

MAPEAMENTO CIENTÍFICO E TENDÊNCIAS EM CUSTO-BENEFÍCIO DO BIOCHAR: Uma Análise Bibliométrica

ANA PAULA CARVALHO MANDU
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

SILMARA CARVALHO MANDU
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

CAIO HENRIQUE VIEIRA BARBOSA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

JESSICA SANTOS OLIVEIRA ABREU
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

FRANCISVAL DE MELO CARVALHO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

Introdução

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS2), da ONU, busca combater a fome e promover a agricultura sustentável. Desta forma, a utilização do biochar, que é um carvão vegetal, que pode ser feito a partir de resíduos da agricultura, surge como uma alternativa para aumentar a eficiência na produtividade agrícola e contribuir para a sustentabilidade ambiental, em razão da sua capacidade de sequestrar carbono. Assim, este trabalho examina as tendências mundiais da produção intelectual acerca do biochar com recorte em seu custo-benefício.

Problema de Pesquisa e Objetivo

Nesse contexto, o problema desta pesquisa se resume em descobrir: De que maneira a produção científica sobre o biochar tem abordado o custo-benefício da utilização desse produto? O estudo tem como objetivo geral identificar e descrever dados de estudos que tenham tratado do custo-benefício do biochar. Especificamente, procura-se identificar os temas emergentes, a concentração das pesquisas por países e a colaboração entre eles, a produção científica anual, os artigos mais citados globalmente, as redes de autores e as pesquisas mais relevantes sobre o assunto.

Fundamentação Teórica

A evolução nos estudos sobre biochar está relacionada com a sustentabilidade ambiental e com a produtividade agrícola, como constatado em alguns artigos científicos. O estudo de Zheng et al. (2017) demonstrou que, em lavouras de milho, tais fertilizantes elevam a eficiência do nitrogênio e ampliam os benefícios econômicos em até 12%, ao mesmo tempo em que reduzem as emissões de carbono. Ademais, Melo et al. (2022) evidenciaram um aumento médio de 10 a 15% na produtividade agrícola ao empregar fertilizantes compostos com biochar, sobretudo em solos pouco responsivos aos insumos convencionais.

Metodologia

Este estudo emprega uma metodologia quantitativa e de caráter descritivo. Foram coletados artigos científicos sobre biochar na base Web of Science, utilizando palavras-chave específicas: biochar and ("economic analysis" or "cost-benefit" or "economic viability" or "cost-effectiveness" or "financial assessment"). Os dados foram tratados no R com o pacote Bibliometrix, incluindo remoção de duplicatas e análise bibliométrica. A visualização e interpretação dos resultados foram realizadas via Biblioshiny, com foco em coocorrência de palavras-chave e redes de colaboração.

Análise e Discussão dos Resultados

A bibliometria identificou 867 publicações sobre custo-benefício do biochar na Web of Science. A produção científica tem crescido de forma consistente, com destaque para a liderança da China, que concentra o maior volume de estudos, justificado por políticas de neutralidade de carbono até 2060. A análise revelou redes de colaboração internacionais, ainda concentradas no eixo asiático, além de palavras-chave emergentes relacionadas à sustentabilidade, sequestro de carbono e produtividade agrícola, evidenciando relevância crescente do tema.

Considerações Finais

Os resultados apontam que o biochar se alinha diretamente à Agenda 2030, contribuindo para os ODS 2 (fome zero e agricultura sustentável), ODS 12 (consumo e produção responsáveis) e ODS 13 (ação contra a mudança global do clima). Além de benefícios econômicos, sua aplicação favorece a mitigação de emissões e o sequestro de carbono. A liderança chinesa demonstra como políticas públicas impulsionam a pesquisa, mas ainda há espaço para diversificar estudos em outros contextos, ampliando a contribuição global rumo ao desenvolvimento sustentável.

Referências

MELO, L. C. A.; Lehmann, J.; Carneiro, J. S. S.; Camps-Arbestain, M. Biochar-based fertilizer effects on crop productivity: a meta-analysis. *Plant and Soil*, 27 jan. 2022. ONU BRASIL, NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. A Agenda 2030. 2015. Disponível em: Zheng, J.; Han, J.; Liu, Z.; Xia, W.; Zhang, X.; Li, L.; Liu, X.; Bian, R.; Cheng, K.; Zhel, J. Biochar compound fertilizer increases nitrogen productivity and economic benefits but decreases carbon emission of maize production. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 241, p. 70-78, abr. 2017.

Palavras Chave

Sequestro de Carbono, Sustentabilidade Ambiental, Produtividade Agrícola

Agradecimento a órgão de fomento

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG.

MAPEAMENTO CIENTÍFICO E TENDÊNCIAS EM CUSTO-BENEFÍCIO DO BIOCHAR: Uma Análise Bibliométrica

1. INTRODUÇÃO

Em 2015, chefes dos Estados ao redor do mundo se uniram com um fim comum: o Desenvolvimento Sustentável. A Agenda 2030 emerge da preocupação com as mudanças climáticas, com os direitos sociais e humanos, definindo os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) como metas a serem alcançadas pelos países para enfrentar os problemas como fome, seca, desequilíbrio ambiental, desigualdades, entre outros (Nações Unidas, 2015).

Algumas tecnologias podem contribuir para que os ODS venham a ser cumpridos nos países, permitindo que as entidades públicas e privadas cumpram com as exigências que possam ser impostas pelos governos. Um exemplo de tecnologia desenvolvida com esse objetivo é o biochar (um carvão vegetal que pode ser feito a partir de resíduos da agricultura), que possui a capacidade de aumentar a eficiência na produtividade agrícola (ODS2), além de contribuir para a sustentabilidade ambiental (ODS13), em razão da sua capacidade de sequestrar carbono (Ramiro e Pollo, 2025).

O aumento da produtividade em conciliação com a sustentabilidade ambiental é um desafio nas produções agrícolas, pois esse ramo é responsável por degradações ambientais e por mais de 600 milhões de toneladas de emissões de CO₂ e em 2023, o que representou 28% do total das emissões calculadas no contexto do 3º Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antropogênicas de GEE - Gases de Efeito Estufa (Observatório do Clima, 2024). Com isso, o uso do biochar na produção agrícola se mostra um meio para diminuir esse impacto.

O biochar é um produto obtido pela queima controlada (pirólise), em ambiente com nenhuma ou pouca presença de oxigênio, da biomassa (resíduos orgânicos), sendo utilizado, maiormente, para aplicação no solo (Lehmann e Joseph, 2009). Esse produto que é obtido por meio da pirólise impede que a biomassa seja decomposta de forma imediata, evitando emissões de GEE (como o CH₄ e o N₂O), além de ter potencial energético (na substituição do carvão mineral) e capacidade de correção do solo, neste último (quando o biochar é depositado no solo) ele ainda reduz as emissões de GEE que seriam liberadas pelo solo (Woolf et. al. 2010).

O estudo de novas tecnologias para a produção agrícola pode proporcionar uma redução de custos a longo prazo, visto que a produção convencional, apesar de ter custos iniciais menores, pode trazer prejuízos com o passar dos anos. A agricultura convencional, com uso intensivo de máquinas e a mudança no uso do solo favorece a erosão, causando dependência de fertilizantes e corretivos para compensar essa degradação (Hernani, et al, 2002; Bernardi, Machado e Silva, 2002).

Embora o biochar apresente potencial para melhorar o solo e reduzir impactos ambientais, sua adoção ainda esbarra em um desafio central: o elevado custo inicial do insumo. Para muitos produtores, especialmente aqueles com menor escala produtiva, o investimento necessário para produzir ou adquirir biochar supera, com folga, o valor dos insumos convencionais. Os dados de Latawiec et al. (2019) mostram que o custo por hectare do biochar pode ser seis vezes superior ao de fertilizantes tradicionais, mesmo quando se considera que ambos são aplicados apenas uma vez. Nesse cenário, a análise estritamente financeira tende a desfavorecer o biochar, já que a tecnologia exige maior volume de recursos no curto prazo, o que limita sua adoção por produtores que operam com margens estreitas ou baixa disponibilidade de capital.

Diante disso, torna-se essencial compreender como a literatura científica tem abordado a relação entre os custos e os benefícios do uso do biochar, especialmente em termos econômicos. Essa análise é fundamental para embasar políticas públicas, orientar investimentos e fomentar estratégias de incentivo que viabilizem sua adoção. É nesse contexto que se insere

o presente estudo, cujo objetivo é investigar de que maneira a produção científica tem tratado o custo-benefício do biochar

Nesse contexto, o problema desta pesquisa se resume em descobrir: De que maneira a produção científica sobre o biochar tem abordado o custo-benefício da utilização desse produto? O estudo tem como objetivo geral identificar e descrever dados de estudos que tenham tratado do custo-benefício do biochar. Especificamente, procura-se identificar os temas emergentes, a concentração das pesquisas por países e a colaboração entre eles, a produção científica anual, os artigos mais citados globalmente, as redes de autores e as pesquisas mais relevantes sobre o assunto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desenvolvimento sustentável é uma preocupação de muitos atores mundiais. Os 17 ODS e as 169 metas estabelecidas em 2015 foram acordadas para serem cumpridas até 2030 (NAÇÕES UNIDAS, 2015). Neste trabalho, o foco são dois ODS: 2 e 13, pois o produto da biomassa demonstrou ter uma capacidade de nutrição do solo, permitindo melhorar a produção de alimentos, por potencializar a fertilização, além de promover o sequestro de carbono dos resíduos utilizados na sua produção. Assim, em menos de 5 anos para o fim do prazo fixado, faz-se a pergunta: o mundo evoluiu na Agenda? Ou ainda está longe de cumprir suas metas.

Alguns países evoluíram muito desde 2015, como pode ser visto na figura 1, a Dinamarca e alguns países da Europa possuem as maiores pontuações em nível geral, acima de 80 pontos. Em contrapartida, outros países como o Afeganistão e 6 países do continente africano possuem pontuações menores que 50.

Figura 1 - Mapa interativo de pontuação geral da ODS nos países



Fonte: Sustainable Development Solutions Network – SDSN, 2025

O ODS 2 busca, não somente, combater a fome, mas, também, impedir que as crianças desenvolvam algumas deficiências em razão da desnutrição e da falta de acesso das mães, gestantes, à alimentação nutritiva. Além disso, ele visa aumentar a produtividade agrícola dos pequenos produtores e dos agricultores familiares, tendo enfoque, também, em empoderar mulheres que atuam nesse ramo e fortalecer as atividades dos povos indígenas. Essa produção deve, segundo a Agenda, ser sustentável ambientalmente. Para mais, esse objetivo determina que os países tem a meta de investir em tecnologia, pesquisa e extensão que favoreçam esse setor. E por fim, a exportação deve seguir regras justas, que não crie concorrência desleal entre países (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

A figura 2 apresenta o alcance da ODS 2 nos países. É possível observar que nenhum país cumpriu para esse objetivo, o que demonstra a exigência de estudos que aborde temas relativos a tecnologias sustentáveis para a produção agrícola e do custo-benefício deste.

Figura 2 - Mapa interativo do ODS2

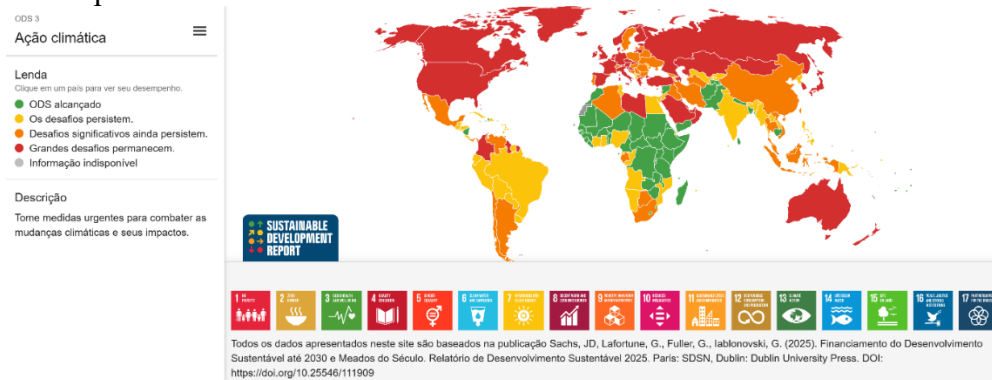


Fonte: Sustainable Development Solutions Network – SDSN, 2025

Outro ODS que envolve este trabalho é o ODS 13, Ação Climática. As metas desse objetivo evidenciam a necessidade de uma resposta abrangente e articulada frente aos desafios climáticos globais, definindo metas para que os países tomem medidas para se adaptar às mudanças climáticas que já ocorreram. Outrossim, estabelece que os países devem desenvolver capacidade de enfrentar catástrofes, integrar a mudança do clima nas suas políticas nacionais, conscientizar e educar a população sobre a importância da preservação do meio ambiente, prevendo, também, que haja investimento nos países em desenvolvimento para este fim, com foco em diminuir as desigualdades das minorias que são mais afetadas com as mudanças climáticas. Somado a isso, os países deveriam destinar, até 2020, recursos para o Fundo Verde, para atender aos países em desenvolvimento nas situações que estão relacionadas às mudanças climáticas (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

O Relatório de Desenvolvimento Sustentável de 2025 expõe a evolução dos países no cumprimento das ODS. A figura 3 exibe o ODS 13, que, como pode ser visto no mapa, muitos países do continente africano atingiram esse objetivo, enquanto, países desenvolvidos como os Estados Unidos da América e Canadá estão em níveis críticos.

Figura 3 – Mapa interativo da ODS 13



Fonte: Sustainable Development Solutions Network – SDSN, 2025

Para compreender de que forma o biochar pode contribuir para o alcance dos ODS apresentados, é necessário definir alguns conceitos fundamentais que sustentam esta pesquisa. Primeiramente, entender o que é biochar, sua origem e para que ele serve é a base deste estudo.

O biochar procede da biomassa (resíduos de materiais orgânicos, como casca de alimentos, lodo de esgoto, serragem) e passa por um processo de pirólise, uma queima em ambiente controlado sem a presença de oxigênio, ou quase ausência total de oxigênio. O biochar é o produto dessa decomposição acelerada desses resíduos (Lehmann e Joseph, 2009).

O biochar tem maior aplicação no solo, devido sua capacidade de aumentar a fertilidade dos solos. Lehmann, Gaunt e Rondon, 2006, consolidaram o termo biochar e já apresentavam os benefícios ambientais que esse produto pode proporcionar. Os autores expuseram alguns estudos e relatórios sobre técnicas para sequestro de carbono (como o reflorestamento), com o intuito de reduzir os problemas ambientais, porém, eles relataram que muitas dessas técnicas podem ter duração curta, pois eles alegam que a mudança no solo já é o suficiente para liberar esse carbono estocado. Assim, eles propõem a técnica de produção do biochar como um método de sequestro de carbono duradouro.

Isso foi confirmado em um método de cálculo do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019) para analisar a duração do carbono no biochar, em que ficou comprovado que a persistência do carbono no biochar pode se prolongar por até 100 anos. O método demonstrou que dependendo da temperatura da pirólise, a porcentagem de carbono mantido nesse tipo de biocarvão pode variar. Em temperaturas acima de 600 °C, o potencial de sequestro é de 89%, enquanto em temperaturas menores entre 350-450 °C, essa capacidade fica em 65%, mas ainda é um percentual relevante.

Além da sustentabilidade ambiental, o biochar aumenta a produtividade agrícola. O estudo de Zheng et al. (2017) demonstrou que, em lavouras de milho, tais fertilizantes elevam a eficiência do nitrogênio e ampliam os benefícios econômicos em até 12%, ao mesmo tempo em que reduzem as emissões de carbono. Ademais, Melo et al. (2022) evidenciaram um aumento médio de 10 a 15% na produtividade agrícola ao empregar fertilizantes compostos com biochar, sobretudo em solos pouco responsivos aos insumos convencionais.

A questão que envolve este trabalho é justamente o custo-benefício do biochar, com um recorte em produção agrícola. O custo do biochar pode ser 600% maior que o do fertilizante comum, como relatado por Latawiec et al, 2019. Esses autores demonstraram que, em 2019, quando o crédito de carbono custava em média 26 dólares, o uso do biochar era economicamente inviável, mas sugeriram que poderia se tornar viável caso o preço do crédito de carbono fosse comercializado entre 53 e 78 dólares. Atualmente, em 24 de novembro de 2025, o crédito de carbono está cotado em 80,66 dólares (dados obtidos em INVESTING.COM, s.d.). Se as demais variáveis permanecessem constantes, esse valor já ultrapassa o patamar de viabilidade indicado pelos autores.

Portanto, com a ascensão do mercado de carbono, além de políticas públicas que promovam incentivos aos produtores rurais para a implementação dessas tecnologias sustentáveis na sua produção, o biochar pode se tornar mais acessível e colaborar para a sustentabilidade ambiental e para o combate à fome, com o aumento de alimentos disponíveis para a população.

A seguir, será abordada a metodologia aplicada neste estudo, cujo foco é apresentar as tendências mundiais acerca do custo-benefício do biochar, aplicando a técnica de análise bibliométrica.

3. METODOLOGIA

Este estudo emprega uma metodologia quantitativa e de caráter descritivo. Utilizou-se a base de dados da Web of Science, em que foi realizada uma busca com as palavras-chave: (*biochar and ("economic analysis" or "cost-benefit" or "economic viability" or "cost-effectiveness" or "financial assessment")*), no campo "Tópico", sem limite temporal, sem limitação de idiomas e sem restrições de tipo de documento, encontrando 867, distribuídos nos anos de 2010 a 2025.

Este trabalho seguiu a linha de Donthu et al. (2021), na qual determina que a pesquisa bibliométrica deve incluir mais de 500 artigos. Assim, optou-se por não inserir mais restrições.

frequentes. Essa ausência revela que, embora existam estudos com enfoque econômico, tal abordagem não constitui eixo central da literatura sobre biochar, permanecendo como um tema periférico, disperso ou tratado de maneira indireta.

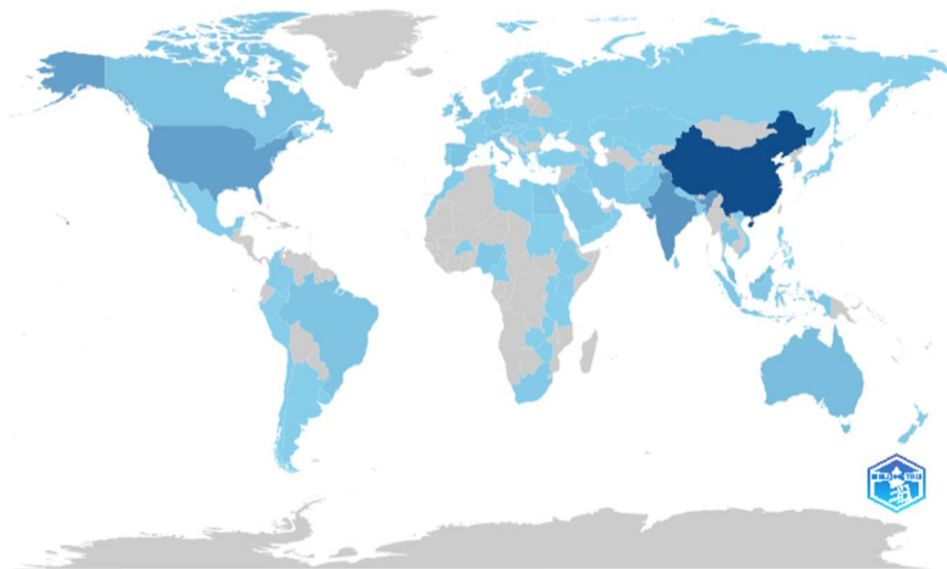
Essa evidência é particularmente relevante para o problema de pesquisa, pois demonstra que a produção científica tende a privilegiar benefícios ambientais e aplicações técnico-operacionais, enquanto a discussão sobre viabilidade financeira, retorno econômico e análise de custos ainda é limitada. Assim, a própria nuvem de palavras confirma uma lacuna importante na literatura, justificando a pertinência do presente trabalho ao destacar um aspecto ainda pouco estruturado no campo.

4.2. Mapa de Colaboração

A figura 5 mostra um mapa mundial de colaboração em pesquisas científicas sobre biochar, com destaque para o custo-benefício. As regiões em azul indicam os países participantes e a intensidade da cor azul reflete o volume de publicações ou colaborações daquele país: quanto mais escura, maior a participação, demonstrando que o continente asiático possui a maior participação nas produções acadêmicas.

A análise demonstrou a China como líder mundial na pesquisa em biochar e custo-benefício. A concentração de estudos nesse país é justificada pelas metas impostas pelo governo chinês de neutralidade de carbono até 2060 (Deng, X. et al. 2024), pois o biochar, como demonstrado pelos autores, tem a capacidade de aumentar o sequestro de carbono quando combinado com outros fatores, como os sumidouros de carbono florestal. Essas metas por neutralidade e por redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) foram estipuladas após o Acordo de Paris, na qual os países se comprometeram, de forma voluntária, a estabelecerem planos para cumprir com os objetivos do Acordo.

Figura 5 - mapa de colaboração (CollabWolrdMap)



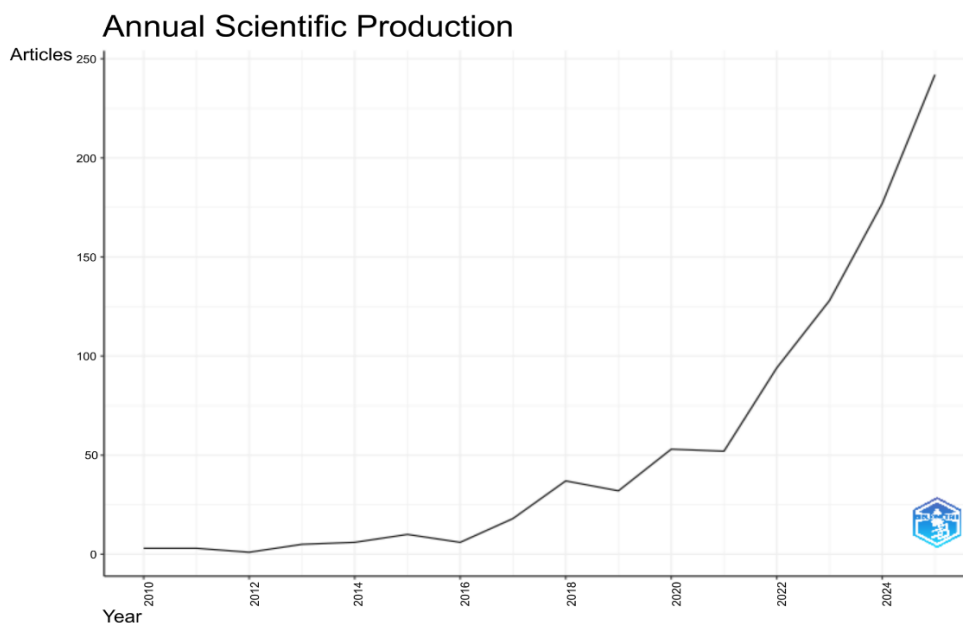
Fonte: Dados extraídos do Biblioshiny, elaborado pelos autores (2025)

A China apresenta desafios persistentes no combate às mudanças climática, como demonstrado na figura 3, entretanto, os resultados das pesquisas em biochar tem sido mais presente neste país, concluindo que há esforços científicos para oferecer soluções tecnológicas para este problema.

4.3. Produção Científica Anual

A análise retornou uma evolução significativa das publicações acerca de biochar e de seu custo-benefício ao longo dos anos. Entre 2021 e 2025, houve um crescimento expressivo nas pesquisas sobre essa temática, passando de cerca de 50 artigos por ano para quase 250 em 2025, o que confirma que esse tema está em ascensão. Esse resultado pode ser visto na figura 6:

Figura 6 - Produção Científica Anual



Fonte: Dados extraídos do Biblioshiny, elaborado pelos autores (2025)

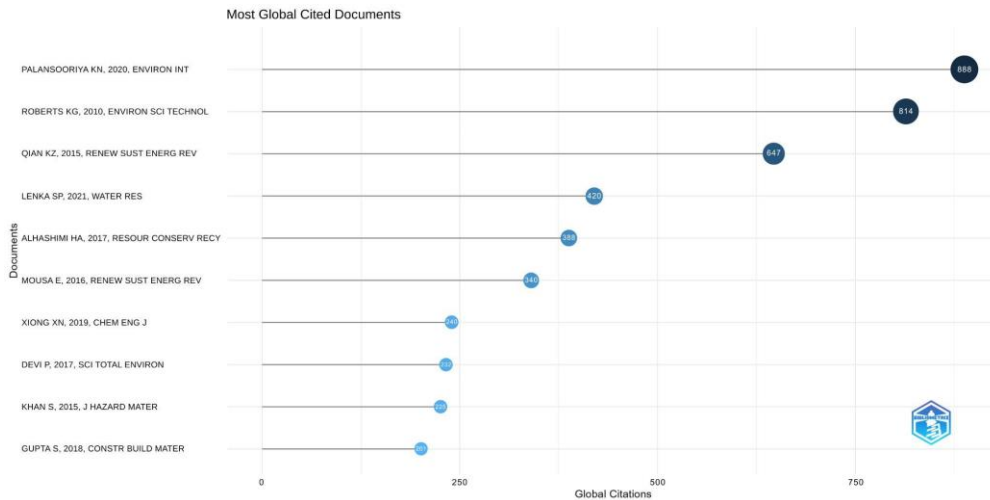
4.4. Artigos Mais Citados Globalmente

A figura 7 apresenta os artigos mais citados globalmente sobre biochar e custo-benefício. O trabalho com mais citações, 888 ao todo, foi o estudo de Palansooriya et al, 2019, que fez uma revisão crítica sobre o uso de aditivos, como o biochar, para correção de solos tóxicos e contaminados. O estudo não tratou do custo-benefício de forma direta, mas apresentou que o uso dessa tecnologia deve ser precedido de uma análise do seu custo efetivo. Os resultados dos estudos apontaram que o biochar contribui para o aumento do pH do solo e para a melhoria da produtividade agrícola, reduzindo a necessidade de fertilizantes minerais, o que pode representar economia de recursos.

O segundo artigo mais citado, com 827 citações, é o estudo de Roberts et al. (2010), que realiza uma avaliação de ciclo de vida (LCA) dos sistemas de produção de biochar, considerando impactos energéticos, emissões de gases de efeito estufa e viabilidade econômica. Diferentemente do trabalho de Palansooriya et al. (2019), este estudo aborda diretamente o custo-benefício do biochar, ao comparar diferentes fontes de biomassa (resíduos agrícolas, resíduos urbanos e culturas energéticas) e calcular os ganhos ambientais e financeiros associados à sua aplicação. Os autores demonstram que o uso de resíduos como matéria-prima, especialmente resíduos de jardim, pode gerar lucro econômico de até US\$ 69 por tonelada de biomassa seca, quando se considera o valor dos créditos de carbono. Além disso, o biochar contribui para a redução de emissões de CO₂ equivalente, melhora a eficiência do uso de fertilizantes e reduz emissões de N₂O no solo, o que reforça seu potencial como tecnologia sustentável e economicamente viável. No entanto, o estudo também alerta que fatores como

distância de transporte da biomassa e mudanças no uso do solo podem comprometer a rentabilidade do sistema, evidenciando que o custo-benefício do biochar depende fortemente do contexto de aplicação.

Figura 7 – Artigos Mais Citados Globalmente



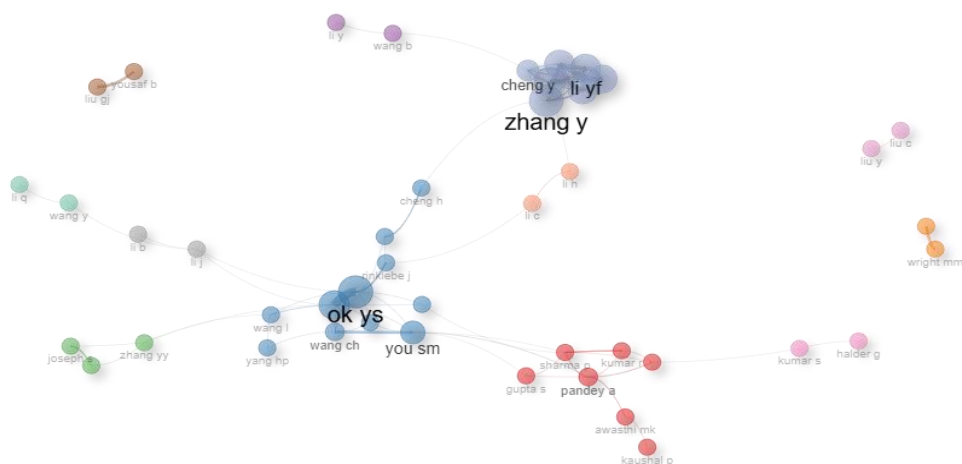
Fonte: Dados extraídos do Biblioshiny, elaborado pelos autores (2025)

4.5. Rede de Autores

A análise da rede de colaboração entre autores revelou dois grandes clusters de pesquisa. O *Cluster 1* é composto majoritariamente por autores como Pandey A, Awasthi MK, Gupta S, Kumar R, Sharma P, Kaushal P e Kumar M, que apresentam conexões entre si, com destaque para Pandey A, que possui o maior valor de *Betweenness* (137.450) dentro do grupo, indicando papel estratégico na mediação entre diferentes autores.

Já o *Cluster 2* concentra os pesquisadores mais influentes da rede, como Ok YS, Tsang DCW e You SM. O autor Ok YS apresenta o maior valor de *Betweenness* (322.920) e de *PageRank* (0.059), o que evidencia sua centralidade e relevância na rede global de pesquisa sobre biochar. Esses autores estão fortemente conectados e atuam em temas relacionados à remediação ambiental, imobilização de elementos tóxicos e sustentabilidade agrícola, conforme identificado nos artigos mais citados da amostra

Figura 8 – Rede de Autores

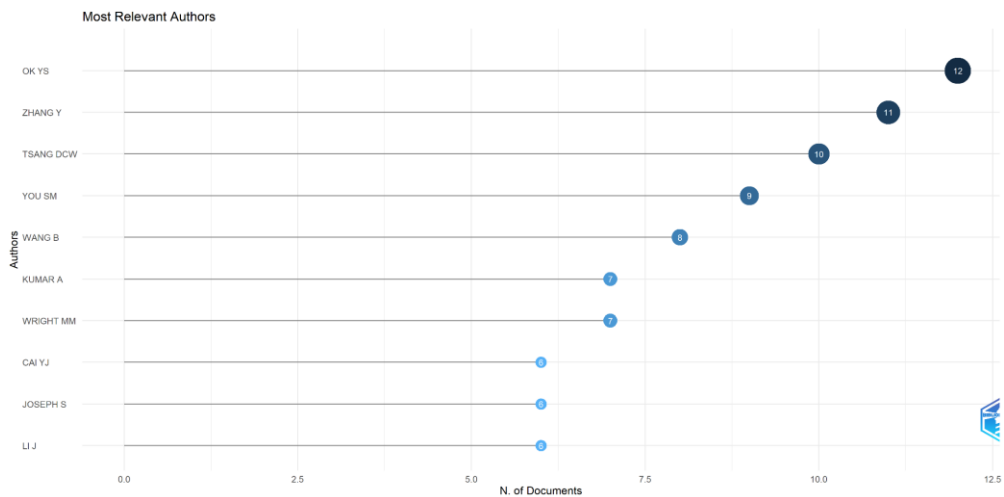


Fonte: Dados extraídos do Biblioshiny, elaborado pelos autores (2025)

4.6. Autores Mais Relevantes

A análise dos autores mais produtivos na temática de biochar com enfoque em custo-benefício revelou que Ok YS lidera em número de publicações, com 12 artigos, seguido por Zhang Y (11 artigos) e Tsang DCW (10 artigos). Esses pesquisadores também apresentam destaque na métrica de contribuição fracionada, que considera o número de coautores por artigo, evidenciando não apenas volume de produção, mas também intensa colaboração científica.

Figura 9 – Autores Mais Relevantes

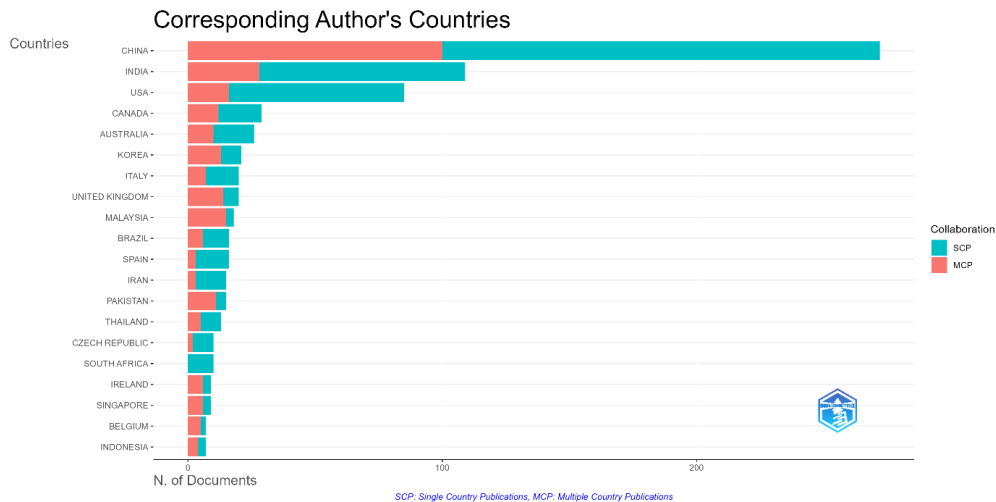


Fonte: Dados extraídos do Biblioshiny, elaborado pelos autores (2025)

4.7. Países dos Autores Correspondentes

A análise da distribuição geográfica dos autores correspondentes (figura 10) revela que a China lidera em número de publicações, seguida por Índia, Estados Unidos e Canadá. Essa predominância indica o forte envolvimento desses países na pesquisa sobre biochar com enfoque em custo-benefício.

Figura 10 – Países do Autores Correspondentes



Fonte: Dados extraídos do Biblioshiny, elaborado pelos autores (2025)

O gráfico também distingue entre publicações de autoria nacional (SCP - Single Country Publications) e colaborações internacionais (MCP - Multiple Country Publications), evidenciando que países como Canadá, Austrália e Reino Unido apresentam maior proporção de colaborações internacionais, o que pode refletir redes de pesquisa mais integradas globalmente. Já países como China e Índia concentram maior número de publicações nacionais, sugerindo forte capacidade de produção científica interna. Essa distribuição reforça o papel da Ásia e da América do Norte como polos estratégicos na geração de conhecimento sobre tecnologias sustentáveis aplicadas à agricultura e ao meio ambiente.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que o biochar desponta como uma tecnologia estratégica para conciliar produtividade agrícola e sustentabilidade ambiental, alinhando-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030. A análise bibliométrica demonstrou que a produção científica sobre o tema tem crescido de forma consistente, com destaque para a liderança da China, impulsionada por políticas de neutralidade de carbono, mas ainda concentrada em determinados contextos geográficos. Apesar dos benefícios comprovados em termos de aumento da produtividade e mitigação das emissões de gases de efeito estufa, o custo inicial elevado permanece como barreira significativa para sua adoção em larga escala, sobretudo por pequenos produtores.

Nesse sentido, observa-se que a literatura privilegia aspectos técnicos e ambientais, enquanto a dimensão econômica ainda é tratada de forma periférica, revelando uma lacuna importante a ser explorada. A valorização do mercado de créditos de carbono e o fortalecimento de políticas públicas de incentivo podem tornar o biochar economicamente viável, ampliando sua aplicação e contribuindo para o combate à fome, a promoção da agricultura sustentável e a ação contra as mudanças climáticas. Portanto, o biochar se apresenta como uma alternativa promissora, cuja plena adoção dependerá da integração entre avanços científicos, mecanismos de financiamento e estratégias de apoio que permitam transformar seu potencial em resultados concretos para o desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

1. BERNARDI, Alberto Carlos de Campos; MACHADO, Pedro Luiz O. de A.; SILVA, Carlos Alberto. **Fertilidade do Solo e Demanda por Nutrientes no Brasil**. In: MANZATTO, C V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J. R. R. (ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. Capítulo 6, p. 61–78.
2. DENG, X. et al. **Exploring negative emission potential of biochar to achieve carbon neutrality goal in China**. *Nature Communications*, v. 15, n. 1, p. 1085, 5 fev. 2024.
3. DONTU, Naveen et al. **How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines**. *Journal of Business Research*, v. 133, p. 285-296, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>.
4. HERNANI, L. C.; FREITAS, P. L.; PRUSKI, F. F.; MARIA, I. C.; CASTRO FILHO, C.; LANDERS, J. N. **A Erosão e seu Impacto**. In: MANZATTO, C V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J. R. R. (ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. Capítulo 5, p. 47–60.

5. INVESTING.COM. Carbon Emissions – Historical Data. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>. Acesso em: 24 nov. 2025.
6. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. **Appendix 4 - Method for Estimating the Change in Mineral Soil Organic Carbon Stocks from Biochar Amendments: Basis for Future Methodological Development**. Kanagawa: IPCC, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>. Acesso em: 24 nov. 2025.
7. LATAWIEC, Agnieszka E. et al. **Biochar amendment improves degraded pasturelands in Brazil: environmental and cost-benefit analysis**. Scientific Reports, [S.l.], v. 9, n. 11993, p. 1–10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47647-x>. Acesso em: 15 nov. 2025.
8. LEHMANN, J., GAUNT, J. AND RONDON, M. **Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review**. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, vol 11, pp395–419, 2006. Disponível em: <https://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/MitAdaptStratGlobChange%2011,%20403-427,%20Lehmann,%202006.pdf>. Acesso em 21 nov. 2025.
9. LEHMANN, J., & JOSEPH, S. (2009). **Biochar for environmental management: An introduction**. Biochar for environmental management. Science and technology. Earthscan Publishers Ltd.
10. MELO, L. C. A.; Lehmann, J; Carneiro, J. S. S.; Camps-Arbestain, M. Biochar-based fertilizer effects on crop productivity: a meta-analysis. Plant and Soil, 27 jan. 2022.
11. NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 14 nov. 2025.
12. OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Nota metodológica do Sistema de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa no Brasil (1970–2023): Agropecuária**. Versão 12. Coordenação técnica: Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola – Imaflo. Dez. 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2025/04/SEEG12-NM-AGROPECUARIA-BR.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2025.
13. PALANSOORIYA, Kumuduni Niroshika et al. **Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: a critical review**. Environment International, v. 134, p. 105046, 2019. ISSN 0160-4120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105046>. Acesso em: 26 nov. 2025.
14. RAMIRO, J., POLLO, M.P. **Biochar: Um Potencial Sustentável para Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas na Agricultura e Pecuária**. CCarbon/USP, 2025. Disponível em: <https://ccarbon.usp.br/pt/biochar-um-potencial-sustentavel-para-mitigacao-e-adaptacao-as-mudancas-climaticas-na-agricultura-e-pecuaria/>. Acesso em: November 13, 2025

15. ROBERTS, Kelli G. et. al. **Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential.** *Environmental Science & Technology*, v. 44, n. 2, p. 827–833, 2010. DOI: 10.1021/es902266r. Acesso em: 26 nov. 2025.
16. SUSTAINABLE DEVELOPMENT SOLUTIONS NETWORK. **Sustainable Development Report 2025 - SDG Index.** 2025. Disponível em: <https://dashboards.sdgindex.org/map/>. Acesso em: 21 nov. 2025.
17. WOOLF, D., AMONETTE, J. E., STREET-PERROTT, F. A., LEHMANN, J., & JOSEPH, S. (2010). **Sustainable biochar to mitigate global climate change.** *Nature communications*, 1(1), 56.
18. Zheng, J.; Han, J.; Liu, Z.; Xia, W.; Zhang, X.; Li, L.; Liu, X.; Bian, R.; Cheng, K.; Zhel, J. Biochar compound fertilizer increases nitrogen productivity and economic benefits but decreases carbon emission of maize production. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 241, p. 70–78, abr. 2017.