

## Panorama das pesquisas envolvendo economia circular na suinocultura

### *Overview of Research on Circular Economy in Pig Farming*

**Gevair Campos**

Universidade de Brasília (UnB). Brasília, DF, Brasil

**Vânia Ferreira Roque-Specht**

Universidade de Brasília (UnB). Brasília, DF, Brasil

**Fabício Oliveira Leitão**

Universidade de Brasília (UnB). Brasília, DF, Brasil

**Pedro Canuto Macedo Sales**

Universidade Federal de Goiás (UFG). Goiânia, GO, Brasil

## GT04 - Meio ambiente, agroecologia, sustentabilidade e mudanças climáticas

**Resumo:** A suinocultura global enfrenta o desafio crítico de conciliar a pujança produtiva com a mitigação de passivos ambientais, impulsionando a transição para a Economia Circular (EC). Este estudo objetivou analisar as tendências da produção científica sobre EC na suinocultura (2016-2025) mediante revisão sistemática (PRISMA) e análise bibliométrica (VOSviewer) nas bases Scopus e Web of Science. A análise de 70 artigos revelou uma inflexão positiva na produtividade acadêmica a partir de 2020, com Brasil, Espanha e China liderando a vanguarda científica. Os resultados confirmam a consolidação da EC como paradigma para a valorização de dejetos em biogás e biofertilizantes. Contudo, evidenciou-se uma assimetria estrutural: as pesquisas concentram-se majoritariamente no elo da produção primária (87%) e na escala micro das fazendas (78,6%), negligenciando os níveis meso e macro. Infere-se que a circularidade no setor ainda opera em "ilhas" operacionais. Para alcançar um modelo regenerativo sistêmico, é imperativo que futuras investigações e políticas públicas integrem os elos de processamento, varejo e consumo, transcendendo os limites físicos das unidades produtoras para fechar integralmente os ciclos biológicos e de valor da cadeia suinícola.

**Palavras-chave:** Economia Circular, Suinocultura, Bioeconomia, Gestão de Resíduos e Análise Bibliométrica.

**Abstract:** Global swine production faces the critical challenge of reconciling productive vigor with the mitigation of environmental liabilities, driving the transition toward the Circular Economy (CE). This study aimed to analyze scientific production trends on CE within the swine industry (2016–2025) through a systematic review (PRISMA) and bibliometric analysis (VOSviewer) using Scopus and Web of Science databases. An analysis of 70 articles revealed a positive inflection in academic productivity from 2020 onwards, with Brazil, Spain, and China leading the scientific vanguard. The results confirm the consolidation of CE as a paradigm for valorizing waste into biogas and biofertilizers. However, a structural asymmetry emerged: research is predominantly concentrated on the primary production link (87%) and at the micro-scale of farms (78.6%), neglecting meso and macro levels. It is inferred that circularity in the sector still operates in operational "islands." To achieve a systemic regenerative model, future investigations and public policies must integrate the processing, retail, and consumption links, transcending the physical boundaries of production units to fully close the biological and value cycles of the swine chain.

**Keywords:** Circular Economy; Swine Production; Bioeconomy; Waste Management; Bibliometric Analysis.

## 1. Introdução

A suinocultura assume um papel primordial na segurança alimentar contemporânea, consolidando-se como a segunda proteína animal mais consumida globalmente. Com uma participação de aproximadamente 35% no suprimento mundial de carnes, a produção anual supera a marca de 110 milhões de toneladas (Cheng *et al.*, 2020a; Zhang *et al.*, 2024). Este dinamismo produtivo concentra-se em polos estruturantes como China, Estados Unidos e

União Europeia, onde o setor está intrinsecamente integrado a cadeias agrícolas complexas (Bertocci & Mannino, 2023; Noya *et al.*, 2017). No contexto europeu, a Espanha lidera o efetivo continental, gerando um volume expressivo de aproximadamente 200.000 m<sup>3</sup> de dejetos diários (Molina-Moreno *et al.*, 2017). Paralelamente, o Brasil apresenta uma cadeia altamente integrada e territorialmente concentrada na região Sul, abrangendo Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Paraná (Hollas *et al.*, 2023; Secco *et al.*, 2020).

Contraditoriamente, o vigor produtivo do setor é acompanhado por vultosos passivos ambientais. Estima-se que a suinocultura seja responsável pela emissão anual de 747 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> e, posicionando-se como a segunda maior fonte de gases de efeito estufa (GEE) no segmento de carnes (Zhang *et al.*, 2024). O manejo negligente de resíduos desencadeia impactos deletérios simultâneos sobre o solo, os recursos hídricos e a atmosfera; a elevada carga de nitrogênio, fósforo, metais pesados e patógenos fomenta processos de eutrofização e contaminação de aquíferos (Molina-Moreno *et al.*, 2017; Secco *et al.*, 2020). Na União Europeia, a gestão deficitária desses efluentes responde por 14,7% das emissões agrícolas, com prevalência de metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (Cheng *et al.*, 2020b; Gislason *et al.*, 2023; Noya *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2024). Somam-se a este quadro a volatilização da amônia (NH<sub>3</sub>) e a persistência de contaminantes emergentes, como genes de resistência antimicrobiana e resíduos hormonais (tetraciclinas e sulfonamidas), cuja remoção é frequentemente ineficaz em sistemas de tratamento convencionais (Møller *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2023; Nagarajan *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2023).

Nesse cenário de urgência ambiental, a Economia Circular (EC) emerge como um paradigma transformador para a gestão de resíduos agroindustriais, fundamentado em princípios restaurativos e regenerativos *by design* (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Geissdoerfer *et al.*, 2017; Ghisellini *et al.*, 2016). O modelo propõe o fechamento de ciclos de materiais e fluxos energéticos, transcendendo a lógica elementar dos "3Rs" para hierarquias mais sofisticadas, como os "9Rs" (Kirchherr *et al.*, 2017; Lieder & Rashid, 2016; Xue *et al.*, 2019). Tal transição pressupõe um engajamento sistêmico entre produtores, consumidores e formuladores de políticas públicas (Kirchherr *et al.*, 2023). Embora estratégias como a digestão anaeróbia, a recuperação de nutrientes e o uso de tecnologias inteligentes demonstrem viabilidade técnica (Bortoli *et al.*, 2022; Gislason *et al.*, 2023; Hollas *et al.*, 2023; Silveira *et al.*, 2021; Gong *et al.*, 2020; Cheng *et al.*, 2020b; Martín-Sanz-Garrido *et al.*, 2025; Bertocci & Mannino, 2023; Liu *et al.*, 2025; Nagarajan *et al.*, 2024; Xue *et al.*, 2019), barreiras culturais e econômicas limitam sua adoção em escala plena (Gislason *et al.*, 2023;

Kirchherr *et al.*, 2018).

Não obstante o incremento no volume de publicações, a literatura acerca da EC na suinocultura permanece fragmentada em nichos tecnológicos isolados, carecendo de uma perspectiva sistêmica da cadeia de valor (Lieder & Rashid, 2016; Secco *et al.*, 2020). Persistem lacunas críticas na compreensão das redes de colaboração científica e na categorização das práticas segundo os níveis operacionais dos "9Rs" (Kirchherr *et al.*, 2017; Secco *et al.*, 2020). Este hiato teórico justifica a realização de uma análise bibliométrica abrangente para mapear padrões, atores e tendências entre 2016 e 2025.

Assim, o presente estudo objetiva analisar as tendências da produção científica sobre Economia Circular na suinocultura no decênio 2016-2025, mediante revisão sistemática e análise bibliométrica nas bases Scopus e Web of Science. A investigação é guiada por duas hipóteses: **H1** — a produção científica apresenta crescimento acelerado a partir de 2020, consolidando a EC como eixo articulador de biogás e digestão anaeróbia (Gislason *et al.*, 2023; Hollas *et al.*, 2023); e **H2** — as pesquisas concentram-se predominantemente no nível micro e na produção primária, com atenção exígua às fases de processamento, varejo e consumo (Gislason *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024). A contribuição desta obra é dual: teoricamente, avalia a maturidade da EC aplicada ao agronegócio suinícola (Silveira *et al.*, 2021); e, no plano pragmático, subsidia agendas de pesquisa em elos subexplorados e apoia a formulação de políticas de sustentabilidade setorial (Bortoli *et al.*, 2022).

## 2. Metodologia

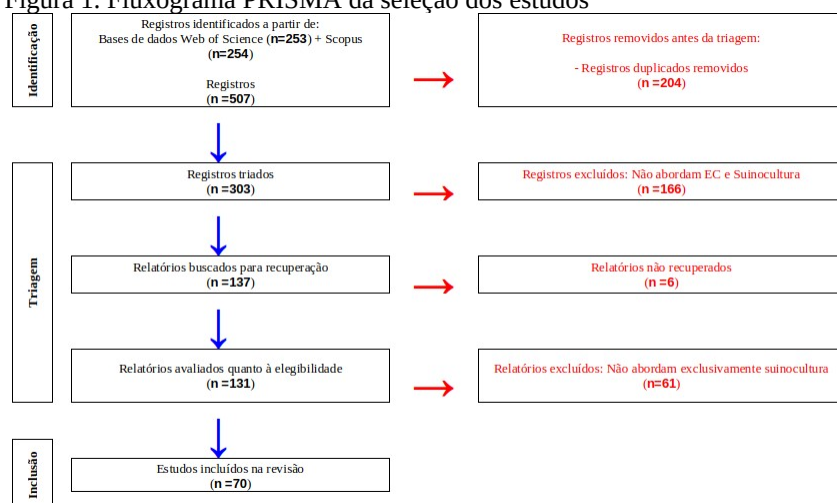
O percurso metodológico desta investigação pauta-se em um delineamento de métodos mistos, integrando a revisão sistemática da literatura à análise bibliométrica. A condução do estudo é orientada pelas diretrizes do protocolo *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA-P 2015). A adoção deste rigor normativo é imperativa para assegurar a transparência e a reprodutibilidade em pesquisas que exploram a complexidade do paradigma da Economia Circular (EC), prática consistente com estudos de referência na área. Estruturalmente, a revisão sistemática provê a síntese qualitativa do conhecimento acumulado, enquanto a bibliometria permite o mapeamento quantitativo das dinâmicas do campo, convergência que operacionaliza o teste das hipóteses H1 (maturação temporal) e H2 (concentração operacional).

O *corpus* documental foi constituído a partir de buscas exaustivas nas bases *Scopus* (Elsevier) e *Web of Science* (Clarivate Analytics). A estratégia de busca envolveu os campos

de título, resumo e palavras-chave (*TITLE-ABS-KEY*), utilizando a combinação booleana: *((“circular economy” OR “circularity”) AND (“pig” OR “pigs” OR “swine” OR “pork”))*. O recorte temporal compreende o intervalo entre janeiro de 2016 e junho de 2025. A escolha do marco inicial justifica-se pela consolidação teórica da EC na literatura internacional naquele período. O busca sistemática, executada em 27 de junho de 2025 e restrita ao tipo "artigo", identificou inicialmente 507 registros (253 na *Web of Science* e 254 na *Scopus*).

Após a remoção de 204 duplicatas, obteve-se um total de 303 registros únicos. A triagem seguiu o fluxograma PRISMA: a leitura de títulos e resumos resultou na exclusão de 166 trabalhos alheios ao escopo. Dos 137 artigos selecionados para leitura integral, 131 foram recuperados; os 6 remanescentes foram descartados após buscas em repositórios e contato com autores. A aplicação dos critérios de elegibilidade culminou na exclusão de 61 manuscritos, consolidando um *corpus* final de 70 artigos.

Figura 1. Fluxograma PRISMA da seleção dos estudos



Fonte: Adaptado de PRISMA. PRISMA Statement. Available online: <http://www.prisma-statement.org/>

Os critérios de inclusão contemplaram artigos originais ou de revisão, em inglês, português ou espanhol, que abordassem práticas de EC na cadeia suinícola. Foram excluídos estudos sem foco setorial específico, análises multiespécies sem desagregação ou trabalhos estritamente conceituais desprovidos de aplicação empírica. A classificação foi realizada por avaliador único, com casos limítrofes resolvidos mediante consenso.

O processamento analítico desdobrou-se em duas vertentes. A primeira, bibliométrica, utilizou o *software VOSviewer* para mapear redes de coautoria e coocorrência de termos, focando na tríade "circular economy", "anaerobic digestion" e "biogas" para responder à H1. A segunda vertente, qualitativo-categórica, classificou cada manuscrito em cinco dimensões

fundamentadas em marcos teóricos de referência, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1. Categorias de análise, subcategorias e referencial teórico.

| Categoria                 | Itens (Subcategorias)                                                                                                                                                                                                                             | Referências Principais                                                                                                                                               |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A. Tipo de Resíduos       | <b>A1:</b> Dejetos de suínos (esterco, chorume e efluentes)<br><b>A2:</b> Águas residuais (higienização e desperdício)<br><b>A3:</b> Subprodutos da Digestão Anaeróbia (Digestato)<br><b>A4:</b> Outros resíduos orgânicos (carcaças e placentas) | Yost <i>et al.</i> (2022); Silva <i>et al.</i> (2025); Cardoso <i>et al.</i> (2015); Zhou <i>et al.</i> (2024); Wu <i>et al.</i> (2023); Pinto <i>et al.</i> (2022). |
| B. Localização Geográfica | <b>B1:</b> Europa; <b>B2:</b> América; <b>B3:</b> África; <b>B4:</b> Ásia; <b>B5:</b> Oceania; <b>B6:</b> Misto; <b>B7:</b> Mundial; <b>B8:</b> Nenhum (estudos conceituais)                                                                      | Esposito <i>et al.</i> (2020); Bisogno <i>et al.</i> (2018); Manes-Rossi <i>et al.</i> (2020).                                                                       |
| C. Métodos de Pesquisa    | <b>C1:</b> Estudo de Caso / Campo / Entrevistas; <b>C2:</b> Survey / Questionário / Outros empíricos; <b>C3:</b> Comentário / Normativo / Política; <b>C4:</b> Análise de conteúdo / Análise histórica                                            | Esposito <i>et al.</i> (2020); Bisogno <i>et al.</i> (2018).                                                                                                         |
| D. Cadeia de Suprimentos  | <b>D1:</b> Produção (Primária); <b>D2:</b> Processamento (Indústria); <b>D3:</b> Varejo (Distribuição); <b>D4:</b> Consumo                                                                                                                        | Esposito <i>et al.</i> (2020).                                                                                                                                       |
| E. Níveis de Aplicação    | <b>E1:</b> Micro (Fazendas e unidades produtivas individuais); <b>E2:</b> Meso (Cooperativas, redes locais e municípios); <b>E3:</b> Macro (Setores nacionais e políticas internacionais)                                                         | Ghisellini <i>et al.</i> (2016); Kirchherr <i>et al.</i> (2017); Esposito <i>et al.</i> (2020).                                                                      |

Fonte: Elaboração própria.

Como limitações, reconhece-se que a restrição às bases *Scopus* e *Web of Science* pode excluir produções relevantes indexadas em outras plataformas, como *Google Scholar* ou bases regionais. A limitação ao tipo documental "artigo" exclui livros, capítulos e relatórios técnicos. Adicionalmente, a classificação por avaliador único, ainda que com protocolo explícito, introduz risco de viés interpretativo nas categorias de análise.

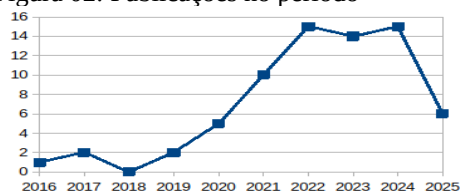
4. Discussão dos Resultados

Nesta seção, procede-se a uma análise pormenorizada das estratégias de Economia Circular (EC) aplicadas à suinocultura, categorizando-as segundo a tipologia de resíduos, os níveis de implementação e a estrutura da cadeia de suprimentos. Para além da mera descrição estatística dos dados, busca-se examinar as redes de coautoria, as afiliações institucionais, a abrangência geográfica e a recorrência de palavras-chave, proporcionando uma perspectiva sistêmica das colaborações e das tendências que emergem na fronteira do conhecimento. O objetivo central é compreender como a ciência está moldando a transição de um setor historicamente pressionado por passivos ambientais para um modelo de bioeconomia circular resiliente e regenerativo.

#### 4.1 Evolução temporal das publicações e redes de colaboração

A trajetória da produção científica no decênio 2016-2025, ilustrada na Figura 02, revela mais do que um simples incremento volumétrico; ela desenha a curva de amadurecimento de um campo estratégico. No início do recorte, o tema era tratado como uma extensão acessória do tratamento de efluentes. Contudo, a análise demonstra uma transição para um paradigma unificador de gestão de recursos.

Figura 02: Publicações no período

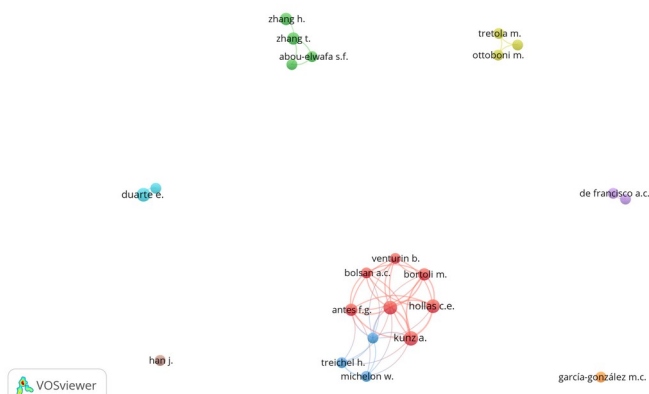


Fonte: Dados da pesquisa.

A partir de 2020, verifica-se uma inflexão positiva marcante com o registro de cinco publicações, tendência que se intensificou em 2021, com dez estudos contabilizados. O ápice da produtividade ocorreu entre 2022 e 2024, período em que se registraram 15, 14 e 15 publicações, respectivamente. Este padrão de distribuição temporal ratifica a consolidação da EC na suinocultura como um campo dinâmico. O salto produtivo sugere que a crise sanitária global e o fortalecimento de agendas como o *European Green Deal* e as métricas ESG atuaram como catalisadores para pesquisas em resiliência agroindustrial.

As análises descritivas das redes de autores e organizações elucidam os padrões de cooperação. A configuração das redes de coautoria (Figura 03) identifica pesquisadores que atendem ao critério de produtividade mínima. A representação gráfica permite analisar a densidade das interconexões científicas.

Figura 03: Redes de coautoria



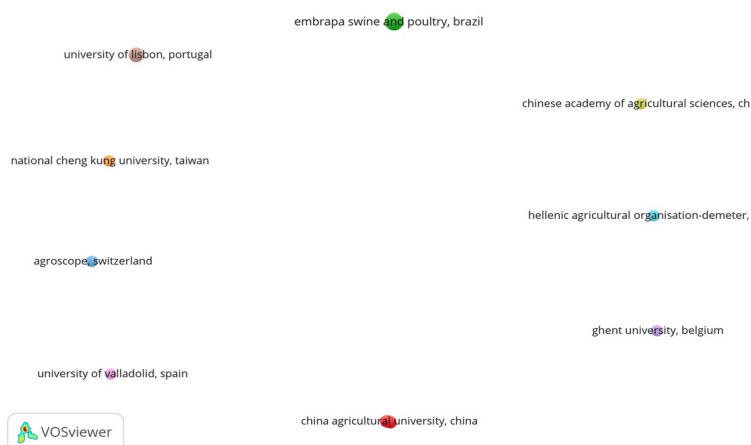
Fonte: Dados da pesquisa.

No que tange à centralidade, observa-se que o pesquisador Kunz A. detém a maior

relevância estrutural, acumulando cinco documentos e a força de conexão total mais elevada (índice 22). Tal posicionamento o caracteriza como um nó articulador fundamental, evidenciando parcerias frequentes e consolidadas. Adicionalmente, verifica-se a produção relevante de Duarte E. e Hollas C.E., seguidos por autores como Antes F.G., Bolsan A.C., Bortoli M., Steinmetz R.L.R., Zhang H. e Zhang T. A proximidade entre os nós reflete uma cooperação técnica intensa, embora persista a fragmentação de subgrupos que operam de forma isolada, indicando que a integração sistêmica da rede permanece concentrada em polos delimitados.

A configuração das redes institucionais (Figura 04) evidencia um cenário de pesquisa caracterizado pela fragmentação estrutural.

Figura 04: Redes de instituições

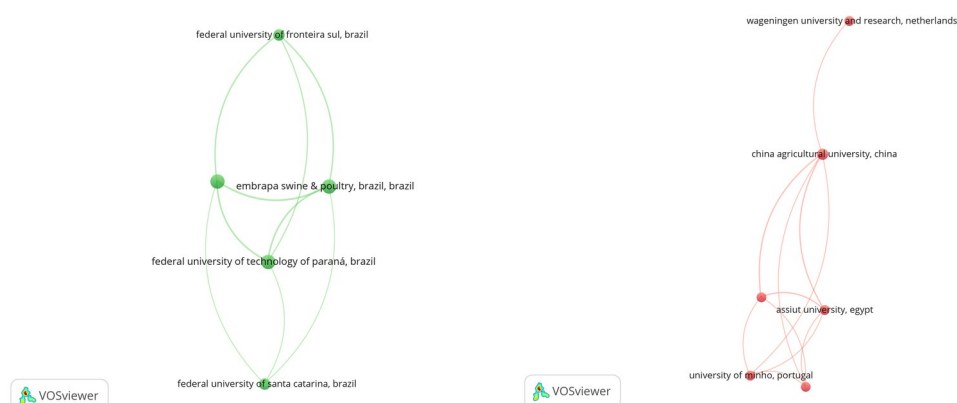


Fonte: Dados da pesquisa.

As organizações operam frequentemente como núcleos autônomos. A visualização revela a inexistência de enlaces de coautoria entre muitas instituições listadas, sugerindo que a produção acadêmica no setor está concentrada em esforços institucionais independentes. Todavia, a distribuição demonstra um caráter global, com centros de referência como a *Embrapa Swine and Poultry*, a *China Agricultural University* e universidades europeias (Lisboa e Gent). A carência de vínculos representa uma oportunidade estratégica para futuras colaborações internacionais.

A Figura 05 demonstra a proeminência brasileira, com destaque para a Embrapa, Unioeste e UTFPR. Essa simetria produtiva reflete uma base acadêmica consolidada, representada pelo agrupamento de cor verde.

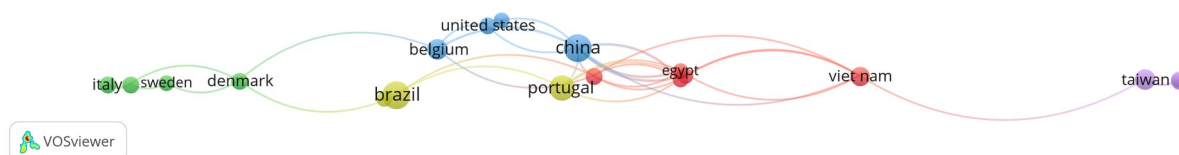
Figura 05: Principais redes institucionais



Fonte: Dados da pesquisa.

Simultaneamente, o agrupamento vermelho caracteriza uma coopera  o transcontinental, integrando institui  es da Ásia, Europa e África. A análise via software *VOSviewer* ratifica que o campo    sustentado pela coexistência de núcleos locais densos e alianças internacionais. Enquanto o *cluster* verde reforça a solidez brasileira, o *cluster* vermelho revela a internacionaliza  o das frentes de pesquisa. A rede de colabora  o entre países (Figura 06) confirma o protagonismo de Brasil e China (12 documentos cada) e Portugal (9 publica  es).

Figura 06: Redes colabora  o entre países



Fonte: Dados da pesquisa.

A configura  o revela um agrupamento central densamente interconectado. Esse intercâmbio transfronteiriço sugere que o progresso na área está condicionado a uma diplomacia científica robusta. Por fim, a rede de palavras-chave (Figura 07) delinea o panorama intelectual.

O conceito de *circular economy* atua como o eixo gravitacional desta rede. Sua proeminência confirma que a pesquisa científica está focada na reconfigura  o dos resíduos de passivos ambientais para ativos econ  micos. Adjacentes a este núcleo, os termos *biogas* e *anaerobic digestion* emergem como as tecnologias mestras para essa conversão. A rede divide-se em sete agrupamentos temáticos: o *cluster* azul-claro atua na media  o das frentes de pesquisa; o laranja foca na produ  o de biogás; e o azul-escuro aborda a gestão operacional de *pig slurry* e *pig manure*.



Fonte: Dados da pesquisa.

Essa predominância deriva da magnitude do impacto ambiental intrínseco. Os dejetos configuram o passivo ambiental mais crítico devido à elevada concentração de matéria orgânica e nutrientes (Cheng *et al.*, 2020b; Noya *et al.*, 2017; Cardoso *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2024). Observa-se, contudo, uma transição paradigmática para a recuperação de recursos, tendência evidenciada pela recorrência de estudos sobre águas residuais (A2) e digestato (A3). Segundo Wu *et al.* (2023), a extração de energia e nutrientes de efluentes líquidos é uma estratégia essencial de sustentabilidade.

A associação entre dejetos e outros resíduos orgânicos (A1, A4) em dez ocorrências sinaliza o interesse na codigestão anaeróbia. Esta prática otimiza a produção de biogás ao ajustar a relação carbono/nitrogênio (Mazareli *et al.*, 2016; Molinuevo-Salces *et al.*, 2012). A circularidade manifesta-se também na otimização de insumos a montante (*upstream*). Investigações conduzidas por Ferrer *et al.* (2022) e Paie-Ribeiro *et al.* (2025) avaliaram a incorporação de subprodutos industriais (cítricos e azeite) na dieta animal, demonstrando a integração da suinocultura em sistemas de simbiose industrial (Pinto *et al.*, 2022). O emprego de aditivos, como o *biochar*, visa o incremento qualitativo do biogás (Silva *et al.*, 2025). Embora o digestato (A3) apresente menor frequência individual, seu potencial agrônomo como substituto de fertilizantes minerais é amplamente documentado, apesar das exigências de monitoramento sanitário (Yost *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2023).

#### 4.4 Distribuição geográfica da produção científica

A dispersão geográfica, consolidada na Tabela 02, revela a hegemonia europeia (B1) com 46% da amostra, seguida pelas regiões asiática (B4) e americana (B2).

Tabela 02: País de Pesquisas

| Categoria País de Realização da Pesquisa (B) | Frequência |
|----------------------------------------------|------------|
| B1: Europa                                   | 32         |
| B4: Ásia                                     | 20         |
| B2: América                                  | 15         |
| B3: África                                   | 1          |
| B8: Nenhum                                   | 2          |

Fonte: Dados da pesquisa.

Esta predominância decorre da maturidade de marcos regulatórios europeus e da atuação de entidades como a Fundação Ellen MacArthur (Bisogno *et al.*, 2018; Esposito *et al.*, 2020). No âmbito nacional, a Espanha e o Brasil lideram, seguidos pela China. A relevância ibérica corrobora a tese de Manes-Rossi *et al.* (2020) sobre a investigação da sustentabilidade

em setores tradicionais. Na China, a produção é impulsionada pela Lei de Promoção da Economia Circular e imperativos de segurança alimentar (Su *et al.*, 2013).

O Brasil consolida sua importância estratégica ao ocupar a segunda posição mundial. Este desempenho reflete a necessidade de compatibilizar o status de grande exportador com a mitigação de impactos em polos densos (Sul do país). Instituições como a Embrapa e universidades federais configuram-se como centros de excelência. Segundo Esposito *et al.* (2020), a transição em economias emergentes (Brasil/China) é motivada pela busca por eficiência de recursos, distinguindo-se da motivação regulatória europeia. A distribuição espacial dos trabalhos por país contribuinte é apresentada na Figura 08.

Figura 08: Distribuição geográfica dos trabalhos por país contribuintes com estudos analisados



Fonte: Adaptado de Google My Maps com dados da pesquisa.

A participação residual da África e a ausência de outras regiões em desenvolvimento evidenciam uma assimetria na distribuição do conhecimento. A centralização em grandes potências agrícolas limita a compreensão do paradigma circular em contextos de menor infraestrutura técnica (Bisogno *et al.*, 2018).

#### 4.5 Abordagens metodológicas de pesquisa

A análise dos procedimentos metodológicos (Tabela 03) evidencia uma convergência com as tendências globais. Constata-se a hegemonia de abordagens empíricas (C2), representando 83% da produção científica.

Tabela 03: Métodos de Pesquisas

| Categoria Métodos de Pesquisa (C)              | Frequência |
|------------------------------------------------|------------|
| C2: Pesquisa/Questionário/Outros empíricos     | 58         |
| C1: Estudo de Caso/Estudo de Campo/Entrevistas | 7          |
| C4: Análise de conteúdo/Análise histórica      | 3          |
| C3: Comentário/Normativo/Política              | 1          |
| C5: Misto (C2, C3)                             | 1          |

Fonte: Dados da pesquisa.

Este cenário ratifica o caráter aplicado da investigação, priorizando a experimentação técnica para a validação de soluções operacionais. Segundo Bisogno *et al.* (2018), tal prevalência indica que o campo se encontra em um estágio de busca de evidências práticas. O Estudo de Caso (C1) figura como a segunda metodologia mais recorrente, reforçando a inclinação pela investigação de fenômenos em contextos reais.

A escassa frequência de métodos qualitativos (C4) e estudos normativos (C3) revela uma lacuna na reflexão teórica e regulatória. A transição para a EC requer, além de avanços técnicos, uma análise crítica das políticas públicas e dos modelos de governança (Esposito *et al.*, 2020). A incipiente utilização de métodos mistos sugere que o campo permanece dominado por uma visão tecnicista. O engajamento de *stakeholders* e a análise de atitudes coletivas são imperativos para a viabilização do paradigma circular, demandando metodologias que integrem desempenho técnico a análises comportamentais.

#### 4.6 Local de aplicação dos estudos na cadeia de suprimentos

A distribuição ao longo dos elos da cadeia de suprimentos revela um padrão de concentração em consonância com a literatura internacional. Os dados evidenciam uma predominância expressiva na "Produção" (D1), com 61 ocorrências isoladas (Tabela 04).

Tabela 04: Local de aplicação dos estudos na cadeia de suprimentos

| Categoria Supply Chain (D)      | Frequência |
|---------------------------------|------------|
| D1: Produção                    | 61         |
| D2: Processamento               | 4          |
| D1: Produção, D2: Processamento | 4          |
| D1: Produção, D4: Consumo       | 1          |

Fonte: Dados da pesquisa.

O foco acadêmico reside primordialmente na fase primária, onde a geração de resíduos é crítica. Esta focalização corrobora as evidências de Esposito *et al.* (2020), que apontam que o setor agroalimentar prioriza intervenções no estágio inicial para mitigar riscos ambientais. Em contrapartida, as atividades de "Processamento" (D2) foram abordadas de forma limitada, denotando um campo incipiente no aproveitamento de subprodutos industriais.

Identifica-se uma lacuna crítica referente às etapas de "Varejo" (D3) e "Consumo" (D4). Esta invisibilidade diverge das proposições de elos fundamentais para a eficácia circular (Esposito *et al.*, 2020). A negligência em relação a esses elos terminais obstaculiza o fechamento integral dos ciclos, dado que a logística reversa e o comportamento do consumidor são determinantes para a sustentabilidade (Kirchherr *et al.*, 2017). Os dados ilustram que a pesquisa opera sob uma lógica fragmentada, centrada "dentro da porteira".

#### 4.7 Níveis de implementação da circularidade

A análise dos níveis de aplicação (Tabela 05) evidencia uma concentração preponderante no nível micro. Este patamar, que compreende unidades individuais, totaliza 78,6% da amostra.

Tabela 05: Níveis de aplicação da circularidade

| Categoria Níveis De Aplicação (E) | Frequência |
|-----------------------------------|------------|
| E1: Micro                         | 55         |
| E2: Meso                          | 10         |
| E3: Macro                         | 5          |

Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados sugerem que a circularidade no setor é interpretada como ferramenta de otimização operacional local (Kirchherr *et al.*, 2017). Relativamente ao nível meso, cooperação regional e simbiose industrial, registrou-se uma frequência reduzida (10 estudos). Este cenário denota uma lacuna na articulação entre setores para o fechamento de ciclos em escala territorial. Segundo Ghisellini *et al.* (2016), o nível meso é essencial para converter subprodutos em insumos intersetoriais.

No âmbito macro (políticas globais), verificou-se a menor frequência. Essa escassez indica que, embora as tecnologias sejam validadas nas fazendas, ainda faltam incentivos institucionais sistêmicos. Esposito *et al.* (2020) ressaltam que a transição exige coordenação que transcenda os limites individuais. A distribuição, concentrada no micro, moderada no meso e incipiente no macro, confirma a percepção de circularidade centrada na gestão "fim-de-tubo" no ambiente produtivo.

#### 4.8 Teste e Validação das Hipóteses

A validação das hipóteses fundamentou-se no cruzamento analítico entre indicadores bibliométricos e a síntese qualitativa. A primeira hipótese (H1), que postulava um crescimento acelerado da produção científica a partir de 2020, com a EC atuando como eixo articulador, foi ratificada de modo contundente.

Tabela 05: Níveis de aplicação da circularidade

| Hipótese | Proposição Central                                       | Status            | Evidência Principal                                                                    |
|----------|----------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| H1       | Crescimento pós-2020 e EC como eixo para biogás/dejetos. | <b>Confirmada</b> | Salto produtivo (2022-2024) e "Circular Economy" como <i>hub</i> central no VOSviewer. |
| H2       | Concentração no nível Micro e na Produção Primária (D1). | <b>Confirmada</b> | 87% de foco no elo D1 e 78,6% de concentração na escala individual (fazendas).         |

Fonte: Dados da pesquisa.

Conforme a Figura 02, o volume de publicações ascendeu para picos anuais em 2022 e 2024. A análise de coocorrência (Figura 07) validou a função central do termo *circular*

*economy* como principal *hub* da rede, conectando *biogas* e *anaerobic digestion*. Esse fenômeno consolida a transição para o paradigma da valorização de recursos.

A segunda hipótese (H2) sugeria a concentração no nível micro e na produção primária. Esta proposição foi igualmente confirmada: 87% dos estudos focalizaram a etapa de produção e 78,6% operaram na escala micro. Os resultados ilustram que a circularidade ainda é percebida como ferramenta para o manejo de passivos na origem (Hollas *et al.*, 2023; Secco *et al.*, 2020). Depreende-se que, embora o campo esteja em expansão, a aplicação permanece restrita a "ilhas de circularidade". Para que o setor se consolide como um modelo regenerativo, é imperativo que futuras pesquisas explorem a integração entre os diversos elos da cadeia de valor, transcendendo o tratamento isolado nos limites das unidades produtivas.

## 5. Considerações finais

As evidências consolidadas nesta investigação revelam que a economia circular na suinocultura deixou de ser apenas uma aspiração teórica para se tornar um imperativo estratégico e operacional. Os achados ratificam que, embora a produção científica tenha experimentado um crescimento exponencial a partir de 2020, a aplicação do conceito ainda se encontra em um estágio de amadurecimento técnico concentrado. O protagonismo de nações como Brasil, Espanha e China demonstra que o setor obteve êxito ao converter o manejo de dejetos e a biodigestão em pilares de valorização de recursos. Contudo, essa circularidade permanece majoritariamente restrita ao nível micro e ao elo da produção primária, operando como soluções isoladas dentro das unidades produtivas e negligenciando a integração sistêmica necessária para uma bioeconomia de larga escala.

As limitações deste estudo residem na marcante assimetria geográfica da literatura, com escassa produção em regiões em desenvolvimento fora dos grandes polos exportadores, e na predominância de abordagens metodológicas estritamente tecnicistas. Essa visão muitas vezes ignora dimensões cruciais de governança, políticas públicas e o comportamento dos atores sociais. Para o avanço da área, as agendas futuras de pesquisa devem romper as barreiras das fazendas e investigar os elos de processamento, varejo e consumo. É imperativo explorar modelos de simbiose industrial e mecanismos de incentivo que permitam à suinocultura transcender a simples gestão de passivos, consolidando-se como um modelo de negócio genuinamente regenerativo, seguro e resiliente aos desafios globais.

## Referências

ABDELMEGUID, A.; AFY-SHARARAH, M.; SALONITIS, K. Investigating the challenges of applying the principles of the circular economy in the fashion industry: a systematic review. *Sustainable Production and Consumption*, v. 32, p. 505-518, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.009>.

ALJABER, A.; MARTINEZ-VAZQUEZ, P.; BANIOTOPOULOS, C. Barriers and enablers to the adoption of circular economy concept in the building sector: a systematic literature review. *Buildings*, v. 13, p. 2778, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13112778>.

BERTOCCI, F.; MANNINO, R. Pearls before swine: plant-derived wastes to produce low-cholesterol meat from farmed pigs — a bibliometric analysis combined to meta-analytic studies. *Foods*, v. 12, n. 3, p. 571, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12030571>.

BISOGNO, M.; DUMAY, J.; ROSSI, F. M.; POLCINI, P. T. Identifying future directions for IC research in education: a literature review. *Journal of Intellectual Capital*, v. 19, n. 1, p. 10-33, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1108/JIC-10-2017-0133>.

BOLOY, R. A. M.; REIS, A. da C.; RIOS, E. M.; MARTINS, J. d. A. S.; SOARES, L. O.; SÁ MACHADO, V. A. de; MORAES, D. R. de. Waste-to-energy technologies towards circular economy: a systematic literature review and bibliometric analysis. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 232, p. 306, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05224-x>.

BORTOLI, M.; HOLLAS, C. E.; CUNHA JR., A.; STEINMETZ, R. L. R.; COLDEBELLA, A.; PRÁ, M. C. de; SOARES, H. M.; KUNZ, A. Water reuse as a strategy for mitigating atmospheric emissions and protecting water resources for the circularity of the swine production chain. *Journal of Cleaner Production*, v. 345, p. 131127, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131127>.

CARDOSO, B. F.; OYAMADA, G. C.; SILVA, C. M. Produção, tratamento e uso dos dejetos suínos no Brasil. *Desenvolvimento em Questão*, v. 13, n. 32, p. 127-145, 2015.

CHEN, N.; ZHANG, X.; DU, Q.; HUO, J.; WANG, H.; WANG, Z.; GUO, W.; NGO, H. H. Advancements in swine wastewater treatment: removal mechanisms, influential factors, and optimization strategies. *Journal of Water Process Engineering*, v. 54, p. 103986, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103986>.

CHENG, H.-H.; NARINDRI, B.; CHU, H.; WHANG, L.-M. Recent advancement on biological technologies and strategies for resource recovery from swine wastewater. *Bioresource Technology*, v. 303, p. 122861, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122861>.

CHENG, D. L.; NGO, H. H.; GUO, W. S.; CHANG, S. W.; NGUYEN, D. D.; KUMAR, S. M. Microalgae biomass from swine wastewater and its conversion to bioenergy. *Bioresource Technology*, v. 275, p. 109-122, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.019>.

DI VAIO, A.; HASAN, S.; PALLADINO, R.; HASSAN, R. The transition towards circular economy and waste within accounting and accountability models: a systematic literature review and conceptual framework. *Environment, Development and Sustainability*, v. 25, p. 734-810, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02078-5>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards the circular economy: economic and business rationale for an accelerated transition. [S. l.]: Ellen MacArthur Foundation, 2013. v. 1. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/>. Acesso em: 27 jun. 2025.

ESPOSITO, B.; SESSA, M. R.; SICA, D.; MALANDRINO, O. Towards circular economy in the agri-food sector: a systematic literature review. *Sustainability*, v. 12, n. 18, p. 7401, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12187401>.

FERRER, P.; CALVET, S.; GARCÍA-REBOLLAR, P.; JIMÉNEZ-BELENQUER, A. I.; HERNÁNDEZ, P.; PIQUER, O.; CERISUELO, A. The impact of replacing barley by dehydrated orange pulp in finishing pig diets on performance, carcass quality, and gaseous emissions from slurry. *Animal*, v. 16, p. 100659, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100659>.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The circular economy: a new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 757-768, 2017.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 114, p. 11-32, 2016.

GISLASON, S.; BIRKVED, M.; MARESCA, A. A systematic literature review of life cycle assessments on primary pig production: impacts, comparisons, and mitigation areas. *Sustainable Production and Consumption*, v. 42, p. 44-62, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.09.005>.

GONG, X.; JI, Y.; YUE, Z.; CHEN, H.; CHEN, Y.; TANG, H.; LIU, T. Exploration of a new model of pig circular economy breeding under intelligent agriculture. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1622, n. 1, p. 012070, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1622/1/012070>.

HOLLAS, C. E.; RODRIGUES, H. C.; BOLSAN, A. C.; VENTURIN, B.; BORTOLI, M.; ANTES, F. G.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. Swine manure treatment technologies as drivers for circular economy in agribusiness: a techno-economic and life cycle assessment approach. *Science of the Total Environment*, v. 857, p. 159494, 2023.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 127, p. 221-232, 2017.

KIRCHHERR, J.; PISCICELLI, L.; BOUR, R.; HUIBRECHTSE-TRUIJENS, A.; HEKKERT, M. Barriers to the circular economy: evidence from the European Union (EU). *Ecological Economics*, v. 150, p. 264-272, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028>.

KIRCHHERR, J.; YANG, N. N.; SCHULZE-SPÜNTRUP, F.; HEERINK, M. J.; HARTLEY, K. Conceptualizing the circular economy (revisited): an analysis of 221 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 194, p. 107001, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001>.

LIEDER, M.; RASHID, A. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 115, p. 36-51, 2016.

LIU, Q.; XIE, H.; XU, Y.; ZHOU, Z.; CHEN, Y.; LIN, L.; ADELEKE, R.; LI, H.; WANG, Y.; CHEN, S.; ZHANG, Y. Biomineralization-driven simultaneous carbon/phosphorus recovery and membrane fouling control in anaerobic membrane bioreactor for swine wastewater treatment. *Water Research*, v. 286, p. 124264, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124264>.

MANES-ROSSI, F.; NICOLÒ, G.; ARGENTO, D. Non-financial reporting formats in public sector organizations: a structured literature review. *Journal of Public Budgeting, Accounting & Financial Management*, v. 32, n. 4, p. 639-669, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1108/JPBAFM-03-2020-0037>.

MARTÍN-SANZ-GARRIDO, C.; REVUELTA-ARAMBURU, M.; SANTOS-MEJÍAS, A. M.; MORALES-POLO, C. A review on anaerobic digestate as a biofertilizer: characteristics, production, and environmental impacts from a life cycle assessment perspective. *Applied Sciences*, v. 15, n. 15, p. 8635, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15158635>.

MAZARELI, R. C. da S.; DUDA, R. M.; LEITE, V. D.; OLIVEIRA, R. A. de. Anaerobic co-digestion of vegetable waste and swine wastewater in high-rate horizontal reactors with fixed bed. *Waste Management*, v. 52, p. 112-121, jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.021>.

MOHER, D.; SHAMSEER, L.; CLARKE, M.; GHERSI, D.; LIBERATI, A.; PETTICREW, M.; SHEKELLE, P.; STEWART, L. A.; PRISMA-P GROUP. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews*, v. 4, n. 1, p. 1, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-1>.

MOLINA-MORENO, V.; LEYVA-DÍAZ, J. C.; LLORENS-MONTES, F. J.; CORTÉS-GARCÍA, F. J. Design of indicators of circular economy as instruments for the evaluation of sustainability and efficiency in wastewater from pig farming industry. *Water*, v. 9, n. 9, p. 653, 2017.

MØLLER, H.; LYNG, K.-A.; RÖÖS, E.; SAMSONSTUEN, S.; OLSEN, H. F. Circularity indicators and added value to traditional LCA impact categories: example of pig production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 29, n. 8, p. 1380-1392, 2024.

MOLINUEVO-SALCES, B.; GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, C.; GÓMEZ, X.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M. C.; MORÁN, A. Vegetable processing wastes addition to improve swine manure anaerobic digestion: evaluation in terms of methane yield and SEM characterization. *Applied Energy*, v. 91, n. 1, p. 36-42, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.09.010>.

NAGARAJAN, D.; MARIAPPAN, N.; CHEN, C.-Y.; CHEN, J.-H.; DONG, C.-D.; LEE, D.-J.; CHANG, J.-S. Biological treatment of swine wastewater: conventional methods versus microalgal processes. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 211, p. 105645, 2024.

NOYA, I.; ALDEA, X.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; GASOL, C. M.; MOREIRA, M. T.; AMORES, M. J.; MARÍN, D.; BOSCHMONART-RIVES, J. Environmental assessment of the entire pork value chain in Catalonia: a strategy to work towards circular economy. *Science of the Total Environment*, v. 589, p. 122-129, 2017.

PAIÉ-RIBEIRO, J.; PINHEIRO, V.; GUEDES, C.; GOMES, M. J.; TEIXEIRA, J.; TEIXEIRA, A.; OUTOR-MONTEIRO, D. From waste to sustainable animal feed: incorporation of olive oil by-products into the diet of Bísaro breed pigs. *Sustainability Switzerland*, v. 17, n. 7, p. 3174, 2025.

PINTO, J.; BOAVIDA-DIAS, R.; MATOS, H. A.; AZEVEDO, J.; AZEVEDO, J. Analysis of the food loss and waste valorisation of animal by-products from the retail sector. *Sustainability*, v. 14, p. 2830, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14052830>.

RÓTOLO, G. C.; VASSILLO, C.; RODRIGUEZ, A. A.; MAGNANO, L.; MILO VACCARO, M.; CIVIT, B. M.; COVACEVICH, M. S.; ARENA, A. P.; ULGIATI, S.

Perception and awareness of circular economy options within sectors related to agriculture in Argentina. *Journal of Cleaner Production*, v. 373, p. 133805, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133805>.

SECCO, C.; LUZ, L. M. da; PINHEIRO, E.; FRANCISCO, A. C. de; PUGLIERI, F. N.; PIEKARSKI, C. M.; FREIRE, F. M. C. S. Circular economy in the pig farming chain: proposing a model for measurement. *Journal of Cleaner Production*, v. 260, p. 121003, 2020.

SILVA, I.; LAPA, N.; RIBEIRO, H.; DUARTE, E. Pig slurry anaerobic digestion: the role of biochar as an additive towards biogas and digestate improvement. *Applied Sciences*, v. 15, p. 1037, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15031037>.

SILVEIRA, C. F.; ASSIS, L. R. de; SOUSA OLIVEIRA, A. P. de; CALIJURI, M. L. Valorization of swine wastewater in a circular economy approach: effects of hydraulic retention time on microalgae cultivation. *Science of the Total Environment*, v. 789, p. 147861, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147861>.

SU, X.; ZHANG, T.; ZHAO, J.; MUKHERJEE, S.; ALOTAIBI, N. M.; ABOU-ELWAF, S. F.; TRAN, H.-T.; BOLAN, N. S. Phosphorus fraction in hydrochar from co-hydrothermal carbonization of swine manure and rice straw: an optimization analysis based on response surface methodology. *Water*, v. 16, n. 15, p. 2208, 2024.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, v. 84, p. 523-538, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>.

WU, H.; LI, A.; ZHANG, H.; GAO, S.; LI, S.; CAI, J.; YAN, R.; XING, Z. The potential and sustainable strategy for swine wastewater treatment: resource recovery. *Chemosphere*, v. 336, p. 139235, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139235>.

XUE, Y.-N.; LUAN, W.-X.; WANG, H.; YANG, Y.-J. Environmental and economic benefits of carbon emission reduction in animal husbandry via the circular economy: case study of pig farming in Liaoning, China. *Journal of Cleaner Production*, v. 238, p. 117968, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117968>.

YOST, J. L.; SCHMIDT, A. M. Effect of swine manure on soil health properties: a systematic review. *Soil and Plant Analysis*, v. 49, p. 223-237, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20359>.

ZHANG, L.; MAO, Y.; CHEN, Z.; HU, X.; WANG, C.; LU, C.; WANG, L. A systematic review of life-cycle GHG emissions from intensive pig farming: accounting and mitigation. *Science of the Total Environment*, v. 907, p. 168112, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168112>.

ZHOU, L.; LIANG, M.; ZHANG, D.; NIU, X.; LI, K.; LIN, Z.; LUO, X.; HUANG, Y. Recent advances in swine wastewater treatment technologies for resource recovery: a comprehensive review. *Science of the Total Environment*, v. 924, p. 171557, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171557>.