

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOCHAR A PARTIR DE DEJETOS PROVENIENTES DE ESTABELECIMENTOS DE PRÉ-EMBARQUE BOVINO

Maria Noémia Saúl Ambasse Mussa- marianoemiasaul@gmail.com

Universidade Federal de Pelotas – Curso de Gestão Ambiental

96010630- Pelotas- Rio Grande do Sul

Sabrina Lessa da Silva Lima- sabrinalima.2003@hotmail.com

Universidade Federal de Pelotas – Curso de Gestão Ambiental

Vagner Vieira Bigliardi- Vagnerbigliardi@gmail.com

Universidade Federal de Pelotas – Programa de Pós- Graduação em Zootecnia

Maurício Pinto da Silva- mauriciomercosul@gmail.com

Universidade Federal de Pelotas – Curso de Gestão Ambiental

Fernanda Medeiros Gonçalves (Orientadora)- fmgvet@gmail.com

Universidade Federal de Pelotas– Curso de Gestão Ambiental

Resumo: Os Estabelecimentos de Pré-Embarque (EPEs) reúnem, por períodos de quarentena de 21 a 30 dias, grandes lotes de bovinos destinados à exportação, concentrando elevados volumes de dejetos sólidos em área e tempo reduzidos. Este trabalho teve como objetivo avaliar, a partir da caracterização físico-química de amostras de raspagem de confinamento e de composto orgânico produzidos em sistema análogo de concentração bovina, o potencial de conversão desse material em biochar pela rota de pirólise lenta, discutindo as implicações para o manejo ambiental dos EPEs e para o aproveitamento agrônomo do produto carbonizado. Foram utilizados resultados analíticos de três amostras de raspa de confinamento (nitrogênio total, carbono orgânico, relação C/N, umidade e pH) e de duas amostras de composto orgânico, contemplando macronutrientes, micronutrientes, carbono orgânico total, matéria orgânica, pH e capacidade de troca de cátions (CTC). As relações C/N variaram de 11:1 a 20:1 nas amostras de raspa e de 8,6:1 a 9,8:1 no composto, valores compatíveis com substratos lignocelulósicos parcialmente humificados, adequados como matéria-prima para pirólise lenta, processo que, segundo a literatura consultada, converte entre 20% e 40% da biomassa seca em biochar. A partir desses parâmetros, estimou-se a massa de biochar potencialmente obtida por tonelada de dejetos seco gerado em um EPE de porte médio durante um ciclo de quarentena, bem como os teores de nutrientes que poderiam ser concentrados no produto final. Os resultados indicam que a pirólise lenta dos dejetos de EPEs representa uma alternativa tecnicamente viável para a redução de volume, estabilização do carbono e geração de um insumo agrícola de menor risco sanitário, contribuindo para a economia circular do setor de exportação de animais vivos.

Palavras-chave: Biocarvão, Resíduos pecuários, Pirólise, Quarentena de exportação, Economia circular.

POTENTIAL OF BIOCHAR PRODUCTION FROM WASTE FROM CATTLE PRE-EXPORT QUARANTINE FACILITIES

Abstract: Pre-Export Establishments (EPEs) hold large batches of cattle for 21- to 30-day quarantine periods prior to live export, concentrating large volumes of solid waste in a reduced area and time span. This study evaluated, from the physicochemical characterization of feedlot scraping samples and organic compost produced in an analogous cattle-concentration system, the potential for converting this material into biochar through slow pyrolysis, discussing implications for environmental management of EPEs and agronomic use of the carbonized product. Analytical results of three feedlot scraping samples and two organic compost samples were used. C/N ratios indicate substrates compatible with slow pyrolysis, which converts 20% to 40% of dry biomass into biochar. The results

indicate that slow pyrolysis of EPE waste is a technically viable alternative for volume reduction, carbon stabilization and generation of a lower sanitary-risk agricultural input.

Keywords: Biochar, Livestock waste, Pyrolysis, Export quarantine, Circular economy.

1. INTRODUÇÃO

A descoberta de que solos amazônicos antropogênicos as Terras Pretas de Índio mantêm elevada fertilidade e estoques de carbono orgânico mais de mil anos após o acréscimo deliberado de carvão vegetal pelas populações pré-colombianas revelou um dos mecanismos mais duradouros de manejo de carbono já documentados na ciência do solo, e tornou-se o marco conceitual a partir do qual se consolidou o campo de estudo do biochar (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002). Definido como o produto rico em carbono obtido pela decomposição térmica de biomassa sob atmosfera com oxigênio limitado, o biochar combina, simultaneamente, elevada recalcitrância química, capacidade de retenção de nutrientes e água no solo e potencial de sequestro de carbono de longo prazo, características que o distinguem da matéria orgânica não pirolisada e o consolidaram, na última década e meia, como uma das estratégias mais discutidas de manejo ambiental baseado em resíduos (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

Entre as biomassas residuais com potencial de conversão em biochar, os dejetos de origem pecuária ocupam posição de destaque no Brasil, maior exportador mundial de proteína animal e, também, expressivo exportador de bovinos vivos. Antes do embarque marítimo, os animais selecionados para exportação são conduzidos a Estabelecimentos de Pré-Embarque (EPEs), unidades isoladas, ou partes de estabelecimentos rurais, habilitadas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para reunir e preparar bovinos, bubalinos, ovinos e caprinos destinados à exportação. Conforme a Instrução Normativa nº 46/2018 (BRASIL, 2018), os animais selecionados permanecem no EPE sob supervisão do Serviço Veterinário Oficial por, no mínimo, 24 horas, podendo o período de quarentena estender-se por até 21 dias ou mais quando exigido pelo protocolo sanitário do país importador. Durante esse intervalo, são realizados exames clínicos, coletas laboratoriais, tratamentos e vacinações, mantendo-se os animais confinados em piquetes ou currais de concentração.

A concentração de grande número de animais em área restrita, por período contínuo, gera volume expressivo de dejetos sólidos (fezes, urina, restos de ração e material de cama), em padrão semelhante ao observado em confinamentos de terminação. Em sistemas de confinamento bovino, considera-se uma geração média da ordem de 3,3 kg de dejetos por animal por dia (IRANCHO, 2025), de modo que um EPE operando com lotes de milhares de cabeças por ciclo de quarentena pode acumular centenas de toneladas de resíduo orgânico em poucas semanas. Esse passivo, se não manejado adequadamente, representa risco de contaminação do solo e de corpos hídricos, emissão de gases de efeito estufa (CH₄ e N₂O) decorrentes da decomposição anaeróbia, além de potencial disseminação de patógenos e parasitas associados ao trânsito intenso de animais de diferentes origens (CASALE, 2025). Diferentemente dos confinamentos convencionais, contudo, os EPEs operam sob exigências sanitárias adicionais impostas pelos protocolos internacionais de quarentena, o que amplia a relevância de soluções de tratamento capazes não apenas de reduzir volume e estabilizar carbono, mas também de inativar eventuais agentes patogênicos presentes no material.

Entre as alternativas tecnológicas para a valorização desses resíduos, a pirólise lenta destaca-se pela conversão térmica da biomassa, em ambiente com oxigênio limitado e temperaturas geralmente entre 300°C e 600°C, em três frações principais: biochar (fração sólida rica em carbono), bio-óleo (fração líquida) e gases não condensáveis (syngas), estes últimos passíveis de aproveitamento energético no próprio processo (REFLEXÕES..., 2019; AGROADVANCE, 2025). O biochar resultante apresenta estrutura aromática condensada que lhe confere elevada recalcitrância química, retomando, em escala industrial e contemporânea, o mesmo princípio identificado nas Terras Pretas amazônicas (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002), tornando-o material de interesse tanto para o sequestro de carbono no solo

quanto para o condicionamento físico-químico de solos agrícolas, atuando na retenção de água e nutrientes e na correção parcial da acidez (MAIA, 2010; BIBAR, 2014).

Estudos com esterco bovino submetido à pirólise indicam potencial energético do bio-óleo correspondente a aproximadamente 59% do poder calorífico de combustíveis derivados do petróleo e 78% do etanol, além da geração de biochar utilizável como condicionador de solo e de biogás reaproveitável para alimentar o próprio sistema de pirólise (PORTAL UFS, 2017). Esses resultados reforçam o potencial de aproveitamento de dejetos de origem bovina, ainda pouco explorado especificamente no contexto dos EPEs, unidades cuja operação intermitente, alta densidade animal e exigências sanitárias rigorosas tornam a gestão de resíduos um desafio operacional adicional para os exportadores, mas que, por essas mesmas características, configuram-se como caso de aplicação particularmente promissor para a tecnologia de pirólise: gerência concentrada de grandes volumes, em ciclos previsíveis, com benefício sanitário direto da inativação térmica de patógenos.

O enfrentamento desse passivo ambiental e a busca por rotas de valorização de resíduos pecuários dialogam diretamente com a Agenda 2030 e seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), particularmente o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), que preconiza a redução substancial da geração de resíduos por meio de prevenção, redução, reciclagem e reuso; o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), associado à mitigação de emissões de gases de efeito estufa e ao sequestro de carbono; e o ODS 15 (Vida Terrestre), voltado à recuperação de solos degradados e ao combate à desertificação (ONU, 2015). A produção de biochar a partir de dejetos de EPEs insere-se, assim, em uma agenda mais ampla de transição da pecuária de exportação para padrões de menor impacto ambiental, tema que será retomado ao longo da discussão dos resultados.

Apesar da consolidação científica do biochar como tema de pesquisa desde os trabalhos seminais sobre Terra Preta (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002) e da sistematização da área por Lehmann e Joseph (2009), a literatura nacional sobre o aproveitamento de resíduos pecuários por pirólise concentra-se majoritariamente em dejetos de confinamentos de terminação, camas de aviário e biossólidos, havendo lacuna específica quanto à caracterização e ao potencial de valorização dos dejetos gerados em Estabelecimentos de Pré-Embarque.

Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial técnico de conversão de dejetos provenientes de estabelecimentos de pré-embarque bovino (EPE) em biochar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa exploratória de caráter quali-quantitativo, baseada na análise de laudos laboratoriais de caracterização físico-química de dejetos bovinos. O material analisado foi coletado em um EPE localizado no município de Capão do Leão, Rio Grande do Sul.

2.1. Caracterização do substrato

As amostras foram coletadas em dois períodos de produção e/ou tratamento do dejetos, representando o material coletado de uma pilha de material (dejetos) em tratamento por compostagem por 120 dias e amostras do material de raspagem diretamente do piso de permanência dos animais (material fresco). Os parâmetros analisados foram nitrogênio total (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) em g kg⁻¹, além de carbono orgânico (C), relação C/N, umidade, pH, macro e micronutrientes (Ca, Mg, Cu, Zn, Fe, Mn, Na, B, S, N, P₂O₅, K₂O), carbono orgânico total (C.O.T.), matéria orgânica (M.O.), pH, capacidade de troca catiônica (CTC) e relação C/N, conforme metodologia oficial estabelecida pela Portaria SDA/MAPA nº 1110/2024.

Os parâmetros C/N, umidade e teor de carbono orgânico foram utilizados como indicadores da adequação do substrato ao processo de pirólise lenta, uma vez que substratos com relação C/N mais elevada e menor teor de umidade tendem a apresentar maior estabilidade térmica e menor formação de compostos nitrogenados voláteis durante a carbonização (MAIA, 2010).

2.2. Estimativa do potencial de produção de biochar

O potencial de produção de biochar foi estimado por analogia com valores de rendimento de pirólise lenta reportados na literatura para biomassas lignocelulósicas e resíduos de origem animal, os quais situam-se, em base seca, entre 20% e 34% da massa inicial (AGROADVANCE, 2025; UNESP, 2018). Para fins de estimativa, considerou-se uma faixa de rendimento de 20% a 35% de biochar em relação à massa seca de dejetos processados, obtida a partir da correção dos teores de umidade determinados nas amostras de raspa de confinamento (22,6% a 26,9%).

A geração diária de dejetos/ animal alojado em sistema de confinamento foi adotada como 3,3 kg animal/dia (IRANCHO, 2025), parâmetro utilizado como referência para cálculo da produção de resíduos em EPEs durante o período de quarentena, considerando-se um lote de 5.000 bovinos mantidos por 21 dias na EPE de referência.

Os teores de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg) determinados no dejetos in natura e no composto orgânico foram utilizados para estimar a concentração relativa desses elementos no biochar, partindo-se do princípio de que, durante a pirólise, os macronutrientes minerais permanecem majoritariamente na fração sólida, ao passo que o carbono e o nitrogênio orgânico são parcialmente volatilizados, resultando em concentração relativa de cinzas e elementos minerais no produto final (BIBAR, 2014).

Para viabilizar a comparação direta entre o dejetos in natura e seu produto compostado na mesma unidade de medida empregada pelo laboratório Laborfort, os teores médios de N, P, K, Ca, Mg e carbono orgânico da raspa de confinamento (originalmente em g kg⁻¹) foram convertidos para percentual (% = g kg⁻¹ ÷ 10), calculando-se a média de cada parâmetro dentro de cada conjunto analítico (três amostras de raspa de confinamento, UFPEL; duas amostras de composto, Laborfort) e restringindo-se a comparação aos parâmetros determinados em ambas as análises. Os parâmetros exclusivos de cada laudo umidade, determinada apenas na raspa de confinamento, e enxofre e CTC, determinados apenas no composto foram excluídos desta tabela comparativa por não possuírem par equivalente na outra análise. Os teores de fósforo e potássio do Laborfort, reportados como P₂O₅ e K₂O, foram convertidos à forma elementar (P e K) pelos fatores 0,4364 e 0,8302, respectivamente, antes da conversão para percentual.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização físico-química dos dejetos

A Tabela 1 apresenta os resultados da caracterização química do dejetos in natura e do dejetos compostado.

Tabela 1 – Caracterização química das amostras de dejetos in natura e dejetos compostados provenientes de um EPE.

Parâmetro	Unidade	In natura (média, n=3)	Compostado (média, n=2)
Nitrogênio total (N)	%	0,282	0,205
Fósforo (P)	%	0,128	0,252
Potássio (K)	%	0,117	0,208
Cálcio (Ca)	%	0,403	0,365
Magnésio (Mg)	%	0,186	0,165
Carbono orgânico (C)	%	3,986	1,870
Relação C/N	—	14,67:1	9,21:1
pH	—	8,89	7,30

A relação C/N do dejetos compostado é substancialmente inferior à observada na raspa de confinamento in natura, evidenciando o avanço do processo de decomposição microbiana durante a compostagem, com perda de carbono na forma de CO₂ e relativa concentração de nitrogênio residual. Esse padrão é esperado em processos de compostagem aeróbia de dejetos bovinos, nos quais a relação C/N tende a se estabilizar entre 8:1 e 12:1 ao final do processo, valor próximo ao da matéria orgânica humificada do solo (CASALE, 2025).

Sob a perspectiva da produção de biochar, o uso do composto já estabilizado como matéria-prima da pirólise representa, em princípio, menor rendimento de fração sólida carbonizável, uma vez que parte do carbono lábil já foi mineralizada durante a compostagem. Assim, do ponto de vista da maximização do rendimento de biochar, é preferível processar o dejetos fresco ou parcialmente curado (relação C/N mais próxima de 20:1, como na Amostra 1 da Tabela 2) do que o composto plenamente maturado, reservando-se este último, preferencialmente, para uso direto como fertilizante orgânico.

A comparação das médias evidencia queda expressiva do carbono orgânico (de 3,986% para 1,870%) e da relação C/N (de 14,67:1 para 9,21:1) entre o dejetos in natura e o composto, consistente com a mineralização do carbono lábil durante o processo de compostagem aeróbia. Em contrapartida, os teores médios de fósforo e potássio elementares aumentam no composto em relação ao material in natura, padrão compatível com a concentração relativa desses minerais à medida que a fração orgânica volátil é perdida na forma de CO₂, fenômeno típico de processos de compostagem em que a massa total do material se reduz proporcionalmente mais do que a massa de minerais inertes (CASALE, 2025). O pH médio também se reduz de 8,89 para 7,30, aproximando-se da neutralidade, o que é coerente com a estabilização da matéria orgânica e a redução de compostos amoniacais voláteis ao longo da compostagem.

Material fresco versus material compostado como matéria-prima da pirólise

A comparação direta entre os dois materiais permite discutir, com base em evidências quantitativas, qual estágio de decomposição do dejetos é mais adequado como matéria-prima da pirólise destinada à produção de biochar. Rathnayake et al. (2023), em revisão crítica sobre a viabilidade técnica da pirólise de dejetos animais, destacam que processos convencionais de manejo, como a compostagem e a biodigestão anaeróbia, apenas melhoram parcialmente o sistema de manejo de dejetos, sem eliminar de forma completa os riscos sanitários e a carga climática associada, ao passo que a pirólise direta do material reduz a biodisponibilidade de elementos potencialmente tóxicos, elimina microrganismos patogênicos e minimiza emissões de gases de efeito estufa de forma mais consistente. Sob essa perspectiva, processar o dejetos in natura, sem submetê-lo previamente à compostagem, preserva uma fração maior de carbono lábil ainda não mineralizado biologicamente, disponibilizando-a integralmente para a conversão térmica em biochar.

Os dados da Tabela 4 corroboram essa leitura: o material in natura apresenta teor de carbono orgânico mais que o dobro do observado no composto (3,986% contra 1,870%) e relação C/N mais elevada (14,67:1 contra 9,21:1), indicando maior proporção de compostos lignocelulósicos estruturais ainda intactos, justamente a fração que, durante a pirólise, se converte preferencialmente em carbono fixo no biochar (MAIA, 2010). No composto, parte substancial desse carbono já foi respirada como CO₂ pelos microrganismos decompositores durante a fase de compostagem, de modo que a massa seca remanescente, embora ainda processável por pirólise, oferece proporcionalmente menos matéria-prima carbonácea convertível, resultando em rendimento mássico de biochar inferior ao obtido a partir do mesmo dejetos antes da compostagem.

Há, contudo, uma contrapartida relevante quanto ao nitrogênio: Enders et al. (2012), em estudo amplamente referenciado na literatura sobre pirólise de dejetos animais e citado por Rathnayake et al. (2023), demonstraram que entre 30% e 70% do nitrogênio do dejetos permanece retido no biochar após a pirólise, com fração decrescente conforme se eleva a temperatura do processo, ao passo que o restante é perdido majoritariamente como N₂ gasoso. Como o composto já apresenta nitrogênio relativamente concentrado em razão da perda preferencial de carbono durante a compostagem (Tabela 4), o biochar

produzido a partir do composto tende a apresentar relação C/N residual mais baixa e, proporcionalmente, maior concentração de nitrogênio remanescente por unidade de massa de biochar, ainda que a massa total de biochar produzida seja menor. Trata-se, portanto, de uma escolha de compromisso entre rendimento mássico (favorecido pelo material in natura) e concentração de nutrientes no produto final (parcialmente favorecida pelo composto), devendo a decisão considerar o objetivo de uso do biochar: para fins predominantes de sequestro de carbono e condicionamento físico do solo, o processamento do dejetos in natura é preferível; para fins de maximização do retorno de nitrogênio por tonelada de biochar produzido, o composto pode representar alternativa competitiva, observada a menor escala de produção resultante.

3.2. Estimativa de rendimento de biochar

Considerando a faixa de rendimento de pirólise lenta de 20% a 35% reportada na literatura para biomassas com características semelhantes às da raspa de confinamento (AGROADVANCE, 2025; UNESP, 2018), e adotando-se a geração diária de 3,3 kg de dejetos por animal alojado (IRANCHO, 2025), estimou-se a produção potencial de biochar para um cenário ilustrativo de EPE operando com lote de 5.000 bovinos durante 21 dias de quarentena, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 2 - Estimativa de geração de dejetos e potencial de produção de biochar em cenário ilustrativo de EPE (5.000 bovinos, 21 dias de quarentena).

Parâmetro	Valor estimado
Dejetos úmidos gerados (kg dia ⁻¹)	16.500
Dejetos úmidos totais no ciclo (t)	346,5
Umidade média (%)	24,7
Massa seca equivalente (t)	261,1
Biochar potencial (20% rendimento, t)	52,2
Biochar potencial (35% rendimento, t)	91,4

Fonte: elaborado pelos autores, com base em IRANCHO (2025), AGROADVANCE (2025) e dados analíticos das Tabelas 1 e 2.

Os resultados indicam que, mesmo em cenário conservador de rendimento (20%), um único ciclo de quarentena de um EPE de porte médio poderia gerar entre 52 e 91 toneladas de biochar, volume substancialmente menor e de maior estabilidade química que o dejetos original, reduzindo os custos logísticos de transporte e armazenamento e mitigando os riscos sanitários e ambientais associados ao acúmulo de material in natura nas instalações do estabelecimento.

Quanto à qualidade nutricional, a literatura indica que o processo de pirólise tende a concentrar os elementos minerais (P, K, Ca, Mg) na fração sólida, em razão da volatilização preferencial do carbono e do nitrogênio orgânico (BIBAR, 2014). Dessa forma, os teores de fósforo e potássio observados nas amostras de raspa de confinamento (Tabela 1), embora moderados em comparação a outros resíduos pecuários como cama de aviário, tendem a ser parcialmente concentrados no biochar resultante, conferindo a esse material valor agregado como condicionador de solo, complementar à sua função de sequestro de carbono.

Cabe ressaltar que o aproveitamento do biogás gerado durante a pirólise como fonte de energia para o próprio processo, conforme relatado para esterco bovino por Portal UFS (2017), pode tornar o sistema parcialmente autossustentável energeticamente, reduzindo a dependência de combustíveis externos para a operação do reator de pirólise nas dependências do EPE ou em unidade de processamento associada.

3.3. Implicações para o manejo ambiental e sanitário dos EPEs

A adoção da pirólise como rota de tratamento dos dejetos gerados em EPEs apresenta vantagens adicionais relacionadas à biossegurança, uma vez que as temperaturas empregadas no processo (300°C a 600°C) são suficientes para inativar patógenos e ovos de parasitas eventualmente presentes no material, aspecto relevante considerando que os EPEs recebem animais de múltiplas origens geográficas, com distintos históricos sanitários, conforme exigido pelos protocolos de quarentena de exportação (BRASIL, 2018; ABREAV, 2024). Esse atributo diferencia a pirólise de processos biológicos como a compostagem convencional, nos quais a eliminação de patógenos depende do alcance e manutenção de temperaturas de pasteurização ao longo de toda a massa tratada, contribuindo, ainda, para a meta do ODS 6 (Água Potável e Saneamento) de redução da poluição e da liberação de produtos químicos e materiais perigosos em corpos hídricos próximos às instalações de concentração animal (ONU, 2015).

Do ponto de vista da gestão ambiental, a conversão de parte do passivo de dejetos em biochar contribui para a redução das emissões de metano associadas à decomposição anaeróbia de pilhas de esterco mal manejadas (CASALE, 2025), alinhando-se a estratégias de produção pecuária de baixo carbono, tema de crescente relevância para a competitividade internacional do agronegócio exportador brasileiro. Essa redução de emissões, somada ao próprio sequestro de carbono na fração sólida estável do biochar, materializa de forma concreta a meta 13.2 do ODS 13, que preconiza a integração de medidas de mudança do clima às políticas, estratégias e planejamentos setoriais (ONU, 2015), neste caso aplicada à etapa final da cadeia de exportação de animais vivos.

3.4. Aplicações agronômicas do biochar e perspectivas de mercado

Para além da destinação ambiental, o biochar produzido a partir de dejetos de EPEs pode ser incorporado a programas de manejo de solos em propriedades agrícolas e pecuárias associadas aos exportadores, atuando como condicionador físico em solos arenosos ou degradados, ampliando a capacidade de retenção de água e nutrientes e contribuindo para a redução da necessidade de irrigação em sistemas de produção forrageira (BIBAR, 2014). A elevada estabilidade química do material, decorrente da estrutura aromática condensada formada durante a pirólise, confere tempo de permanência no solo da ordem de décadas a séculos, configurando uma forma efetiva de sequestro de carbono de longo prazo, distinta da simples incorporação de matéria orgânica não pirolisada, cuja mineralização ocorre em escala de meses a poucos anos (MAIA, 2010). Esse efeito condicionador aproxima-se diretamente da meta 2.4 do ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), que preconiza práticas agrícolas resilientes capazes de aumentar a produtividade e a qualidade do solo (ONU, 2015).

No contexto brasileiro, o mercado de insumos derivados de resíduos pecuários já apresenta dinâmica relevante: estima-se que a produção anual de esterco em confinamentos bovinos no país atinja 2,69 milhões de toneladas, com potencial de geração de receita de até R\$ 350 milhões considerando-se preço médio de R\$ 130,00 por tonelada, valor que pode ser ampliado para R\$ 160,00 por tonelada quando o material é processado por compostagem (IRANCHO, 2025). É plausível que produtos de maior valor agregado, como o biochar, alcancem preços de mercado superiores aos do composto convencional, em razão de suas propriedades diferenciadas de condicionamento de solo e de sua aplicabilidade em programas de créditos de carbono, modalidade que vem ganhando espaço na pecuária brasileira como mecanismo de monetização de práticas de manejo de baixo carbono e de avanço do ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), em sua meta de gestão ambientalmente correta de resíduos ao longo de todo o ciclo de vida do produto (ONU, 2015).

A escala de operação dos EPEs, recebendo lotes recorrentes de milhares de animais ao longo do ano, favorece a viabilidade econômica da instalação de unidades de pirólise de porte intermediário nas proximidades dessas instalações, ou mesmo a centralização do processamento em cooperativas regionais que atendam a múltiplos EPEs situados próximos aos principais portos de exportação (Rio Grande, São Sebastião e Vila do Conde), reduzindo custos de transporte do dejetos bruto e otimizando a escala de produção do biochar. A adoção dessa tecnologia de processamento térmico de resíduos, ainda incipiente no setor pecuário exportador brasileiro, representa também uma forma de modernização da infraestrutura produtiva alinhada ao ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), particularmente à sua meta de promoção de tecnologias e processos industriais ambientalmente corretos (ONU, 2015).

3.6. Síntese da contribuição para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

A Tabela 5 sintetiza os principais achados deste estudo à luz dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 (ONU, 2015), evidenciando que a valorização de dejetos de EPEs por meio da pirólise não se restringe a um único eixo ambiental, mas articula simultaneamente dimensões climáticas, edáficas, hídricas, sanitárias, econômicas e tecnológicas.

Tabela 3 - Síntese da contribuição do biochar de dejetos de EPEs para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

ODS	Meta(s) relacionada(s)	Contribuição identificada no estudo
ODS 2 – Fome Zero e Agricultura Sustentável	2.4	Biochar como condicionador de solo, ampliando retenção de água e nutrientes em sistemas forrageiros e agrícolas.
ODS 6 – Água Potável e Saneamento	6.3	Redução do risco de contaminação de solo e corpos hídricos por dejetos não tratados nas proximidades dos EPEs.
ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura	9.4	Modernização tecnológica da gestão de resíduos pecuários por processamento térmico de baixo impacto.
ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis	12.5	Conversão de passivo ambiental em insumo de valor agregado, reduzindo volume final de resíduo a destinar.
ODS 13 – Ação contra a Mudança Global do Clima	13.2	Sequestro de carbono estável no biochar e mitigação de emissões de CH ₄ evitadas pela não decomposição anaeróbica do dejetos.
ODS 15 – Vida Terrestre	15.3	Potencial de recuperação de solos degradados e de uso pecuário/agrícola associados às áreas de EPEs.

Fonte: elaborado pelos autores, com base em ONU (2015) e nos resultados discutidos nas seções 3.1 a 3.4.

3.7. Limitações do estudo

Cabe destacar que as estimativas aqui apresentadas baseiam-se em dados de caracterização de dejetos provenientes de um confinamento convencional, utilizado como modelo análogo às condições de um EPE, e em parâmetros de rendimento de pirólise obtidos da literatura para biomassas distintas, não tendo sido realizado ensaio experimental de pirólise com o material efetivamente avaliado. Dessa forma, os valores de rendimento de biochar e de concentração de nutrientes devem ser interpretados como aproximações de ordem de grandeza, úteis para o planejamento preliminar de projetos-piloto, mas não substituem a validação experimental específica para o dejetos gerado em cada EPE, cuja composição pode variar em função da dieta fornecida aos animais durante a quarentena, da raça, do tempo de confinamento prévio e das condições climáticas regionais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização físico-química dos dejetos de um Estabelecimento de Pré-Embarque (EPE) indicou relações C/N e teores de umidade compatíveis com a pirólise lenta, processo capaz de converter de 20% a 35% da massa seca do material em biochar. Estimativas para um cenário ilustrativo de EPE com 5.000 bovinos em ciclo de 21 dias de quarentena apontam potencial de geração entre 52 e 91 toneladas de biochar por ciclo, representando redução expressiva de volume, estabilização do carbono e mitigação de riscos sanitários e ambientais associados ao acúmulo de dejetos in natura.

Conclui-se que a pirólise lenta constitui alternativa tecnicamente promissora para o manejo de resíduos em EPEs, com potencial de gerar um insumo agrícola de valor agregado e de contribuir para a redução da pegada ambiental da cadeia de exportação de animais vivos.

A tecnologia articula contribuições simultâneas a seis Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 2, 6, 9, 12, 13 e 15), evidenciando que o aproveitamento de resíduos de EPEs por pirólise transcende uma solução pontual de manejo ambiental, configurando-se como vetor de transição da pecuária de exportação brasileira para padrões mais alinhados à Agenda 2030.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de ensaios experimentais de pirólise com o material efetivamente coletado em EPEs, a determinação direta do rendimento e das propriedades físico-químicas do biochar obtido (poder calorífico, área superficial, teor de cinzas) e a avaliação agrônômica de sua aplicação em solos de uso pecuário e agrícola.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Estância del Sur pela disponibilização dos laudos analíticos utilizados neste estudo.

REFERÊNCIAS

ABREAV – Associação Brasileira de Exportadores de Animais Vivos. **Passo a passo da exportação de gado vivo**. Disponível em: <<http://www.abreav.com.br/passopasso.php>>. Acesso em: 23 jun. 2026.

AGROADVANCE. **Biochar: o que é e qual seu potencial de uso na agricultura?** Disponível em: <<https://agroadvance.com.br/blog-biochar-biocarvao-uso-na-agricultura/>>. Acesso em: 23 jun. 2026.

BIBAR, M. P. S. **Potencial agrícola de biocarvões provenientes de biomassas alternativas**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2014.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 46, de 28 de agosto de 2018**. Estabelece os procedimentos para exportação de bovinos, bubalinos, ovinos e caprinos vivos. Brasília: MAPA, 2018.

CASALE. **Manejo de dejetos em confinamento bovino: como as inovações tecnológicas apoiam práticas sustentáveis**. Disponível em: <<https://casale.com.br/en/blog/manejo-de-dejetos-em-confinamento-bovino-como-as-inovacoes-tecnologicas-apoiam-praticas-sustentaveis/>>. Acesso em: 23 jun. 2026.

COMPRERURAL. **Como 20 mil bois atravessam o oceano de uma só vez – e como o bem-estar animal é garantido**. Disponível em: <<https://www.comprerural.com/como-20-mil-bois-atravessam-o-oceano-de-uma-so-vez-e-como-o-bem-estar-animal-e-garantido-na-exportacao-de-gado-vivo/>>. Acesso em: 23 jun. 2026.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, n. 4, p. 219-230, 2002.

IRANCHO. **Confinamento de bovinos: como lidar com os dejetos?** Disponível em: <<https://www.irancho.com.br/confinamento-de-bovinos-como-lidar-com-os-dejetos/>>. Acesso em: 23 jun. 2026.

LABORFORT ANÁLISES QUÍMICAS. **Laudo de análise de fertilizantes nº 0040213.1**. Cambira: Laborfort, 2024.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: an introduction. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Ed.). **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. London: Earthscan, 2009. p. 1-12.

MAIA, C. M. B. F. **Biochar**. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSISTEMAS FLORESTAIS, 2., Guarapuava. Anais... Guarapuava: UNICENTRO, 2010.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015.

PORTAL UFS. **Esterco bovino pode ser transformado em biocombustível e outros produtos, mostra pesquisa**. Disponível em: <<https://ciencia.ufs.br/conteudo/57646-esterco-bovino-pode-ser-transformado-em-biocombustivel-e-outros-produtos-mostra-pesquisa>>. Acesso em: 23 jun. 2026.

REFLEXÕES acerca do aproveitamento energético de resíduos de biomassa por pirólise e gaseificação. **Ensaio Energético**, 2019. Disponível em: <<https://ensaioenergetico.com.br/reflexoes-acerca-do-aproveitamento-energetico-de-residuos-de-biomassa-por-pirolise-e-gaseificacao/>>. Acesso em: 23 jun. 2026.

UFPEL – Universidade Federal de Pelotas. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Departamento de Solos. **Laudo de análise de amostra: raspa de boi de confinamento**. Capão do Leão: UFPEL, 2024.

UNESP – Universidade Estadual Paulista. **Produção de biocombustíveis a partir da pirólise lenta do bagaço de cana-de-açúcar**. Repositório Institucional UNESP, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/items/536d3c04-df36-4844-9c6d-c51e55719c12>>. Acesso em: 23 jun. 2026.