

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DO SERTÃO PERNAMBUCANO
CAMPUS PETROLINA ZONA RURAL**

CURSO DE BACHARELADO EM AGRONOMIA

**Efeito do ácido pirolenhoso, biocarvão e microrganismos eficientes
sobre o estado nutricional e o desempenho agrônômico de pimentão
infectado por *Meloidogyne enterolobii***

KELLY MILENE SANTOS DE BRITO

**PETROLINA, PE
2025**

KELLY MILENE SANTOS DE BRITO

Efeito do ácido pirolenhoso, biocarvão e microrganismos eficientes sobre o estado nutricional e o desempenho agrônômico de pimentão infectado por *Meloidogyne enterolobii*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao IF SERTÃO-PE Campus Petrolina Zona Rural, exigido como parte dos requisitos para a obtenção de título de Engenheira Agrônoma.

**PETROLINA, PE
2025**

B862 Brito, Kelly Milene Santos de.

Efeito do ácido pirolenhoso, biocarvão e microrganismos eficientes sobre o estado nutricional e o desempenho agrônomo de pimentão infectado por *Meloidogyne enterolobii* / Kelly Milene Santos de Brito. - Petrolina, 2025.
109 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Petrolina Zona Rural, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Cícero Antônio de Sousa Araújo.

Coorientação: Dr. Fábio Freire Oliveira.

1. Ciências Agrárias. 2. Controle alternativo. 3. Nematóides. 4. *Capsicum annuum*. 5. *Prosopis juliflora*. I. Título.

CDD 630



**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA INSTITUTO
FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SERTÃO
PERNAMBUCANO**

FOLHA DE APROVAÇÃO

KELLY MILENE SANTOS DE BRITO

**EFEITO DO ÁCIDO PIROLENHOSO, BIOCARVÃO E MICRORGANISMOS EFICIENTES
SOBRE O ESTADO NUTRICIONAL E O DESEMPENHO AGRÔNOMICO DE
PIMENTÃO INFECTADO POR *Meloidogyne enterolobii***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Engenheira Agrônoma, pelo Instituto
Federal de Educação, Ciências e Tecnologia
Sertão Pernambucano, Campus Petrolina
Zona Rural.

Aprovado em: 02/12/2025

Cicero Antonio de Sousa Araujo:22296980368 Assinado de forma digital por Cicero
Antonio de Sousa Araujo:22296980368
Dados: 2025.12.02 10:53:46 -03'00'

Prof. Dr. Cícero Antônio de Sousa Araújo
Orientador/Presidente
IF Sertão-PE, Campus Petrolina Zona Rural

Documento assinado digitalmente
gov.br FABIO FREIRE DE OLIVEIRA
Data: 02/12/2025 11:24:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fábio Freire de Oliveira
2º Examinador
IF Sertão-PE, Campus Petrolina Zona Rural

Documento assinado digitalmente
gov.br GRACIENE DE SOUZA SILVA
Data: 03/12/2025 14:01:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

MSc. Graciene da Silva Souza
3ª Examinadora
IF Sertão-PE, Campus Petrolina Zona Rural

RESUMO

Este estudo conduzido em casa de vegetação objetivou avaliar o efeito de Microrganismos Eficientes (EM), biocarvão e ácido pirolenhoso de algaroba, isoladamente e combinados, no cultivo de pimentão em solo infestado com *Meloidogyne enterolobii*. Foi utilizado delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial (3x3x3) com 27 tratamentos e 3 repetições por tratamento. O solo foi previamente solarizado e as plantas, inoculadas com o nematoide, receberam diferentes doses dos insumos (EM: 0, 200, 400 L/ha; Biocarvão: 0, 1500, 3000 kg/ha; Pirolenhoso: 0, 1:200, 1:100 v:v), com avaliações de parâmetros agronômicos e entomológicos aos 30, 60 e 72 dias. As variáveis analisadas foram: número de folhas (NF), peso fresco da parte aérea (PFPA), peso seco da parte aérea (PSPA), peso fresco da raiz (PFR), volume de raiz (VR), número de brotos (NB), área foliar (AF), Clorofila a (CA), clorofila b (CB), peso dos frutos (PF), número de nematóides (NN) e quantidade de nutrientes absorvidos pelas plantas. Os resultados demonstraram que os insumos, especialmente a combinação de EM e biocarvão, promoveram significativamente o crescimento vegetal, mas paradoxalmente, os tratamentos que mais estimularam o desenvolvimento radicular e da parte aérea, como aqueles com biocarvão e pirolenhoso, também resultaram em um aumento da população do nematoide, possivelmente devido à maior produção de exsudatos radiculares e área de colonização. Conclui-se que, embora sejam eficazes na promoção de crescimento, o uso desses insumos deve ser integrado a estratégias específicas de manejo de nematoides para garantir a produtividade.

Palavras-chave: Ciências Agrárias; Controle alternativo; Nematóides; *Capsicum annuum*; *Prosopis juliflora*.

DEDICATÓRIA

À Deus, segundo aos meus pais, em especial minha mãe que trabalhou muito no sol para que eu estudasse na sombra. Obrigada aos meus irmãos, todos os meus orientadores e meus amigos que fizeram a graduação ficar mais leve.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder a graça de ter frequentado uma Instituição Federal de qualidade e por não ter me deixado desistir. Sem Ele, jamais teria chegado até aqui.

Aos meus companheiros de Luta, que fizeram ou fazem parte da minha vida: Luiz Eduardo, Emmily Ingrid (Dora), João Afonso, David Souza e aos demais companheiros de turma.

Ao todos os meus orientadores durante a graduação: Francisco Amorim, Rodolfo Peixoto, Cícero Antônio, Fábio Freire e Patricia.

À técnica do laboratório Graciene.

A todos os bolsistas e voluntários do laboratório de solos que me ajudaram.

À minha mãe Carla Regina, ao meu pai, Milton Guedes, a minhas irmãs Mileide, Mirele e ao meu irmão Murilo.

À minha eu de 6 anos de idade.

Por fim, a todos que contribuíram e me apoiaram nessa jornada chamada Agronomia.

EPÍGRAFE

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”
Albert Einstein

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Página

Figura (1): espécie de nematóide vista a nível microscópico.	16
Figura (2): Desenvolvimento do <i>Meloidogyne</i> de acordo com o processo de ecdise: (A) ovo; (B) ovo contendo J ₂ ; (C) J ₂ pré-parasita; (D) J ₂ parasita; (E) fêmea imatura; (F) macho no invólucro cuticular do J ₄ ; (G) macho e (H) fêmea sexualmente madura.....	19
Figura (3): raízes de pimentão atacadas por <i>Meloidogyne enterolobii</i>	20
Figura (4): partículas de biocarvão em diferentes tipos de solo.....	25
Figura (5): Modelo representando a interação entre microrganismos e biocarvão no solo.....	26
Figura (6): Disposição dos sacos plásticos contendo solo durante o processo de solarização.....	37
Figura (7): Inoculação de nematóides nos vasos.....	39
Figura (8): influência dos microrganismos eficientes sobre o peso fresco da raiz de planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em gramas.....	50
Figura (9): influência do Biocarvão de Algaroba (B) sobre o peso fresco da raiz de planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em gramas.....	50
Figura (10): influência do Pirolenhoso de Algaroba (PA) sobre o peso fresco da raiz de planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em gramas.....	51

Figura (11): influência dos Microrganismos eficientes (EM) sobre o volume da raiz de planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em cm ³	56
Figura (12): influência do Biocarvão de Algaroba (B) sobre o volume da raiz de planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em cm ³	57
Figura (13): influência do Pirolenhoso de Algaroba (PA) sobre o volume da raiz de planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em cm ³	57
Figura (14): número de nematóides em planta de pimentão, inoculado com <i>M. enterolobii</i> , em função de doses de microrganismos eficientes (EM), de biocarvão (B) e de ácido pirolenhoso (P).....	76
Figura (15): influência dos Microrganismos eficientes (EM) sobre a quantidade de nitrogênio na planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em g/kg.....	88
Figura (16): influência do Biocarvão de Algaroba (B) sobre a quantidade de nitrogênio na planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em g/kg.....	88
Figura (17): influência do Pirolenhoso de Algaroba (PA) sobre a quantidade de nitrogênio na planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em g/kg.....	89
Figura (18): influência dos Microrganismos eficientes (EM) sobre a quantidade de fósforo na planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em g/kg.....	93
Figura (19): influência do Biocarvão de Algaroba (B) sobre a quantidade de fósforo na planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em g/kg.....	93
Figura (20): influência do Pirolenhoso de Algaroba (PA) sobre a quantidade de fósforo na planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em g/kg.....	94
Figura (21): influência dos Microrganismos eficientes (EM) sobre a quantidade de manganês na planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em mg/kg.....	97

Figura (22): influência do Biocarvão de Algaroba (B) sobre a quantidade de manganês na planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em mg/kg.....	98
Figura (23): influência do Pirolenhoso de Algaroba (B) sobre a quantidade de manganês na planta de pimentão inoculado com <i>M. enterolobii</i> . Valores expressos em mg/kg.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EM= Microrganismo eficiente

B=Biocarvão

PA=Pirolenhoso

PFFA= Peso fresco da parte aérea

PSPA= Peso seco da parte aérea

PFR= Peso fresco da raiz

VR= Volume da raiz

PFF= Peso fresco fruto

AFP= Área da folha primeira medição

CAP= Clorofila A, primeira medição

CBP= Clorofila B, primeira medição

CAS= Clorofila segunda medição

CBS= clorofila segunda medição

APP= altura da planta, primeira medição

NB= Número de brotos primeira medição

NFP= Número de folhas, primeira medição

APS= altura da planta, segunda medição

NFs= número de folha, segunda coleta

AFS= área foliar da segunda coleta

NN= Número de nematóides

N= Nitrogênio

Ca= Cálcio

Mg= Magnésio

P= Fósforo

K= Potássio

Zn= Zinco

Fe= Ferro

Mn= Manganês

Cu= Cobre

Na= Sódio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1-Nematóides	16
2.1.1 Origem	16
2.1.2 Morfologia dos fitonematoides	17
2.1.3 Gênero <i>Meloidogyne</i> e a espécie <i>Meloidogyne enterolobii</i>	19
2.2 Biocarvão	23
2.2.1 Formação do Biocarvão	23
2.2.2 Influência da porosidade do biocarvão na atividade microbiana do solo	25
2.3.1 Ácido Pirolenhoso	28
2.3.2 Ácido Pirolenhoso: testes sobre nematóides	32
2.3.3 Escolha da Algaroba como matéria prima	32
2.4 Microrganismos eficientes (EM)	33
3. OBJETIVOS:	36
Objetivo Geral:	36
Objetivos específicos:	36
4. METODOLOGIA	37
4.1 Área de Estudo e Caracterização do Solo	37
4.2 Preparação da Amostra e Processo de Solarização	37
4.3 Preparo das Unidades Experimentais e Delineamento dos tratamentos	38
4.4 Obtenção do Inóculo e Inoculação de <i>Meloidogyne enterolobii</i>	39
4.5 Aplicação dos tratamentos e avaliações agronômicas	41
4.6 Análise do Teor de Nutrientes na Parte Aérea	42
5. RESULTADOS	43
5.1 Variáveis agronômicas	43
5.1.3 Peso fresco da raiz (PFR)	51
5.1.4 Volume de raiz	57
5.1.5 Clorofila A e B, segunda medição	61
5.1.6 Número de brotos	66
5.1.7 Número de folhas para a primeira medição	68
5.1.8 Número de folhas na segunda medição	70
5.1.9 Altura da planta segunda medição	73
5.2 Número de nematóides	76

5.3 Nutrientes	86
5.3.1 Nitrogênio	87
5.3.2 Fósforo.....	92
5.3.3 Manganês	97
6. CONCLUSÃO	103
7. REFERÊNCIAS	104

1. INTRODUÇÃO

Os fitonematoides representam um dos maiores desafios fitossanitários da agricultura global, com destaque para espécies do gênero *Meloidogyne* que possuem capacidade de parasitar diversas culturas. No contexto brasileiro, a espécie *Meloidogyne enterolobii* tem causado prejuízos significativos em culturas como goiaba, acerola e hortaliças, caracterizando-se como uma ameaça à sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Ferraz e Brown, 2016; Ferraz, 2018).

O manejo convencional desses patógenos, baseado predominantemente em nematicidas químicos, tem se mostrado insuficiente e ambientalmente problemático. A crescente restrição a moléculas sintéticas, aliada ao desenvolvimento de resistência nos nematoides, demanda por alternativas sustentáveis. Neste cenário, a biorremediação através de produtos da pirólise emerge como uma abordagem promissora, integrando o controle fitossanitário à valorização de resíduos biomássicos.

O biocarvão (biochar), material carbonáceo obtido através da decomposição térmica de biomassa em condições anóxicas, apresenta propriedades multifacetadas que transcendem sua função inicial de condicionador de solo. Conforme demonstrado em estudos recentes, a estrutura porosa singular do biocarvão atua como microhabitat para microrganismos antagonistas, enquanto sua superfície funcionalizada influencia a disponibilidade de nutrientes e a dinâmica populacional de organismos edáficos (Liu et al., 2017; Xiaomin Z., et al., 2017; Ajema, 2018).

O extrato pirolenhoso, subproduto líquido do processo pirolítico, tem revelado notável potencial bioativo. Pesquisas recentes indicam que composições ricas em ácidos orgânicos, fenóis e cetonas exibem propriedades nematicidas diretas e efeitos eliciadores de resistência sistêmica em plantas. Estudos específicos evidenciaram reduções significativas no índice de reprodução de *M. enterolobii* em goiabeiras tratadas com extrato pirolenhoso (Miranda, 2021).

A espécie *Prosopis juliflora* (algaroba) configura-se como matéria-prima ideal para esta abordagem integrada, dada sua adaptação às condições edafoclimáticas do semiárido brasileiro e composição lignocelulósica peculiar. Análises realizadas com esta espécie identificaram teores de carbono fixo superiores a 65% na biomassa, indicando alto potencial para produção de biocarvão de qualidade (Cavalcanti et al., 2020; Brito, 2024).

A sinergia entre biocarvão e extrato pirolenhoso no manejo de nematoides representa uma fronteira científica emergente. Enquanto o biocarvão modula o ambiente edáfico, criando condições supressivas, o EM cria ambientes propícios à competição e enriquecimento do solo, já o extrato pirolenhoso, por sua vez, atua diretamente no controle populacional.

O presente estudo teve como avaliar a eficácia de duas doses distintas de biocarvão de algaroba (*Prosopis juliflora* objetivo a), microrganismos eficientes e ácido pirolenhoso de algaroba, aplicados de forma isolada e em combinações, para o controle do nematoide *Meloidogyne enterolobii* na cultura do pimentão (*Capsicum annuum*). A ideia principal do trabalho é determinar quais as combinações são mais promissoras em variáveis agronômicas: peso fresco da parte aérea e raiz, peso seco da parte aérea, volume da raiz, clorofila a e b, altura da planta, área foliar, número de folhas, nutrientes absorvidos pela planta. Além disso, a eficácia dos tratamentos sobre o número de nematóides.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1-Nematóides

2.1.1 Origem

A retratação do aparecimento de nematóides origina-se de muitos anos atrás. Por se tratar de um ser que possui um corpo com ausência de estrutura óssea, houve dificuldade em datar sua origem, no entanto, estudos realizados na área descreveram a aparição de nematóides do gênero *Xiphinema*, *Xiphidorus* no continente Gondwana em alguma época durante o período Permiano (280 milhões de anos adp), sendo o gênero dispersado para o continente Laurásia, antes da divisão da Pangaea (Weischeir e Brown, 2000).

Segundo Weischeir e Brown (2000), o surgimento da maioria das espécies do gênero *Xiphinema* se deu na África, visto que suas condições ambientais, como zonas tropicais e subtropicais, no geral, eram estáveis e favoreciam o desenvolvimento da espécie, especialmente as suas formas partenogenéticas. Já as espécies do gênero *Xiphidorus*, são possivelmente originárias de ancestrais do continente africano e foram realocados para a América do sul, quando este último foi separado da África, durante o período Cretáceo (130 milhões de anos adp.)

Os nematóides podem ser divididos de maneira geral, como parasitas obrigatórios ou não, podendo parasitar espécies humanas, animais ou plantas. Parasitas de humanos foram descritos há milhares de anos, sendo mencionados em documentos produzidos na China e no Egito, há cerca de 2700 anos a. C.. A própria bíblia também chega a relatar lesões dolorosas causadas em hospedeiro humano denominada “serpentes de fogo” que, segundo especialistas, teriam sido causadas por *Dracunculus medinensis*, uma espécie de nematóides (Ferraz e Brown, 2016).

A primeira descrição sobre parasitas em plantas é datada do século XVII. No ano de 1743, Turbevil Needham, relatou sobre a ocorrência de um organismo que conseguiu ao dissecar grãos anormais de trigo (Ferraz e Brown, 2016).

O estudo de Nematóides foi intensificado a partir de meados do século XIX, quando a Nematologia passou a adquirir o *status* de ciência. Posteriormente, a causa por enfermidades em plantas também começou a ser associada ao filo, como as enormes perdas de beterraba açucareira ocorridas na Europa, que antes havia sido associada ao “cansaço do solo” (Ferraz e Brown, 2016).

2.1.2 Morfologia dos fitonematoides

Grande parte dos nematoides de plantas (fitonematoides) tem tamanho microscópico, variando o seu comprimento de 0,2 a 0,3 mn, sendo menores e mais rígidos que um fio de cabelo humano. A forma de seu corpo, predominantemente, é a filiforme, podendo haver algumas exceções em fêmeas (Ferraz e Brown, 2016).

Fitonematoides geralmente são incolores, subcilíndricos, comparados estruturalmente a um modelo formado por dois tubos contendo outro e o espaço intermediário preenchido por um fluído (Ferraz e Brown, 2016). A Figura (1) demonstra uma espécie vista a nível microscópico.

Figura (1): espécie de nematoide vista a nível microscópico.



Fonte: site oasis turf. Acesso em 10 de set. 2025.

Os nematóides são constituídos pela parede do corpo, o pseudoceloma, o sistema digestório, o sistema excretor-secretor e o sistema nervoso.

A parede serve como interface entre o nematóide e o ambiente. É um órgão complexo, constituído de camada elástica, não celular e a epiderme, por cima da epiderme tem-se a cutícula.

A cutícula dos nematóides está separada em quatro camadas, a epicutícula, exocutícula, mesocutícula e endocutícula, sendo apenas a primeira e a última presente nos fitonematoides. A cutícula pode variar a depender do estágio de desenvolvimento da

espécime e do modo de alimentação, como ocorre, por exemplo, nos nematóides de galhas e de cisto. Em relação a constituição química da cutícula, incluem proteínas tipo-colágeno e outras substâncias, tendo ausência de quitina. É importante observar que dois tipos de estruturas externas podem ocorrer na cutícula dos fitonematoides, órgãos sensoriais e ornamentação (Ferraz e Brown, 2016).

A epiderme é a camada fina, metabolicamente ativa, de células multinucleadas que produzem secreções que mantêm a cutícula e suas estruturas associadas. Cortes transversais revelam que a epiderme se invagina em direção a quatro pontos do pseudoceloma, a saber, dorsal, ventral e bilateral, originando-se o que é denominado de “cordas”, nas quais ficam embutidos dutos do sistema nervoso e canais do sistema excretor (Ferraz e Brown, 2016).

O pseudoceloma é a cavidade preenchida por um fluido que banha os órgãos, que garante a elevada pressão interna associada à movimentação de nematóides (Ferraz e Brown, 2016).

Em relação ao sistema digestório, é separado em três partes: estomodeu, mesêntero e proctodeo. Esse sistema tem como função a ingestão de alimentos, retirada de nutrientes do alimento ingerido e eliminação de resíduos. Diferente dos nematóides de vida livre, que fazem a maior parte da digestão no intestino, os fitonematoides comumente excretam secreções enzimáticas nas células das plantas por eles parasitadas e realizam um pré-digestão do alimento fora de seu corpo (Ferraz e Brown, 2016).

No estomodeu se encontra o esôfago e cavidade bucal, esta última é delimitada anteriormente por seis lábios, sendo dois laterais, dois subdorsais e dois subventrais. As papilas cefálicas, geralmente achatadas, são comuns nesta região. Ademais, nos fitonematoides, a cavidade bucal é caracterizada pela presença de um órgão portátil, situado em posição central, chamado estilete, que serve como agulha hipodérmica, prestando-se à injeção das excreções enzimáticas nas células vegetais. Já o esôfago é um órgão musculoso com função de bombeamento, envolvendo componentes nervosos, glandulares e musculares (Ferraz e Brown, 2016).

No mesêntero e o proctodeo se encontra o intestino, o intestino é o órgão mais longo do sistema, possui formato tubular e consiste de camadas simples de células epiteliais que comumente é afiliada (Ferraz, e Brown, 2016).

No que se refere ao sistema excretor-secretor as funções gerais são de regular as funções osmóticas e iônicas do corpo, coletar produtos finais do metabolismo, podendo se encaixar resíduos nitrogenados que são eliminados em forma de amônia, ureia e ácido

úrico, e secreção de certas substâncias com funções não conhecidas (Ferraz e Brown, 2016).

Por fim, o sistema nervoso funciona como um receptor dos diferentes tipos de estímulos promovidos pelo ambiente, no qual, se direciona para um órgão central que irá identificar a informação. Os nematoides têm por órgãos sensoriais papilas cefálicas e fasmídios, hemizonídio, papilas genitais e seta, sendo todos associados a tecidos nervosos. Em relação ao sistema nervoso, propriamente dito tem-se um órgão central periesofágico, denominado anel nervoso central, o qual é abastecido por uma rede de condutos nervosos periféricos (Ferraz e Brown, 2016).

2.1.3 Gênero *Meloidogyne* e a espécie *Meloidogyne enterolobii*

Descritos como nematoides de galhas, seus primeiros registros datam de parasitismos em plantas na Europa desde 1855, sendo o gênero criado apenas em 1877, no Brasil, com a descrição da espécie-tipo *Meloidogyne exigua* Goeldi (Ferraz e Brown, 2016; Ferraz, 2018).

Atualmente são conhecidas mais de 100 espécies, das quais encontramos: *M. arenaria* (Neal) Chitwood; *M. incognita* (Kofoid & White) Chitwood; *M. javanica* (Treub) Chitwood e *M. hapla* Chitwood; *M. exigua* Goeldi; *M. coffeicola* Lordello & Zamith; *M. enterolobii* Yang & Eisenback; *M. ethiopica* Whitehead; *M. graminicola* Golden & Birchfield e *M. paranaensis* Carneiro, Carneiro, Abrantes, Santos & Almeida (Ferraz e Brown, 2016; Ferraz, 2018).

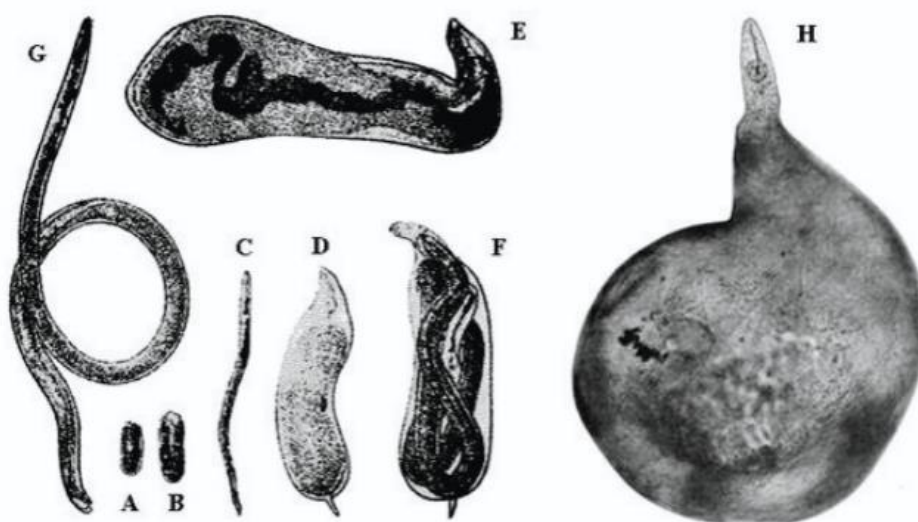
No tópico 1.2 foi descrito como é a morfologia dos nematoides em geral, por seguinte, é imprescindível entender a sua forma de atuação e como causa danos a plantas. A principal responsável pela infecção de plantas são as fêmeas de *Meloidogyne*, que possuem corpo globoso e região anterior formando o pescoço. O processo de inicia-se obrigatoriamente em raízes, as fêmeas depositam uma massa de ovos, no parênquima cortical ou sobre a superfície das raízes, que são unidos por uma substância aderente. Após um período ocorre um processo de ecdise, na qual juvenis do 1º estágio (J₁) passa a ser juvenis do 2º estágio (J₂) que possuem o corpo filiforme, este último, são pré-parasitas que abandonam os ovos e vão em direção a outras raízes, podendo ficar algum tempo no solo, abastecido por sua reserva de lipídios, armazenadas no intestino, até encontrar seus hospedeiros (Ferraz e Brown, 2016; Ferraz, 2018).

O J₂ agora penetra em radícula de plantas suscetíveis e migra do parênquima cortical em direção a região anterior do corpo em torno do cilindro vascular. Outra vez, estabelece a relação de parasitismo, injetando secreções esofagianas lançadas pelo estomatoestilete e formando um grupo de células chamadas de nutridoras, estas, serão agora os sítios de alimentação, denominada cenócito, sendo essenciais na nutrição do nematóide enquanto ele está parasitando a planta (Ferraz, 2018).

Com o início da alimentação o J₂ começa a aumentar de volume e se torna sedentário no local da célula, migrando agora de J₂ pré-parasita para parasita. Na continuação do processo, o parasita continua a sofrer ecdise, passando para J₃ e J₄, vale ressaltar que estas duas últimas fases não se alimentam por não possuir estilete bucal. Por fim, ocorre a última ecdise, formando-se adultos fêmeas e/ ou machos. A duração biológica do ciclo é influenciada por fatores abióticos, bem como a origem da planta hospedeira, mas em geral, completa-se em 3 a 4 semanas (Ferraz, 2018).

A figura (2) mostra as diferentes fases do nematoide do gênero *Meloidogyne*, sendo ligados aos processos de ecdise.

Figura (2): Desenvolvimento do *Meloidogyne* de acordo com o processo de ecdise: (A) ovo; (B) ovo contendo J₂; (C) J₂ pré-parasita; (D) J₂ parasita; (E) fêmea imatura; (F) macho no invólucro cuticular do J₄; (G) macho e (H) fêmea sexualmente madura.



Fonte: Ferraz , 2018 apud G. Steiner e W. F. Mai & H. H. Lyon.

Segundo Ferraz e Brown (2016), “As fêmeas apresentam dois ramos genitais [...] funcionais e continuam a se alimentar após atingirem a fase adulta pelo restante de suas vidas passando, quando sexualmente maduras, a exibir forma aberrante de saco”. Para a reprodução deste gênero são conhecido dois modelos de reprodução, a anfigimixia e partenogênese, sendo que para espécies anfigimícticas os machos são sexualmente ativos, já para o modelo de partenogênese, os machos normais são bem raros, ocorrendo preferencialmente o processo de partenogênese mitótica (Ferraz e Brown, 2016).

Para identificação de fitonematóides do gênero é necessário a obtenção de um conjunto de dados anatomofolológicos e morfométricos que se liga ao estádios de juvenis e adultos. Para identificação são observados os sistemas funcionais, parede do corpo e região específica. A identificação de nematóides iniciou-se a partir do ano de 1949 quando B. Chitwood publicou seu clássico artigo que sugere o exame da região perineal das fêmeas, o que necessitou de cortes específicos (Ferraz e Brown, 2016).

A identificação seguindo o método de Chitwood ainda é difícil, após vários anos, especialistas tentaram entrar em um consenso sobre esse processo empregando também métodos bioquímicos e técnicas biomoleculares. Agora as variações na verificação das características anatomofolológicas e morfométricas passaram a ser observadas também a partir do parasitismo em diferentes plantas hospedeiras, sendo separadas agora em quatro raças a partir deste hábito (Ferraz e Brown, 2016).

A sintomatologia do gênero também é bem conhecido, sendo que os nematóides *Meloidogyne* considerados de galhas, o qual se caracteriza por sintomas diretos observados nos próprios órgãos vegetais parasitados, podendo ser visualizado principalmente no sistema radicular e até mesmo na parte aérea da planta.

As galhas formadas nas raízes são os sintomas mais característico do gênero, há um engrossamento de diâmetro na raiz da planta, do qual resultam em hiperplasia e hipertrofia celular no cilindro vascular, afetando diretamente o parênquima cortical ao redor do local em que o parasita está instalado. A própria planta tem uma reação às toxinas introduzidas pelo parasita, mas este não é um detalhe característico de todas as espécies, a exemplo da *M. coffeicola*, onde não ocorre este problema (Ferraz, 2018). De acordo com Ferraz e Brown (2016), “as galhas no geral aparecem um a dois dias depois da penetração do juvenil infectante na raiz e, como representam mera resposta da planta à infecção, não são essenciais ao sucesso da relação parasita-hospedeiro”.

A figura (3) demonstra o exemplo de galhas em uma raiz e planta de pimentão atacada pelo nematóide *Meloidogyne enterolobii*. Como observado na imagem, o formato das galhas é irregular, podendo ser arredondados ou alongados.

Figura (3): raízes de pimentão atacadas por *Meloidogyne enterolobii*.



Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Outro fator que é característico do gênero é a redução no volume do sistema radicular, geralmente plantas atacadas pelo parasita apresenta uma raiz pouco volumosa e com pouca radícula, isto está relacionado em grande parte na preferência do gênero em parasitar raízes jovens que são mais fáceis de penetrarem por não serem lignificadas, ademais, com a redução das radículas também há uma redução na absorção de nutrientes e água, o que justifica folhas mais amareladas em plantas atacadas (Ferraz, 2018).

Comumente, em plantas parasitadas há o descolamento cortical nas raízes, o que faz com que as raízes esfarelem ao serem apertadas, sendo comuns na espécies *M. coffeicola* e *M. enterolobii*. Além disso, também são sintomas: anomalias em vegetais subterrâneos, como cenouras; rachaduras, como as que ocorre em batata doce; tamanho desigual das plantas, estando relacionado a distribuição tipicamente irregular dos fitonematoides; fome dos minerais; Murchamento das folhas; Desfolha; Mudanças em características varietais e diminuição na produção (Ferraz, 2018).

Como dito anteriormente, as galhas podem não demonstrar necessariamente o sucesso da infecção do parasita na planta, mas o cenócito introduzido pelos nematóides sim. Os cenócitos atuam como um constante “sugador” dos fotoassimilados das plantas, visando promover o desenvolvimento do próprio parasita. Essa característica do nematóide tende a levar ao desequilíbrio fisiológico, provocando a carência de macro e micronutrientes na planta (Ferraz e Brown, 2016).

2.2 Biocarvão

2.2.1 Formação do Biocarvão

As denominadas “terras pretas” já vinham sendo observada durante muito tempo em solos antropogênicos em terras indígenas na amazônia, sendo encontrados há mais de 100 anos em sítios arqueológicos e aldeias indígenas pré-colombianas, distribuídos desde Rondônia e Alto Rio Negro até as regiões mais próximas ao delta do Rio Amazona (Maia et al., 2021; Mendes, 2020). Acredita-se que essas terras ocupadas por resíduos preto, ocupem cerca de 1% do território amazônico, estes depósitos de sedimentos escuros teriam sido formados involuntariamente ao longo dos anos através do depósito de “lixos” feito por habitantes da área (De Rezende et al., 2019).

Foi observado nessas regiões alta fertilidade do solo quando comparado a solos adjacentes. Segundo De Rezende et al. (2019) nessas regiões existem cerca de “1000 ppm de fósforo, sem falar nos demais nutrientes, e alto teor de matéria orgânica, que pode ser até uma ordem de grandeza maior do que nos solos ao redor”. Essa alta fertilidade foi atribuída, em grande parte, a dejetos de cerâmicas deixados na área por civilizações antigas e ao carvão pirogênico, contido na área, graças às queimadas.

Um tempo depois o que viria a ser essa terra preta começou a ser denominado então de biocarvão ou *biochar* (do inglês). O termo *biochar* é a união das palavras em inglês *biomass* (biomassa) e *charcoal* (carvão) (Kalinke, 2019), este termo foi imputado graças à descoberta do processo de produção deste produto, ademais, também foi atribuído com o intuito de separar a ideia de prejudicial ao meio ambiente e mudá-lo para benéfico. Hoje se classifica como biochá aqueles processos em que há a reciclagem de resíduos orgânicos, a produção de energia renovável, a captura de carbono estável nos solos e a melhoria de sua fertilidade (Rezende et al., 2011). Não podendo se encaixar nesta classe a degradação ambiental em detrimento da fabricação do carvão.

O biocarvão é um produto obtido, na maioria das vezes, a partir de pirólise. Neste processo há o aquecimento da biomassa em ambiente fechado, com pouco ou nenhum oxigênio e temperatura variando de 300 a 700°C (Maia et al., 2021). A pirólise pode ser rápida ou lenta, a depender do objetivo final do biocarvão, em casos de produção rápida, para elaboração de bio-óleo, o indicado é que a temperatura do processo seja entre 100 e 500° C, para casos de produção lenta e obtenção da parte sólida, o carvão ou biocarvão, a

pirólise deve ser no mínimo de 450°C, chegando a temperaturas próximas a 900°C (Laird et al., 2010; Nachenius et al., 2013). Além da pirólise rápida e lenta ainda é possível ter um processo de pirólise flash, solar e assistida por micro-ondas, nas quais, a temperatura pode beirar os 1200°C (Tan et al., 2017; Razzaghi et al., 2020)

O processo da pirólise ocorre em várias etapas, inicialmente na produção ocorre a secagem da biomassa, sendo procedida da remoção progressiva dos voláteis pirolíticos, em seguida há a decomposição da madeira à medida que a temperatura aumenta, entre 200 e 500°C inicia o processo de degradação das hemiceluloses, celulose e lignina. A partir de 500°C a pirólise secundária começa a predominar com a quebra (cracking) dos produtos pirolenhosos, frutos da primeira etapa, havendo uma perda de oxigênio, principalmente via óxidos de carbono (CO e CO₂), além disso há a condensação do carbono e formação das estruturas carbônicas conhecido como aromatização ou grafitização (Maia et al., 2021; Mendes, 2020).

As estruturas carbônicas conhecidas como aromatização ou grafitização são estruturas poliaromáticas que dão estabilidade ao carvão e resistência à degradação. Na margem dessas estruturas aromáticas existem “grupos funcionais como carboxilas e hidroxilas que podem se ionizar e se tornar sítios iônicos ativos que conseguem aumentar a capacidade de retenção de cátions (CTC) e de nutrientes no solo” (De Rezende et al., 2019). Testes realizados por Costa (2021), evidenciaram que a elevação dos valores de CTC foi proporcional ao aumento das doses do biocarvão, isto se deve também pelo conteúdo de oxigênio do biocarvão, incluindo grupos carbonila, carboxila e fenólicos, que aumentam a CTC. Paralelamente o biocarvão também serviu como um sequestrador de carbono a longo prazo.

O biocarvão pode ser feito a partir de diferentes materiais, sejam eles à base de plantas (folhas, cascas, sementes e espigas), produtos à base de madeira (como pellets e lascas de madeira, casca de árvore) e resíduos orgânicos e industriais (como lodo e estrume) (Razzaghi et al., 2020; Nair, et al., 2020; Santos, et al, 2022).

A temperatura no processo de pirólise determina a composição dos nutrientes no biocarvão. Trabalhos feitos por Maia et al. (2021) com eucalipto, por Reis (2020), com casca coco verde e seca, por Montoro (2020), com briquetes e por Mendes (2020), com cama de aviário, evidenciaram que a depender da temperatura, o composto final pode ter maior teor de carbono, nitrogênio ou outros elementos.

As propriedades físico-químicas do biocarvão dependem das condições em que foi realizada a pirólise, destacando-se principalmente temperatura, tempo de duração e tipo de reator, além da matéria-prima. Em estudo, o carvão pirolisado a 350° C apresentou um

rendimento de 32,03%, massa voláteis de 40,1%, cinzas de 32,1%, carbono fixo de 27,8% e umidade mínima 0,2%. Em relação ao material volátil produzido durante a reação, os resultados demonstraram a produção de materiais lábeis: metanol, ácido acético, CO, H₂ e CO₂ e moléculas com pequenas massas moleculares, como: ácidos graxos, óleos e resinas, assim como a decomposição das hemiceluloses e a liberação de ácidos graxos (Enders et al., 2012; Zhao et al., 2013).

Durante a produção de biocarvão a biomassa apresenta, durante o tratamento térmico, perda de água (natural e estrutural), de oxigênio, de nitrogênio e de hidrogênio, em diferentes graus de intensidade (De Rezende et al., 2019). Em geral, independente do material, o biocarvão apresenta vantagens quase que fixa de teor de carbono, matéria volátil, cinzas, nutrientes, porosidade, área superficial específica, morfologia, cátion e capacidade de troca de ânions e retenção de água, essas características físico-químicas estão relacionadas, diretamente, ao uso deste composto no solo, sendo o biocarvão de madeira o que apresenta maior quantidade de nutrientes, se comparado aos que vêm de resíduos culturais e rejeitos (Liu, et al., 2016, Feitosa, et al., 2017, Batista, et al., 2018; Wijitkosum & Jiwnok, 2019, Tomczyk, et al., 2020; Huang, et al., 2021 apud Santos, et al., 2022).

2.2.2 Influência da porosidade do biocarvão na atividade microbiana do solo

As características físicas do biocarvão estão diretamente relacionadas com o processo de produção, principalmente concernente à matéria-prima e a temperatura em que é feita a pirólise.

Segundo De Rezende et al. (2019), a porosidade varia muito de material para material no processo de produção do biocarvão, visto que após a pirólise, o biochar tende a manter a estrutura anatômica do material de origem, seja animal ou vegetal. Os poros de estruturas de tecidos vegetais e de ossos tendem a ser mantidos, neste processo esses poros podem ser mais ou menos preenchidos por outros constituintes dos tecidos que são perdidos ao longo do processo. Em geral, quanto mais alta a temperatura de pirólise e maior o tempo do processo, maior o volume de poros e da superfície específica do biochar, o que confere ao material maior poder de adsorção (De Rezende et al., 2019; Ajeng et al., 2020; Jeffery et al., 2015).

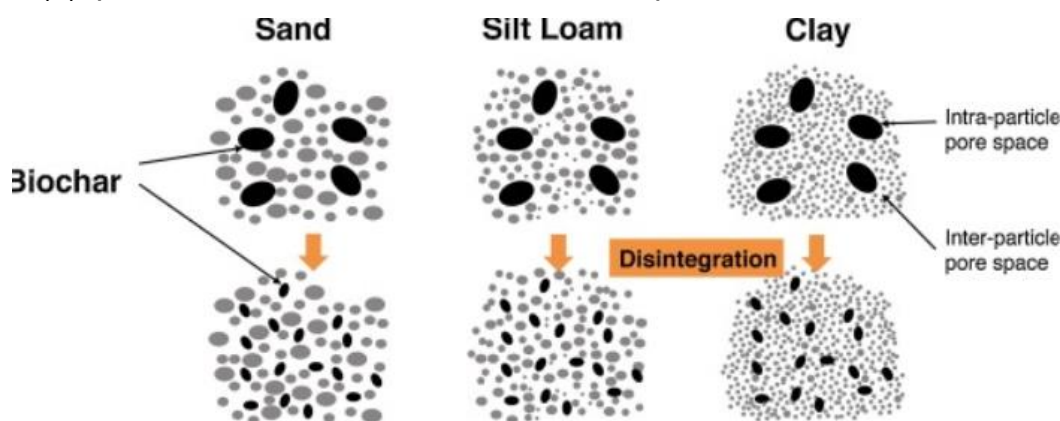
Experimentos feitos por Duarte et al. (2019) e Mendoza e Horn (2018) demonstraram mudanças significativas na porosidade total de solos adubados com biocarvão e alterações

em macroporos para mesoporos, respectivamente. Estes estudos explicitaram que o uso de biocarvão aumentou a estabilidade estrutural do sistema de poros.

De acordo com Razzaghi et al. (2020) em termos de tamanho, a porosidade é altamente variável incluindo nano ($< 0,9 \mu\text{m}$), micro ($< 2\text{--}50 \mu\text{m}$) e a macroporos, enquanto que o tamanho das partículas dos biocarvões variam de 0,03 a 8,0mm, com mediana de 2,0 mm.

A imagem abaixo demonstra a ilustração de como funciona a partícula do biocarvão do solo:

Figura (4): partículas de biocarvão em diferentes tipos de solo.



Fonte: Zhang, Amonette e Fleury (2017)

É plausível observar que além da relação com o tamanho da própria partícula, existe uma relação direta entre os interporos e intraporos, ou seja a relação entre os espaços vazios dentro do biocarvão e os espaços entre o biocarvão e o solo.

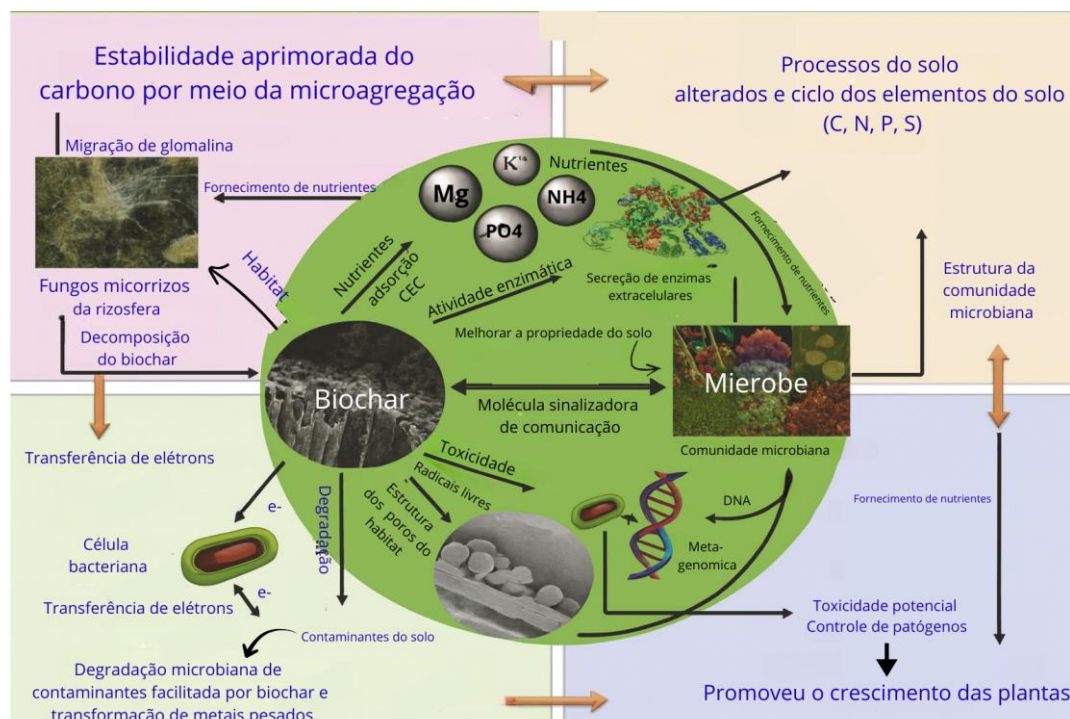
Segundo Liu et al. (2017) a intraporosidade e interporosidade é influenciada também pelo formato alongado da partícula de biocarvão, que aumenta o espaço entre os poros em ψ mais alto, quando a pressão de capilaridade é o principal componente do potencial hídrico do solo.

O aumento da porosidade do solo auxilia não só na retenção de água, mas também na influência sobre a atividade microbiológica no solo. Ajema (2018) definiu o porquê a interação entre biocarvão e microrganismos deu tão certo. De acordo com o autor, os poros presentes no biocarvão são como “abrigo” para os microrganismos, isso se referindo aos macroporos, já que os microporos, são pequenos até para microrganismos, além disso, o biocarvão possui em sua superfície nutrientes adsorvidos que podem ser interessantes para alimentação microbiana; As condições de aeração e umidade garantida pelo biocarvão garantem um ambiente favorável para vida microscópica. As próprias moléculas na

superfície do biocarvão podem funcionar como sinalizadores/comunicadores entre os microrganismos, entre outros.

O esquema abaixo apresentado por Ajema (2018), em seu artigo, referente a ilustração desenvolvida por Xiaomin Z., et al. (2017), elucida bem as interações entre biocarvão e microrganismos do solo:

Figura (5): Modelo representando a interação entre microrganismos e biocarvão no solo.



Fonte: Adaptado de Xiaomin Z., et al. (2017) apud Ajema (2018).

A imagem acima demonstra como é fundada a interação entre os microrganismos e o biocarvão. Dentro das vantagens estabelecidas, a planta é o organismo mais beneficiado, já que melhorando esta interação, melhora também as características do solo para a planta. Vale ressaltar que o biocarvão pode auxiliar inclusive na relação C/N, sendo que garante o carbono para a planta e o local ideal para as bactérias fixadoras de nitrogênio.

Apesar de todos os estudos demonstrando as vantagens da interação microrganismo/biocarvão, González-Marquetti et al. (2020), descreve com base em seu estudo, que esta interação pode ser insignificante a depender de qual microrganismos é consorciado. É preciso uma análise apurada antes da implementação do consórcio para verificar se aquele microrganismo é adequado para o ambiente, local e matéria-prima do biocarvão.

Em relação a atividade microbiológica, é necessário se atentar principalmente àqueles que ajudam na ciclagem de nutrientes, principalmente as minhocas, chamadas de “vermes da terra”. Conforme Edwards (2004) e Liesch (2010), as minhocas são os principais indicadores de boa qualidade do solo, além disto, este último autor aponta em sua pesquisa um aumento na perda de peso e mortalidade das minhocas com o crescente aumento de pH, visto que esses organismos, possuem preferência por pH baixos, outro fator é o acúmulo de microrganismos em seus macroporos, o que não disponibilizaria, de fácil acesso, a alimentação dos compostos orgânicos presentes na superfície do biocarvão.

Diferente dos resultados mencionados por Edwards (2004) e Liesch (2010), De Souza et al. (2023) explica que solos que recebem o biocarvão como condicionar aumenta a população de minhocas, proporcionando também uma melhor fixação de N atmosférico. Claramente os fatores negativos sobre as minhocas podem estar limitados ao tipo de biocarvão e a espécie das minhocas, além disso, também é necessário considerar em qual região o experimento está sendo conduzido. Regiões quentes, por exemplo, podem não ter atividade tão prejudicial para esses vermes do solo.

Noguera et al. (2010) relata a influência do tipo de solo, sobre as potencialidades do biocarvão. Em seu experimento com *Eucalyptus deglupta* Blume y *Pontoscolex corethrurus* Muller sobre o crescimento de *O. sativa*, demonstraram que em solos ricos em nutrientes, o desempenho do biocarvão tende a ser melhor, se comparado a solos escassos em nutrientes. Os efeitos positivos sobre a biomassa da cultura testada e sobre as minhocas foram visíveis. Considerando as variáveis mencionadas, é importante a implementação do biocarvão com uma boa adubação do solo, para evitar perdas com os macrorganismos do solo.

No manejo de nematoides, uma das estratégias mais empregadas consiste no incremento da matéria orgânica no solo, cujo efeito supressivo está intrinsecamente associado ao aumento da competitividade biológica do ambiente. Conforme descrito na literatura, a aplicação de biocarvão está diretamente relacionada à estimulação da vida microbiana no solo. Essa atividade promove um incremento na riqueza e diversidade da biota edáfica, criando um cenário de antagonismo que pode auxiliar no controle populacional desses fitoparasitas.

2.3.1 Ácido Pirolenhoso

O ácido pirolenhoso é um coproduto da pirólise, processo de degradação térmica de material orgânico ou biomassa vegetal na ausência de oxigênio, que também gera

biocarvão, gases combustíveis e outros subprodutos. Trata-se de um líquido orgânico condensado bruto, de natureza complexa e altamente oxigenada, resultante da condensação dos vapores liberados durante a carbonização. Sua nomenclatura tem origem etimológica na combinação dos termos "lignina" – principal componente estrutural da biomassa lignocelulósica que serve como matéria-prima – e "piráo" (fogo) ou "pirólise" – referência direta ao seu método de obtenção. Dessa forma, o próprio nome sintetiza a relação intrínseca entre a origem do material e a tecnologia de produção. (Mathew e Zakaria, 2015; GREWAL, ABBEY e GUNUPURU, 2018).

Em seu livro, Wampler (2006, p. 1), trata de processos relacionados à pirólise, não só para fins de alta produção, mas principalmente aquela focada para a pirólise analítica, a qual tem como objetivo estudar as moléculas e seus comportamentos. Entender a natureza da pirólise está intimamente ligada a entender a reação do pirolenhoso e suas funcionalidades. Segundo o autor, de forma controlada e reprodutível, a pirólise fragmenta macromoléculas em compostos menores por meio da aplicação de energia. O perfil desses fragmentos é característico da estrutura original, uma vez que a quebra ocorre preferencialmente nas ligações químicas mais fracas. Assim, a técnica produz um "mapa" de fragmentos que carrega informações essenciais sobre a composição e o arranjo da macromolécula de origem.

Em resumo a pirólise degrada moléculas, como polímeros sintéticos, através da quebra aleatória de ligações químicas por mecanismos de radicais livres. A fragmentação ocorre principalmente por escisão aleatória da cadeia e cisão beta, gerando uma distribuição característica de hidrocarbonetos menores (alcanos, alcenos e dienos). A estrutura do polímero original determina o padrão dos produtos: o poli(etileno) gera uma série contínua de hidrocarbonetos, enquanto polímeros com unidades monoméricas maiores, como poli(propileno) e poli(1-butenos), produzem padrões onde os picos cromatográficos se repetem em intervalos correspondentes ao número de carbonos do monômero (3 e 4 carbonos, respectivamente). Assim, o pirolisado atua como uma "impressão digital" química, fornecendo evidências diretas da estrutura macromolecular original (Wampler, 2006, p. 2-3).

O processo de pirólise apresenta distintas configurações operacionais que determinam a natureza dos produtos gerados, podendo ser classificado em 3 categorias: lenta, rápida e ultrarrápida. A pirólise lenta, caracterizada por baixas taxas de aquecimento, sendo de 5-30 minutos e a temperatura em torno de 600° C, o que maximiza a produção de carvão vegetal (biochar) através de reações secundárias favorecidas nessas condições.

Em contrapartida, a pirólise rápida emprega aquecimento acelerado e tempos de residência curtos, gerando principalmente vapores e aerossóis, um pouco de carvão e gás, constituindo-se como método promissor para conversão energética da biomassa. A pirólise ultrarrápida representa a configuração mais extrema, com taxas de aquecimento elevadíssimas e tempos de residência na ordem de segundos, aproximando-se conceptualmente dos processos de gaseificação; esta modalidade pode ser direcionada tanto para produção de vapores quanto para elevados rendimentos de carvão (até 60%) quando operada sob condições específicas de pressão, requerendo igualmente reatores especializados para sua implementação eficiente (Gomes, 2010; Bridgwater, 2012; Laird, 2012; Mota et al., 2015).

A pirólise é um processo termoquímico aplicável a diversas biomassas lignocelulósicas, incluindo espécies madeireiras (eucalipto, algaroba), resíduos agrícolas (casca de coco, palha de milho) e culturas energéticas (capim-elefante, cana-de-açúcar). Estes materiais consistem principalmente nos componentes estruturais celulose, hemicelulose e lignina, cuja proporção determina as características dos produtos pirolíticos (Mota et al., 2015).

O processo envolve reações químicas classificadas como primárias – que ocorrem diretamente no substrato celulósico – e secundárias, decorrentes da decomposição de intermediários voláteis como o levoglucosano. Condições operacionais específicas influenciam a predominância dessas reações: baixas taxas de aquecimento com prolongado tempo de residência favorecem as reações secundárias, enquanto condições de pirólise rápida e ultrarrápida as inibem (Luengo et al., 2008; Mota et al., 2015).

A otimização dos produtos depende diretamente dos parâmetros de processo. Reações primárias maximizam a produção de líquidos, enquanto as secundárias promovem a formação de sólidos. Temperaturas reduzidas associadas a longos tempos de residência favorecem a produção de carvão vegetal, enquanto temperaturas elevadas com extenso tempo de vapor aumentam a conversão em gases. Condições intermediárias com curto tempo de residência de vapor são ideais para maximizar o rendimento de líquidos (Bridgwater e Peacocke, 2000; Mota et al., 2015).

Cineticamente, o processo apresenta três estágios distintos: inicialmente ocorre a evaporação de umidade (até 150°C), seguida pela decomposição de celulose e hemicelulose com liberação de voláteis leves (170-370°C), e finalmente a degradação da lignina com combustão de voláteis pesados (400-700°C) (Ioannidou et al., 2009).

Conforme descrito por Balat et al. (2009), a biomassa, enquanto substrato para a produção de ácido pirolenhoso, caracteriza-se como uma fonte versátil para a geração de combustíveis (gasosos e líquidos), carvão vegetal e matérias-primas químicas. A conversão deste recurso é categorizada em duas rotas principais: biológica e termoquímica. Esta última, por sua vez, subdivide-se em processos distintos, nomeadamente pirólise, gaseificação e liquefação direta. Especificamente no processo de pirólise, os produtos resultantes incluem uma fração volátil, composta por gases, vapores e componentes de alcatrão, bem como um resíduo sólido carbonáceo, designado como biocarvão.

A Circular Técnica da EMBRAPA Campos (2018) estabelece diretrizes para o controle de qualidade do extrato pirolenhoso, enfatizando a necessidade de isenção de alcatrões e hidrocarbonetos no produto final. Como parâmetro de segurança, adotam-se os limites máximos de contaminantes definidos pela União Europeia para Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), correspondentes a 0,34 mg/L para a soma de quatro HPAs específicos ou 0,49 mg/L para a soma de oito compostos deste grupo.

Conforme prescrito, o adequado controle térmico durante o processo pirolítico é fundamental para manter as concentrações de HPAs dentro dos limites seguros. O protocolo de estabilização requer repouso do extrato por período de quatro a seis meses pós-coleta. Um produto de qualidade é caracterizado por coloração límpida entre amarelada e marrom-avermelhada, odor característico de defumados, pH entre 2,0-3,7 e densidade superior a 1,005 a 20°C, parâmetros estes que o assemelham visualmente a bebidas como chá preto ou cerveja (Campos, 2018)

A composição química do ácido pirolenhoso, líquido resultante da pirólise da madeira, é variável e dependente da natureza da matéria-prima utilizada. No estudo de Candido et al. (2023), que visava identificar alternativas de baixo custo para a inibição da urease, o ácido pirolenhoso foi apontado como um potencial candidato. A referida investigação avaliou extratos pirolenhosos provenientes de diferentes biomassas vegetais - especificamente casca de coco, acácia-negra e eucalipto - e de distintos processos produtivos. Os autores postularam, com base nos resultados obtidos, que a matéria-prima e o processo de produção são fatores determinantes para a composição qualitativa e quantitativa dos componentes presentes nesses extratos. Ademais, a metodologia de pirólise empregada, classificada como rápida ou lenta, também foi descrita como um parâmetro de significativa influência na qualidade do produto final.

2.3.2 Ácido Pirolenhoso: testes sobre nematóides

O ácido pirolenhoso apresenta aplicabilidade no manejo fitossanitário. Grewal, Lord e Gunupuru (2018), estudaram sobre as possíveis aplicações do pirolenhoso na agricultura, eles concluíram que o mesmo possui propriedades antimicrobianas, antioxidantes, pesticidas e que conseguem melhorar o crescimento das plantas, podendo ser uma ferramenta ecológica e sustentável para agricultores.

Em investigação conduzida por Sampaio (2021), constatou-se que o extrato pirolenhoso suprimiu significativamente o parasitismo e a taxa reprodutiva de *Meloidogyne enterolobii* em goiabeiras. Os dados demonstraram que concentrações superiores a 40% do extrato foram eficazes no controle do fitonematoide, resultando em expressiva redução do índice de reprodução do patógeno. Em congruência com tais achados, Farias et al. (2020) relataram efeitos nematostáticos e nematicidas de extratos pirolenhosos obtidos de palmeiras (*Cocos nucifera*, *Syagrus cearensis*, *S. coronata* e *Wodyetia bifurcata*) sobre *Scutellonema bradys*, reforçando o potencial desses compostos no manejo nematológico.

Testes desenvolvidos por Sandisk, Fabiyi e Bello (2023) testando o manejo ecológico de de ácido pirolenhoso de *Bambusa vulgaris* sobre a espécie *M. incógnita* na alface destacaram que o BPL poderia servir como uma alternativa ecológica muito potente aos nematicidas sintéticos no manejo de *M. incógnita*. Conclusões encontradas por Neto, Negrisoli Junior e Negrisoli (2017) corroboram com isso, no qual descreveram que produtos vindo do processo pirogênico teve efeito aditivos na mortalidade em espécie de nematóide.

O estudo desenvolvido por Miranda (2021), ao investigar estratégias de controle de nematoides de galha, demonstrou que a aplicação do extrato pirolenhoso exerceu efeitos bioativos significativos no cultivo da acerola. Os dados permitem inferir que o produto atuou como estimulante vegetal, promovendo o desenvolvimento radicular, a recuperação da coloração foliar – com transição de amarelo para verde – e o surgimento de novas brotações. Paralelamente, registrou-se expressiva redução populacional de ovos e indivíduos vivos de fitonematoides pós-aplicação. Tais evidências sugerem o potencial do extrato pirolenhoso como alternativa fitossanitária sustentável e economicamente viável, embora sua validação definitiva requeira investigações adicionais mediante ensaios concentração-dependentes e análises biométricas sistematizadas.

2.3.3 Escolha da Algaroba como matéria prima

A algaroba foi introduzida no Brasil em 1940, objetivando aumentar os recursos forrageiros da região do Sertão Pernambucano, além disso também foi utilizado para fins de reflorestamento de áreas desmatadas. A algaroba se adaptou rapidamente e conseguiu se adaptar ao clima semiárido (Brito, 2024).

Prosopis juliflora foi o nome científico dado a algaroba, sendo do gênero *Prosopis*, a espécie é uma planta arbórea, xerófila, pertencente à família *Leguminosae* e subfamília *Mimosoideae*. Originalmente a espécie é do deserto do Piura no Peru (Brito, 2024).

Quando se fala de sua morfologia, é possível observar que a algaroba possui espinhos inermes e germinados, possui ramos ascendentes, flores amareladas-esverdeadas em formato de espigas, formando uma inflorescência do tipo racimos. Possui flores actinomorfas, bixessuais, apresentando dez estames, cinco sépalas e cinco pétalas. Seu fruto é do tipo vagem, indeiscente, variando seu comprimento entre 10 a 40 cm, possuindo coloração amarelo-palha e 17 sementes (Brito, 2024).

A algaroba é mais disseminada no Nordeste do país, isso devido a sua resistência à seca e seu próprio florescimento nesta época. A planta se adapta bem a quase todos os tipos de solo, exceto em solos com muita umidade, o que torna a planta “perfeita” para a implementação na caatinga, além disto a planta é de fácil germinação (Brito, 2024).

O estudo desenvolvido por Cavalcanti et al. (2020) realizou a caracterização química de resíduos biomássicos de algaroba com finalidade de aplicação energética. De acordo com a análise química imediata, os resultados demonstraram a seguinte composição: teor de umidade de 10,45%, teor de cinzas de 8,75%, conteúdo de materiais voláteis de 26,11% e carbono fixo de 65,14%. Esses resultados sugerem as características do ácido pirolenhoso produzido a partir dessa espécie vegetal, visto que, como mencionado antes, as características químicas do pirolenhoso estão diretamente associadas à matéria-prima utilizada para a elaboração do produto.

Estudos desenvolvidos por Bage (2022) também descreveram a quantidade de materiais presentes na algaroba, mas desta vez, em biochar. Os resultados demonstraram a presença de 79,23% de materiais voláteis, 37,92% de carbono fixo e 1,59% de cinza, isso considerando o processo de produção a uma temperatura de 450°C. Os resultados desta pesquisa evidenciam que a quantidade de alguns compostos podem também estar atrelados a idade da madeira e a temperatura de pirólise.

2.4 Microrganismos eficientes (EM)

Segundo o dicionário de língua portuguesa de Aurélio, microrganismos são “s.m. Organismo excessivamente pequeno, visível somente com a ajuda de um microscópio: as bactérias, os fungos, os vírus.....” já eficiente é descrito pelo autor como “adj. Que desenvolve alguma coisa, trabalho ou tarefa, de modo correto e sem erros, obtendo um ótimo resultado.” (Dicionário online, 2025). O nome microrganismos eficiente vem do inglês: effective microorganism e é aplicado a um conjunto de microrganismos que conseguem expressar características desejáveis para determinado fim.

Os microrganismos eficientes estão presentes na natureza a muitos anos, podendo ser naturalmente do local ou adicionados (Caetano, 2024). De acordo com Pugas et al., (2013) “A utilização dos microrganismos eficientes (EM) favorece a atividade microbiana e conseqüente aceleração da degradação da matéria orgânica bem como disponibilização dos nutrientes à plantas favorecendo seu desenvolvimento”, o que justifica o seu crescente uso como incremento no solo.

A composição dos microrganismos podem ser diversas, dependendo do tipo do solo, a cultura e principalmente a região atrelada ao clima. Bactérias do filo firmicutes, do gênero *Lactococcus* e do gênero *Bacillus*, são frequentemente associadas a solos com microrganismos eficientes, sendo este último o mais encontrado associado ao desenvolvimento de plantas (Bonfim, 2011; Cardoso e Andreote, 2016; Batista, 2017). Bonfim chega a citar que a *Lactococcus* contribuem para a supressão de patógenos, visto que bactérias deste gênero produzem substâncias antimicrobianas, incluindo ácido láctico. Iriti et al., (2019) chega a apontar que a solução de EM mais eficiente possui bactérias que produzem o ácido láctico.

Tanya e Leiva (2019), ao buscarem identificar os principais microrganismos presentes no EM comercial e de produção doméstica, conseguiram encontrar predominância dos gêneros *Bacillus*, *Streptomyces* e *Staphylococcus*, podendo também encontrar fungos

De acordo com a revisão bibliográfica realizada por Avila et al. (2021), a utilização de Microrganismos Eficazes (EM) promove a melhoria da qualidade biológica do solo. A inoculação desses consórcios microbianos contribui para o incremento da diversidade e atividade da biota edáfica, potencializando processos biogeoquímicos essenciais à fertilidade do solo, como a ciclagem de nutrientes e a estabilização da matéria orgânica, além de deixar o ambiente equilibrado.

Seguindo a análise de Avila et al., (2021), a agricultura contemporânea tem testemunhado avanços significativos no emprego de agentes microbiológicos para promoção de crescimento vegetal e controle biológico de fitopatógenos. A prospecção e

utilização de isolados microbianos nativos em sistemas agrícolas convencionais e orgânicos configuram-se como estratégia promissora, uma vez que tais populações apresentam adaptação natural às condições edafoclimáticas locais e demonstram especificidade de ação contra comunidades patogênicas endêmicas. Esta abordagem permite o aproveitamento de isolados regionais, otimizados às particularidades macro e microambientais dos sistemas produtivos.

O autor também chega a falar que esta tecnologia possibilita ainda a formação de parcerias estratégicas entre agricultores e instituições de pesquisa regionais, visando à quantificação da diversidade de agentes de controle biológico em campo. Tal colaboração permite o desenvolvimento de protocolos personalizados para o manejo fitossanitário em diferentes contextos agroecológicos (Avila, et al., 2021). Podendo ser aplicado inclusive para o incremento da matéria orgânica e ambiente menos propícios à infestação de fitonematoides.

Com base na revisão de literatura de Da Silva, Cordeiro e Rocha (2022) conclui-se que os Microrganismos Eficazes (ME) representam uma tecnologia versátil e benéfica para a agricultura sustentável. O Brasil, dada sua notável biodiversidade microbiana e a abundância de substratos orgânicos, possui potencial singular para desenvolver e aplicar esses consórcios.

3. OBJETIVOS:

Objetivo Geral:

Avaliar a efeito de biocarvão, de ácido pirolenhoso, ambos de algaroba (*Prosopis juliflora*), e de microrganismos eficientes, sobre planta de pimentão inoculada com o nematoide *Meloidogyne enterolobii*,

Objetivos específicos:

- Avaliar o efeito nematicida e determinar a dose eficaz do biocarvão, do ácido pirolenhoso e dos microrganismos eficientes, individuais e combinados, sobre *Meloidogyne enterolobii*;
- Avaliar os efeitos agronômicos no pimentão da aplicação isolada e combinada de biocarvão, ácido pirolenhoso e Microrganismos Eficazes (EM);
- Avaliar os sobre a nutrição da planta após a aplicação isolada e combinada de biocarvão, ácido pirolenhoso e Microrganismos Eficazes (EM).

4. METODOLOGIA

4.1 Área de Estudo e Caracterização do Solo

O estudo foi conduzido utilizando-se solo proveniente de uma área experimental localizada no Instituto Federal do Sertão Pernambucano (IFSERTAOPE), Campus Petrolina Zona Rural, Pernambuco (9°19'58"S 40°41'44"W). A área em questão foi previamente cultivada com uva e é caracterizada pedologicamente como um Latossolo Amarelo.

Antes da instalação do experimento, uma amostra composta de solo foi coletada na camada de 0-20 e 20-40 cm de profundidade para caracterização química inicial. A área não apresentava sintomas visuais ou histórico de fitonematoides.

4.2 Preparação da Amostra e Processo de Solarização

O processo de solarização foi adaptado de Siqueira (2023) e Santos Filho (2022), utilizando-se 300 kg de solo foram coletados na camada de 0-20 cm de profundidade. O material foi transportado para o laboratório, onde foi destorroado e passado em peneira de 4 mm, e acondicionado em sacos plásticos transparentes (50 litros cada), com 25 kg de solo, com teor de água de 70%. Os sacos foram hermeticamente vedados para evitar a perda de umidade e dispostos verticalmente em uma área aberta, sob pleno sol, por 6 dias, com temperatura média de 30°C, conforme dados da estação meteorológica local.

Após o término do período, o solo foi considerado solarizado e pronto para os ensaios subsequentes. A Figura 1 ilustra a disposição dos sacos durante o tratamento.

Figura (6): Disposição dos sacos plásticos contendo solo durante o processo de solarização.



Fonte: Autor. Petrolina, 2025.

4.3 Preparo das Unidades Experimentais e Delineamento dos tratamentos

Após o processo de solarização, o solo foi homogeneizado e distribuído em vasos plásticos com capacidade nominal de 3 litros, contendo 3 kg de solo por unidade experimental.

Para o bioensaio, foram utilizadas mudas de pimentão (*Capsicum annuum*), variedade Itamara, com 30 dias após a semeadura. O plantio foi realizado imediatamente após a montagem dos vasos. A adubação de plantio foi realizada com base na análise química preliminar do solo e de acordo com as recomendações do Manual de Adubação para o Estado de Pernambuco (IPA, 2008), visando suprir as exigências nutricionais da cultura e evitar déficits que pudessem interferir nos resultados. Durante a condução do experimento, também foi realizada a adubação de cobertura da cultura.

O experimento foi instalado em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 27 tratamentos e 3 repetições, totalizando 81 vasos. Os tratamentos resultaram combinação fatorial de três insumos: Biochar micronizado de Algaroba (B), Ácido Pirolenhoso de Algaroba (P) e *Effective Microorganisms* (EM), com três doses, sendo: B = 0, 1500 e 3000 Kg/ha; PA = 0, 1:200 (v:v); 1:100 (v:v) e EM = 0, 200 e 400 L/ha, aplicados semanalmente.

O quadro abaixo mostra a disposição dos produtos de acordo com o tratamento:

Tabela 1: distribuição dos microrganismos eficientes, biocarvão e pirolenhoso em relação aos tratamentos.

Tratamentos	Doses	Tratamentos	Doses
T0	EM-0; B-0; P-0	T14	EM-1; B-0; P-2
T1	EM-1; B-0; P-0	T15	EM-2; B-1; P-0
T2	EM-2; B-0; P-0	T16	EM-2; B-1; P-1
T3	EM-0; B-1; P-0	T17	EM-2; B-1; P-2
T4	EM-0; B-2; P-0	T18	EM-2; B-0; P-1
T5	EM-0; B-0; P-1	T19	EM-2 B-2; P-1
T6	EM-0; B-0; P-2	T20	EM-2; B-2; P-0
T7	EM-1; B-1; P-0	T21	EM-2; B-2; P-2
T8	EM-1; B-1; P-1	T22	EM-2; B-0; P-2
T9	EM-1; B-1; P-2	T23	EM-0; B-1; P-1
T10	EM-1; B-0; P-1	T24	EM-0; B-1; P-2
T11	EM-1; B-2; P-1	T25	EM-0; B-2; P-1
T12	EM-1; B-2; P-0	T26	EM-0; B-2; P-2
T13	EM-1; B-2; P-2		

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

EM- 1 : Dose de microrganismo 200 L/ ha

EM-2 Dose de Microrganismo 400 L/ha

B-1 Dose de biocarvão de 1500 Kg/ha

B-2 Dose de biocarvão de 3000 Kg/ha

P-1 Dose de Pirolenhoso diluição de 1/100

P-2 Dose de Pirolenhoso diluição de 1/ 200

4.4 Obtenção do Inóculo e Inoculação de *Meloidogyne enterolobii*

O inóculo de nematoides do gênero *Meloidogyne* foi obtido a partir de amostras de raízes de goiabeira (*Psidium guajava*) coletadas em uma propriedade comercial localizada no distrito de Santana do Sobrado, município de Casa Nova, Bahia. A área é historicamente

afetada por nematoides, e a espécie presente foi previamente identificada como *Meloidogyne enterolobii*.

Em laboratório, ovos e juvenis de segundo estágio (J2) foram extraídos do sistema radicular das plantas sintomáticas. A extração dos nematoides das raízes foi pelo método de extração proposto por Hussey & Barker (1973), modificado por Bonetti & Ferraz (1981), que consiste em processar o sistema radicular infectado em liquidificador com uma solução de hipoclorito de sódio (NaOCl) a 0,5%, seguido da sequência do processado por um jogo de peneiras de 200 e 500 mesh, para a obtenção da suspensão do inóculo. As plantas foram inoculadas no sétimo dia de transplantadas, onde cada vaso recebeu uma suspensão (3.288 ovos/juvenis) de nematóides, estimada por mililitro sob microscópio óptico, com auxílio de lâmina de Peter (Southey, 1970).

O inóculo foi aplicado com auxílio de uma pipeta, distribuído em três aberturas com profundidade de 3,0 cm, distanciados 2,0 cm do colo das mudas para facilitar o desenvolvimento da ação dos nematoides no solo.

Figura (7): Inoculação de nematóides nos vasos.



Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

4.5 Aplicação dos tratamentos e avaliações agronômicas

Os tratamentos foram iniciados sete dias após a inoculação. O biocarvão foi aplicado em dose única no início do experimento, enquanto o ácido pirolenhoso e os microrganismos eficientes (EM) foram aplicados semanalmente até o término do período experimental.

As avaliações agronômicas, durante o período em casa de vegetação, foram realizadas aos 30 e 60 dias após a inoculação (DAI). Em cada época, foram mensurados os seguintes parâmetros de crescimento: altura da planta, número de folhas, comprimento e largura do limbo foliar. Adicionalmente, efetuou-se a leitura dos teores de clorofila A e B por meio de um medidor de clorofila portátil (ClorofiLOG, modelo CFL1030, Falker). Para leitura da clorofila, utilizou-se a folha índice proposta por Veloso et al (2020). Para indicação de área foliar utilizou-se no modelo da potência ($Y = 0,6379CL^{0,9816}$), proposto por Lorenzen et al. (2015).

Aos 72 dias após a inoculação, as plantas foram retiradas de casa de vegetação e foram avaliados: peso fresco e peso seco da parte aérea e peso fresco do sistema radicular (com auxílio de balança analítica); volume radicular total (com uso de régua) e a contagem de nematóides presentes nas raízes de acordo com o tratamento e repetição.

A extração de nematoides das raízes foi realizada mediante uma combinação de métodos estabelecidos na literatura. Utilizou-se como base a técnica de Hussey & Barker (1973), com as modificações propostas por Bonetti & Ferraz (1981), associada ao método de flotação e centrifugação em solução de sacarose, conforme descrito por Jenkins (1964).

O protocolo consistiu nas seguintes etapas: inicialmente, foi despejado o sistema radicular infectado em liquidificador com uma solução de hipoclorito de sódio (NaOCl) a 0,5%, seguido da sequência do processado por um jogo de peneiras de 200 e 500 mesh. A suspensão contida na peneira de 500 mesh foi transferida para tubos Falcon e centrifugada a 1800 rpm por 5 minutos. Após a centrifugação, o sobrenadante foi descartado e o sedimento foi ressuspenso em uma solução de sacarose a 45% (264 g L^{-1}). A mistura foi novamente centrifugada a 1800 rpm por 1 minuto. O sobrenadante resultante foi então vertido sobre uma peneira de 500 mesh para retenção dos nematoides, enquanto o material decantado foi descartado. Por fim, o conteúdo retido na peneira foi recolhido e ressuspenso em água destilada no tubo Falcon, a partir do qual se procedeu à contagem.

A quantificação da população de nematoides foi realizada sob microscópio estereoscópico, utilizando-se para tal a câmara de contagem de Peters (Southey, 1970)

4.6 Análise do Teor de Nutrientes na Parte Aérea

Com o objetivo de verificar a influência dos tratamentos na absorção de nutrientes pela planta, realizou-se a análise química da matéria seca da parte aérea. A quantificação dos teores de nutrientes seguiu metodologia padrão de análise vegetal, conforme rotina estabelecida no Laboratório de Análise de Solo e Planta do IFSERTAOPE, campus Petrolina Zona Rural. Os dados obtidos foram submetidos à análise comparativa entre os diferentes tratamentos.

5. RESULTADOS

5.1 Variáveis agronômicas

Tabela 2: Resumo da análise de variância do peso fresco da parte aérea (PFPA), do peso seco da parte aérea (PSPA), do peso fresco da raiz (PFR); e do volume de raiz (VR), de pimentão inoculado com *M. enterolobii*, em função de doses de Microrganismo eficiente (EM), Biocarvão (B) e Ácido Pirolenhoso (P).

FV	GL	PFPA	PSPA	PFR	VR
EM	2	NS	NS	NS	**
B	2	NS	NS	*	NS
P	2	NS	NS	**	***
EM x B	4	NS	NS	NS	NS
EM x P	4	NS	NS	NS	NS
B x P	4	NS	NS	NS	NS
EM x B x P	8	*	*	*	NS

CV (%) = 22.76

Média geral: 20.0192593

Ns= não significativo

*= significativo a 5%

**= significativo a 1%

*** = significativo a 0,01%

Tabela 3: Resumo da análise variância para os dados de Peso fresco do fruto (PFF); Área foliar da primeira medição (AFP); Clorofila A primeira medição (CAP) Clorofila B primeira medição (CBP) de pimentão inoculado com *M. enterolobii*, em função de doses de Microrganismo eficiente (EM), Biocarvão (B) e Ácido Pirolenhoso (P).

FV	GL	PFF	AFP	CAP	CBP
EM	2	NS	NS	NS	NS
B	2	NS	NS	NS	NS
P	2	NS	NS	NS	NS
EM x B	4	NS	NS	NS	NS
EM x P	4	NS	NS	NS	NS

B x P	4	NS	NS	NS	NS
EM x B x P	8	NS	NS	NS	NS

CV (%) = 22.76

Média geral: 20.0192593

Ns= não significativo

*= significativo a 5%

**= significativo a 1%

*** = significativo a 0,01%

Tabela 4: Resumo da análise de variância para os dados de Área foliar segunda medição (AFS); Clorofila A segunda medição (CAS); Clorofila B segunda medição (CBS); Altura da planta primeira medição (APS) de pimentão inoculado com *M. enterolobii*, em função de doses de Microrganismo eficiente (EM), Biocarvão (B) e Ácido Pirolenhoso (P).

FV	GL	AFS	CAS	CBS	APP
EM	2	*	NS	NS	NS
B	2	*	NS	NS	NS
P	2	NS	NS	NS	NS
EM x B	4	**	**	NS	NS
EM x P	4	NS	NS	NS	NS
B x P	4	NS	**	NS	NS
EM x B x P	8	NS	**	NS	NS

CV (%) = 22.76

Média geral: 20.0192593

Ns= não significativo

*= significativo a 5%

**= significativo a 1%

*** = significativo a 0,01%

Tabela 5: Resumo da análise de variância para os dados de Número de broto na planta (NBP); Número de folha, primeira contagem (NFP); Altura da planta, segunda medição (APS); Número de folhas, segunda contagem (APS) e número de nematóides (N) de pimentão inoculado com *M. enterolobii*, em função de doses de Microrganismo eficiente (EM), Biocarvão (B) e Ácido Pirolenhoso (P).

FV	GL	NBP	NFP	APS	NFS	NN
EM	2	NS	NS	NS	NS	***

B	2	NS	*	NS	NS	**
P	2	NS	NS	NS	NS	*
EM x B	4	*	NS	NS	NS	*
EM x P	4	NS	NS	NS	NS	NS
B x P	4	NS	NS	NS	NS	***
EM x B x P	8	*	NS	**	NS	***

CV (%) = 22.76

Média geral: 20.0192593

Ns= não significativo

*= significativo a 5%

**= significativo a 1%

*** = significativo a 0,01%

As tabelas, 2, 3, 4 e 5 mostram os resultados de análise de variância do peso fresco da parte aérea (PFPA); Peso seco da parte aérea (PSPA); Peso fresco da raiz (PFR); Volume de raiz (VR); Peso fresco do fruto (PFF); Área foliar da primeira medição (AFP); Clorofila A primeira medição (CAP) Clorofila B primeira medição (CBP); Área foliar segunda medição (AFS); Clorofila A segunda medição (CAS); Clorofila B segunda medição (CBS); Altura da planta primeira medição (APS); Área foliar segunda medição (AFS); Clorofila A segunda medição (CAS); Clorofila B segunda medição (CBS); Altura da planta primeira medição (APS) e número de nematóides (NN), de acordo com as doses e combinações de Microrganismos eficientes (EM), Biocarvão (B) e pirolenhoso (P).

Verifica-se na Tabela 2 que a PFPA e a PFSA afetadas pela ação conjunta de EM, de B e de P, pelo teste F, a $p < 0,05$. A PFR variou com a aplicação de B e PA e com ação conjunta de EM, B e P, pelo teste F, a $p < 0,05$ (Tabela 2). Nesta mesma tabela observa-se que o VR foi influenciado pelo uso de EM e P, pelo teste F, a $p < 0,01$ e $p < 0,001$, respectivamente.

Para as variáveis PFF, AFP, CAP, CBP, CBS, APP e NFS não houve nenhuma significância entre os tratamentos. Já para a AFS, houve interação com o aumento da área e os tratamentos com EM e B e a interação entre eles. A CAS também foi alterada pelos tratamentos, havendo significância para a combinação de EM e P, para interação entre B e PA e para a combinação tripla entre EM, B e P.

Em relação ao número de broto, houve significância para os tratamentos que continham EM e B, e a interação tripla entre EM, B e P. O NFP só foi significativo para o

tratamento que continha B. A APS mostrou resultados em relação ao seu crescimento influenciados pelos tratamentos que continham a interação entre os três produtos testados, como descrito na tabela 5. O NN foi influenciado diretamente pelos tratamentos, não havendo interação apenas para as combinações contendo EM e P.

Tabela 6: Valores médios do peso fresco da parte aérea (g) em resposta a doses de microrganismo eficiente, biocarvão e pirolenhoso em plantas de pimentão 70 dias após serem inoculadas com *M. enterolobii*. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

EM/Água (L/ha)	Pirolenhoso/ Água (L/L)	Biocarvão (Kg/ha)		
		0	1500	3000
0	0	19,45a	14,4b	18,55a
	1:200	21,45a	25,6a	23a
	1:100	26,11a	12,88a	18,1a
200	0	22,48a	16,5ab	19,22a
	1:200	15,83a	20,84a	22,34a
	1:100	18,74a	19,92a	21,12a
400	0	17,5a	23,98a	19,75a
	1:200	20,6a	16,91a	23,82a
	1:100	19,53a	16,91a	24a

Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

A tabela 6 mostra os resultados para peso fresco da parte aérea em relação aos tratamentos. Entre os tratamentos citados, o único que teve diferença significativa e que teve os melhores resultados foi o tratamento que continha a dose de 400 L/ha do EM, dose de 1500 Kg/ha de biocarvão e a dose 0 de pirolenhoso.

Pugas et al., (2013) elucida que a utilização dos Microrganismos Eficazes (EM) promove um estímulo significativo à atividade microbiana no solo. Como consequência direta desse processo, ocorre uma aceleração na degradação da matéria orgânica. Essa decomposição mais rápida e eficiente libera nutrientes que estavam retidos nesse material, tornando-os disponíveis para a absorção pelas plantas. Dessa forma, ao melhorar a nutrição vegetal, os EM atuam como um agente fundamental para favorecer o pleno desenvolvimento das culturas, o que justificaria o aumento das doses do EM também terem aumentado o peso fresco da parte aérea.

Bonfim (2011), Cardoso e Andreote (2016) e Batista (2017) chegam a explicar inclusive que a composição das comunidades de microrganismos eficientes (EM) é variável e influenciada por fatores como o tipo de solo, a cultura cultivada e, principalmente, as condições climáticas da região. Entre os grupos microbianos mais frequentemente associados a esses consórcios, destacam-se bactérias do filo Firmicutes, especialmente dos gêneros *Lactococcus* e *Bacillus*. Este último, o gênero *Bacillus*, é consistentemente reportado como o mais ubíquo e abundantemente ligado ao estímulo do desenvolvimento vegetal. No nosso estudo, contamos com a junção de bactérias eficientes para o solo, possuindo em sua composição inclusive bactérias da espécie *Bacillus subtilis* e *Bacillus thuringiensis*.

Em estudo desenvolvido por Stolte (2019), com o objetivo de avaliar a influência de *Bacillus* spp. na promoção do crescimento de plantas de arroz, observou-se que a linhagem *B. methylotrophicus* promoveu os melhores resultados para as variáveis de massa fresca da parte aérea e do sistema radicular. Cabe ressaltar, no entanto, que tais resultados não diferiram estatisticamente do grupo controle. Adicionalmente, a espécie *B. amyloliquefaciens* também demonstrou efeitos significativos em ensaios *in vitro*.

Os dados supracitados convergem com os resultados apresentados neste resumo, nos quais o consórcio de microrganismos eficientes (EM) empregado nos tratamentos continha a espécie *B. amyloliquefaciens*, que se mostrou diretamente associada ao aumento da massa fresca da parte aérea. Alinhados a esses achados, os trabalhos de Cerqueira et al. (2015) também corroboram tais evidências, tendo verificado, em estudos

com feijão comum, que o isolado S3.5 do gênero *Bacillus* proporcionou incremento significativo na massa fresca da parte aérea.

Para o tratamento com biocarvão, foram observados resultados significativos na variável massa fresca da parte aérea na dose de 1500 kg ha⁻¹. É plausível afirmar que, nessa concentração, o biocarvão tenha exercido influência na atividade microbológica do solo mediada pelos microrganismos eficientes (EM).

Valderrama et al. (2023) constataram que a adição de biocarvão ao solo promove alterações em parâmetros como o pH, o que pode favorecer o aumento ou a redução de populações microbianas específicas. De modo semelhante, Xu et al. (2016) avaliaram as alterações na microbiota do solo após a aplicação de biocarvão e verificaram, na dosagem de 2%, um incremento na presença de bactérias associadas à redução da lixiviação de nitrogênio total.

Adicionalmente, estudos conduzidos por Chen et al. (2016) e Wang et al. (2017) investigaram o impacto do biocarvão sobre a comunidade microbiana do solo. Esses trabalhos demonstraram que a aplicação do material pode estimular populações de bactérias redutoras, como *Geobacter*, *Anaeromyxobacter*, *Desulfosporosinus* e *Pedobacter*, além de influenciar positivamente a abundância de gêneros como *Clostridium*, *Bacillus*, *Caloramator* e *Desulfitobacterium*.

Ressalta-se, no entanto, que a composição final da comunidade microbiana e a predominância de determinados gêneros dependem fundamentalmente da microbiota preexistente no solo. Essa premissa está em consonância com os resultados obtidos no presente estudo, sugerindo que a interação entre biocarvão e os microrganismos nativos foi determinante para a promoção do aumento da massa fresca observado.

Ajema (2018) elucidou os mecanismos subjacentes à eficácia da interação entre biocarvão e microrganismos. De acordo com o autor, os poros presentes na estrutura do biocarvão, em especial os macroporos, atuam como microhabitats ou abrigos para os microrganismos, uma vez que os microporos possuem dimensões reduzidas, insuficientes para a colonização microbiana. Adicionalmente, a superfície do biocarvão apresenta nutrientes adsorvidos, os quais podem servir como fonte de energia e subsídios metabólicos para a microbiota.

Outro fator determinante refere-se à melhoria das condições físico-ambientais, como aeração e retenção de umidade, propiciadas pelo biocarvão, que garantem um ambiente favorável ao desenvolvimento e à atividade microbiana. Por fim, o autor também destaca que certas moléculas presentes na superfície do biocarvão podem atuar como sinalizadores

químicos, mediando processos de comunicação intercelular (quorum sensing) entre os microrganismos, entre outros mecanismos.

Tabela 7: Valores médios do peso seco da parte aérea (g) em resposta a doses de microrganismo eficiente, biocarvão e pirolenhoso em plantas de pimentão 70 dias após serem inoculadas com *M. enterolobii*. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

EM/Água (L/ha)	Pirolenhoso/ Água (L/L)	Biocarvão (Kg/ha)		
		0	1500	3000
0	0	3,22a	2,65b	3,41a
	1:200	4,10a	4,86a	4,23a
	1:100	4,8	2,27a	3,24a
200	0	4,14a	3,03ab	3,87a
	1:200	2,88a	3,88ab	4,02a
	1:100	3,47a	3,57a	3,97a
400	0	3,22a	4,34a	3,5a
	1:200	2,58a	2,94b	4,16a
	1:100	3,57a	3,14a	4,7a

Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Os resultados referentes à massa seca da parte aérea corroboram os achados da massa fresca, evidenciando que os tratamentos com microrganismos eficientes (EM) apresentaram valores estatisticamente superiores em relação à testemunha, além de demonstrarem uma interação sinérgica promissora com o biocarvão. Em contrapartida, observou-se um efeito antagônico nos tratamentos contendo pirolenhoso na dose de 1:200 L/L, sugerindo uma possível inibição da atividade microbiana. Ressalta-se que o incremento na aplicação de EM nestes tratamentos resultou em redução da massa seca da parte aérea, indicando que, para esta variável, a interação entre os microrganismos e o pirolenhoso não foi favorável.

O efeito observado do pirolenhoso pode estar relacionado à sua natureza química variável. A composição do ácido pirolenhoso, líquido obtido mediante pirólise de biomassa lignocelulósica, é altamente dependente da matéria-prima empregada e das condições de processamento. No estudo de Candido et al. (2023), os autores constataram que a origem do material vegetal e os parâmetros do processo produtivo são determinantes para a composição qualitativa dos compostos presentes no extrato. Ademais, a metodologia de pirólise utilizada – classificada como rápida ou lenta – mostrou-se um fator de significativa influência na qualidade e nas propriedades do produto final, o que pode explicar as respostas diferenciadas observadas nos tratamentos.

Uma alternativa explicativa para os resultados observados reside no possível efeito negativo exercido pela interação do pirolenhoso com a microbiota do solo. Estudos anteriores indicam a utilização do pirolenhoso como agente supressor de microrganismos fitopatogênicos. Na pesquisa conduzida por Maciel (2020), verificou-se uma redução gradativa do crescimento micelial, da velocidade de crescimento e um aumento percentual na inibição de todos os fungos analisados quando submetidos à dose de 20 mL L⁻¹ de pirolenhoso de eucalipto.

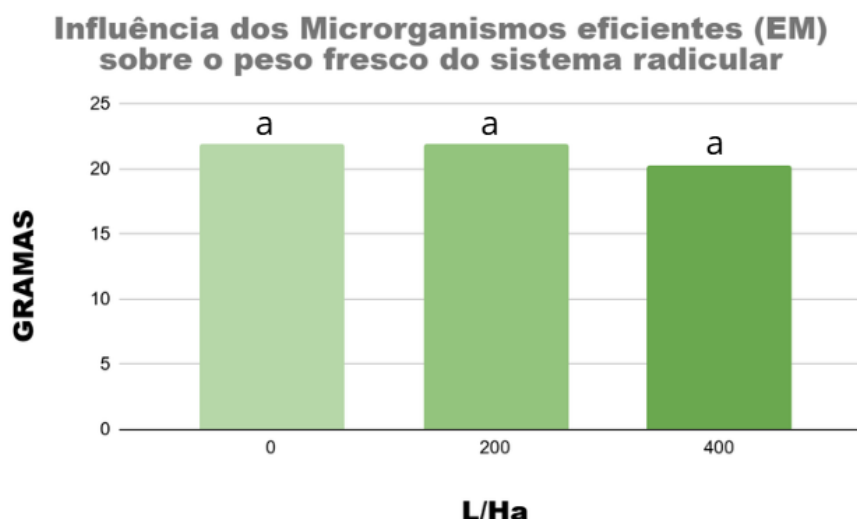
Diante desses achados, concluiu-se que o extrato pirolenhoso apresenta propriedades fungitóxicas sobre os fungos estudados. Tal característica sugere um potencial efeito inibitório semelhante sobre componentes da microbiota edáfica, o que poderia explicar os resultados obtidos no presente estudo. No entanto, ressalta-se a necessidade de investigações mais aprofundadas para determinar a seletividade dessa ação, isto é, se seus efeitos restringem-se a grupos patogênicos ou podem afetar também microrganismos benéficos do solo.

O caráter distintivamente ácido do extrato pirolenhoso, com pH em torno de 2,5, é amplamente documentado na literatura. Estudos, como o desenvolvido por Gama et al. (2023), estabelecem uma correlação direta entre a acidez do pirolenhoso e sua capacidade antimicrobiana. De acordo com os referidos autores, a atividade inibitória está intrinsecamente ligada ao baixo pH do produto, sendo a manutenção de seu estado ácido natural um requisito fundamental para a eficácia contra microrganismos, particularmente linhagens bacterianas mais resistentes. A neutralização do extrato resulta em uma redução significativa de sua potência.

Diante dessas evidências, é plausível inferir que a aplicação de pirolenhoso ao solo, ao alterar o pH do ambiente rizosférico, pode ter atuado como um dos mecanismos subjacentes aos resultados observados no presente estudo. A alteração na acidez do solo, induzida pelo extrato, provavelmente impactou a dinâmica e a atividade da microbiota, influenciando diretamente os parâmetros de crescimento vegetal analisados.

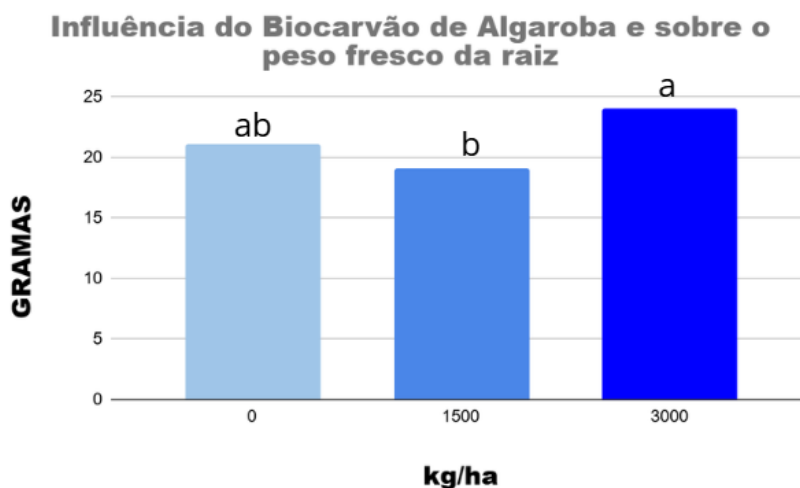
5.1.3 Peso fresco da raiz (PFR)

Figura (8): influência dos microrganismos eficientes sobre o peso fresco da raiz de planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em gramas.



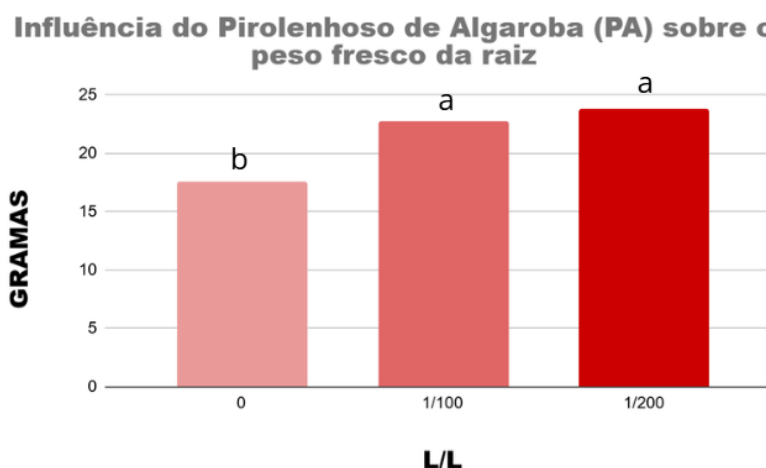
Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Figura (9): influência do Biocarvão de Algaroba (B) sobre o peso fresco da raiz de planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em gramas.



Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Figura (10): influência do Pirolenhoso de Algaroba (PA) sobre o peso fresco da raiz de planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em gramas.



O peso fresco de raízes (PFR) foi diretamente influenciado pelos tratamentos aplicados. Conforme demonstrado no Figura (8), (9) e (10), não foi observada diferença estatística significativa nos tratamentos com microrganismos eficientes (EM). Entretanto, a aplicação de biocarvão na dosagem mais elevada (dose 2) mostrou-se mais efetiva no incremento do PFR, não diferindo estatisticamente do tratamento controle (dose 0), mas apresentando superioridade em relação à dose 1.

No que se refere ao pirolenhoso, ambas as doses testadas resultaram em valores superiores aos verificados na testemunha.

O efeito positivo do biocarvão no desenvolvimento radicular pode ser atribuído às suas propriedades condicionadoras do solo, com destaque para sua influência no pH, na

capacidade de troca catiônica (CTC), na matéria orgânica do solo (MOS) e no carbono orgânico total (COT). Biocarvões apresentam tipicamente pH variando de neutro a alcalino (7,83–11,67), característica particularmente benéfica para a correção de solos ácidos, uma vez que a faixa de pH ideal para a maioria das culturas situa-se entre 6,0 e 6,5. Ressalta-se, contudo, que o pH final é dependente da matéria-prima e da temperatura de pirólise, sendo que temperaturas mais elevadas geralmente resultam em biocarvões com maior alcalinidade (Shaaban et al., 2014; Villagra-Mendoza & Horn, 2018; Pariyar et al., 2020).

Essas propriedades estão intrinsecamente relacionadas à estrutura química superficial do biocarvão, a qual apresenta grupos funcionais oxigenados – como carboxila (COOH), carbonila (C=O), éster e hidroxila (OH) – que conferem características de tamponamento, carga superficial variável e elevada CTC (Laghari et al., 2015; Xiao et al., 2018). Adicionalmente, Rezende, Angelo e Mangrich (2011) destacam a atuação do biocarvão na estabilização estrutural do solo, por meio da formação de ligações com constituintes inorgânicos, retenção hídrica e regulação do pH via liberação gradual de íons H^+ e OH^- . A partir desta característica do biocarvão pode-se chegar a ideia de o pq ele interferiu sobre o peso fresco do sistema radicular.

Outra questão a ser levado em consideração é sua influência sobre a CTC estudos demonstram que a CTC do solo pode ser incrementada progressivamente com a aplicação contínua de biocarvão (De Rezende et al., 2019; Hale et al., 2020). O mecanismo subjacente a essa resposta está relacionado à presença de grupos carboxílicos e fenólicos derivados da biomassa precursora, bem como aos processos de oxidação superficial que geram sítios funcionais carregados negativamente e ricos em oxigênio (Silva, 2022; Lima, 2023). Ademais, é crucial destacar que a temperatura de pirólise exerce influência inversa sobre esta propriedade, uma vez que temperaturas mais elevadas resultam em biocarvões com menor capacidade de troca catiônica (Stroher et al., 2020).

O biocarvão exerce influência significativa na matéria orgânica do solo (MOS), atuando como agente promotor de sua qualidade e estabilidade. Conforme destacado por Melo (2017), "uma das vantagens da utilização de biochar [biocarvão] é o fornecimento de nutrientes e o sequestro de carbono no solo, por meio do acúmulo de frações da matéria orgânica". Não obstante, o mesmo autor ressalta a escassez de dados específicos sobre as frações lábeis e estáveis da MOS em solos tratados com biocarvão.

Em estudo conduzido por Melo (2017) em Latossolo Vermelho, envolvendo seis tratamentos – controle, adubação mineral (NPK), biocarvão produzido a 300 °C (BC300), BC300 com adubação mineral (BC300 + NPK), biocarvão a 500 °C (BC500) e BC500 com adubação mineral (BC500 + NPK) –, observou-se incremento mais expressivo no teor de

carbono orgânico total e, conseqüentemente, na MOS, nos tratamentos que receberam biocarvão. Esse efeito pode ser atribuído ao mecanismo de sequestro de carbono promovido pela adição do material, o que, por sua vez, está diretamente relacionado ao estímulo do desenvolvimento radicular no solo.

Em relação aos resultados de incremento na massa fresca do sistema radicular associados à aplicação de pirolenhoso, observa-se consonância com achados reportados na literatura. Guerreiro, Bento e Silvestre (2012), ao avaliarem o efeito da incorporação de extrato pirolenhoso (PA) em substrato de fibra de coco sobre parâmetros morfológicos de mudas de tomate, constataram que o PA promoveu desenvolvimento significativo das mudas, com influência positiva no tamanho das plantas, na biomassa da parte aérea e no sistema radicular.

De modo análogo, Paneque et al. (2016) verificaram que o ácido pirolenhoso derivado de madeira de marabu (*Dichrostachys cinerea*) exerceu efeito bioestimulante dose-dependente no crescimento inicial de arroz. Concentrações moderadas ($1-2 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$) promoveram aumentos consistentes na altura das plantas e no comprimento radicular, particularmente na variedade LP5, sugerindo a existência de uma faixa otimizada para o vigor inicial das plântulas. Ademais, os autores identificaram uma correlação positiva significativa ($p = 0,61$) entre o comprimento radicular e a altura da planta, reforçando o papel fundamental do desenvolvimento do sistema radicular no acúmulo de biomassa aérea.

Seguindo agora para interação entre os produtos testados temos a primeira descrição na tabela 8:

Tabela 8: Valores médios do peso fresco do sistema radicular (g) em plantas de pimentão, inoculadas com *M. enterolobii* em função de diferentes combinações de doses de microrganismo eficiente (ME) e biocarvão. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Microrganismo eficiente (L)	Biocarvão (kg/ha)		
	0	1500	3000
0	18,73a	21,91ab	22,6a
200	16,54a	18,82b	21,79a
400	17,39a	27,65a	27a

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025

A Tabela 8 apresenta a interação entre as doses de microrganismos eficientes (EM) e o peso fresco do sistema radicular. Conforme demonstrado anteriormente no Gráfico 1, os tratamentos influenciaram significativamente essa variável. Os resultados novamente analisados revelam que a segunda dose de biocarvão, em combinação com a maior dose de EM, promoveu variação significativa no peso fresco da parte aérea. Este resultado está alinhado com o desempenho previamente observado para o biocarvão nesta mesma variável, onde se mostrou o tratamento mais efetivo, apresentando agora padrão similar para a variável radicular.

O mecanismo de ação do biocarvão, como anteriormente discutido, envolve a modificação direta das propriedades microbiológicas do solo. Dentre seus benefícios, destaca-se o estímulo ao desenvolvimento vegetal mediante a melhoria das condições edáficas. Ressalta-se ainda a capacidade do biocarvão em otimizar a relação carbono/nitrogênio (C/N), atuando tanto como fonte de carbono estável quanto como habitat preferencial para bactérias fixadoras de nitrogênio.

O tratamento isento de EM (dose 0) não diferiu estatisticamente das demais doses, sugerindo que o incremento no peso fresco radicular está intrinsecamente associado às propriedades do biocarvão. Este efeito pode ser atribuído principalmente às suas características físico-químicas, conforme demonstrado por Kaur e Sharma (2019). Em seu estudo com biocarvão de algaroba (1%, 5% e 10%) e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, observou-se melhoria nos parâmetros físico-químicos de solo arenoso, incluindo redução na densidade aparente, aumento da porosidade, maior capacidade de retenção hídrica, elevação do pH e incremento na condutividade elétrica.

A próxima tabela continua a descrever a situação.

Tabela 9: Valores médios do peso fresco da raiz (g) em resposta a doses de microrganismo eficiente, biocarvão e pirolenhoso em plantas de pimentão 70 dias após serem inoculadas com *M. enterolobii*. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

EM/Água (L/ha)	Pirolenhoso/ Água (L/L)	Biocarvão (Kg/ha)		
		0	1500	3000
0	0	16,93a	16,77a	15,22a

	1:200	19,91a	27,12a	26,91a
	1:100	32,34a	16,24a	22,85a
	0	24,08a	14,68a	19,10a
200	1:200	20,88a	22,35a	25,5a
	1:100	18,84ab	20,67a	31,19a
	0	15,17a	18,18a	17,85a
400	1:200	27,02a	15,91a	25,9a
	1:100	14,56b	19,54a	28,92a

Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Os dados apresentados na Tabela 9 complementam os resultados observados na Tabela 8, demonstrando a ausência de diferença estatística significativa para a interação tripla entre microrganismos eficientes (EM), biocarvão (B) e pirolenhoso (P). Contudo, verificou-se uma interação significativa específica entre EM e P. Quando analisadas as variáveis independentemente, os dados sugerem que o incremento no peso fresco radicular está predominantemente associado à aplicação do pirolenhoso (P), e não aos microrganismos eficientes (EM).

Este achado corrobora com o estudo de Ofoe, Gunupuru e Lord (2022), que demonstrou a eficácia do pirolenhoso na promoção de características vegetais. De acordo com os autores, a presença de compostos bioativos no extrato pirolenhoso possibilita seu uso como alternativa para potencializar o crescimento vegetal, aumentando a produtividade e a resiliência das plantas a stresses ambientais. Tais propriedades estão intrinsecamente relacionadas ao processo de pirólise e à natureza da matéria-prima utilizada, sendo que os resultados encontrados pelos autores poderiam não ser os mesmo encontrados no presente trabalho.

Considerando os resultados obtidos para a variável de massa radicular, infere-se que mecanismo semelhante possa estar ocorrendo. No entanto, ressalta-se a necessidade de estudos adicionais para elucidar os componentes específicos do biocarvão de algaroba responsáveis por essa resposta, dada a escassez de literatura especializada sobre o tema.

Como já dito antes, a natureza da matéria-prima exerce influência determinante sobre os processos e produtos da pirólise, constituindo-se como variável fundamental na modulação das reações termoquímicas. A composição lignocelulósica específica de cada biomassa - compreendendo teores particulares de celulose, hemiceluloses e lignina -

direciona os mecanismos de decomposição térmica e a distribuição dos produtos formados (Wampler, 2006).

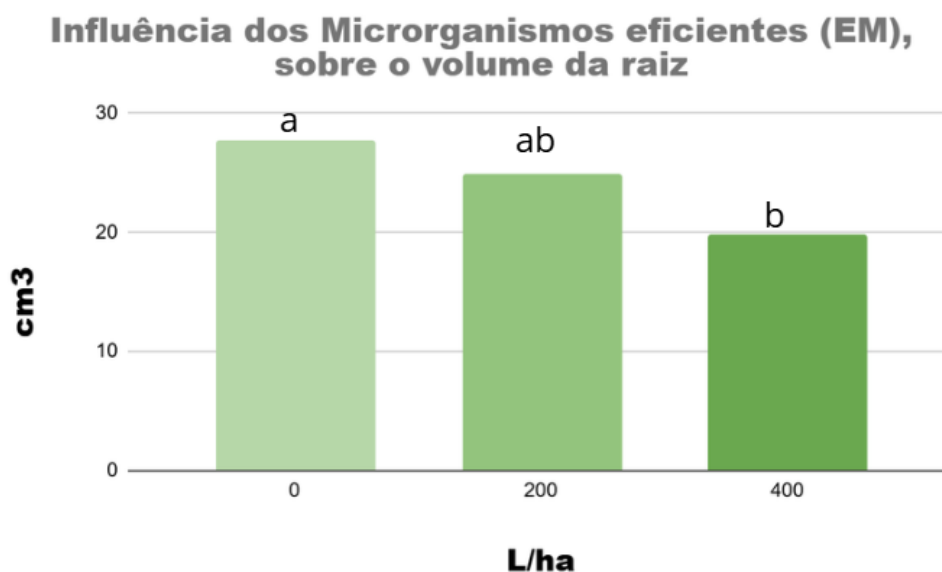
Matérias-primas com elevado conteúdo de celulose, como madeiras de espécies arbóreas, tendem a gerar maiores rendimentos de compostos oxigenados voláteis, enquanto biomassas lignocíticas produzem frações aromáticas mais expressivas. A temperatura de transição vítrea dos componentes macromoleculares, assim como a presença de elementos inorgânicos catalíticos, adicionalmente modula a cinética de degradação e a seletividade dos pathways reacionais (Wampler, 2006).

Como consequência, o perfil químico do bio-óleo, a porosidade do biocarvão e a composição da fase gasosa manifestam correlação direta com as características estruturais e químicas do material precursor. Esta relação de causalidade confere aos produtos pirolíticos as mesmas características da matéria-prima original, conforme demonstrado por Wampler (2006), onde a identidade macromolecular do polímero determina univocamente a distribuição dos fragmentos de degradação.

Estudos como os de Cândido et al. (2023) corroboram esta premissa, evidenciando que parâmetros qualitativos e quantitativos dos compostos identificados no extrato pirolenhoso variam significativamente em função da origem botânica da biomassa submetida à pirólise.

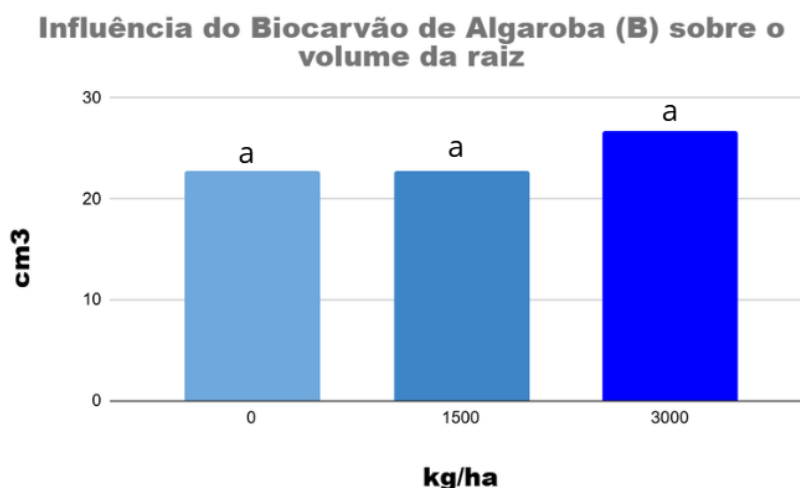
5.1.4 Volume de raiz

Figura (11): influência dos Microrganismos eficientes (EM) sobre o volume da raiz de planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em cm³.



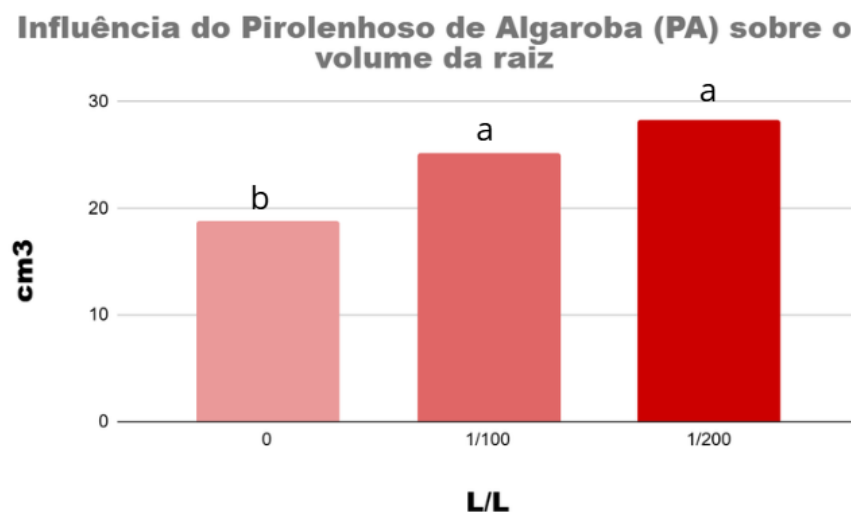
Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Figura (12): influência do Biocarvão de Algaroba (B) sobre o volume da raiz de planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em cm³.



Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Figura (13): influência do Pirolenhoso de Algaroba (PA) sobre o volume da raiz de planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em cm³.



O volume do sistema radicular foi significativamente influenciado pelos tratamentos com microrganismos eficientes (EM) e pirolenhoso (P). Para os EM, observou-se uma correlação negativa entre o incremento das dosagens e o volume radicular, caracterizando uma relação inversamente proporcional.

Este resultado diverge dos achados de Thomas et al. (2010), que avaliaram os efeitos de isolados nativos de *Pseudomonas fluorescens*, *Azospirillum brasilense* e *Trichoderma harzianum* no enraizamento e aclimação de plantas de chá micropropagadas. Em seu estudo, constatou-se que *T. harzianum* e *A. brasilense*, embora tenham inicialmente retardado o desenvolvimento dos brotos, subsequentemente promoveram o enraizamento *in vitro* e aumentaram a sobrevivência durante a fase de aclimação. Adicionalmente, as plantas tratadas com bioinoculantes exibiram maior eficiência na absorção de nutrientes e apresentaram atividades enzimáticas de defesa (peroxidase e fenilalanina amônia-liase) significativamente elevadas, prevenindo incidências de podridão radicular e murchamento.

Os resultados do volume de raiz corroboram com o peso fresco da raiz, para o fresco da raiz não houve significância. Para este último caso houve uma diminuição do volume, é preciso verificar o que pode ter ocasionado isso, já que a literatura chega a citar que a sua eficiência no sistema radicular, como no trabalho de HUSSAIN, M. I. et al.(2013).

Os resultados obtidos para o pirolenhoso indicam uma correlação positiva entre sua aplicação e o incremento no volume do sistema radicular. Almeida Júnior et al. (2022) constataram, em estudo de campo, que a aplicação do extrato pirolenhoso no sulco de plantio promoveu um desenvolvimento significativo do sistema radicular da cultura, concomitantemente à manutenção de elevados patamares de produtividade, com ganhos reais no rendimento agrícola.

Com base na premissa estabelecida por Lu et al. (2019), que atribui os efeitos do extrato pirolenhoso à ação sinérgica entre componentes ácidos e fenólicos, é possível inferir que o desenvolvimento do sistema radicular pode ser diretamente influenciado pela modulação do pH do solo. A acidificação do ambiente rizosférico, mediada pelos ácidos orgânicos presentes no extrato, constitui um mecanismo fundamental para o estímulo ao crescimento radicular.

O crescimento e desenvolvimento do sistema radicular são processos dinâmicos e altamente sensíveis às condições edáficas. Na região do ápice radicular, as células meristemáticas produzem continuamente novas células que sofrem intenso alongamento - podendo atingir até 150 vezes seu tamanho original - antes de se diferenciarem na zona de maturação. É nesta região que se formam os pelos radiculares, estruturas efêmeras responsáveis pela maior parte da absorção de água e nutrientes, com densidade que pode alcançar 40.000 por cm² (Michereff, Andrade e Menezes, 2005)

A interface solo-raiz, denominada rizosfera, representa um ambiente biologicamente ativo onde ocorrem complexas interações entre a planta e os microrganismos do solo. Esta

zona sofre intensa influência das raízes, manifestada através de: Alterações no pH (variações de 1-2 unidades), Modificações na composição iônica, Liberação de exsudatos radiculares e Incremento na população microbiana (até 50% superior ao solo não-rizosférico) (Michereff, Andrade e Menezes, 2005).

O fenômeno da rizodeposição, que compreende a liberação de 40-70% do carbono alocado para as raízes, cria um ambiente único que favorece o estabelecimento de relações simbióticas entre a planta e microrganismos benéficos. A dinâmica do pH rizosférico é particularmente relevante, sendo influenciada pela forma de nitrogênio disponível: a absorção de amônio (NH_4^+) promove acidificação, enquanto a absorção de nitrato (NO_3^-) tende a alcalinizar o ambiente (Michereff, Andrade e Menezes, 2005)

Neste contexto, a aplicação de extrato pirolenhoso, rico em ácidos orgânicos, pode potencializar os processos naturais de acidificação da rizosfera, criando condições favoráveis para o desenvolvimento radicular.

A próxima tabela mostra como a interação entre EM e PA afetou o aumento do volume da raiz.

Tabela 10: combinação dos tratamentos contendo EM e PA em relação ao aumento do volume do sistema radicular (m³) em plantas de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Microrganismo eficiente (L)	Pirolenhoso(L/L)		
	0	9000	4667
0	19,11a	29,44a	34,44a
200	20,55a	25,11a	28,88ab
400	16,66a	21,11a	21,67b

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Conforme demonstrado pela Tabela 10, que apresenta a relação entre o incremento do volume radicular e a combinação entre pirolenhoso (P) e microrganismos eficientes (EM), observa-se uma correlação negativa entre essas variáveis. Especificamente,

constatou-se que o aumento progressivo das doses de EM resultou em redução correspondente no volume do sistema radicular.

Como previamente discutido, estes resultados com EM apresentam divergência em relação ao consenso estabelecido na literatura especializada. No contexto da interação entre EM e P, os dados obtidos indicam a ausência de efeito sinérgico significativo entre esses componentes, padrão este consistente com os achados reportados para a massa seca da parte aérea e em conformidade com as observações de Maciel (2020) e Gama et al. (2023).

5.1.5 Clorofila A e B, segunda medição

Tabela 11: interação entre as doses de microrganismo eficiente e biocarvão sobre a clorofila a da segunda medição em plantas de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Microrganismo eficiente (L)	Biocarvão (kg/ha)		
	0	1500	3000
0	28,6a	31,72a	29,75a
200	30,04a	25,89b	29,27a
400	27,73a	29,28ab	31,38a

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Conforme demonstrado pela Tabela 11, que apresenta os valores médios de clorofila *a* em resposta à aplicação de microrganismos eficientes (EM) e biocarvão (B), não foram observadas interações estatisticamente significativas quando estes fatores foram analisados isoladamente. Esta ausência de significância individual sugere que a resposta fisiológica provavelmente decorre de um efeito sinérgico entre os componentes. A análise estatística revelou diferença significativa exclusivamente entre a maior e a primeira dose de EM nos tratamentos combinados, enquanto não foi detectada variação significativa entre a testemunha e a dose intermediária. Estes resultados indicam que o efeito na clorofila *a*

manifestou-se de forma dependente da concentração, com resposta fisiológica relevante apenas no patamar mais elevado da aplicação conjunta.

As clorofilas constituem os pigmentos naturais de maior abundância nos organismos vegetais, localizando-se nos cloroplastos de folhas e demais tecidos fotossinteticamente ativos. A clorofila *a* (Chl *a*) representa o pigmento fotossintético universal em organismos que realizam fotossíntese oxigênica, atuando diretamente nos processos fotoquímicos do estágio inicial da fotossíntese (Taiz & Zeiger, 2004). Em contraste, bactérias fotossintetizantes utilizam bacterioclorofila como pigmento primário.

As clorofilas *a* e *b* ocorrem naturalmente na proporção de 3:1, diferenciando-se estruturalmente pelos substituintes no carbono C-3 do anel de porfirina: a Chl *a* apresenta grupo metil (-CH₃), enquanto a Chl *b* contém grupo aldeído (-CHO). A maior estabilidade da clorofila *b* atribui-se ao efeito atrativo de elétrons conferido pelo seu grupo aldeído (Von Elbe, 2000), sendo que a conversão entre essas formas é mediada pela enzima clorofila *a* oxigenase, que catalisa a transformação de Chl *b* em Chl *a* (Xu et al., 2001).

A relação positiva observada entre a maior dose de EM e biocarvão pode estar associada ao papel do biocarvão como condicionante do solo. Suas propriedades físico-químicas distintas - incluindo elevada porosidade, área superficial específica, capacidade de troca catiônica e retenção hídrica - criam microhabitats ideais para o estabelecimento e atividade microbiana (Liu et al., 2016; Feitosa et al., 2017; Batista et al., 2018). Particularmente, o biocarvão de madeira demonstra superioridade nutricional comparado a outras matérias-primas, atuando simultaneamente como fonte de carbono e condicionante da matéria orgânica do solo (Wijitkosum & Jiwnok, 2019; Tomczyk et al., 2020; Huang et al., 2021 *apud* Santos et al., 2022).

No presente estudo, observaram-se teores de clorofila inferiores aos padrões estabelecidos para a cultura, possivelmente atribuíveis à infestação do nematóide do gênero *Meloidogyne*. Estudo pioneiro de Ferraz (1982) demonstrou que este fitonematoide promove redução significativa nos teores de clorofila total em pimenteiras, através do comprometimento da absorção e translocação de nutrientes essenciais (P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Zn e Mn). Tais desequilíbrios nutricionais correlacionam-se diretamente com a drástica diminuição nos teores clorofilianos e consequente comprometimento do desenvolvimento vegetal.

A próxima tabela demonstra agora a relação do biocarvão com o pirolenhoso sobre a clorofila *a*.

Tabela 12: interação entre as doses de biocarvão e pirolenhoso sobre a clorofila a da segunda medição em plantas de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Biocarvão (kg/ha)	Pirolenhoso (L/L)		
	0	1:100	1:200
0	30,03ab	27,31a	29,03a
1500	27,47b	30,21a	29,11a
3000	32,7a	28,48a	29,23a

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Os resultados indicam aumento significativo nos teores de clorofila a na combinação entre a dose zero de pirolenhoso (P) e 3000 kg/ha de biocarvão (B). Considerando análises anteriores, é plausível atribuir ao biocarvão o papel de principal agente promotor desse incremento nos teores clorofilianos.

A matéria orgânica do solo, fundamental para o desenvolvimento vegetal, é significativamente influenciada pela adição de biocarvão. Conforme destaca Melo (2017), "uma das vantagens da utilização de biochar é o fornecimento de nutrientes e o sequestro de carbono no solo, por meio do acúmulo de frações da matéria orgânica". Em estudo com Latossolo Vermelho, tratamentos contendo biocarvão (produzido a 300 °C e 500 °C) promoveram maior incremento no carbono orgânico total e consequente acréscimo na MOS comparativamente ao controle e à adubação mineral isolada.

A dinâmica da MOS em solos tropicais com baixa fertilidade é crucial para a manutenção dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, com implicações diretas na fertilidade (Hermle et al., 2008). Essa dinâmica é influenciada pelo tipo de resíduo vegetal, temperatura de degradação e atividade da microbiota associada à decomposição (Ferreira, 2021).

O processo de pirólise demonstra eficiência superior na retenção de carbono quando comparado à combustão, fixando mais de 50% do carbono original contra apenas 2-3% na combustão (Pereira et al., 2020). O teor de carbono no biocarvão varia conforme a matéria-

prima e condições de pirólise, com temperaturas superiores a 500 °C resultando em teores acima de 80%, enquanto temperaturas entre 400-500 °C produzem biocarvões com 60-80% de carbono, e temperaturas abaixo de 350 °C geram produtos com 15-60% de carbono (Laird et al., 2011; Ronsse et al., 2013).

Conforme Rezende, Angelo e Mangrich (2011), o biocarvão apresenta dupla funcionalidade: estrutura interna inerte, similar à grafite, que sequestra carbono no solo por milênios; e substâncias superficiais que melhoram o desempenho agrícola. As características do carbono presente no biocarvão podem, portanto, constituir o mecanismo subjacente aos efeitos observados na fisiologia vegetal e nos teores de clorofila.

As próxima tabela (13 e 14) relacionam os três produtos testados e suas respectivas doses, na influência da clorofila a e da clorofila b

Tabela 13: Valores médios para clorofila a, segunda medição em resposta a doses de microrganismo eficiente, biocarvão e pirolenhoso em plantas de pimentão 70 dias após serem inoculadas com *M. enterolobii*. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

EM/Água (L/ha)	Pirolenhoso/ Água (L/L)	Biocarvão (Kg/ha)		
		0	1500	3000
0	0	28,93a	32,45a	33a
	1:200	30,23a	32,1a	25,83b
	1:100	26,63ab	30,6ab	30,43a
200	0	28,97a	22,5b	32,56a
	1:200	29,57a	28,56a	28,93ab
	1:100	31,6a	26,63b	26,3a
400	0	32,2a	27,47ab	32,53a
	1:200	27,3a	27a	32,9a
	1:100	23,7b	33,4a	28,71a

Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Tabela 14: Valores médios para clorofila b, segunda medição, em resposta a doses de microrganismo eficiente, biocarvão e pirolenhoso em plantas de pimentão 70 dias após serem inoculadas com *M. enterolobii*. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

EM/Água (L/ha)	Pirolenhoso/ Água (L/L)	Biocarvão (Kg/ha)		
		0	1500	3000
0	0	4,53a	9,07a	6,53a
	1:200	5,06a	3,5a	3,67a
	1:100	4,3a	5,97a	4,87a
200	0	4,77a	3,07b	5,3a
	1:200	4,53a	4,3a	4,83a
	1:100	5,6a	3,97a	3,9a
400	0	5,2a	5,37ab	5,63a
	1:200	4,53a	3,93	6,67a
	1:100	3,87a	6,6a	4,06a

Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Para a variável clorofila *a*, verificou-se diferença estatística significativa no tratamento contendo pirolenhoso (P) na concentração de 9000 L/ha associado a microrganismos eficientes (EM) na dosagem de 200 L/ha. Embora análises anteriores tenham demonstrado que a interação entre EM e PA não foi significativamente positiva para outras variáveis morfofisiológicas, observou-se neste caso um incremento nos teores de clorofila *a* para as referidas dosagens. Contudo, é relevante destacar que estes valores não diferiram estatisticamente da testemunha, sugerindo que esta resposta específica possa estar associada a fatores adicionais não controlados experimentalmente. Esta hipótese é reforçada pela ausência de diferença significativa nos teores de clorofila *b* para o mesmo tratamento, indicando um comportamento diferencial entre os pigmentos fotossintéticos.

O tratamento contendo exclusivamente biocarvão (B) na dosagem de 1500 kg/ha (na ausência de EM e P) demonstrou superioridade estatística na promoção dos teores de clorofila *a*. Este resultado corrobora achados anteriores que atribuíram à mesma dosagem de biocarvão efeitos positivos em outras variáveis morfofisiológicas da planta, confirmando a consistência da resposta a esta dosagem específica.

Adicionalmente, na dosagem de 3000 kg/ha de biocarvão combinada com a maior concentração de EM e a segunda dose de pirolenhoso, registrou-se aumento significativo nos teores de clorofila *a*. Com base em análises de correlação previamente realizadas, infere-se que o biocarvão constitui o principal fator responsável por este incremento.

Apesar do comportamento antagônico entre EM e PA observado em outras variáveis, a interação tripla entre estes componentes e o biocarvão mostrou-se sinérgica para a clorofila *a*, criando condições favoráveis à biossíntese deste pigmento. Contudo, é significativo notar que esta mesma combinação não produziu efeito equivalente na clorofila *b*, revalidando a ideia de o biocarvão ser o principal precursor sobre esta característica.

5.1.6 Número de brotos

Tabela 15: Valores médios para número de brotos em resposta a doses de microrganismo eficiente, biocarvão e pirolenhoso em plantas de pimentão 70 dias após serem inoculadas com *M. enterolobii*. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

EM/Água (L/ha)	Pirolenhoso/ Água (L/L)	Biocarvão (Kg/ha)		
		0	1500	3000
0	0	3,67ab	4,33a	4,33a
	1:200	7a	8a	6a
	1:100	7,33a	3,33a	3,67a
200	0	7,33a	6,33a	5a
	1:200	3,67a	7,3ab	7,6a
	1:100	3,33a	6,33a	3,67a
400	0	3b	5,67a	5a
	1:200	6,67a	3,3b	6,3a

	1:100	4,67a	4a	6,33a
--	-------	-------	----	-------

Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Conforme apresentado na Tabela 15, que demonstra a interação entre os tratamentos e o número de brotos, os maiores valores foram observados em duas condições distintas: no tratamento contendo 200 L/ha de microrganismos eficientes (EM) na ausência de pirolenhoso (PA) e biocarvão (B), e no tratamento composto por 1500 kg/ha de B e 4667 L/ha de P, igualmente na ausência de EM.

O incremento no número de brotos nos tratamentos com EM pode ser atribuído à capacidade dos microrganismos em promover o desenvolvimento vegetal. Estudo realizado por De Paula et al. (2025) investigou os efeitos da inoculação de EM de diferentes procedências na formação de mudas de *Coffea arabica*, demonstrando que inoculantes comerciais favorecem o vigor, adaptação e sustentabilidade das mudas, com respostas dependentes da cultivar. Os autores destacam que a seleção adequada de inoculantes pode otimizar o estabelecimento das mudas, reduzindo a dependência de insumos químicos e aumentando a eficiência produtiva.

Resultados convergentes foram obtidos por Candido (2023) em estudo com grão-de-bico (*Cicer arietinum*), onde avaliou-se o efeito de rizobactérias promotoras de crescimento vegetal no desenvolvimento de plântulas. O experimento, conduzido em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2×3 , demonstrou que a inoculação bacteriana promoveu efeitos significativos no acúmulo de massa fresca do sistema radicular. A cultivar Aleppo apresentou melhor desempenho geral, com superioridade no desenvolvimento radicular, da parte aérea e na emergência de plântulas quando comparada às cultivares BRS Cícero e BRS Toro.

A identificação e isolamento dos microrganismos envolvidos nos consórcios mostram-se essenciais para determinar os mais eficientes para cada cultivar. Pesquisas futuras deverão considerar testes em diferentes ambientes e períodos prolongados para validar o impacto dos inoculantes ao longo do ciclo produtivo, bem como avaliar outras combinações de inoculantes e cultivares para estabelecer recomendações técnicas precisas.

A interação entre pirolenhoso (PA) e microrganismos eficientes (EM) mais uma vez não demonstrou resultados promissores para o número de brotos, uma vez que o tratamento contendo 1500 kg/ha de biocarvão (B) e 4667 L/ha de P, na ausência de EM, mostrou-se significativamente mais eficiente. Atribui-se este resultado às características físico-químicas do biocarvão e do pirolenhoso, que atuaram como precursores do aumento no número de brotos.

Entretanto, observações subsequentes revelaram que esses brotos não se mantiveram ao longo do tempo, com progressiva redução no seu desenvolvimento devido a ataques de nematoides. Como consequência, apenas uma minoria atingiu a fase reprodutiva e formou frutos. Este fato ressalta a importância de considerar não apenas o potencial de emissão de brotos, mas também a sustentabilidade do desenvolvimento vegetal frente a estresses bióticos.

Estes resultados indicam que, embora a combinação B+PA tenha potencial para estimular a brotação inicial, a sustentabilidade da produção depende do controle propriamente dito dos nematoides. Sugere-se que pesquisas futuras investiguem a combinação desses tratamentos com outras fontes de matéria prima para biocarvão e pirolenhoso ou variedades resistentes, visando conciliar o estímulo ao crescimento com a proteção fitossanitária necessária para garantir a produtividade final.

5.1.7 Número de folhas para a primeira medição

Tabela 16: Valores médios para número de folhas, primeira medição, em resposta a doses de microrganismo eficiente, biocarvão e pirolenhoso em plantas de pimentão 70 dias após serem inoculadas com *M. enterolobii*. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

EM/Água (L/ha)	Pirolenhoso/ Água (L/L)	Biocarvão (Kg/ha)		
		0	1500	3000
0	0	16,6a	13a	17a
	1:200	18,33a	17,67a	19a
	1:100	20,66a	13a	16,33a
200	0	21,67a	17,33a	15,33a
	1:200	14,33a	16,33a	18,67a
	1:100	14,33b	16a	16,33a
400	0	17,33a	18a	14,66a
	1:200	17,67a	14,33a	17a
	1:100	19,67ab	15,67a	17a

Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Conforme demonstrado pela Tabela 16, que apresenta o número de folhas em função dos tratamentos testados, a única combinação que evidenciou diferença significativa foi a composta por 0 de microrganismos eficientes (EM) e 900 L/ha de pirolenhoso (PA), não diferindo estatisticamente do tratamento com 400 L/ha de EM. Com base nas interações previamente observadas e na consistência dos resultados, infere-se que o pirolenhoso representa o principal agente promotor do incremento na emissão foliar.

Os resultados obtidos alinham-se parcialmente com evidências científicas que demonstram o potencial bioestimulante do ácido pirolenhoso. Pesquisa desenvolvida por Ofoe et al. (2024) com tomateiro (*Solanum lycopersicum* 'Scotia') revelou que a aplicação foliar de PA a 2%, combinada com adubação NPK integral, promoveu aumentos significativos ($p < 0,001$) nos teores de clorofila foliar, corroborando o efeito positivo do extrato nos parâmetros fisiológicos vegetais.

Contudo, é fundamental considerar a existência de respostas divergentes reportadas na literatura. Estudo realizado por Wanderley, Faria e Ventura (2012) com palmeiras fênix

demonstrou que o extrato pirolenhoso aplicado isoladamente não promoveu alterações significativas no comprimento e número de folhas. Efeitos positivos foram observados apenas quando o EPL foi combinado com adubação orgânica, enquanto a combinação com fertilizante mineral NPK não resultou em incrementos significativos.

O efeito positivo do pirolenhoso na emissão foliar observado no presente estudo pode estar relacionado a múltiplos mecanismos de ação, incluindo o estímulo à atividade fotossintética, incremento de síntese de pigmentos e modulações metabólicas. No entanto, a discrepância entre os resultados de diferentes estudos sugere que a eficácia do pirolenhoso está condicionada a fatores como a espécie vegetal, método de aplicação e interação com outros insumos.

A análise integrada dos dados revela que, embora o pirolenhoso demonstre potencial como bioestimulante vegetal, sua eficácia não é universal. São necessários estudos adicionais para identificar as condições ótimas de aplicação, compreender os mecanismos moleculares envolvidos e determinar a especificidade de respostas entre diferentes espécies cultivadas.

O próximo tópico irá abordar se na segunda medição houve diferença significativa para o número de folhas.

5.1.8 Número de folhas na segunda medição

Tabela 17: interação entre as doses de biocarvão e pirolenhoso sobre o número de folhas na segunda medição em plantas de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Medidas realizadas aos 60 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Biocarvão (kg/ha)	Pirolenhoso (L/L)		
	0	1:100	1:200
0	15,33a	16,22ab	14,77a
1500	15,94a	13,78b	16,67a
3000	14,55a	17,33a	17,11a

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

A análise integrada dos resultados confirma o pirolenhoso (P) como um promotor eficaz do crescimento vegetativo, particularmente no aumento do número de folhas. Este achado está em consonância com estudos anteriores, como os de Siriwardena et al. (2020) e Mahumud (2016), que relataram incrementos de até 20% na emissão foliar em culturas como berinjela e quiabo mediante aplicação de concentrações entre 1% e 2% de PA. No entanto, observa-se uma dissociação crítica entre o crescimento vegetativo promovido pelo PA e a qualidade fisiológica das plantas. Enquanto os estudos em condições controladas demonstram melhorias uniformes nos parâmetros de crescimento, nossos resultados em condições de campo revelaram que o aumento no número de folhas foi acompanhado por redução nos teores de clorofila e surgimento de sintomas de deficiência nutricional.

A presença de nematoides no experimento explica consistentemente as características anômalas observadas nas folhas, particularmente a redução nos teores de clorofila e os sintomas de deficiência nutricional. Os nematoides, ao parasitarem o sistema radicular, comprometem severamente a capacidade de absorção de água e nutrientes pelas plantas. Este dano radicular direto desencadeia uma série de respostas fisiológicas que se manifestam na parte aérea.

O parasitismo por nematoides induz a formação de galhas radiculares que obstruem o sistema vascular, limitando o transporte de nutrientes essenciais para a síntese de clorofila, como nitrogênio, magnésio e ferro. Simultaneamente, as plantas sob estresse nematológico desviam recursos metabólicos para mecanismos de defesa, reduzindo a alocação de carbono para processos fotossintéticos. Esta reação é particularmente evidente nos baixos teores de clorofila observados, mesmo com a aplicação de PA.

O facto de o biocarvão não ter influenciado significativamente a emissão foliar reforça a preponderância do PA sobre este parâmetro específico, embora a combinação de factores edáficos e fitossanitários tenha claramente limitado a expressão completa do potencial bioestimulante do PA.

As implicações práticas destes resultados são significativas para o manejo agrícola. A eficácia do PA como bioestimulante mostrou-se dependente de um equilíbrio entre dosagem, interações com outros insumos e condições fitossanitárias do cultivo. Concentrações entre 1-2% demonstraram melhor desempenho, mas sua eficácia foi comprometida na presença de stresses bióticos não controlados. Estes achados destacam a necessidade de abordagens integradas de manejo, onde a aplicação de PA seja acompanhada de estratégias adequadas de controle fitossanitário e manejo nutricional.

Para pesquisas futuras, recomenda-se a identificação dos compostos ativos específicos responsáveis pelos efeitos bioestimulantes do PA, bem como a elucidação dos mecanismos de interação com a microbiota do solo. Adicionalmente, tornam-se necessários estudos para desenvolver protocolos de aplicação adaptados às condições específicas de campo, considerando as variações sazonais e as particularidades de cada sistema produtivo. Embora o PA represente uma alternativa promissora para a agricultura sustentável, sua aplicação requer uma consideração holística dos fatores edafoclimáticos e fitossanitários específicos de cada contexto agrícola.

A próxima tabela mostra como funcionou a interação entre os 3 produtos.

Tabela 18: Valores médios para número de folhas, segunda medição, em resposta a doses de microrganismo eficiente, biocarvão e pirolenhoso em plantas de pimentão 70 dias após serem inoculadas com *M. enterolobii*. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

EM/Água (L/ha)	Pirolenhoso/ Água (L/L)	Biocarvão (Kg/ha)		
		0	1500	3000
0	0	14,67a	12,5b	14a
	1:200	12,67a	18,67a	17,33a
	1:100	17a	11,33a	15,67a
200	0	15,67a	15,67ab	15a
	1:200	15,33a	17,67a	17a
	1:100	14,67a	15a	17,33a
400	0	15,67a	19,67a	14,67a
	1:200	16,33a	13,67a	17a
	1:100	17a	15a	19a

Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Para a interação entre os três produtos testados e suas respectivas dosagens, o tratamento composto pela dose zero de pirolenhoso, 1500 kg/ha de biocarvão e as maiores doses de microrganismos eficientes (EM) demonstrou os maiores valores de número de folhas. Conforme esperado, a interação entre biocarvão e EM mostrou-se estatisticamente significativa, ressaltando o efeito sinérgico entre esses componentes. A atribuição dos resultados aos EM segue o padrão previamente discutido, estando diretamente relacionada à capacidade dos microrganismos em influenciar positivamente o crescimento vegetal por meio de mecanismos de promoção de crescimento, incluindo a disponibilização de nutrientes e a produção de fitormônios.

5.1.9 Altura da planta segunda medição

Tabela 19: interação entre as doses de microrganismo eficiente e biocarvão sobre a altura da planta (cm) na segunda medição em plantas de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Medidas realizadas aos 60 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Microrganismo eficiente (L)	Biocarvão (kg/ha)		
	0	1500	3000
0	35,88a	29,22a	32,89a
200	31,55b	31,67a	32,22a
400	32,11ab	32,055a	33a

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Na avaliação da interação entre microrganismos eficientes (EM) e biocarvão, observou-se efeito significativo especificamente entre a dose zero de biocarvão e a maior dose de EM. Estes resultados sugerem que os microrganismos eficientes constituíram o principal agente responsável pelo incremento no desenvolvimento vegetal nesta condição específica.

Conforme demonstrado na literatura e em tópicos anteriores, os microrganismos eficientes estabelecem uma relação constante com a promoção do crescimento vegetal, atuando na criação de um ambiente radicular favorável e no processo de absorção de

nutrientes. Este mecanismo será detalhadamente discutido em seção subsequente, com enfoque específico na relação entre microbiota e nutrição vegetal.

Embora os dados morfológicos tenham indicado que os EM não exerceram influência significativa no desenvolvimento radicular - conforme documentado em tópicos anteriores - constatou-se sua efetiva contribuição para o incremento da altura da parte aérea. Esta aparente dissociação entre os efeitos sobre o sistema radicular e a parte aérea sugere que os mecanismos de ação dos EM podem envolver vias metabólicas diferenciadas, atuando preferencialmente no crescimento vertical da planta através de modulações fisiológicas específicas.

A seguir, é analisada a interação entre pirolenhoso e microrganismo eficiente para esta mesma variável.

Tabela 20: interação entre as doses de microrganismo eficiente e pirolenhoso sobre a altura da planta (cm) na segunda medição em plantas de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Medidas realizadas aos 60 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Microrganismo eficiente (L)	Pirolenhoso (L/L)		
	0	1:100	1:200
0	32,83a	33,11a	34,89a
200	32,89a	31a	31,55ab
400	32,89a	31,89a	29,55b

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 20, referente à interação entre microrganismos eficientes (EM) e pirolenhoso (P), constatou-se que o pirolenhoso demonstrou maior eficiência no desenvolvimento vegetal. Este achado corrobora observações previamente documentadas neste estudo, nas quais o pirolenhoso apresentou efeito antagônico sobre os microrganismos do solo.

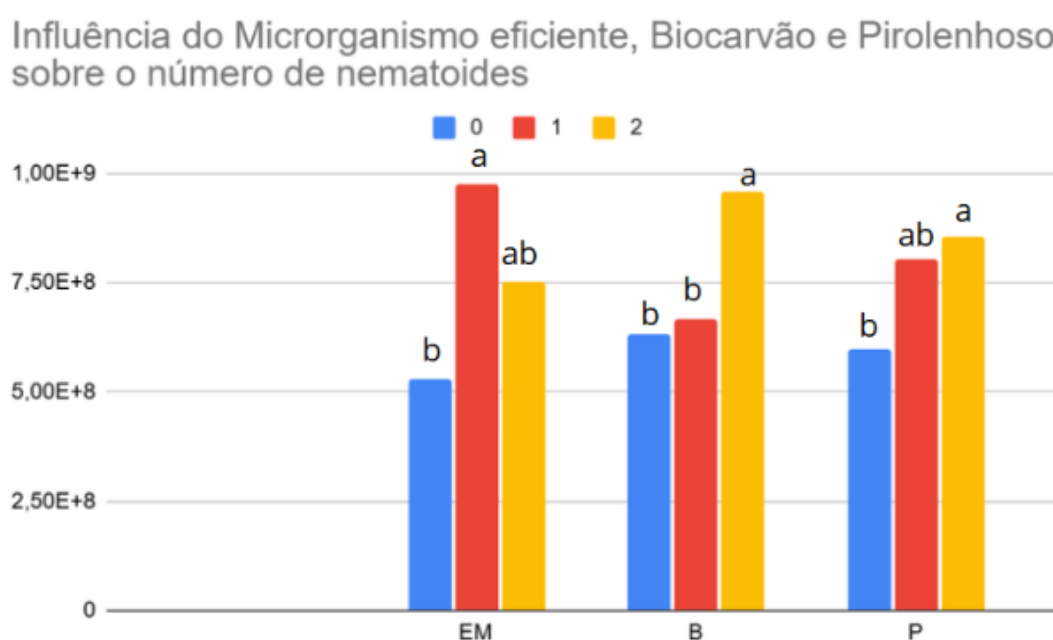
A análise dos dados revela um padrão complementar em relação à altura da planta: o pirolenhoso, em sua dose intermediária, promoveu incrementos significativos no

crescimento da parte aérea. Contudo, este efeito positivo foi progressivamente reduzido à medida que se aumentou a concentração de microrganismos no solo. Esta relação inversa entre a eficácia do pirolenhoso e a densidade microbiana sugere a existência de um mecanismo de interferência competitiva ou inibitória, onde o aumento da população microbiana pode limitar a expressão do potencial bioestimulante do pirolenhoso.

Tal comportamento sustenta a hipótese do efeito antagônico do pirolenhoso sobre a microbiota do solo, ao mesmo tempo em que evidencia a complexidade das interações entre bioestimulantes e componentes biológicos do sistema solo-planta.

5.2 Número de nematóides

Figura (14): número de nematóides em planta de pimentão, inoculado com *M. enterolobii*, em função de doses de microrganismos eficientes (EM), de biocarvão (B) e de ácido pirolenhoso (P).



Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

A análise integrada dos resultados evidenciou um aumento progressivo na população de nematoides proporcional à elevação das dosagens de todos os produtos testados, conforme demonstrado na Figura (14). Este fenômeno constitui uma contradição frente ao paradigma convencional estabelecido na literatura sobre controle biológico de fitonematoides. A compreensão deste resultado requer uma contextualização à luz do ciclo biológico de *Meloidogyne* spp., minuciosamente descrito por Ferraz e Brown (2016) e Ferraz (2018), que estabelece o processo infeccioso mediante a penetração de juvenis do segundo estágio (J2) através das radículas, seguida do estabelecimento do parasitismo por meio da formação de células nutridoras no sistema vascular.

O estudo conduzido por Maia (2022) em condições controladas de casa de vegetação, utilizando solo arenoso sob delineamento em blocos casualizados com sete tratamentos distintos, demonstrou que a associação entre fertilizantes organominerais e microrganismos (*Bacillus subtilis* e *Bacillus licheniformis*) proporcionou melhores resultados para parâmetros de desenvolvimento vegetal, especificamente altura de planta e massa seca avaliados aos 75 dias após a semeadura. Contudo, os dados referentes ao controle de nematoides revelaram-se inconclusivos, indicando limitações significativas na eficácia do tratamento biológico.

Estes resultados divergem dos obtidos por Machado, Kaneko e Pinto (2016), que relataram sucesso significativo no controle de nematoides utilizando microrganismos específicos. Esta disparidade pode ser atribuída a vários fatores, incluindo diferenças nas linhagens microbianas utilizadas, variações nas condições edafoclimáticas dos experimentos, ou particularidades na interação entre os microrganismos introduzidos e a microbiota nativa do solo em cada estudo.

Esta constatação encontra respaldo em investigações anteriores que documentam a variabilidade na eficiência do controle biológico de nematoides. Oliveira (2018), em estudo abrangente com cana-de-açúcar, observou que, embora o controle biológico com *Trichoderma asperellum*, *Bacillus subtilis* e *Bacillus methyilotrophicus* tenha demonstrado eficácia na redução de populações nematológicas e no estímulo ao crescimento vegetal, o tratamento químico com carbofurano proporcionou superioridade na produtividade de colmos em cana-soca e quarta soca. A combinação de nematicidas biológicos Quality + Rizos + Onix em cana-planta apresentou eficácia comparável ao controle químico, contribuindo significativamente para o incremento na produtividade de colmos e produção de açúcar.

Machado, Kaneko e Pinto (2016) enfatizam a complexidade inerente ao manejo de nematoides em culturas de extensão, como algodão, soja e milho. De acordo com esses autores, a eficácia dos métodos de controle está intrinsecamente relacionada às condições edafoclimáticas específicas de cada região, requerendo adaptações locais e abordagens personalizadas. Esta perspectiva corrobora a necessidade de planejamento criterioso que integre diferentes ferramentas de manejo, uma vez que produtos com desempenho satisfatório em determinadas condições podem apresentar eficácia reduzida em ambientes distintos.

Entre os fatores determinantes para as limitações observadas no controle biológico, destacam-se a especificidade na relação patógeno-hospedeiro, a competição com a microbiota nativa do solo, condições edafoclimáticas desfavoráveis e potenciais

interferências dos fertilizantes na estabilidade dos consórcios microbianos. A incorporação de torta de filtro no solo, conforme documentado por Oliveira (2018), demonstrou efeitos benéficos no incremento de produtividade através da adição de matéria orgânica e nutrientes, representando uma estratégia complementar viável.

A matéria orgânica do solo (MOS) é reconhecida na literatura como uma prática de manejo promissora para o controle de nematoides. No entanto, os resultados do presente estudo, representados no Gráfico 3, demonstraram um aumento populacional de nematoides em resposta à aplicação de biocarvão. Este fenômeno aparentemente paradoxal pode ser explicado mediante a análise das propriedades físico-químicas do biocarvão e sua interação com o sistema solo-planta.

O processo de pirólise, que ocorre entre 200-500°C, resulta na formação de uma estrutura porosa e alcalina (pH 7,83-11,67) rica em grupos funcionais oxigenados. Conforme demonstrado por Ibrahim et al. (2013) e Edeh e Mašek (2022), o biocarvão modifica significativamente a estrutura do solo, aumentando a macroporosidade e a retenção hídrica. Essas alterações criam um ambiente edáfico mais favorável ao desenvolvimento radicular, o que, paradoxalmente, pode beneficiar os nematoides ao proporcionar maior superfície de penetração e melhor estabelecimento do parasitismo. Os resultados deste trabalho chegam a evidenciar essa relação com o aumento do biocarvão e aumento de raízes, concernente a isso, quanto maior quantidade de raiz, maior o número de nematóides.

A capacidade de troca catiônica (CTC) do biocarvão, que varia conforme a temperatura de pirólise, promove a retenção de nutrientes essenciais como demonstrado por De Rezende et al. (2019) e Silva (2022). Entretanto, essa melhoria na fertilidade do solo não se traduziu necessariamente em controle nematológico, pois o crescimento radicular vigoroso estimulado pelo biocarvão pode ter compensado os danos causados pelos nematoides, permitindo a manutenção de suas populações.

Quanto à matéria orgânica do solo, o biocarvão atua como importante agente de sequestro de carbono, com teores que variam de 15-88% dependendo da temperatura de pirólise. Conforme Melo (2017) com incremento significativo de carbono orgânico no solo

A estrutura interna inerte do biocarvão, semelhante à grafite, assegura a estabilidade do carbono no solo por milhares de anos, conforme descrito por Rezende, Angelo e Mangrich (2011). Paralelamente, as substâncias superficiais do biocarvão estimulam a atividade microbiana através do fornecimento de habitats protegidos e recursos nutricionais, criando condições favoráveis para o desenvolvimento de microrganismos

benéficos. O que pode ter acontecido para este estudo é que a liberação de matéria orgânica pelo biocarvão não foi o suficiente para a regulação da MOS no solo, já que estudos apontam que o biocarvão libera o carbono de forma mais controlada e lenta.

Embora o biocarvão não tenha demonstrado eficácia no controle direto de nematoides neste estudo, sua importância para a qualidade do solo é inquestionável. Sua capacidade de melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, particularmente no que se refere ao incremento da MOS e à promoção da atividade microbiana, reforça seu valor como condicionador edáfico de longo prazo. A aparente contradição entre os benefícios do biocarvão para o solo e sua ineficácia no controle nematológico ressalta a complexidade das interações no sistema solo-planta-patógeno e a necessidade de aplicações integradas de manejo.

Em contraste com os resultados reportados na literatura científica, a aplicação de pirolenhoso no presente estudo não promoveu o controle de nematoides, conforme demonstrado no Gráfico 3. Paradoxalmente, observou-se um incremento na população desses fitoparasitas, divergindo dos achados de Farias (2020), Miranda (2021), Sandisk, Fabiyi (2023), Neto Negrison Junior e Negrison (2017) e Sampaio (2021), que documentaram a eficácia do extrato pirolenhoso no manejo de nematoides. Esta aparente contradição pode ser explicada mediante análise das particularidades experimentais e das condições edafoclimáticas específicas deste estudo.

Embora o pirolenhoso não tenha demonstrado eficácia no controle nematológico, seu efeito positivo em variáveis agrônomicas, previamente discutido, corrobora as observações de Grewal, Lord e Gunupuru (2018). Esses autores atribuíram ao pirolenhoso propriedades antimicrobianas, antioxidantes e pesticidas, além da capacidade de promover o crescimento vegetal, posicionando-o como ferramenta sustentável para a agricultura. A manutenção do desenvolvimento vegetal, mesmo sob elevada pressão de nematoides, sugere que o pirolenhoso pode ter estimulado mecanismos de tolerância nas plantas, em vez de exercer controle direto sobre os fitoparasitas.

A divergência observada entre os resultados pode estar associada a fatores como a concentração e método de aplicação do pirolenhoso, a composição química específica do extrato utilizado, a espécie de nematoide predominante no estudo, as interações com a microbiota nativa do solo e as condições específicas de temperatura e umidade do ambiente experimental. Estes fatores podem explicar a disparidade entre os resultados obtidos e aqueles reportados por outros pesquisadores.

A tabela a seguir mostra a interação entre Microrganismo eficiente e biocarvão e suas respectivas doses.

Tabela 21: interação entre as doses de microrganismo eficiente e biocarvão sobre o número de nematóides nas raízes em plantas de pimentão. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Microrganismo eficiente (L)	Biocarvão (kg/ha)		
	0	1500	3000
0	423,88b	467,22b	703,55b
200	931,33a	1022,22a	975,67ab
400	545,55ab	515,22b	1195,78a

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

A Tabela 21 demonstra a relação entre microrganismos eficientes e biocarvão quanto ao número de nematoides, corroborando as observações do gráfico anterior, onde se verificou um aumento progressivo na população de nematoides concomitantemente com o incremento nas concentrações dos produtos testados. Este fenômeno paradoxal pode ser compreendido mediante análise das características físico-químicas do biocarvão e suas interações com a microbiota do solo.

As substâncias húmicas presentes no biocarvão, constituídas por ácidos fúlvicos, húmicos e huminas, desempenham papel fundamental na modulação das propriedades do solo. Segundo Pinto (2016), estas macromoléculas atuam como polieletrólitos que estabelecem ligações estáveis com íons metálicos, influenciando diretamente a disponibilidade de nutrientes. A estrutura porosa do biocarvão, particularmente seus macroporos, funciona como microhabitat para microrganismos, conforme demonstrado por Ajema (2018), proporcionando abrigo, nutrientes adsorvidos e condições adequadas de aeração e umidade. Como já dito várias vezes neste estudo.

Estudos de Valderrama et al. (2023) e Xu et al. (2016) evidenciaram que a aplicação de biocarvão altera significativamente a composição da microbiota do solo, promovendo o aumento de grupos bacterianos benéficos como Proteobacteria, Bacteroidetes e Actinobacteria. Esta modulação microbial favorece processos essenciais como a ciclagem

de nutrientes e a fixação biológica de nitrogênio, conforme observado por Saxena, Rana e Pandey (2013) em estudos com *Phaseolus vulgaris*.

A interação sinérgica entre biocarvão e microrganismos resulta em melhorias significativas nas variáveis agronômicas das plantas. O biocarvão atua como condicionador do solo, aumentando sua capacidade de troca catiônica e disponibilizando nutrientes essenciais para o desenvolvimento vegetal. Esta ação conjunta explica os incrementos observados no crescimento das plantas, mesmo sob condições de elevada pressão de nematoides.

Contudo, é crucial destacar que, embora o biocarvão promova o desenvolvimento vegetal através do estímulo à atividade microbiana, este mecanismo não se traduz em controle efetivo de nematoides. Pelo contrário, as condições edáficas melhoradas podem eventualmente favorecer o estabelecimento e reprodução desses fitoparasitas.

A eficácia do biocarvão como promotor do crescimento vegetal está, portanto, intrinsecamente ligada à sua capacidade de modular a microbiota do solo e melhorar as propriedades físico-químicas do substrato, embora esta ação não se estenda ao controle de fitonematoides. Esta compreensão é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável que aproveitem os benefícios do biocarvão enquanto reconhecem suas limitações no controle específico de patógenos do solo.

A próxima tabela agora relaciona os microrganismos eficientes com o pirolenhoso.

Tabela 22: interação entre as doses de microrganismo eficiente e pirolenhoso sobre o número de nematoides nas raízes em plantas de pimentão. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematoides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Microrganismo eficiente (L)	Pirolenhoso (L/L)		
	0	1:100	1:200
0	425b	407,33b	762,11a
200	874,55a	1108a	946a
400	492,33ab	902a	862a

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Conforme previamente discutido, infere-se a existência de relação antagônica entre os produtos testados, particularmente no que se refere à interação entre o pirolenhoso e os microrganismos. Este fenômeno pode ser atribuído principalmente às alterações promovidas pelo pH acidificado do pirolenhoso na microbiota do solo, criando condições desfavoráveis para o estabelecimento e desenvolvimento dos microrganismos introduzidos.

Observa-se igualmente que o incremento na dosagem dos produtos correlacionou-se diretamente com o aumento populacional de nematoides, padrão este consistentemente documentado ao longo do estudo. Esta relação paradoxal pode estar associada ao efeito estimulante dos tratamentos no desenvolvimento vegetal, conforme demonstrado nos parâmetros agrônômicos analisados. O crescimento mais vigoroso das plantas, embora desejável sob condições normais, pode ter criado condições favoráveis para a proliferação de nematoides ao proporcionar maior volume de sistema radicular para colonização e estabelecimento do parasitismo.

A próxima tabela agora relaciona o biocarvão com o pirolenhoso.

Tabela 23: interação entre as doses de biocarvão e pirolenhoso sobre o número de nematóides nas raízes em plantas de pimentão. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Biocarvão (kg/ha)	Pirolenhoso (L/L)		
	0	1:100	1:200
0	408,44b	1017a	474,44b
1500	282,44b	487,77b	1234a
3000	1101,22a	912,33a	861,44ab

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Conforme apresentado na Tabela 23, que demonstra a interação entre microrganismos eficientes e biocarvão em relação à população de nematoides, observa-se um padrão consistente com os resultados previamente discutidos: o aumento nas concentrações desses insumos correlacionou-se com incrementos progressivos na densidade populacional de fitonematoides. Este fenômeno incoerente, onde produtos

reconhecidamente benéficos para o desenvolvimento vegetal não exerceram controle efetivo sobre os nematoides, pode ser explicado pelas características físico-químicas dos compostos testados.

A análise integrada dos dados demonstra que o biocarvão e o pirolenhoso, ambos derivados da algaroba (*Prosopis juliflora*), atuam como efetivos promotores do desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas. Esta sinergia funcional está intrinsicamente relacionada à sua origem comum e aos processos termoconversão distintos que sofrem. O biocarvão, produzido mediante pirólise lenta entre 450-900°C, apresenta estrutura porosa altamente estabilizada que promove melhorias nas propriedades físico-químicas do solo, enquanto o pirolenhoso, obtido por condensação dos vapores durante a carbonização, atua como bioestimulante natural rico em compostos orgânicos voláteis (Laird et al., 2010; Nachenius et al., 2013; Maia et al., 2021; Mendes, 2020; Mathew e Zakaria, 2015; Grewal, Abbey e Gunupuru, 2018).

A interação complementar entre esses produtos, notável considerando sua matriz vegetal comum, estabelece condições edáficas que favorecem simultaneamente o desenvolvimento vegetal e, paradoxalmente, a proliferação de nematoides. O vigoroso crescimento radicular propiciado pela aplicação conjunta desses insumos parece criar um ambiente propício para o estabelecimento e reprodução dos fitoparasitas, superando eventuais efeitos supressivos diretos.

A caracterização química dos resíduos biomássicos de algaroba para aplicação energética, conforme Cavalcanti et al. (2020), revela composição distintiva com teores de umidade (10,45%), cinzas (8,75%), materiais voláteis (26,11%) e carbono fixo (65,14%), parâmetros que determinam as características do pirolenhoso produzido a partir desta espécie vegetal.

Estudos complementares de Baqe (2022) sobre o biocarvão de algaroba identificaram composição diferenciada com 79,23% de materiais voláteis, 37,92% de carbono fixo e 1,59% de cinzas em pirólise a 450°C, evidenciando a influência conjunta da idade da madeira e das condições de processamento na composição final dos produtos pirolíticos.

Tabela 24: Valores médios para número de nematóides em resposta a doses de microrganismo eficiente, biocarvão e pirolenhoso em plantas de pimentão 70 dias após serem inoculadas com *M. enterolobii*. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

EM/Água (L/ha)	Pirolenhoso/ Água (L/L)	Biocarvão (Kg/ha)		
		0	1500	3000
0	0	380,66a	265,33a	629b
	1:200	634,66a	620b	1031ab
	1:100	256,33b	516,33a	449b
200	0	409,67a	379a	1835a
	1:200	236,33a	2267a	334b
	1:100	2148a	420,33a	757b
400	0	435a	203a	839b
	1:200	552,33a	816b	1218a
	1:100	649,33b	526,67a	1530a

Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

A análise da Tabela 24, que apresenta as interações entre os três produtos testados e suas respectivas doses, revela a necessidade de compreender os mecanismos pelos quais os estímulos ao crescimento vegetal podem influenciar a atração de nematoides. Para tanto, é fundamental considerar os processos que ocorrem na rizosfera

A rizosfera constitui um ambiente dinâmico onde se estabelecem complexas interações entre as raízes e os microrganismos do solo (Hopkins, 1995). Sua extensão varia conforme fatores edáficos e vegetais, compreendendo desde a superfície radicular (rizoplane) até alguns centímetros no solo circunvizinho. Nesta interface, os exsudatos radiculares atuam como potentes atratores de microrganismos quimiorganotróficos, elevando a população bacteriana em até 50% comparativamente ao solo não rizosférico (Hopkins, 1995).

O processo de rizodeposição, mediante o qual 40-70% do carbono alocado para as raízes é liberado na rizosfera (Lynch & Whipps, 1990), cria um ambiente biologicamente ativo que pode ativar propágulos de fitopatógenos quiescentes. Como observado por Nelson (1990), exsudatos solúveis e voláteis funcionam como estímulos primários para a germinação de estruturas de sobrevivência de fungos patogênicos.

No contexto específico dos nematoides, estudos desenvolvidos por Andaló, Moreira e Moino Junior (2017), com *Heterorhabditis amazonensis* demonstraram resposta locomotora diferenciada a compostos voláteis de exsudatos radiculares. Esta espécie mostrou-se particularmente atraída pela associação entre exsudatos de plântulas de alho e a presença do inseto *Spodoptera frugiperda*, indicando que a interação planta-praga potencializa a emissão de sinais químicos atrativos.

O estudo de Campos et al. (2011) fornece evidências elucidativas sobre os mecanismos de atração e penetração de nematoides, complementando a compreensão dos processos previamente discutidos na dinâmica rizosférica. A investigação demonstrou que a penetração de juvenis de segundo estágio (J2) de *Meloidogyne javanica* em soja ocorre preferencialmente pela coifa, seguida de migração entre os feixes vasculares do cilindro central, enquanto *Heterodera glycines* apresenta padrão distinto, penetrando aproximadamente 15 mm da região da coifa.

A análise comparativa revelou que a região seccionada da raiz de soja apresentou atratividade três vezes superior para J2 de *M. javanica* em comparação com a região da coifa, padrão não observado para *H. glycines*. A obstrução conjunta de ambas as extremidades radiculares reduziu significativamente (83%) a penetração de J2 de ambas as espécies, indicando que as substâncias atrativas são liberadas preferencialmente nessas regiões de lesão ou crescimento ativo.

Estes achados corroboram a premissa estabelecida anteriormente de que exsudatos radiculares e compostos voláteis liberados em regiões de desenvolvimento radicular ativo ou danificado atuam como potentes estimulantes quimiotáticos para nematoides. O fato de a penetração de *M. javanica* ter sido maior em segmentos de raiz comparado com plântulas intactas ressalta a importância de sinais químicos concentrados liberados em locais de injúria mecânica.

Estes mecanismos explicam os resultados observado experimentalmente: os tratamentos que promoveram o desenvolvimento radicular mais vigoroso, mediante a aplicação dos produtos testados, criaram simultaneamente condições favoráveis à proliferação de nematoides através do aumento na produção de exsudatos radiculares e da expansão da superfície de colonização disponível. A ativação de propágulos e a quimiotaxia positiva em resposta aos compostos voláteis liberados constituem fatores determinantes neste processo.

5.3 Nutrientes

Tabela 25: Resumo da análise de variância para os dados de Nitrogênio (N); Fósforo (P); Potássio (K); Sódio (NA) e Cálcio (CA) de pimentão inoculado com *M. enterolobii* em função de Microrganismo eficiente (EM), Biocarvão (B) e Ácido Pirolenhoso (P).

FV	GL	N	P	K	NA	CA
EM	2	*	***	NS	NS	NS
B	2	NS	NS	NS	NS	NS
P	2	NS	**	NS	NS	NS
EM x B	4	NS	NS	NS	NS	NS
EM x P	4	NS	NS	NS	NS	NS
B x P	4	NS	NS	NS	NS	NS
EM x B x P	8	NS	**	NS	NS	NS

CV (%) = 49,98

Média geral: 2,14

Ns= não significativo

*= significativo a 5%

**= significativo a 1%

*** = significativo a 0,01%

Tabela 26: Resumo da análise de variância para os dados de Magnésio (MG); Cobre (CU); Zinco (ZN); Ferro (FE) e manganês (MN) de pimentão inoculado com *M. enterolobii* em função de Microrganismo eficiente (EM), Biocarvão (B) e Ácido Pirolenhoso (P).

FV	GL	MG	CU	ZN	FE	MN
EM	2	NS	NS	NS	NS	***
B	2	NS	NS	NS	NS	***
P	2	NS	NS	NS	NS	***
EM x B	4	NS	NS	NS	NS	**
EM x P	4	NS	NS	NS	NS	*
B x P	4	NS	NS	NS	NS	NS
EM x B x P	8	NS	NS	NS	NS	*

CV (%) = 49,98

Média geral: 2,14

Ns= não significativo

*= significativo a 5%

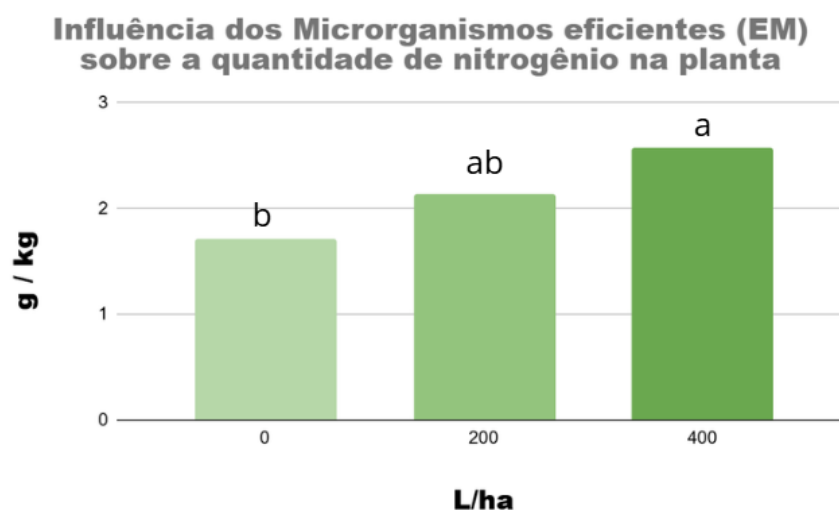
**= significativo a 1%

*** = significativo a 0,01%

A tabela de variação acima descreve que os tratamentos tiveram significância apenas para a absorção de nitrogênio, fósforo e manganês.

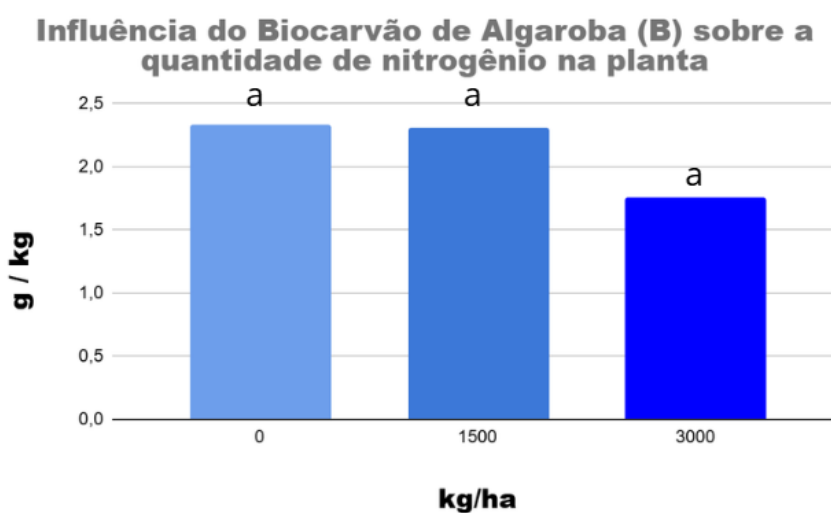
5.3.1 Nitrogênio

Figura (15): influência dos Microrganismos eficientes (EM) sobre a quantidade de nitrogênio na planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em g/kg.



Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

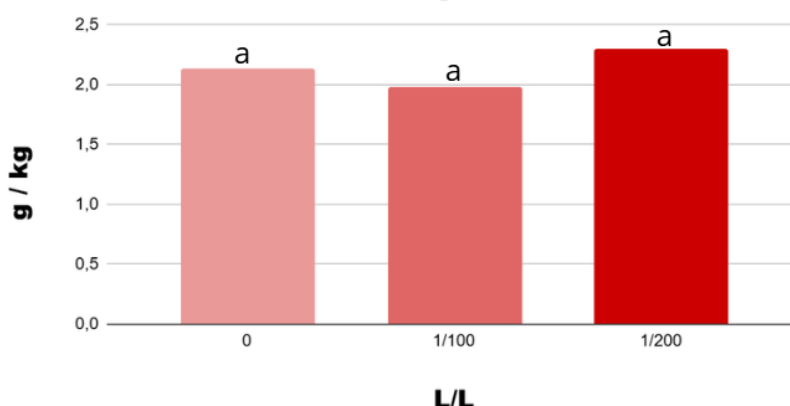
Figura (16): influência do Biocarvão de Algaroba (B) sobre a quantidade de nitrogênio na planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em g/kg.



Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Figura (17): influência do Pirolenhoso de Algaroba (PA) sobre a quantidade de nitrogênio na planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em g/kg.

Influência do Pirolenhoso de Algaroba (PA) sobre a quantidade de nitrogênio na planta



Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

O nitrogênio persiste como principal fator limitante à produtividade agrícola, constituindo a Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) em plantas não leguminosas uma alternativa sustentável para superar esta limitação. Os resultados das figuras (15), (16) e (17) demonstram que a aplicação de Microrganismos Eficientes (EM) promoveu aumento significativo na absorção de nitrogênio pelas plantas. Este fenômeno pode ser atribuído à capacidade desses microrganismos em estabelecer associações com o sistema radicular, convertendo nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas (VINHAL; FREITAS; RODRIGUES, 2010).

De acordo com Marchetti e Barp (2015), a significativa absorção de nitrogênio observada está diretamente relacionada às interações estabelecidas entre os microrganismos e o sistema radicular. A seleção de estirpes bacterianas adaptadas às condições locais, particularmente do gênero *Azospirillum*, revela-se crucial para o êxito do processo de inoculação. A combinação adequada entre variedades vegetais e estirpes eficientes demonstrou potencial para suprir mais de 50% da demanda de nitrogênio das plantas, conforme evidenciado pelos resultados de assimilação (VINHAL; FREITAS; RODRIGUES, 2010).

A análise dos resultados confirma que os microrganismos fixadores de nitrogênio atuam como componentes essenciais no sistema solo-planta, não apenas pela disponibilização de nitrogênio, mas também mediante o estabelecimento de relações simbióticas que favorecem o desenvolvimento vegetal. Esses achados reforçam a importância da FBN como processo fundamental para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, representando uma estratégia promissora para reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados.

As próximas tabelas mostram as interações entre os tratamentos.

Tabela 27: interação entre as doses de microrganismo eficiente e biocarvão sobre a quantidade de nitrogênio (g/kg) em plantas de pimentão inoculadas com *M. enterolobii*. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Microrganismo eficiente (L/L)		Biocarvão (Kg/ha)	
	0	1500	3000
0	1,53b	2,26a	1,34b
200	2,8a	2,29a	1,31b
400	2,69ab	2,37a	2,63a

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Tabela 28: interação entre as doses de microrganismo eficiente e pirolenhoso sobre a quantidade de nitrogênio (g/kg) na planta em plantas de pimentão inoculadas com *M. enterolobii*. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Microrganismo eficiente (L/L)		Pirolenhoso (L/L)	
	0	1:100	1:200
0	1,91a	1,71a	1,5b
200	1,66a	2,06a	2,74a
400	2,84a	2,22a	2,64ab

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Tabela 29: Valores médios para quantidade de nitrogênio (g/kg) na planta em resposta a doses de microrganismo eficiente, biocarvão e pirolenhoso em plantas de pimentão 70 dias após serem inoculadas com *M. enterolobii*. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

EM/Água (L/ha)	Pirolenhoso/ Água (L/L)	Biocarvão (Kg/ha)		
		0	1500	3000
0	0	1,72a	2,45a	1,56ab
	1:200	2,38a	1,56a	0,58b
	1:100	0,49b	2,77a	1,89a
200	0	2,8a	1,68a	0,51b
	1:200	2,61a	2,8a	2,82a
	1:100	3,01a	2,4a	0,6a
400	0	3,03a	2,47a	3,03a
	1:200	2,35a	2,19a	3,36a
	1:100	2,68a	2,45a	1,51a

Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Os dados obtidos por Almeida, Santos e Pereira (2025) nas interações entre os produtos testados e suas respectivas doses demonstram correlação direta com a atividade microbiana. Estudo desenvolvido por Almeida, Santos e Pereira comprovou a eficácia dos microrganismos eficientes (ME) mediante análise de unidades formadoras de colônias (UFCs) e teores de macro e micronutrientes, evidenciando seu potencial para melhoria da saúde do solo, fertilidade e desenvolvimento vegetal.

Os resultados deste trabalho destacam a superioridade dos ME produzidos, que apresentaram elevada atividade microbiana e concentrações significativas de nutrientes essenciais, superando valores reportados em estudos anteriores e fertilizantes comerciais. A diversidade e funcionalidade microbiana dos ME demonstraram capacidade para melhorar a fertilidade do solo através do aumento da retenção hídrica, promoção da

mineralização de nutrientes e competição com patógenos, estabelecendo condições mais equilibradas para o desenvolvimento agrícola.

Particularmente relevante é a comprovada atuação dos ME nos processos de fixação biológica de nitrogênio, corroborando os dados de absorção nitrogenada obtidos experimentalmente. Esta eficácia consolida os ME como alternativa viável para o manejo agroecológico, reduzindo a dependência de insumos químicos e fortalecendo sistemas agrícolas mais resilientes e sustentáveis.

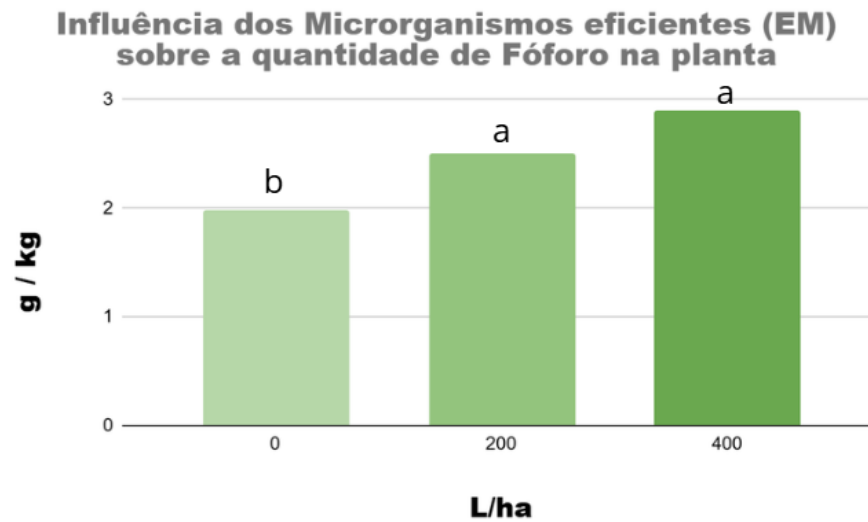
No entanto, o estudo de Dalle (2008) demonstra que a eficácia da inoculação com bactérias fixadoras de nitrogênio em leguminosas é condicionada por dois fatores fundamentais: a especificidade da estirpe bacteriana e as características do substrato utilizado. Os resultados evidenciaram respostas diferenciadas das quatro espécies de leguminosas (*Desmodium leiocarpum*, *Tephrosia adunca*, *Mimosa xanthocentra* e *Mimosa somnians*) conforme a combinação bactéria-substrato.

Em substrato esterilizado, as estirpes mais eficientes foram BR 2216 e BR 6610 para *D. leiocarpum*, BR 5303 e BR 3628 para *T. adunca*, e BR 3523 e BR 3454 para *M. xanthocentra*. Já em solo não esterilizado, os melhores resultados foram obtidos com BR 3467 e BR 4406 para *D. leiocarpum*, BR 5609 e BR 96 para *T. adunca*, e BR 3477 e BR 3474 para *M. somnians*.

Estes achados reforçam que o sucesso da simbiose depende criticamente da seleção de estirpes bacterianas adaptadas tanto à espécie vegetal quanto às condições edáficas específicas, destacando a necessidade de se estabelecer parcerias específicas entre planta e bactéria para garantir a eficiência do processo de inoculação em programas de recuperação de áreas degradadas.

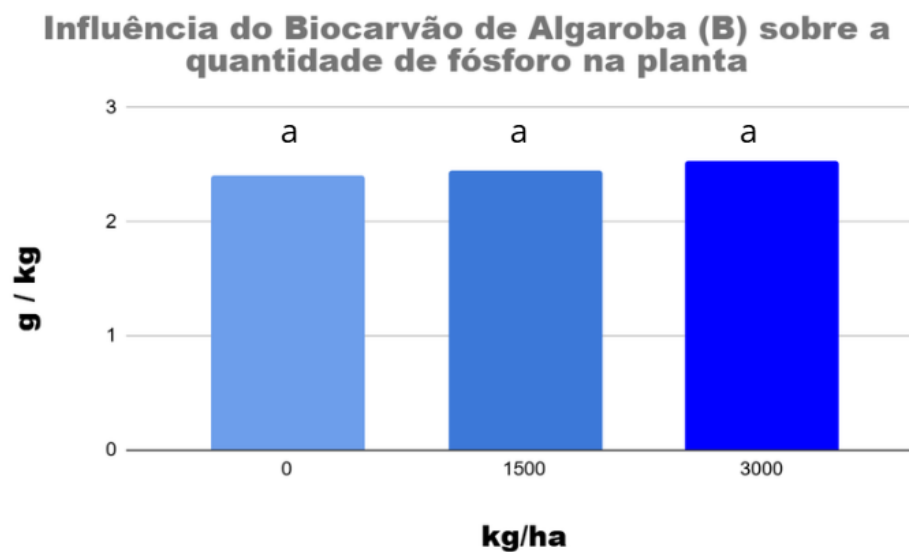
5.3.2 Fósforo

Figura (18): influência dos Microrganismos eficientes (EM) sobre a quantidade de fósforo na planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em g/kg.



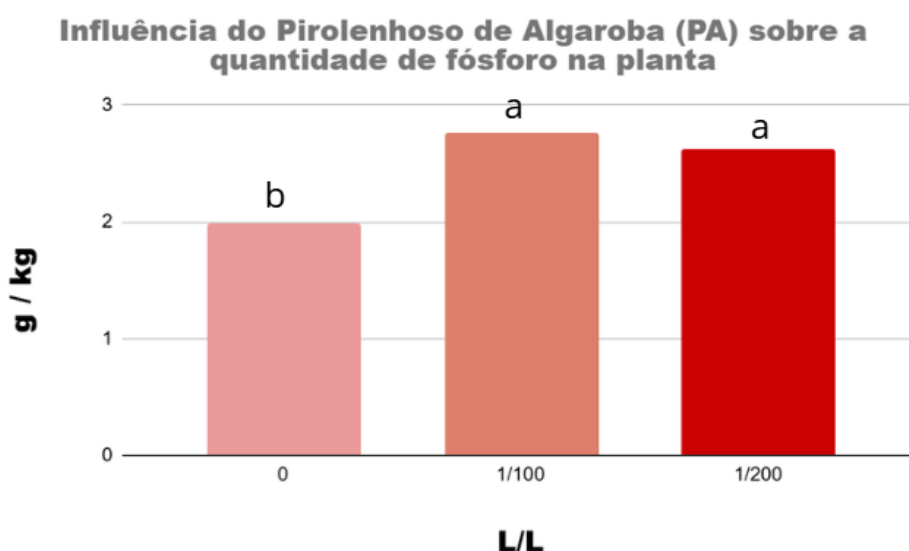
Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Figura (19): influência do Biocarvão de Algaroba (B) sobre a quantidade de fósforo na planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em g/kg.



Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Figura (20): influência do Pirolenhoso de Algaroba (PA) sobre a quantidade de fósforo na planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em g/kg.



Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Tabela 30: interação entre as doses de microrganismo eficiente e biocarvão sobre a quantidade de fósforo (g/kg) em plantas de pimentão inoculadas com *M. enterolobii*. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Microrganismo eficiente (L)	Biocarvão (kg/ha)		
	0	1500	3000
0	2,2a	2,15a	1,57b
200	2,3a	2,39a	2,83a
400	2,7a	2,81a	3,21a

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Tabela 31: interação entre as doses de microrganismo eficiente e pirolenhoso sobre a quantidade de fósforo (g/kg) em plantas de pimentão inoculadas com *M. enterolobii*. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Microrganismo eficiente (L)		Pirolenhoso (L/L)	
	0	9000	4667
0	1,44b	2,32a	2,18b
200	2,12ab	3,07a	2,33b
400	2,42a	2,91a	3,38a

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Tabela 32: Valores médios para a quantidade de fósforo (g/kg) na planta em resposta a doses de microrganismo eficiente, biocarvão e pirolenhoso em plantas de pimentão 70 dias após serem inoculadas com *M. enterolobii*. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

EM/Água (L/ha)	Pirolenhoso/Água (L/L)	Biocarvão (Kg/ha)		
		0	1500	3000
0	0	1,88a	2,12a	0,31b
	1:200	1,82a	2,44b	2,27a
	1:100	2,92a	1,88a	2,14a
200	0	1,56a	2,27a	2,52a
	1:200	1,7a	2,73ab	2,57a
	1:100	3,67a	2,16a	3,4a
400	0	1,6a	2,49a	3,15a
	1:200	2,94a	4,03a	3,19a
	1:100	3,53a	1,9a	3,3a

Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Os dados das figuras (18), (19) e (20) e das tabelas 30, 31 e 32 demonstram uma correlação positiva entre o incremento nas doses de microrganismos eficientes e a maior disponibilidade de fósforo no sistema solo-planta. Esta relação pode ser explicada pelo mecanismo de ação descrito por Bento et al. (2016), que observaram que os benefícios da inoculação com microrganismos promotores de crescimento nos teores de fósforo na planta e grãos de milho manifestaram-se principalmente em condições de baixa disponibilidade do nutriente. Com o ataque de nematóides, essa planta possuía dificuldades de absorção de nutrientes devido aos danos nas raízes.

O estudo de Bento et al. (2016), avaliando o potencial de microrganismos rizosféricos em diferentes doses de P_2O_5 (0, 20, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹), constatou que a inoculação com estirpes de bactérias e fungos rizosféricos resultou em efeitos significativos na massa seca da parte aérea e nos teores de fósforo, especialmente nas menores doses do nutriente. Estes resultados corroboram com os dados obtidos na presente pesquisa, onde se verifica que a aplicação crescente de microrganismos eficientes potencializou a disponibilidade de fósforo, possivelmente através de mecanismos de solubilização de formas não-disponíveis do nutriente no solo.

A similaridade entre os resultados evidencia que os microrganismos atuam como facilitadores da aquisição de fósforo pelas plantas, particularmente em condições edáficas com limitações iniciais deste nutriente, reforçando o potencial do uso de inoculantes microbianos como estratégia para melhorar a eficiência do uso de fósforo na agricultura.

Em estudo recente, Almeida (2025) investigou a interação entre microrganismos e a disponibilidade de fósforo (P) em solos tropicais, onde este nutriente apresenta baixa disponibilidade devido aos processos de adsorção e precipitação com óxidos de ferro e alumínio. A pesquisa selecionou 28 linhagens de *Bacillus* spp. com potencial para solubilizar P, destacando-se as linhagens MGB3314 (*Priestia megaterium*), MGB289 (*Priestia aryabhattai*), RZ2MS13 e RZ1MS18 (*Bacillus toyonensis*).

Os resultados demonstraram que os consórcios microbianos potencializaram significativamente a solubilização de fósforo, com destaque para o consórcio MGB3314+MGB289+RZ2MS13, que aumentou em 40,8% a disponibilidade de P. Em experimentos de curta duração, a inoculação com microrganismos associados a fontes de P promoveu aumento de 66% na disponibilidade do nutriente, 45% na produção de massa seca da parte aérea e maior acúmulo de P nos tecidos vegetais.

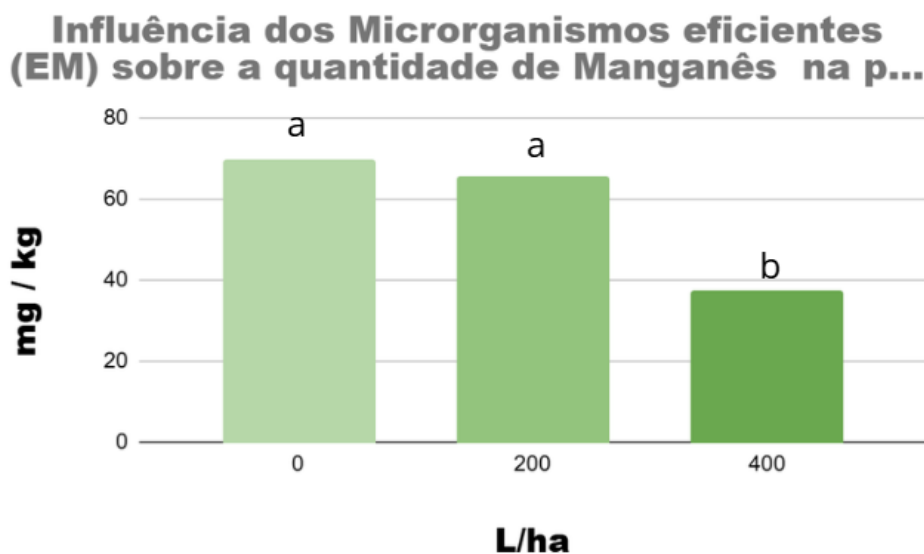
Em condições de campo, os experimentos confirmaram a eficácia da inoculação, com incrementos de 36 a 44% na disponibilidade de P na fração lábil do solo, além de

contribuir para a redução do P não-lábil. O consórcio microbiano no Experimento 2 demonstrou os resultados mais expressivos, aumentando a concentração de P nos tecidos vegetais e favorecendo a produção de massa seca. Estes resultados corroboram com os dados obtidos na presente pesquisa.

Estudos desenvolvidos para avaliar a interação da aplicação de biocarvão em conjunto com bactérias ressaltaram a interação entre microrganismo e biocarvão na absorção de nutrientes. De acordo com Saxena, Rana e Pandey (2013), o consórcio entre rizobactérias e biocarvão, contribuíram significativamente positivamente para o desenvolvimento da planta *P. vulgaris*, também influenciou no conteúdo de N e P na planta.

5.3.3 Manganês

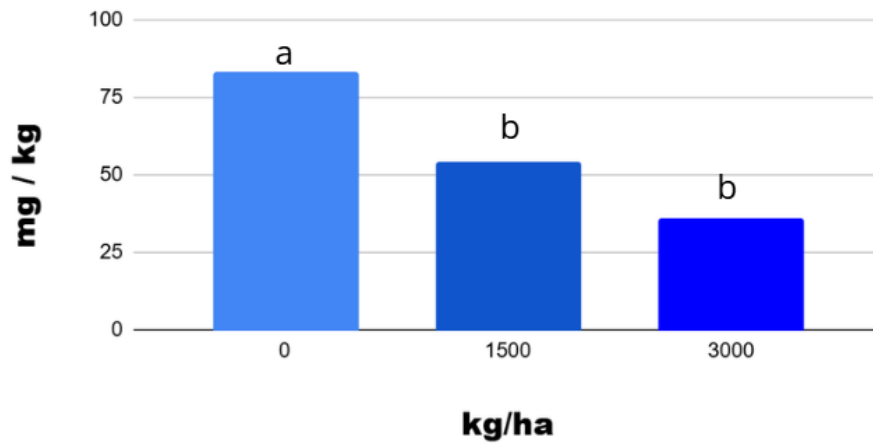
Figura (21): influência dos Microrganismos eficientes (EM) sobre a quantidade de manganês na planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em mg/kg.



Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Figura (22): influência do Biocarvão de Algaroba (B) sobre a quantidade de manganês na planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em mg/kg.

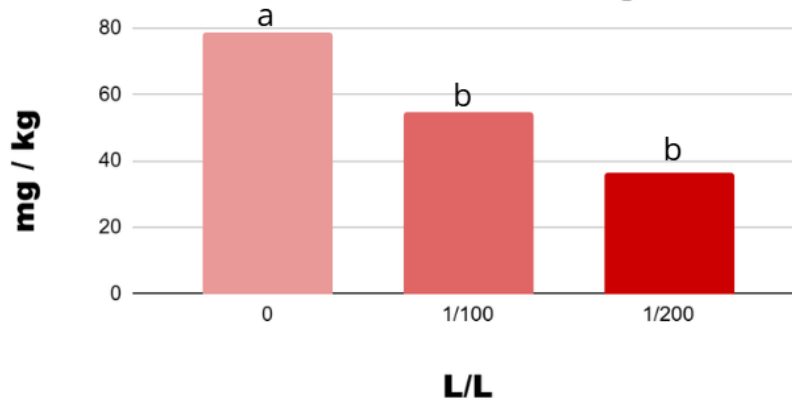
Influência do Biocarvão de Algaroba (B) sobre a quantidade de manganês na planta



Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Figura (23): influência do Pirolenhoso de Algaroba (B) sobre a quantidade de manganês na planta de pimentão inoculado com *M. enterolobii*. Valores expressos em mg/kg.

Influência do Pirolenhoso de Algaroba (PA) sobre a quantidade de manganês n...



Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Tabela 33: interação entre as doses de microrganismo eficiente e biocarvão sobre a quantidade de manganês (g/kg) em plantas de pimentão inoculadas com *M. enterolobii*. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Microrganismo eficiente (L)		Biocarvão (kg/ha)	
	0	1500	3000
0	107,84a	51,98b	50a
200	76,16ab	93,71a	27,58a
400	65,16b	16,5b	30,66a

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Tabela 34: interação entre as doses de microrganismo eficiente e pirolenhoso sobre a quantidade de manganês (g/kg) em plantas de pimentão inoculadas com *M. enterolobii*. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Microrganismo eficiente (L)		Pirolenhoso (L/L)	
	0	1:100	1:200
0	100a	68,5a	41,07a
200	85ab	61,75a	50a
400	50,74b	34,29a	27,28a

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Tabela 35: interação entre as doses de biocarvão e pirolenhoso sobre a quantidade de manganês (g/kg) em plantas de pimentão inoculadas com *M. enterolobii*. Medidas realizadas aos 70 dias após a inoculação de nematóides. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Biocarvão (kg/ha)		Pirolenhoso (L/L)	
--------------------------	--	--------------------------	--

	0	1:100	1:200
0	121,19a	69,93a	58,05a
1500	75,63b	61,56a	24,98a
3000	39,5b	33a	35,77a

Fonte: própria do autor. Petrolina, 2025.

Tabela 36: Valores médios para a quantidade de manganês (g/kg) na planta em resposta a doses de microrganismo eficiente, biocarvão e pirolenhoso em plantas de pimentão 70 dias após serem inoculadas com *M. enterolobii*. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

EM/Água (L/ha)	Pirolenhoso/ Água (L/L)	Biocarvão (Kg/ha)		
		0	1500	3000
0	0	130a	131,37a	38,42a
	1:200	85,55a	-11,053b	47,72a
	1:100	106,16a	35,26a	64,09a
200	0	127,16a	98,85a	29,82a
	1:200	46,95a	85,22a	19,08a
	1:100	54,36a	97,06a	33,83a
400	0	105,64a	3,68b	50,26a
	1:200	40,57a	0,79a	40,5a
	1:100	49,27a	52,36a	1,24a

Fonte: Própria do autor. Petrolina, 2025.

Ao contrário do observado para outras variáveis nutricionais, os teores de manganês apresentaram comportamento distinto, com redução na absorção deste elemento em função do incremento das doses e dos tratamentos avaliados. Este fenômeno encontra similaridade com os resultados obtidos por Nogueira e Cardoso (2002), que investigaram a interação entre fungos micorrízicos arbusculares e a comunidade microbiana do solo na atenuação da toxidez de manganês em soja.

Em seu estudo, as plantas micorrizadas com *Glomus etunicatum* ou *G. macrocarpum* demonstraram maior crescimento e redução significativa nos sintomas de toxidez por manganês, particularmente quando associadas ao restabelecimento da comunidade microbiana do solo. Os mecanismos envolvidos incluíram o aumento na disponibilidade de ferro e a consequente diminuição na disponibilidade de manganês no substrato, além de maiores teores de fósforo nas plantas micorrizadas.

A diminuição na concentração de manganês na parte aérea das plantas micorrizadas foi atribuída principalmente à redução em sua disponibilidade no substrato, enquanto para o ferro este efeito foi relacionado à sua retenção nas raízes. Estes resultados sugerem que a associação micorrízica, especialmente quando integrada à comunidade microbiana nativa, modula a dinâmica de disponibilidade e absorção de micronutrientes, particularmente mediante mecanismos competitivos que reduzem a fitodisponibilidade de manganês no sistema solo-planta.

Estudos desenvolvidos por Voss e Thomas demonstraram mecanismos similares aos observados no presente experimento com Microrganismos Eficientes (EM), particularmente quanto à atuação de bactérias do gênero *Pseudomonas* na disponibilidade de metais pesados no sistema solo-planta. De acordo com os pesquisadores, a capacidade de diversos microrganismos em adsorver metais em solução representa um fator significativo na nutrição mineral vegetal.

Em investigação específica com *Pseudomonas* sp. isolada da rizosfera de trigo (*Triticum aestivum* L.), observou-se que a inoculação bacteriana reduziu em aproximadamente 70% a concentração de cobre e 35% a de manganês no tecido das plântulas de duas cultivares distintas (Anahuac e BR 35). Este efeito foi atribuído à competição estabelecida pela bactéria por esses micronutrientes na solução do solo, mediante processos de sorção, particularmente através da adsorção à parede celular bacteriana.

No presente experimento com EM, que incluiu a espécie *Pseudomonas aeruginosa*, verificaram-se resultados convergentes, com significativa redução na absorção de manganês pelas plantas. Tais evidências reforçam que microrganismos rizosféricos, especialmente representantes do gênero *Pseudomonas*, modulam a disponibilidade e absorção de micronutrientes mediante mecanismos competitivos de sorção, estabelecendo relações de antagonismo nutricional que podem influenciar diretamente a composição mineral dos tecidos vegetais.

6. CONCLUSÃO

A combinação específica de 1500 kg/ha de biocarvão de algaroba e 400 L/ha de Microrganismos Eficazes (EM) foi a mais eficaz para promover o crescimento e a nutrição do pimentão, atingindo os objetivos de melhorar os parâmetros agronômicos e nutricionais da cultura (nitrogênio e Fósforo).. No entanto, em contraste com o objetivo de controle do nematoide, esse maior vigor vegetal paradoxalmente favoreceu o aumento populacional de *Meloidogyne enterolobii*, indicando um efeito indireto mediado pela planta. Portanto, embora os insumos testados sejam alternativas válidas para a nutrição vegetal, seu uso para o manejo sustentável desse fitoparasita exige a integração com outras táticas de controle direto.

7. REFERÊNCIAS

- AJEMA, L. Effects of Biochar Application on Beneficial Soil Organism Review. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*, v. 5, n. 5, p. 9-18, 2018.
- AJENG, A. A. et al. Bioformulation of biochar as a potential inoculant carrier for sustainable agriculture. *Environmental Technology & Innovation*, v. 20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101168>.
- ALMEIDA, Ádila Natália França de. Interação entre microrganismos e fontes fosfatadas promovendo o crescimento da cana-de-açúcar e biodisponibilidade de fósforo no solo. 2025. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2025.
- ALMEIDA, Marcos; SANTOS, Edivaldo; PEREIRA, Maria. Produção e caracterização de microrganismos eficientes: uma alternativa sustentável. *Cadernos de Agroecologia*, v. 20, n. 1, 2025.
- ALMEIDA JÚNIOR, Joaquim Júlio Almeida et al. Milho em segunda safra com uso do enraizante extrato pirolenhoso implantado no sudoeste goiano. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 4, p. 30051-30062, 2022.
- ANDALÓ, Vanessa; MOREIRA, Grazielle Furtado; JUNIOR, Alcides Moino. Comportamento de busca do nematoide *Heterorhabditis amazonensis* em relação a fontes de estímulo. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, p. 265-272, 2017.
- AVILA, Giovani Mansani De Araujo et al. Use of efficient microorganisms in agriculture. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 8, p. e40610817515, 2021.
- BALAT, Mustafa et al. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. ***Energy conversion and Management***, v. 50, n. 12, p. 3147-3157, 2009.
- BAQE, Sharu et al. Efeito de Parâmetros Seleccionados de Pirólise na Produção e Qualidade do Ácido de Biochar e Piroligneos a partir de matérias-primas específicas. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Egerton, Quênia, 2022.
- BATISTA, B. D. Promoção de crescimento vegetal por *Bacillus* sp. RZ2MS(: dos genes ao campo. 2017. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola)-Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.
- BATISTA, E. M. C. C. et al. Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. *Scientific Reports*, v. 8, n. 10677, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28794-z>.
- BENTO, Rafael Umbelino et al. Contribuição de bioestimulantes contendo microrganismos rizosféricos na absorção de fósforo pelo milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 15, n. 3, p. 572-581, 2016.

BONFIM, F. P. G. et al. Caderno dos microrganismos eficientes (EM): instruções práticas sobre Uso ecológico e social do EM. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2011. 32 p. BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Regras para análise de sementes. Brasília: SNDA/DNDV/CLAV, 1992. 365 p.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, v. 38, p. 68-94, 2012.

BRITO, Marina de Oliveira. Mapeamento de informações tecnológicas em documentos de patente sobre a algaroba (*Prosopis juliflora*). 2024. Dissertação (Mestrado em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

CAETANO, M. I. Micro-organismos eficientes (EM's) na compostagem de palha de cana-de-açúcar e esterco bovino. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014.

CAMPOS, Hercules Diniz et al. Atração e penetração de *Meloidogyne javanica* e *Heterodera glycines* em raízes excisadas de soja. *Ciência Rural*, v. 41, n. 8, p. 1496-1502, 2011.

CÂNDIDO, Núbia Rangel et al. Extratos pirolenhosos de casca de coco, acácia negra e eucalipto: Caracterização físico-química e avaliação in vitro como potenciais inibidores da urease. *Química Nova*, v. 46, n. 10, p. 961-971, 2023.

CÂNDIDO, Ruan da Silva. Bactérias promotoras de crescimento utilizadas no desempenho de plântulas do grão de bico. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

CAVALCANTI, Ingrid Lelis Ricarte et al. Caracterização química do resíduo da biomassa da algaroba para fins de estudos energéticos. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 1, p. 872-881, 2020.

CHEN, Zheng et al. Enhanced bioreduction of iron and arsenic in sediment by biochar amendment influencing microbial community composition and dissolved organic matter content and composition. *Journal of Hazardous Materials*, v. 311, p. 20-29, 2016.

COSTA, Ana Caroline Damasceno da et al. Qualidade física e química do solo em função da aplicação de Biocarvão de sementes de açaí. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 14, p. e467101421866, 2021.

DA SILVA, André Lopes; CORDEIRO, Rogério Soares; DA ROCHA, Heliselle Cristine Ramires. Aplicabilidade de Microrganismos Eficientes (ME) na Agricultura: uma revisão bibliográfica. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 1, p. e32311125054, 2022.

DE PAULA FREITAS, Maisa et al. Microrganismos eficientes na qualidade de mudas cafeeiro (*Coffea arabica*). *Revista DELOS*, v.18, n.66, p. e4607, 2025.

DE REZENDE, Fabiana Abreu et al. Biocarvão: multifuncionalidade no gerenciamento e reutilização de co-produtos agroindustriais. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 14, n. 3, p. 45-60, 2019.

DE SOUZA, Leane Castro. Resposta do biocarvão nos atributos e na emissão de gases do solo. 2023. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2023.

DICIONÁRIO ONLINE DE PORTUGUÊS. Diclo, 2025. Disponível em : <https://www.dicio.com.br>. Acesso em: 24 nov. 2025.

DUARTE, S. J. et al. Chemical, Physical, and Hydraulic Properties as Affected by One Year of Miscanthus Biochar Interaction with Sandy and Loamy Tropical Soils. *Soil Systems*, v. 3, n. 2, p. 24, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020024>.

EDEH, Ifeoma Gloria; MAŠEK, Ondřej. The role of biochar particle size and hydrophobicity in improving soil hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, v. 73, n. 1, p. e13138, 2022.

ENDERS, A. et al. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*, v. 114, p. 644–653, 2012.

FARIAS, Sara Padilha de et al. Controle in vitro e in vivo dos nematoides da podridão seca do inhame usando extratos pirolíneos de palmeiras. *Revista Ceres*, v. 67, n. 6, p. 482-490, 2020.

FEITOSA, A. A. et al. Caracterização Química de Amostras de Biocarvão de Casca de Bana e Bagaço de Laranja Carbonizados a 400 e 600°C. *Revista Virtual de Química*, v.12, n.4, p. 922-935, 2020.

FERRAZ, Edmir Celestino de Almeida. Absorção de nutrientes e conteúdo de clorofila em pimenteiras-do-reino (*Piper nigrum* L.) infestadas por *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White, 1919) Chitwood, 1949. 1982. Tese (Doutorado em Fitopatologia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982

FERRAZ, Luiz Carlos Camargo Barbosa. Nematoides. Manual de fitopatologia: princípios e conceitos. Tradução . Ouro Fino: Agronômica Ceres, 2018. v. 1. . . Acesso em: 10 set. 2025.

FERRAZ, Luiz Carlos Camargo B.; BROWN, Derek John Finlay. Nematologia de plantas: fundamentos e importância. Piracicaba: Sociedade Brasileira de Nematologia, 2016. 250 p. ISBN 978-85-99031-26-1.

FERREIRA, José Adcarlos Neles. Atributos químicos e mesofauna em latossolo amarelo da Amazônia central alterado com doses crescentes de biocarvão. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021.

GAMA, Gil Sander Próspero et al. Efeito do pH sobre a atividade antibacteriana e antifúngica do extrato pirolenhoso de eucalipto. *Revista Árvore*, v. 47, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-908820230000011>.

GONZÁLEZ-MARQUETTI, Ivonne et al. Biochar y su contribución a la nutrición, crecimiento y defensa de las plantas. *Revista de Protección Vegetal*, v. 35, n. 2, p. e08, 2020.

GREWAL, Arshdeep; ABBEY, Lord; GUNUPURU, Lokanadha Rao. Production, prospects and potential application of pyroligneous acid in agriculture. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 135, p. 152-159, 2018.

GUERREIRO, Julio César; BENTO, Felipe Santade; SILVESTRE, Caio. Efeito da incorporação de extrato pirolenhoso em substrato no desenvolvimento inicial de mudas de tomate. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 8, n. 1, p. 1-9, 2012.

HALE, S. E. et al. The effect of biochar, lime and ash on maize yield in a long-term field trial in a Ultisol in the humid tropics. *Science of the Total Environment*, v. 719, p. 137455, 2020.

IRITI, M. et al. Soil application of effective microorganisms (EM) maintains leaf photosynthetic efficiency, increases seed yield and quality traits of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants grown on different substrates. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 20, n. 9, p. 2327, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20092327>.

JEFFERY, S. et al. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. *Geoderma*, v. 251-252, p. 47-54, 2015.

KAUR, Varinder; SHARMA, Praveen. Effect of prosopis juliflora biochar on physico-chemical properties of naphthalene and phenanthrene contaminated soil. *Polycyclic Aromatic Compounds*, v. 41, n. 7, p. 1406-1417, 2021.

LAGHARI, M. et al. Effects of biochar application rate on sandy desert soil properties and sorghum growth. *Catena*, v. 135, p. 313–320, 2015.

LAIRD, D. A. et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil. *Geoderma*, v. 158, n. 3-4, p. 443-449, 2010.

LASTE, Keila Caroline Dalle. Seleção de estirpes de rizóbio eficientes na fixação biológica de nitrogênio para leguminosas com potencial de uso na recuperação de áreas mineradas. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

LIMA, Daniele de Andrade Villarim. Caracterização de substrato e de biocarvão derivado de resíduo madeireiro. 2023. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023.

LIU, Zuolin et al. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *PLoS ONE*, v12, n. 6, p. e0179079, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179079>.

LU, Xincheng et al. Effect of pyrolysis temperature on the characteristics of wood vinegar derived from Chinese fir waste: A comprehensive study on its growth regulation performance and mechanism. *ACS Omega*, v. 4, n. 21, p. 19054-19062, 2019.

MACIEL, Elen Raquel Ferreira. Extrato pirolenhoso no controle de microorganismos fitopatogênicos. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2020.

MAHMUD, Khoirun Nisa et al. Evaluation on efficiency of pyroligneous acid from palm kernel shell as antifungal and solid pineapple biomass as antibacterial and plant growth promoter. *Sains Malaysiana*, v. 45, n. 10, p. 1423-1434, 2016.

MAIA, Júlio Eduardo Santana. Uso de organomineral associado a microrganismos no desenvolvimento e controle de nematoides na cultura da soja. 2022. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022.

MATHEW, S.; ZAKARIA, Z. A. Pyroligneous acid—the smoky acidic liquid from plant biomass. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 99, n. 2, p. 611–622, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6242-1>.

MELO, Bruno Araújo. Influência do biochar de lodo de esgoto nas frações lábeis da matéria orgânica do solo cultivado com milho. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2017.

MENDES, Jacqueline da Silva et al. Biocarvão: caracterização, uso como condicionador de solo e influência no desempenho agrônômico do milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 12, p. 819-825, 2020.

MIRANDA, Ipojucan Santos de. Avaliação qualitativa do uso de extrato pirolenhoso no controle nematoides das galhas (*Meloidogvne* spp.) na cultura da acerola. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

MONTORO, Arthur Vieira da Silva et al. Produção, otimização e análise de briquetes de biocarvão oriundos da pirólise. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 8, p. e679985627, 2020.

NAIR, R. R. et al. Biochar from co-pyrolysis of urban organic wastes—investigation of carbon sink potential using ATR-FTIR and TGA. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 12, p. 4729–4743, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01000-9>

NOGUEIRA, Marco Antonio; CARDOSO, Elke Jurandy Bran. Interações microbianas na disponibilidade e absorção de manganês por soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, n. 11, p. 1605-1612, 2002.

OASIS TURF. Nematodes. Oasis Turf, 2020. Disponível em: <https://www.oasisturf.com.au/project-details/nematodes/>. Acesso em: 11 set. 2025.

OFOE, Raphael; GUNUPURU, Lokanadha Rao; ABBEY, Lord. Metabólitos, perfil elementar e atividades químicas do ácido pirolineoso derivado de alta temperatura de *Pinus strobus*. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, v. 9, n. 1, p. 85, 2022.

OFOE, Raphael et al. Foliar application of pyroligneous acid acts synergistically with fertilizer to improve the productivity and phytochemical properties of greenhouse-grown tomato. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 1934, 2024.

OLIVEIRA, Elisa Fidêncio de. Utilização de microrganismos e torta de filtro em cana-de-açúcar cultivada em áreas com nematoides. 2018. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2018.

PARIYAR, P. et al. Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application. *Science of the Total Environment*, v. 713, p. 136433, 2020.

PEREIRA, Lia Martins et al. Caracterização de biocarvão via craqueamento térmico catalítico a partir do blend do lodo de esgoto e gordura residual em escala piloto. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 1, p. 1502-1509, 2020.

PINTO, Tatiane de Oliveira et al. Potencialidades do vermicomposto, de seu resíduo sólido (da extração de substâncias húmicas), do biochar e de humina para o uso na remediação de solo contaminado com cádmio. *Química Nova*, v. 39, n. 6, p. 703-709, 2016.

PUGAS, A. S. et al. Efeito dos Microrganismos Eficientes na taxa de germinação e no crescimento da Abobrinha (*Cucurbita Pepo* L.). *Cadernos de Agroecologia*, v. 8, n. 2, 2013.

RAZZAGHI, F.; OBOUR, P. B.; ARTHUR, E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, v. 361, p. 114055, 2020.

REIS, Edclea do Nascimento et al. Biocarvão e bio-óleo de cascas de coco (*Cocos nucifera* L.) sob diferentes temperaturas de pirólise. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 9, p. e642997480, 2020.

REZENDE, Edivaltrys I. P. et al. Biocarvão (biochar) e sequestro de carbono. *Revista Virtual de Química*, v. 3, n. 5, p. 426-433, 2011.

SAMPAIO, Erik Gomes et al. Estudo do extrato pirolenhoso no manejo de *Meloidogyne enterolobii* em goiabeira. *Summa Phytopathologica*, v. 47, n. 4, p. 287-293, 2021.

SANTOS, Joseilma Araújo et al. Caracterização, retenção e disponibilidade de água de diferentes tipos de biocarvão de origem animal e vegetal. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 5, p. e48411528360, 2022.

SAXENA, J.; RANA, G.; PANDEY, M. Impact of addition of biochar along with *Bacillus* sp. on growth and yield of French beans. *Scientia Horticulturae*, v. 162, p. 351-356, 2013.

SHAABAN, A. et al. Influence of heating temperature and holding time on biochars derived from rubber wood sawdust via slow pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 107, p. 31-39, 2014.

SILVA, Ivan Euzébio da. Efeitos da combinação de composto orgânico com biocarvão sobre a produção de biomassa de *Brachiaria brizantha* e alterações nas características químicas do solo. 2022. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2022.

SIQUEIRA, Dayany Florencio et al. Potencial de extrato de cabacinha no controle de *Meloidogyne enterolobii* em pimentão. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 18, n. 3, p. e3189, 2023.

SIRIWARDENA, B. P. et al. Efeitos dos ácidos pirolíneos (vinagre de madeira) produzidos por diferentes espécies de madeira no crescimento vegetativo da berinjela

(*Solanum melongena* L.). Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka, v. 48, n. 2, p. 207-213, 2020.

STROHER, Bruna et al. Influência da temperatura de pirólise no pH, condutividade e etc nos produtos da pirólise de agro-resíduos. In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 11., 2020, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: ABES, 2020.

TAN, Y. L.; ABDULLAH, A. Z.; HAMEED, B. H. Fast pyrolysis of durian (*Durio zibethinus* L) shell in a drop-type fixed bed reactor: Pyrolysis behavior and product analyses. Bioresource Technology, v. 243, p. 85-92, 2017.

VALDERRAMA, Christian F. et al. Análisis de biochar y metales: una revisión sistemática y análisis bibliométrico. Ingeniería y Competitividad, v. 25, n. 3, p. e-31512, 2023.

VILLAGRA-MENDOZA, K.; HORN, R. Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils. Geoderma, v. 326, p. 88-95, 2018.

VINHAL-FREITAS, Isabel Cristina; RODRIGUES, Mariana Bueno. Fixação biológica do nitrogênio na cultura do milho. Agropecuária Técnica, v. 31, n. 2, p. 143-154, 2010.

WANG, Ning et al. Biochar increases arsenic release from an anaerobic paddy soil due to enhanced microbial reduction of iron and arsenic. Environmental Pollution, v. 220, p. 514-522, 2017.

XIAO, X. et al. Insights into multilevel structures of biochars and their potential environmental applications: a critical review. Environmental Science & Technology, v. 52, n. 9, p. 5027–5047, 2018.

XU, Nan et al. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure. European Journal of Soil Biology, v. 74, p. 1-8, 2016.

ZHAO, L. et al. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. Journal of Hazardous Materials, v. 256-257, p. 1-9, 2013.

ZHANG, Jun; AMONETTE, James E.; FLURY, Markus. Effect of biochar and biochar particle size on plant-available water of sand, silt loam, and clay soil. Soil and Tillage Research, v. 212, p. 104992, 2021.