

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS – CCA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE - PPGAA

FERTILIZANTES DE EFICIÊNCIA MELHORADA NA PRODUÇÃO DE PIMENTA
BIQUINHO

LINO CARLOS SITOE

ARARAS – SP
2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS – CCA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE - PPGAA

FERTILIZANTES DE EFICIÊNCIA MELHORADA NA PRODUÇÃO DE PIMENTA
BIQUINHO

LINO CARLOS SITOE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA da Universidade Federal de São Carlos *campus* Araras, como requisito para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Roselena Faez

ARARAS – SP
2026

Sitoe, Lino Carlos

Fertilizantes de eficiência melhorada na produção de
pimenta biquinho / Lino Carlos Sitoe -- 2026.
72f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São
Carlos, campus Araras, Araras

Orientador (a): Claudinei Fonseca Souza

Banca Examinadora: Claudinei Fonseca Souza, Josiane
de Lima Souza, Glaucia Cristina Pavão

Bibliografia

1. Fertilizantes de eficiência melhorada. 2. Cultivo sem
solo. 3. Agricultura sustentável. I. Sitoe, Lino Carlos. II.
Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Helena Sachi do Amaral - CRB/8
7083

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Curso de Mestrado do candidato Lino Carlos Siteo, realizada em 11/02/2026.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza (UFSCar)

Prof^a. Dr^a. Josiane de Lima Souza (UFSCar)

Prof^a. Dr^a. Glaucia Cristina Pavão (LDC)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,
Com toda a gratidão, dedico a vocês, que
com apoio incondicional, incentivo e
coragem, me impulsionaram a seguir em
frente de cabeça erguida em minha jornada
acadêmica e na conquista dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Anabela Luís Chaúque e Carlos José Site, por sempre acreditarem no meu potencial. Mesmo distantes, a energia e a força de vocês foram os pilares desta jornada. Às minhas irmãs, Hermínia e Eunice, por cada partilha e risada que encurtaram a distância. A crença de vocês em mim foi meu combustível.

À minha família estendida: tias Daina, Luisa, Beatriz e Esperança; tios Elves e Sérgio Reis; primas Flora e Marcelina; e avós Lino e Flora. Aos meus amigos Luís, Louves, Felicidade, Alfredo, Jairo, Camila e Vanda. Obrigado por se fazerem presentes, incentivando-me constantemente, independentemente da distância geográfica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza, pela dedicação ao meu crescimento acadêmico e profissional. À Profa. Dra. Roselena Faez, pelo inestimável apoio e ensinamentos.

Aos técnicos e amigos Priscila, Daniel e Juliana, pelo suporte fundamental na etapa experimental. Ao Grupo de Engenharia de Água, Solo e Ambiente (EASA), especialmente à Viviane; e ao Laboratório de Materiais Poliméricos e Biossorventes (LabMPB), com carinho especial a Rodrigo, Sahmira, Gabriela, Josiane, Matheus e Eduardo. Agradeço pela amizade, companheirismo e troca de saberes.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente (PPGAA) e a todo o corpo docente, pelas oportunidades e conhecimentos partilhados.

Aos meus amigos Ricardo e Campos, irmãos que ganhei nesta caminhada. Obrigado pelos momentos de alegria e pelo apoio incondicional.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O uso intensivo de insumos na agricultura tem gerado preocupações quanto à sustentabilidade dos sistemas produtivos. A Agenda 2030 da ONU, por meio do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável “Fome Zero e Agricultura Sustentável”, propõe o uso de tecnologias que conciliem produtividade com a redução de impactos ambientais. Nesse contexto, este estudo avaliou como diferentes estratégias de aplicação de fertilizantes de eficiência melhorada (FEM) influenciam o crescimento e a produção de pimenta biquinho (*Capsicum chinense*), variedade “Maria Bonita”, em sistema protegido e sem solo. Os FEM foram formulados com fosfato monoamônico (MAP) e nitrato de potássio (KNO_3), incorporados em matrizes biodegradáveis de celulose nanofibrilada (CNF) e amido termoplástico (TPS), via *spray dryer* e misturador interno. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com três tratamentos: fertirrigação (FERT), aplicação única (PAT) e aplicação parcelada (PAD) dos FEM. Foram avaliadas variáveis biométricas, produção, qualidade dos frutos, estado nutricional e, complementarmente, realizou-se um ensaio de biodegradação no substrato de fibra de coco. Os resultados demonstraram que, embora o tratamento FERT tenha proporcionado maior produtividade e biomassa, os tratamentos com FEM apresentaram desempenho promissor quanto à qualidade. O PAD favoreceu frutos de maior diâmetro e comprimento e garantiu teores adequados de fósforo, apesar das limitações em nitrogênio e potássio. A análise de biodegradação revelou que a rápida decomposição da matriz polimérica resultou em imobilização temporária de nitrogênio, explicando os menores índices de clorofila e o crescimento inicial mais lento sob FEM. Conclui-se que os FEM aplicados de forma parcelada constituem uma alternativa tecnicamente viável para a obtenção de frutos com características comerciais superiores, além de ambientalmente sustentável pela redução de perdas de nutrientes.

Palavras-chave: FEM, fibra de coco, *Capsicum chinense*, e agricultura sustentável.

ABSTRACT

The intensive use of inputs in agriculture has raised concerns regarding the sustainability of production systems. The UN 2030 Agenda, through the Sustainable Development Goal "Zero Hunger and Sustainable Agriculture," proposes the use of technologies that reconcile productivity with the reduction of environmental impacts. In this context, this study evaluated the effect of different application methodologies of enhanced efficiency fertilizers (EEF) on the growth and yield of Biquinho pepper (*Capsicum chinense*), "Maria Bonita" variety, in a protected and soilless system. The EEF were formulated with monoammonium phosphate (MAP) and potassium nitrate (KNO_3), incorporated into biodegradable matrices of nanofibrillated cellulose (CNF) and thermoplastic starch (TPS), using spray drying and melt mixing. The experiment was conducted in a randomized block design with three treatments: fertigation (FERT), single application (PAT), and split application (PAD) of the EEF. Biometric variables, yield, fruit quality, and nutritional status were evaluated; additionally, a biodegradation assay was performed in the coconut fiber substrate. Results demonstrated that, although the FERT treatment provided higher total yield and biomass, the EEF treatments showed promising agronomic performance regarding quality. The PAD treatment favored the formation of fruits with larger diameter and length and ensured adequate phosphorus levels, despite limitations in nitrogen and potassium contents. The biodegradation analysis revealed that the rapid decomposition of the polymeric matrix resulted in temporary nitrogen immobilization, explaining the lower chlorophyll indices and slower initial growth observed in plants under EEF. It is concluded that EEF applied in a split manner constitute a technically viable alternative for obtaining fruits with superior commercial characteristics, in addition to being environmentally sustainable by reducing nutrient losses.

Keywords: EEF, coconut fibre, *Capsicum chinense*, and sustainable agriculture.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1- INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo geral	3
2.2. Objetivos específicos	3
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. A cultura de pimenta biquinho (<i>Capsicum chinense</i>).....	4
3.1.1. Características agronômicas e qualidade da pimenta biquinho (<i>Capsicum chinense</i>)	5
3.2. Fertirrigação.....	6
3.3. Cultivo sem solo com substrato de fibra de coco	7
3.3. Fertilizantes de eficiência melhorada (FEM).....	9
4 - MATERIAL E MÉTODOS	13
ETAPA 1 – Preparo dos FEM e liberação de nutrientes em água.....	13
4.1. Material.....	13
4.2. Métodos	14
4.2.1. Preparo das microesferas.....	14
4.2.2. Preparo do TPS e incorporação das microesferas	15
4.2.3. Teste de liberação de nutrientes em água.....	15
ETAPA 2 – Desempenho agronômico e liberação em substrato.....	16
4.3. Caracterização da área experimental	16
4.3.1. Estrutura do sistema de cultivo sem solo em vasos	17
4.3.2. Produção e Transplântio das Mudanças de Pimenta Biquinho.....	18
4.3.3. Manejo da irrigação.....	20
4.3.4. Avaliação da uniformidade do sistema de irrigação	22
4.3.5. Monitoramento da Condutividade Elétrica	22
4.4. Avaliações biométricas da pimenta Maria Bonita	23
4.4.1. Avaliação do Crescimento Vegetativo da Planta	24
4.4.2. Avaliação das Características e Produção de Frutos	24
4.5. Análise química do tecido vegetal da pimenta Maria Bonita	25
4.6. Índice de Clorofila Falker	26
4.7. Avaliação da Qualidade dos Frutos (Sólidos Solúveis).....	26
ETAPA 3 – Biodegradação dos materiais poliméricos	27

4.8. Ensaio de biodegradação pelo método respirométrico	27
4.9. Estatística e análise de dados	28
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
ETAPA 1 – Preparo dos FEM e liberação de nutrientes em água.....	30
5.1. FEM - Liberação de Nutrientes em Água	30
ETAPA 2 – Desempenho agrônômico e liberação em substrato.....	32
5.2. Dados meteorológicos.....	32
5.3. Condutividade elétrica em campo.....	33
5.4. Parâmetros biométricos.....	35
5.4.1. Altura da planta e diâmetro do caule.....	35
5.4.2. Variáveis biométricas: comprimento dos frutos e diâmetro dos frutos por planta.....	38
5.4.3. Variáveis biométricas: número e massa dos frutos por planta	39
5.4.4. Produtividade	41
5.5. Análise química do tecido vegetal da pimenta Maria Bonita	42
5.6. Índice de clorofila Falker (ICF)	43
5.7. Qualidade das pimentas	44
ETAPA 3 – Biodegradação dos materiais poliméricos	46
5.8. Biodegradação dos FEM em substrato de fibra de coco.....	46
6 - CONCLUSÃO	48
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação esquemática comparativa entre a perda de nutrientes em fertilizantes sintéticos (A) e o mecanismo de liberação lenta em FEM (B).....	10
Figura 2. Modelo de encapsulação de nutrientes em matriz biodegradável de TPS e CNF.	12
Figura 3. Imagem ilustrativa de preparo das microesferas. (A) Solução aquosa de fertilizante e CNF sob agitação em mesa agitadora. (B) Processo de secagem da solução no equipamento Spray dryer. (C) Microesferas prontas após a secagem.	14
Figura 4. Esquema visual de obtenção do FEM.	15
Figura 5. Componentes utilizados no estudo da liberação dos FEM. (A) FEM. (B) Saquinho permeável utilizado para conter o fertilizante. (C) Medida de condutividade iônica em condutivímetro.	16
Figura 6. Localização e características da área de estudo.	16
Figura 7. Estrutura e preparo do experimento. (A) Estufa agrícola utilizada para a condução do experimento. (B) Preenchimento e pesagem da fibra de coco umedecida antes do plantio. (C) Disposição dos vasos dentro da estufa, organizados conforme o delineamento experimental.	17
Figura 8. Ilustração do sistema de cultivo sem solo da pimenta Maria bonita.....	18
Figura 9. Esquema visual do transplântio das mudas e aplicação dos FEM no cultivo da pimenta Maria Bonita. (A) Mudanças da pimenta biquinho variedade Maria Bonita em células da bandeja de polietileno; (B) Plantio das mudas no substrato de fibra de coco; (C) Incorporação dos FEM no substrato; (D) Colocação do gotejador sobre o local onde os FEM foram aplicados.	19
Figura 10. Componentes do sistema de irrigação e monitoramento ambiental. (A) Controlador digital Wi-Fi; (B) Reservatórios utilizados no sistema de irrigação; (C) Emissor acoplado a um conector, permitindo a distribuição da água por quatro saídas; (D) Estação meteorológica utilizada para monitoramento ambiental.	21
Figura 11. Instrumentação e monitoramento de parâmetros da solução e do substrato. (A) Medição da CE da solução nutritiva nas caixas de preparo; (B) Sonda de capacitância (Frequency Domain Reflectometry - FDR) instalada no perfil do substrato para monitoramento contínuo de umidade, CE e temperatura; e (C) Coleta e análise da solução de drenagem (lixiviado) para determinação da sua Condutividade Elétrica, empregando condutivímetro de bancada.	23
Figura 12. Esquema visual das análises biométricas da pimenta Maria Bonita.....	24
Figura 13. Imagem ilustrativa de coleta e secagem de folhas para análise do tecido foliar. (A) Corte das folhas com tesoura desinfetada em cada unidade experimental. (B) Folhas cortadas, sendo duas por planta, dispostas para posterior secagem. (C) Estufa utilizada para a secagem das folhas.....	25
Figura 14. Etapas da preparação e análise de amostras de pimenta biquinho para determinação de sólidos solúveis (°Brix): (A) separação dos frutos; (B) amostras homogeneizadas; (C) leitura em refratômetro digital.	27
Figura 15. Sistema respirométrico de Bartha utilizado para ensaio da biodegradação.	28
Figura 16. Perfil de liberação dos FEM em meio aquoso ao longo do tempo. A liberação dos nutrientes foi monitorada pela condutividade iônica.	30
Figura 17. Dados da estação meteorológica do experimento.	32
Figura 18. Monitoramento dos valores médios semanais de CE nas soluções nutritivas em sistema de cultivo sem solo: (A) valores de CE das soluções na entrada do sistema; (B) valores de CE na saída do sistema; (C) valores de CE ao longo dos perfis de cultivo.	34

Figura 19. Variáveis biométricas: (A): Boxplot e teste de Tukey para o comprimento dos frutos; (B): Boxplot e teste de Tukey para o diâmetro dos frutos. As médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ...	38
Figura 20. Variáveis biométricas: (A) Número de frutos por planta e (B) Massa de frutos por planta. As médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	39
Figura 21. Sintomas de deficiência nutricional (Clorose) em plantas de pimenta biquinho dos tratamentos com FEM aos 45 DAT.	40
Figura 22. Perfil de liberação de CO ₂ (mg) durante a biodegradação dos FEM em substrato de fibra de coco ao longo de 75 dias de incubação. (A) Liberação diária de CO ₂ e (B) Liberação acumulada de CO ₂	46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Solução nutritiva para fertirrigação	20
Tabela 2. Altura e diâmetro médio do caule das plantas de pimenta-biquinho Maria Bonita aos 30, 60 e 90 dias após o transplântio (DAT) sob diferentes estratégias de fertilização.	36
Tabela 3. Produtividade média de pimenta biquinho em função de diferentes tratamentos.	41
Tabela 4. Concentrações médias foliares de macronutrientes nos tratamentos FERT, PAD e PAT, comparadas com os níveis considerados apropriados conforme as recomendações do Boletim 100.	42
Tabela 5. Índice de clorofila a e b.....	43
Tabela 6. Teste de Tukey a 5 % entre as médias do parâmetro qualitativo dos frutos de pimenta.	45

1- INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a intensificação da produção agrícola têm ampliado a demanda por fertilizantes sintéticos para suprir as necessidades nutricionais das culturas. No entanto, estima-se que entre 30% e 50% desses insumos sejam perdidos por processos como lixiviação, volatilização e solubilização, resultando em impactos ambientais, como a contaminação do solo e da água e a eutrofização de ecossistemas aquáticos, além de representar perdas econômicas para os produtores (RISEH et al., 2023).

Diante desses desafios, a Agenda 2030 da ONU estabelece metas voltadas ao desenvolvimento sustentável, incluindo ODS 2 "Fome Zero e Agricultura Sustentável" e ODS 12 "Consumo e Produção Responsáveis" (SDGS, 2015). Nesse contexto, a adoção de tecnologias inovadoras tem sido fundamental para otimizar a eficiência do uso de nutrientes e mitigar os impactos ambientais associados ao uso intensivo de fertilizantes sintéticos.

Entre as principais estratégias destacam-se a fertirrigação, o cultivo sem solo e os fertilizantes de eficiência melhorada (FEM), que visam reduzir as perdas de nutrientes e promover uma produção agrícola mais sustentável. Os FEM são produtos formulados com nutrientes associados a substâncias específicas, que controlam a liberação de nutrientes no solo e maximizam sua absorção pelas plantas. Essas tecnologias permitem a redução do volume de fertilizantes aplicados, minimizam perdas por processos físicos e químicos e mitigam os impactos ambientais, como a toxicidade hídrica e a degradação do solo (CHIAREGATO & FAEZ, 2021).

Além disso, estudos apontam que os FEM, quando associados ao cultivo sem solo, promovem aumentos significativos na produtividade e na qualidade dos cultivos, enquanto contribuem para práticas agrícolas mais sustentáveis (MESSA, SOUZA & FAEZ, 2020; ZHANG et al., 2022; ZHANG et al., 2023).

O cultivo sem solo, que substitui o solo tradicional por substratos orgânicos como fibra de coco, casca de arroz e serragem de pinus, destaca-se como uma técnica inovadora e sustentável. Esses substratos promovem o desenvolvimento saudável das plantas, ao fornecer nutrientes essenciais e melhorar as condições físicas e químicas do meio de cultivo (SANTOS, 2018). Além disso, essa técnica elimina problemas relacionados à salinização, compactação e erosão do solo, permitindo o cultivo em áreas onde o uso de solos naturais seria inviável. Quando associado à fertirrigação, o cultivo sem solo otimiza

a aplicação de nutrientes, reduz custos operacionais e aumenta a eficiência do sistema produtivo, como demonstrado em estudos com hortaliças e frutas tropicais (MEDEIROS, 2010; BRYŚEWSKI et al., 2021).

Entre as culturas de relevância econômica no Brasil, as pimentas do gênero *Capsicum spp.* ocupam posição de destaque. Com uma produção anual de aproximadamente 75 mil toneladas distribuídas em 5 mil hectares, as pimentas têm importante papel no agronegócio, sendo o estado de São Paulo o segundo maior produtor nacional (PINTO e DONZELE, 2021).

A pimenta biquinho, em particular, possui grande relevância social e econômica, especialmente para a agricultura familiar, por sua versatilidade na comercialização. Além de ser vendida *in natura*, é amplamente processada em conservas, geleias, molhos e pimentas em pó, gerando valor agregado ao produto final e contribuindo para a sustentabilidade financeira dos pequenos agricultores (RIBEIRO et al., 2016).

Avanços na pesquisa agrônômica, como os desenvolvimentos realizados pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), têm impulsionado a produtividade e a qualidade das pimentas biquinho por meio do melhoramento genético. Como resultado desse progresso, cultivares híbridas têm demonstrado desempenho superior. Destaca-se a pimenta Maria Bonita que, ao aliar alta produtividade, resistência a estresses e qualidades sensoriais singulares, consolida-se como um modelo de referência para estudos de manejo nutricional e eficiência de fertilizantes de liberação controlada (SALA, 2020; MARTINEZ et al., 2021).

Apesar das vantagens dos FEM e do cultivo sem solo, as interações entre essas tecnologias e o desempenho de culturas hortícolas em diferentes condições de manejo e ambientais ainda são pouco compreendidas (PAN et al., 2024). Tais lacunas dificultam a formulação de estratégias otimizadas para o uso desses insumos em sistemas agrícolas modernos. Neste contexto, este estudo tem como objetivo avaliar, em ambiente protegido, a eficácia agrônômica de FEM na produção de pimenta biquinho da variedade ‘Maria Bonita’, considerando parâmetros de crescimento, produtividade e liberação de nutrientes. Adicionalmente, busca-se comparar diferentes métodos de aplicação dos FEM e analisar sua taxa de degradação em substrato de fibra de coco ao longo do tempo, visando subsidiar estratégias para otimização do uso de fertilizantes em sistemas de cultivo protegido.

2 - OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a eficácia agronômica de fertilizantes de eficiência melhorada (FEM) na produção de pimenta biquinho da variedade ‘Maria Bonita’ em ambiente protegido.

2.2. Objetivos específicos

- Produzir fertilizantes de eficiência melhorada (FEM) à base de polímeros biodegradáveis associados a fertilizantes sintéticos;
- Avaliar a liberação de nutrientes dos FEM durante o cultivo da pimenta biquinho “Maria Bonita”;
- Comparar os parâmetros biométricos e a produtividade de pimenta biquinho “Maria Bonita” sob diferentes métodos de aplicação dos FEM;
- Avaliar a taxa de degradação dos FEM em substrato de fibra de coco ao longo do tempo.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. A cultura de pimenta biquinho (*Capsicum chinense*)

A exploração das pimentas nas Américas remonta a cerca de 12.000 anos, quando as populações indígenas já utilizavam esses vegetais para alimentação, cura de doenças, cultos sagrados e ornamentação (BOSLAND e VOTAVA, 2000; DEWITT e BOSLAND, 1996).

O gênero *Capsicum*, pertencente à família Solanaceae, inclui diversas espécies, sendo *Capsicum chinense* uma das mais conhecidas. Esse gênero tem uma longa história de uso humano, com seu cultivo no Peru e em outros países da América Latina datando de 8000-7000 a.C. Entre 1500 e 1600 d.C., a exploração do *Capsicum* se espalhou globalmente, impactando profundamente os alimentos e as culturas ao redor do mundo (KATO e NOMURA, 2024). Das 41 espécies de *Capsicum*, apenas cinco foram domesticadas: *C. annuum*, *C. baccatum*, *C. frutescens*, *C. chinense* e *C. pubescens* (BARBOZA et al, 2020; CARRIZO GARCÍA et al., 2016 e Kim et al., 2014).

Em 2018, a produção mundial de pimentas atingiu 40,9 milhões de toneladas, cultivadas em uma área de 3,8 milhões de hectares. A China lidera como o maior produtor mundial, responsável por 45,3% da produção, seguida pelo México (8,4%), Turquia (6,3%), Indonésia (6,2%) e Índia (4,6%). No Brasil, a área cultivada com pimenta é de aproximadamente 5 mil hectares por ano, resultando em uma produção de 75 mil toneladas (PINTO e DONZELE, 2021).

A maior produção no Brasil está concentrada na região do Triângulo Mineiro (MG), que colheu cerca de 2.898 toneladas de frutos em 2019, seguida pelos estados de São Paulo, Goiás, Ceará e Rio Grande do Sul (FAOSTAT, 2019).

No Brasil, a espécie *Capsicum chinense* apresenta grande diversidade, com variedades como Pimenta de Cheiro, de Bode, Murupi, Cumari do Pará, Murupi, Biquinho e Habanero, sendo a última mais popular no México (ALVARES et al., 2012).

A pimenta biquinho tem significativa importância socioeconômica, fomentando a agricultura familiar no Brasil. Conforme Ribeiro et al. (2016), essa cultura tem uma relação estreita com a indústria agrícola, permitindo aos agricultores vendê-la *in natura* ou processada em produtos como pó de páprica, pimenta em flocos, pasta, geleia e conservas. As pimentas mais picantes do mundo, como *Carolina Reaper*, *Trinidad Scorpion* e *Bhut Jolokia*, também pertencem a essa espécie (*Capsicum chinense*) (PADILHA e BARBIERI, 2016).

As pimentas biquinho são conhecidas por seus frutos doces e aromáticos, com pouca ou nenhuma pungência. A pungência, responsável pelo ardor, deriva dos capsaicinóides, um grupo de alcaloides que inclui capsaicina e dihidrocapsaicina, compondo 90% dos capsaicinóides totais (SANATOMBI e SHARMA, 2008; NWOKE et al., 2010). As diferenças na pungência dos frutos resultam da combinação e concentração de capsaicinóides, variando desde os doces, como os pimentões e a pimenta biquinho, até os extremamente pungentes, como a pimenta malagueta (BOSLAND, 1993).

A pimenta biquinho possui um amplo mercado consumidor para uso ornamental, medicinal e culinário, tanto no Brasil quanto internacionalmente. Sua principal utilização é em conservas, devido ao sabor suave e à ausência de ardor (PINTO et al., 2021). No entanto, a alta perecibilidade dos frutos após a colheita apresenta um grande desafio. Pesquisas e tecnologias que minimizem as perdas são essenciais, como a retirada do extrato da pimenta biquinho, que proporciona conservação e disponibilidade de matéria-prima para produtos derivados, especialmente nos períodos de entressafra (BERNARDO et al., 2015).

3.1.1. Características agronômicas e qualidade da pimenta biquinho (*Capsicum chinense*)

A pimenta biquinho (*Capsicum chinense*) é uma variedade amplamente cultivada no Brasil, destacando-se pelo sabor adocicado, aroma característico e ausência de pungência atributos que favorecem sua aceitação tanto para consumo *in natura* quanto para processamento industrial (BATISTA et al., 2022; MARTÍNEZ et al., 2021).

As plantas apresentam porte baixo a médio, com hábito de crescimento ereto ou semi-ereto, caule ramificado e folhas ovadas de coloração verde intensa. As flores, geralmente pendentes, possuem corola esbranquiçada a esverdeada e anteras azuladas ou arroxeadas, características típicas do gênero *Capsicum* (BIANCHI et al., 2020; ANDRADE et al., 2020).

Os frutos são pequenos, de formato arredondado com o ápice em forma de “biquinho”, e variam do verde ao vermelho-alaranjado ao longo da maturação. No ponto ideal de colheita, quando adquirem tonalidade vermelho-alaranjada, apresentam maior tamanho, menor incidência de rachaduras e textura mais macia (BATISTA et al., 2022). Durante esse processo, a espessura do pericarpo aumenta, influenciando diretamente a firmeza e a aceitação sensorial do produto (BATISTA et al., 2022; BIANCHI et al., 2020).

A produtividade da pimenta biquinho é fortemente dependente do manejo nutricional e das condições edafoclimáticas. O uso de biofertilizantes líquidos e resíduos orgânicos como esterco de galinha e conteúdo ruminal bovino tem se mostrado eficiente no aumento do crescimento e rendimento, embora doses excessivas possam provocar efeitos tóxicos às plantas (BARBOSA et al., 2024; PEREIRA et al., 2021; LABIGALINE et al., 2020).

Os principais componentes produtivos incluem o número de frutos por planta, o peso médio e o número de cachos, parâmetros relevantes para seleção genotípica (RAMJATTAN e UMAHARAN, 2022). A espécie também exibe elevada variabilidade genética, característica fundamental para programas de melhoramento voltados à resistência a estresses bióticos e abióticos (TRIPODI, 2024; PARISI et al., 2020; BIANCHI et al., 2020).

Do ponto de vista químico, a pimenta biquinho é rica em compostos fenólicos, antioxidantes, vitamina C e carotenoides, mas possui baixo teor de capsaicina substância responsável pela pungência o que a diferencia de outras variedades de *Capsicum chinense* (SANTOS et al., 2021; MARTÍNEZ et al., 2021). Sensorialmente, os frutos são crocantes, de sabor adocicado e aroma marcante, atributos valorizados pelo consumidor e pela indústria alimentícia (BATISTA et al., 2022; PEREIRA et al., 2021).

O desenvolvimento ótimo da cultura ocorre em temperaturas médias entre 21 e 30 °C, com boa tolerância até 35 °C, e umidade relativa entre 50 e 70 %, condições que favorecem a coloração e o teor de compostos bioativos (PEREIRA et al., 2021; MARTÍNEZ et al., 2021). A adoção de práticas sustentáveis, como adubação verde, cobertura do solo e uso de bioinsumos, contribui para maior produtividade e qualidade dos frutos (LABIGALINE et al., 2020; BARBOSA et al., 2024).

3.2. Fertirrigação

A fertirrigação é a prática de fertilização das culturas através da água de irrigação. É considerada o método mais eficiente de adubação, pois combina água e nutrientes, que, juntamente com a luz solar, são os fatores mais importantes para o desenvolvimento e a produção das culturas. Uma boa combinação desses fatores determina o rendimento e a qualidade das hortaliças (TRANI, 2011).

Os principais parâmetros a serem avaliados na qualidade da água para fertirrigação incluem aspectos físico-químicos e biológicos, que determinam sua adequação para o uso (ALMEIDA, 2010). Os atributos mais comumente analisados são

pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, e íons como sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloretos, sulfatos, carbonatos e bicarbonatos (ALMEIDA, 2010).

O uso racional de fertilizantes é outro ponto de destaque. A fertirrigação permite a aplicação precisa de nutrientes conforme as necessidades fisiológicas da planta, reduzindo o consumo de insumos e os custos de produção sem comprometer o rendimento (DELBAZ et al., 2023; ASHRAFI et al., 2020; YAN et al., 2021). Em alguns casos, é possível economizar entre 25 e 60% de fertilizantes quando são utilizadas doses otimizadas, como 75% da recomendada, sem redução significativa da produtividade (HADOLE et al., 2020). A integração com tecnologias inteligentes e sensores tem potencializado esses resultados, promovendo maior absorção de nutrientes, estímulo à atividade microbiana e manutenção da saúde do solo (XING e WANG, 2024; AATHITHYAN et al., 2025).

Apesar dos benefícios, a fertirrigação também apresenta desafios e limitações. O investimento inicial elevado, a necessidade de mão de obra qualificada e a manutenção constante do sistema são fatores que podem restringir sua adoção em pequenas propriedades (INCROCCI et al., 2017; CHTOUKI et al., 2024). Além disso, problemas como o entupimento de emissores, o acúmulo de sais e o manejo inadequado da água e dos fertilizantes podem comprometer a eficiência do sistema e a produtividade das culturas (PIBARS et al., 2022).

3.3. Cultivo sem solo com substrato de fibra de coco

O cultivo sem solo abrange todos os métodos de produção vegetal que utilizam um meio de crescimento distinto do solo natural ou, em alguns casos, nenhum meio físico, como ocorre na hidroponia. Esses métodos possuem classificações específicas. Nos sistemas abertos, a solução nutritiva aplicada às raízes é descartada após o uso, enquanto nos sistemas fechados o excedente é coletado, filtrado e reaproveitado, reduzindo perdas e impactos ambientais (RAVIV; LEITH, 2008).

O cultivo sem solo, também conhecido como *soilless system*, tem se consolidado como uma alternativa tecnológica e ambientalmente sustentável à agricultura convencional, destacando-se pela eficiência no uso de água e nutrientes (BULGARI et al., 2021; MIRANDA et al., 2014). Nesse contexto, a utilização da fibra de coco como substrato se consolidou como uma das principais estratégias, especialmente em regiões tropicais, devido à sua disponibilidade, baixo custo e excelente desempenho físico-químico (GOHARDOUST et al., 2020; ORTIZ-DELVASTO et al., 2022).

A fibra de coco apresenta propriedades desejáveis para o desenvolvimento vegetal, como alta capacidade de retenção de água, boa aeração, pH levemente ácido, elevada capacidade de troca catiônica (CTC) e resistência à compactação. Essas características favorecem o equilíbrio hídrico e nutricional das plantas cultivadas, reduzindo o estresse radicular e melhorando o crescimento vegetativo e produtivo. Além disso, por ser um subproduto da indústria do coco, trata-se de um recurso renovável e biodegradável, o que reforça seu potencial no contexto da agricultura sustentável (BULGARI et al., 2021; GOHARDOUST et al., 2020).

Diversos estudos têm avaliado a fibra de coco pura e suas misturas com outros materiais, como vermiculita, areia, casca de arroz, biochar, lã de ovelha, compostos de palmeira-dátil e resíduos orgânicos. Essas combinações visam otimizar o custo, a retenção de nutrientes e a longevidade do substrato, além de melhorar a estrutura física e a atividade microbiana (AYDI et al., 2023; MEJÍA et al., 2022; GUERRERO-GUERRERO et al., 2021; GARCÍA-LÓPEZ e CRUZ-ORTEGA, 2023). Substratos alternativos, quando corretamente formulados, podem substituir parcialmente a fibra de coco, mantendo desempenho semelhante ou superior em algumas culturas (AURDAL et al., 2022).

Os efeitos positivos da fibra de coco sobre o crescimento vegetal são amplamente relatados em culturas como morango, tomate, melão, pimentão, mirtilo e alface (AYDI et al., 2023; SILVA et al., 2021; SOUSA et al., 2023; OLIVEIRA et al., 2024). Nessas espécies, observa-se aumento no vigor vegetativo, na expansão foliar e na produtividade, com frutos de melhor qualidade comercial e maior concentração de compostos bioativos (BALAWEJDER et al., 2022; KUBOÑ et al., 2024). Em morangueiro, por exemplo, a utilização de fibra de coco pura ou combinada com casca de arroz ou tezontle promoveu melhor aeração e maior uniformidade de crescimento (MIRANDA et al., 2014; GUERRERO-GUERRERO et al., 2021). Já em tomate e melão, misturas com resíduos de palmeira-dátil apresentaram incrementos significativos de biomassa e produtividade em comparação ao solo tradicional (AYDI et al., 2023; MEJÍA et al., 2022).

Além de favorecer o crescimento, a fibra de coco também influencia positivamente a qualidade fisiológica e nutricional das plantas. Misturas com biochar, vermicomposto ou lã de ovelha mostraram potencial em aumentar a absorção de nutrientes, prolongar a vida útil do substrato e estimular a biossíntese de compostos antioxidantes e fenólicos (BALAWEJDER et al., 2022; KUBOÑ et al., 2024).

No entanto, o cultivo sem solo exige monitoramento constante das propriedades físicas e químicas do substrato. A salinização, o acúmulo de sais e a compactação progressiva podem comprometer a aeração e o desenvolvimento radicular, afetando o desempenho das plantas ao longo dos ciclos produtivos (GUERRA et al., 2018; GUERRERO-GUERRERO et al., 2021). Por isso, a adoção de manejos corretivos e o condicionamento dos substratos após cada ciclo são práticas recomendadas para manter a eficiência do sistema.

A tendência atual aponta para a busca de substratos alternativos produzidos a partir de resíduos locais, como compostos de madeira, palha e subprodutos agroindustriais, reduzindo custos e impactos ambientais (AYDI et al., 2023). Além disso, pesquisas têm explorado modificações estruturais da fibra de coco, como impregnação com isolantes ecológicos e adição de biocarvões, com o objetivo de aumentar sua durabilidade, reduzir perdas de nutrientes e melhorar a sustentabilidade geral do sistema (KUBOÑ et al., 2024; BALAWEJDER et al., 2022).

3.3. Fertilizantes de eficiência melhorada

Os fertilizantes desempenham um papel crucial na agricultura, pois são ricos em nutrientes essenciais que aumentam a produtividade das plantas. No entanto, a alta mobilidade dos íons no solo pode resultar na contaminação de recursos hídricos, como rios, lagos e aquíferos, devido aos processos de lixiviação e volatilização, que podem levar à perda significativa de fertilizantes (SHALEV et al., 2015; TIMILSENA et al., 2015; WICK, HEUMESSER e SCHMID, 2012).

A importância dos fertilizantes no setor agrícola está intrinsecamente ligada à necessidade de resolver o desequilíbrio entre a oferta e demanda global de alimentos, impulsionado pelo crescimento populacional, além de reduzir a pressão sobre os recursos naturais. No entanto, o uso excessivo e descontrolado desses materiais pode resultar em problemas ambientais, econômicos e energéticos significativos (ISHERWOOD, 2000; SERRANO et al., 2014).

Os FEM são materiais que combinam fertilizantes com substâncias de interesse, resultando em produtos finais com propriedades vantajosas (CHEN et al., 2017; TIMILSENA et al., 2015). Esses materiais protegem os nutrientes e reduzem suas perdas, proporcionando uma liberação mais gradual para as plantas, o que diminui as perdas por lixiviação e volatilização, além de reduzir a quantidade de fertilizante necessária e, conseqüentemente, os custos de produção. Esse contraste entre as perdas observadas em

fertilizantes sintéticos e o mecanismo de liberação lenta característico dos FEM é ilustrado na Figura 1.

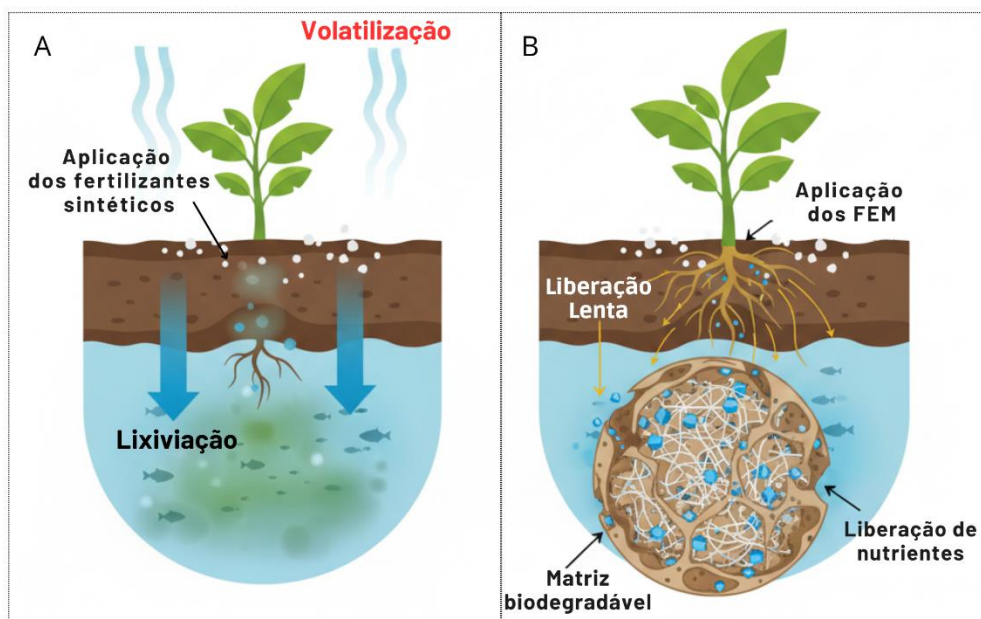


Figura 1. Representação esquemática comparativa entre a perda de nutrientes em fertilizantes sintéticos (A) e o mecanismo de liberação lenta em FEM (B).

Fonte: Adaptado de Timilsena et al. (2015).

A literatura descreve várias metodologias para produzir FEM, como revestimento, processamento mecânico e por fusão, secagem por pulverização e coacervação (FRANÇA et al, 2019; SANTOS et al., 2015). A composição desses materiais varia, incluindo fibras, argilas, materiais porosos, polímeros e combinações desses componentes (CALABI-FLOODY et al., 2018).

A eficácia dos FEM também depende do método utilizado para encapsular os nutrientes. Métodos como coacervação, revestimento, extrusão e secagem por pulverização são amplamente estudados e aplicados (TREINYTE et al., 2018; XIANG et al., 2018; FRANÇA et al., 2021).

A secagem por pulverização, por exemplo, é um processo em uma etapa para a produção de partículas em pó em larga escala, convertendo uma solução em partículas secas por meio da atomização em um *spray*, mistura com um fluxo de gás aquecido para evaporar o solvente e separação do pó seco do fluxo de gás (LIU et al., 2015). Essa técnica é fundamental para a microencapsulação de fertilizantes, atuando como uma barreira física que reduz a disponibilidade de nutrientes no solo.

Os polímeros são os materiais mais utilizados no desenvolvimento de FEM. Originalmente, compostos por polímeros sintéticos e não biodegradáveis, como

poliolefinas, poliuretano e acrílico (CALABI-FLOODY et al., 2018). Esses materiais evitam a perda de produtos químicos durante a irrigação e minimizam a poluição ambiental, controlando a liberação de nutrientes no solo (LU et al., 2016). A formulação dos fertilizantes frequentemente envolve grânulos revestidos com camadas de materiais biodegradáveis que são degradados gradualmente pela microflora do solo (LU et al., 2016).

Nos últimos anos, observa-se um avanço significativo na substituição desses polímeros sintéticos por biopolímeros de origem renovável, como o amido termoplástico (TPS) e a celulose nanofibrilada (CNF), que têm se destacado por sua biodegradabilidade e capacidade de controlar a liberação de nutrientes. O TPS, obtido pela plastificação do amido sob calor e cisalhamento, atua como uma matriz hidrofílica que permite a incorporação e liberação gradual de compostos como ureia e nitrato de potássio (GIROTO et al, 2019; DE SOUZA GAMARANO et al, 2022; LI et al, 2025).

Já a CNF, por sua alta área superficial e grupos hidroxila reativos, pode interagir com os nutrientes e reforçar mecanicamente a matriz polimérica, ajustando o perfil de liberação e aumentando a estabilidade das formulações frente à umidade e à degradação precoce (FRANÇA et al, 2021; FRANÇA et al, 2022; BIANCHI et al, 2023). Trabalhos recentes também demonstram que o uso combinado de TPS e CNF em compósitos híbridos resulta em materiais com boas propriedades mecânicas, alta taxa de biodegradação e liberação controlada de nutrientes, configurando uma das abordagens mais promissoras para o desenvolvimento de FEM sustentáveis (PETRUZ et al, 2024; CHIAREGATO et al, 2021; BOARINO et al, 2025; WITT et al, 2024).

A interação entre a matriz de TPS, a CNF e os nutrientes encapsulados pode ser visualizada na Figura 2, que apresenta um modelo representativo da estrutura de encapsulação de nutrientes e do mecanismo de liberação gradual em matrizes biodegradáveis.

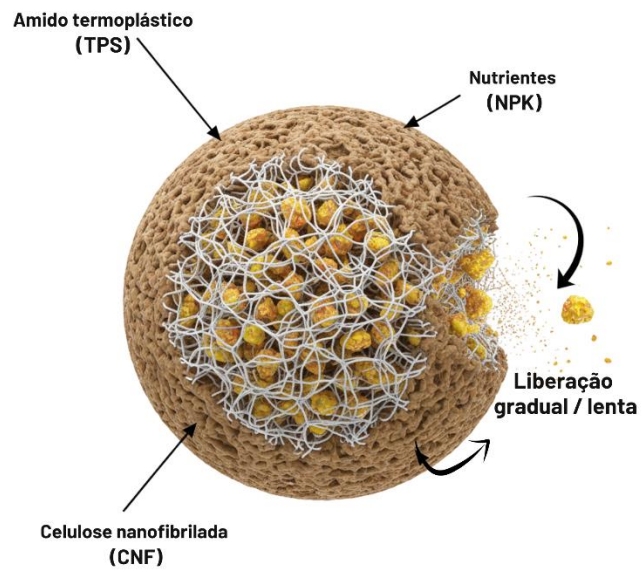


Figura 2. Modelo de encapsulação de nutrientes em matriz biodegradável de TPS e CNF.

Fonte: Adaptado de Petruz et al. (2024) e Boarino et al. (2025)

4 - MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em três etapas, a primeira consistiu no preparo de FEM utilizando fosfato monoamônico (MAP) e nitrato de potássio (KNO_3). Em seguida se avaliou a cinética de liberação de nutrientes em água.

Na segunda etapa, os fertilizantes foram incorporados ao substrato de cultivo, seguindo as recomendações nutricionais específicas para a pimenta Maria bonita (*Capsicum chinense*). Após a aplicação, foram realizadas análises de biometria das plantas, e testes de liberação dos nutrientes em substrato de fibra de coco, visando compreender o desempenho dos materiais desenvolvidos em condições reais de cultivo.

Por fim, na terceira etapa, foi conduzido o ensaio de biodegradação dos materiais poliméricos utilizados na formulação dos FEM. Esse ensaio teve como finalidade avaliar o tempo e o grau de degradação dos compósitos em ambiente simulado de substrato de fibra de coco, determinando sua estabilidade, a taxa de decomposição e o potencial de reintegração ao meio ambiente sem causar impactos negativos. Essa etapa foi essencial para verificar a sustentabilidade dos materiais e confirmar sua adequação como matriz biodegradável para sistemas de liberação lenta de nutrientes.

ETAPA 1 – Preparo dos FEM e liberação de nutrientes em água

4.1. Material

Os fertilizantes MAP e o KNO_3 foram utilizados, considerando suas características de solubilidade. A CNF, em dispersão aquosa de 2,8% em massa, foi utilizada como matriz para a formação das microesferas, sendo obtida por doação da Suzano Papel e Celulose S.A[®]. A água Milli-q Reference da Merck-Millipore Sigma Direct-Q³ foi empregada como solvente para o preparo das soluções, enquanto uma mistura de amido e glicerol, na proporção de 75:25, foi utilizada para a produção do amido termoplástico (TPS), que atuou como matriz para a incorporação das microesferas.

Os processos envolveram equipamentos como Mini *Spray dryer* - Buchi B-290, misturador interno Haake (*Thermo Scientific*) e dispersor/homogeneizador Turrax, fundamentais para a obtenção dos materiais.

4.2. Métodos

4.2.1. Preparo das microesferas

O processo de preparo das microesferas foi dividido em duas etapas: o preparo da solução e a secagem para obtenção das microesferas.

Para o preparo da solução, inicialmente foi medida uma quantidade correspondente a 1% da massa de CNF, considerando sua concentração de 2,8% (m/v), em relação ao volume desejado. Em seguida, a massa dos fertilizantes (MAP e KNO_3) foi medida com base em suas respectivas taxas de solubilidade: 27,6 g 100 mL⁻¹ para o MAP e 40,0 g 100 mL⁻¹ para o KNO_3 .

Após a pesagem, adicionou-se o volume necessário de água Milli-Q para completar o volume total da solução. A mistura foi mantida sob agitação mecânica contínua por 24 h (*overnight*) para garantir a completa dispersão dos componentes. Antes da secagem no *Spray dryer*, a solução foi homogeneizada no equipamento Turrax por 15 min a 12.000 rpm, assegurando sua uniformidade.

Com a solução devidamente preparada e homogeneizada, procedeu-se à secagem no Mini *Spray dryer* - Buchi B-290. Os parâmetros de secagem foram adaptados de acordo com França et al. (2021): temperatura de entrada de 180°C, aspirador ajustado a 100%, bomba externa regulada para 10 mL min⁻¹, fluxo de gás a 536 L h⁻¹ e fluxo de alimentação a 20%. Após a secagem, as microesferas de CNF- fertilizantes (Ms/ KNO_3 e Ms/MAP) foram coletadas do amostrador e armazenadas para as etapas subsequentes do processo (Figura 3).

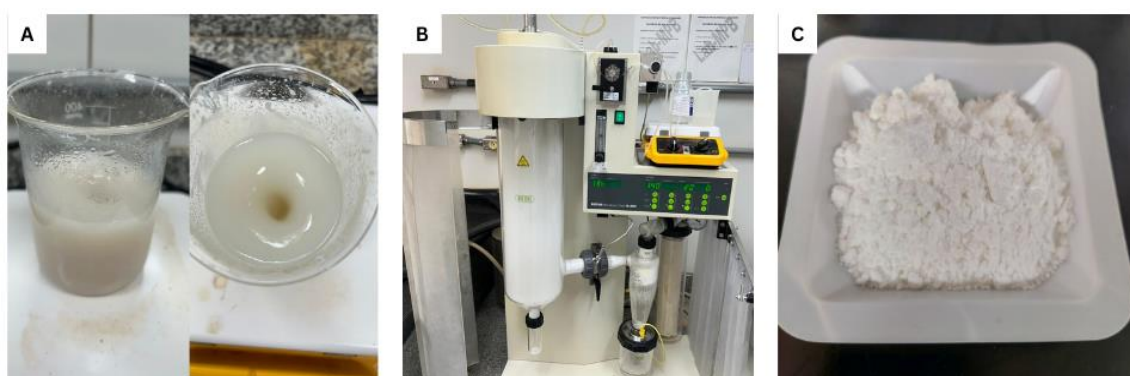


Figura 3. Imagem ilustrativa de preparo das microesferas. (A) Solução aquosa de fertilizante e CNF sob agitação em mesa agitadora. (B) Processo de secagem da solução no equipamento *Spray dryer*. (C) Microesferas prontas após a secagem.

4.2.2. Preparo do TPS e incorporação das microesferas

Para a obtenção do TPS, foi preparada uma mistura de amido e glicerol na proporção de 75:25. Essa mistura foi deixada em repouso por 24 h em um dessecador, permitindo a completa interação entre os componentes. Após esse período, o material foi processado em um misturador interno Haake a 90 °C, com rotação de 50 rpm, por 30 min. Ao final do processamento, o TPS foi retirado da câmara e armazenado para a etapa seguinte de incorporação das microesferas.

Na etapa de preparo dos FEM, foi realizada a incorporação das microesferas ao TPS. Para isso, foram pesados 24 g de cada componente, mantendo a proporção de 50:50. O processamento foi conduzido no misturador interno Haake a 110 °C, com rotação de 60 rpm, por 5 min para MAP e 10 min para KNO₃. Inicialmente, o TPS foi inserido no equipamento, seguido da adição gradual das microesferas. Após o tempo determinado, o material foi retirado da câmara e reduzido a pedaços menores, aproximando-se do formato de pellet, o que facilitou seu manuseio e o corte posterior com auxílio de uma tesoura, Figura 4. Os materiais produzidos são denominados de TPS/Ms/KNO₃ e TPS/Ms/MAP.

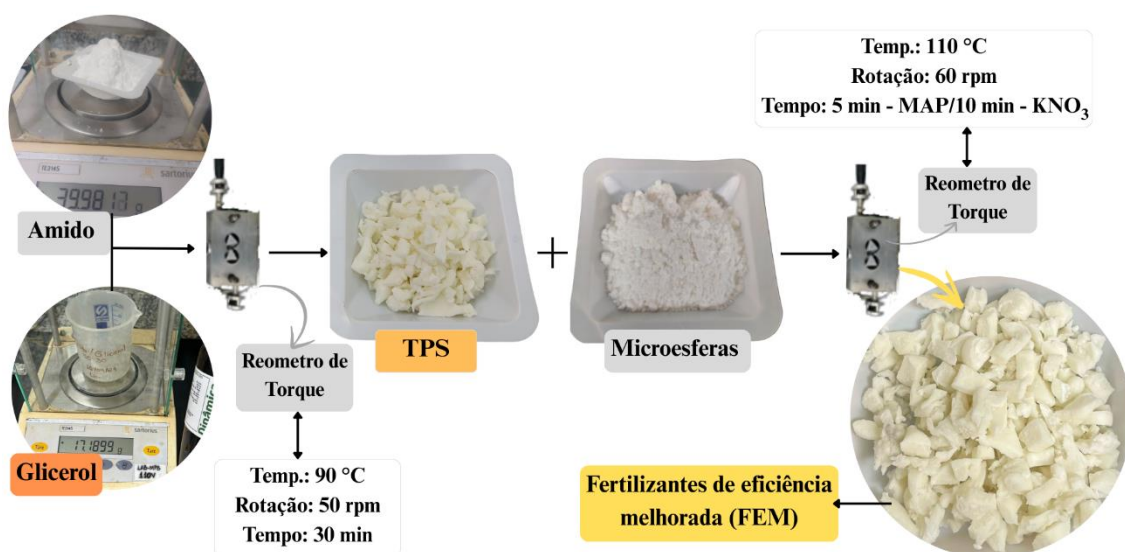


Figura 4. Esquema visual de obtenção do FEM.

4.2.3. Teste de liberação de nutrientes em água

A eficiência dos FEM foi avaliada pela cinética de liberação de nutrientes em meio aquoso. O protocolo experimental, previamente validado por França, De Barros e Faez (2021), baseou-se na adição de 0,5 g do FEM em 100 mL de água destilada (Figura 5). A liberação e disponibilidade dos nutrientes foram monitoradas em intervalos pré-definidos ao longo de quatro dias.

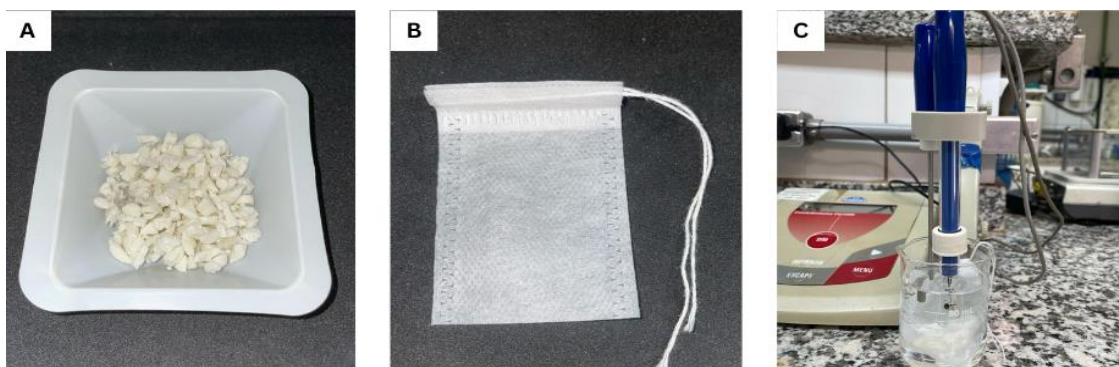


Figura 5. Componentes utilizados no estudo da liberação dos FEM. (A) FEM. (B) Saquinho permeável utilizado para conter o fertilizante. (C) Medida de condutividade iônica em condutivímetro.

ETAPA 2 – Desempenho agrônômico e liberação em substrato

4.3. Caracterização da área experimental

O experimento com a pimenta biquinho (*Capsicum chinense*) e FEM foi conduzido nas instalações da estufa agrícola pertencente ao Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental (DRNPA), situado no Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), campus de Araras, estado de São Paulo. A localização geográfica é definida pelas coordenadas 22°18'49'' de latitude Sul e 47°23'04,03'' de longitude Oeste, conforme detalhado na Figura 6.

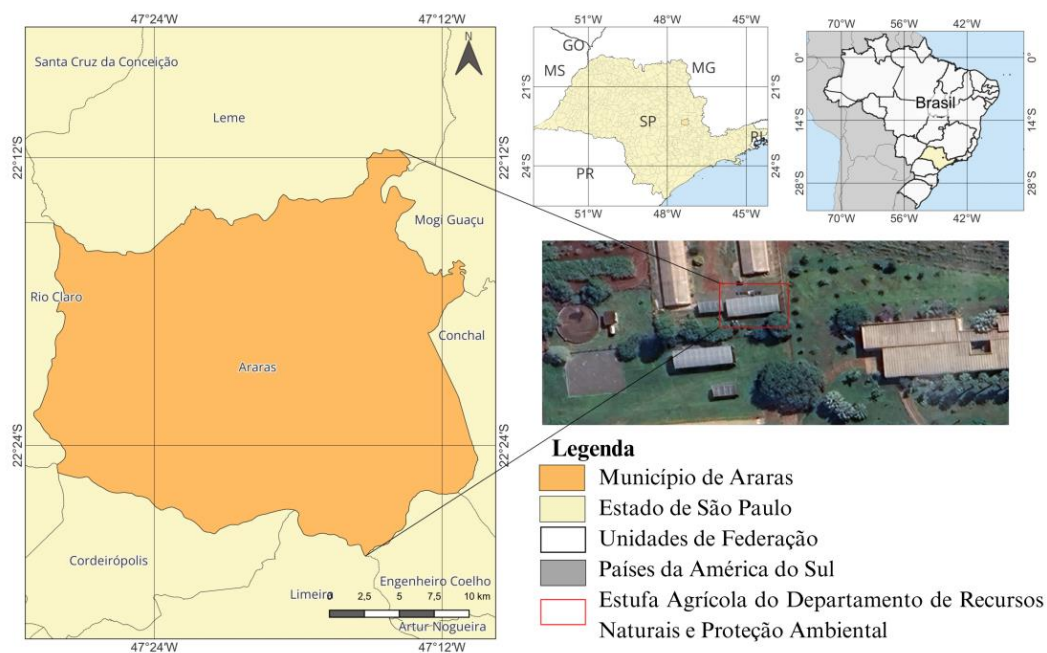


Figura 6. Localização e características da área de estudo.

O ambiente edafoclimático da região de estudo, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, corresponde ao tipo Subtropical Úmido ('Cfa' ou 'Cwa'), característico de áreas com verão quente e chuvas bem distribuídas. Este regime climático, é marcado por uma estação seca entre abril e setembro e outra chuvosa de outubro a março (Medeiros et al., 2021). Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023), a temperatura média anual da região é de 21,3 °C, enquanto a precipitação média anual corresponde a 1.575 mm.

4.3.1. Estrutura do sistema de cultivo sem solo em vasos

O experimento foi conduzido em uma estufa agrícola com estrutura de aço galvanizado, com dimensões de 6,4 m de largura, 18 m de comprimento e 3,4 m de pé-direito, no período de 16 de dezembro de 2024 a 18 de março de 2025. As laterais da estufa eram fechadas com tela do tipo sombrite, enquanto o teto era composto por polietileno transparente.

O sistema de cultivo adotado foi o sem solo, utilizando vasos com fibra de coco como substrato. A Figura 7 apresenta a estrutura da estufa, o preparo da fibra de coco e a organização dos vasos conforme o delineamento experimental. Os tratamentos avaliados foram:

- Fertirrigação (FERT): aplicação de nutrientes via irrigação;
- PAT: aplicação integral do FEM no transplantio da muda;
- PAD: aplicação fracionada do FEM, sendo a primeira no transplantio da muda e a segunda aos 45 dias.

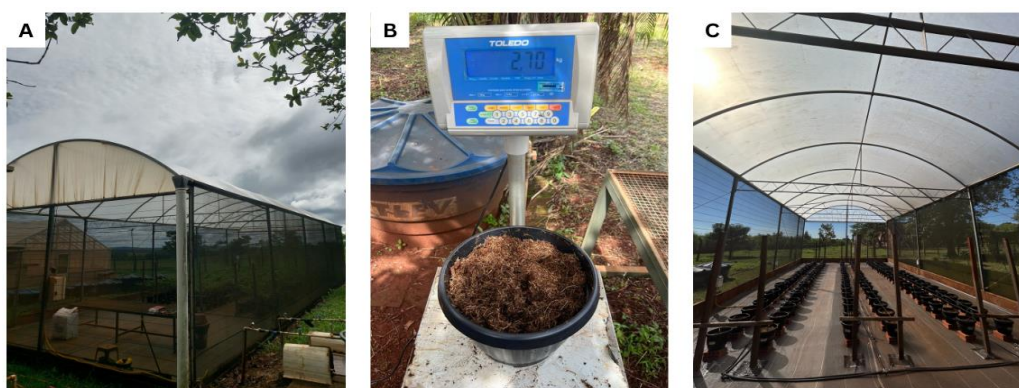


Figura 7. Estrutura e preparo do experimento. (A) Estufa agrícola utilizada para a condução do experimento. (B) Preenchimento e pesagem da fibra de coco umedecida antes do plantio. (C) Disposição dos vasos dentro da estufa, organizados conforme o delineamento experimental.

O dimensionamento interno do experimento foi composto por três fileiras duplas de plantas, divididas em 12 blocos, sendo cada fileira dupla composta por duas fileiras simples e quatro blocos. Cada fileira dupla continha 12 parcelas, e cada parcela era formada por quatro vasos. O espaçamento entre plantas nas parcelas foi de 0,45 m, entre fileiras simples de 0,60 m e entre fileiras duplas de 1,15 m, conforme ilustrado na Figura 8.

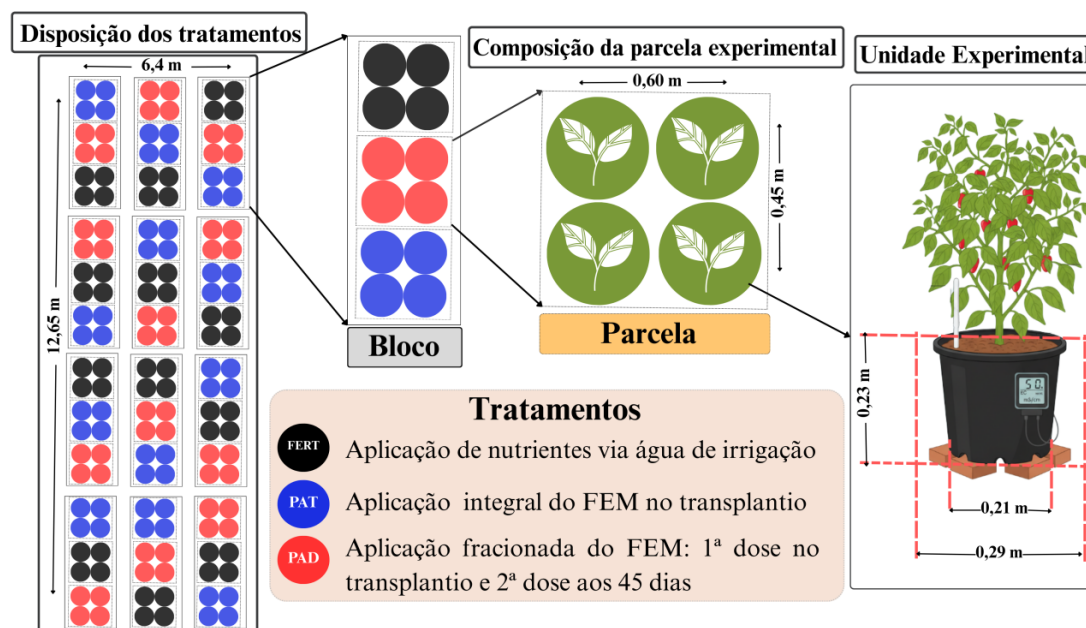


Figura 8. Ilustração do sistema de cultivo sem solo da pimenta Maria bonita.

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, com três tratamentos e 12 repetições (parcelas) para cada tratamento, totalizando 36 parcelas experimentais. O tamanho amostral foi de 12 vasos por bloco (12 blocos com 12 vasos cada, contendo uma muda de pimenta biquinho em cada vaso), resultando em 48 vasos por tratamento e um total de 144 unidades experimentais. As parcelas foram dispostas de maneira alternada.

Cada unidade experimental foi composta por um vaso de cor preta, com 0,22 m de altura, diâmetro inferior de 0,21 m, diâmetro superior de 0,24 m e capacidade para 8 litros.

4.3.2. Produção e Transplântio das Mudanças de Pimenta Biquinho

A variedade de pimenta Maria Bonita (*Capsicum chinense*) foi selecionada para o experimento. As mudas foram adquiridas diretamente da estufa do Grupo de Estudos em Horticultura (GEHORT), onde este híbrido ou variedade foi desenvolvido. As mudas foram germinadas em bandejas de polietileno com 120 células, contendo uma semente

por célula. O transplântio das mudas ocorreu em 16/12/2024, quando as plantas apresentavam cerca de 5 a 10 folhas definitivas e uma altura média de 15 cm, aproximadamente 50 a 60 dias após a semeadura.

O cultivo foi realizado em vasos plásticos de polietileno com capacidade de 8 L, preenchidos com 2,70 kg/m³ de substrato de fibra de coco (*Amafibra*®) previamente umedecido. Cada vaso recebeu uma muda centralmente posicionada.

Nos primeiros dois dias após o transplântio, foi fornecida apenas água via irrigação para favorecer o estabelecimento das mudas. Para os tratamentos PAD e PAT, a incorporação dos FEM ocorreu no terceiro dia, após esse período inicial de adaptação. Da mesma forma, para o tratamento FERT, a solução nutritiva foi disponibilizada dois dias após o transplântio, garantindo um fornecimento gradual dos nutrientes.

Na estufa, foi instalado um sistema de tutoramento para garantir o crescimento vertical das plantas. Para isso, fios de arame e fitilhos plásticos foram utilizados para sustentar as plantas e evitar o acamamento, enquanto peças de madeira foram fixadas a cada 2 metros ao longo das linhas para reforçar a estrutura.

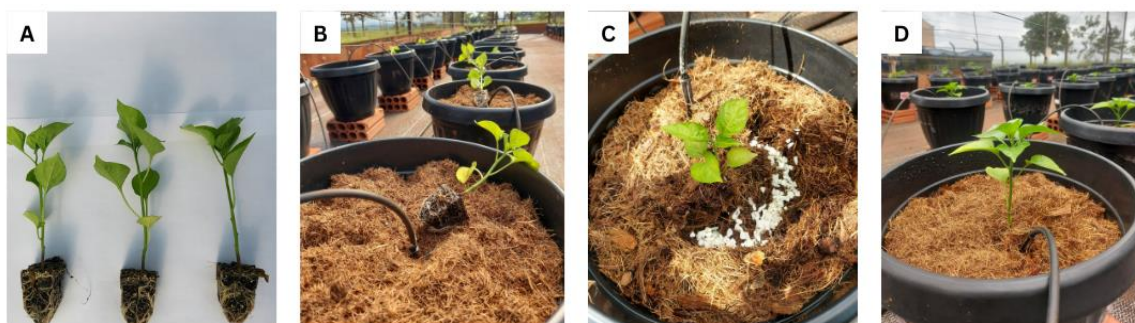


Figura 9. Esquema visual do transplântio das mudas e aplicação dos FEM no cultivo da pimenta Maria Bonita. (A) Mudas da pimenta biquinho variedade Maria Bonita em células da bandeja de polietileno; (B) Plantio das mudas no substrato de fibra de coco; (C) Incorporação dos FEM no substrato; (D) Colocação do gotejador sobre o local onde os FEM foram aplicados.

A desbrota manual das plantas foi realizada aos 22 e 33 dias após o transplântio, removendo as brotações abaixo da primeira bifurcação para favorecer o vigor das plantas. O monitoramento de pragas e doenças ocorreu por meio da observação e identificação dos sintomas dos agentes causais.

Quando necessário, foi adotado o controle químico para insetos-praga, como trips (*Frankliniella schultzei*, *Thrips palmi* e *T. tabaci*) e ácaro-branco

(*Polyphagotarsonemus latus*), utilizando os produtos Evidence® e Abamex®, conforme as recomendações do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

Durante o cultivo da pimenta biquinho em estufa agrícola, a polinização foi estimulada por vibração das plantas, sempre no período da manhã, logo após a abertura dos botões florais. Apesar de serem autógamas, ou seja, capazes de realizar autofecundação, a polinização induzida pode melhorar a produção, aumentando o peso dos frutos, prevenindo malformações e aprimorando suas características químicas.

Na família Solanaceae, a polinização por vibração é um processo comum, frequentemente realizado por agentes polinizadores, como abelhas.

4.3.3. Manejo da irrigação

O manejo hídrico e nutricional da cultura foi executado por meio de um sistema de fertirrigação por gotejamento, utilizando-se dois reservatórios de polietileno com capacidade individual de 350 L para o preparo e armazenamento da solução nutritiva. A formulação desta solução seguiu as recomendações de Furlani et al. (1999), detalhada na Tabela 1.

Tabela 1. Solução nutritiva para fertirrigação

Fertilizantes	Concentração (g 1000 L ⁻¹)
Nitrato de Cálcio (Ca(NO ₃) ₂)	500
Nitrato de Potássio (KNO ₃)	500
Sulfato de magnésio (MgSO ₄)	350
MAP (NH ₄ H ₂ PO ₄)	100
ConMicros	20

Fonte: adaptada de Furlani et al. (1999)

Para a distribuição da solução, empregaram-se linhas de gotejamento instaladas em duas disposições paralelas, alocadas no centro das linhas duplas de cultivo. O sistema utilizou tubos equipados com emissores autocompensantes da marca NaanDanJain by Rivulis, modelo ClickTif. As especificações técnicas destes gotejadores incluem um espaçamento de 0,90 m entre si, uma vazão de 4,0 L h⁻¹ e uma faixa operacional de pressão entre 1 e 4 bar.

A primeira linha de irrigação atendeu às parcelas tratadas com FEM (PAD e PAT) baseados em TPS/Ms/KNO₃ e TPS/Ms/MAP e aplicados diretamente no substrato, atendendo à recomendação nutritiva adaptada de Furlani et al. (1999). A dose total aplicada correspondeu a 18,87 g planta⁻¹ de KNO₃ e 3,75 g planta⁻¹ de MAP. No

tratamento PAD a aplicação foi parcela em duas etapas, correspondendo a metade da dose total em cada aplicação, enquanto no PAT a aplicação foi realizada em dose única no transplântio. Para complementar a recomendação nutricional da pimenta biquinho, fertilizantes adicionais, incluindo $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, MgSO_4 e ConMicros, foram fornecidos via fertirrigação por gotejamento, conforme as concentrações estabelecidas na solução nutritiva.

A segunda linha de irrigação foi destinada ao tratamento com fertirrigação, garantindo a distribuição uniforme dos nutrientes ao longo do ciclo da cultura. Cada emissor foi equipado com um conector que permitiu a distribuição de água em quatro saídas de 1 L h^{-1} . Dessa forma, cada parcela foi irrigada por um emissor que abasteceu quatro vasos simultaneamente. Cada tratamento contou com uma linha de irrigação própria, equipada com um cabeçal de controle ligado por válvula antivácuo, registro de esfera, filtro de disco e manômetro, permitindo o controle e monitoramento das condições operacionais do sistema. Esse conjunto foi integrado a um controlador digital Wi-Fi, responsável pela automação do manejo da irrigação.

O manejo da irrigação foi realizado com base no tempo de aplicação, programado no controlador digital. O tempo de aplicação foi ajustado ao longo do ciclo da cultura, de acordo com as necessidades hídricas das plantas em cada fase de desenvolvimento. Após a definição dos parâmetros, o sistema operava de forma automática, promovendo maior precisão, repetibilidade e padronização da irrigação. O acionamento do sistema ocorreu por meio de uma motobomba, responsável por inserir a solução nutritiva no sistema de irrigação, garantindo sua adequada distribuição aos emissores.

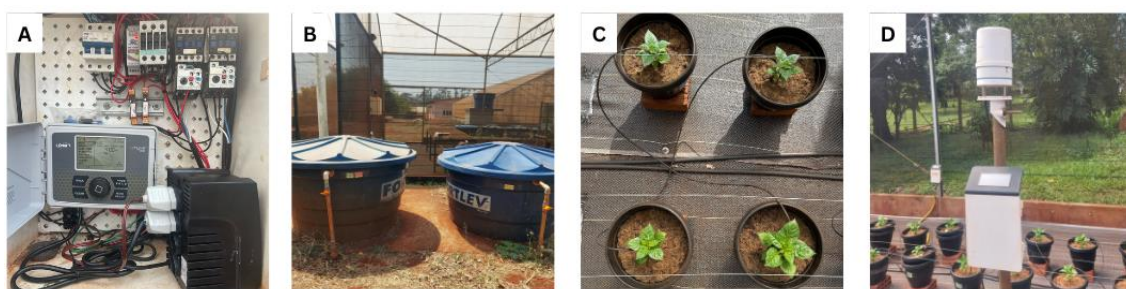


Figura 10. Componentes do sistema de irrigação e monitoramento ambiental. (A) Controlador digital Wi-Fi; (B) Reservatórios utilizados no sistema de irrigação; (C) Emissor acoplado a um conector, permitindo a distribuição da água por quatro saídas; (D) Estação meteorológica utilizada para monitoramento ambiental.

4.3.4. Avaliação da uniformidade do sistema de irrigação

A uniformidade de aplicação do sistema de irrigação foi avaliada preliminarmente ao início do experimento utilizando o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), conforme a metodologia de Cunha et al. (2014), para assegurar a distribuição homogênea da solução nutritiva na área experimental. O CUC é calculado pela Equação 1,

$$CUC = 100 \times \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}} \right\} \quad (1)$$

Em que:

n - número de gotejadores observados;

x_i - vazão de cada gotejador ($L h^{-1}$);

$\bar{x}$ - vazão média dos gotejadores ($L h^{-1}$).

4.3.5. Monitoramento da Condutividade Elétrica

Após o estabelecimento das mudas, instalou-se um sistema de monitoramento contínuo utilizando sondas de capacitância do tipo FDR (Frequency domain reflectometry), modelo TEROS 12 (METER Group Inc., USA), com um total de 12 sensores, sendo quatro por tratamento, para o acompanhamento da umidade, temperatura e CE do substrato (Figura 11B). Essas sondas operam com base nas propriedades dielétricas do meio, permitindo a estimativa indireta do teor de água no substrato a partir da constante dielétrica. Os dados de umidade foram cruciais para o manejo da irrigação, uma vez que possibilitaram a identificação do estado hídrico do substrato e a tomada de decisão quanto ao ajuste da lâmina de irrigação a ser aplicada. Com base nessas leituras, os tratamentos foram conduzidos de forma a manter a umidade próxima à capacidade de campo do substrato, equivalente a $0,26 m^3 m^{-3}$ (OLIVEIRA et al., 2018).

Adicionalmente, para garantir condições ideais ao desenvolvimento da pimenta Maria bonita, a CE foi monitorada de forma direta nos reservatórios, no substrato e na solução drenada dos tratamentos (Figura 11A, C). O monitoramento semanal da CE permitiu a correção de possíveis acúmulos de sais no substrato via lixiviação e o ajuste periódico das soluções nutritivas (total de 15 caixas de 350 L preparadas), mantendo-se a CE dentro da faixa recomendada de 1,2 a 2,0 $dS \cdot m^{-1}$ para a fase de crescimento da planta (OWEN et al., 2018; SHARMA et al., 2015).

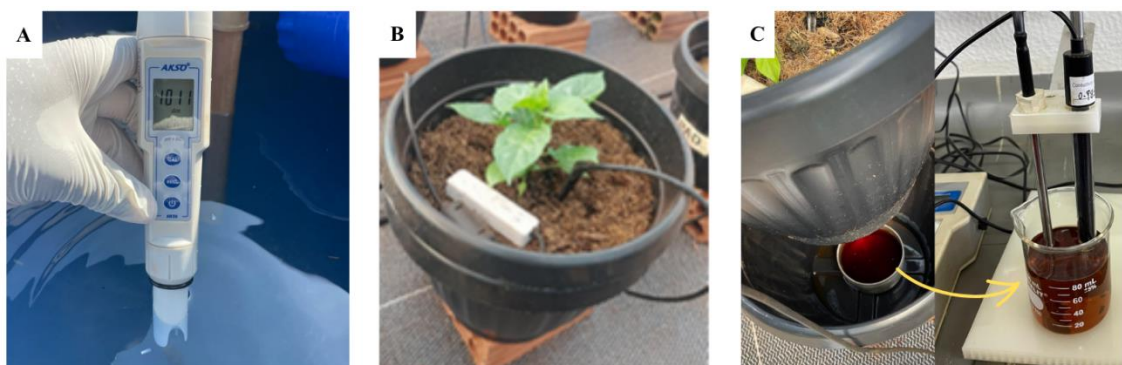


Figura 11. Instrumentação e monitoramento de parâmetros da solução e do substrato. (A) Medição da CE da solução nutritiva nas caixas de preparo; (B) Sonda de capacitância (Frequency Domain Reflectometry - FDR) instalada no perfil do substrato para monitoramento contínuo de umidade, CE e temperatura; e (C) Coleta e análise da solução de drenagem (lixiviado) para determinação da sua Condutividade Elétrica, empregando condutivímetro de bancada.

4.4. Avaliações biométricas da pimenta Maria Bonita

A colheita foi realizada ao final do ciclo, e os frutos obtidos foram destinados às análises das características físicas, conforme demonstrado na Figura 12. A produtividade e o crescimento vegetativo foram monitorados ao longo do desenvolvimento da cultura, com coletas aos 30, 60 e 90 dias após o plantio.

Ao término do experimento, realizaram-se avaliações agronômicas seguindo a metodologia descrita por Bione et al. (2021), incluindo a medição do diâmetro do caule, a contagem do número de frutos por planta, além do comprimento, diâmetro, massa, produtividade e índice relativo de clorofila Falker.

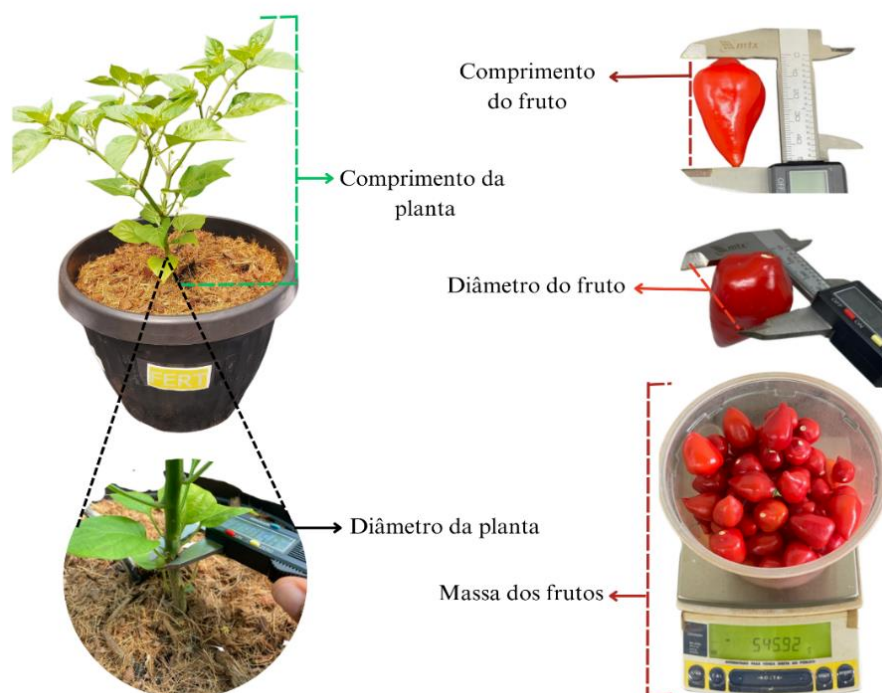


Figura 12. Esquema visual das análises biométricas da pimenta Maria Bonita

A altura das plantas foi determinada conforme os critérios estabelecidos pelo *International Plant Genetic Resources Institute* (IPGRI, 1995). Todas as análises e medições foram feitas em um total de 48 plantas por tratamento (FERT, PAT e PAD). Posteriormente, a média foi calculada para cada um dos 12 blocos experimentais.

4.4.1. Avaliação do Crescimento Vegetativo da Planta

O crescimento vegetativo da planta foi avaliado pela aferição do diâmetro do caule e da altura da planta. O diâmetro do caule foi medido com um paquímetro digital, posicionado perpendicularmente ao caule a 6,5 cm de altura do colo da planta (região de transição entre a base do caule e o sistema radicular), com resultados expressos em centímetros (cm). A altura da planta foi mensurada com o auxílio de uma trena milimetrada, posicionada verticalmente, medindo-se da base do colo até o ponto mais elevado da parte aérea, com resultados também expressos em cm.

4.4.2. Avaliação das Características e Produção de Frutos

A produção foi avaliada pela contagem e massa total de frutos, além da mensuração de suas dimensões. Os frutos colhidos foram contabilizados individualmente a cada coleta. A massa total de frutos por planta foi obtida pela pesagem de todos os frutos colhidos em balança analítica. Os resultados de contagem e massa foram expressos,

respectivamente, em frutos por planta e gramas por planta (g planta^{-1}), após divisão pelo número de plantas analisadas. As dimensões foram determinadas aferindo-se o diâmetro transversal máximo (na região central do fruto, com paquímetro) e o comprimento (distância da extremidade apical até a inserção do pedúnculo). As dimensões foram expressas em cm, e para cada parcela experimental, foi calculada a média de 12 frutos.

4.4.3. Produtividade

A produtividade das plantas foi determinada após a colheita por meio da mensuração da massa total de frutos por planta (g), convertida posteriormente para toneladas por hectare (t ha^{-1}) para viabilizar a comparação com referências da literatura agrônômica. A área útil de cada vaso foi calculada a partir do diâmetro de 0,29 m, correspondendo a $0,066 \text{ m}^2$ por planta, e a produtividade por hectare foi obtida dividindo-se a massa total de frutos pela área correspondente.

4.5. Análise química do tecido vegetal da pimenta Maria Bonita

As determinações da matéria seca do tecido vegetal da pimenta Maria Bonita foram realizadas a partir de material coletado sempre no mesmo horário pela manhã, minimizando as variações diurnas nos parâmetros avaliados. O material consistiu de 2 folhas coletadas aleatoriamente de 144 plantas, totalizando 48 plantas por tratamento.

Após a coleta, conforme ilustrado na Figura 13, as folhas foram encaminhadas ao laboratório, onde foram submetidas à secagem em estufa com circulação de ar a 60°C por 48 horas, até atingirem massa constante.



Figura 13. Imagem ilustrativa de coleta e secagem de folhas para análise do tecido foliar. (A) Corte das folhas com tesoura desinfetada em cada unidade experimental. (B) Folhas

cortadas, sendo duas por planta, dispostas para posterior secagem. (C) Estufa utilizada para a secagem das folhas.

A determinação da massa seca das folhas foi realizada aos 30, 60 e 90 dias após o transplântio. Esse procedimento permitiu avaliar as variações na matéria seca ao longo do ciclo da cultura, possibilitando o monitoramento da marcha de aquisição de nutrientes nos diferentes tratamentos durante o período de maior desenvolvimento das plantas.

Após a secagem, a massa seca das amostras foi determinada, e estas foram enviadas para análise química no Laboratório Pirasolos Ltda., em Piracicaba/SP. Foram quantificados os teores de macro e micronutrientes.

4.6. Índice de Clorofila Falker

As leituras dos teores de clorofila *a* e *b* foram realizadas mensalmente, de janeiro a março, com o objetivo de avaliar o estado fisiológico e nutricional das plantas. A medição do Índice de Clorofila, portanto, permite monitorar o impacto de tratamentos ou estresses ambientais sobre a fisiologia vegetal, além de ser um método rápido e não destrutivo para detectar deficiências nutricionais, como a de nitrogênio, que é um componente crucial da molécula de clorofila (ZHANG et al., 2020).

Para a medição, utilizou-se um clorofilômetro ClorofiLOG® modelo CFL 1030, da Falker Automação Agrícola. As leituras foram efetuadas em folhas maduras, sempre entre 10h e 12h, com o aparelho posicionado no centro do limbo foliar. O clorofilômetro opera com diodos emissores de luz que atravessam a folha e atingem um fotodiodo de silício. Este receptor converte a luz transmitida em sinais elétricos, fornecendo valores proporcionais à absorbância das clorofilas *a*, *b* e total (*a+b*). O aparelho utiliza emissores em três comprimentos de onda: dois na faixa do vermelho, próximos aos picos de absorção de cada tipo de clorofila ($\lambda=635$ e 660 nm), e um no infravermelho próximo ($\lambda=880$ nm). Os resultados são expressos em unidades adimensionais, representadas pelo Índice de Clorofila Falker (ICF) (FALKER, 2008).

4.7. Avaliação da Qualidade dos Frutos (Sólidos Solúveis)

Para a determinação do teor de sólidos solúveis (°Brix), foram utilizadas amostras de frutos de pimenta biquinho provenientes dos diferentes tratamentos nutricionais (FERT, PAT e PAD). A seleção dos frutos foi feita manualmente, considerando-se apenas

aqueles com coloração vermelha uniforme e aparência íntegra, a fim de garantir a padronização das análises (Figura 14A).

As amostras foram organizadas em grupos representativos de cada tratamento, sendo quatro frutos por repetição. Os frutos foram então triturados em um misturador tipo liquidificador. Em seguida, 10 g da polpa triturada foram transferidos para copos de vidro contendo 100 mL de água destilada. A mistura foi novamente homogeneizada no mesmo equipamento, de forma a garantir a completa solubilização dos sólidos solúveis (Figura 14B).

O suco obtido foi utilizado para a leitura do teor de °Brix. As leituras foram realizadas com um refratômetro digital de bancada da marca Milwaukee (modelo MA871), previamente calibrado com água destilada (Figura 14C). Para cada repetição, uma alíquota do suco foi colocada diretamente na lente do equipamento, e o valor em °Brix foi registrado. A temperatura de leitura foi controlada automaticamente pelo próprio equipamento (ATC), mantendo-se em torno de 21,9 °C.



Figura 14. Etapas da preparação e análise de amostras de pimenta biquinho para determinação de sólidos solúveis (°Brix): (A) separação dos frutos; (B) amostras homogeneizadas; (C) leitura em refratômetro digital.

ETAPA 3 – Biodegradação dos materiais poliméricos

4.8. Ensaio de biodegradação pelo método respirométrico

A análise de biodegradação foi conduzida conforme a NBR 14283 – Determinação da biodegradação pelo método respirométrico de Bartha (Figura 15). Os ensaios foram realizados em respirômetros de Bartha, mantidos em incubadora BOD (Tecnal TE-371) a 28 ± 2 °C. A fibra de coco utilizada como substrato foi inicialmente seca à temperatura ambiente por 24 h. Em seguida, 10 g da fibra de coco foram

adicionados aos respirômetros. Para ajustar a umidade para aproximadamente 60% da capacidade de campo, foram aplicados 20 mL de água destilada, revolvendo-se a fibra para garantir homogeneidade, e adicionou-se 0,2 g de FEM em cada respirômetro. As amostras foram preparadas em triplicata, juntamente com um controle sem material, permitindo a comparação da evolução respiratória microbiana. O ensaio foi conduzido por até 75 dias, ou até que a produção de CO₂ apresentasse estabilização (três medições consecutivas sem variação significativa). A liberação de CO₂ indicador da atividade microbiana e, portanto, da biodegradação foi quantificada por titulação ácido-base. Para cada leitura, a solução de KOH presente nos respirômetros foi transferida para um frasco contendo fenolftaleína e solução de BaCl₂ 0,1 mol L⁻¹, realizando-se a titulação com HCl 0,1 mol L⁻¹. Simultaneamente, efetuou-se uma titulação de controle contendo 10 mL de KOH 0,2 mol L⁻¹. Após cada titulação, 10 mL de nova solução de KOH 0,2 mol L⁻¹ foram repostos aos respirômetros, que retornaram imediatamente à incubação. Esse procedimento assegurou a absorção contínua do CO₂ produzido e a padronização das medições durante todo o período experimental.

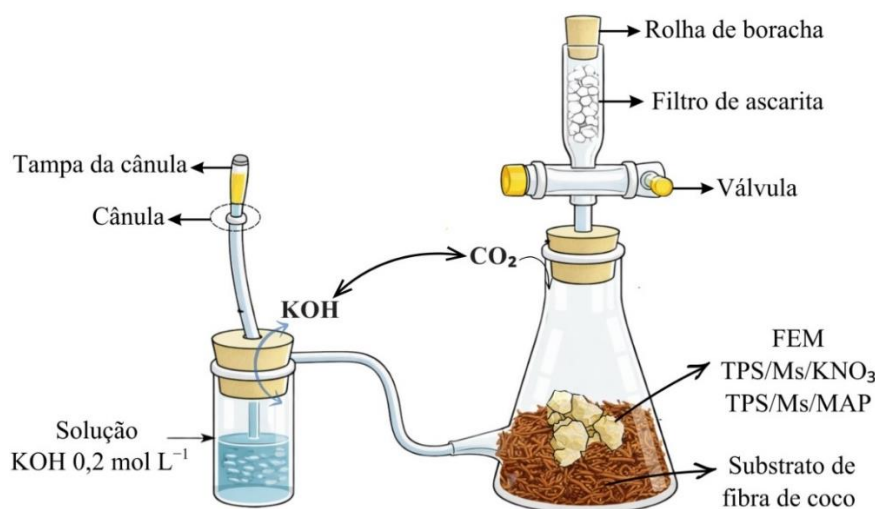


Figura 15. Sistema respirométrico de Bartha utilizado para ensaio da biodegradação.

4.9. Estatística e análise de dados

A análise estatística dos dados biométricos foi realizada no software R (R Core Team, 2021), onde os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, posteriormente, ao teste de *Tukey* para comparação das médias dos tratamentos. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de *Shapiro-Wilk*, adotando-se um nível de significância de 5% em todas as análises. Além disso, os parâmetros de condutividade

elétrica (CE) foram analisados e apresentados como médias semanais, com gráficos elaborados no software ORIGIN 6.0.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

ETAPA 1 – Preparo dos FEM e liberação de nutrientes em água

5.1. FEM - Liberação de Nutrientes em Água

A Figura 16 mostra o perfil de liberação dos íons em solução aquosa dos FEM ao longo de 96 h. Nos primeiros minutos após a imersão, os FEM passaram por um processo de intumescimento, seguido por uma liberação gradual dos nutrientes, evidenciada pelo aumento progressivo da condutividade iônica.

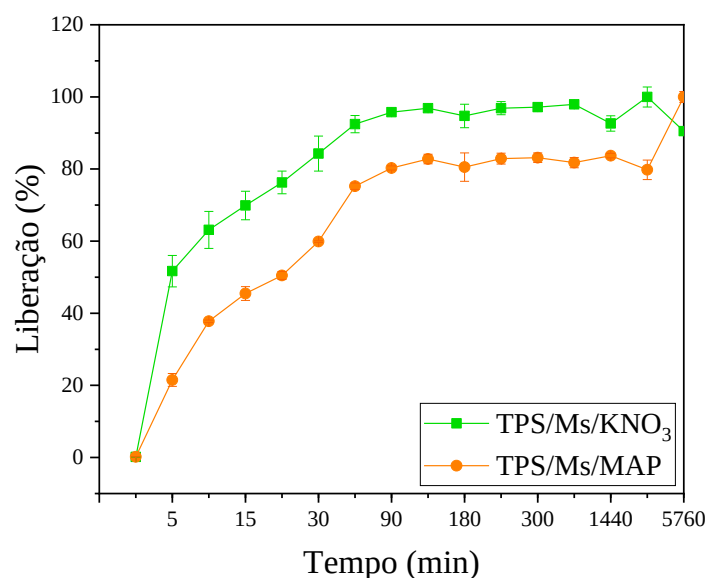


Figura 16. Perfil de liberação dos FEM em meio aquoso ao longo do tempo. A liberação dos nutrientes foi monitorada pela condutividade iônica.

Esse comportamento está diretamente relacionado à solubilidade dos sais utilizados na formulação, como KNO₃ e o MAP, os quais difundem através do material nas primeiras horas de exposição (FRANÇA et al., 2021). O TPS, empregado como matriz polimérica teve papel fundamental no controle da liberação, atuando inicialmente como uma barreira física capaz de retardar a dissolução imediata dos sais. Com o tempo, a absorção de água pela matriz levou à sua expansão, aumentando a permeabilidade e, consequentemente, promovendo uma liberação mais controlada e progressiva dos nutrientes (GIROTO, 2017).

A comparação entre os FEM (TPS/Ms/KNO₃ e TPS/Ms/MAP) evidencia dinâmicas de liberação distintas. O sistema contendo KNO₃ apresentou uma liberação mais acelerada, em apenas 30 min, o sistema já havia liberado aproximadamente 80% do

nutriente, atingindo um platô próximo a 97% em cerca de 180 min. Já o TPS/Ms/MAP demonstrou um comportamento mais gradual, em 30 min, a liberação foi de aproximadamente 60%, estabilizando em um patamar inferior, em torno de 80% após 180 min. Tal diferença pode ser atribuída às propriedades físico-químicas dos sais, bem como à sua interação com a matriz TPS.

De acordo com França et al. (2022), fertilizantes encapsulados com CNF associados ao TPS exibem diferentes padrões de liberação, influenciados pela estrutura da matriz e pela solubilidade do sal. O KNO_3 , por sua alta solubilidade em água (32 g/100 mL), tende a difundir-se rapidamente, sobretudo quando presente em matrizes menos densas ou mais porosas. Por outro lado, o MAP, apesar de solúvel (37 g/100 mL), possui maior propensão à formação de complexos e precipitados, principalmente em ambientes ácidos ou na presença de cargas poliméricas, o que retarda sua liberação. Esse fenômeno foi observado por Messa et al. (2020), que relataram interações entre o MAP e materiais poliméricos com cargas negativas, capazes de dificultar a difusão do fosfato para o meio externo.

Além da composição química, a estrutura física das micropartículas exerce forte influência na taxa de liberação. Como apontado por França et al. (2018), fatores como área superficial, espessura da parede e presença de canais porosos determinam a velocidade de penetração da água e, conseqüentemente, a liberação do nutriente. O sistema com KNO_3 , por exemplo, apresentou maior absorção de água e liberação rápida, caracterizando um padrão de liberação acelerada no início do processo.

Adicionalmente, estudos como de Qiao et al. (2016) demonstram que a interação entre a estrutura molecular do TPS e o tipo de sal encapsulado pode gerar barreiras mais densas à liberação, especialmente no caso do MAP, quando há baixa capacidade de inchamento da matriz.

Os valores mais elevados de porcentagem de liberação obtidos para o TPS/Ms/ KNO_3 reforçam essa diferença entre os sistemas, evidenciando maior disponibilidade inicial de nutrientes. Isso ressalta a importância do uso do TPS como modulador da taxa de liberação, permitindo maior controle sobre a disponibilização dos nutrientes no tempo (GIROTO, 2017). No entanto, a dinâmica em meio aquoso difere significativamente das condições reais de aplicação. Angelo et al. (2021) sugeriram que a liberação em uma hora em água equivale cerca de 20 dias em solo arenoso. Em sistemas de cultivo sem solo não há informações sobre a disponibilização dos nutrientes.

Entretanto, observou-se na avaliação em campo (Figura 18C) o efeito de rápida liberação inicial e, após, uma liberação mais gradativa.

ETAPA 2 – Desempenho agrônômico e liberação em substrato

5.2. Dados meteorológicos

De acordo com os dados obtidos pela estação meteorológica instalada na estrutura experimental da estufa agrícola, Figura 17, entre os meses de dezembro e março, a temperatura apresentou variações superiores aos limites recomendados para o cultivo da pimenta Maria Bonita (*Capsicum chinense*). Conforme indicado por Pinto et al. (2022), a faixa ideal para essa cultura varia entre 21°C e 30°C. No entanto, os registros mostraram oscilações entre 18,5°C e 35°C, ultrapassando, em diversos momentos, o limite superior recomendado, o que pode representar um fator limitante ao desenvolvimento da planta.

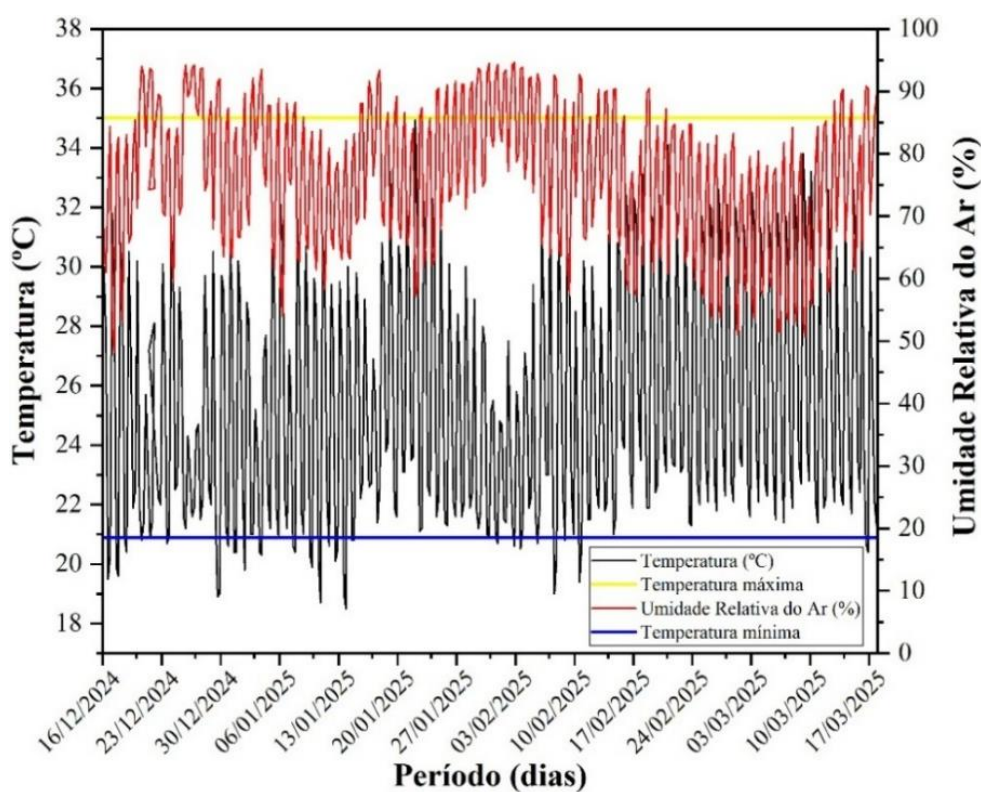


Figura 17. Dados da estação meteorológica do experimento.

Apesar dessas oscilações térmicas, não foram observados prejuízos expressivos no desenvolvimento vegetativo da cultura. Tal resultado pode estar associado a três fatores: o uso do substrato de fibra de coco, o manejo adequado da irrigação por gotejamento e a estabilidade da umidade relativa do ar dentro da estufa ao longo do ciclo.

A fibra de coco é um substrato amplamente utilizado em cultivos sem solo por apresentar excelente capacidade de retenção hídrica, boa porosidade e propriedades térmicas favoráveis. Charlo et al. (2009) evidenciaram que o cultivo de pimentão em fibra de coco, sob ambiente protegido, proporcionou elevado desempenho produtivo, mesmo em condições de temperaturas elevadas.

Além disso, os níveis de umidade relativa do ar se mantiveram relativamente estáveis durante o período analisado, o que pode ter atuado como fator atenuante do estresse térmico. Umidade elevada reduz a taxa de transpiração das plantas, contribuindo para a manutenção do balanço hídrico e da temperatura foliar. Sharma et al. (2015) ressaltam que o equilíbrio entre temperatura e umidade relativa é fundamental para o desempenho fisiológico de culturas como o *Capsicum chinense*, especialmente em ambientes controlados.

Ainda segundo Latournerie-Moreno et al. (2018), o desempenho agrônômico de diferentes genótipos de *Capsicum chinense* pode ser altamente sensível a variações ambientais, especialmente térmicas, sendo necessário o uso de estratégias de manejo que favoreçam a estabilidade das condições microclimáticas. Assim, o uso da fibra de coco como substrato, aliado à irrigação eficiente e à manutenção de uma umidade relativa estável, foi decisivo para a resiliência da cultura em ambiente protegido

5.3. Condutividade elétrica em campo

A Figura 18 ilustra o monitoramento da CE em diferentes pontos do sistema de cultivo sem solo da pimenta Maria Bonita, considerando os tratamentos nutricionais PAT, PAD e FERT.

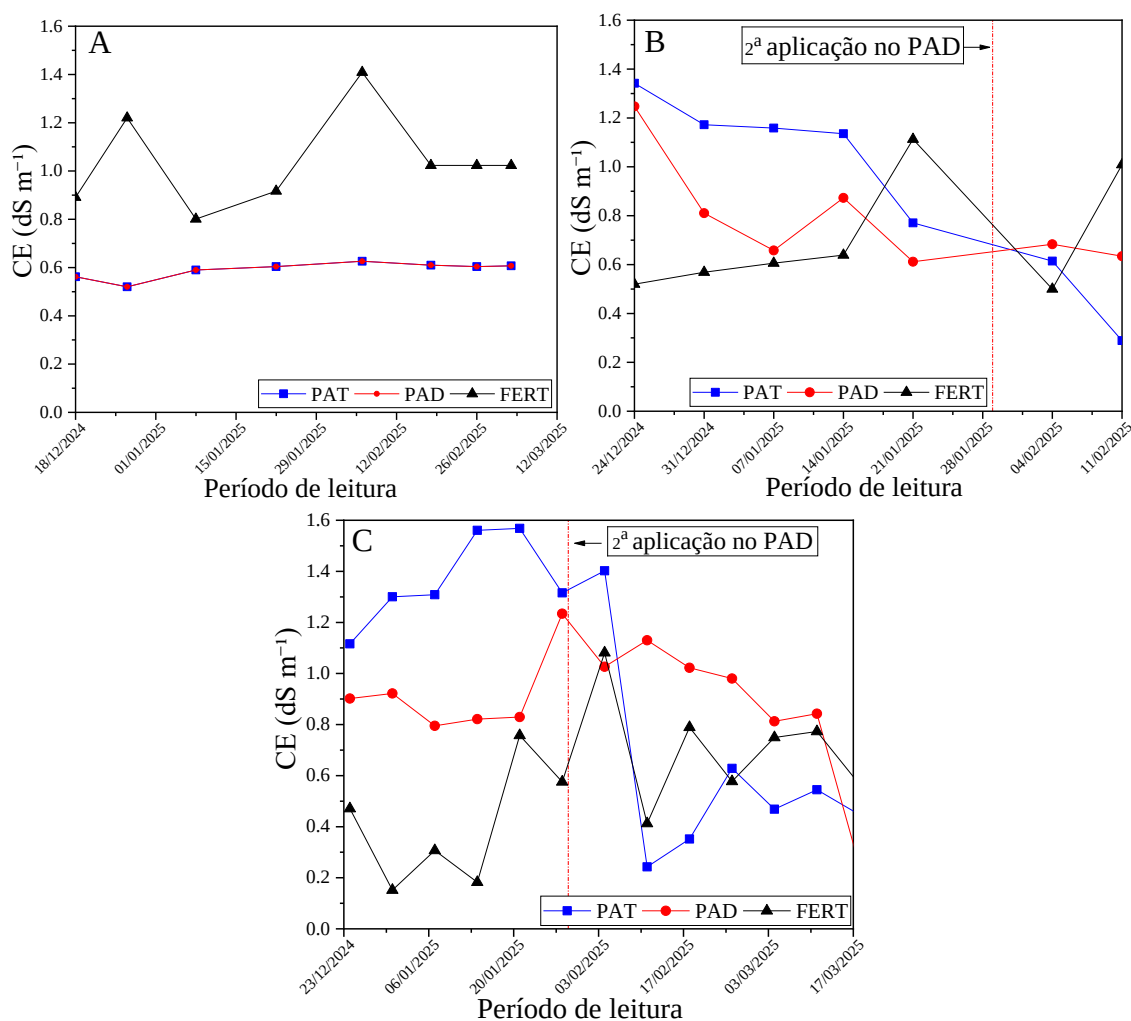


Figura 18. Monitoramento dos valores médios semanais de CE nas soluções nutritivas em sistema de cultivo sem solo: (A) valores de CE das soluções na entrada do sistema; (B) valores de CE na saída do sistema; (C) valores de CE ao longo dos perfis de cultivo.

A Figura 18A apresenta os valores de CE das soluções de entrada, representando a concentração de sais nutrientes fornecidas às plantas em cada tratamento. Observa-se que os tratamentos PAD e PAT mantiveram valores similares e relativamente estáveis, com CE entre 0,6 e 0,7 dS m⁻¹, enquanto o tratamento FERT apresentou valores superiores, próximos de 1,2 dS m⁻¹. Essa diferença sugere uma oferta inicial mais moderada de nutrientes nos tratamentos com FEM, o que pode contribuir para um fornecimento gradual e mais controlado, conforme proposto por El Bey et al. (2021), que destacam a capacidade dos FEM de modular o fornecimento de nutrientes ao longo do tempo. De forma geral, os valores observados nos três tratamentos ficaram abaixo da faixa considerada ideal por Bione et al. (2021), que recomendam uma CE de ~ 2,2 dS m⁻¹ para maximizar a produtividade da pimenta Biquinho cultivada em sistema hidropônico

com água salobra, atendendo às exigências da indústria por frutos íntegros e de qualidade padronizada.

A Figura 18B mostra os valores de CE na solução drenada e permite avaliar a eficiência da absorção de nutrientes pelas plantas. Nota-se que o tratamento PAT apresentou tendência de redução da CE ao longo do tempo, especialmente após os 35 dias, indicando diminuição na disponibilidade de nutrientes no sistema. Esse comportamento indica menor reposição de nutrientes ao longo do ciclo, o que pode resultar em limitação nutricional. Em contraste, o tratamento PAD apresentou aumento pontual da CE associado à segunda aplicação do FEM, seguido de estabilização dos valores, indicando maior equilíbrio entre a liberação e a absorção de nutrientes pelas plantas. Segundo Khan et al. (2018), a elevação da CE na solução drenada é um indicativo claro de acúmulo de sais e possível estresse salino, o que pode comprometer o desenvolvimento radicular e a absorção de nutrientes.

A Figura 18C reforça essas observações ao acompanhar a CE ao longo do tempo no perfil do substrato. O tratamento PAD apresentou valores mais estáveis e uma tendência de declínio após os picos iniciais, sugerindo maior eficiência na liberação e aproveitamento dos nutrientes. Por outro lado, o PAT manteve CE elevada por longos períodos, o que pode refletir acúmulo excessivo de sais no substrato. Como referência, o tratamento FERT apresentou flutuações mais abruptas, condizentes com seu manejo convencional via fertirrigação, em que os nutrientes são fornecidos diretamente e exigem controle frequente.

5.4. Parâmetros biométricos

5.4.1. Altura da planta e diâmetro do caule

De acordo com a Tabela 2, a análise das variáveis altura da planta e diâmetro do caule aos 30, 60 e 90 dias após o transplantio (DAT) evidencia o comportamento da pimenta Maria Bonita (*Capsicum chinense*) sob diferentes estratégias de manejo.

Tabela 2. Altura e diâmetro médio do caule das plantas de pimenta-biquinho Maria Bonita aos 30, 60 e 90 dias após o transplântio (DAT) sob diferentes estratégias de fertilização.

DAT	30		60		90	
Tratamento	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Diâmetro (cm)
FERT	33,29 a	0,62 a	45,27 a	0,47 a	48,19 a	0,55 a
PAT	31,72 a	0,56 b	40,80 b	0,42 a	42,06 b	0,43 a
PAD	26,04 b	0,51 c	39,94 b	0,42 a	41,97 b	0,47 a
P-valor	0,0000*	0,00003*	0,00005*	0,151019 _{ns}	0,00023*	0,06433 _{ns}
CV (%)	5,89	7,86	6,2	16,07	7,9	23,87

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

ns = não significativo; * = significativo a 5%; CV = coeficiente de variação. DAT – Dias após o transplântio.

O tratamento FERT proporcionou desenvolvimento vigoroso desde o início. Aos 30 DAT, este tratamento apresentou as maiores médias absolutas, não diferindo estatisticamente do PAT para a variável altura, mas superando PAT e PAD no diâmetro do caule. Esse desempenho indica que o fornecimento contínuo e adequado de nutrientes da fonte solúvel favoreceu o crescimento vegetativo inicial.

No mesmo período, o tratamento PAD apresentou os menores valores, diferindo estatisticamente dos demais em altura e diâmetro. Essa diferença pode ser atribuída à menor disponibilidade imediata de nutrientes na fase inicial do ciclo, etapa crítica para a formação estrutural da planta evidenciada pelas medições de CE (Figura 17C). Como indicado por Xiukang et al. (2019), a limitação nutricional precoce afeta negativamente a formação do caule e a eficiência fotossintética, o que justifica o desenvolvimento restrito observado inicialmente neste tratamento.

O tratamento PAT, por sua vez, resultou em diâmetro do caule intermediário aos 30 DAT (0,56 cm), superior ao PAD (0,51 cm), sugerindo que a presença de nutrientes prontamente disponíveis na mistura impactou positivamente os tecidos condutores e estruturais nessa fase inicial, evitando a deficiência de nitrogênio crítica nessa fase.

Com o avanço do ciclo, observou-se uma mudança na dinâmica. Aos 60 DAT, o tratamento PAD recuperou seu crescimento em altura, igualando-se estatisticamente ao PAT, embora ambos tenham permanecido inferiores ao FERT. Essa recuperação demonstra uma resposta positiva à segunda aplicação ou à liberação gradual dos nutrientes. Não houve diferença significativa em relação ao diâmetro do caule entre os

tratamentos, indicando que, apesar das diferenças iniciais, o espessamento do caule tendeu a se homogeneizar nesta fase.

As vantagens teóricas dos FEM, especialmente aqueles formulados com polímeros biodegradáveis, residem na capacidade de prolongar a liberação de nutrientes, reduzindo perdas por lixiviação, volatilização e imobilização (ZHANG et al., 2022; LIU et al., 2019). Liu et al. (2019), ao desenvolverem fertilizantes à base de poliuretano elástico bio-baseado, demonstraram uma liberação de nitrogênio com duração superior a 80 dias, oferecendo flexibilidade no manejo. No entanto, os autores também alertam para possíveis lacunas no fornecimento quando não há perfeita sincronização com as fases fenológicas, o que explica a superioridade do tratamento FERT em relação à altura das plantas.

Sintomas visuais de deficiência ou menor vigor, inferidos pelos menores valores biométricos no PAD inicial, reforçam a importância de ajustes no fracionamento, conforme observado por Liu et al. (2019). A necessidade de sincronização entre liberação e absorção é destacada por Saberi Riseh et al. (2023), apontando que a disponibilidade em fases-chave é determinante.

Aos 90 DAT, o tratamento FERT manteve a superioridade na altura das plantas (48,19 cm), diferindo significativamente do PAT e PAD, que permaneceram estatisticamente iguais entre si. Para o diâmetro do caule, embora o FERT tenha apresentado a maior média absoluta (0,55 cm), a análise estatística não indicou diferenças significativas ($p > 0,05$) nesta etapa final. Isso sugere que a limitação inicial observada no PAD afetou mais o alongamento vertical final do que o espessamento final do caule. Tais observações reforçam a importância de ajustar o fornecimento às exigências fenológicas, como argumentado por Wang et al. (2015), que demonstraram que a aplicação contínua e balanceada melhora a produtividade e a retenção de nutrientes, aspectos críticos para sistemas agrícolas.

A incorporação de biopolímeros à formulação dos FEM representa uma abordagem sustentável promissora. Qiao et al. (2016), ao utilizarem superabsorventes à base de amido para encapsular ureia, observaram maior eficiência de uso do nitrogênio e menor impacto ambiental. Esses resultados apontam para a viabilidade técnica e ecológica do uso de fertilizantes de liberação controlada, ainda que ajustes de manejo, como os testados no tratamento PAT, sejam necessários para otimizar o desempenho agrônômico frente à adubação convencional.

5.4.2. Variáveis biométricas: comprimento dos frutos e diâmetro dos frutos por planta

A Figura 19 ilustra *boxplots* que comparam FERT, PAT e PAD, sobre o comprimento (A) e o diâmetro (B) dos frutos da pimenta Maria Bonita.

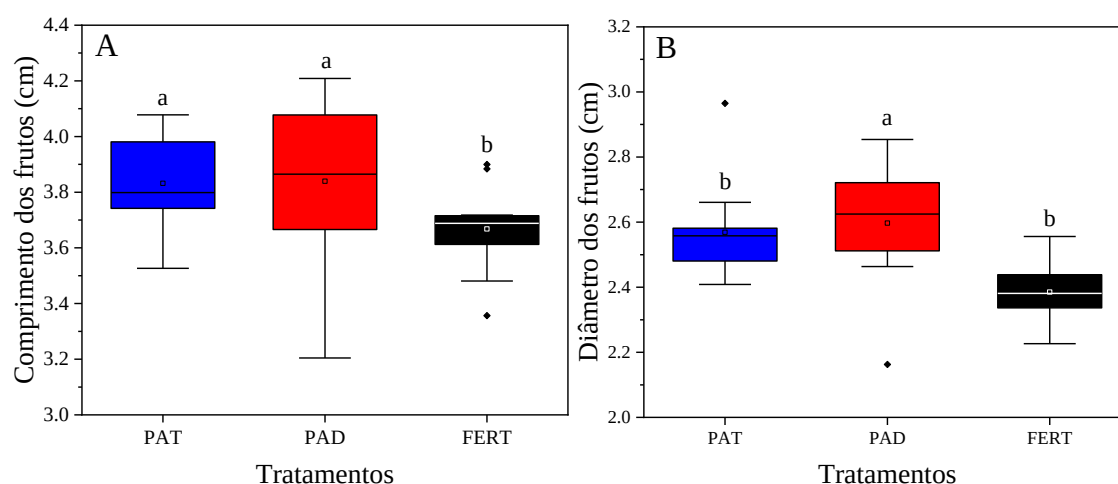


Figura 19. Variáveis biométricas: (A): Boxplot e teste de Tukey para o comprimento dos frutos; (B): Boxplot e teste de Tukey para o diâmetro dos frutos. As médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Em contraste com a fase vegetativa, onde o tratamento FERT induziu maior crescimento em altura, a análise das características morfológicas dos frutos revela uma compensação nutricional eficiente no tratamento PAD. Enquanto os maiores comprimentos de fruto foram estatisticamente semelhantes entre PAT (3,80 cm) e PAD (3,81 cm), o tratamento PAD destacou-se isoladamente ao proporcionar o maior diâmetro médio (2,84 cm).

Esses resultados indicam que o PAD proporcionou frutos mais desenvolvidos em termos de volume, com dimensões equilibradas, e estão de acordo com os achados de Lima et al. (2018), que ressaltam a influência do manejo hídrico e nutricional no desenvolvimento estrutural dos frutos de *Capsicum*. O desempenho superior do PAD no diâmetro e comprimento dos frutos está diretamente ligado à sua estratégia de aplicação fracionada. Essa técnica garantiu um suprimento contínuo e estável de nutrientes, promovendo uma sincronização eficaz entre a liberação do nutriente e a demanda fisiológica da planta na fase de enchimento, o que é essencial para o crescimento uniforme (ZHANG et al., 2023; GOVIL et al., 2024; NEGI, THAKUR e BHARDWAJ, 2022). A importância desse parcelamento é acentuada em cultivos com substratos de baixa capacidade tampão e alta porosidade, como a fibra de coco, que exigem maior precisão

na oferta de nutrientes ao longo do ciclo produtivo para assegurar essa nutrição estável (MACEDO et al., 2021).

Além disso, a dinâmica da umidade no substrato também exerce influência significativa na disponibilidade de nutrientes. A fibra de coco, apesar de boa retenção hídrica, possui drenagem acelerada, o que pode acentuar perdas quando os fertilizantes são aplicados de maneira única. Os dados de CE no perfil do substrato (Figura 18C) comprovam esta limitação e a eficácia da estratégia PAD. A aplicação dividida do PAD manteve a CE mais estável e sustentada durante a fase de enchimento, otimizando a eficiência do uso da água e dos nutrientes (Wang et al., 2021), favorecendo o desenvolvimento de frutos com maior calibre.

Por outro lado, a FERT, embora proporcione suprimento imediato de nutrientes via solução nutritiva, pode apresentar menor eficiência de absorção, sobretudo devido à maior suscetibilidade à lixiviação de elementos móveis como nitrogênio e potássio (CHEN et al., 2017; WANG et al., 2021).

5.4.3. Variáveis biométricas: número e massa dos frutos por planta

A Figura 20 mostram os resultados das variáveis biométricas. Verifica-se que os tratamentos com FEM apresentaram menores valores médios de número e massa de frutos por planta, além de maior dispersão entre as repetições. Os parâmetros biométricos revelou estratégias distintas de alocação de recursos pelas plantas em resposta à disponibilidade nutricional.

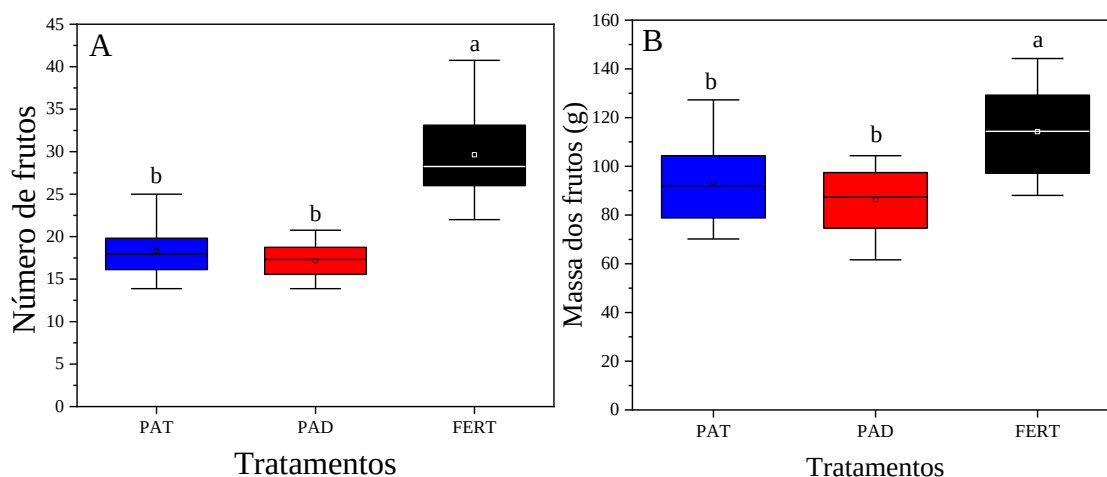


Figura 20. Variáveis biométricas: (A) Número de frutos por planta e (B) Massa de frutos por planta. As médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O tratamento FERT destacou-se significativamente com o maior número de frutos (30) e maior massa (114 g) acumulada por planta relacionado com o fornecimento contínuo e imediato de nutrientes, garantindo suporte para uma grande quantidade de frutos (ALBAHO et al., 2012). No entanto, essa alta quantidade gerou uma intensa disputa por energia e nutrientes, o que acabou limitando o crescimento individual de cada fruto, um efeito típico de quando a planta está muito carregada, descrito por Stoffella e Bryan (1988).

Em contrapartida, os tratamentos PAD e PAT apresentaram médias inferiores, com cerca de 17 a 18 frutos por planta e massa total entre 86 e 94 g. Essa redução na quantidade pode ser explicada pelos sintomas de deficiência nutricional observados aos 45 DAT, como a clorose (amarelecimento) nas folhas mais velhas (conforme ilustrado na figura 21). Esse estresse nutricional é evidenciado pela CE do substrato flutuante nos primeiros estágios da cultura, o que indica que a taxa de liberação do FEM foi momentaneamente incapaz de atender à demanda da planta. Conforme elucidado por Wubs et al. (2009), a falta momentânea de nutrientes como N, P e K altera os hormônios da planta e aumenta a produção de etileno, provocando a queda de flores e frutos jovens (SHAVIV, 2005; TRENKEL, 2010).



Figura 21. Sintomas de deficiência nutricional (Clorose) em plantas de pimenta biquinho dos tratamentos com FEM aos 45 DAT.

Contudo, apesar de produzirem menos em volume total, os PAT e PAD destacaram-se pela qualidade comercial, gerando frutos de tamanho superior. Isso ocorreu porque, com menos frutos na planta, houve menor competição por recursos, permitindo que a planta concentrasse sua energia no crescimento dos frutos que restaram. Os tratamentos com FEM consolidam-se como alternativas viáveis para mercados que

buscam frutos maiores e um sistema de produção mais sustentável (DE ALMEIDA et al., 2019).

5.4.4. Produtividade

As estratégias de fertilização influenciaram a produtividade final da pimenta biquinho. O tratamento FERT demonstrou superioridade estatística, alcançando a maior média produtiva $17,31 \text{ t ha}^{-1}$. Em contraste, os tratamentos PAT e PAD, não diferiram entre si, com médias inferiores ao controle, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Produtividade média de pimenta biquinho em função de diferentes tratamentos.

Tratamento	Produtividade média (t ha^{-1})
FERT	$17,31 \pm 2,90 \text{ a}$
PAT	$13,19 \pm 4,48 \text{ b}$
PAD	$13,08 \pm 2,00 \text{ b}$
CV (%)	20,66

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

A produtividade obtida pelo tratamento FERT aproximou-se de valores tipicamente reportados para o cultivo da pimenta biquinho em sistemas convencionais, entre 10 e 20 t ha^{-1} (DIEL et al., 2020). Este desempenho válido a eficiência do sistema experimental, demonstrando que o fornecimento contínuo e balanceado de nutrientes via solução nutritiva garantiu uma sincronização ideal entre oferta e demanda. Isso maximizou o crescimento vegetativo inicial e a capacidade fotossintética, conforme corroborado pelos maiores índices de clorofila observados na literatura para condições ideais (FILHO et al., 2021).

Em contrapartida, os tratamentos PAT e PAD, embora estatisticamente inferiores ao controle, atingiram rendimentos médios de $13,08$ a $13,19 \text{ t ha}^{-1}$. Este resultado situa o desempenho dos polímeros dentro da faixa de produtividade comercial de campo relatada por Diel et al. (2020), indicando que a matriz biodegradável de celulose e amido termoplástico é tecnicamente viável como veículo transportador de nutrientes.

A diferença no rendimento final em relação à FERT correlaciona-se à limitação no vigor vegetativo inicial nos tratamentos FEM, conforme indicado pelas análises biométricas. Essa limitação inicial está ligada a uma CE desbalanceada na solução do substrato nos estágios iniciais. Conforme visto na Figura 18C, a CE para os tratamentos FEM antes da 2ª aplicação apresenta pontos de baixa disponibilidade ou maior flutuação,

quando comparada ao FERT. Esse cenário reflete um desafio dos FEM, a ausência de uma liberação rápida inicial pode comprometer o desenvolvimento nos estágios fenológicos críticos de estabelecimento (LAWRENCIA et al., 2021).

Além disso, a estratégia de parcelamento da dose (PAD) não resultou em aumento significativo de produtividade em comparação à aplicação única (PAT). As análises foliares reforçam essa limitação ao indicarem deficiência de potássio nos tratamentos FEM. Visto que o potássio é vital para a translocação de açúcares e enchimento de frutos (BARBOSA et al., 2024), a baixa disponibilidade desse nutriente restringiu o potencial de rendimento da cultura, que pode superar 40 t ha⁻¹ em sistemas totalmente otimizados (BIONE et al., 2021).

5.5. Análise química do tecido vegetal da pimenta Maria Bonita

A Tabela 4 apresenta as concentrações foliares de NPK nos tratamentos FERT, PAD e PAT, em comparação com os níveis considerados adequados segundo o Boletim 100.

Tabela 4. Concentrações médias foliares de macronutrientes nos tratamentos FERT, PAD e PAT, comparadas com os níveis considerados apropriados conforme as recomendações do Boletim 100.

Tratamento	N (g/kg)	P (g/kg)	K (g/kg)
FERT	32,16	3,57	28,17
PAD	28,80	4,90	23,67
PAT	29,04	5,57	19,50
Boletim 100	30 – 45	3 – 6	30 – 50

Com base nos teores foliares observados, o tratamento FERT apresentou valores de N (32,16 g/kg) e P (3,57 g/kg) dentro da faixa adequada estabelecida pelo boletim, enquanto o K (28,17 g/kg) ficou levemente abaixo do limite inferior (30g/kg). A FERT permite a aplicação contínua e fracionada de nutrientes, o que favorece a sincronização entre oferta e demanda da planta e reduz perdas por lixiviação (SOUZA; SANTOS; PEREIRA, 2023).

Essa prática pode estimular o crescimento do sistema radicular e a absorção eficiente dos nutrientes, conforme apontado por Marschner (1986). Nos tratamentos com FEM, o PAD, que recebeu aplicação parcelada, apresentou teor de P dentro da faixa adequada (4,90 g/kg), e teores de N (28,80 g/kg) e K (23,67 g/kg) próximos dos limites inferiores. A liberação gradual de nutrientes característica dos FEM pode ter favorecido

a absorção de elementos de baixa mobilidade, como o P. O tratamento PAT apresentou o maior teor de P (5,57 g/kg), indicando boa liberação e disponibilidade deste nutriente. O N (29,04 g/kg) ficou próximo do limite inferior adequado e o K (19,50 g/kg) no tratamento PAT esteve abaixo da faixa de suficiência. Esse resultado é explicado pela alta mobilidade e solubilidade do K, que, no substrato de alta drenagem, foi lixiviado, comprometendo o suprimento nas fases posteriores do ciclo. Os dados de CE no perfil do substrato (Figura 18C) reforçam essa interpretação, onde o PAT exibe maior flutuação e quedas acentuadas da CE após a aplicação inicial, o que é um indicador direto da perda de íons móveis como o K.

Cunha et al. (2021) destacam que, mesmo em aplicações únicas, a eficiência dos FEM depende da compatibilidade entre a taxa de liberação do nutriente e as exigências da planta ao longo de seu desenvolvimento. Observa-se, portanto, que todos os tratamentos apresentaram vantagens específicas, a FERT demonstrou boa adequação para N e P, enquanto os tratamentos com FEM, especialmente o PAD, apresentaram desempenho satisfatório, principalmente no fornecimento de P.

5.6. Índice de clorofila Falker (ICF)

Com base nos valores médios do ICF, Tabela 5, observa-se que os tratamentos com FEM, especialmente o PAD, apresentaram desempenho inferior ao tratamento FERT em termos de acúmulo de pigmentos fotossintéticos. A análise de variância confirmou diferença significativa entre os tratamentos ($p < 0,05$) para ambos os pigmentos, com coeficientes de variação considerados baixos 3,1% para clorofila *a* e 7,75% para clorofila *b*, o que reforça a confiabilidade dos dados experimentais.

Tabela 5. Índice de clorofila *a* e *b*

Tratamentos	clorofila <i>a</i>	clorofila <i>b</i>
FERT	43,60 a	14,47 a
PAT	40,17 c	12,54 b
PAD	41,51 b	11,65 b
ANOVA		
CV(%)	3,1	7,75
Shapiro-Wilk		
P-valor	0,96	0,25

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

O tratamento PAD, obteve teores intermediários de clorofila *a* (41,51), superiores ao PAT (40,17), mas ainda inferiores ao FERT (43,60). No caso da clorofila *b*, o PAD

obteve os menores valores (11,65), em comparação com o PAT (12,54), evidenciando possível limitação na suplementação de nutrientes essenciais à síntese de clorofilas. Essa limitação no acúmulo total de pigmentos nos tratamentos FEM é a evidência quantitativa para os sintomas de deficiência observados em campo, como a clorose nas folhas mais velhas (Figura 21), sintoma que aponta para a carência de elementos como o N, essencial para a biossíntese da molécula de clorofila (EPSTEIN & BLOOM, 2006; MARSCHNER, 2012).

A causa desse déficit de pigmentos está intrinsecamente ligada à cinética de liberação dos FEM em um substrato de alta drenagem. Íons altamente móveis e solúveis como N e K podem ter sofrido um *burst release* inicial, seguido de rápida lixiviação para fora da zona radicular. Essa perda é corroborada pelos dados de CE do substrato (Figura 18C), que mostraram quedas acentuadas após a aplicação inicial do fertilizante. A consequência direta da perda desses íons essenciais nos estágios iniciais é o baixo ICF, que limita o aparato fotossintético e, consequentemente, o potencial produtivo.

A superioridade do PAD sobre o PAT para a clorofila *a* demonstra que o parcelamento da dose é uma estratégia de manejo eficaz para parcialmente mitigar a lixiviação de CE, garantindo um suprimento mais contínuo e, consequentemente, permitindo um maior acúmulo de pigmentos. Em contraste, a dose única (PAT), ao perder grande parte de seu conteúdo por lixiviação inicial, não conseguiu sustentar a demanda de N e K necessária para a fotossíntese ao longo do ciclo (FAGERIA; BALIGAR; JONES, 2010).

Martinez et al. (2021) relataram que cultivares de *Capsicum chinense* em condições otimizadas podem atingir valores de 23,38 para clorofila *a*. Nossos resultados, tanto para PAD quanto para PAT, superam amplamente este valor, reforçando que os FEM são tecnicamente viáveis.

5.7. Qualidade das pimentas

A variável Sólidos Solúveis °Brix é um importante indicador da qualidade sensorial e nutricional dos frutos de pimenta, refletindo o acúmulo de açúcares e outros compostos solúveis. Embora o K seja o principal elemento na translocação de açúcares (MARSCHNER, 1986), o baixo observado neste estudo 3,99 a 4,24 °Brix é resultado da inter-relação de múltiplos fatores limitantes. Apesar de o FERT ter apresentado o maior valor, é fundamental contextualizar que todos os tratamentos situaram-se abaixo do esperado para a espécie *Capsicum chinense*.

Martinez et al. (2021), ao avaliarem híbridos de *Capsicum chinense*, reportaram valores que se aproximam de 7,3 °Brix, indicando que o potencial genético da pimenta biquinho para o acúmulo de sólidos solúveis é significativamente superior aos resultados obtidos. Conforme a Tabela 6, as estratégias de manejo FERT (4,24 a) e PAT (4,22 ab) demonstraram o melhor desempenho, sendo o PAD (3,99 b) estatisticamente inferior a ambos. Este resultado reflete, primariamente, a limitação na matéria-prima fotossintética.

Tabela 6. Teste de Tukey a 5 % entre as médias do parâmetro qualitativo dos frutos de pimenta.

Tratamentos	Média de sólidos solúveis (°Brix)
FERT	4,24 a
PAT	4,22 ab
PAD	3,99 b
CV (%)	5,81
Shapiro-wilk	
P-valor	0,266

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

A dinâmica da água e a cinética de liberação de nutrientes também são cruciais. A diferença entre PAT e PAD é particularmente relevante para o K. O desempenho superior do PAT sugere que a dose concentrada de K inicial, apesar de ter levado à lixiviação e à queda de flores/frutos, garantiu um acúmulo de K residual mais eficaz na translocação de açúcares para os frutos remanescentes do que a liberação fracionada.

O PAD, que buscou sincronizar a liberação com a demanda, pode ter promovido uma baixa concentração de K no momento crítico de enchimento dos frutos, resultando em menor °Brix (LEAL et al., 2015). Adicionalmente, flutuações na disponibilidade hídrica e potencial de estresse salino no substrato, evidenciados pela CE flutuante, podem ter provocado o fechamento estomático e reduzido a taxa fotossintética, contribuindo para o baixo °Brix (RESENDE et al., 2010).

Em síntese, a variação de °Brix entre os FEM evidencia que, apesar do potencial agrônomo desses materiais (MESSA et al., 2016; CUNHA et al., 2021), sua eficácia está intrinsecamente ligada à sincronização da liberação de nutrientes (N e K) em substratos de alta drenagem. A performance superior do FERT reafirma que um fornecimento contínuo e eficiente potencializa a fotossíntese e o metabolismo de carboidratos, estabelecendo o desafio de otimizar o FEM para que sua cinética de liberação se alinhe às fases de maior exigência da cultura (SOUZA et al., 2023).

ETAPA 3 – Biodegradação dos materiais poliméricos

5.8. Biodegradação dos FEM em substrato de fibra de coco

A dinâmica de mineralização dos FEM foi monitorada através da respirometria. Para uma compreensão aprofundada das interações entre o substrato de fibra de coco e os FEM, a análise distingue dois perfis complementares na Figura 22: a taxa de liberação diária (A) e a liberação acumulada de CO₂ (B).

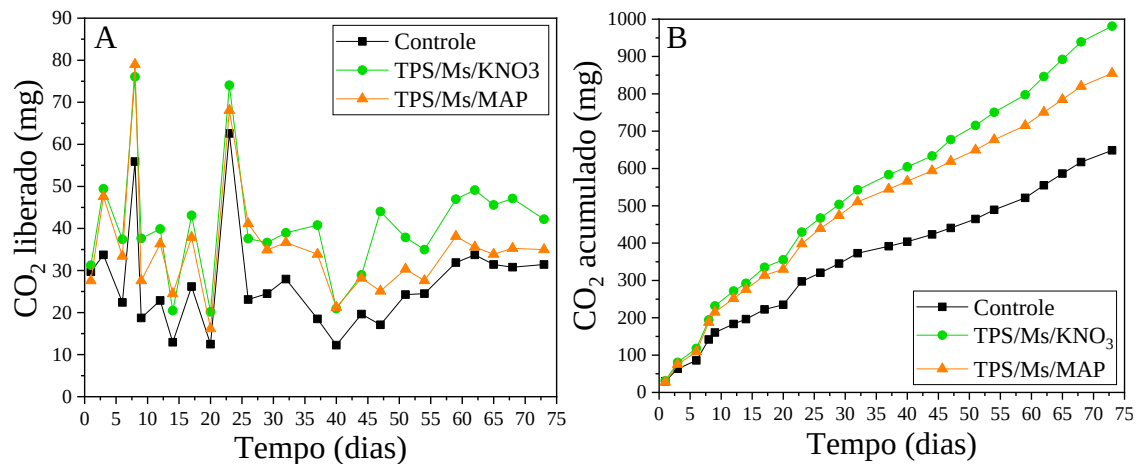


Figura 22. Perfil de liberação de CO₂ (mg) durante a biodegradação dos FEM em substrato de fibra de coco ao longo de 75 dias de incubação. (A) Liberação diária de CO₂ e (B) Liberação acumulada de CO₂

A Figura 22A revela oscilações acentuadas na respiração, concentradas especialmente nas fases iniciais. Esse perfil indica uma resposta metabólica imediata da microbiota à introdução do material. Tal comportamento confirma a alta disponibilidade do TPS como fonte de carbono de decomposição fácil. Conforme detalhado por Santos et al. (2024) e Nasution et al. (2024), a presença de domínios ricos em amido na superfície do FEM favorece a adesão microbiana e a hidrólise enzimática, promovendo a rápida colonização do material.

Entretanto, a Figura 21B demonstra que a evolução contínua de CO₂ ao longo dos 75 dias de ensaio ocorreu de forma gradativa. Essa cinética de mineralização, que pode ser descrita como de dois estágios, caracterizada por um pico inicial de liberação seguido por uma taxa de decomposição mais lenta e prolongada sugere que a formulação dos FEM permite modular o ataque microbiano, garantindo a persistência do material por um período compatível com o ciclo da cultura.

É crucial destacar que o tratamento Controle (fibra de coco) também apresentou liberação de CO₂ (Figura 22), embora em menor magnitude. A fibra de coco, por ser um material orgânico, é composta majoritariamente por celulose, hemicelulose e lignina, e, portanto, é naturalmente biodegradável. A taxa menor do Controle reflete a complexidade estrutural e a resistência da lignina à decomposição microbiana em comparação com o amido e polímeros mais lábeis dos FEM.

A magnitude da atividade biológica oferece o mecanismo de ação para os resultados produtivos. A rápida degradação do amido, com alto CO₂ (Figura 22A), disponibilizou uma quantidade massiva de Carbono de decomposição fácil, desencadeando um intenso estímulo à atividade microbiana (Kuzyakov, 2010). Como polímeros à base de amido promovem intensa imobilização temporária de N (Török et al., 2000; Cao et al., 2021), os microrganismos absorveram o N disponível no FEM para processar essa carga de carbono. Isso justifica a restrição no crescimento vegetativo inicial observada na cultura (deficiência de N).

O momento da liberação do nutriente foi fundamental. A remineralização do nitrogênio imobilizado na biomassa microbiana ocorre tipicamente entre 2 e 12 semanas (Maitlo et al., 2022; Jensen, 1997). Assim, com o declínio da população microbiana após o consumo do amido, o nitrogênio retornou à solução do solo justamente durante a fase reprodutiva (45 DAT). Essa oferta tardia sustentou o enchimento dos frutos nos tratamentos com FEM, conforme observado nos resultados de produtividade.

Dessa forma, a imobilização temporária de nitrogênio atuou duplamente: como um mecanismo biológico de retenção (Li et al., 2021) contra a lixiviação nas fases iniciais em substratos de alta drenagem, e como garantia de biodegradação completa do veículo transportador. O desenvolvimento deste fertilizante insere-se, portanto, no contexto global de redução de resíduos, onde FEM à base de TPS representam uma alternativa ecologicamente favorável para materiais de uso único (Surendren et al., 2022)

6 - CONCLUSÃO

O estudo atingiu o objetivo de avaliar a eficácia agronômica dos FEM no cultivo protegido da pimenta biquinho ‘Maria Bonita’, demonstrando que esses materiais apresentam desempenho agronômico competitivo em relação ao fertilizante convencional, especialmente sob a perspectiva da sustentabilidade.

Os FEM à base de polímeros biodegradáveis e fertilizantes sintéticos foram produzidos e apresentaram perfil de liberação de nutrientes compatível com sistemas de liberação controlada. A avaliação agronômica indicou que, embora o FERT tenha proporcionado maior produtividade total, os FEM promoveram desenvolvimento mais equilibrado das plantas. O PAD favoreceu maior volume dos frutos e melhor manutenção da disponibilidade nutricional ao longo do ciclo, enquanto o PAT apresentou redução na disponibilidade de nutrientes ao longo do tempo, refletindo menor reposição no sistema.

A biodegradação dos FEM evidenciou rápida mineralização inicial da matriz polimérica, com imobilização temporária de nitrogênio, seguida de remineralização após cerca de 45 dias, assegurando suprimento adequado do nutriente na fase reprodutiva. De forma integrada, os resultados confirmam que os FEM atuam como um mecanismo biológico de retenção de nutrientes, reduzindo perdas por lixiviação em substratos de alta drenagem e configurando-se como uma alternativa viável e sustentável para o cultivo protegido de pimenta ‘Maria Bonita’.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AATHITHYAN, C.; GURUSAMY, A.; SUBRAMANIAN, E.; HEMALATHA, G.; KUMUTHA, K.; BHAKIYATHU, B. Smart fertigation effects on groundnut (*Arachis hypogaea* L.) yield, nutrient uptake and soil health. **Plant Science Today**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.14719/pst.7007>.
- ALBAHO, M.; GHLOUM, D.; THOMAS, B.; ISATHALI, S.; GEORGE, P. Effect of two fertilizers on growth and yield of chili pepper and cherry tomato grown in a closed insulated pallet system. **Acta Horticulturae**, v. 927, p. 879–885, 2012. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.108>.
- ALMEIDA, O. A. de. *Qualidade da água de irrigação*. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2010.
- ALVARES, R. C.; REIS, E. F. dos; PINTO, J. F. N. Divergência genética em genótipos de pimenta do sudoeste goiano. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, n. 5, p. 498–506, 2012.
- ANGELO, L. M.; FRANÇA, D.; FAEZ, R. Biodegradation and viability of chitosan-based microencapsulated fertilizers. **Carbohydrate Polymers**, v. 257, e117635, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117635>.
- ARAÚJO FILHO, R. N.; FEITOSA, S. S.; CARVALHO, C. M.; FACCIOLI, G. G.; NUNES, T. P.; ARAÚJO FILHO, R. R. de; SILVA, S. L. da; RESENDE, R. S.; SANTOS, R. C.; FILHO, M. A. C.; NARANJO, J. B. Reaproveitamento de esgoto doméstico tratado para cultivo de pimenta biquinho. **Revista da Faculdade de Ciências Agrárias UNCuyo**, Mendoza, v. 53, n. 1, p. 159–170, 2021. DOI: <https://doi.org/10.48162/rev.39.017>.
- ASHRAFI, M.; RAJ, M.; SHAMIM, S.; LAL, K.; KUMAR, G. Effect of fertigation on crop productivity and nutrient use efficiency. **Journal of Pharmacognosy & Phytochemistry**, v. 9, n. 5, p. 2937–2942, 2020. DOI: [10.22271/chemi.2020.v8.i3m.9329](https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i3m.9329).
- AURDAL, S.; WOZNICKI, T.; HARALDSEN, T.; KUSNIEREK, K.; SØNSTEBY, A.; REMBERG, S. Wood fiber-based growing media for strawberry cultivation: effects of incorporation of peat and compost. **Horticulturae**, v. 9, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9010036>.
- AYDI, S.; AYDI, S.; MARSIT, A.; ABED, N.; RAHMANI, R.; BOUAJILA, J.; MERAH, O.; ABDELLEY, C. Optimizing alternative substrate for tomato production in arid zone: lesson from growth, water relations, chlorophyll fluorescence, and photosynthesis. **Plants**, v. 12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12071457>.
- AYDI, S.; AYDI, S.; RAHMANI, R.; BOUAZIZ, F.; SOUCHARD, J.; MERAH, O.; ABDELLEY, C. Date-palm compost as soilless substrate improves plant growth, photosynthesis, yield and phytochemical quality of greenhouse melon (*Cucumis melo* L.). **Agronomy**, v. 13, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13010212>.

BALAWAJDER, M. The modification of substrate in the soilless cultivation of raspberries (*Rubus idaeus* L.) as a factor stimulating the biosynthesis of selected bioactive compounds in fruits. **Molecules**, v. 28, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28010118>.

BARBOSA, L. S.; SANTOS, T. da S.; OLIVEIRA, L. de S.; ALCÂNTARA NETO, F. de; ARAÚJO, A. S. F. de; SOUZA, H. A. de; NUNES, L. A. P. L.; RODRIGUES, A. C.; SOUSA, R. da S. Morphophysiological and production characteristics of yellow pepper in response to bovine rumen residue and poultry litter in the soil are dose-dependent. **Journal of Plant Nutrition**, v. 47, n. 19, p. 2941–2955, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2369089>.

BARBOZA, G. E.; BIANCHETTI, L. de B.; STEHMANN, J. R. *Capsicum carassense* (Solanaceae), uma nova espécie da Mata Atlântica brasileira. **PhytoKeys**, v. 140, p. 125–138, 2020.

BATISTA, C.; SOLDATELI, F.; FEHNDRICH, S.; BITTENCOURT, M.; SILVA, L.; ETHUR, L. Maturation and determination of the harvest point of *Capsicum chinense* Jacq. ('biquinho' pepper). **Revista Brasileira de Ciências Agrárias – Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 17, n. 3, e161, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v17i3a161>.

BERNARDO, R.; SCHWAN-ESTRADA, K. R. F.; STANGARLIN, J. R.; OLIVEIRA, J. S. B.; CRUZ, M. E. S.; MESQUINI, R. M. Atividade fungitóxica in vitro de extratos vegetais sobre o crescimento micelial de fungos fitopatogênicos. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 14, n. 2, p. 89–93, 2015.

BIANCHI, P.; SILVA, L. da; ALENCAR, A. da S.; SANTOS, P.; PIMENTA, S.; SUDRÉ, C.; CORTE, L.; GONÇALVES, L.; RODRIGUES, R. Biomorphological characterization of Brazilian *Capsicum chinense* Jacq. germplasm. **Agronomy**, v. 10, n. 3, p. 447, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10030447>.

BIANCHI, S.; FRANÇA, D.; FAEZ, R. Anionic and cationic cellulose nanofibrils as a macronutrient-carrying vehicle. **Cellulose**, v. 31, p. 1053–1070, 2023. DOI: [10.1007/s10570-023-05662-2](https://doi.org/10.1007/s10570-023-05662-2).

BIONE, M. A. A.; COVA, A. M. W.; PAZ, V. P. S.; SANTOS, U. O.; RAFAEL, M. R. J.; MODESTO, F. J. N.; SOARES, T. M. Consumo e eficiência do uso da água da pimenta 'Biquinho' em cultivo hidropônico com água salobra. **Ciência Rural**, v. 53, n. 8, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220076>.

BIONE, M. A. A.; SOARES, T. M.; COVA, A. M.; PAZ, V. P. S.; GHEYI, H. R.; RAFAEL, M. R. S.; MODESTO, F. J. N.; SANTANA, J. da A.; NEVES, B. S. L. Hydroponic production of 'Biquinho' pepper with brackish water. **Agricultural Water Management**, v. 245, p. 106607, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106607>.

BJÖRN, L. O. *Photobiology: the science of life and light*. 2. ed. Springer, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-72655-7>.

BOARINO, A.; WENZEL, L.; CAVALLO, M.; FAEZ, R. Biodegradable polymers for plant nutrient delivery and recovery. **Macromolecular Bioscience**, v. 25, 2025. DOI: 10.1002/mabi.202500042.

BOSLAND, P. W. Breeding for quality in *Capsicum*. *Capsicum and Eggplant Newsletter*, p. 25–31, 1993.

BOSLAND, P. W.; VOTAVA, E. J. *Peppers: vegetables and spice Capsicum*. Wallingford: CAB International Publishing, 2000. 204 p.

BRYSEWSKI, K. Ł.; RODZIEWICZ, J.; MIELCAREK, A.; JANCZUKOWICZ, W.; JOZWIAKOWSKI, K. Investigation on the improved electrochemical and bio-electrochemical treatment processes of soilless cultivation drainage (SCD). **Science of the Total Environment**, v. 783, p. 146846, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146846>.

BULGARI, R.; NEGRI, M.; SANTORO, P.; FERRANTE, A. Quality evaluation of indoor-grown microgreens cultivated on three different substrates. **Horticulturae**, v. 7, p. 96, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae7050096>.

CALABI-FLOODY, M.; MEDINA, J.; RUMPEL, C.; CONDRON, L. M.; HERNANDEZ, M.; DUMONT, M.; DE LA LUZ MORA, M. Smart fertilizers as a strategy for sustainable agriculture. **Science of the Total Environment**, v. 613–614, p. 463–479, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.10.003>.

CAO, Y.; HE, Z.; ZHU, T.; ZHAO, F. Organic-C quality as a key driver of microbial nitrogen immobilization in soil: a meta-analysis. **Geoderma**, v. 383, p. 114784, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114784>.

CARRIZO GARCÍA, C.; BARFUSS, M. H.; SEHR, E. M.; BARBOZA, G. E.; SAMUEL, R.; MOSCONE, E. A.; EHRENDORFER, F. Relações filogenéticas, diversificação e expansão de pimenta malagueta (*Capsicum*, Solanaceae). **Anais de Botânica**, v. 118, n. 1, p. 35–51, 2016.

CHARLO, H. C. O.; CASTOLDI, R.; FERNANDES, C.; VARGAS, P. F.; BRAZ, L. T. Cultivo de híbridos de pimentão amarelo em fibra da casca de coco. **Horticultura Brasileira**, v. 27, n. 2, p. 155–159, 2009.

CHEN, J.; LÜ, S.; ZHANG, Z.; ZHAO, X.; LI, X.; NING, P.; LIU, M. Environmentally friendly fertilizers: a review of materials used and their effects on the environment. **Science of the Total Environment**, v. 613–614, p. 1657–1666, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.186>.

CHIAREGATO, C. G.; FAEZ, R. Micronutrients encapsulation by starch as an enhanced efficiency fertilizer. **Carbohydrate Polymers**, v. 271, p. 118419, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118419>.

CHTOUKI, M.; NACIRI, R.; OUKARROUM, A. A review on phosphorus drip fertigation in the Mediterranean region: fundamentals, current situation, challenges, and perspectives. **Heliyon**, v. 10, n. 3, e25543, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25543.

CUNHA, F. L.; NIERI, E. M.; SANTOS, J. A.; ALMEIDA, R. S.; MELO, L. A.; VENTURIN, N. Uso dos adubos de liberação lenta no setor florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 41, e201902063, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4336/2021.pfb.41e201902063>.

DE ALMEIDA, U. O.; ANDRADE NETO, R. C.; ARAUJO, J. M. de; COSTA, D. A.; TEIXEIRA JÚNIOR, D. L. Fertilizantes de liberação lenta na produção de mudas frutíferas. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, v. 6, n. 1, 2019.

DE SOUZA GAMARANO, D.; RAMALHO, R.; GODOY, L.; TESCARO, C.; FAEZ, R. Thermoplastic starch–urea, a feasible alternative to release nitrogen as fertilizer. **Macromolecular Symposia**, 2022. DOI: 10.1002/masy.202200043.

DELBAZ, R.; EBRAHIMIAN, H.; ABBASI, F.; GHAMESHLOU, A. N.; LIAGHAT, A.; RANAZADEH, D. A global meta-analysis on surface and drip fertigation for annual crops under different fertilization levels. **Agricultural Water Management**, v. 289, art. 108504, 2023. DOI: 10.1016/j.agwat.2023.108504.

DEWITT, D.; BOSLAND, P. W. *Peppers of the world: an identification guide*. 1996. 219 p.

DIEL, M. I.; LÚCIO, A. D.; VALERA, O. V. S.; SARI, B. G.; OLIVOTO, T.; PINHEIRO, M. V. M.; MELO, P. J. de; TARTAGLIA, F. de L.; SCHMIDT, D. Production of biquinho pepper in different growing seasons characterized by the logistic model and its critical points. **Ciência Rural**, v. 50, n. 9, e20190477, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190477>.

EL BEY, N.; AOUNALLAH, M. K.; CHAMMAM, M. R.; BETTAIEB, T. Effect of controlled-release fertilizers (CRF) on vegetative growth, nutritional status, fruit yield and quality of ‘Maltaise Ballerin’ orange trees. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 38, n. 4, p. 305–312, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40502-021-00622-z>.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. *Mineral nutrition of plants: principles and perspectives*. 2. ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates, 2004. 400 p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. *Growth and mineral nutrition of field crops*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1201/b10160>.

FALKER. Como o índice ICF é calculado? *Automação Agrícola*, 2011. Disponível em: <http://www.falker.com.br/base/article/AA-00299/41/Clorofila/clorofiLOG-CFL1030/Comoo-%C3%ADndice-ICF-%C3%A9-calculado.html>.

FRANÇA, D.; ANGELO, R.; SOUZA, C.; FAEZ, R. Charged-cellulose nanofibrils as a nutrient carrier in biodegradable polymers for enhanced efficiency fertilizers. *Carbohydrate Polymers*, v. 296, p. 119934, 2022. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119934.

FRANÇA, D.; DE BARROS, J. R. S.; FAEZ, R. Micropartículas de nanofibrilas de celulose secas por pulverização como veículo para fertilizantes de maior eficiência. **Cellulose**, v. 28, p. 1571–1585, 2021.

FURLANI, P. R.; BOLONHESI, L. C. P.; FANQUIN, V. *Cultivo hidropônico de plantas*. Campinas: Instituto Agrônômico, 1999. (Boletim Técnico, n. 180).

GARCÍA-LÓPEZ, D.; CRUZ-ORTEGA, R. Evaluation effects of alternative substrates for soilless cultivation of strawberry (*Fragaria × ananassa*). **Nexo Revista Científica**, v. 36, n. 6, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5377/nexo.v36i06.17439>.

GIROTO, A. S.; GUIMARÃES, G. G.; FOSCHINI, M.; RIBEIRO, C. Role of slow-release nanocomposite fertilizers on nitrogen and phosphate availability in soil. **Scientific Reports**, v. 7, art. 46032, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep46032>.

GIROTO, A.; DÍAZ, L.; RIBEIRO, C.; FAEZ, R. Role of urea and melamine as synergic co-plasticizers for starch composites for fertilizer application. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2019. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2019.12.094](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.094).

GOHARDOUST, M.; BAR-TAL, A.; EFFATI, M.; TULLER, M. Characterization of physicochemical and hydraulic properties of organic and mineral soilless culture substrates and mixtures. **Agronomy**, v. 10, n. 9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091403>.

GOVIL, S.; LONG, N. V. D.; ESCRIBÀ-GELONCH, M.; HESSEL, V. Controlled-release fertiliser: recent developments and perspectives. **Industrial Crops and Products**, v. 205, p. 119160, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119160>.

GUERRA, P.; DEL CARMEN SALAS SANJUAN, M.; LÓPEZ, M. Evaluation of physicochemical properties and enzymatic activity of organic substrates during four crop cycles in soilless containers. **Food Science & Nutrition**, v. 6, p. 2066–2078, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.757>.

GUERRERO-GUERRERO, E.; CRIOLLO-ESCOBAR, H.; CHÁVES, G.; VÉLEZ, J. Evaluation of physical and chemical variables of organic substrates in a hydroponic system for strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.). **Revista de Ciências Agrícolas**, v. 38, n. 2, 2021. DOI: <https://doi.org/10.22267/rcia.213802.158>.

HADOLE, S. S.; SURYAWANSHI, A. P.; KADAM, D. D.; GAVIT, P. S. Studies on fertigation scheduling and fertilizer levels on growth and yield of tomato. **International Journal of Chemical Studies**, v. 8, n. 3, p. 2343–2348, 2020. DOI: [10.22271/chemi.2020.v8.i3m.9329](https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i3m.9329).

INCROCCI, L.; MASSA, D.; PARDOSSI, A. New trends in the fertigation management of irrigated vegetable crops. **Horticulturae**, v. 3, n. 2, art. 37, 2017. DOI: [10.3390/horticulturae3020037](https://doi.org/10.3390/horticulturae3020037).

INTERNATIONAL PLANT GENETIC RESOURCE INSTITUTE (IPGRI). *Descriptors for Capsicum (Capsicum spp.)*. Rome: IPGRI, 1995. 32 p.

ISHERWOOD, K. F. *O uso de fertilizantes minerais e o meio ambiente*. Tradução da Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA). Paris, 2000. 63 p.

JENSEN, E. S. Nitrogen immobilization and mineralization during initial decomposition of ^{15}N -labelled pea and barley residues. **Biology and Fertility of Soils**, v. 24, p. 39–44, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf01420218>.

KATO, Y.; NOMURA, T. Functional characterization of *Capsicum chinense* vanillin aminotransferase: detection of vanillylamine-forming activity from vanillin. **Biochemistry and Biophysics Reports**, v. 38, p. 101692, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2024.101692>.

KHAN, A.; SHAH, S. N. M.; RAB, A.; SAJID, M.; ALI, K.; AHMED, A.; FAISAL, S. Influence of nitrogen and potassium levels on growth and yield of chillies (*Capsicum annum* L.). **International Journal of Farming and Allied Sciences**, v. 3, n. 3, p. 260–264, 2014.

KIM, S.; PARK, M.; YEOM, S. I. Genome sequence of the hot pepper provides insights into the evolution of pungency in *Capsicum* species. **Nature Genetics**, v. 46, n. 3, p. 270–278, 2014.

KUBOŃ, M. Modification of coconut fibers through impregnation with eco-friendly wood-based isolate as a method to increase the sustainability of dessert raspberries production. **Sustainability**, v. 16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16145878>.

KUZYAKOV, Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 9, p. 1363–1371, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.003>.

LABIGALINE, I.; SALA, F.; GOMES, T.; CORSINI, I.; ROSSI, F. Green manure, *Trichoderma asperellum* and homeopathy in cultivating the biquinho pepper. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, p. 1–10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200054>.

LATOURNERIE-MORENO, L.; LOPEZ-VÁZQUEZ, J. S.; CASTAÑÓN-NÁJERA, G.; MIJANGOS-CORTES, J. O.; ESPADAS-VILLAMIL, G.; PÉREZ-GUTIÉRREZ, A.; RUIZ-SÁNCHEZ, E. Evaluación agronómica de germoplasma de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). **Agro Productividad**, v. 8, n. 1, p. 35–41, 2018.

LAWRENCIA, D.; WONG, S. K.; LOW, D. Y. S.; GOH, B. H.; GOH, J. K.; RUKTANONCHAI, U. R.; SOOTTITANTAWAT, A.; LEE, L. H.; TANG, S. Y. Controlled release fertilizers: a review on coating materials and mechanism of release. **Plants**, v. 10, n. 2, p. 238, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10020238>.

LEAL, A. J. F.; VALDERRAMA, M.; KANEKO, F. H.; LEAL, U. A. S. Produtividade da soja de acordo com diferentes doses de cloreto de potássio revestido ou não com polímeros. **Global Science and Technology**, v. 8, n. 1, p. 19–30, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14688/1984-3801/gst.v8n1p19-30>.

LI, Y.; ZHANG, L.; XIAO, H.; WANG, J. PLA/starch composite coating used for developing slow releasing fertilizer. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025. DOI: 10.1002/app.56920.

- LI, Z.; ZENG, Z.; SONG, Z.; WANG, F.; TIAN, D.; MI, W.; HUANG, X.; WANG, J.; SONG, L.; YANG, Z.; WANG, J.; FENG, H.; JIANG, L.; CHEN, Y.; LUO, Y.; NIU, S. Vital roles of soil microbes in driving terrestrial nitrogen immobilization. **Global Change Biology**, v. 27, n. 9, p. 1848-1858, 2021. <https://doi.org/10.1111/gcb.15552>.
- LIMA, V. M.; LIMA JÚNIOR, J. A.; SANTOS, H. C. A.; SILVA, A. L. P.; OLIVEIRA, P. D.; BRITO NETO, J. F. Growth of *Capsicum chinense* Jacq. subjected to different irrigation depths in the northeastern region of Pará, Brazil. **Científica**, v. 46, n. 1, p. 30–37, 2018. <http://hdl.handle.net/11449/187078>.
- LIU, J.; YANG, Y.; GAO, B.; LI, Y. C.; XIE, J. Bio-based elastic polyurethane for controlled-release urea fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 528–537, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.263>.
- LIU, Q. Q.; YU, M.; WANG, X. L. Poverty reduction within the framework of SDGs and Post-2015 Development Agenda. **Advances in Climate Change Research**, v. 6, n. 1, p. 67–73, 2015.
- LOPEZ-VÁZQUEZ, J. S. Evaluación agronómica de germoplasma de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en Yucatán. **Agro Productividad**, v. 6, n. 4, p. 34–39, 2018. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/634>.
- LÜ, S.; FENG, C.; GAO, C.; WANG, X.; XU, X.; BAI, X.; GAO, N.; LIU, M. Multifunctional environmental smart fertilizer based on l-aspartic acid for sustained nutrient release. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 64, n. 24, p. 4965–4974, 2016. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b01133.
- MACEDO, L. A.; FERREIRA, B. O.; FRANÇA, A. C.; SARDINHA, L. T.; LEÃO, A. F.; OLIVEIRA, L. L. Influence of the use of slow-release phosphate fertilizers on the growth and production of chili peppers. **Colloquium Agrariae**, v. 17, n. 2, p. 39–50, 2021. DOI: 10.5747/ca.2021.v17.n2.a428
- MAITLO, A. A.; ZHANG, S.; AHMED, W.; JANGID, K.; ALI, S.; YANG, H.; BHATTI, S. M.; DUAN, Y.; XU, M. Potential Nitrogen Mineralization and Its Availability in Response to Long-Term Fertilization in a Chinese Fluvo-Aquic Soil. **Agronomy**, v. 12, n. 6, p. 1260, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061260>.
- MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. **Brasília**, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. cap. 8, p. 265–288.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press Inc., 1986. 674 p.
- MARSCHNER, P. Rhizosphere Biology. In: MARSCHNER, P. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3. ed. London: Academic Press, 2012. cap. 15, p. 369–388. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00015-7>.
- MARTÍNEZ, M.; SANTOS, C.; VERRUMA-BERNARDI, M.; CARRILHO, E.; SILVA, P.; SPOTO, M.; CIARROCCHI, I.; SALA, F. Agronomic, physical-chemical and sensory evaluation of pepper hybrids (*Capsicum chinense* Jacquin). **Scientia Horticulturae**, v. 277, p. 109819, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109819>.

MEDEIROS, F. J.; SILVA, C. M. S.; BEZERRA, B. G. Clima regional do estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 409–416, 2021.

MEDEIROS, J.; SOUSA, V.; MAIA, C.; COELHO, E.; MAROUELLI, W. Determinação e preparo da solução de fertilizantes para fertirrigação. In: SOUSA, V.; SOUSA, V. F. de

MEJÍA, P.; RUÍZ-ZUBIATE, J.; CORREA-BUSTOS, A.; LÓPEZ-LÓPEZ, M.; SALAS-SANJUÁN, M. Effects of vermicompost substrates and coconut fibers used against the background of various biofertilizers on the yields of *Cucumis melo* L. and *Solanum lycopersicum* L. **Horticulturae**, v. 8, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050445>.

MESSA, L. L.; SOUZA, C. F.; FAEZ, R. Spray-dried potassium nitrate-containing chitosan/montmorillonite microparticles as potential enhanced efficiency fertilizer. **Polymer Testing**, v. 81, p. 106196, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106196>.

MESSA, L.; FROES, J. D.; SOUZA, C. F.; FAEZ, R. Híbridos de quitosana-argila para encapsulamento e liberação sustentada do fertilizante nitrato de potássio. **Química Nova**, v. 39, n. 8, p. 1215–1220, 2016. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160133>.

MIRANDA, F.; DA SILVA, V.; SANTOS, F.; ROSSETTI, A.; SILVA, C. Production of strawberry cultivars in closed hydroponic systems and coconut fibre substrate. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, p. 833–841, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1806-66902014000400022>.

NASUTION, H.; ASDITA, M. B.; ZOELVA, A. A.; ASRAF, F.; TAMANNI, D.; LUBIS, N. A. The Effect of Microcrystal Cellulose Filling from Coconut Fiber and Betel Leaf Extract as Antimicrobials on Sago Starch Bioplastic Composite. **E3S Web of Conferences**, v. 519, p. 04003, 2024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451904003>.

NEGI, P.; THAKUR, R.; BHARDWAJ, S. K. Coated controlled-release fertilizers: Potential solution for sustainable agriculture. **Nature Environment and Pollution Technology**, v. 21, n. 4, 2022. DOI: 10.46488/NEPT.2022.v21i04.028.

NWOKE, C. O.; AGBAJE, E. B.; OGBU, J. A.; EKANEM, E. J. Determinação do teor de capsaicina e nível de pungência de cinco diferentes pimentas cultivadas na Nigéria. **New York Science Journal**, v. 3, n. 9, p. 17–21, 2010.

OLIVEIRA, F.; SANTOS, S.; MELO, M.; OLIVEIRA, M.; TRAVASSOS, K.; SOUSA, L.; PINTO, F. Gas exchange and growth of bell pepper grown in different substrates under salinity stress. **Horticultura Brasileira**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-2024-e288866>.

OLIVEIRA, M. S.; CARVALHO, D. F.; GOMES, D. P.; PEREIRA, F. A. C.; MEDICI, L. O. Production of cut sunflower under water volumes and substrates with coconut fiber. **Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 12, p. 859-865, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriamb.v22n12p859-865>

ORTIZ-DELVASTO, N.; GARCÍA-IBÁÑEZ, P.; OLMOS-RUIZ, R.; BÁRZANA, G.; CARVAJAL, M. Substrate composition affects growth and physiological parameters of blueberry. **Scientia**, 2022.

- OWEN, W. G.; COCKSON, P.; HENRY, J.; WHIPKER, B. E. Série de Acompanhamento Nutricional: Manjerição (*Ocimum basilicum*). 2018.
- PADILHA, H. K. M.; BARBIERI, R. L.; MASSOT PADILHA, H. K. M. P. E. L.; BARBIERI, R. L. Plant breeding of chili peppers (*Capsicum*, *Solanaceae*) – **A review**. 2016.
- PAN, Z.; HE, P.; FAN, D.; JIANG, R.; SONG, D.; SONG, L.; ZHOU, W.; HE, W. Global impact of enhanced-efficiency fertilizers on vegetable productivity and reactive nitrogen losses. **Science of The Total Environment**, v. 926, p. 172016, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172016>
- PARISI, M.; ALIOTO, D.; TRIPODI, P. Overview of biotic stresses in pepper (*Capsicum spp.*): sources of genetic resistance, molecular breeding and genomics. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 7, p. 2587, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21072587>.
- PEREIRA, B. L. da S.; COELHO, E. F.; OLIVEIRA, P. M. de; LIMA, J. C. L. de; REIS, J. B. R. da S.; BARROS, D. L.; AMORIM, I. C. da S.; CARVALHO, L. A. C. de. Diferentes estratégias de fertirrigação e seus efeitos no crescimento, produtividade, condutividade elétrica e nitrato do solo com a bananeira. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 8, p. e7178, 2024. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n8-258>.
- PEREIRA, J.; STOLF, R.; DA SILVA, J.; VICENTINI-POLETTE, C.; SILVA, P.; BIAZOTTO, A.; SPOTO, M.; VERRUMA-BERNARDI, M.; SALA, F. Agronomic, physicochemical, and sensory characteristics of fruit of biquinho pepper cultivated with liquid biofertilizer. **Scientia Horticulturae**, v. 288, p. 110348, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110348>.
- PETRUZ, A.; FAEZ, R.; SOUZA, C. Enhancing marine algae composites with cellulose nanofibrils for sustainable nutrient management. **Cellulose**, 2024. DOI: 10.1007/s10570-024-05947-0.
- PIBARS, S. K.; GABALLAH, M. S.; MANSOUR, H. A.; KHALIL, S. E. Management of fertigation and its effects on irrigation systems performance and crop yield. **International Journal of Health Sciences**, v. 6, n. S2, p. 1634-1659, 2022. DOI: 10.53730/ijhs.v6nS2.5420
- PINTO, C. M. F.; DONZELE, S. M. L. Diversidade das pimentas *Capsicum*. Campo & Negócios, Uberlândia, 29 maio 2021. Disponível em: <https://camponenegocios.com/pimentas-capsicum/>
- PINTO, C. M. F.; RIBEIRO, W. S.; DONZELES, S. M. L.; SOUZA, M. R. M.; SOUZA, G. A. Cultivo de pimenta *Capsicum*. Juiz de Fora: EPAMIG Sudeste, Departamento de Informação Tecnológica, 2022.
- PINTO, M. C.; SILVA, A. R.; SOUZA, R. C. Manejo de ambiente protegido para cultivo de *Capsicum chinense*: exigências térmicas e estratégias de mitigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 16, n. 1, p. 220–233, 2022. DOI: <https://doi.org/10.7127/rbai.v16n1.1546>.

PRIYA, E. S.; SARKAR, S.; MAJI, P. K. A review on slow-release fertilizer: Nutrient release mechanism and agricultural sustainability. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 3, p. 113211, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113211>.

QIAO, D.; LIU, H.; YU, L.; BAO, X.; SIMON, G. P.; PETINAKIS, E.; CHEN, L. Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by starch-based superabsorbent polymer. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 147, p. 146–154, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.010>.

RAMJATTAN, R.; UMAHARAN, P. Selection criteria for yield in hot pepper (*Capsicum chinense* Jacq.). **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 51, p. 625–641, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/01140671.2022.2058966>.

RAVIV, M.; LIETH, J. H.; BAR-TAL, A. Cultura sem solo: teoria e prática. Amsterdam: **Revista Elsevier**, v. 2, n. 1, p. 637–638, 2008.

RESENDE, J. T. V. de; MORALES, R. G. F.; FARIA, M. V.; RISSINI, A. L. L.; CAMARGO, L. K.; CAMARGO, C. K. Produtividade e teor de sólidos solúveis de frutos de cultivares de morangueiro em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 2, p. 185–189, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362010000200008>.

RIBEIRO, C. C. S.; HENZ, G. P.; VILELA, N. J.; AMARO, G. B.; MELO, W. F.; REIFSCHNEIDER, F. J. Agência de Informação Embrapa. Pimenta. Socioeconomia. **Árvore do Conhecimento**, 2016.

RISEH, R.; HEMMATI, M.; SALIMI, M.; BAHADORI, A. Increasing the efficiency of agricultural fertilizers using cellulose nanofibrils: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 321, 121313, 2023. DOI: 10.1016/j.carbpol.2023.121313.

SABERI RISEH, R.; VATANKHAH, M.; HASSANISAADI, M.; KENNEDY, J. F. Increasing the efficiency of agricultural fertilizers using cellulose nanofibrils: A review. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 321, p. 121313, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121313>.

SALA, F. C.; COSTA, C. P.; MARTINEZ, M.; LIMA, T. J. L. E.; AMARAL, E.; PORTELLA, M. A.; GAZMENGA, A. P. Maria Bonita: a nova pimenta brasileira. **Revista Campo e Negócios**, Uberlândia, p. 32–36, 2020.

SANATOMBIATOMBI, K.; SHARMA, G. J. Teor de Capsaicina e Pungência de Diferentes *Capsicum* spp. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, v. 36, n. 2, p. 89–90, 2008.

SANTOS, L.; FERNANDES, C.; SANTOS, L.; DEUS, I.; DE SOUSA, T.; MIRANDA, M. Ethanolic extract from *Capsicum chinense* Jacq. ripe fruits: phenolic compounds, antioxidant activity and development of biodegradable films. **Food Science and Technology**, v. 41, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.08220>.

SANTOS, R. S. S.; DIAS, N. S.; DUARTE, S. N.; LIMA, C. J. G. S.; FERNANDES, C. S.; MIRANDA, J. H. Cultivo da rúcula em substrato de fibra de coco sob solução nutritiva salina. **Revista Cultura Agronômica**, v. 27, n. 1, p. 12–21, 2018. <https://doi.org/10.32929/2446-8355.2018v27n1p12-21>.

SANTOS, T. P.; SANTOS, B. S.; DE SOUZA, R. C.; SPINACÉ, M. A. S. Study on the biodegradation of thermoplastic starch and bacterial cellulose based sandwich panel

biocomposites. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 284, Part 2, p. 144191, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144191>.

SERRANO, J.; PEÇA, J.; SILVA, J. M.; SHAHIDIAN, S. Aplicação de fertilizantes: tecnologia, eficiência energética e ambiente. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 37, n. 3, p. 270–279, 2014.

SHALEV, N.; BURG, A.; GAVRIELI, I.; LAZAR, B. Nitrate contamination sources in aquifers underlying cultivated fields in an arid region – The Arava Valley, Israel. **Applied Geochemistry**, v. 63, p. 322–332, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.09.017>.

SHARMA, H.; SHUKLA, M. K.; BOSLAND, P. W.; STEINER, R. L. Physiological responses of greenhouse-grown drip-irrigated chile pepper under partial root zone drying. **HortScience**, v. 50, n. 8, p. 1224–1229, 2015. <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/50/8/article-p1224.xml>.

SHAVIV, A. Controlled release fertilizers. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt, Germany, 27–30 June, 2005.

SOUZA, C. F.; FAEZ, R.; BACALHAU, F. B.; BACARIN, M. F.; PEREIRA, T. S. In situ monitoring of a controlled release of fertilizers in lettuce crop. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 37, n. 4, p. 656–664, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n4p656-664/2017>.

SOUZA, C. F.; SALA, F. C.; FAEZ, R. Polymer fertilizer and the fertigation of grape tomatoes in protected cultivation. **Scientia Horticulturae**, v. 311, p. 111801, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111801>.

STOFFELLA, P. J.; BRYAN, H. H. Plant Population Influences Growth and Yields of Bell Pepper. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 113, n. 6, p. 835-839, 1988. <https://doi.org/10.21273/jashs.113.6.835>.

SURENDREN, A.; MOHANTY, A. K.; LIU, Q.; MISRA, M. A review of biodegradable thermoplastic starches, their blends and composites: recent developments and opportunities for single-use plastic packaging alternatives. *Green Chemistry*, v. 24, n. 22, p. 8606-8636, 2022. <https://doi.org/10.1039/d2gc02169b>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017.

TIMILSENA, Y. P.; ADHIKARI, R.; CASEY, P.; MUSTER, T.; GILL, H.; ADHIKARI, B. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n. 6, p. 1131–1142, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.6812>.

TÖRÖK, K.; SZILI-KOVÁCS, T.; HALASSY, M.; TÓTH, T.; HAYEK, Z.; PASCHKE, M. W.; WARDELL, L. J. Immobilization of soil nitrogen as a possible method for the restoration of sandy grassland. **Applied Vegetation Science**, v. 3, n. 1, p. 7-14, 2000. <https://doi.org/10.2307/1478913>.

TRANI, P. E.; TRANI, A. L. Fertilizantes: cálculo de fórmulas comerciais. Campinas: Instituto Agrônômico, 2011. (Boletim técnico, 208).

TRENKEL, M. E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. IFA, 2010. https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2010_trenkel.pdf.

TRIPODI, P. Genomic structure and marker-trait association for plant and fruit traits in *Capsicum chinense* and *Capsicum baccatum* germplasm. **BMC Research Notes**, v. 17, n. 1, p. 36889, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13104-024-06889-3>.

WANG, H.; ZHANG, L.; GAO, Y.; ZHAO, Y.; WANG, X.; ZHANG, X. Responses of yield, quality and water-nitrogen use efficiency of greenhouse sweet pepper to different drip fertigation regimes in Northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 260, p. 107279, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107279>.

WANG, J. Y.; YAN, X. Y.; GONG, W. Effect of long-term fertilization on soil productivity on the North China Plain. **Pedosphere**, v. 25, n. 3, p. 450–458, 2015. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)30012-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)30012-6).

WANG, X.; YANG, Y.; GAO, B.; WAN, Y.; LI, Y. C.; XIE, J.; TANG, Y. Slow-released bio-organic–chemical fertilizer improved tomato growth: synthesis and pot evaluations. **Journal of Soils and Sediments**, v. 21, p. 319–327, 2021. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11368-020-02775-0>.

WICK, K.; HEUMESSER, C.; SCHMID, E. Groundwater nitrate contamination: factors and indicators. **Journal of Environmental Management**, v. 111, p. 178–186, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.06.030>.

WITT, T.; RIBEIRO, C.; LEE, H.; FAEZ, R. Evaluating novel biodegradable polymer matrix fertilizers for nitrogen-efficient agriculture. **Journal of Environmental Quality**, 2024. DOI: 10.1002/jeq2.20552.

XIANG, Y.; LI, J.; YANG, Q.; WANG, X. Optimization of controlled water and nitrogen fertigation on greenhouse culture of *Capsicum annuum*. **The Scientific World Journal**, v. 2018, p. 9207181, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9207181>.

XING, Y.; WANG, X. Precise application of water and fertilizer to crops: challenges and opportunities. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, Article 1444560, 2024. DOI: 10.3389/fpls.2024.1444560.

YAN, J.; LI, S.; ZHOU, J.; WANG, Q. Optimized fertigation improves water and fertilizer use efficiency and crop yield: a case study with maize. **Irrigation Science**, v. 39, p. 637–649, 2021. DOI: 10.1007/s00271-021-00717-5.

ZHANG, F.; MA, X.; GAO, X.; CAO, H.; LIU, C.; WANG, J.; GUO, G.; LIANG, T.; WANG, Y.; CHEN, X.; WANG, X. Innovative nitrogen management strategy reduced N₂O emission while maintaining high pepper yield in subtropical condition. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 354, p. 108565, 2023.

ZHANG, H.; SHEN, H.; LAN, J.; WU, H.; WANG, L.; ZHOU, J. Dual-network polyacrylamide/carboxymethyl chitosan-grafted-polyaniline conductive hydrogels for wearable strain sensors. **Carbohydrate Polymers**, v. 295, p. 119848, 2022.

ZHANG, H.; WANG, Y.; LI, X.; HE, G.; CHE, Y.; TENG, Z.; SHAO, J.; XU, N.; SUN, G. Chlorophyll synthesis and the photoprotective mechanism in leaves of mulberry

(*Morus alba* L.) seedlings under NaCl and NaHCO₃ stress revealed by TMT-based proteomics analyses. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 191, p. 1-11, 2020.

ZHANG, S.; WANG, S.; XU, M. A review on slow-release fertilizer: nutrient release mechanism and application. **Journal of Cleaner Production**, v. 379, p. 134211, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113211>.