 **EMERGINDO TECNOLOGIAS INOVADORAS PARA UMA
REVOLUÇÃO AMBIENTAL: UMA PERSPECTIVA DE PREVISÃO
TECNOLÓGICA**

*EMERGING INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR ENVIRONMENTAL
REVOLUTION: A TECHNOLOGICAL FORECASTING PERSPECTIVE*

 **Bilal Kargi¹** and  **Mario Coccia²**

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University. Ankara, Turkey  bilalkargi@gmail.com

² National Research Council / Rome, Italy 

Conflict of interest: The authors have not declared any potential conflicts of interest

Correspondence concerning this article should be addressed to Bilal Kargi

CRedit authorship contribution statement

Bilal Kargi: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Resources, Revision and editing, Viewing, Funding acquisition. **Mario Coccia:** Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Resources, Data curation, Writing –original draft, Project administration, Funding acquisition.

Cite as – American Psychological Association (APA)

Kargi, B., & Coccia, M. (2024, Sept./Dec.). Emerging innovative technologies for environmental revolution: a technological forecasting perspective. *International Journal of Innovation - IJI*, São Paulo, 12(3), p. 1-42, e27000. <https://doi.org/10.5585/2024.27000>

Resumo

Objetivo do Estudo: Este estudo visa identificar tecnologias emergentes com potencial transformador para alcançar a proteção ambiental e fomentar um futuro sustentável.

Metodologia/Abordagem: Utilizando modelos de previsão tecnológica, o estudo explora e avalia várias tecnologias avançadas, incluindo técnicas de produção de aço limpo, hidrogênio verde, agricultura celular e tecnologia blockchain, para avaliar sua capacidade de redução de impacto ambiental.

Originalidade/Relevância: O estudo apresenta uma abordagem interdisciplinar que conecta previsão tecnológica, ciência ambiental e análise de políticas. Destaca a importância dessas tecnologias na mitigação da degradação ambiental e na promoção da sustentabilidade, oferecendo insights práticos para stakeholders e formuladores de políticas.

Principais Resultados: A pesquisa identifica várias tecnologias promissoras, como turbinas eólicas offshore, captura e armazenamento de carbono, técnicas de produção de aço limpo, hidrogênio verde, agricultura celular e tecnologia blockchain, que têm o potencial de reduzir significativamente o impacto ambiental e apoiar o desenvolvimento sustentável.

Contribuições Teóricas/Metodológicas: Este estudo contribui para a literatura sobre sustentabilidade e inovação, oferecendo uma avaliação abrangente de tecnologias emergentes. Ele fornece uma estrutura metodológica para integrar os avanços tecnológicos nas estratégias de proteção ambiental.

Contribuições Sociais/Gerenciais: Os resultados fornecem aos formuladores de políticas um roteiro de avanços tecnológicos, facilitando uma tomada de decisão informada voltada para a criação de um futuro caracterizado por mínima degradação ambiental. O estudo aborda a necessidade urgente de soluções inovadoras para os desafios ambientais e orienta a transição para uma sociedade mais sustentável.

Palavras-chave: tecnologias emergentes, tecnologias inovadoras, revolução ambiental, sustentabilidade, previsão tecnológica.

Emerging innovative technologies for environmental revolution: a technological forecasting perspective

Abstract

Objective of the Study: This study aims to identify emerging technologies with transformative potential to achieve environmental protection and foster a sustainable future.

Methodology/Approach: Utilizing technological forecasting models, the study explores and evaluates various advanced technologies, including clean steel production techniques, green hydrogen, cellular agriculture, and blockchain technology, to assess their capacity for environmental impact reduction.

Originality/Relevance: The study presents an interdisciplinary approach that bridges technological forecasting, environmental science, and policy analysis. It highlights the significance of these technologies in mitigating environmental degradation and promoting sustainability, offering practical insights for stakeholders and policymakers.

Main Results: The research identifies several promising technologies, such as offshore wind turbines, carbon capture and storage, clean steel production techniques, green hydrogen, cellular

agriculture, and blockchain technology, that have the potential to significantly reduce environmental impact and support sustainable development.

Theoretical/Methodological Contributions: This study contributes to the literature on sustainability and innovation by offering a comprehensive evaluation of emerging technologies. It provides a methodological framework for integrating technological advancements into environmental protection strategies.

Social/Management Contributions: The findings equip policymakers with a roadmap of technological advancements, facilitating informed decision-making aimed at creating a future characterized by minimal environmental degradation. The study addresses the urgent need for innovative solutions to environmental challenges and guides the transition towards a more sustainable society.

Keywords: emerging technologies, innovative technologies, environmental revolution, sustainability, technological forecasting.

Tecnologías innovadoras emergentes para la revolución ambiental: una perspectiva de previsión tecnológica

Resumen

Objetivo del Estudio: Este estudio tiene como objetivo identificar tecnologías emergentes con potencial transformador para lograr la protección ambiental y fomentar un futuro sostenible.

Metodología/Enfoque: Utilizando modelos de previsión tecnológica, el estudio explora y evalúa diversas tecnologías avanzadas, incluyendo técnicas de producción de acero limpio, hidrógeno verde, agricultura celular y tecnología blockchain, para evaluar su capacidad de reducción del impacto ambiental.

Originalidad/Relevancia: El estudio presenta un enfoque interdisciplinario que une la previsión tecnológica, la ciencia ambiental y el análisis de políticas. Destaca la importancia de estas tecnologías en la mitigación de la degradación ambiental y en la promoción de la sostenibilidad, ofreciendo conocimientos prácticos para las partes interesadas y los responsables de la formulación de políticas.

Principales Resultados: La investigación identifica varias tecnologías prometedoras, como turbinas eólicas marinas, captura y almacenamiento de carbono, técnicas de producción de acero limpio, hidrógeno verde, agricultura celular y tecnología blockchain, que tienen el potencial de reducir significativamente el impacto ambiental y apoyar el desarrollo sostenible.

Contribuciones Teóricas/Metodológicas: Este estudio contribuye a la literatura sobre sostenibilidad e innovación al ofrecer una evaluación integral de las tecnologías emergentes. Proporciona un marco metodológico para integrar los avances tecnológicos en las estrategias de protección ambiental.

Contribuciones Sociales/De Gestión: Los hallazgos dotan a los responsables de políticas de una hoja de ruta de los avances tecnológicos, facilitando la toma de decisiones informadas con el objetivo de crear un futuro caracterizado por una mínima degradación ambiental. El estudio aborda la urgente necesidad de soluciones innovadoras a los desafíos ambientales y guía la transición hacia una sociedad más sostenible.

Palabras clave: tecnologías emergentes, tecnologías innovadoras, revolución ambiental, sostenibilidad, previsión tecnológica.

Introdução

A década de 1860 marcou um ponto de inflexão. Após os avanços sociais, econômicos e tecnológicos das Revoluções Industriais, a investigação científica sobre o impacto humano no meio ambiente começou a florescer (Marsh, 1864; Fowler et al., 2020). No entanto, esse progresso era uma faca de dois gumes. As indústrias em expansão dependiam fortemente de combustíveis fósseis, como carvão, gás natural e petróleo, para impulsionar setores-chave como produtos químicos orgânicos pesados, materiais sintéticos e têxteis, resultando em um aumento significativo da poluição e da degradação ambiental (Ayres, 1990, 1990a; Campbell, 2002; Coccia, 2008, 2014). Embora alguns argumentem que essa era introduziu tecnologias que fomentaram o crescimento econômico (Ayres, 1998; Sterner et al., 1998; Coccia, 2015), pesquisas indicam que ela também impulsionou um rápido aumento na população global, no consumo de energia e nos níveis atmosféricos de CO₂, alterando fundamentalmente o curso da história humana (Fowler et al., 2020).

A industrialização, a urbanização e o avanço incessante da atividade humana intensificaram nossa influência sobre a biosfera. A dependência generalizada de combustíveis fósseis desencadeou uma reação em cadeia. O crescimento populacional e a expansão econômica resultaram em uma sociedade caracterizada por alto consumo, esgotamento de recursos, grandes quantidades de resíduos sólidos e mudanças ambientais significativas (Chin et al., 2013; Coccia, 2021; Kaza et al., 2018). A prosperidade econômica gerada pela industrialização nos países desenvolvidos e em desenvolvimento, infelizmente, veio com um alto custo – degradação ambiental, poluição por combustíveis fósseis e efeitos prejudiciais à saúde das populações em todo o mundo (Adam, 2021; Ali et al., 2021; Belpomme et al., 2007; Coccia, 2017, 2018, 2019, 2020).

Essa correlação inegável entre a atividade humana e suas consequências ambientais deu origem ao conceito do Antropoceno – uma nova época geológica definida pelo impacto profundo dos humanos nos sistemas da Terra (Crutzen & Stoermer, 2000; Zalasiewicz et al., 2011). O início exato do Antropoceno ainda é um tema de debate. Alguns, como Ruddiman (2003), propõem que ele começou com o aumento nos níveis de CO₂ há 6.000 anos, enquanto outros defendem que a era industrial marca seu início devido à poluição ambiental (Crutzen & Stoermer, 2000; Steffen et al., 2007). Independentemente da data exata, a contribuição significativa das emissões de gases de efeito estufa para a deterioração ambiental é inegável (Hausfather & Peters, 2020; Moss et al., 2010; Tollefson, 2020). Essas emissões são projetadas para causar um aumento de até 5°C na

temperatura global até 2100, juntamente com o degelo do permafrost – uma grande ameaça ambiental com efeitos em cascata (Hausfather & Peters, 2020; Tollefson, 2020).

A boa notícia é que atingir a neutralidade de carbono – um estado em que as emissões de CO₂ são equilibradas pela remoção – pode mitigar esse perigoso cenário de mudança climática (Chapman et al., 2022). Pesquisas indicam que novas tecnologias focadas na produção de hidrogênio verde, processos de fabricação limpos, armazenamento de energia solar térmica e captura de carbono podem abrir o caminho para esse objetivo (Chapman et al., 2022; National Academies of Sciences, 2022; NIST, 2022). Como afirma Linstone (2010), "o futuro global dependerá fortemente de nossa disposição em agir a curto prazo para um futuro sustentável a longo prazo" (p.147).

Portanto, um aspecto crítico para enfrentar esse desafio reside em explorar novas trajetórias tecnológicas e inovações ecológicas. Essas inovações devem não apenas facilitar uma transição energética para sistemas socioeconômicos sustentáveis, mas também proteger simultaneamente a atmosfera, a litosfera, a hidrosfera e toda a biosfera – a base da vida no Planeta Terra (Sanni & Verdolini, 2022). A seção a seguir explora as metodologias para investigar essas áreas cruciais na interseção entre ciência e sociedade.

Neste contexto, a principal pergunta de pesquisa que este estudo busca esclarecer é:

Quais são as principais direções das trajetórias tecnológicas e das eco-inovações que podem apoiar a transição ecológica (a mudança gradual de combustíveis fósseis para fontes de energia renováveis e sustentáveis) em sistemas socioeconômicos modernos para apoiar o desenvolvimento sustentável?

As seções subsequentes ao quadro teórico mergulham nas metodologias para investigar essas áreas cruciais de pesquisa na interseção entre meio ambiente e sociedade em uma perspectiva de sustentabilidade. O estudo utiliza a Scopus (2022), uma base de dados multidisciplinar que abrange artigos de periódicos, anais de conferências e livros, para coletar e analisar dados de artigos e patentes para tecnologias sustentáveis. Uma análise de regressão baseada em um modelo log-linear de séries temporais e modelo log-log de evolução tecnológica, incluindo crescimento relativo de Y (patentes) em relação à produção científica X das tecnologias em estudo, sugere tecnologias promissoras voltadas para a sustentabilidade. A análise dos resultados e uma discussão aprofundada explicam os resultados das análises estatísticas e visualizam as tendências para

fornecer principais implicações para apoiar políticas de inovação para uma transição ecológica voltada para a sustentabilidade.

Fundamento Teórico e Quadro Conceitual

Ayres (1998) destaca que os combustíveis fósseis e as inovações tecnológicas foram essenciais para o desenvolvimento humano ao longo da história (Sterner et al., 1998, p. 254). O boom industrial pós-Segunda Guerra Mundial dependia fortemente de carvão, gás natural e materiais à base de petróleo (Campbell, 2002). Esses combustíveis impulsionaram o crescimento econômico e a inovação, especialmente em indústrias como produtos químicos pesados, materiais sintéticos e petroquímicos (Ayres, 1990a, 1990b; Coccia, 2008). No entanto, essa industrialização e progresso tecnológico também contribuíram para a urbanização, o crescimento populacional e a poluição ambiental séria, levando a mudanças humanas e sociais significativas (Belpomme et al., 2007). Em 1972, Meadows et al. alertaram que os recursos naturais e os ecossistemas da Terra poderiam não suportar o crescimento econômico e populacional descontrolado além de 2100, mesmo com avanços tecnológicos. Sua previsão destacou vários fatores críticos, como o crescimento populacional, a queda da produção agrícola, o esgotamento de recursos não renováveis e o aumento da produção e da poluição industrial. No entanto, o relatório do Clube de Roma (Meadows et al., 1972) sugeriu que a humanidade poderia se sustentar indefinidamente se fossem estabelecidos limites para o uso de recursos e produção, e se fosse adotado um desenvolvimento sustentável para atender às necessidades atuais sem prejudicar o ambiente para as gerações futuras.

Adam (2021) refere-se à projeção das Nações Unidas de que a população global chegará a cerca de 11 bilhões até 2100. No entanto, um relatório de 2014 do Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados da Áustria estima o pico da população em 9,4 bilhões na década de 2070, antes de cair para 9 bilhões na década de 2090. De forma semelhante, pesquisadores da Universidade de Washington preveem um pico de 9,7 bilhões em torno de 2060, seguido por um declínio para aproximadamente 8,8 bilhões até 2100. Essas estimativas variáveis se devem a incertezas nas taxas de fertilidade e eventos imprevistos, como pandemias (ex., COVID-19), conflitos e desastres naturais. O alto crescimento populacional levanta várias questões socioeconômicas (Global Change, 2022), como extração e consumo aumentados de recursos naturais (combustíveis fósseis, minerais, água), maior urbanização, maior produção e consumo de

bens, geração de resíduos, poluição e degradação ambiental (La Scalia et al., 2022). Esses são alguns dos principais motores das mudanças climáticas e do aquecimento global (Coccia, 2024). Em resposta, muitos países continuam a depender de combustíveis fósseis baratos para impulsionar suas economias, especialmente após crises como a pandemia de COVID-19 ou guerras. Infelizmente, essa dependência de combustíveis fósseis é prevista para impulsionar um aumento de +5°C na temperatura global até o final do século, junto com o degelo do permafrost (Hausfather & Peters, 2020; Moss et al., 2010; Tollefson, 2020).

Os efeitos de longo prazo das mudanças climáticas sobre a sociedade humana são significativos (IPCC, 2007; 2013; NASA Global Climate Change, 2022). Estes incluem temporadas livres de geada mais longas, mudanças nos padrões de precipitação, secas e ondas de calor mais intensas, furacões mais fortes e aumento do nível do mar global – potencialmente de 1 a 3 metros até 2100 devido ao derretimento do gelo. A economia global atual, ainda fortemente dependente de combustíveis fósseis baratos e energia nuclear, continua a causar poluição, enquanto a energia renovável permanece cara e insuficiente para atender às necessidades energéticas da maioria dos países. Acadêmicos argumentam que as sociedades precisam ser mais resilientes e mudar para transições ecológicas para enfrentar os desafios ambientais e sociais extremos que se aproximam (Campbell, 2002).

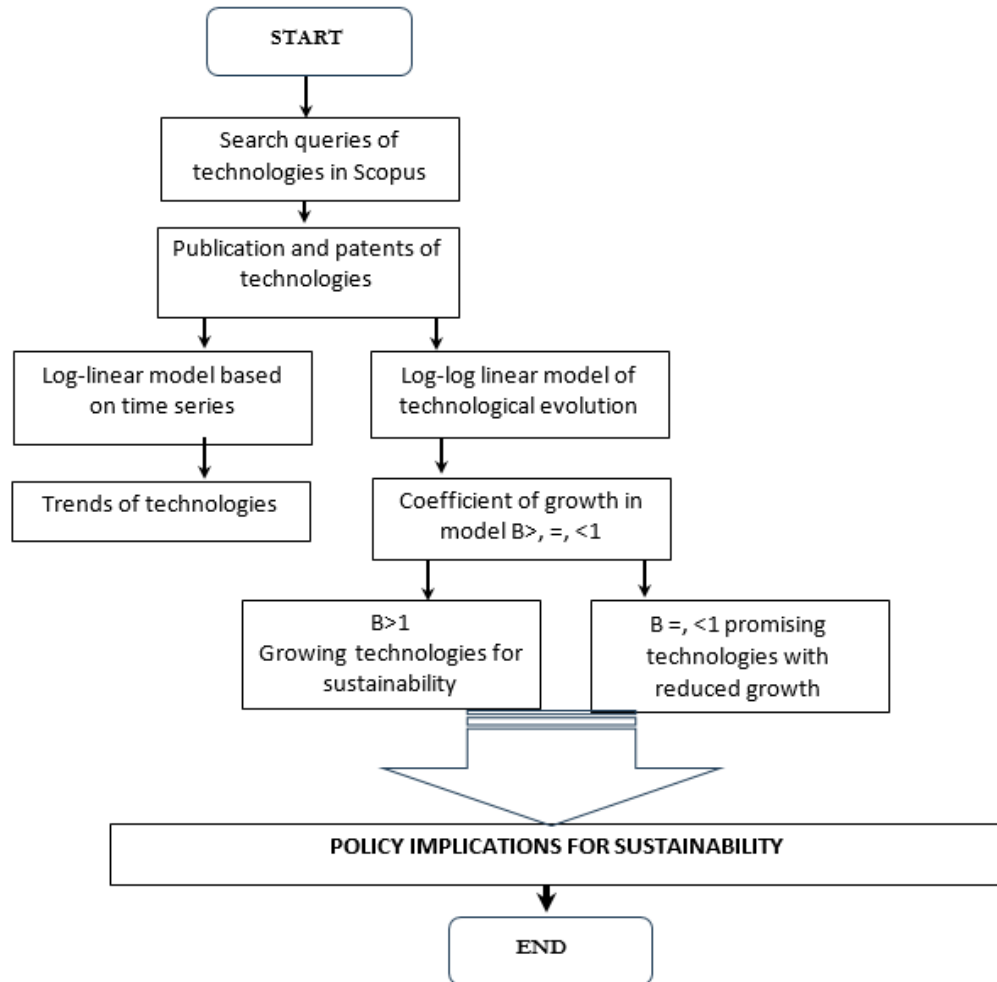
Ali et al. (2021) mostram que, em países desenvolvidos, o esgotamento de recursos naturais está intimamente ligado à degradação ambiental, enquanto as fontes de energia renovável impactam positivamente o ambiente. As atividades humanas têm sido as principais responsáveis pelos danos ambientais e pelo declínio do oxigênio atmosférico. Como resultado, as sociedades agora precisam agir urgentemente para reduzir os riscos ambientais, adotando tecnologias sustentáveis e promovendo transições ecológicas para melhorar tanto o meio ambiente quanto o bem-estar humano. A seção a seguir descreve os métodos para identificar tecnologias sustentáveis que podem ajudar a mitigar os desafios ambientais e conservar os recursos naturais para um futuro sustentável.

Desenho do Estudo

A figura 1 a seguir mostra o fluxograma sequencial do desenho do estudo aqui.

Figura 1

Fluxograma sequencial da metodologia de pesquisa para detectar a evolução das tecnologias sustentáveis



Fontes e Coleta de Dados

A pesquisa se baseia em uma ferramenta poderosa: o Scopus (2022). Este banco de dados abrangente funciona como uma biblioteca digital que inclui não apenas periódicos acadêmicos e livros, mas também anais de conferências e até registros de patentes de escritórios de propriedade intelectual em todo o mundo (Gonzalo et al., 2022; Li et al., 2022; Wang et al., 2022). Esse recurso valioso permite aos pesquisadores identificar avanços de ponta em tecnologias promissoras que são essenciais para a transição ecológica e um futuro sustentável (por exemplo, Gonzalo et al., 2022; Balaji & Rabiei, 2022).

Dentro do Scopus, a função “Buscar documentos” serve como a base desse processo investigativo. Ao utilizar palavras-chave (descritas na Tabela 1, não exibida aqui) cuidadosamente

escolhidas para corresponder a essas tecnologias transformadoras, os pesquisadores podem lançar uma ampla rede. A busca abrange títulos de artigos, resumos e palavras-chave no banco de dados, permitindo que os pesquisadores identifiquem artigos científicos e patentes relevantes (os termos de pesquisa específicos estão na Tabela 1). As referências incluídas (e.g., Gonzalo et al., 2022; Balaji & Rabiei, 2022) oferecem uma amostra do tipo de estudos valiosos que essa abordagem pode revelar.

A coleta de dados para este estudo ocorreu de 30 de março de 2022 (primeiro download) a 15 de novembro de 2022 (integração de dados). Informações de 2022 foram deliberadamente excluídas devido à sua natureza em andamento e ao ecossistema científico e tecnológico em constante evolução. Como apontado por Coccia et al. (2022), publicações científicas (artigos, conferências, etc.) e patentes servem como base para análises científicas e tecnológicas. As tecnologias em estudo são selecionadas com base na literatura atual em ciências ambientais e de sustentabilidade (Gonzalo et al., 2022; Li et al., 2022; Wang et al., 2022; Balaji & Rabiei, 2022; Elavarasan et al., 2022; Chapman et al., 2022; Gadikota, 2021; Bapat et al., 2022; Moritz et al., 2022; Esmaeilzadeh, 2022; Strepparava et al., 2022).

O objetivo aqui é identificar novas rotas tecnológicas que possam não só combater a degradação ambiental, mas também promover a transição ecológica e a sustentabilidade dentro dos sistemas socioeconômicos.

Para alcançar esse objetivo ambicioso, as informações coletadas são meticulosamente categorizadas em quatro grupos tecnológicos distintos, com base em suas principais aplicações e potenciais contribuições para um futuro sustentável:

- **Tecnologias de Energia Renovável:** Este grupo abrange tecnologias voltadas para o aproveitamento de fontes de energia renováveis, como turbinas eólicas que geram eletricidade.
- **Tecnologias de Energia Renovável e Armazenamento:** Esta categoria explora tecnologias que vão além da geração de energia renovável, abrangendo soluções para armazenamento de energia limpa para uso posterior, como sistemas de armazenamento de energia térmica.
- **Produtos Sustentáveis e Processos de Produção Limpa:** Este grupo enfoca tecnologias que promovem o desenvolvimento e a produção de produtos sustentáveis por meio de processos de fabricação limpa. A produção de aço limpo é um exemplo dessa categoria.

Além disso, tecnologias voltadas para captura e utilização de CO₂, como a conversão catalítica e copolimerização de CO₂, também se enquadram nesse grupo.

a) *Métricas*

Para fins de avaliação, o estudo utiliza duas métricas principais: Número de Produtos Científicos: O total de artigos e produtos científicos recuperados com as consultas de busca (da Tabela 1) serve como uma proxy para o progresso científico relacionado ao avanço tecnológico. Os dados de 2022 são excluídos devido à sua incompletude.

Análise de Patentes: Ao analisar o número de patentes recuperadas com os termos de busca (excluindo dados de 2022), a pesquisa pode identificar inovações potenciais que podem contribuir para o desenvolvimento sustentável. Esta metodologia fornece um framework sistemático para identificar e analisar tecnologias promissoras para a transição ecológica e sustentabilidade. Ao focar em publicações científicas e patentes, a pesquisa visa descobrir novos avanços tecnológicos que possam enfrentar os desafios ambientais e promover sistemas socioeconômicos sustentáveis.

Além dos grupos tecnológicos identificados, pesquisas adicionais poderiam explorar outras áreas promissoras, como a biomimética, que busca inspiração nos princípios de design da natureza para soluções sustentáveis. Além disso, fatores sociais e econômicos que podem influenciar a adoção e implementação dessas tecnologias merecem investigação.

Table 1
Queries and data analyzed

Investigações sobre publicações e patentes relacionadas a tecnologias sustentáveis	Dados analisados até 2021*	
	Documentos/ Artigos	Patentes
<i>Fontes de Energia Renovável</i>		
Sistemas de energia das ondas aproveitam o poder das ondas oceânicas.	78	341
Turbinas eólicas offshore geram eletricidade limpa a partir do vento no mar.	6978	3791
Painéis solares flutuantes capturam a luz solar em corpos d'água.	76	43
O hidrogênio verde é um combustível limpo produzido a partir de fontes de energia renováveis.	1000	172
O hidrogênio azul é um combustível limpo produzido a partir do gás natural com captura de carbono.	77	198
A energia geotérmica utiliza o calor do núcleo da Terra para gerar eletricidade.	317	182
A energia solar concentrada (CSP) foca a luz solar para criar altas temperaturas para a geração de eletricidade.	1841	2451
<i>Armazenamento de Energia Renovável e Captura de Carbono</i>		
Sistemas de armazenamento de calor armazenam excesso de energia térmica para uso posterior.	15,573	8888
A captura e armazenamento de carbono (CCS) captura emissões de carbono de usinas de energia e as armazena no subsolo.	7544	1365
A CCS pós-combustão captura carbono dos gases de combustão após a queima.	631	286
A CCS pré-combustão captura carbono do combustível antes da combustão.	90	70
A combustão com oxigênio puro queima o combustível em oxigênio puro, facilitando a captura de dióxido de carbono.	89	227
As tecnologias de carbono negativo removem mais carbono da atmosfera do que emitem.	34	10
<i>Captura e Utilização de CO2</i>		
A conversão eletroquímica utiliza eletricidade para transformar CO2 em produtos úteis.	510	376
A conversão fotocatalítica usa luz solar e catalisadores para converter CO2 em produtos químicos valiosos.	424	32
A conversão fototérmica catalítica combina luz solar e calor com catalisadores para utilizar CO2.	4	0
A conversão de energia solar usa a luz solar para converter CO2 em combustíveis ou produtos químicos.	300	194
A conversão catalítica utiliza catalisadores para transformar CO2 em novos materiais.	776	2433
A bioconversão utiliza microrganismos para converter CO2 em biocombustíveis ou outros produtos.	896	1060
A copolimerização incorpora CO2 em polímeros para diversas aplicações.	1215	4283
A carbonatação mineral converte CO2 em minerais carbonatados estáveis.	769	168
<i>Produtos e Processos Sustentáveis</i>		
Baterias de alumínio oferecem uma alternativa potencialmente sustentável às baterias de lítio.	228	1033
A produção de aço limpo minimiza o impacto ambiental em comparação com métodos tradicionais.	92	28
A produção sustentável de amônia foca em maneiras ambientalmente amigáveis de produzir amônia.	1058	3370
A agricultura celular cultiva produtos cárneos diretamente de células, reduzindo o impacto ambiental.	81	21
A tecnologia blockchain pode ser utilizada para promover práticas de sustentabilidade nas cadeias de suprimentos.	259	60

Nota: * O ano de 2022 não é considerado porque os dados estavam em andamento no momento em que a análise foi realizada; esse aspecto não afeta a detecção e a tendência das trajetórias contínuas das tecnologias.

A Tabela 2 apresenta a principal string de pesquisa utilizada neste estudo, inserida na janela de busca de documentos no Scopus (2022). As palavras indicadas na Tabela 2 são utilizadas entre aspas para identificar com precisão as tecnologias em estudo e, em alguns casos, são combinadas com o operador booleano AND para examinar as tecnologias relacionadas ao nosso estudo.

Tabela 2

Principais strings de pesquisa utilizadas para coletar dados

Sistemas de energia das ondas Turbinas eólicas offshore Sistemas fotovoltaicos flutuantes Hidrogênio verde Hidrogênio azul Tecnologia geotérmica Tecnologia térmica
Armazenamento de energia térmica Captura e armazenamento de carbono Captura e armazenamento de carbono (CAC) pós-combustão Captura e armazenamento de carbono (CAC) pré-combustão Captura e armazenamento de carbono com combustão a oxicom bustível Tecnologias negativas em carbono
Conversão eletroquímica E CO2 Conversão fotocatalítica E CO2 Conversão fototérmica catalítica E CO2 Conversão de energia solar E CO2 Conversão catalítica E CO2 Bioconversão E CO2 Copolimerização E CO2 Carbonatação mineral E CO2
Bateria de alumínio Produção de aço limpo Amônia E sustentabilidade Agricultura celular Tecnologia blockchain E sustentabilidade

Fonte: Coccia, 2017a; Kargi et al., 2023.

b) Modelos de Progresso Tecnológico e Análise de Dados

Este estudo discute duas etapas em um processo de análise científica. Primeiramente, destaca a importância da transformação logarítmica para alcançar uma distribuição normal das variáveis, especialmente para testes estatísticos que exigem essa premissa (referência não fornecida). Isso garante resultados confiáveis no método de análise paramétrica escolhido.

A segunda etapa descreve a coleta de dados. Os autores planejam utilizar a função "Buscar documentos" no Scopus (2022) para obter dados de séries temporais sobre publicações e patentes relacionadas a uma tecnologia específica (tecnologia i). Os detalhes do modelo de análise utilizado para examinar essas tendências serão explicados na próxima seção deste artigo.

$$\log y_{i,t} = a + b \text{ time} + u_{i,t} \quad (1)$$

- $y_{i,t}$ São produtos científicos ou patentes da tecnologia i no tempo t .
- a é uma constante; b é o coeficiente de regressão; $u_{i,t}$ = termo de erro da tecnologia i no tempo t .
- \log é logarítmico com base $e = 2,7182818$

O texto continua a explicar o método de análise utilizado para examinar as tendências no desenvolvimento tecnológico. O método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) é empregado para estimar a relação entre duas variáveis (parâmetros a e b) no modelo (1).

Em terceiro lugar, utilizando um modelo de desenvolvimento técnico no qual o número de patentes (Y) é uma função da quantidade de produção científica (X) ao longo do tempo, examina-se a potencial expansão de tecnologias sustentáveis (cf. Sahal, 1981). Este método fornece a taxa relativa de progresso tecnológico, que ilustra como a acumulação de publicações científicas impulsiona a evolução das unidades tecnológicas (patentes) ao longo do tempo. Para resumir, o modelo [2] analisa como a tecnologia evoluiu, avaliando como o aumento das patentes, Y_i , é impactado pelo desenvolvimento e pela acumulação de informações científicas (com base nas publicações X_i) (cf. Sahal, 1981):

$$\log Y_i = \log A + B \log X_i \quad (2)$$

- o A = constante
- o B = o coeficiente de crescimento relativo que mede como as patentes, ou Y , mudaram em relação à produção científica da tecnologia i (X).

Especificamente, o valor do coeficiente B do modelo [2] mostra vários padrões de crescimento técnico, conforme indicado por:

- $B < 1$, ao longo do tempo, a evolução das patentes na tecnologia desacelerou em comparação ao crescimento da produtividade científica.
- $B = 1$, à medida que publicações e patentes aumentam proporcionalmente, a tecnologia avança.
- $B > 1$, um progresso técnico mais rápido ao longo do tempo, com melhorias desproporcionais na tecnologia, conforme medido por patentes Y em comparação a publicações.

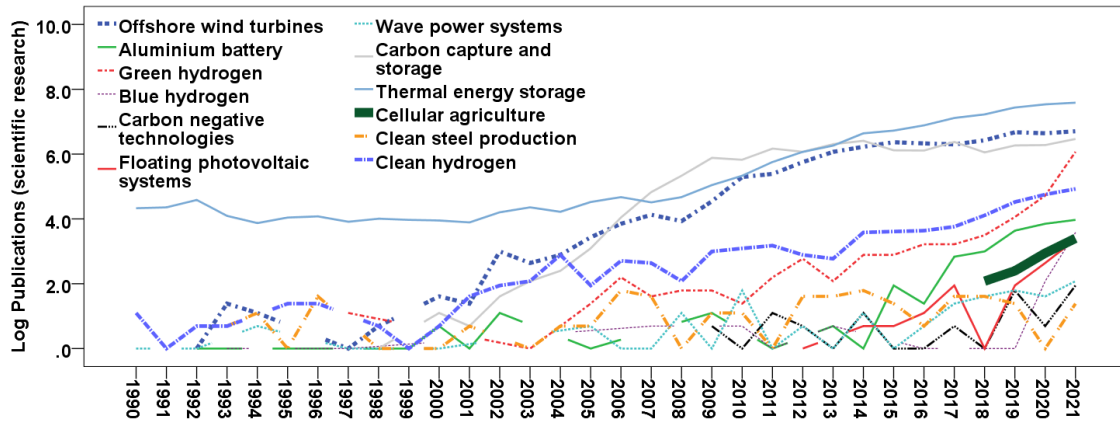
A abordagem dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) também é utilizada para estimar os parâmetros lineares deste modelo log-log [2]. O programa utilizado para a análise estatística é o IBM SPSS Statistics 26®.

Resultados Empíricos

O modelo [1] é uma ferramenta utilizada para visualizar padrões em patentes e publicações relacionadas à tecnologia sustentável. Especificamente, a figura 2 ilustra como várias tecnologias evoluíram à luz da expansão do conhecimento, conforme indicado pelos artigos publicados, enquanto a figura 2 ilustra como as tecnologias evoluíram à luz das patentes.

Figura 2

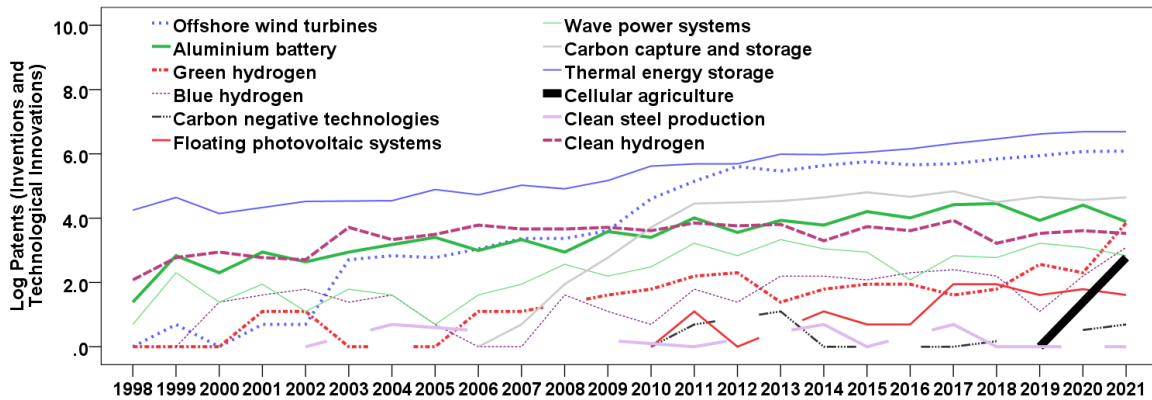
Tendências de publicações relacionadas às tecnologias sustentáveis.



Nota: O período analisado começa em 1990 para ilustrar melhor as mudanças.

Figura 3

Caminhos percorridos por tecnologias que utilizam patentes para alcançar a sustentabilidade.



Nota: o período analisado começa em 1998 para melhor ilustrar as tendências.

A taxa relativa de expansão de várias tecnologias ao longo do tempo é avaliada combinando e analisando as tendências das figuras 2 e 3, juntamente com os dados subjacentes, utilizando o modelo [2].

Tabela 3

Relações entre patentes de pesquisas científicas que produzem inovações voltadas para a sustentabilidade no futuro que são estimadas

<i>Fontes de Energia Renováveis</i>	<i>Coefficiente B</i>	<i>Constante A</i>	<i>Teste F</i>	<i>R²</i>
Os sistemas de energia das ondas aproveitam o poder das ondas oceânicas.	.840**	1.160***	7.68**	0.22
As turbinas eólicas offshore geram eletricidade limpa a partir do vento no mar.	1.062***	-0.968**	391.65***	0.95
Os painéis solares flutuantes capturam a luz solar em corpos d'água.	0.309	0.840*	2.75	0.28
O hidrogênio verde é um combustível limpo produzido a partir de fontes de energia renováveis.	0.584***	0.101	45.84***	0.74
O hidrogênio azul é um combustível limpo produzido a partir do gás natural com captura de carbono.	0.542*	.956***	6.33*	0.30
A energia geotérmica utiliza o calor do núcleo da Terra para gerar eletricidade.	0.840***	-0.240***	32.95***	0.54
A energia solar concentrada (CSP) foca a luz solar para criar altas temperaturas para a geração de eletricidade.	0.980***	0.330	104.73***	0.71
<i>Armazenamento de Energia Renovável e Captura de Carbono</i>	<i>Coefficiente B</i>	<i>Constante A</i>	<i>Teste F</i>	<i>R²</i>
Os sistemas de armazenamento de calor armazenam o excesso de energia térmica para uso posterior.	0.935**	0.036	319.33***	0.87
A captura e armazenamento de carbono (CCS) captura emissões de carbono de usinas de energia e as armazena sob o solo.	2.270***	-9.690***	169.81***	0.91
A CCS pós-combustão captura carbono dos gases de combustão após a queima.	1.000***	-0.840	32.24***	0.69
A CCS pré-combustão captura carbono do combustível antes da combustão.	0.270	1.010*	1.14	0.01
A combustão com oxigênio queima o combustível em oxigênio puro, facilitando a captura do dióxido de carbono.	0.660***	1.270***	16.14***	0.44
<i>As tecnologias negativas de carbono removem mais carbono da atmosfera do que emitem.</i>	<i>Coefficiente B</i>	<i>Constante A</i>	<i>Teste F</i>	<i>R²</i>
Captura e Utilização de CO2	1.740***	-2.172**	52.82***	0.72
A conversão eletroquímica utiliza eletricidade para transformar CO2 em produtos úteis.	.384**	-.364	10.83**	0.45
A conversão fotocatalítica utiliza luz solar e catalisadores para converter CO2 em produtos químicos valiosos.	--	--	--	--
A conversão fotocatalítica utiliza luz solar e catalisadores para converter CO2 em produtos químicos valiosos.	0.590***	.560*	29.50***	0.59
A conversão fototérmica catalítica combina luz solar e calor com catalisadores para utilizar CO2.	0.440***	2.800***	70.28***	0.63
A conversão de energia solar usa luz solar para converter CO2 em combustíveis ou produtos químicos.	1.040***	-.250	180.43***	0.81
A conversão catalítica utiliza catalisadores para transformar CO2 em novos materiais.	0.570***	2.720***	63.52***	0.63
A bioconversão utiliza microrganismos para converter CO2 em biocombustíveis ou outros produtos.	0.640***	-.340	19.47***	0.49
<i>A copolimerização incorpora CO2 em polímeros para várias aplicações.</i>	<i>Coefficiente B</i>	<i>Constante A</i>	<i>Teste F</i>	<i>R²</i>
A carbonatação mineral converte CO2 em minerais carbonatados estáveis.	.600***	2.295***	19.71***	0.461

	-0.063	0.379	0.046	.005
Produtos e Processos Sustentáveis	1.890***	0.81***	284.72***	0.91
As baterias de alumínio oferecem uma alternativa potencialmente sustentável às baterias de lítio.	2.760*	-6.65*	374.61*	.99
A produção de aço limpo minimiza o impacto ambiental em comparação aos métodos tradicionais.	0.810	-0.04	48.73	0.96

Nota: Estrutura *log-log*. As patentes relacionadas à tecnologia são a variável dependente. As publicações tecnológicas *i* são a variável explicativa; elas são *** significativas a 1%, ** significativas a 5% e * significativas a 10%. *F* é a razão da variância que o modelo pode explicar em relação à variação que não pode ser explicada. O coeficiente de determinação é conhecido como R^2 . As tecnologias com uma perspectiva de crescimento tecnológico $B > 1$ estão em negrito.

O coeficiente de evolução técnica $B > 1$ da Tabela 3 indica que algumas tecnologias cresceram de forma desproporcional (e mais rapidamente) ao longo do tempo, o que pode impactar a futura transformação social e econômica sustentável. Em contraste, várias tecnologias na Tabela 3 têm $B < 1$, indicando um crescimento mais lento. Isso provavelmente se deve ao fato de que essas tecnologias ainda estão nos estágios iniciais da evolução tecnológica, o que significa que, mesmo que tenham patentes, ainda não estão desenvolvidas o suficiente para serem plenamente utilizadas nos mercados. Por fim, algumas tecnologias não são consideradas, pois não possuem um coeficiente B substancial.

Tecnologia para Construir a Sustentabilidade é Discutida

Uma conclusão importante dos coeficientes de regressão da Tabela 3 é a identificação de tecnologias com valor de B maior que 1. Essas tecnologias, incluindo turbinas eólicas offshore, representam caminhos mais rápidos para a evolução tecnológica em direção a um futuro sustentável. As turbinas eólicas offshore exemplificam inovações tecnológicas aceitas pelo mercado, enquanto outras, como o Armazenamento de Carbono (CCS), ainda estão em pesquisa e desenvolvimento (P&D). Da mesma forma, a conversão eletroquímica de CO_2 , a bioconversão de CO_2 , a produção sustentável de amônia e a agricultura celular estão todas na fase de P&D.

Explorar os potenciais usos dessas tecnologias pode fornecer insights valiosos para promover uma transição energética positiva. Discussões em torno desses avanços podem ajudar a definir aspectos cruciais para a construção de sistemas socioeconômicos sustentáveis. É importante reconhecer os diferentes estágios de desenvolvimento. Enquanto as turbinas eólicas offshore estão impulsionando o progresso do mercado, tecnologias como o CCS permanecem imaturas para adoção generalizada no mercado atual. Essa distinção destaca a necessidade de avanços contínuos para facilitar uma transição ecológica suave e garantir um futuro sustentável para nossa sociedade global.

O texto conclui sugerindo o potencial de uma tecnologia moderna específica, provavelmente com um valor $B > I$, que está disponível comercialmente devido ao seu rápido progresso científico e tecnológico. No entanto, a tecnologia específica não é mencionada.

- A energia eólica pode ser aproveitada a partir de locais terrestres (onshore) ou marítimos (offshore), sendo que as fazendas eólicas offshore oferecem diversos benefícios. Estudos de Gonzalo et al. (2022) sugerem que as fazendas eólicas offshore podem ser maiores, mais potentes e ter um impacto ambiental menor. A tecnologia eólica, particularmente as gerações mais novas de turbinas, é considerada uma fonte significativa e econômica de energia renovável (Nemet, 2006; Pérez & Ponce, 2015). Avanços tecnológicos estão continuamente reduzindo os custos em mais de 30% por meio de melhorias na produtividade do trabalho (por exemplo, instalação mais rápida) e na seleção de materiais (por exemplo, utilização de fibra de vidro mais leve e resistente) (Elia et al., 2020). A pesquisa de Elia et al. (2020) e Oh (2020) destaca o "aprendizado pela implantação" como um fator importante na redução dos custos da tecnologia de turbinas eólicas entre 2005 e 2017. Isso significa que, à medida que mais turbinas são implantadas, a indústria ganha experiência e otimiza os processos de produção. Wang et al. (2021) documentaram avanços significativos na tecnologia de energia eólica entre 2005 e 2019, com a capacidade eólica instalada global superando 651 GW até 2019, refletindo um aumento de 1100%. Um fator chave para esse crescimento é a transição para fazendas eólicas offshore. Ventos mais fortes e consistentes, além da capacidade de instalar turbinas maiores (de até 17 MW, em comparação ao limite atual de 6 MW onshore), tornam os locais offshore altamente atraentes (Li et al., 2022). A pesquisa de Li et al. (2022) sugere até mesmo que a combinação de energia eólica offshore com sistemas de energia de corrente de maré pode reduzir ainda mais os custos de energia para comunidades costeiras. Exemplos de países que lideram a revolução da energia eólica offshore incluem a Coreia do Sul (mais de 10.000 MW), a China (com capacidade atual superior a 43.300 MW) e o Reino Unido (que possui uma das maiores fazendas eólicas offshore do mundo) (Chen et al., 2023).

Além das turbinas eólicas offshore, este estudo destaca várias tecnologias inovadoras de transição energética que ainda estão nos estágios iniciais de desenvolvimento e que ainda não foram amplamente lançadas ou adotadas no mercado, mas que têm como foco a produção de energia renovável e a captura e armazenamento de CO₂:

- A Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) e a Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) são tecnologias emergentes com o potencial de reduzir significativamente nossa pegada de carbono. Conforme destacado por Balaji & Rabiei (2022), essas tecnologias podem abordar as emissões de CO₂ de setores industriais importantes, como o de aço, cimento e petroquímicos. Além disso, a CCUS oferece a possibilidade de converter o CO₂ capturado em produtos valiosos, como combustíveis, produtos químicos e até materiais agrícolas (Ghiat & Al-Ansari, 2021; Peplow, 2022). Essa transição de uma dependência de combustíveis fósseis para uma economia de baixo carbono é crucial para um futuro sustentável. Embora muitas tecnologias de CCS e CCUS ainda estejam em desenvolvimento com testes de mercado em andamento (Academias Nacionais de Ciências, 2022), seu potencial é inegável. A CCS, quando integrada a usinas de energia existentes, pode reduzir dramaticamente as emissões de CO₂ em 80-90% em comparação com as emissões não capturadas (AIE, 2022). As instalações de CCUS existentes já estão capturando uma quantidade significativa de CO₂ globalmente, alcançando quase 45 Mt, de acordo com Gadikota (2021). É importante ressaltar que esses novos processos químicos também podem diminuir a pegada de carbono geral de vários processos industriais, otimizando a conversão de energia e recursos. Apesar de atrasos iniciais na implementação, a CCUS está ganhando impulso, com mais de 300 projetos atualmente em várias fases de desenvolvimento (CTCN, 2022). Até 2030, projeções estimam cerca de 200 plantas operacionais de captura com uma capacidade de captura anual combinada superior a 220 milhões de toneladas de CO₂ (AIE, 2022; Resources Magazine, 2022). Elavarasan et al. (2022) enfatizam a necessidade de planos estratégicos de descarbonização, particularmente na Europa, que utilizem tecnologias de CCS e CCUS para setores difíceis de descarbonizar, como a indústria (Chapman et al., 2022; NIST, 2022). Esses avanços oferecem um caminho promissor para alcançar a neutralidade climática.
- Captura e utilização de CO₂ utilizando conversão eletroquímica (CCU). A conversão eletroquímica de CO₂ em produtos, como gás de síntese, metano, metanol ou dimetil éter, com a adição de energia renovável, é uma das tecnologias com perspectivas em expansão para a CCU. A empresa Sunfire, que gerou combustível diesel de alta qualidade em 2015, e a ETOGAS, que criou uma técnica que utiliza a eletrólise a pressão alcalina da H₂O para

produzir H₂, que posteriormente se combina com CO₂ para produzir CH₄ (metano), são os dois principais exemplos dessa tecnologia. Embora os processos da Sunfire e da ETOGAS possam atualmente produzir pequenas quantidades de produção industrial, mais pesquisa e desenvolvimento, além do aprendizado a partir da utilização desses processos, podem levar a aplicações em larga escala (Zhu, 2019).

- Captura e utilização de CO₂ (CCU) por bioconversão. A bioconversão de CO₂ é uma tecnologia que tem o potencial de ser mais sustentável; no entanto, atualmente está em estágio de pesquisa e desenvolvimento, com as primeiras aplicações em operações industriais. Por exemplo, a empresa LanzaTech criou um método biológico de fermentação de gás que transforma gases de exaustão industriais em produtos químicos e combustíveis. O método converte gases e resíduos ricos em CO em compostos, cultivando bactérias sobre os gases. Esta empresa, que está conectada à empresa japonesa Sekisui Chemical, desenvolveu uma planta industrial em 2014 que gasifica resíduos sólidos urbanos não reciclados e não compostáveis. O gás de síntese produzido é então queimado para gerar eletricidade. Alternativamente, a empresa americana Joule Unlimited Technologies criou microrganismos artificiais, incluindo cianobactérias geneticamente alteradas, que usam energia solar para converter continuamente CO₂ e H₂O em etanol ou combustíveis hidrocarbonetos (Zhu, 2019).
- Métodos sustentáveis para a produção de amônia. Os resultados da Tabela 2 demonstram ainda mais o forte progresso tecnológico da amônia (NH₃). A indústria que produz fertilizantes nitrogenados (N) baseia-se na amônia. Uma das áreas mais intrigantes do estudo químico para promover a sustentabilidade é a geração de amônia a partir do dinitrogênio molecular (N₂) em condições suaves (Ampelli, 2020; Cui et al., 2018). Na verdade, há muito espaço para a síntese sustentável e de baixo consumo energético de NH₃ por meio da redução eletroquímica de N₂. De acordo com Soloveichik (2019), o processo Haber-Bosch é uma tecnologia chave; no entanto, os caminhos eletroquímicos, que enfatizam eletrocatalisadores, eletrólitos e um design inovador de células, podem reduzir o consumo de energia e sustentar uma produção sustentável de amônia. Segundo Lv et al. (2020), o processo Haber-Bosch, que é intensivo em energia, pode ser substituído por uma técnica emergente chamada eletrossíntese de amônia (NH₃) a partir do nitrogênio atmosférico (N₂) e da água; no entanto, gargalos no processo e questões tecnológicas

podem impedir a ampla adoção industrial do método. De acordo com Tavella et al. (2022), a crescente demanda industrial por amônia pode ser atendida pela geração eletrocatalítica direta de amônia (NH_3) a partir de N_2 e H_2O em condições ambientes. Além disso, a pesquisa e o desenvolvimento atuais nesse campo estão focados no desenvolvimento de eletrodos de difusão gasosa, no design de configurações de células e na adoção de nanoarquitetura tridimensional para a superfície do eletrodo. Adicionalmente, técnicas mediadas por lítio mais eficazes em solventes não aquosos estão sendo estudadas, como a inundação dos eletrodos de difusão gasosa, visando a sustentabilidade do sistema de transporte de prótons.

- A pesquisa sugere que a agricultura celular, também conhecida como cultivo baseado em células, possui um grande potencial para um futuro mais sustentável (Tabela 2). Essa tecnologia tem a capacidade de abordar alguns dos desafios ambientais associados à agricultura convencional. A pecuária, particularmente a criação de gado, é uma grande contribuinte para as emissões de gases de efeito estufa, representando cerca de 38% das emissões de metano globalmente (Cho, 2022). As práticas agrícolas tradicionais também contribuem para as emissões de CO_2 , embora em menor escala, em torno de 1%. A agricultura celular apresenta uma oportunidade de reduzir essas emissões ao oferecer uma abordagem mais ambientalmente amigável à produção de alimentos. Esse método, juntamente com outras práticas sustentáveis como a agroecologia e a agricultura regenerativa, pode contribuir para a diminuição das emissões de CO_2 e a melhoria da saúde do solo (Pronti & Coccia, 2020, 2021; Kargı et al., 2023, 2023a; Uçkaç et al., 2023, 2023a). Esses avanços são cruciais, uma vez que a população global está projetada para atingir 11 bilhões até 2100, exigindo adaptações em nossos sistemas atuais de produção de alimentos (Willett et al., 2019; Global Change, 2022). Para atender a essa crescente demanda por alimentos, especialmente opções ricas em proteínas, enquanto minimiza o impacto ambiental, novos modelos agrícolas sustentáveis são necessários (Edeme et al., 2020; Pronti & Coccia, 2021, 2021b, 2021c, 2022). A agricultura celular pode ser um componente chave de um sistema agrícola à prova de futuro que prioriza a sustentabilidade e apoia redes de produção de alimentos resilientes (Bapat et al., 2021; Campbell, 2002). Essa tecnologia aproveita os avanços no cultivo celular para criar produtos de origem animal sem a pegada ambiental associada à produção tradicional de gado. Embora alguns,

como Moritz et al. (2022), reconheçam os obstáculos potenciais e as adaptações necessárias para uma adoção comercial ampla, a agricultura celular representa uma mudança metódica em direção a um futuro mais sustentável para a produção de alimentos. A produção industrial em larga escala baseada nessa tecnologia pode não ser alcançável no curto prazo, mas a pesquisa e o desenvolvimento contínuos têm um grande potencial.

c) Soluções adicionais empolgantes para um futuro socioeconômico sustentável que estão em fase de P&D ou acabaram de entrar no mercado

Os frameworks de controle de ondas são um dos avanços sob investigação que estão disponíveis no mercado, mas de acordo com os dados da Tabela 2, sofreram menos progresso científico e tecnológico. Os principais usos dessa tecnologia incluem fazendas de ondas construídas em Portugal em 2008 utilizando a tecnologia de coluna de água oscilante e atenuadores de superfície, em Israel em 2009 utilizando tecnologia de conversor de onda oscilante, na Espanha e no Reino Unido nas décadas de 2000 e 2010 utilizando tecnologia de coluna de água oscilante, entre outros (Kaldellis & Chrysikos, 2019).

Muitas das tecnologias aqui analisadas, embora tenham um alto potencial para soluções sustentáveis e a capacidade de gerar patentes, ainda não são avanços mecânicos que deveriam ser aplicados nos mercados para ampla dispersão. Por exemplo, existem várias startups na fase inicial de lançamento no mercado de tecnologia de armazenamento de energia térmica. A Highview Power, financiada no Reino Unido e fundada em 2005, desenvolve uma solução de armazenamento de energia a líquido-ar para aplicações em infraestrutura; a MALTA, financiada em 2018 em Cambridge, EUA; e a Antora Energy, financiada em 2017 (EUA), que armazena energia na forma de calor em matérias-primas baratas e converte esse calor de volta em eletricidade com um motor térmico termofotovoltaico eficiente, entre outros (Tracxn, 2022).

Uma nova tecnologia com elementos importantes para a sustentabilidade é o hidrogênio verde. Atualmente na fase de pesquisa e desenvolvimento, o grupo Iberdrola—um líder global em energia—colocou em operação a maior planta de produção de hidrogênio verde da Espanha, que é totalmente baseada em recursos renováveis para uso industrial. Esta planta é composta por uma usina solar fotovoltaica de 100 MW, um sistema de baterias de íon de lítio de 20 MWh e um dos maiores sistemas de produção eletrolítica de hidrogênio do mundo (20 MW; veja, Iberdrola, 2022). A Siemens começou a construção de uma das maiores instalações de fabricação de hidrogênio

verde solar e eólico na Alemanha (CNBC, 2022). Até junho de 2023, a Sinopec (China Petroleum & Chemical Corporation) pretende construir a maior instalação de produção de hidrogênio do mundo utilizando energia renovável, impulsionada por uma usina fotovoltaica de 300 MW. O objetivo é produzir 20.000 toneladas de hidrogênio verde anualmente, o que deve resultar em uma redução anual de 485.000 toneladas de emissões de CO₂ (Balkan Green Energy News, 2022).

Embora a introdução da fabricação de aço limpo no mercado ainda esteja em fase de teste, pode ser um processo de desenvolvimento com potencial significativo para reduzir a poluição do ar e melhorar a sustentabilidade (Coccia, 2014). Para reduzir o minério de ferro e eliminar a necessidade de carbono no processo de fabricação do aço, a Arcelor (2022) está investigando novas estratégias de fabricação limpa, como hidrogênio ou eletrólise, que podem reduzir as emissões de CO₂. O projeto H2 Hamburg (Alemanha) é uma pesquisa intrigante que utiliza hidrogênio para produzir aço e reduz o minério de ferro diretamente durante o processo de fabricação do aço. O objetivo de longo prazo é expandir essa tecnologia em escala industrial, e o projeto em Hamburgo deverá utilizar hidrogênio verde derivado de fontes renováveis.

Por fim, embora ainda esteja em seus estágios iniciais nesses campos de pesquisa e tecnologia, a tecnologia blockchain pode ser uma ferramenta de uso geral que também pode ajudar a garantir um futuro limpo e sustentável para todos (Howson, 2019; Hughes et al., 2019; Esmailzadeh, 2022; Coccia, 2017a, 2017b, 2017c). Para validar transações e proteger o julgamento dos dados do sistema, as plataformas de blockchain fazem uso de uma rede descentralizada de nós distribuídos (Centobelli et al., 2021). Uma maneira de reduzir as emissões de gases de efeito estufa até 2050 é que os países integrem mais fontes renováveis de energia descentralizadas em seus sistemas de fornecimento de energia. Isso significa se afastar da tradicional distribuição de energia de cima para baixo, que depende de grandes usinas de energia para atender toda a demanda, e avançar para um sistema descentralizado onde a energia é gerada e armazenada no nível do consumidor final (Javid et al., 2021). A fundamentação dessa transformação tecnológica e de mercado deve ser um mercado de energia local (LEM), onde os produtores e consumidores de energia estão conectados entre si para realizar energia em uma plataforma apoiada por planos de mercado descentralizados e tecnologia blockchain. Essa tecnologia inovadora tem o potencial de estimular uma mudança de mercado que resulta em práticas de consumo de energia viáveis e maior eficiência do sistema (Streparava et al., 2022).

Considerações Finais e Compromissos para Cumprir Pelo Menos um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

As principais descobertas, com base nos coeficientes de regressão estimados, mostram que as tecnologias com $B > I$ —indicando que estão em caminhos acelerados de avanço tecnológico para apoiar futuros sustentáveis— incluem os seguintes itens:

- Turbinas eólicas offshore, que já foram adotadas nos mercados;
- Armazenamento de Carbono, atualmente em fase de desenvolvimento e ainda não amplamente implementado;
- Conversão eletroquímica de CO₂, ainda na fase de pesquisa e desenvolvimento;
- Bioconversão de CO₂, também na fase de pesquisa e desenvolvimento;
- Processos sustentáveis para a produção de amônia, na fase de pesquisa e desenvolvimento;
- Agricultura celular, que igualmente está na fase de pesquisa e desenvolvimento.

Este estudo é peculiar na medida em que utiliza um modelo baseado em distribuições (dados científicos, variável explicativa) e licenças (um intermediário para o avanço tecnológico, variável de resposta) para investigar a evolução de novas direções tecnológicas voltadas para a transição energética. Os resultados apontam para avanços que estão se desenvolvendo de forma mais rápida e que têm o potencial de auxiliar futuros sistemas econômicos sustentáveis. Em contraste com investigações anteriores, este estudo apresenta uma série de tecnologias inovadoras e potencialmente econômicas, incluindo turbinas eólicas offshore, captura e armazenamento de carbono, conversão eletroquímica e bioconversão de CO₂, processos sustentáveis de fabricação de amônia e agricultura celular. Os resultados também demonstram que algumas dessas tecnologias— como os processos de conversão eletroquímica e bioconversão de CO₂, que possuem 376 e mais de 1.000 patentes, respectivamente— não estão gerando inovações significativas para aplicações em larga escala, apesar de deter um número considerável de patentes. Algumas empresas de energia e universidades renomadas estão atualmente pesquisando e desenvolvendo essas inovações, que têm o potencial de reduzir emissões de gases de efeito estufa utilizando recursos renováveis. Por exemplo, a Equinor (2022) está trabalhando em um projeto para armazenar carbono de maneira segura e permanente sob o leito marinho, a fim de evitar o aquecimento global sempre que possível. Iniciativas recentes na George Washington University (EUA) estão criando

terminais de baixo-voltagem e baixo-custo feitos de aço e níquel para converter CO₂ em nanofibras de carbono e nanotubos de carbono. Esses compósitos de carbono são fundamentais para a indústria, pois podem ser utilizados em baterias e como substitutos leves para metais em aeronaves, carros esportivos de luxo e equipamentos esportivos (Zhu, 2019). A bioconversão de captura e utilização de CO₂ pode ser uma tecnologia promissora que tem levado a iniciativas intrigantes utilizando proteínas e micróbios que foram desenvolvidos. Por exemplo, pesquisadores na Escócia estão trabalhando em uma técnica que permitiria à bactéria *Escherichia coli* operar como um dispositivo realmente eficaz de captura de carbono, convertendo CO₂ em ácido fórmico (Roger et al., 2018). Alternativamente, uma nova proteína em desenvolvimento por pesquisadores dos EUA é capaz de converter formaldeído em diidroxiacetona, que pode então ser utilizada para converter CO₂ em combustíveis como etanol. Novas vias para a conversão de CO₂, baseadas em biotecnologia microbiana, estão sendo abertas por essa tecnologia em desenvolvimento.

Implicações para Políticas a Fim de Reduzir os Efeitos Negativos do Desenvolvimento Econômico e Social Poluente sobre o Meio Ambiente

As nações devem promover o rápido avanço de tecnologias voltadas para a transição ambiental e a sustentabilidade nos sistemas econômicos, tendo como base as questões globais de energia e poluição ambiental (Calza et al., 2020; Nti et al., 2022; Khan et al., 2022; Sterner & Coria, 2012). Este estudo ilustra como novas abordagens tecnológicas estão sendo desenvolvidas para reduzir as emissões de CO₂ através do uso de recursos renováveis (como turbinas eólicas offshore) e para capturar e utilizar CO₂ na produção de energia sustentável (como o hidrogênio verde produzido por plantas fotovoltaicas e eólicas que estão atualmente em pesquisa e desenvolvimento). O processo de interação de diferentes tecnologias voltadas para uma transição ambiental que produza caminhos de co-evolução acelerada para a sustentabilidade é outra descoberta crucial aqui. Por exemplo, a interação industrial entre o hidrogênio verde gerado a partir de recursos renováveis e a produção de aço limpo evita a utilização de carbono no processo de fabricação do aço, reduzindo assim as emissões de CO₂ (cf., Coccia, 2017c, 2018a, 2019a). Para promover a sustentabilidade e mitigar os problemas ambientais relacionados à escassez ou exaustão de recursos naturais, essas novas direções tecnológicas devem ser cada vez mais seguidas (Knolls et al., 1972; Sulston, 2012). Portanto, para garantir que a sociedade humana possa continuar rumo a um futuro econômico sustentável, os sistemas econômicos devem apoiar as

tecnologias que são o tema desta investigação e que têm a capacidade de reduzir efetivamente a degradação ambiental e proteger a biosfera (Magdoff, 2013; Magdoff & Cultivate, 2011; Saeli et al., 2022). O avanço da ciência e da tecnologia, bem como sua comercialização nos mercados, pode ser acelerado por recursos financeiros, aos quais formuladores de políticas, gestores e acadêmicos estão atentos (Roshani et al., 2021a, 2022; Mosleh et al., 2022). Para promover um desenvolvimento econômico que tenha um impacto positivo na indústria e na sociedade, os formuladores de políticas devem utilizar as informações cruciais fornecidas por este estudo para direcionar seus investimentos em P&D para disciplinas e tecnologias promissoras relacionadas à transição energética (Coccia, 2021a; Kargı, & Coccia, 2024). Essas estratégias de investimento em P&D podem ser aplicadas a políticas energéticas e econômicas que promovam um equilíbrio entre o meio ambiente, os recursos naturais e a sociedade humana dentro de cidades e grandes aglomerações urbanas: em outras palavras, um sistema de eco-socialismo baseado em instituições e indivíduos colaborando para preservar o meio ambiente e a sustentabilidade econômica nas tecnologias (Aidnik, 2022; Adaman & Devine, 2022).

Em geral, os países devem desenvolver e implementar estratégias sistêmicas de longo prazo voltadas para reduzir sua dependência de economias baseadas em carvão e petróleo. Algumas das tecnologias aqui identificadas apresentam aplicações promissoras nas áreas de geração de energia limpa, produtos recicláveis e energias renováveis, direcionadas a uma economia circular ampla, que integra o ecossistema para o bem-estar das gerações futuras e para o crescimento econômico sustentável (cf., Aresta & Dibenedetto, 2020; Pronti & Coccia, 2021).

Limitações

As conclusões aqui são, evidentemente, provisórias. Este estudo fornece alguns resultados interessantes, mas preliminares, nestes campos complexos da evolução científica e tecnológica em tecnologias sustentáveis. Embora este estudo produza alguns resultados intrigantes, se não preliminares, apresenta várias deficiências que devem ser abordadas em investigações subsequentes, utilizando novos dados e métodos para apoiar as conclusões aqui obtidas. Algumas limitações são: 1) os resultados científicos e os tópicos de pesquisa podem apenas detectar certos aspectos da dinâmica atual da tecnologia sustentável; 2) as análises estatísticas consideram resultados e implicações com base em campos tecnológicos específicos em sustentabilidade; 3) a estrutura proposta analisa campos científicos e de pesquisa específicos, mas descarta insights interessantes de outros campos de pesquisa e tecnologia para a transição ecológica; 4) Além dos

grupos tecnológicos identificados, pesquisas futuras poderiam explorar outras áreas promissoras, como a biomimética, que se inspira nos princípios de design da natureza para soluções sustentáveis. Além disso, fatores sociais e econômicos podem influenciar a adoção e a implementação dessas tecnologias, o que merece investigação.

Apesar dessas limitações, os resultados aqui claramente ilustram as dinâmicas das principais tecnologias que podem impulsionar a transição ecológica e a sustentabilidade nos sistemas socioeconômicos.

Ideias para pesquisa futura

Há uma necessidade de pesquisas muito mais detalhadas sobre a investigação dos padrões evolutivos emergentes nos campos científicos e tecnológicos voltados para a transição ecológica e a sustentabilidade. Áreas mais precisas para investigação adicional incluem:

a) Análises complementares para fornecer uma visão mais abrangente do ecossistema científico e inovador, caminhos evolutivos que revelem não apenas os avanços científicos, mas também a inovação e as aplicações práticas voltadas para a sustentabilidade na ciência e na sociedade.

b) Considerar em análises futuras fatores de confusão, como o nível de investimentos em P&D públicos e privados, a colaboração internacional em tecnologias sustentáveis específicas, etc. Esses fatores podem explicar outros aspectos dos campos de pesquisa emergentes e das tecnologias.

c) As análises estatísticas consideram campos científicos e tecnológicos específicos, mas os próximos estudos devem ser aprimorados com mais dados, abrangendo uma ampla gama de áreas de pesquisa em diferentes domínios científicos e tecnológicos, desde ciências biológicas e químicas até ciências ambientais, para uma transição ecológica geral.

Para concluir, as descobertas apresentadas aqui podem estimular uma exploração teórica mais aprofundada na terra incognita das tecnologias voltadas para a sustentabilidade. Este estudo amplia o estado da arte na informação científica e tecnológica direcionada a apoiar a transição ecológica e a sustentabilidade por meio de tecnologias promissoras. Em conclusão, é necessária uma investigação intensiva e contínua para elevar as expectativas sustentáveis sobre as novas tecnologias que as nações devem desenvolver para mitigar a poluição e a degradação ambiental. No entanto, uma explicação abrangente da evolução da ciência e da tecnologia direcionadas à sustentabilidade é um tema difícil, devido a múltiplos fatores complexos e inter-relacionados

associados a aspectos econômicos, sociais, políticos e institucionais, bem como à presença de um ambiente em mudança e turbulento. Nesse sentido, Wright (1997, p.1562) afirma apropriadamente que: “No mundo da mudança tecnológica, a racionalidade limitada é a regra.”

Referências

- Adam, D. (2021). How far will global population rise? Researchers can't agree. *Nature*, 597(7877), 462-465. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02522-6>
- Adaman, F., & Devine, P. (2022). Revisiting the Calculation Debate: A Call for a Multiscale Approach, *Rethinking Marxism*, 34(2), 162-192. <https://doi.org/10.1080/08935696.2022.2051374>
- Aidnik, M. (2022). Envisioning a Utopian Ecosocialism in the Darkness of the Covid-19 Pandemic, *Capitalism Nature Socialism*. 33(2), 44-59. <https://doi.org/10.1080/10455752.2021.2016878>
- Ali, A., Audi, M., & Roussel, Y. (2021). Natural resources depletion, renewable energy consumption and environmental degradation: A comparative analysis of developed and developing World. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(3), 251-260. <https://doi.org/10.32479/ijeep.11008>
- Ampelli, C. (2020). Electrode design for ammonia synthesis. *Nature Catalysis*, 3, 420-421. <https://doi.org/10.1038/s41929-020-0461-x>
- Arcelor, M. (2022). Clean power steelmaking. https://automotive.arcelormittal.com/sustainability/clean_power_steelmaking
- Ardito, L., Coccia M., & Messeni-Petruzzelli A. (2021). Technological exaptation and crisis management: Evidence from COVID-19 outbreaks. *R&D Management*, 51(4), 381-392. <https://doi.org/10.1111/radm.12455>
- Aresta, M, & Dibenedetto A. (2020). Carbon recycling through CO2-conversion for stepping

- toward a cyclic-c economy. A perspective. *Frontiers Energy Research*, 8, 159.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00159>
- Ayres, R.U. (1990a). Technological transformations and long waves. Part I. *Technological Forecasting and Social Change*, 37(1), 1-37. [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(90\)90057-3](https://doi.org/10.1016/0040-1625(90)90057-3)
- Ayres, R.U. (1990b). Technological transformations and long waves. Part II. *Technological Forecasting and Social Change*, 37(2), 111-137. [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(90\)90065-4](https://doi.org/10.1016/0040-1625(90)90065-4)
- Ayres, R.U. (1998). Towards a disequilibrium theory of endogenous economic growth. *Environmental and Resource Economics*, 11(3-4), 289-300.
<https://doi.org/10.1023/A:1008239127479>
- Balaji, K., & Rabiei M. (2022). Carbon dioxide pipeline route optimization for carbon capture, utilization, and storage: A case study for North-Central USA. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101900. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101900>
- Balkan Green Energy News (2022). Renewables, China building world's biggest green hydrogen factory. <https://balkangreenenergynews.com/chinas-sinopec-building-worlds-biggest-green-hydrogen-factory/>
- Bapat, S., Koranne, V., Shakelly, N., (...), Rajurkar, K.P., & Malshe, A.P. (2022). Cellular agriculture: An outlook on smart and resilient food agriculture manufacturing. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*, 6(1), 1-11. <https://doi.org/10.1520/SSMS20210020>
- Belpomme, D., Irigaray, P., Hardell, L., Clapp, R., Montagnier, L., Epstein, S., & Sasco A.J. (2007). The multitude and diversity of environmental carcinogens, *Environmental Research*, 105(3), 414-429. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2007.07.002>

- Bowman, D.M. (2011). The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography*, 38(12), 2223-2236. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x>
- Calabrese, G., Coccia, M., & Rolfo, S. (2005). Strategy and market management of new product development: evidence from Italian SMEs. *International Journal of Product Development*, 2(1-2), 170-189. <https://doi.org/10.1504/IJPD.2005.006675>
- Calza, F., Parmentola, A., & Tutore, I. (2020). Big data and natural environment. How does different data support different green strategies? *Sustainable Futures*, 2, no.100029. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100029>
- Campbell, C.J. (2002). Petroleum and People. *Population and Environment*, 24(2), 193-207. <https://doi.org/10.1023/A:1020752205672>
- Centobelli, P., Cerchione, R., Del Vecchio, P., Oropallo, E., & Secundo, G. (2021). Blockchain technology for bridging trust, traceability and transparency in circular supply chain. *Information Management*, 59(7), no.103508. <https://doi.org/10.1016/j.im.2021.103508>
- Chapman, A., Ertekin, E., Kubota, M., (...), Kirchheim, R., & Sofronis, P. (2022). Achieving a carbon neutral future through advanced functional materials and technologies, *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 95(1), 73-103. <https://doi.org/10.1246/bcsj.20210323>
- Chen, J., Mao, B., Wu, Y., (...), Yu, A., & Peng, L. (2023). Green development strategy of offshore wind farm in China guided by life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 188, no.106652. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106652>
- Chin, A., Fu, R., Harbor, J., Taylor, M.P., & Vanacker, V. (2013). Anthropocene: Human interactions with earth systems, *Anthropocene*, 1, 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2013.10.001>
- Cho, R. (2022). What is decarbonization, and how do we make it happen? *Columbia Climate*

- School, <https://news.climate.columbia.edu/2022/04/22/what-is-decarbonization-and-how-do-we-make-it-happen/>
- CNBC, (2022). Sustainable energy. <https://www.cnbc.com/2022/09/15/green-hydrogen-siemens-commissions-german-production-plant.html>
- Coccia, M. (2008). Measuring scientific performance of public research units for strategic change. *Journal of Informetrics*, 2(3), 183-194. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2008.04.001>
- Coccia, M. (2014). Steel market and global trends of leading geo-economic players. *International Journal of Trade and Global Markets*, 7(1), 36-52. <http://dx.doi.org/10.1504/IJTGM.2014.058714>
- Coccia, M. (2015). Spatial relation between geo-climate zones and technological outputs to explain the evolution of technology. *International Journal of Transitions and Innovation Systems*, 4(1-2), 5-21. <http://dx.doi.org/10.1504/IJTIS.2015.074642>
- Coccia, M. (2017). Varieties of capitalism's theory of innovation and a conceptual integration with leadership-oriented executives: the relation between typologies of executive, technological and socioeconomic performances. *International Journal of Public Sector Performance Management*, 3(2), 148–168. <https://doi.org/10.1504/IJPSPM.2017.084672>
- Coccia, M. (2017a). Disruptive firms and industrial change, *Journal of Economic and Social Thought*, 4(4), 437-450. <http://dx.doi.org/10.1453/jest.v4i4.1511>
- Coccia, M. (2017b). New directions in measurement of economic growth, development and under development, *Journal of Economics and Political Economy*, 4(4), 382-395. <http://dx.doi.org/10.1453/jepe.v4i4.1533>
- Coccia, M. (2017c). Sources of disruptive technologies for industrial change. *L'industria – rivista di economia e politica industriale*, 38(1), 97-120. <http://dx.doi.org/10.1430/87140>

- Coccia, M. (2018). An introduction to the methods of inquiry in social sciences, *Journal of Social and Administrative Sciences*, 5(2), 116-126.
<http://dx.doi.org/10.1453/jsas.v5i2.1651>
- Coccia, M. (2018a). An introduction to the theories of institutional change, *Journal of Economics Library*, 5(4), 337-344. <http://dx.doi.org/10.1453/jel.v5i4.1788>
- Coccia, M. (2019). Why do nations produce science advances and new technology? *Technology in society*, 59, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2019.03.007>
- Coccia, M. (2019a). The theory of technological parasitism for the measurement of the evolution of technology and technological forecasting, *Technological Forecasting and Social Change*, 141, 289-304. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.12.012>
- Coccia, M. (2020). How (Un)sustainable Environments are Related to the Diffusion of COVID-19: The Relation between Coronavirus Disease 2019, *Air Pollution, Wind Resource and Energy. Sustainability*, 12, 9709. <https://doi.org/10.3390/su12229709>
- Coccia, M. (2021). Effects of the spread of COVID-19 on public health of polluted cities: results of the first wave for explaining the déjà vu in the second wave of COVID-19 pandemic and epidemics of future vital agents. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 19147-19154. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11662-7>
- Coccia, M. (2021a). The relation between length of lockdown, numbers of infected people and deaths of COVID-19, and economic growth of countries: Lessons learned to cope with future pandemics similar to Covid-19. *Science of The Total Environment*, 775, 145801. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145801>
- Coccia, M. (2021b). High health expenditures and low exposure of population to air pollution as critical factors that can reduce fatality rate in COVID-19 pandemic crisis: a global

analysis. *Environmental Research*, 199, no.111339.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111339>

Coccia, M. (2021c). The impact of first and second wave of the COVID-19 pandemic: comparative analysis to support control measures to cope with negative effects of future infectious diseases in society. *Environmental Research*, 197, 111099.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111099>

Coccia, M. (2022). Preparedness of countries to face covid-19 pandemic crisis: Strategic positioning and underlying structural factors to support strategies of prevention of pandemic threats, *Environmental Research*, 203, 111678.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111678>

Coccia M. (2024). Theory of errors in innovation failure and strategic management of winning by failing. *Technology Analysis & Strategic Management*. Forthcoming,

<https://doi.org/10.1080/09537325.2024.2383604>

Constant, K., Nourry, C., & Seegmuller, T. (2014). Population growth in polluting industrialization, *Resource and Energy Economics*, 36(1), 229-247.

<https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2013.05.004>

Crutzen, P.J., & Stoermer, E.F. (2000). The Anthropocene, *Global IGBP Change Newsletter*, 41,

17-18. <http://dx.doi.org/10.17159/sajs.2019/6428>

CTCN, (2022). CO2 storage technologies. <https://www.ctc-n.org/technologies/co2-storage-technologies>

Cui, X., Tang, C., & Zhang, Q. (2018). A review of electrocatalytic reduction of dinitrogen to ammonia under ambient conditions, *Advanced Energy Materials*, 8(22), 1800369.

<https://doi.org/10.1002/aenm.201800369>

- Edeme, R.K., Nkalo, N.C., Idenyi, J.C., & Arazu, W.O. (2020). Infrastructural development, sustainable agricultural output and employment in ECOWAS countries, *Sustainable Futures*, 2, 100010. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2020.100010>
- Elavarasan, R.M., Pugazhendhi, R., Irfan, M., Lucian, M.P., Khan, I.A., & Campana, P.E. (2022). State-of-the-art sustainable approaches for deeper decarbonization in Europe – An endowment to climate neutral vision. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112204. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112204>
- Elia, A., Taylor, M., Gallachóir, O.B., & Rogan, F. (2020). Wind turbine cost reduction: A detailed bottom-up analysis of innovation drivers, *Energy Policy*, 147, 111912. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111912>
- Equinor, (2022). Carbon capture, utilisation and storage (CCS). <https://www.equinor.com/energy/carbon-capture-utilisation-and-storage>
- Esmaeilzadeh, P. (2022). Benefits and concerns associated with blockchain-based health information exchange (HIE): a qualitative study from physicians' perspectives. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 22(1), 80. <https://doi.org/10.1186/s12911-022-01815-8>
- Foley, S.F., Gronenborn, D., Andreae, (...) Sirocko, F., & Crutzen, P.J. (2013). The Palaeoanthropocene – The beginnings of anthropogenic environmental change, *Anthropocene*, 3, 83-88. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2013.11.002>
- Fowler, D., Brimblecombe, P., Burrows, J., (...) Unsworth, M.H., & Vieno, M. (2020). A chronology of global air quality. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 378, 20190314. <http://doi.org/10.1098/rsta.2019.0314>
- Gadikota, G. (2021). Carbon mineralization pathways for carbon capture, storage and utilization.

- Communications Chemistry*, 4(1), 23. <https://doi.org/10.1038%2Fs42004-021-00461-x>
- Ghiat, I., & Al-Ansari, T. (2021). A review of carbon capture and utilisation as a CO₂ abatement opportunity within the EWF nexus. *Journal of CO₂ Utilization*, 45, 101432. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101432>
- Glikson, A. (2013). Fire and human evolution: The deep-time blueprints of the Anthropocene. *Anthropocene*, 3, 89-92. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2014.02.002>
- Global Change, (2022). Population growth. A project of the University of California Museum of Paleontology. <https://ugc.berkeley.edu/background-content/population-growth/>
- Gonzalo, P.A., Benmessaoud, T., Entezami, M., & García Márquez, F.P. (2022). Optimal maintenance management of offshore wind turbines by minimizing the costs, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102230. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102230>
- Hausfather, Z., & Peters, G.P. (2020). Emissions - the 'business as usual' story is misleading. *Nature*, 577(7792), 618–620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>
- Howson, P. (2019). Tackling climate change with blockchain. *Nat. Clim. Chang.* 9, 644–645. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0567-9>
- Hughes, A., Park, A., Kietzmann, J., & Archer-Brown, C. (2019). Beyond Bitcoin: what blockchain and distributed ledger technologies mean for firms. *Business Horizons*, 62(3), 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2019.01.002>
- Iberdrola, (2022). Puertollano Green Hydrogen Plant. <https://www.iberdrola.com/about-us/what-we-do/green-hydrogen/puertollano-green-hydrogen-plant>
- IEA, (2022). Carbon capture, utilisation and storage. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage>

IPCC, (2007). *Summary for Policymakers, in Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, p.17.

IPCC, (2013). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Javid, I., Chauhan, A., Thappa, S., Verma, S.K., Anand, Y., Sawhney, A., Tyagi, V.V., & Anand, S. (2021). Futuristic decentralised clean energy networks in view of inclusive-economic growth and sustainable society. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127304. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127304>

Kaldellis, J.K., & Chrysikos, T. (2019). Wave energy exploitation in the Ionian Sea Hellenic coasts: spatial planning of potential wave power stations. *International Journal of Sustainable Energy*, 38(4), 312-332. <https://doi.org/10.1080/14786451.2018.1539395>

Kargı, B., & Coccia, M. (2024). The developmental routes followed by smartphone technology over time (2008-2018 Period), *Bulletin of Economic Theory and Analysis*, 9(2), 369-395. <https://doi.org/10.25229/beta.1398832>

Kargı, B., Coccia, M., & Uçkaç, B.C. (2023). How does the wealth level of nations affect their COVID19 vaccination plans? *Economics, Management and Sustainability*, 8(2), 6-19. <https://doi.org/10.14254/jems.2023.8-2.1>

Kargı, B., Coccia, M., & Uçkaç, B.C. (2023a). The relation between restriction policies against

- Covid-19, economic growth and mortality rate in society. *Migration Letters*, 20(5), 218-231. <https://doi.org/10.47059/ml.v20i5.3538>
- Kaza, S., Yao, L.C., Bhada-Tata P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development;. Washington, DC: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Khan, M.N., Huang, J., & Shah, A. (...), Zhang, H., & Núñez-Delgado, A. (2022). Mitigation of greenhouse gas emissions from a red acidic soil by using magnesium-modified wheat straw biochar. *Environmental Research*, 203,111879.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111879>
- La Scalia, G., La Fata. C.M., Certa, A., & Micale, R. (2022). A multifunctional plant for a sustainable reuse of marble waste toward circular economy. *Waste Management & Research*. 40(6), 806-813. <https://doi.org/10.1177/0734242X211029161>
- Li, M., Cao, S., Zhu, X., & Xu, Y. (2022). Techno-economic analysis of the transition towards the large-scale hybrid wind-tidal supported coastal zero-energy communities. *Applied Energy*, 316, 119118. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119118>
- Linstone, H.A. (2010). Historians and complexity: trends vs. collapses? *Technological Forecasting and Social Change*, 77(8), 1415-1428.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.07.012>
- Lv, X.-W., Weng, C.-C., & Yuan, Z.-Y. (2020). Ambient Ammonia Electrosynthesis: Current Status, Challenges, and Perspectives. *Chemistry, Sustainability, Energy, Materials*, 13(12), 3061-3078. <https://doi.org/10.1002/cssc.202000670>
- Magdoff, F. (2013). Global resource depletion: Is population the problem? *Monthly Review*, 64(8), 13-28. https://doi.org/10.14452/MR-064-08-2013-01_2

- Magdoff, F., Foster, J.B. (2011). *What Every Environmentalist Needs to Know About Capitalism*. Monthly Review Press, (pp.124-131), New York.
- Marsh, G.P. (1864). *Man and Nature*. Reprinted in 1965. Harvard University Press, Cambridge.
- Meadows, D., Meadows, D. Randers, J., & Behrens III W.W. (1972). *The Limits to Growth; A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books.
- Moritz, J., Tuomisto, H.L., & Ryyänen, T. (2022). The transformative innovation potential of cellular agriculture: Political and policy stakeholders' perceptions of cultured meat in Germany, *Journal of Rural Studies*, 89, 54-65.
<https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.11.018>
- Mosleh, M., Roshani, S., Coccia, M. (2022). Scientific laws of research funding to support citations and diffusion of knowledge in life science. *Scientometrics*, 127, 1931-1951.
<https://doi.org/10.1007/s11192-022-04300-1>
- Moss, R., Edmonds, J., & Hibbard, K. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756.
<https://doi.org/10.1038/nature08823>
- NASA Global climate change, (2022). The Effects of Climate Change.
<https://climate.nasa.gov/effects>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, (2022). Carbon Dioxide Utilization Markets and Infrastructure: Status and Opportunities: A FirstReport. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26703>
- Nemet, G.F. (2006). How well does learning-by-doing explain cost reductions in a carbon-free energy technology?, *FEEM Working Paper*, No.143.06.

<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.946173>

NIST, (2022). NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database

(REFPROP): Version 10. <https://www.nist.gov/srd/refprop>

Nti, K.E., Cobbina, S.J., Attafuah, E.E., Opoku, E., & Gyan, M.A. (2022). Environmental sustainability technologies in biodiversity, energy, transportation and water management using artificial intelligence: A systematic review. *Sustainable Futures*, 4, 100068.

<https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100068>

Oh, H.S. (2020). Unit commitment considering the impact of deep cycling, *Sustainable Futures*, 2, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100031>

Peplow, M. (2022). The race to upcycle CO2 into fuels, concrete and more. *Nature*, 603, 780-783. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00807-y>

Pérez-Carlos J., & Ponce-Carlos J. (2015). Disruption costs, learning by doing, and technology adoption, *International Journal of Industrial Organization*, 41, 64-75.

<https://doi.org/10.1016/j.ijindorg.2015.03.010>

Pronti, A., & Coccia, M. (2020). Multicriteria analysis of the sustainability performance between agroecological and conventional coffee farms in the East Region of Minas Gerais (Brazil). *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(3), 299-306.

<https://doi.org/10.1017/S1742170520000332>

Pronti, A., & Coccia, M. (2021). Agroecological and conventional agricultural systems: comparative analysis of coffee farms in Brazil for sustainable development, *International Journal of Sustainable Development*, 23(3/4), 223-248.

<https://doi.org/10.1504/IJSD.2020.115223>

Resources Magazine, (2022). Carbon Capture and Storage, 101.

<https://www.rff.org/publications/explainers/carbon-capture-and-storage-101/>

Roger, M., Brown, F., & Gabrielli, W. (2018). Efficient hydrogendependent carbon dioxide reduction by *Escherichia coli*. *Current Biology*, 28, 140-145.

<https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.11.050>

Roshani, S., Bagheri, R., Mosleh, M., & Coccia, M. (2021). What is the relationship between research funding and citation-based performance? A comparative analysis between critical disciplines. *Scientometrics*, 126, 7859-7874. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-04077-9>

Roshani, S., Bagheryllooieh, M.-R., Mosleh, M., & Coccia, M. (2021a). What is the relationship between research funding and citation-based performance? A comparative analysis between critical disciplines. *Scientometrics*, 126, 7859-7874.

<https://doi.org/10.1007/s11192-021-04077-9>

Roshani, S., Coccia, M., & Mosleh, M. (2022). Sensor technology for opening new pathways in diagnosis and therapeutics of breast, lung, colorectal and prostate cancer. *HighTech and Innovation Journal*, 3(3), 356-375. <http://dx.doi.org/10.28991/HIJ-2022-03-03-010>

Ruddiman, W.F. (2003). The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago.

Climate Change, 61, 261-293. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000004577.17928.f8>

Saeli, M.I.N., Capela, M., Campisi, T., Seabra, M.P., Tobaldi, D.M., & La Fata, C.M. (2022).

Architectural technologies for life environment: Spent coffee ground reuse in lime-based mortars. A preliminary assessment for innovative green thermo-plasters, *Construction and Building Materials*, 319, 126079. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126079>

Sahal, D. (1981). *Patterns of Technological Innovation*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.: Reading, MA, USA.

- Sanni, M., & Verdolini, E. (2022). Eco-innovation and openness: Mapping the growth trajectories and the knowledge structure of open eco-innovation. *Sustainable Futures*, 4, 100067. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100067>
- Scopus, (2022). Start exploring, search documents.
<https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic>
- Soloveichik, G. (2019). Electrochemical synthesis of ammonia as a potential alternative to the Haber–Bosch process. *Nature Catalysis*, 2, 377–380. <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0280-0>
- Steffen, W., Crutzen, P.J., & McNeill, J.R. (2007). The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature? *AMBIO*, 36, 614-621.
[https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36%5b614:TAAHNO%5d2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36%5b614:TAAHNO%5d2.0.CO;2)
- Steingraber, S. (1997). *Industrial pollution, pesticides, and cancer. Living Downstream. An Ecologist Looks at Cancer and the Environment*. Reading, Addison-Wesley, Massachusetts.
- Sterner, T., & Coria, J. (2012). *Policy Instruments for Environmental and Natural Resource Management*, 2nd ed. RFF Press and Routledge, New York, NY.
- Sterner, T., Jeroen, C.J., & Van Den Bergh, M. (1998). Frontiers of environmental and resource economics, *Environmental and Resource Economics*, 11(3-4), 243-260.
<https://doi.org/10.1023/A:1008236412072>
- Strepparava, D., Nespoli, L., Kapassa, E., (...), Katelaris, L., & Medici, V. (2022). Deployment and analysis of a blockchain-based local energy market. *Energy Reports* 8, 99-113.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.283>
- Sulston, J. (2012). *People and the Planet*, The Royal Society (Britain). <http://royalsociety.org/>

- Tavella, F., Giusi, G., & Ampelli, C. (2022). Nitrogen reduction reaction to ammonia at ambient conditions: A short review analysis of the critical factors limiting electrocatalytic performance. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 35, 100604. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100604>
- Thomson, M.C., & Stanberry, L.R. (2022). Climate change and vectorborne diseases. *New England Journal of Medicine*, 387, 1969-1978. <https://doi.org/10.1056/NEJMra2200092>
- Tollefson, J. (2020). How hot will Earth get by 2100? *Nature*, 580(7804), 443–445. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-01125-x>
- Tracxn, (2022). Top Thermal Energy Storage System Startups. <https://tracxn.com/d/trending-themes/Startups-in-Thermal-Energy-Storage-System>
- Uçkaç, B.C., Coccia, M., & Kargi, B. (2023a). Diffusion COVID-19 in polluted regions: Main role of wind energy for sustainable and health, *International Journal of Membrane Science and Technology*, 10(3), 2755-2767. <https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i3.2286>
- Uçkaç, B.C., Coccia, M., & Kargi, B., (2023). Simultaneous encouraging effects of new technologies for socioeconomic and environmental sustainability. *Bulletin Social-Economic and Humanitarian Research*, 19(21), 100-120. https://doi.org/10.52270/26585561_2023_19_21_100
- Wang, F., Harindintwali, J. D., Yuan, Z., (...) Chen, J.M. (2021). Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality. *Innovation*, 2(4), 100180. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100180>
- Wang, L., Kolios, A., Liu, X., Venetsanos, D., & Rui, C. (2022). Reliability of offshore wind turbine support structures: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 161, 112250. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112250>

- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., & Wood, A.J.T.L., (2019). Food in the anthropocene: the EAT. Lancet Commission on healthy diet from sustainable food systems, *The Lancet*, 393(10170), 447-492.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- Zalasiewicz, J., Williams, M., Haywood, A., & Ellis, M. (2011). The Anthropocene: a new epoch of geological time? *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 369, 835-841.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0339>
- Zhu, Q. (2019). Developments on CO2-utilization technologies, *Clean Energy*, 3(2), 85-100.
<https://doi.org/10.1093/ce/zkz008>