de base (Camada 1: Hidrogênio verde) até o produto comercial final (Camada 7: Ureia), passando por macrossetor de aplicação (Camada 2), setor industrial (Camada 3), produto intermediário, com destaque para a amônia verde (Camada 4) (OJELADE *et al*., 2023; SMITH *et al*., 2020), aplicação final (Camada 5), categoria de fertilizante (Camada 6) e produto comercial (Camada 7).

Figura 1 – Estrutura hierárquica das camadas do *HTBF*



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A Figura 1 ilustra o caminho do hidrogênio verde à ureia nas sete camadas do HTBF.

3. Metodologia

O presente estudo enquadra-se como revisão bibliométrica sistemática, combinando abordagens quantitativa e qualitativa, de caráter descritivo e exploratório, com recorte temporal de 2011 a 2026, restrito a artigos científicos e de revisão em inglês indexados no *Scopus* (campo *TITLE-ABS-KEY*) e *Web of Science* (campo *TS*), conforme Tabela 1. O caráter exploratório justifica-se pelo fato de que essa cadeia ainda não havia sido objeto de mapeamento bibliométrico sistemático na literatura.

Tabela 1 – Condições de filtragem aplicadas nas buscas bibliométricas

Critério	Condição Aplicada
Bases de dados	*Scopus* e *Web of Science*
Campo de busca *Scopus*	*TITLE-ABS-KEY*
Campo de busca *Web of Science*	*TS (Topic Search)*
Período de publicação	2011 a 2026
Tipo de documento	*Article* e *Review*
Idioma	*English*

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

As buscas foram executadas em duas etapas: primeiro de forma isolada por camada, para estabelecer volumes de referência; depois combinadas progressivamente por AND, seguindo a lógica hierárquica do funil. O universo base totalizou 42.510 registros brutos, dos quais 23.986 registros únicos após deduplicação, constituindo o N0 do estudo.

3.1. Construção do vocabulário controlado

O vocabulário controlado organiza os termos em quatro categorias funcionais, conforme a Tabela 2, garantindo consistência terminológica e reprodutibilidade do método.

Tabela 2 – Categorias funcionais do vocabulário controlado adotado no *HTBF*

Categoria	Definição Operacional
Preferred Term	Termo conceitualmente central e prioritário para representar o conceito da camada
Equivalent Terms	Termos equivalentes com variações lexicais, terminológicas ou regulatórias
Related Terms	Termos semanticamente próximos que ampliam a cobertura temática sem gerar ruído.
Associated Terms	Tecnologias e fenômenos associados, selecionados conforme risco de falso positivo

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Preferred e Equivalent Terms são incluídos integralmente; Related e Associated Terms, avaliados conforme risco de falso positivo.

3.2. O *Hierarchical Taxonomic Bibliometric Funnel (HTBF)*

O *HTBF* é o método original desenvolvido neste estudo, estruturado em sete camadas hierárquicas combinadas progressivamente por AND, permitindo quantificar a densidade bibliométrica em cada nível temático. A estrutura das camadas é apresentada na Tabela 3.

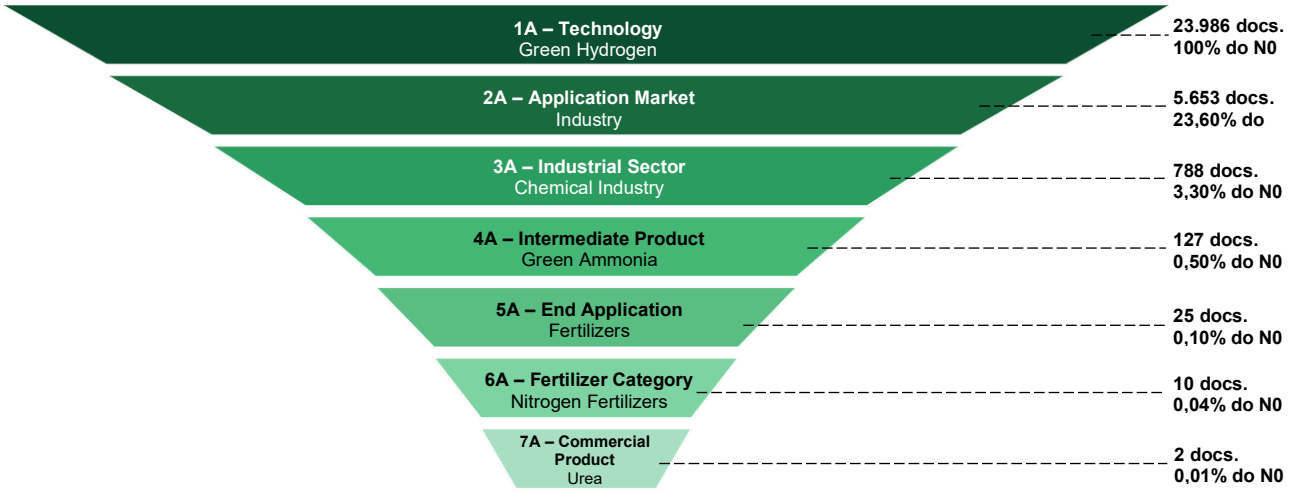
Tabela 3 – Estrutura das sete camadas do *Hierarchical Taxonomic Bibliometric Funnel (HTBF)*

Camada	Nome da Camada	Combinação da Busca	Objetivo da Busca (Identificar)
1A	Technology	1A	O universo total da pesquisa (N0)
2A	Application Market	1A AND 2A	A participação da aplicação industrial
3A	Industrial Sector	1A AND 2A AND 3A	A participação da indústria química
4A	Intermediate Product	1A AND 2A AND 3A AND 4A	A participação da Amônia Verde
5A	End Application	1A AND 2A AND 3A AND 4A AND 5A	A participação dos fertilizantes
6A	Fertilizer Category	1A AND 2A AND 3A AND 4A AND 5A AND 6A	A participação dos fertilizantes nitrogenados
7A	Commercial Product	1A AND 2A AND 3A AND 4A AND 5A AND 6A AND 7A	A participação da ureia

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Em cada camada foram desenvolvidas *strings* paralelas para as demais aplicações, totalizando 27 combinações nas duas bases, fundamentadas em três princípios: hierarquia conceitual, não redundância e reprodutibilidade, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxo de filtragem progressiva do *HTBF* com volumes de documentos por camada



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A Figura 2 evidencia a progressão do afunilamento bibliométrico e constitui a base quantitativa central para a identificação da lacuna de pesquisa discutida na Seção 4.

3.3. Critérios de inclusão e exclusão

Os critérios de inclusão e exclusão foram aplicados em duas etapas sequenciais e complementares: filtragem automatizada pelas condições das bases de dados e triagem manual por título e *abstract*, aplicada às Camadas 4A e 5A, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Critérios de inclusão adotados no processo de seleção do corpus

Critério	Condição de Inclusão
Tipo de documento	Artigos científicos (Article) e artigos de revisão (Review)
Idioma	Publicações em inglês
Período de publicação	2011 a 2026
Base de indexação	*Scopus* e *Web of Science*
Aderência temática	Abordagem direta ou indireta dos conceitos da respectiva camada.
Campo de busca	Termos de busca no título, resumo ou palavras-chave do documento

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Os critérios de exclusão foram aplicados em duas etapas distintas: na primeira, de forma automatizada pelas condições de filtragem das bases; na segunda, por triagem manual baseada na leitura de títulos e *abstracts*, aplicada especificamente às Camadas 4A e 5A. Os critérios de exclusão da triagem manual estão apresentados na Tabela 5.

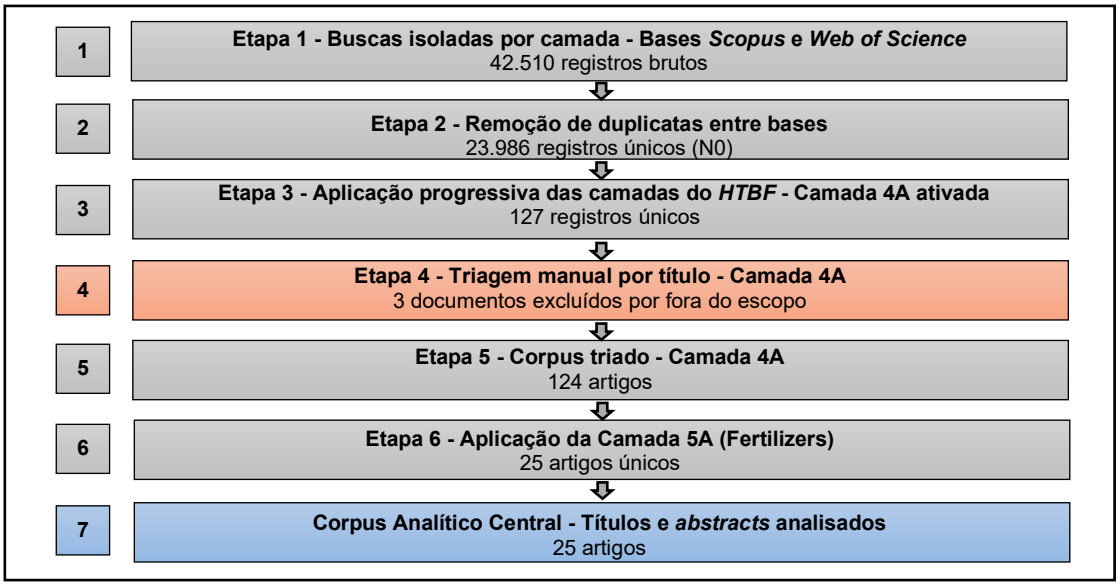
Tabela 5 – Critérios de exclusão aplicados na triagem manual por título e *abstract*

Critério	Condição de Exclusão
Fora do escopo temático	Documento não aborda a cadeia Hidrogênio verde, Amônia Verde ou fertilizantes nitrogenados como objeto central ou relevante.
Escopo de aplicação divergente	Aborda amônia em contexto não relacionado à cadeia de fertilizantes ou ao hidrogênio verde.
Foco em rota não verde	Documento aborda exclusivamente amônia convencional ou hidrogênio de origem fóssil sem relação com rotas renováveis.
Inconsistência com o nível do funil	Não apresenta aderência ao nível hierárquico da camada após leitura do *abstract.*

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A triagem manual identificou três documentos fora do escopo na Camada 4A, resultando em corpus consolidado de 124 artigos (Camada 4A) e 25 artigos como corpus analítico central (Camada 5A). O processo completo de seleção é sintetizado na Figura 3

Figura 3 – Fluxograma do processo de seleção do corpus analítico



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A Figura 3 evidencia a trajetória metodológica desde os 23.986 registros únicos até o corpus analítico de 25 artigos de forma transparente e auditável. Os procedimentos combinam

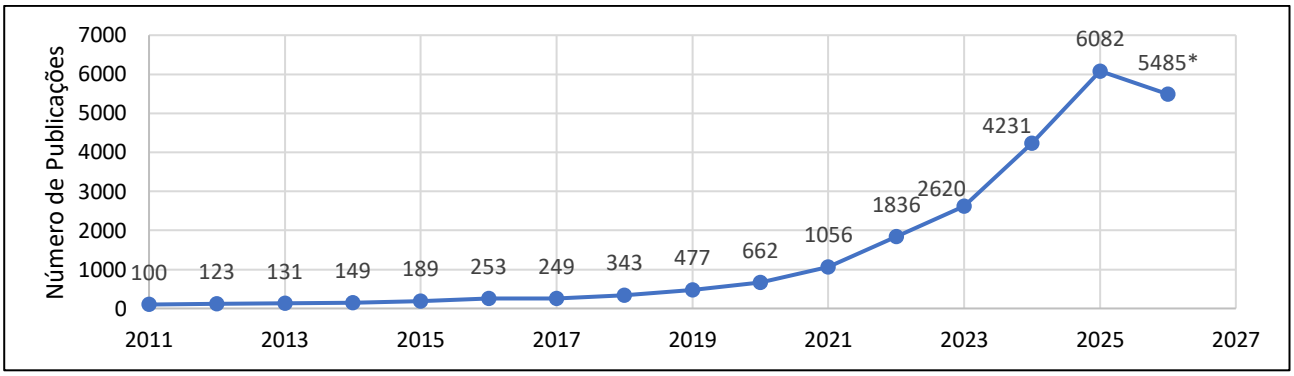
análise quantitativa, estruturada em distribuição vertical, horizontal e concentração temática do funil, e análise qualitativa, conduzida por leitura sistemática dos títulos e abstracts dos 25 artigos, orientada por protocolo de extração em cinco dimensões: foco temático, metodologia, contexto geográfico, resultados e limitações declaradas pelos autores.

4. Resultados e Discussão

4.1. Evolução temporal da literatura sobre Hidrogênio verde

O universo base da pesquisa, constituído pelos documentos recuperados pela *string* da Camada 1A nas bases *Scopus* e *Web of Science*, totalizou 42.510 registros brutos, dos quais 23.986 registros únicos foram obtidos após a remoção de duplicatas, representando o N0 do presente estudo. A evolução anual das publicações é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Evolução anual das publicações sobre Hidrogênio verde (2011-2026)



Fonte: Elaborado pelos autores

* Dados de 2026 parciais. Consulta realizada em agosto de 2026.

A Figura 4 evidencia crescimento acelerado de 5.982% entre 2011 e 2025 (de 100 para 6.082 registros anuais), impulsionado pela redução dos custos de eletrólise e geração renovável, pela intensificação dos compromissos internacionais de descarbonização e pelo aumento de políticas públicas dedicadas ao tema (GLENK; REICHELSTEIN, 2019; IEA, 2025; IRENA, 2022). A distribuição por macrossetor é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Distribuição da literatura sobre Hidrogênio verde por macrossetor de aplicação

Camada	Macrossetor	*Scopus*	*WoS*	Total Bruto	Sem Duplicatas	% do N0
2A	Industry	5.100	4.462	9.562	5.653	23,60%
2B	Electricity Generatior	7.523	6.051	13.574	8.667	36,10%
2C	Transport	6.037	5.148	11.185	6.939	28,90%
2D	Buildings	1.788	1.608	3.396	1.987	8,30%

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Os dados da Tabela 6 evidenciam predominância da geração de energia elétrica (36,1%) e transporte (28,9%), com o setor industrial em terceiro lugar (23,6%), justificando sua seleção como macrossetor de referência no *HTBF*.

4.2. Distribuição das aplicações do Hidrogênio verde por macroárea de aplicação

O aprofundamento hierárquico do *HTBF* no macrossetor industrial revela distribuição heterogênea da literatura entre os quatro setores investigados na Camada 3, permitindo identificar quais setores concentram maior atenção científica no contexto das aplicações do hidrogênio verde e posicionar a indústria química como objeto de aprofundamento nas camadas subsequentes do funil, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Distribuição da literatura sobre Hidrogênio verde por setor industrial

Camada	Setor Industrial	*Scopus*	*WoS*	Total Bruto	Sem Duplicatas	% do N0
3A	Chemical Industry	641	578	1.219	788	3,30%
3B	Iron and Steel	275	234	509	308	1,30%
3C	Refining	396	277	673	443	1,80%
3D	Cement	756	227	983	771	3,20%

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A indústria química lidera com 3,3% do N0, justificando seu aprofundamento nas camadas subsequentes. A Tabela 8 apresenta a distribuição dos produtos intermediários.

Tabela 8 - Distribuição da literatura sobre produtos intermediários na indústria do Hidrogênio verde

Camada	Produto	*Scopus*	*WoS*	Total Bruto	Sem Duplicatas	% do N0
4A	Green Ammonia	114	98	212	127	0,53%
4B	Green Methanol	148	137	285	193	0,80%
4C	e-Fuels	190	173	363	262	1,09%

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

O resultado contraintuitivo, com Green Methanol (0,80%) e e-Fuels (1,09%) superando Green Ammonia (0,53%), sugere que parte da literatura sobre amônia verde é recuperada em outros contextos temáticos, dispersando o volume entre diferentes camadas do funil.

4.3. Amônia Verde no contexto da indústria química

A Camada 4A identificou 127 documentos únicos. Após triagem manual com exclusão de 3 documentos fora do escopo, o corpus foi consolidado em 124 artigos. A análise qualitativa dos títulos revela concentração em quatro eixos temáticos, conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Eixos temáticos predominantes nos 124 artigos da Camada 4A

Eixo Temático	Descrição	Artigos Aproximados
Análise tecno-econômica de produção	Avaliações de custo, viabilidade e comparação de rotas de produção de amônia verde	38
Otimização e simulação de processos	Modelagem, integração energética, controle e análise de ciclo de vida	29
Catalisadores e rotas alternativas	Novos catalisadores Haber-Bosch e rotas eletroquímicas emergentes	32
Sistemas integrados com renováveis	Planejamento, flexibilidade operacional e armazenamento com fontes variáveis	18
Outros temas	Infraestrutura, cadeia de suprimentos, aspectos regulatórios e temas transversais	7

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Nenhum dos quatro eixos predominantes aborda especificamente a cadeia *downstream* da amônia verde aos fertilizantes nitrogenados. A literatura concentra-se nos desafios de produção, tratando a amônia como produto final, e não como insumo de etapas subsequentes, configurando uma lacuna qualitativa que reforça a lacuna quantitativa identificada nas camadas 5A, 6A e 7A.

4.4. Amônia Verde aplicada à produção de fertilizantes

A Camada 5A recuperou 25 documentos únicos (0,10% de N0), após a aplicação progressiva das sete camadas do *HTBF*, que restringiu 23.986 registros aos estudos que associam hidrogênio verde, indústria química, amônia verde e fertilizantes. Esse resultado equivale a apenas 1 documento por 1.000 publicações sobre hidrogênio verde, evidenciando a baixa concentração da literatura nesse elo estratégico da cadeia. A distribuição entre as aplicações finais da amônia verde é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Distribuição da literatura sobre aplicações finais da Amônia Verde

Camada	Aplicação Final	*Scopus*	*WoS*	Total Bruto	Sem Duplicatas	% do N0
5A	Fertilizers	22	15	37	25	0,10%
5B	Marine Fuel	15	5	20	15	0,06%
5C	Hydrogen Carrier	55	32	87	59	0,25%
5D	Power and Energy Storage	42	22	64	45	0,19%
5E	Chemical Feedstock	34	26	60	37	0,15%

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Os dados evidenciam que a aplicação em fertilizantes (5A) apresenta a segunda menor densidade bibliométrica (0,10%), superando apenas o combustível marítimo (0,06%) e contrastando com sua importância histórica como principal destino da amônia convencional. A análise qualitativa dos 25 artigos é sintetizada na Tabela 11.

Tabela 11 - Distribuição dos 25 artigos do corpus analítico central por foco temático principal

Foco Temático Principal	Artigos	Exemplos do Corpus
Produção e viabilidade da amônia verde com menção a fertilizantes	11	Amirhaeri *et al.,* (2026); Bora *et al.,* (2024); Ghavam *et al.,* (2021)
Análise tecno-econômica integrada com contexto de fertilizantes	5	Martinez Alonso *et al.*, (2024); Muhsen *et al.,* (2025)
Cadeia de fertilizantes e descarbonização com amônia verde	4	Milani *et al.,* (2022); Mirzania *et al.,* (2025); Neumann *et al.,* (2024)
Síntese de amônia com referência a fertilizantes	5	Zhang *et al.*, (2024)

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A Tabela 11 revela que 11 dos 25 artigos tratam fertilizantes como contexto de justificativa para a produção de amônia verde, e apenas 4 abordam a cadeia de fertilizantes como objeto central, raramente descendo ao nível de produtos como a ureia. Esse achado confirma que a lacuna identificada possui não apenas dimensão quantitativa, mas também conceitual: a literatura permanece compartimentada entre produção de amônia verde e fabricação de fertilizantes, sem estudos que integrem sistematicamente a cadeia completa.

4.5. Fertilizantes nitrogenados e a aplicação da Amônia verde na produção de ureia

O aprofundamento nas Camadas 6 e 7 quantifica com precisão a lacuna *downstream*. A Tabela 12 apresenta a distribuição por categoria de fertilizante.

Tabela 12 - Distribuição da literatura sobre categorias de fertilizantes à base de Amônia Verde

Camada	Categoria	*Scopus*	*WoS*	Total Bruto	Sem Duplicatas	% do N0
6A	Nitrogen Fertilizers	9	7	16	10	0,04%
6B	Phosphate Fertilizers	2	0	2	2	0,01%
6C	Potash Fertilizers	1	0	1	1	0,00%
6D	Compound Fertilizers	1	0	1	1	0,00%

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os fertilizantes nitrogenados concentram a totalidade da densidade bibliométrica residual na Camada 6 (10 documentos, 0,04%), confirmando a pertinência do recorte temático adotado. A Tabela 13 apresenta a desagregação por produto comercial.

Tabela 13 - Literatura sobre fertilizantes nitrogenados comerciais à base de Amônia Verde

Camada	Produto Comercial	*Scopus*	*WoS*	Total Bruto	Sem Duplicatas	% do N0
7A	Urea	2	2	4	2	0,01%
7B	Ammonium Nitrate	1	1	2	1	0,00%
7C	Ammonium Sulfate	1	0	1	1	0,00%
7D	Urea-Ammonium Nitrate (UAN)	1	1	2	1	0,00%
7E	Calcium Ammonium Nitrate (CAN)	8	6	14	9	0,04%

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Os dados da Tabela 13 constituem a evidência quantitativa mais expressiva do estudo: apenas 2 documentos únicos abordam especificamente a cadeia completa até a ureia (0,01% do N0). O resultado aparentemente anômalo do CAN (9 documentos) é atribuído à construção da *string* com nomenclaturas alternativas e à ambiguidade da sigla, introduzindo possível ruído. A trajetória completa de afunilamento, já ilustrada na Figura 2, confirma a baixa densidade bibliométrica da cadeia: as reduções progressivas entre camadas variam de 60% a 86%, com destaque para a transição da indústria química à amônia verde (−83,9%) e desta aos fertilizantes (−80,3%), culminando em apenas 2 documentos únicos na Camada 7A (−80,0% em relação à camada anterior).

4.6. Lacunas identificadas e oportunidades de pesquisa

Os resultados quantitativos e qualitativos obtidos pela aplicação do *HTBF* permitem a caracterização sistemática das lacunas de pesquisa existentes na literatura científica sobre a cadeia Hidrogênio verde, Amônia Verde e fertilizantes nitrogenados. A classificação das lacunas, organizada por tipo e fundamentada nas evidências obtidas pelo *HTBF*, é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 - Classificação tipológica das lacunas de pesquisa identificadas pelo *HTBF*

Tipo de Lacuna	Descrição	Evidência do *HTBF*
Quantitativa	Escassez de estudos sobre a cadeia completa GH → GA → ureia	2 documentos únicos na Camada 7A (0,01% do N0)
Qualitativa	Estudos orientados à produção de amônia verde, sem investigar etapas *downstream*	11 dos 25 artigos tratam fertilizantes como contexto, não como objeto central
Integração	Ausência de estudos que conectem os três corpos de literatura	Literatura tratada de forma independente nos 25 artigos analisados
Empírica	Ausência de dados operacionais reais de plantas integradas à cadeia	Predominância de modelagem e simulação no corpus
Contextual	Sub-representação de países em desenvolvimento dependentes de fertilizantes	Concentração geográfica em contextos europeus, norte-americanos e asiáticos
Temporal	Ausência de análises prospectivas de longo prazo sobre a cadeia	Predominância de análises estáticas no corpus

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As seis lacunas se complementam. A quantitativa (2 documentos na Camada 7A) fornece a evidência mais direta; a qualitativa mostra que fertilizantes permanecem como contexto, não objeto central; a de integração evidencia a fragmentação dos três corpos de literatura; a empírica aponta a ausência de dados operacionais de plantas piloto; a contextual destaca a relevância para países como o Brasil, com alta demanda por fertilizantes e recursos renováveis (IEA, 2025; MUHSEN *et al.*, 2025). A temporal reflete a predominância de análises estáticas no corpus.

As oportunidades de pesquisa derivadas das lacunas identificadas incluem: estudos integrados tecno-econômicos e ambientais da cadeia completa até a ureia; revisões sistemáticas sobre a descarbonização de fertilizantes nitrogenados com amônia verde; *frameworks* que integrem os três corpos de literatura; estudos de caso com dados operacionais de plantas demonstradoras de amônia verde; análises de viabilidade em países com alta dependência de fertilizantes importados, como o Brasil, onde a segurança alimentar e a disponibilidade de recursos renováveis conferem relevância estratégica ao tema; e análises prospectivas sobre a competitividade da ureia verde em cenários de descarbonização acelerada. Essas oportunidades são diretamente relevantes para empresas produtoras de fertilizantes, governos e organismos internacionais envolvidos na transição energética (IEA, 2025; IRENA, 2022; NEUMANN *et al.*, 2024).

5. Conclusão

O presente estudo mapeou e analisou a distribuição da literatura científica sobre a cadeia Hidrogênio Verde → Amônia Verde → Fertilizantes Nitrogenados, com ênfase na identificação e documentação da lacuna de pesquisa na aplicação da amônia verde para a produção de Ureia, motivado pela relevância estratégica dessa cadeia para a descarbonização da agricultura e para a segurança alimentar global (IEA, 2025; IRENA, 2022; MAO *et al.*, 2024). Para tanto, foi desenvolvido e aplicado o *HTBF*, método original estruturado em sete camadas hierárquicas, executado nas bases *Scopus* e *Web of Science* por meio de 27 combinações de *strings* booleanas para o período 2011–2026, totalizando 23.986 registros únicos após deduplicação.

Os resultados demonstram lacuna de pesquisa de grande magnitude: dos 23.986 documentos sobre hidrogênio verde, apenas 788 (3,3%) abordam a indústria química, 127 (0,53%) associam a cadeia à amônia verde, 25 (0,10%) tratam da aplicação em fertilizantes e apenas 2 documentos únicos (0,01%) abordam a cadeia completa até a ureia. A análise qualitativa dos 25 artigos do corpus central confirmou que a lacuna possui dimensões quantitativa, qualitativa, de integração, empírica, contextual e temporal.

As contribuições são de natureza científica, documentação inédita e rigorosa das lacunas da cadeia investigada, metodológica, o *HTBF* como instrumento de mapeamento hierárquico superior aos métodos convencionais de revisão sistemática em especificidade e granularidade, e prática, relevância direta para empresas produtoras de fertilizantes, governos e organismos internacionais (BORA *et al.*, 2024; IEA, 2025; IRENA, 2022).

As principais limitações incluem: restrição às bases *Scopus* e *WoS*; análise qualitativa baseada em títulos e *abstracts* sem análise do texto completo; recorte temporal a partir de 2011; e baixos volumes nas Camadas 6 e 7 limitando a representatividade estatística dos padrões qualitativos identificados.

Como pesquisas futuras, recomenda-se: estudos integrados tecno-econômicos e ambientais da cadeia até a ureia; estudos de caso com dados operacionais de plantas demonstradoras de amônia verde; *frameworks* que integrem os três corpos de literatura; análises de viabilidade em países com dependência de fertilizantes importados, como o Brasil; e análises prospectivas de longo prazo sobre a competitividade da ureia verde em cenários de descarbonização acelerada. Recomenda-se ainda a aplicação do *HTBF* em outras cadeias produtivas com estrutura hierárquica de múltiplos níveis.

Referências

AMIRHAERI, Yasaman *et al.* Emerging and Conventional Pathways for Sustainable Ammonia Production: Technology Readiness, Economics, and Environmental Performance. *Processes*, v. 14, n. 12, p. 1973, 2026.

BORA, Neelam *et al.* Green ammonia production: Process technologies and challenges. *Fuel*, v. 369, p. 131808, 2024.

DAWOOD, Furat *et al.* Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 7, p. 3847–3869, 2020.

GHAVAM, Seyedehhoma *et al.* Sustainable Ammonia Production Processes. *Frontiers in Energy Research*, v. 9, p. 1–19, 2021.

GLENK, Gunther; REICHELSTEIN, Stefan. Economics of converting renewable power to hydrogen. *Nature Energy*, v. 4, n. 3, p. 216–222, 2019.

IEA. *Fertilisers: Breakthrough Agenda Report 2025*. *International Energy Agency*. Paris: [s.n.], 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-

2025/fertilisers>. Acesso em: 1 ago. 2026.

IRENA. *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*. *International Renewable Energy Agency*. Abu Dhabi: [s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/May/Innovation-Outlook-Renewable-Ammonia>. Acesso em: 1 ago. 2026.

KHAN, Ansub *et al.* Towards a low-carbon future: exploring green urea synthesis for sustainable agriculture. *Green Chemistry*, v. 26, n. 3, p. 1551–1565, 2024.

MAO, Chengliang *et al.* Green urea production for sustainable agriculture. *Joule*, v. 8, n. 5, p. 1224–1238, 2024.

MARTINEZ ALONSO, A. *et al.* Phasing out steam methane reformers with water electrolysis in producing renewable hydrogen and ammonia: A case study based on the Spanish energy markets. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 52, p. 1472–1487, 2024.

MILANI, Dia *et al.* Green pathways for urea synthesis: A review from Australia's perspective. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, v. 1, p. 100008, 2022.

MINGOLLA, Stefano *et al.* Trade-Offs between Grid Connectivity and Operational Flexibility in Reducing the Cost and Carbon Footprint of Green Ammonia. *Environmental science & technology*, v. 59, n. 48, p. 25803–25816, 2025.

MIRZANIA, Pegah *et al.* Decarbonising Agriculture with Green Hydrogen: A Stakeholder-Guided Feasibility Study. *Sustainability (Switzerland)*, v. 17, n. 20, p. 1–32, 2025.

MUHSEN, Hani *et al.* The Potential of Green Hydrogen and Power-to-X to Decarbonize the Fertilizer Industry in Jordan. *Agriculture (Switzerland)*, v. 15, n. 6, p. 1–22, 2025.

NEUMANN, Nicole Carina *et al.* Exploiting synergies between sustainable ammonia and nitric acid production: A techno-economic assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 438, p. 140740, 2024.

OJELADE, Opeyemi A. *et al.* Green ammonia production technologies: A review of practical progress. *Journal of Environmental Management*, v. 342, p. 118348, 2023.

OLIVEIRA, Alexandra M. *et al.* A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Current Opinion in Chemical Engineering*, v. 33, p. 100701, 2021.

RIBEIRO, Cátia; SANTOS, Diogo M.F. Transitioning Ammonia Production: Green Hydrogen-Based Haber–Bosch and Emerging Nitrogen Reduction Technologies. *Clean Technologies*, v. 7, n. 2, p. 1–26, 2025.

SMITH, Collin *et al.* Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. *Energy and Environmental Science*, v. 13, n. 2, p. 331–344, 2020.

VALERA-MEDINA, A. *et al.* Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 69, p. 63–102, 2018.

YUE, Meiling *et al.* Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 146, p. 111180, 2021.

ZHANG, Yuxin *et al.* Ammonia synthesis by nonthermal plasma catalysis: a review on recent research progress. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 57, n. 32, p. 323001, 2024.