

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS - CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS - PPGCAMB

PATRICIA FUCK DE ANDRADE

**DESEMPENHO DO BONECHAR COMO FONTE DE FÓSFORO: UMA REVISÃO
BIBLIOMÉTRICA, CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO NA CULTURA DE ALFACE**

**LAGES
2024**

PATRICIA FUCK DE ANDRADE

**DESEMPENHO DO BONECHAR COMO FONTE DE FÓSFORO: UMA REVISÃO
BIBLIOMÉTRICA, CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO NA CULTURA DE ALFACE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Mari Lucia Campos
Co-Orientador: Prof. Dr. Luiz Paulo Rauber

**LAGES
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Andrade, Patricia Fuck de
DESEMPENHO DO BONECHAR COMO FONTE DE
FÓSFORO: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA,
CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO NA CULTURA DE
ALFACE / Patrcia Fuck de Andrade. -- 2024.
21 p.

Orientadora: Mari Lucia Campos
Coorientador: Luiz Paulo Rauber
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages, 2024.

1. carvão de osso. 2. valorização de resíduos. 3. pirólise. 4.
alface. I. Campos, Mari Lucia . II. Rauber, Luiz Paulo . III.
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais. IV. Título.

PATRICIA FUCK DE ANDRADE

**DESEMPENHO DO BONECHAR COMO FONTE DE FÓSFORO: UMA REVISÃO
BIBLIOMÉTRICA, CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO NA CULTURA DE ALFACE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais,

Banca Examinadora:

Orientador: _____
Profª. Drª. Mari Lucia Campos
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro 1: _____
Prof. Dr. Flávio José Simioni
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro 2: _____
Profª. Drª. Caroline Aparecida Matias
Universidade Federal de Santa Catarina

Aos meus pais, meu marido, que com muito carinho e apoio não mediram esforços para que eu chegassem até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela força, sabedoria e coragem que me acompanharam durante todo esse processo, sem os quais nada seria possível.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a minha orientadora, Profa. Mari Lucia Campos por sua orientação, paciência e dedicação ao longo dessa jornada. Sua sabedoria e entusiasmo foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por acreditar em meu potencial, por suas valiosas sugestões e por sempre me motivar a seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis. Ao meu coorientador Luiz Paulo Rauber, pela contribuição significativa para o meu trabalho. Suas contribuições foram valiosas e enriquecedoras.

Aos meus familiares, especialmente à minha Mãe Lucilene por seu amor incondicional, apoio e compreensão. Agradeço por sempre estar ao meu lado, acreditando em mim e me incentivando a persistir nos momentos de dúvida.

Aos meus amigos, colegas de curso, que se tornaram uma verdadeira rede de apoio ao longo dessa jornada. Agradeço pelas trocas de ideias, pelos momentos de descontração e, especialmente, pela amizade que fizeram deste percurso uma experiência mais leve e prazerosa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para o sucesso deste trabalho, meu sincero agradecimento.

Por fim, dedico este trabalho ao meu marido Jonatan, que foi essencial em cada passo desta jornada. Seu apoio incondicional, amor e inspiração foram fundamentais para que eu superasse os desafios e chegasse até aqui. Agradeço por estar ao meu lado, acreditando em mim e me incentivando em todos os momentos da minha trajetória acadêmica.

“Não desista de seu sonho.”

(Augusto Cury)

RESUMO

A produção de carne gera grandes volumes de resíduos, como ossos, que podem causar sérios impactos ambientais caso não sejam adequadamente manejados. A pirólise desses resíduos é uma alternativa sustentável para a sua utilização, transformando-os em *bonechar*, um produto de grande valor agronômico. O *bonechar* tem mostrado grande potencial como fertilizante, oferecendo benefícios significativos para a fertilidade do solo e para a agricultura sustentável. Este estudo teve como objetivo realizar uma revisão bibliométrica sobre o desempenho do *bonechar*, caracterizar suas propriedades físico-químicas e avaliar seus efeitos como fonte de fósforo no cultivo de alface. Para atingir esse objetivo, foram realizados dois experimentos. O primeiro consistiu na quantificação dos teores de fósforo, cálcio e magnésio no solo após a incubação com *bonechars*. O segundo experimento foi voltado para a avaliação do desempenho dos *bonechars* no cultivo de alface, analisando o efeito da aplicação de dois tipos de *bonechar* no crescimento e desenvolvimento das plantas. Os tratamentos avaliados foram: Testemunha (sem fertilização), Super Fosfato Triplo (STF), *bonechar* 1 e *bonechar* 2. O experimento foi conduzido em ambiente controlado utilizando solo cambisolô húmico distrófico léptico de Lages, SC. As variáveis analisadas incluíram o pH, a condutividade elétrica e os teores de fósforo, cálcio e magnésio no solo. A análise estatística dos dados foi realizada utilizando ANOVA, seguida pelo teste de Tukey, a fim de verificar a diferença entre os tratamentos, com um nível de significância de 5%. Os resultados indicaram que, embora não tenha sido observada uma diferença significativa entre os tratamentos em relação à quantificação de fósforo, cálcio e magnésio, os *bonechars*, de modo geral, aumentaram os níveis de fósforo no solo, o que é um indicativo de seu potencial como fonte de nutriente. O aumento nos teores de fósforo pode ser particularmente relevante para melhorar a fertilidade do solo e proporcionar uma maior disponibilidade desse nutriente para as plantas. No segundo experimento, que avaliou o desempenho dos *bonechars* no cultivo de alface, o *bonechar* 2 se destacou como a fonte mais eficiente de fósforo. Esse tratamento promoveu um aumento significativo no crescimento das plantas, especialmente na parte aérea, o que pode ser atribuído à alta concentração de fósforo e à sua alta solubilidade (94%). Esse aumento no crescimento da alface foi acompanhado por um maior acúmulo de biomassa e nutrientes, como cálcio, magnésio e potássio, nos tecidos das plantas. Esses resultados indicam que o *bonechar* 2 não só é uma fonte eficaz de fósforo, como também pode melhorar a disponibilidade de outros nutrientes essenciais para o desenvolvimento saudável das plantas. Dessa forma, os resultados sugerem que o *bonechar* 2 apresenta um grande potencial para substituir fertilizantes sintéticos, como o Super Fosfato Triplo, proporcionando uma solução mais sustentável e eficaz para a agricultura. O uso de *bonechar* como fertilizante tem o potencial de reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos, promovendo a sustentabilidade na agricultura e contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados ao uso de fertilizantes químicos.

Palavras-chave: Carvão de osso; valorização de resíduos; pirólise; alface.

ABSTRACT

The production of meat generates large volumes of waste, such as bones, which can cause serious environmental impacts if not properly managed. The pyrolysis of this waste is a sustainable alternative for its utilization, transforming it into bonechar, a product of significant agronomic value. Bonechar has shown great potential as a fertilizer, offering significant benefits for soil fertility and sustainable agriculture. This study aimed to conduct a bibliometric review on bonechar performance, characterize its physicochemical properties, and evaluate its effects as a phosphorus source in lettuce cultivation. To achieve this objective, two experiments were conducted. The first involved quantifying the levels of phosphorus, calcium, and magnesium in the soil after incubation with bonechars. The second experiment assessed the performance of bonechars in lettuce cultivation, analyzing the effects of applying two types of bonechar on plant growth and development. The treatments evaluated were: control (no fertilization), Triple Superphosphate (TSP), bonechar 1, and bonechar 2. The experiment was carried out in a controlled environment using dystrophic leptosol from Lages, Santa Catarina, Brazil. The variables analyzed included soil pH, electrical conductivity, and the levels of phosphorus, calcium, and magnesium. Statistical analysis of the data was performed using ANOVA, followed by Tukey's test, to identify differences among treatments at a 5% significance level. The results indicated that, although no significant differences were observed among treatments regarding the quantification of phosphorus, calcium, and magnesium, bonechars generally increased soil phosphorus levels, demonstrating their potential as a nutrient source. The increase in phosphorus levels could be particularly relevant for improving soil fertility and providing greater nutrient availability to plants. In the second experiment, which evaluated the performance of bonechars in lettuce cultivation, bonechar 2 emerged as the most efficient phosphorus source. This treatment significantly enhanced plant growth, especially in the aerial parts, which can be attributed to its high phosphorus content and high solubility (94%). This improvement in lettuce growth was accompanied by a greater accumulation of biomass and nutrients, such as calcium, magnesium, and potassium, in plant tissues. These findings indicate that bonechar 2 is not only an effective phosphorus source but also improves the availability of other essential nutrients for healthy plant development. Therefore, the results suggest that bonechar 2 has great potential to replace synthetic fertilizers, such as Triple Superphosphate, offering a more sustainable and effective solution for agriculture. The use of bonechar as a fertilizer has the potential to reduce dependence on synthetic fertilizers, promoting sustainability in agriculture and contributing to the reduction of environmental impacts associated with chemical fertilizers.

Keywords: Bone char; waste valorization; pyrolysis; lettuce.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Bonechars antes do processo de moagem (A) e pronto para ser utilizado nos testes (B) **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 2 - Local de condução dos testes com os Bonechars ambiente controlado parte externa (A) e parte interna (B) **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 3 - Adição ao solo das doses de Bonechars de forma incorporada (A) e deposição do solo nos vasos com capacidade de 2 kg (B) **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 4 - Nuvem de palavras evidenciadas nos artigos científicos..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 5 - Gráfico de difratometria de raios X (DRX) para amostras de bonechar 1 e 2... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6 - Comparação de plantas de alface comparando a Testemunha, SFT, Bonechars 1 e 2 **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Combinações de palavras-chave utilizadas na análise bibliométrica **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 2 - Caracterização química e teor de argila do solo utilizado nos testes com Bonechars **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 3 - Descrição das amostras de bonechar quanto a natureza física, carbono orgânico (C.Org) estimado, teores de macro e micronutrientes e relação C/N, e valores estabelecidos na IN MAPA 61/2020. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 4 - Teores de As, Cd, Cr e Pb em amostras dos bonechars e teores por percentual de P2O5 (teor / % P2O5) de e teores máximo na massa total do fertilizante (Max. Fert) segundo a IN MAPA 39/2018. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 5 - Teores de P₂O₅ solúveis em água e ácido cítrico para bonechars 1 e 2, e para SFT estabelecido na IN MAPA 39/2018..... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 6 - Valores de pH, CE, SB, relações P(mg/kg), K (mg/kg), Ca (mg/kg), Mg (mg/kg), Ca/Mg (mg/kg), Ca/K (mg/kg), e Mg/K (mg/kg), no solo após 60 dias de incubação como bonechars 1 e 2, e STF. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 7 - Valores de peso seco e úmido, e acúmulo de nutrientes na parte aérea da alface. **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
B	Boro
Ca	Cálcio
CE	Condutividade Elétrica
Cd	Cádmio
Cr	Cromo
Co	Cobalto
Cu	Cobre
dm	Decímetro
DRX	Difratometria de Raios-X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Fe	Ferro
FRX	espectrometria de fluorescência de raios X
g	Grama
ha	Hectare
IN	Instrução Normativa
K	Potássio
kg	Quilograma
K ₂ O	Óxido de potássio
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.
Mg	Magnésio
mg	Miligrama
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MO	Matéria Orgânica
N	Nitrogênio
Ni	Níquel
P	Fósforo
Pb	Chumbo
P ₂ O ₅	Fosfato
SB	Soma de bases

Se	Selênio
Si	Silício
STF	Super Fosfato Triplo
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivo específicos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	PIRÓLISE	14
2.2	BONECHAR: CARACTERIZAÇÃO E USO NA AGRICULTURA.....	14
2.3	FÓSFORO NO SOLO E NA CULTURA DE ALFACE.....	15
2.4	EFICIÊNCIA AGRONÔMICA E SUSTENTABILIDADE DO BONECHAR.....	16
3	MATERIAL E MÉTODOS	Erro! Indicador não definido.
3.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E SISTEMÁTICA	Erro! Indicador não definido.
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS BONECHARS	Erro! Indicador não definido.
3.3	AVALIAÇÃO DO EFEITO DO BONECHAR COMO FONTE DE P NA CULTURA DE ALFACE	Erro! Indicador não definido.
3.3.1	Quantificação do teor de P, Ca e Mg disponível após incubação do solo com bonechars	Erro! Indicador não definido.
3.3.2	Avaliação dos Bonechars com fonte de P no cultivo de Alface	Erro! Indicador não definido.
3.4	ANÁLISE DE DADOS.....	Erro! Indicador não definido.
4	RESULTADOS	Erro! Indicador não definido.
4.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E SISTEMÁTICA	Erro! Indicador não definido.
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS BONECHARS	Erro! Indicador não definido.
4.3	AVALIAÇÃO DO EFEITO DO BONECHAR COMO FONTE DE P NA CULTURA DE ALFACE	Erro! Indicador não definido.
4.3.1	Quantificação do teor de P, Ca e Mg disponível após incubação do solo com bonechars	Erro! Indicador não definido.
4.3.2	Avaliação dos Bonechars com fonte de P no cultivo de Alface	Erro! Indicador não definido.
5	discussão	Erro! Indicador não definido.
5.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E SISTEMÁTICA	Erro! Indicador não definido.
5.2	CARACTERIZAÇÃO DOS BONECHARS	Erro! Indicador não definido.

5.3	AVALIAÇÃO DO EFEITO DO BONECHAR COMO FONTE DE P NA CULTURA DE ALFACE	Erro! Indicador não definido.
5.3.1	Quantificação do teor de P, Ca e Mg disponível após incubação do solo com bonechars	Erro! Indicador não definido.
5.3.2	Avaliação dos Bonechars com fonte de P no cultivo de Alface	Erro! Indicador não definido.
6	CONCLUSÃO	Erro! Indicador não definido.
7	RECOMENDAÇÕES	Erro! Indicador não definido.
8	REFERÊNCIAS	Erro! Indicador não definido.

1 INTRODUÇÃO

A produção de carne de aves deverá ser responsável por mais de 55% do crescimento da produção até o ano de 2031, com a produção de bovinos e suínos representando 29% e 16%, respectivamente (OCDE/FAO, 2022). Contudo, o abate de animais para alimentação resulta em volumes significativos de biomassa não cárnea, que resulta em altos custos e volumes consideráveis para descarte devido ao seu potencial de causar danos ao meio ambiente (Shirsath *et al.*, 2021).

Entre os resíduos gerados, os ossos bovinos chamam atenção pelo seu potencial de contaminação e transmissão de doenças, como a encefalopatia espongiforme bovina ou doença da vaca louca (Castro *et al.*, 2024). Nesse contexto, práticas baseadas na economia circular buscam reaproveitar materiais e energia para gerar benefícios ambientais e econômicos (Batista *et al.*, 2021).

As distintas fontes de material biodegradável, a exemplo dos resíduos agrícolas, das indústrias de alimentos, florestais e a fração orgânica de resíduos sólidos, devem ser considerados no ciclo ao longo de toda a cadeia que envolve etapas de geração e uso de biomassa (Teigiserova *et al.*, 2020; Batista *et al.*, 2021).

A pirólise é conversão termoquímica de biomassa em ambiente com concentração limitada de oxigênio (Andrade; Puga, 2023) ou, idealmente, sem oxigênio. A técnica de pirólise para geração de produtos energéticos renováveis (bio-óleo e gás de pirólise), além de biocarvão, representa uma solução eficiente de gestão de resíduos (Matrapazi *et al.*, 2020; Batista *et al.*, 2021). No caso específico de resíduos de matadouros, a pirólise pode transformar esses materiais em fontes sustentáveis de fósforo (P) para fertilizantes (Zwetsloot *et al.*, 2014).

O *bonechar*, um produto derivado da pirólise, se destaca por suas características distintas e valiosas, como alta capacidade de adsorção (Sohi *et al.*, 2014; Yavari *et al.*, 2015), fertilizantes (Hossain *et al.*, 2011; Shulz *et al.*, 2013), condicionadoras de solo (Hossain *et al.* 2009; Obia *et al.*, 2016), a retenção de água e a filtração de água no solo (Lehmann e Joseph, 2009) por ser um produto que promove a melhoria das propriedades físicas, químicas ou atividade biológica podendo recuperar solos degradados ou desequilibrados nutricionalmente (MAPA, 2004). Além disso, pode contribuir para mitigação das mudanças climáticas por meio da fixação de carbono (C), devido a sua elevada resistência a degradação, conferida pela presença de cadeias aromáticas condensadas (Novotny *et al.*, 2015).

O fósforo (P) é um dos elementos mais limitantes ao crescimento e desenvolvimento das plantas em condições tropicais. A alta demanda de P exigida pelos solos brasileiros para

manter uma produtividade agrícola satisfatória exige a aplicação de fertilizantes fosfatados em altas taxas, o que aumenta os custos de produção (Castro *et al.*, 2024). Ainda, quando aplicados em excesso, esses fertilizantes podem causar contaminações ao meio ambiente.

A atual crise (Pandemia da Covid 19 e conflito do Leste Europeu) de oferta de insumos agrícolas, especialmente adubos fosfatados, impacta a produção agropecuária no Brasil. A alta dependência de insumos importados torna o setor vulnerável a escassez de produtos e aumentos de custos, evidenciando a necessidade de políticas públicas que promovam a autossuficiência e a sustentabilidade na agricultura (EMBRAPA, 2022; BRASIL, 2023). Estima-se que as reservas de fosfato atenderão às necessidades do mundo agrícola por apenas 50 a 100 anos, tornando urgente a busca por fontes alternativas de P (Ahmed *et al.*, 2013).

Assim, explorar o potencial do *bonechar* como fonte alternativa de P não apenas oferece uma solução sustentável para o manejo de resíduos orgânicos, mas também contribui para a mitigação de impactos ambientais e o aumento da resiliência da agricultura brasileira. Neste contexto, este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade do *bonechar* na agricultura, com foco em sua aplicação como fonte de fósforo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial do *bonechar* oriundo de carcaças de aves e suínos como tecnologia sustentável para reduzir o uso de fertilizantes convencionais, investigando seus efeitos nas propriedades químicas e físicas do solo e sua eficácia como fonte de fósforo na agricultura.

1.1.2 Objetivo específicos

- Realizar uma revisão bibliométrica sobre o desempenho do *bonechar* como fonte de fósforo na agricultura.
- Caracterizar e avaliar o efeito do *bonechar* como fonte de fósforo no crescimento e desenvolvimento da cultura de alface.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PIRÓLISE

A pirólise é um processo térmico que ocorre em atmosfera inerte, também conhecida como combustão (Santos, 2022). Trata-se de uma tecnologia viável sob o ponto de vista custo efetivo e limpa, considerada uma alternativa para o tratamento e disposição de resíduos em função da redução do volume, eliminação de eventual carga patogênica e geração de produtos energéticos e/ou químicos rentáveis (Ahmad *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2014).

A temperatura aplicada no processo de pirólise é o fator mais importante que influencia diversas propriedades físico-químicas do carvão de osso bovino produzido (Amin *et al.*, 2021). Esse processo pode ocorrer de forma lenta ou rápida. Esse processo pode ocorrer de forma lenta ou rápida, dependendo das condições de temperatura e tempo de aquecimento. A pirólise é considerada lenta quando a temperatura está abaixo de 400 °C e o tempo necessário para aquecer o material até a temperatura de ocorrência é significativamente maior que o tempo específico da ocorrência de pirólise. Por outro lado, no processo rápido, a temperatura supera os 500 °C, e o aquecimento ocorre de forma muito mais breve (Andrade; Puga, 2023).

A pirólise lenta favorece a produção de biocarvão, enquanto a pirólise rápida prioriza a formação de bio-óleo e gás. Com o aumento da temperatura, há redução no rendimento de biocarvão e aumento na produção de biogás, evidenciando a influência das condições operacionais no balanço de massas (Yaashikaa *et al.*, 2020).

A composição química e estrutural do biocarvão é altamente heterogênea. Algumas propriedades estão presentes em todos os biocarvões, incluindo alto teor de carbono (C) e grau de aromaticidade, o que explica seu alto nível de recalcitrância. Contudo, a exata composição química e estrutural é dependente da combinação da matéria-prima e das condições de pirólise (Trazzi *et al.*, 2018).

2.2 BONECHAR: CARACTERIZAÇÃO E USO NA AGRICULTURA

O *Bonechar* é um material produzido a partir da pirólise de resíduos animais, como ossos de animais. Os ossos são constituídos, predominantemente, por hidroxiapatita (Santos, 2022). Esse material se destaca como uma alternativa viável às fontes minerais, sendo rico em fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), nutrientes essenciais para o crescimento das plantas e a produtividade das culturas (Azeem *et al.*, 2022; Liang *et al.*, 2023; Shahid *et al.*, 2024).

Segundo Azeem et al. (2021a) o *bonechar* contém macrósporos com teores de carbono (10%) e minerais (90%) e o teor de fertilizante P₂O₅ é de aproximadamente 30%. Essas características tornam o *bonechar* um aditivo de solo adequado e um fertilizante orgânico natural.

Os *bonechars* produzidos em temperaturas mais baixas, inferiores a 400 °C, são adequados para uso como fertilizante, uma vez que são materiais menos recalcitrantes e capazes de serem mineralizados mais rápido pela microbiota do solo, disponibilizando nutrientes em menos tempo para as culturas. Em contraste, *bonechars* produzidos a temperaturas mais altas, acima de 500°C, são altamente recalcitrantes, têm seu uso adequado para o sequestro de carbono no solo (Agrafioti *et al.*, 2013).

Os benefícios ambientais do uso de *bonechar* são significativos, isto é, ao utilizar resíduos orgânicos, como ossos de animais, na produção de fertilizantes, contribui para a redução da quantidade de resíduos descartados, aliviando a pressão sobre aterros sanitários. Além disso, o *bonechar* promove o sequestro de carbono no solo (Andrade; Puga, 2023). O uso do *bonechar* também diminui a dependência de recursos não renováveis, como os fosfatos minerais, o uso excessivo causa danos ao meio ambiente.

Portanto, o *bonechar* se apresenta como uma tecnologia versátil, com aplicações que vão desde a disponibilização de nutrientes às plantas até o manejo sustentável de carbono no solo, contribuindo tanto para a produtividade agrícola quanto para a mitigação dos impactos ambientais.

2.3 FÓSFORO NO SOLO E NA CULTURA DE ALFACE

O fósforo (P) é o segundo elemento mais importante para as plantas (Amin *et al.*, 2021). De acordo com Carstensen *et al.* (2018), o P é essencial para o crescimento radicular, promovendo maior absorção de água e nutrientes, além de ser um componente vital na transferência de energia durante a fotossíntese e na síntese de ácidos nucléicos e proteínas essenciais.

A disponibilidade do P no solo é influenciada por diversos fatores, como o pH do solo (Hou *et al.*, 2023), que afeta sua solubilidade. Em solos com pH alto, o P é insolubilizado como fosfato de cálcio (Ca₃(PO₄)₂), e naqueles com pH baixo é fixado, como fosfatos de alumínio e de ferro (Lana *et al.*, 2004). Em solos com pH moderadamente ácido, o P tende a ser mais disponível para as plantas.

Além disso, a textura do solo também desempenha um papel importante na dinâmica do P. Em solos arenosos, por exemplo, a quantidade de P aplicada pode ser menor devido à maior macroporosidade e ao baixo teor de argila, características que facilitam a absorção do nutriente (Rossi *et al.*, 2020).

A indisponibilidade do P nos estágios de desenvolvimento iniciais das plantas pode causar restrições no crescimento vegetativo, haja vista que o P está ligado diretamente ao crescimento das raízes, portanto, uma má formação do sistema radicular poderá dificultar a absorção de água e nutrientes ocasionando um desenvolvimento inicial (Taiz *et al.*, 2017).

A alface (*Lactuca sativa*), um vegetal crucial e amplamente cultivado no mundo pertence à família Asteraceae (Alomari *et al.*, 2024). De acordo com Torres *et al.* (2022) a alface é uma cultura de ciclo curto e exigente em fertilidade do solo, demandando grandes quantidades de fertilizantes minerais para suprir suas necessidades nutricionais em um curto período.

Apesar da importância econômica da alface, trabalhos sobre adubação fosfatada ainda são escassos e com respostas variadas, necessitando de estudos, pois a alface pode ser considerada como bastante exigente em P, principalmente na fase final de seu ciclo (Kano *et al.*, 2012).

2.4 EFICIÊNCIA AGRONÔMICA E SUSTENTABILIDADE DO BONECHAR

A agricultura brasileira enfrenta desafios importantes para garantir a produtividade sustentável dos solos, especialmente devido à alta demanda de P. O uso excessivo de fertilizantes fosfatados aumenta os custos de produção (Castro *et al.*, 2024).

Historicamente, a suplementação de P nas lavouras meio é realizada através de de fertilizantes químicos, como o Superfosfato Triplo (STF), que é uma das fontes mais comuns e eficientes de P. No entanto, o uso indiscriminado desses fertilizantes tem gerado preocupações ambientais, como a eutrofização de corpos d'água e o empobrecimento do solo devido à alta acidez causada pela aplicação contínua de produtos ácidos. Nesse contexto, o uso de fontes alternativas, como o *bonechar*, tem se mostrado promissor.

O P derivado do *bonechar* é uma alternativa viável, mas apresenta algumas limitações. A hidroxiapatita, principal composto presente nos ossos, possui baixa solubilidade, o que reduz a disponibilidade de P para as plantas quando comparado aos fertilizantes fosfatados tradicionais (Castro *et al.*, 2024).

No entanto, o uso de *bonechar* se alinha com a sustentabilidade agrícola, uma vez que fertilizantes de liberação lenta, como esse material, desempenham um papel fundamental na agricultura sustentável. Eles oferecem benefícios ambientais, econômicos e sociais ao reduzir os impactos negativos dos fertilizantes tradicionais, promovendo a liberação gradual de P para as plantas, o que minimiza problemas como a lixiviação de nutrientes (Andelkovic *et al.*, 2018).

Desse modo, a utilização de resíduos orgânicos, como ossos animais, para a produção de *bonechar* contribui para a economia circular, ajudando a reduzir o desperdício de recursos e diminuindo a dependência de fertilizantes químicos, que são limitados e caros (Filho *et al.*, 2024).

O *bonechar* também se destaca por ser uma alternativa econômica, limpa e ecologicamente correta, com potencial para desempenhar um papel importante nas práticas agrícolas sustentáveis (Amin *et al.*, 2021).