A valorização dos resíduos suinícolas como um caminho para bioeconomia circular

The valorization of swine waste as a path to the circular bioeconomy

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

Todegnon Aurel Dieudonne Adisso
Universidade de Brasília (UnB). Brasília, DF, Brasil

Pedro Canuto Macedo Sales
Universidade Federal de Goiás (UFG). Goiânia, GO, Brasil

GT12 - Impactos socioambientais das novas tecnologias no agronegócio

Resumo: Este estudo analisou como a valorização energética dos dejetos suínos, especialmente a digestão anaeróbia (DA), impulsiona a suinocultura rumo à bioeconomia circular (BEC). O estudo confirmou que a DA é essencial, transformando resíduos em bioenergia (biogás/biometano), promovendo a autossuficiência energética das fazendas e reduzindo as emissões de GEE. Além da energia, a tecnologia viabiliza o fechamento dos ciclos de recursos ao gerar digestato sanitizado, que permite a recuperação avançada de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e o reuso da água, aumentando a resiliência econômica do setor. Contudo, o alto custo de capital (CAPEX) e os desafios de escala são as principais limitações para a adoção, especialmente por pequenas e médias empresas. A superação desses obstáculos exige o desenvolvimento de modelos de negócios cooperativos e a valoração econômica integral dos benefícios ambientais.
Palavras-chave: Digestão Anaeróbia; Circularidade; Dejetos Suínos; Recuperação de Nutrientes.

Abstract: This study analyzed how the energetic valorization of swine manure, specifically through Anaerobic Digestion (AD), drives pig farming toward the Circular Bioeconomy (CBE). The research confirmed that AD is essential, transforming waste into bioenergy (biogas/biomethane), promoting farms energy self-sufficiency, and reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions. Beyond energy, the technology enables the closing of resource loops by generating sanitized digestate, which allows for the advanced recovery of nutrients (nitrogen and phosphorus) and water reuse, increasing the sector's economic resilience. However, the high Capital Expenditure (CAPEX) and scaling challenges are the main limitations to adoption, especially for small and medium-sized enterprises. Overcoming these obstacles requires the development of cooperative business models and the full economic valuation of the environmental benefits.
Keywords: Anaerobic Digestion; Circularity; Swine Manure; Nutrient Recovery.

1. Introdução

A suinocultura moderna é considerada um pilar fundamental na cadeia global de produção de alimentos. No entanto, o setor confronta-se com desafios crescentes relativos à sustentabilidade e ao impacto ambiental (Sossidou *et al.*, 2025). A produção intensiva, que se mostra essencial para satisfazer a procura crescente por carne suína, demanda um esforço contínuo para equilibrar a eficiência produtiva, o bem-estar animal e a responsabilidade ecológica. Recentemente, a sustentabilidade ganha um enfoque central no setor pecuário, impulsionando a necessidade de desenvolver sistemas de produção que sejam eticamente corretos, economicamente viáveis, ecologicamente sadios e socialmente aceitáveis. O bem-estar animal, inclusive, é integrado como a quarta dimensão da sustentabilidade na produção moderna (Sossidou *et al.*, 2025). A transição da suinocultura para um modelo alinhado com a

Bioeconomia Circular (BEC) é percebida como a solução mais promissora para conciliar produtividade com metas ambientais, concentrando-se na otimização do uso de recursos e no fechamento de ciclos (Mariyappan *et al.*, 2024; Leavy *et al.*, 2024). Este novo paradigma exige uma análise crítica das práticas existentes e a adoção de estratégias inovadoras capazes de transformar passivos ambientais, como os dejetos suínos, em valiosos produtos e recursos.

O manejo incorreto dos dejetos da suinocultura associa-se diretamente a graves problemas ambientais, sendo um dos principais contribuintes para a poluição em escala global. O setor pecuário, do qual a suinocultura faz parte, é responsabilizado por uma grande porcentagem da eutrofização mundial e por mais de 14% das emissões globais antropogênicas de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Sossidou *et al.*, 2025). No manejo tradicional, caracterizado pelo descarte descontrolado ou pela aplicação direta e excessiva no solo, os dejetos liberam grandes quantidades de nitrogênio (N), fósforo (P) e matéria orgânica no ambiente (López-Sánchez *et al.*, 2023). Este excesso de nutrientes nos corpos d'água pode levar à eutrofização, um processo considerado indesejável, enquanto a decomposição da matéria orgânica não controlada libera gases como metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), os quais possuem um alto potencial de aquecimento global. Adicionalmente, a gestão inadequada resulta na poluição do solo e da água subterrânea, exaurindo recursos naturais limitados. A complexidade desses impactos ambientais destaca a urgência em implementar métodos de gestão de resíduos que não apenas tratem, mas também valorizem os dejetos, conforme preconizado pela Bioeconomia Circular (BEC).

A BEC propõe um afastamento do modelo linear tradicional de "extrair, produzir, usar e descartar", adotando uma abordagem que visa manter os produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade e valor, estendendo seu ciclo de vida (Muscat *et al.*, 2021; Leavy *et al.*, 2024). Na suinocultura, essa transição implica em mudanças substanciais que oferecem benefícios econômicos, ambientais e sociais. As estratégias de BEC integradas no setor incluem o manejo de dejetos para produção de biogás, o uso de ingredientes alternativos na alimentação animal e a reciclagem da água residuária (Mariyappan *et al.*, 2024). A adoção dessas práticas busca melhorar a eficiência no uso de recursos, como água e terra, e simultaneamente reduzir a pegada ambiental da produção. Exemplos concretos dessa abordagem incluem a integração da Digestão Anaeróbia (DA) com sistemas de tratamento de águas residuárias baseados em microalgas, transformando o efluente suíno em uma fonte de energia e nutriente para a produção de biomassa de alto valor (López-Sánchez *et al.*, 2023; Mariyappan *et al.*, 2024). Outra prática circular notável é a valorização de subprodutos da

indústria alimentícia, como produtos de panificação antigos (*Former Food Products* - FFP), que são reintroduzidos na cadeia como ingredientes de ração suína (*Bakery Meal* - BM), reduzindo o desperdício alimentar e a dependência de commodities tradicionais (Melas *et al.*, 2023; Malamakis *et al.*, 2023). Essa integração de fluxos de resíduos no ciclo de produção suína estabelece-se como um exemplo central do paradigma da Bioeconomia Circular (Malamakis *et al.*, 2023).

O potencial e a valorização dos dejetos suínos, seguindo os princípios da BEC, são maximizados através de tecnologias de bioconversão que buscam não apenas o tratamento, mas a recuperação de energia e nutrientes. A Digestão Anaeróbia (DA) se revela a tecnologia central para a valorização energética, convertendo a matéria orgânica dos dejetos em biogás, uma fonte de energia renovável (López-Sánchez *et al.*, 2023; Mariyappan *et al.*, 2024). O biogás, que pode ser transformado em eletricidade, calor ou biometano, representa uma contribuição direta para a autossuficiência energética das fazendas, permitindo que elas se tornem produtoras de energia e não apenas consumidoras.

Além da DA, o efluente (digestato líquido) pode ser submetido a processos biotecnológicos avançados, como o tratamento com microalgas (*Microalgae-based Wastewater Treatment* - MbWT), que removem alta porcentagem de nitrogênio e fósforo, recuperando-os na forma de biomassa de alto valor (Mariyappan *et al.*, 2024). A biomassa de microalgas produzida é rica em proteínas e outros compostos, e pode ser valorizada como ingrediente para ração animal (Mariyappan *et al.*, 2024) ou como matéria-prima para a produção de bioenergia, como o Bio-hidrogênio ($BioH_2$) (Ferreira *et al.*, 2018).

A valorização se estende ao âmbito econômico. O cenário de manejo de dejetos que combina DA e MbWT não só reduz drasticamente a liberação de poluentes no ambiente, mas também gera produtos de valor agregado, como o biogás e a biomassa proteica. A redução significativa nas emissões de GEE representa uma oportunidade de geração de créditos de carbono (*Certified Emission Reductions* - CERs) em mercados voluntários, provendo uma fonte de renda adicional e fundos para projetos de mitigação, o que eleva a viabilidade econômica do sistema circular (López-Sánchez *et al.*, 2023). A otimização do ciclo, como o cenário que utiliza o digestato do biogás para nutrir as microalgas, que por sua vez são parcialmente recicladas para a ração, demonstra ser superior em termos de aumento de receita e redução de impacto ambiental (Mariyappan *et al.*, 2024).

O cerne da transição para a BEC, especialmente no que tange à gestão de resíduos, reside na capacidade de analisar o papel central das tecnologias de valorização energética de

dejetos suínos no estabelecimento do fechamento dos ciclos de recursos. O objetivo central é quantificar a contribuição dessas tecnologias para a autossuficiência e segurança energética, que são os pilares cruciais para a transição sustentável da suinocultura.

A conversão de efluentes em biogás (DA) e, subsequentemente, a produção de Bio-hidrogênio ($BioH_2$) a partir da biomassa de microalgas cultivada no digestato (Ferreira *et al.*, 2018), cumpre o objetivo central de fechar os ciclos de N e P e, crucialmente, de quantificar uma contribuição tangível para a autossuficiência e segurança energética do setor (Mariyappan *et al.*, 2024). A DA transforma o resíduo em energia (biogás), reduzindo o passivo ambiental. O digestato remanescente, ao invés de ser um efluente a ser descartado, torna-se um fertilizante orgânico rico em nutrientes. Em sistemas integrados, estes nutrientes são utilizados para cultivar microalgas, que atuam como biorremediadoras e produtoras de biomassa com alto teor de energia (López-Sánchez *et al.*, 2023; Mariyappan *et al.*, 2024). A biomassa pode então ser convertida em combustíveis avançados, como $BioH_2$, ampliando a matriz energética da fazenda e quantificando o potencial de contribuição para a segurança energética (Ferreira *et al.*, 2018). Essa sinergia entre o tratamento de águas residuárias e a geração de energia e ração de alto valor, juntamente com a implementação de rações alternativas (Malamakis *et al.*, 2023), estabelece o caminho para um sistema de produção mais sustentável e economicamente resiliente, quantificando a autossuficiência e o fechamento de ciclos de recursos na prática.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi, analisar o papel das tecnologias de valorização energética de dejetos suínos para o fechamento dos ciclos de recursos, quantificando sua contribuição para a autossuficiência e segurança energética como pilares da transição da suinocultura para a Bioeconomia Circular.

3. Metodologia

O delineamento metodológico desta pesquisa foi rigorosamente estruturado seguindo as diretrizes do *Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis Protocols* (PRISMA-P 2015) (Moher *et al.*, 2015). A seleção do protocolo PRISMA justifica-se pela sua capacidade de assegurar a transparência, integridade, precisão e reprodutibilidade do processo de revisão.

Essa abordagem padronizada é amplamente reconhecida em revisões sistemáticas sobre economia circular e bioeconomia, conforme demonstrado por Goldáraz-Salamero *et al.* (2025), Jiao *et al.* (2025) e Munaro *et al.* (2025), ambos os trabalhos que utilizaram o

PRISMA para garantir uma abordagem estruturada e abrangente na busca, avaliação e extração de dados da literatura.

A busca por literatura científica para este estudo foi realizada em duas das mais abrangentes bases de dados internacionais: Web of Science e Scopus. A escolha dessas plataformas se justifica pela sua reputação consolidada como fontes primárias de literatura revisada por pares, cobrindo diversas disciplinas relevantes ao escopo do estudo, como nos estudos de Goldáraz-Salamero *et al.* (2025), Jiao *et al.* (2025) e Munaro *et al.* (2025). Esses estudos aplicaram metodologias rigorosas de revisão de literatura para explorar a biocircularidade em diversos setores. A natureza multidisciplinar dessas plataformas e a ampla indexação de periódicos garantem uma cobertura abrangente das publicações sobre bioeconomia na suinocultura.

A estratégia de busca foi elaborada para maximizar a recuperação de artigos pertinentes, onde os termos de busca foram combinados e aplicados aos campos de Título, Resumo, Palavras-chave Plus e Palavras-chave do Autor (*Title, abstract, keyword plus, and author keywords*), assegurando a relevância dos resultados. A busca foi realizada utilizando os seguintes termos: *((“Circular economy” OR “circularity”) AND (“pig” OR “pigs” OR “swine” OR “pork”))*.

Essa combinação de termos foi elaborada para capturar estudos que abordam o conceito de EC e sua relação direta com a cadeia de produção de suínos. O período de publicação dos artigos foi restrito de 2015 a 2025, um recorte temporal que permite a análise das tendências mais recentes e do estado da arte na área (Munaro *et al.*, 2025). Além disso, foram considerados apenas artigos (*Article*), excluindo outros tipos de documentos para manter o foco em pesquisas empíricas e revisões de alta qualidade. A aplicação dessa estratégia resultou na identificação de 253 artigos na *Web of Science* e 254 artigos na *Scopus*, com a busca realizada em 27 de junho de 2025.

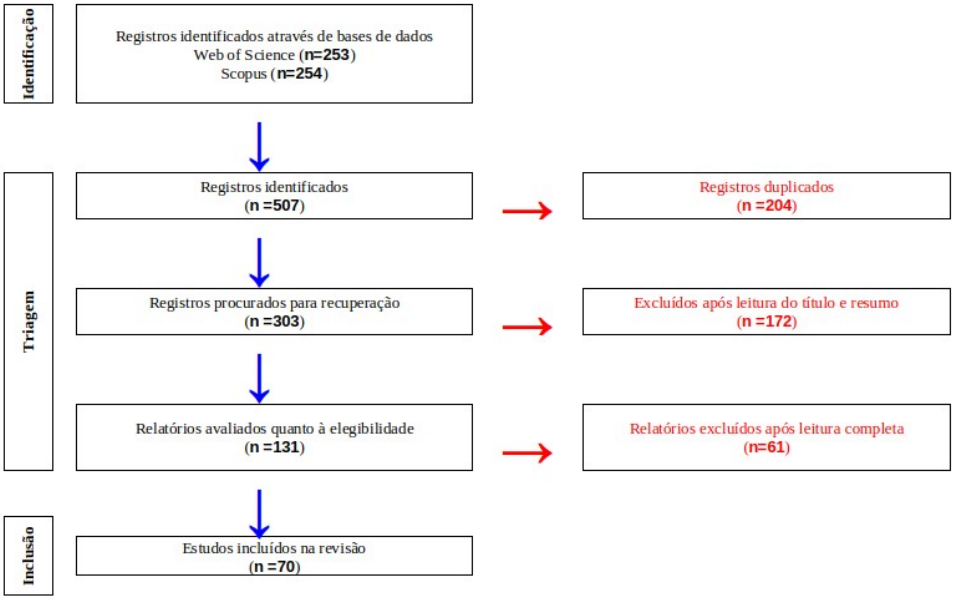
Todos os registros recuperados das bases de dados foram importados para o *software Microsoft Excel*. Isso facilitou a organização, a remoção de duplicatas e o gerenciamento eficiente do fluxo de documentos. A triagem seguiu o fluxograma PRISMA, conforme ilustrado na Figura 1, adaptado de Moher *et al.* (2015), com o objetivo de garantir a rastreabilidade e reprodutibilidade do processo de seleção.

Após a etapa de deduplicação, 303 registros únicos foram submetidos à análise de título e resumo, o que resultou na exclusão de 166 registros considerados irrelevantes. Na fase de elegibilidade, buscou-se o texto completo de 137 artigos, dos quais 131 foram obtidos.

Após avaliação detalhada, 61 artigos foram excluídos por não atenderem aos critérios previamente definidos, resultando em uma amostra final de 70 estudos.

Os critérios de inclusão priorizaram a especificidade temática e a credibilidade científica. Selecionaram-se artigos que se concentravam em em subprodutos tratados segundo princípios da bioeconomia diretamente aplicadas à suinocultura, alinhando-se ao objetivo central do estudo. A inclusão restringiu-se a publicações revisadas por pares, indexadas nas bases de dados Web of Science e Scopus.

Figura 1. Fluxograma PRISMA da seleção dos estudos



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

Já os critérios de exclusão visaram refinar a amostra, removendo estudos que não contribuíam diretamente para a questão de pesquisa. Descartaram-se artigos sem foco claro na suinocultura e em subprodutos tratados segundo princípios da bioeconomia, bem como aqueles que, embora abordassem resíduos, não priorizavam os gerados no setor suinícola ou tratavam de misturas de resíduos de outras espécies sem a devida relevância para o tema. Adicionalmente, artigos de revisão de literatura foram excluídos, em conformidade com as metodologias rigorosas de revisões similares (Goldáraz-Salamero *et al.*, 2025; Jiao *et al.*, 2025; Munaro *et al.*, 2025). Por fim, a impossibilidade de acesso ao texto completo após a triagem inicial também resultou em exclusão.

A aplicação sistemática e transparente desses critérios resultou na amostra final de 70 artigos, proporcionando uma base sólida e pertinente para a análise subsequente.

A amostra final para esta revisão sistemática compreende 70 artigos que atendem integralmente aos critérios de inclusão. Esta amostra robusta servirá como base para responder à seguinte questão de pesquisa (RQ1), que guiará a síntese dos resultados:

RQ1: De que modo as tecnologias de valorização energética de dejetos suínos estabelecem a base para o fechamento dos ciclos de recursos, promovendo a autossuficiência e segurança energética na transição da suinocultura para a Bioeconomia Circular?

Os dados provenientes dos 70 artigos serão submetidos a uma análise qualitativa com o objetivo de responder à questão de pesquisa proposta. A análise categoriza os estudos com base nos seguintes eixos temáticos: valorização dos resíduos e subprodutos, digestão anaeróbia (DA) e recuperação de bioenergia, recuperação avançada de nutrientes (N, P, K), valorização de bioprodutos sólidos e biomassa, e estratégias sistêmicas e fechamento de ciclos.

4. Discussão dos Resultados

4.1 Estratégias para Valorização de Resíduos Suinícolas

A valorização dos resíduos na suinocultura consolidou-se, nas últimas décadas, como o eixo central da Bioeconomia Circular (BEC) aplicada ao agronegócio nacional. Constatou-se que a transição de um modelo reativo de "fim de tubo" para uma governança sistêmica de recursos permitiu a internalização de externalidades ambientais negativas, anteriormente negligenciadas pelos agentes da cadeia. Esse processo de valorização fundamentou-se na premissa técnica de converter o dejeto, historicamente gerido como um passivo ambiental oneroso, em um ativo produtivo com valor de mercado e liquidez potencial. Sob o prisma da literatura seminal, verificou-se que o objetivo primordial dessa abordagem consiste na reintegração eficiente de fluxos de matéria e energia, estabelecendo uma cadeia de valor significativamente mais resiliente (Liu & Xiao, 2016; Molina-Moreno *et al.*, 2017; Xue *et al.*, 2019; Macedo *et al.*, 2023; Hollas *et al.*, 2023; Marques *et al.*, 2024).

Observou-se que a mudança de paradigma decorreu da necessidade premente de mitigar desequilíbrios ecossistêmicos causados pela elevada densidade produtiva regional. Os dados indicaram que o modelo de operação em circuito fechado (*closed-loop farming system*) promove o equilíbrio dinâmico entre a produtividade marginal e a preservação do capital natural. Consequentemente, essa visão sistêmica alterou a governança operacional das unidades, incidindo sobre o nexo água-energia-alimento e otimizando a alocação de recursos

escassos (Jeng *et al.*, 2024; Levario *et al.*, 2025). Sob essa ótica, a economia circular transcende a dimensão técnica, apresentando-se como um arranjo estratégico voltado à redução de incertezas operacionais no setor rural (Secco *et al.*, 2020).

Verificou-se que as estratégias de gestão foram segmentadas em três frentes: fechar, estreitar e retardar os ciclos de materiais (Møller *et al.*, 2024). Constatou-se que as intervenções mais frequentes priorizaram a recuperação energética e a reciclagem de nutrientes do chorume, sugerindo uma orientação voltada à redução de custos diretos (Cândido *et al.*, 2022; Rodríguez-Alegre *et al.*, 2023). Relativamente ao fechamento de ciclos, a conversão de resíduos agroindustriais em ração animal emergiu como a rota de maior eficiência alocativa (Jayathilake *et al.*, 2022; Tong *et al.*, 2023). Essa prática ratifica a vocação bioeconômica dos suínos em converter biomassa não competitiva com a alimentação humana em proteína de alto valor, reduzindo custos de transação e a exposição à volatilidade dos preços das commodities (Jayathilake *et al.*, 2022).

A tecnologia de Digestão Anaeróbia (DA) apresentou-se como a "tecnologia-nódulo" essencial para a circularidade (Hollas *et al.*, 2022; Lee & Tsai, 2020; Macedo *et al.*, 2023; Møller *et al.*, 2024; Xue *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2022a). Por meio de processos biotecnológicos, constatou-se a viabilidade da extração de bioenergia concomitante à estabilização sanitária dos efluentes. Esse achado corrobora a tese de que a DA é imperativa para a descarbonização, uma vez que atenua emissões de GEE, transformando-as em fontes de receita (Xue *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022a; Cândido *et al.*, 2022; Hollas *et al.*, 2023). Verificou-se que, em mercados maduros, essa tecnologia é percebida como uma vantagem competitiva indispensável para o acesso a mercados internacionais exigentes (Jurkenaite, 2023; Cong *et al.*, 2024).

A performance metanogênica foi avaliada sob diversas configurações, como reatores UASB e CSTR. Verificou-se uma tendência analítica que aponta para a eficácia de usinas centralizadas, que possibilitam o tratamento cooperativo e a diluição de custos fixos (Shi *et al.*, 2023). Essa governança territorial amplia a escala de produção e fortalece a segurança energética rural (Pereira *et al.*, 2023). Observou-se, ainda, que a codigestão (AcoD), integrando chorume a resíduos de milho e subprodutos frutícolas, potencializou o rendimento de metano, indicando que a diversificação do substrato é fundamental para a estabilidade biológica e maximização econômica do biogás (Sousa *et al.*, 2021; Eduria *et al.*, 2024; Azevedo *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022a).

Adicionalmente, os dados indicaram que o uso de cascas de manga e biomassa microalgal elevou o teor de sólidos voláteis, incrementando a densidade energética do sistema (Macedo *et al.*, 2023; Dinnebier *et al.*, 2021). No que tange à fração sólida, verificou-se que a compostagem permaneceu essencial para a bioseguridade. Constatou-se que esse processo gera um fertilizante orgânico estável, inibindo a propagação de patógenos multirresistentes e reduzindo potenciais custos externos de saúde pública (Batista-Barwinski *et al.*, 2024; Zalewska *et al.*, 2023).

Quanto ao estreitamento de ciclos, o foco recaiu sobre a recuperação de macronutrientes (NPK). A fertirrigação com chorume tratado permitiu a substituição significativa de fertilizantes sintéticos em culturas de larga escala (Jiménez-de-Santiago *et al.*, 2019; Mateo-Marín *et al.*, 2020; Rosa *et al.*, 2022; Møller *et al.*, 2024; Pu *et al.*, 2025; Levario *et al.*, 2025). Verificou-se que a eficiência dessa prática está condicionada a tecnologias de precisão, que mitigam a volatilização de amônia. Consequentemente, essa estratégia representou uma economia real de divisas e redução na pegada ecológica (Møller *et al.*, 2024; El Bied *et al.*, 2024).

Em contextos de restrição de área, observou-se o emprego de sistemas de membranas (Hollas *et al.*, 2021; Wei *et al.*, 2022; Proskynitopoulou *et al.*, 2024; Rodríguez-Alegre *et al.*, 2023; Vega *et al.*, 2022). A cristalização de estruvita revelou-se uma rota técnica promissora para a recuperação de fósforo, convertendo uma fonte de eutrofização em fertilizante de alto valor comercial. Essa solução oferece uma fonte renovável para um recurso mineral finito e estrategicamente crítico (Serra-Toro *et al.*, 2022; González-García *et al.*, 2023; Ha *et al.*, 2024; Pinatha *et al.*, 2025).

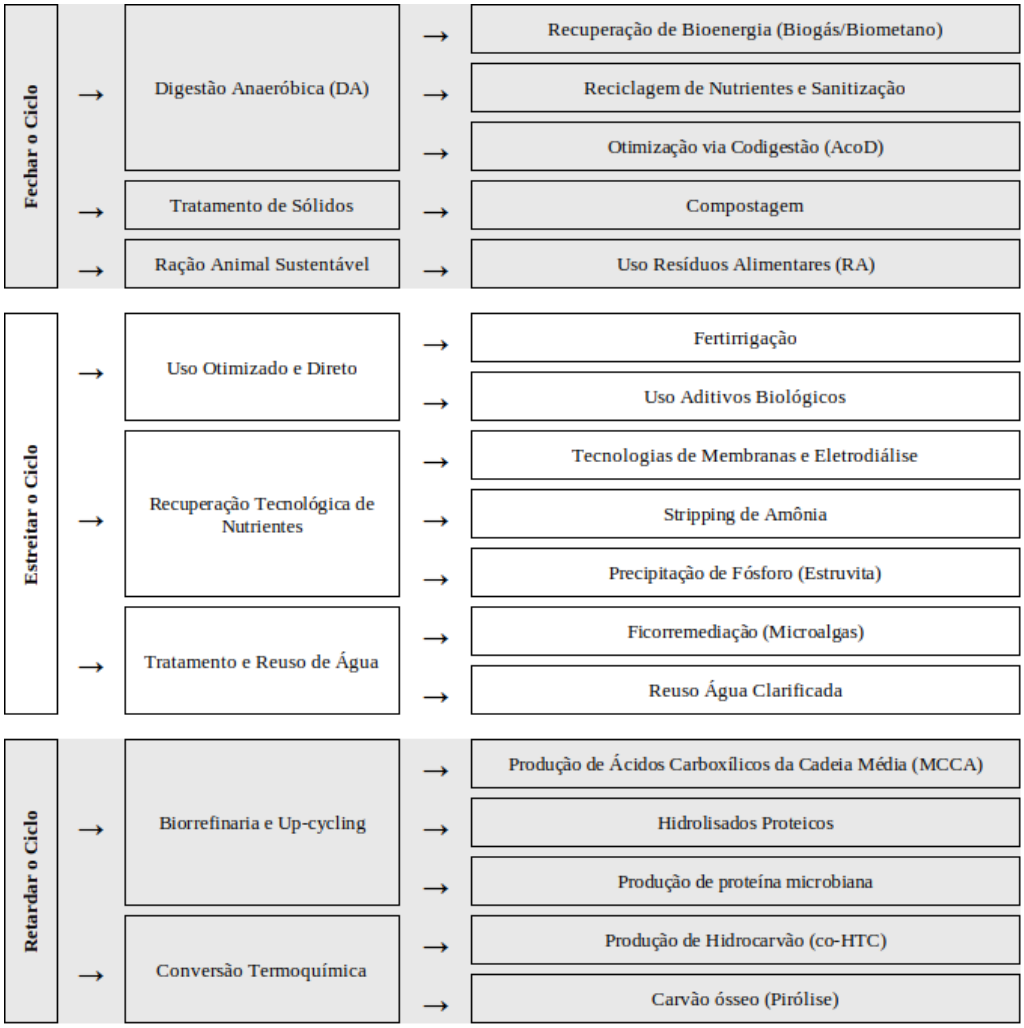
As microalgas demonstraram ser agentes versáteis na biorremediação, convertendo nutrientes em biomassa rica em compostos bioativos (Dinnebier *et al.*, 2021; Silveira *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022b; Veuthey *et al.*, 2022). Verificou-se que o cultivo purifica o efluente a níveis que permitem o reuso hídrico. A obtenção de água recuperada clarificada elevou a resiliência hídrica do sistema diante de variáveis exógenas climáticas (Giang *et al.*, 2021; Bortoli *et al.*, 2022; Wei *et al.*, 2022; Proskynitopoulou *et al.*, 2024; Hollas *et al.*, 2023; Levario *et al.*, 2025). Esse modelo consolidou o conceito de "resíduo zero" (Noya *et al.*, 2017).

No eixo de retardamento de ciclos, observou-se a bioconversão de resíduos em bioprodutos de alto valor, integrando a unidade rural ao conceito de biorrefinaria. Verificou-se a viabilidade da produção de ácidos carboxílicos e proteínas microbianas, diversificando a

matriz de receitas (Zhang *et al.*, 2022a; Verbeeck *et al.*, 2021; Veuthey *et al.*, 2022). Processos termoquímicos transformaram ossos em hidrocarvão e carvão ósseo, insumos para o sequestro de carbono e melhoria de solos degradados (Su *et al.*, 2024; Xiong *et al.*, 2025; Huyen *et al.*, 2024). Observou-se que o reuso de resíduos de panificação reduziu a pressão sobre o uso da terra, melhorando a eficiência global da dieta (Luciano *et al.*, 2021; Malamakis *et al.*, 2023; Kiatti *et al.*, 2025; Jayathilake *et al.*, 2022; Paié-Ribeiro *et al.*, 2025; Ferrer *et al.*, 2022).

Verifica-se que as estratégias, quando integradas, fortaleceram a resiliência financeira das unidades (Pfeifer *et al.*, 2022; Brajon *et al.*, 2024). Conforme ilustrado na Figura 2, a transição depende da articulação tecnológica entre rotas de energia, nutrientes e bioprodutos. A eficácia reside em manter o valor dos recursos circulando pelo maior tempo possível (Vásquez *et al.*, 2024).

Figura 2: Estratégias de valorização de resíduos suinícolas



Fonte: Dados da pesquisa.

4.2 Aspectos Bioeconômicos da Suinocultura Circular

A análise indicou que a adoção de práticas circulares alterou a estrutura de custos e a governança das unidades. A transição para a Bioeconomia Circular (BEC) fundamenta-se na busca por eficiência alocativa sob escassez de recursos (Secco *et al.*, 2020). Verificou-se que o ganho de viabilidade decorreu da conversão de externalidades negativas em ativos comercializáveis, permitindo a redução do custo operacional (OPEX) e a geração de novos fluxos de caixa.

No domínio energético, constatou-se que o biogás conferiu autonomia operativa, protegendo as propriedades contra oscilações tarifárias (Azevedo *et al.*, 2021; Cândido *et al.*, 2022; Lee & Tsai, 2020; Santos *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2021; Soares *et al.*, 2020; Verbeeck *et al.*, 2021; Xue *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2022a; Cong *et al.*, 2024; Nagarajan *et al.*, 2024). Verificou-se que a venda do excedente elétrico ou biometano tornou-se fonte de receita estratégica (Hollas *et al.*, 2022; Macedo *et al.*, 2023; Pereira *et al.*, 2023; Sousa *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2023). Tal resultado corrobora a tese de que a bioenergia rural é central para a segurança energética descentralizada (Nagarajan *et al.*, 2024).

Na produção agrícola, observou-se que a substituição de fertilizantes minerais por biofertilizantes gerou economias de escala diretas (Jiménez-de-Santiago *et al.*, 2019; Cândido *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2021; Xue *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2022a; Zhu *et al.*, 2023; Batista-Barwinski *et al.*, 2024; Zalewska *et al.*, 2023). A valoração econômica indicou redução da exposição à volatilidade do preço do nitrogênio. Adicionalmente, a estruvita revelou potencial para mercados de nicho, transformando custo de tratamento em receita incremental (Cong *et al.*, 2024; El Bied *et al.*, 2024; Noya *et al.*, 2017; Tong *et al.*, 2023; Doyeni *et al.*, 2023; Hollas *et al.*, 2023; Lessmann *et al.*, 2023; Pu *et al.*, 2025; Rodríguez-Alegre *et al.*, 2023; Rosa *et al.*, 2022).

Verificou-se que o reuso hídrico reduziu custos externos associados à captação e disposição (Proskynitopoulou *et al.*, 2024; Soto-Herranz *et al.*, 2022; Vega *et al.*, 2022; Wei *et al.*, 2022). A análise sugeriu que produtos de alta sofisticação biotecnológica possuem margens de contribuição superiores às commodities (Zhang *et al.*, 2022a; Zhang *et al.*, 2022b; Cotârleț *et al.*, 2020; Marques *et al.*, 2024). Isso indicou que a suinocultura deve evoluir para o modelo de biorrefinaria, onde a proteína animal deixa de ser o único item de valor (González-García *et al.*, 2023; Ha *et al.*, 2024; Pinatha *et al.*, 2025).

Contudo, observou-se que a adoção plena ainda enfrenta barreiras estruturais. O elevado custo inicial (CAPEX) para tecnologias de ponta constitui o principal obstáculo para pequenos produtores (López-Sánchez *et al.*, 2023; Shi *et al.*, 2023). Verificou-se que a viabilidade é sensível à escala; propriedades menores raramente atingem o ponto de equilíbrio isoladamente. Tal cenário demanda novos arranjos de governança, como cooperativas de energia e modelos centralizados para diluição de custos fixos (Pereira *et al.*, 2023; Bortoli *et al.*, 2022; Giang *et al.*, 2021; Levario *et al.*, 2025; Rodríguez-Alegre *et al.*, 2023; Noya *et al.*, 2017; Hollas *et al.*, 2023).

A viabilidade de longo prazo depende da monetização de benefícios intangíveis. A comercialização de créditos de carbono (CERs) emergiu como incentivo crucial para atrair investimentos (López-Sánchez *et al.*, 2023). Concluiu-se que o sucesso exige métricas que considerem a eficiência no uso de recursos ao longo da cadeia de suprimentos (Xue *et al.*, 2019; Leavy *et al.*, 2024).

4.3 Proposição Teórica

A discussão teórica sustenta que a transição é mediada pelo avanço das tecnologias de valorização. Verificou-se que a Digestão Anaeróbia (DA) atua como a variável independente catalisadora da reorganização estrutural. Sob essa perspectiva, a tecnologia é o motor que ativa as estratégias de fechar, estreitar e retardar ciclos (Liu & Xiao, 2016; Molina-Moreno *et al.*, 2017; Xue *et al.*, 2019; Macedo *et al.*, 2023; Marques *et al.*, 2024; Secco *et al.*, 2020).

Infere-se que o modelo se consolida na transformação de passivos em fatores de resiliência. A bioenergia assegura autonomia e mitiga externalidades ambientais (Jeng *et al.*, 2024; Xue *et al.*, 2019; Cândido *et al.*, 2022; Hollas *et al.*, 2022; Lee & Tsai, 2020; Macedo *et al.*, 2023; Møller *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2022a; Pereira *et al.*, 2023). O digestato sustenta o estreitamento de ciclos hídricos e nutricionais (Cândido *et al.*, 2022; López-Sánchez *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2021; Xue *et al.*, 2019; Møller *et al.*, 2024). No nível estratégico, o up-cycling biotecnológico eleva o valor agregado, inserindo a suinocultura em cadeias complexas de base biológica (González-García *et al.*, 2023; Ha *et al.*, 2024; Pinatha *et al.*, 2025; Proskynitopoulou *et al.*, 2024; Jiménez-de-Santiago *et al.*, 2019; Rosa *et al.*, 2022; Giang *et al.*, 2021; Hollas *et al.*, 2023; Levario *et al.*, 2025; Wei *et al.*, 2022).

Propõe-se que a transição é uma função da integração sistêmica condicionada à escala e governança. O modelo pode ser representado pela relação:

Transição BEC = f (Inovação Tecnológica x Governança Cooperativa x Valoração Ambiental)

Essa proposição sugere que o avanço tecnológico isolado é insuficiente sem arranjos de governança que permitam o acesso à tecnologia e mecanismos de mercado que valorizem externalidades positivas (Bortoli *et al.*, 2022; Giang *et al.*, 2021; Hollas *et al.*, 2023; López-Sánchez *et al.*, 2023; Shi *et al.*, 2023).

4.5 Contribuições Gerenciais

A transição exige o desenvolvimento de capacidades organizacionais dinâmicas. Verificou-se que a habilidade de integrar rotas de valorização é o diferencial competitivo para superar o modelo linear. O estudo demonstrou que a transformação de resíduos em recursos é a competência essencial para redesenhar o design do negócio (Molina-Moreno *et al.*, 2017; Xue *et al.*, 2019).

Recomenda-se que gestores reconheçam a DA e a AcoD como pilares centrais. Verificou-se que esses mecanismos realizam o fechamento efetivo de ciclos, tratando resíduos e mitigando emissões (Hollas *et al.*, 2022; Lee & Tsai, 2020; Macedo *et al.*, 2023). Além dos benefícios ambientais, convertem passivos em ativos estratégicos para agregação de valor (Cândido *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2022a).

Gestores devem investir na recuperação avançada de bionutrientes e no up-cycling para diversificar o portfólio de oferta (González-García *et al.*, 2023; Proskynitopoulou *et al.*, 2024; Verbeeck *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022a). Para as MPMEs, a formação de consórcios é vital para a sustentabilidade econômica (Pereira *et al.*, 2023; Shi *et al.*, 2023). A sustentabilidade financeira depende da monetização de benefícios através de créditos de carbono e redução sistemática de insumos externos (López-Sánchez *et al.*, 2023; Jayathilake *et al.*, 2022). Ao adotar essa postura, as empresas alavancam vantagens competitivas em um mercado que valoriza a produção ética e circular.

5. Considerações finais

Os resultados demonstram que a digestão anaeróbia (DA) e a codigestão (AcoD) de dejetos suínos são tecnologias catalisadoras para a transição do setor à Bioeconomia Circular (BEC). A questão de pesquisa sobre a promoção da autossuficiência energética e o fechamento de ciclos é respondida pela capacidade da DA de transformar um resíduo em bioenergia (biogás/biometano), permitindo que as propriedades rurais gerem a própria energia

e contribuam para a segurança energética. Esse processo propicia a redução da pegada de carbono, sendo um passo fundamental para as fases subsequentes de recuperação de recursos.

O êxito dessa transição reside na integração sistêmica ativada pelo tratamento dos dejetos. O digestato resultante possibilita o fechamento dos ciclos de nutrientes essenciais, como nitrogênio e fósforo, através da produção de fertilizantes de alto valor e do reuso da água clarificada, fortalecendo a sustentabilidade hídrica. A sinergia entre o tratamento de dejetos, a recuperação de nutrientes e a geração de energia aumenta a resiliência econômica do sistema, devido à diminuição de custos operacionais (OPEX) e à criação de novas fontes de receita, como a comercialização de créditos de carbono.

No entanto, a adoção em larga escala enfrenta limitações, sendo o alto custo de capital inicial (CAPEX) a principal barreira para as Micro, Pequenas e Médias Empresas (MPMEs). A dificuldade de escala e a necessidade de modelos de negócios centralizados e cooperativos também são desafios críticos. Para impulsionar a BEC, sugerem-se pesquisas futuras: o desenvolvimento de modelos de negócios cooperativos e centralizados para mitigar o CAPEX e otimizar a escala; análises de custo-benefício que incorporem a valoração econômica dos benefícios ambientais (ex., conservação hídrica, créditos de carbono) e avaliem o impacto de políticas públicas de incentivo; e a otimização de biorrefinarias com foco no up-cycling do digestato para a produção de bioprodutos de alto valor agregado.

Referências

Azevedo, A., Duarte, E., & Gominho, J. (2021). Performance of anaerobic co-digestion of pig slurry with pineapple (*Ananas comosus*) bio-waste residues. *Waste and Biomass Valorization*, *12*(1), 303–311.

Batista-Barwinski, M. J., Venturieri, G. A., Miller, P. R. M., Testolin, R. C., Niero, G., Somensi, C. A., Almerindo, G. I., Ariente-Neto, R., Radetski, C. M., & Cotelle, S. (2024). Swine slaughterhouse biowaste: An environmental sustainability assessment of composting, amended soil quality, and phytotoxicity. *Environmental Technology*, *45*(7), 1404–1411.

Beyers, M., Ravi, R., Devlamynck, R., Meers, E., Jensen, L. S., & Bruun, S. (2023). Constructed wetlands and duckweed ponds as a treatment step in liquid manure handling, A life cycle assessment. *Science of The Total Environment*, *889*, 163956.

Bortoli, M., Hollas, C. E., Cunha Jr., A., Steinmetz, R. L. R., Coldebella, A., de Prád, M. C., Soares, H. M., & Kunz, A. (2022). 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*, *345*, 131127.

Brajon, S., Tallet, C., Merlot, E., & Lollivier, V. (2024). Barriers and drivers of farmers to provide outdoor access in pig farming systems: A qualitative study. *Animal*, *18*(5), 101138.

Cândido, D., Bolsan, A. C., Hollas, C. E., Venturin, B., Tápparo, D. C., Bonassa, G., Antes, F. G., Steinmetz, R. L. R., Bortoli, M., & Kunz, A. (2022). Integration of swine manure

anaerobic digestion and digestate nutrients removal-recovery under a circular economy concept. *Journal of Environmental Management*, *301*, 113825.

Casas, M. E., Pastor-López, E. J., Rodríguez-Espelta, Y., & Matamoros, V. (2024). Simultaneous veterinary antibiotics reduction and biomass production from pig slurry by microalgae co-immobilization in moving bed biofilm reactors. *Environmental Technology & Innovation*, *35*, 103677.

Cong, V.H., Canh, N.D., & Vien, T.D. (2024). Greenhouse gases emissions from pig husbandry: A case study in Bac Giang Province, Vietnam. *J. ISSAAS*, *30*(1), 51–61.

Cotârleț, M., Stănciuc, N., & Bahrim, G. E. (2020). *Yarrowia lipolytica* and *Lactobacillus paracasei* solid state fermentation as a valuable biotechnological tool for the pork lard and okara's biotransformation. *Microorganisms*, *8*(8), 1098.

Dandamudi, K. P. R., Murdock, T., Lammers, P. J., Deng, S., & Fini, E. H. (2021). Production of functionalized carbon from synergistic hydrothermal liquefaction of microalgae and swine manure. *Resources, Conservation and Recycling*, *170*, 105564.

Dinnebier, H. C. F., Matthiensen, A., Michelon, W., Tápparo, D. C., Fonseca, T. G., Favretto, R., Steinmetz, R. L. R., Treichel, H., Antes, F. G., & Kunz, A. (2021). Phycoremediation and biomass production from high strong swine wastewater for biogas generation improvement: An integrated bioprocess. *Bioresource Technology*, *332*, 125111.

Doyeni, M. O., Barcauskaite, K., Buneviciene, K., Venslauskas, K., Navickas, K., Rubezius, M., Baksinskaite, A., Suproniene, S., & Tilvikiene, V. (2023). Nitrogen flow in livestock waste system towards an efficient circular economy in agriculture. *Waste Management and Research*, *41*(3), 701–712.

Eduria, A. J., Mangubat, X., Nailes, R. J., Llemit, S. L., Bactong Jr, R., Ido, A., & Arazo, R. (2024). Leveraging acid-hydrolyzed corn stover and pig manure as substrates for optimized biogas production: A circular economy approach. *Circular Economy and Sustainability*, *4*(3), 1793–1804.

El Bied, O., Terrero Turbí, M.A., Gómez Garrido, M., Faz Cano, Á., & Acosta, J.A. (2024). Reducing Methane, Carbon Dioxide, and Ammonia Emissions from Stored Pig Slurry Using Bacillus-Biological Additives and Aeration. *Environments*, *11*(8).

Ferreira, A., Marques, P., Ribeiro, B., Assemany, P., Mendonça, H. V. de, Barata, A., Oliveira, A. C., Reis, A., Pinheiro, H. M., & Gouveia, L. (2018). Combining biotechnology with circular bioeconomy: From poultry, swine, cattle, brewery, dairy and urban wastewaters to biohydrogen. *Environmental Research*, *164*, 32–38.

Ferrer, P., Calvet, S., García-Rebollar, P., Jiménez-Belenguer, A. I., Hernández, P., Piquer, O., & Cerisuelo, A. (2022). The impact of replacing barley by dehydrated orange pulp in finishing pig diets on performance, carcass quality, and gaseous emissions from slurry. *Animal*, *16*(11), 100659.

Giang, N. T. H., An, N. T., Huong, L. T. T., Yabe, M., Thang, N. T., Hieu, V. N., & Son, C. T. (2021). Recycling Wastewater in Intensive Swine Farms: Selected Case Studies in Vietnam. *Journal Of The Faculty Of Agriculture Kyushu University*, *66*(1), 115–121.

Goldáraz-Salamero, N., Blanc, S., Sierra-Perez, J., & Brun, F. (2025). From food loss and waste to feed: a systematic review of life cycle perspectives in livestock systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *30*(7), 1586–1606. https://doi.org/10.1007/s11367-025-02464-5

González-García, I., Riaño, B., Molinuevo-Salces, B., & García-González, M. C. (2023). Effect of Alkali and Membrane Area on the Simultaneous Recovery of Nitrogen and

Phosphorous from Digestate by Membrane Technology and Chemical Precipitation. *Sustainability*, *15*(5).

Ha, T. H., Mahasti, N. N. N., Ha, H.-Q., Liao, P.-L., Huang, Y.-H., & Lu, M.-C. (2024). Recovery of nitrogen as struvite from swine wastewater: Comparison study of batch and continuous fluidized-bed crystallization process. *Separation and Purification Technology*, *351*, 128045.

Hollas, C. E., Bolsan, A. C., Chini, A., Venturin, B., Bonassa, G., Cândido, D., Antes, F. G., Steinmetz, R. L. R., Prado, N. V., & Kunz, A. (2021). Effects of swine manure storage time on solid-liquid separation and biogas production: A life-cycle assessment approach. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *150*.

Hollas, C. E., do Amaral, K. G. C., Lange, M. V., Higarashi, M. M., Steinmetz, R. L. R., Barros, E. C., Mariani, L. F., Nakano, V., Sanches-Pereira, A., & Jannuzzi, G. de M. (2022). Life cycle assessment of waste management from the Brazilian pig chain residues in two perspectives: Electricity and biomethane production. *Journal of Cleaner Production*, *354*, 131654. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131654

Hollas, C. E., Rodrigues, H. C., Bolsan, A. C., Venturin, B., Bortoli, M., Antes, F. G., Steinmetz, R. L. R., & Kunz, A. (2023). Swine manure treatment technologies as drivers for circular economy in agribusiness: A techno-economic and life cycle assessment approach. *Science of the Total Environment*, *857*, 159494.

Huyen, D. T., Khoa, B. D. D., Phat, L. N., Long, D. H., & Nguyen, H. C. (2024). Investigation of characteristics and application of food waste-derived bone char on plant growth. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *12*(5), 113446. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113446

Jayathilake, N., Aheeyar, M., & Drechsel, P. (2022). Food waste to livestock feed: Prospects and challenges for swine farming in peri-urban Sri Lanka. *Circular Economy and Sustainability*, *2*(4), 1301–1315. https://doi.org/10.1007/s43615-022-00168-8

Jeng, S. Y., Lin, C.-W. R., Sethanan, K., Wang, H. W., & Tseng, M.-L. (2024). Circular economy-based integrated closed-loop farming system: A sensitivity analysis for profit optimization. *Journal of Cleaner Production*, *482*, 144184. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144184

Jiao, F., Zhu, X., Li, C., Xie, H., & Li, H. (2025). Advancing biomass fermentation and composting for global sustainability: A bibliometric perspective (2019–2024). *Discover Sustainability*, *6*(1), 667. https://doi.org/10.1007/s43621-025-01574-2

Jiménez-de-Santiago, D. E., Yagüe, M. R., & Bosch-Serra, A. D. (2019). Soil water repellency after slurry fertilization in a dryland agricultural system. *Catena*, *174*, 536–545. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.026

Jurkenaite, N. (2023). Analysis of the Nexus between Structural and Climate Changes in EU Pig Farming. *Agriculture*, *13*(9), 1778.

Kiatti, D. D., Serrapica, F., Musco, N., Di Palo, R., & Calabrò, S. (2025). Potential use of tropical and subtropical fruits by-products in pig diet: In vitro two-step evaluation. *Animals*, *15*(10), 1454. https://doi.org/10.3390/ani15101454

Leavy, S., Allegretti, G., Presotto, E., Montoya, M. A., & Talamini, E. (2024). Measuring the Bioeconomy Economically: Exploring the Connections between Concepts, Methods, Data, Indicators and Their Limitations. *Sustainability*, *16*(20), 8727.

Lee, Y. R., & Tsai, W. T. (2020). Valorization of value-added resources from the anaerobic digestion of swine-raising manure for circular economy in Taiwan. *Fermentation*, *6*(3), 81. https://doi.org/10.3390/fermentation6030081

Lessmann, M., Kanellopoulos, A., Kros, J., Orsi, F., & Bakker, M. (2023). Maximizing agricultural reuse of recycled nutrients: A spatially explicit assessment of environmental consequences and costs. *Journal of Environmental Management*, *332*, 117378. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117378

Levario, E., Saldivar, J., Cobos-Mercado, I., Torres-Montijo, L., Alvarez, L. H., & Cervantes, F. J. (2025). Sustainable farming by implementing the water-energy-food nexus between piggery production and wheat cultivation. *Energy for Sustainable Development*, *85*, 101688. https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101688

Liu, X., & Xiao, X. (2016). The optimization of cyclic links of live pig-industry chain based on circular economics. *Sustainability*, *8*(1). https://doi.org/10.3390/su8010026

López-Sánchez, A., Silva-Gálvez, A. L., González-López, M. E., Díaz-Vázquez, D., Orozco-Nunnelly, D. A., Novoa-Leiva, I., González-Valdez, J., Casillas-García, L. F., & Gradilla-Hernández, M. S. (2023). Valorization of livestock waste through combined anaerobic digestion and microalgae-based treatment in México: A techno-economic analysis for distributed biogas generation, animal feed production, and carbon credits trading. *Environmental Technology & Innovation*, *32*, 103321.

Luciano, A., Tretola, M., Mazzoleni, S., Rovere, N., Fumagalli, F., Ferrari, L., Comi, M., Ottoboni, M., & Pinotti, L. (2021). Sweet vs. salty former food products in post-weaning piglets: Effects on growth, apparent total tract digestibility and blood metabolites. *Animals*, *11*(11), 3315. https://doi.org/10.3390/ani11113315

Macedo, A., Fragoso, R., Silva, I., Gomes, T., Martins, C. F., Freire, J. B., & Duarte, E. (2023). Mango peel nanofiltration concentrates to enhance anaerobic digestion of slurry from piglets fed with Laminaria. *Membranes*, *13*(4), 371. https://doi.org/10.3390/membranes13040371

Malamakis, A., Patsios, S. I., Melas, L., Dedousi, A., Kontogiannopoulos, K. N., Vamvakas, K., Tsotsolas, N., Koutsouraki, E., Sossidou, E. N., & Banias, G. F. (2023). Demonstration of an integrated methodology for the sustainable valorisation of bakery former food products as a pig feed ingredient: A circular bioeconomy paradigm. *Sustainability*, *15*(19), 14385. https://doi.org/10.3390/su151914385

Mariyappan, V., Yu, C.-L., Wu, W., & Chang, J.-S. (2024). Circular bioeconomy approach for pig farming systems using microalgae-based wastewater treatment processes. *Bioresource Technology*, *393*, 130134.

Marques, B., Nunes, R., Araújo-Rodrigues, H., Pintado, M., Pereira, R. N., Teixeira, J. A., & Rocha, C. M. R. (2024). Solubilization and hydrolysis of porcine coagulated blood protein using sub-critical solvent extraction. *Food and Bioprocess Technology*, *17*(1), 123–137. https://doi.org/10.1007/s11947-023-03111-3

Mateo-Marín, N., Isla, R., Guillén, M., & Quílez, D. (2020). Agronomic and Environmental Implications of Substituting Pig Slurry for Synthetic Nitrogen in Mediterranean Wheat Systems. *Agronomy-Basel*, *10*(10).

Melas, L., Batsioula, M., Malamakis, A., Patsios, S. I., Geroliolios, D., Alexandropoulos, E., Skoutida, S., Karkanias, C., Dedousi, A., Kritsa, M.-Z., Sossidou, E. N., & Banias, G. F. (2023). Circular Bioeconomy Practices in the Greek Pig Sector: The Environmental Performance of Bakery Meal as Pig Feed Ingredient. *Sustainability*, *15*(15), 11688.

Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., Shekelle, P., Stewart, L. A., & PRISMA-P Group. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews*, *4*(1), 1. https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-1

Molina-Moreno, V., Leyva-Díaz, J. C., Llorens-Montes, F. J., & Cortés-García, F. J. (2017). Design of indicators of circular economy as instruments for the evaluation of sustainability and efficiency in wastewater from pig farming industry. *Water*, *9*(9), 653.

Møller, H., Lyng, K.-A., Röös, E., Samsonstuen, S., & Olsen, H. F. (2024). Circularity indicators and added value to traditional LCA impact categories—example of pig production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *29*(8), 1380–1392.

Munaro, A. T., Ndlovu, J., Bunhu, T., & Siziba, N. (2025). Examining the potential of duckweed and *Azolla* species towards attaining bio-circularity in agricultural systems—a systematic literature review. *Sustainable Environment*, *11*(1), 2505292. https://doi.org/10.1080/27658511.2025.2505292

Muscat, A., Olde, E. M. d., Ripoll-Bosch, R., Zanten, H. H. E. v., Metze, T. A. P., Temme, L. J. M. d. B., Talsma, C. J. A. M., & Ierland, M. K. v. (2021). Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. *Nature Food*, *2*(8), 561–566.

Nagarajan, D., Mariappan, N., Chen, C.-Y., Chen, J.-H., Dong, C.-D., Lee, D.-J., & Chang, J.-S. (2024). Biological treatment of swine wastewater—Conventional methods versus microalgal processes. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *211*, 105645.

Noya, I., Aldea, X., González-García, S., Gasol, C.M., Moreira, M.T., Amores, M.J., Marín, D., & Boschmonart-Rives, J. (2017). Environmental assessment of the entire pork value chain in Catalonia – A strategy to work towards Circular Economy. *Science of the Total Environment*, *589*, 122–129.

Paié-Ribeiro, J., Pinheiro, V., Guedes, C., Gomes, M. J., Teixeira, J., Teixeira, A., & Outor-Monteiro, D. (2025). From Waste to Sustainable Animal Feed: Incorporation of Olive Oil By-Products into the Diet of Bísaro Breed Pigs. *Sustainability Switzerland*, *17*(7), 3174.

Pereira, R. B., Salvador, R., Sales, G. F., Obal, J. S., Piekarski, C. M., & de Francisco, A. C. (2023). Energy from livestock waste: Using circular economy and territorial intelligence to build sustainable businesses. *Energy and Environment*, *34*(6), 2072–2092.

Pfeifer, C., Moakes, S., Salomon, E., & Kongsted, A.G. (2022). The role of diversity and circularity to enhance the resilience of organic pig producers in Europe. *Animal - Open Space*, *1*(1), 100009.

Pinatha, Y., Rongchapo, W., Neamhom, T., & Pentamwa, P. (2025). Product characterization, application, and techno-economic aspects of phosphorus recovery as struvite from swine wastewater: A case of small-scale swine farm. *Science of the Total Environment*, *982*, 179685.

Proskynitopoulou, V., Vourros, A., Garagounis, I., Toursidis, P. D., Lorentzou, S., Kougias, P., Zouboulis, A., & Panopoulos, K. D. (2024). Treatment of anaerobically digested pig manure by applying membrane processes for nutrient recovery and antibiotics removal. *Environmental Science and Pollution Research*.

Pu, M., Zhang, Y., Mukherjee, S., Alharbi, S. F., Singh, R. K., Abou-Elwafa, S. F., Trindade, H., & Zhang, T. (2025). Impact of Combined Application of Swine Manure Liquid and Phosphorus Fertilizers on Soil Phosphorus and Microbial Communities. *Sustainability*, *17*(5), 2037. https://doi.org/10.3390/su17052037

Rodríguez-Alegre, R., Zapata-Jiménez, J., You, X., Pérez-Moya, M., Sanchis, S., & García-Montaño, J. (2023). Nutrient recovery and valorisation from pig slurry liquid fraction with membrane technologies. *Science of the Total Environment*, *874*, 162548. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162548

Rosa, A., Pereira, N., Damaceno, F. M., & Júnior, L. A. Z. (2022). Pig slurry improves the productive performance of eucalypt and exceeds the mineral fertilization. *Revista Árvore*, *46*. https://doi.org/10.1590/0100-6762202246011

Santos, A. D., Silva, J. R., Castro, L. M., & Quinta-Ferreira, R. M. (2022). A biochemical methane potential of pig slurry. *Energy Reports*, *8*, 153–158. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.077

Secco, C., Luz, L.M. da, Pinheiro, E., Francisco, A.C. de, Puglieri, F.N., Piekarski, C.M., & Freire, F.M.C.S. (2020). Circular economy in the pig farming chain: Proposing a model for measurement. *Journal of Cleaner Production*, *260*, 121003.

Serra-Toro, A., Astals, S., Madurga, S., Mata-Álvarez, J., Mas, F., & Dosta, J. (2022). Ammoniacal nitrogen recovery from pig slurry using a novel hydrophobic/hydrophilic selective membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(5), 108434. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108434

Shi, B., Yin, C., Léonard, A., Jiao, J., Di Maria, A., Bindelle, J., & Yao, Z. (2023). Opportunities for centralized regional mode of manure and sewage management in pig farming: The evidence from environmental and economic performance. *Waste Management*, *170*, 240–251. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.09.020

Silva, I., Jorge, C., Brito, L., & Duarte, E. (2021). A pig slurry feast/famine feeding regime strategy to improve mesophilic anaerobic digestion efficiency and digestate hygienisation. *Waste Management & Research*, *39*(7), 947–955. https://doi.org/10.1177/0734242X20972794

Silveira, C. F., de Assis, L. R., de Sousa Oliveira, A. P., & Calijuri, M. L. (2021). Valorization of swine wastewater in a circular economy approach: Effects of hydraulic retention time on microalgae cultivation. *Science of the Total Environment*, *789*, 147861. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147861

Soares, C. A., Viancelli, A., Michelon, W., Sbardelloto, M., Camargo, A. F., Vargas, G. D. L. P., Fongaro, G., & Treichel, H. (2020). Biogas yield prospection from swine manure and placenta in real-scale systems on circular economy approach. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *25*, 101598. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101598

Sossidou, E. N., Banias, G. F., Batsioula, M., Termatzidou, S.-A., Simitzis, P., Patsios, S. I., & Broom, D. M. (2025). Modern Pig Production: Aspects of Animal Welfare, Sustainability and Circular Bioeconomy. *Sustainability*, *17*(11), 5184.

Soto-Herranz, M., Sánchez-Báscones, M., García-González, M. C., & Martín-Ramos, P. (2022). Comparison of the ammonia trapping performance of different gas-permeable tubular membrane system configurations. *Membranes*, *12*(11), 1104.

Sousa, S., Duarte, E., Mesquita, M., & Saraiva, S. (2021). Energetic valorization of cereal and exhausted coffee wastes through anaerobic co-digestion with pig slurry. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *5*, 642244.

Su, X., Zhang, T., Zhao, J., Mukherjee, S., Alotaibi, N. M., Abou-Elwafa, S. F., Tran, H.-T., & Bolan, N. S. (2024). Phosphorus fraction in hydrochar from co-hydrothermal carbonization of swine manure and rice straw: An optimization analysis based on response surface methodology. *Water*, *16*(15), 2208.

Tong, B.X., Zhang, L., Hou, Y., Oenema, O., Long, W., Velthof, G., Ma, W., & Zhang, F. (2023). Lower pork consumption and technological change in feed production can reduce the pork supply chain environmental footprint in China. *Nature Food*, *4*(1), 74–83.

Vásquez, P., Gallego, V., & Soto, J.D. (2024). Transforming MSMEs towards circularity: An attainable challenge with the appropriate technologies and approaches. *Environment Systems and Decisions*, *44*(3), 624–644.

Vega, E., Paredes, L., Marks, E. A. N., Singla, B., Castaño-Sánchez, O., Casas, C., Vilaplana, R., Mora, M., Ponsá, S., & Llenas, L. (2022). Application of vibrating reverse osmosis technology for nutrient recovery from pig slurry in a circular economy model. *Membranes*, *12*(9), 848.

Verbeeck, K., De Vrieze, J., Pikaar, I., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2021). Assessing the potential for *up-cycling* recovered resources from anaerobic digestion through microbial protein production. *Microbial Biotechnology*, *14*(3), 897–910.

Veuthey, M.J., Morillas-España, A., Sánchez-Zurano, A., Navarro-López, E., Acién, G., López-Segura, J. G., & Lafarga, T. (2022). Production of the marine microalga *Nannochloropsis gaditana* in pilot-scale thin-layer cascade photobioreactors using fresh pig slurry diluted with seawater. *Journal of Water Process Engineering*, *48*, 102869.

Wei, C.-Y., Pan, S.-Y., Lin, Y.-I., & Cao, T. N.-D. (2022). Anaerobic swine digestate valorization via energy-efficient electrodialysis for nutrient recovery and water reclamation. *Water Research*, *224*, 119066.

Xiong, W., Zhang, M., Wei, Y., Song, D., Luo, Y., Wang, J., Cheng, S., & Xiao, R. (2025). Co-hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass and swine manure for humic substance abundant target products: Impacts of hydrothermal temperature and feedstock composition. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *13*(3), 116280.

Xue, Y.-N., Luan, W.-x., Wang, H., & Yang, Y.-j. (2019). 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*, *238*, Article 117968. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117968

Zalewska, M., Błażejewska, A., Czapko, A., & Popowska, M. (2023). Pig manure treatment strategies for mitigating the spread of antibiotic resistance. *Scientific Reports*, *13*(1), Article 11999. https://doi.org/10.1038/s41598-023-39204-4

Zhang, W., Wang, S., Yin, F., Cao, Q., Lian, T., Zhang, H., Zhu, Z., & Dong, H. (2022a). Medium-chain carboxylates production from co-fermentation of swine manure and corn stalk silage via lactic acid: Without external electron donors. *Chemical Engineering Journal*, *439*, Article 135751. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135751

Zhang, A. H., Feng, B., Zhang, H., Jiang, J., Zhang, D., Du, Y., Cheng, Z., & Huang, J. (2022b). Efficient cultivation of *Porphyridium purpureum* integrated with swine wastewater treatment to produce phycoerythrin and polysaccharide. *Journal of Applied Phycology*, *34*(5), 2315–2326. https://doi.org/10.1007/s10811-022-02785-0

Zhu, Y., Yuan, G., Zhao, Z., Tang, Y., Li, P., & Han, J. (2023). Pig farm biogas slurry can effectively reduce the pH of saline-alkali soils. *Environmental Technology*, *44*(10), 1415–1425. https://doi.org/10.1080/09593330.2021.2003440