

USO DO LODO DE CURTUME COMO COMPONENTE DO SUBSTRATO PARA
PRODUÇÃO DE MUDAS DE CAFÉ CONILON EM TUBETES

LEONARDO MARTINELI

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
AGOSTO – 2025

USO DO LODO DE CURTUME COMO COMPONENTE DO SUBSTRATO PARA
PRODUÇÃO DE MUDAS DE CAFÉ CONILON EM TUBETES

LEONARDO MARTINELI

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Produção Vegetal”.

Orientador: Sílvio de Jesus Freitas

Coorientador: Sávio da Silva Berilli

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
AGOSTO – 2025

FICHA CATALOGRÁFICA
UENF - Bibliotecas
Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

M385 Martineli, Leonardo.

Uso do lodo de curtume como componente do substrato para produção de mudas de café conilon em tubetes / Leonardo Martineli. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2026.

71 f. : il.

Bibliografia: 54 - 71.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2026.
Orientador: Silvio de Jesus Freitas.

1. *Coffea Canephora*. 2. Compostagem. 3. Substratos Orgânicos. 4. Lodo de Curtume. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

USO DO LODO DE CURTUME COMO COMPONENTE DO SUBSTRATO PARA
PRODUÇÃO DE MUDAS DE CAFÉ CONILON EM TUBETES

LEONARDO MARTINELI

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor Em Produção Vegetal”.

Aprovada em 28 de agosto de 2025

Comissão examinadora:

Prof. Evandro Chaves de Oliveira (D.Sc., Agronomia – Meteorologia aplicada) – IFES

Prof. Ramon Amaro de Sales (D.Sc., Agronomia – Fitotecnia) – UFV

Prof. Sávio da Silva Berilli (D.Sc., Agronomia – Produção Vegetal) – IFES
Coorientador

Prof. Sílvio de Jesus Freitas – (D.Sc., Agronomia – Produção Vegetal) – UENF
Orientador

Dedico essa conquista aos meus pais, Jonacy Martineli e Luzia de Almeida Martineli, aos meus irmãos Willian, Flávio, Maristella e Luciana Martineli.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, fonte de sabedoria, força e perseverança, que sustentou cada etapa desta caminhada e tornou possível a concretização deste trabalho. Agradeço, igualmente, ao Instituto Federal do Espírito Santo (IFES, Brasil) e à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF, Brasil), instituições que tornaram possível a realização desta pesquisa por meio do apoio institucional, acadêmico e estrutural. Expresso, ainda, minha gratidão à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio concedido, fundamental para o desenvolvimento das atividades científicas.

Ao Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Itapina, agradeço pelo fornecimento do campo experimental e pela disponibilização do Laboratório de Fitotecnia, com equipamentos essenciais às avaliações fisiológicas realizadas, bem como pelo suporte técnico da equipe, sempre solícita e comprometida. À UENF, manifesto meu reconhecimento a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, que contribuíram significativamente para minha formação acadêmica e científica ao longo do doutorado.

Ao meu orientador, Professor Sílvio de Jesus Freitas e coorientador, Professor Sávio da Silva Berilli, expresso minha profunda gratidão pela confiança, orientação, ensinamentos compartilhados e constante incentivo à excelência científica.

Aos meus colegas de turma no doutorado, agradeço pela convivência, pelas trocas de experiências e pelo apoio mútuo, que tornaram o percurso mais leve e enriquecedor.

Por fim, à minha família, meu reconhecimento mais sincero. Pelo amor, compreensão, paciência e apoio incondicional em todos os momentos, especialmente nos períodos de maior exigência e dedicação, vocês foram o alicerce que sustentou esta conquista.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. Objetivo geral	4
2.2. Objetivos específicos	4
3. REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1. Cafeicultura Conilon e o Espírito Santo	5
3.2. Uso agrícola do lodo de curtume	8
3.3. Uso agrícola da cama aviária	12
3.4. Uso agrícola da palha de café	15
3.5. Uso agrícola da maravalha de madeira	17
3.6. Compostagem de Resíduos Orgânicos	18
3.7. Substratos para produção de mudas	22
4. MATERIAL E MÉTODOS	24
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1. Avaliação das características morfológicas das plantas	37
5.2. Avaliação das características morfométricas das plantas	40
5.2. Avaliação das características biométricas do sistema radicular das plantas	42
5.3. Avaliação das características fisiológicas das plantas	43
5.4. Avaliação das características anatômicas foliares das plantas	48
5.5. Análise de correlação de Pearson entre as principais características avaliadas	50
6. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização geográfica de Colatina, localizada no estado do Espírito Santo, Brasil	24
Figura 2: Preparo do substrato convencional.	26
Figura 3: Montagem dos tratamentos na compostagem.	26
Figura 4: Montagem dos tratamentos e condução do processo de compostagem em sistema de leiras revolvidas.	29
Figura 5: Substratos estabilizados após processo de compostagem.	30
Figura 6: Tratamentos acondicionados em tubetes e dispostos em suportes apropriados, dentro do viveiro de mudas irrigado com delineamento em blocos casualizados.....	32
Figura 7: Preparo e plantio das estacas de café Conilon da variedade LB1.	33
Figura 8: Monitoramento de temperatura, umidade relativa e luminosidade no viveiro de propagação de mudas do Ifes-Campus Itapina durante o ciclo experimental.	34
Figura 9: Início das avaliações de desenvolvimento 150 dias após o plantio.	35
Figura 10: Preparo das amostras para avaliação das massas secas.	35
Figura 11: Associação (correlação de Pearson) entre as principais variáveis avaliadas.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição dos componentes de cada tratamento e respectiva relação carbono/nitrogênio inicial.	25
Tabela 2: Caracterização química dos resíduos utilizados nos substratos. Lodo de curtume (LC), cama de aviário (CA), palha de café (PC) e maravalha (Ma).	27
Tabela 3: Análise nutricional dos substratos orgânicos utilizados no presente estudo após processo de compostagem.	31
Tabela 4: Parâmetros morfológicos em mudas de café Conilon cultivadas em diferentes substratos, aos 150 dias após o plantio.	37
Tabela 5: Parâmetros morfométricos em mudas de café Conilon cultivadas em diferentes substratos, aos 150 dias após o plantio.	40
Tabela 6: Parâmetros biométricos do sistema radicular em mudas de café Conilon cultivadas em diferentes substratos, aos 150 dias após o plantio.	42
Tabela 7: Médias dos índices fisiológicos, obtidas por meio de fluorômetro MPM-100® em folhas de mudas de café Conilon cultivadas em diferentes substratos, aos 150 dias após o plantio.	44
Tabela 8: Parâmetros anatômicos foliares de mudas de café Conilon cultivadas em diferentes substratos, aos 150 dias após o plantio.	48

RESUMO

MARTINELI; Leonardo; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; agosto de 2025; USO DO LODO DE CURTUME COMO COMPONENTE DO SUBSTRATO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE CAFÉ CONILON EM TUBETES; Orientador: D.Sc. Sílvio de Jesus Freitas; Coorientador: D.Sc. Sávio da Silva Berilli.

A aplicação de resíduos na agricultura desempenha um papel fundamental tanto na sustentabilidade ambiental quanto na produção agrícola, pois são bons condicionadores dos solos e promovem a ciclagem de nutrientes. O lodo de curtume é um resíduo constituído de materiais orgânicos de origem animal, rico em diversos nutrientes considerados essenciais para as plantas, apresentando potencial de uso como um componente de substrato para produção de mudas. Contudo, ainda é um resíduo dependente de estudos que viabilizem o seu uso agrícola. Estudos mostram que o lodo de curtume, quando misturado a outros resíduos orgânicos, tem seus efeitos deletérios reduzidos para seu uso como substrato de plantas. Entretanto, recomenda-se que estes materiais sejam previamente estabilizados por meio de compostagem, tornando-os prontos para o uso agrícola. Dessa forma, objetivou-se, com este estudo, avaliar a eficiência de substratos orgânicos produzidos com diferentes concentrações de lodo de curtume desidratado, tratados por um processo de compostagem, para a produção de mudas de café Conilon em tubetes. O experimento foi conduzido em viveiro de propagação de mudas e montado em delineamento em blocos casualizados (DBC), contendo 7 blocos e 8 tratamentos por bloco. Os tratamentos foram constituídos de 7 misturas com diferentes concentrações de lodo de curtume, palha de café, cama de aviário e maravalha de madeira, previamente compostados, e por 1 substrato convencional (controle). Foram avaliadas características morfológicas, fisiológicas e anatômicas das plantas aos 150 dias após o plantio. Os substratos produzidos com materiais alternativos mostraram-se inferiores quando comparados ao substrato convencional, possivelmente uma resposta das plantas aos altos valores de pH apresentado, somado às altas concentrações de sódio destes substratos.

Palavras-chave: *Coffea Canephora*, Compostagem, Substratos orgânicos, Lodo de Curtume.

ABSTRACT

MARTINELI; Leonardo; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; agosto de 2025; USE OF TANNERY SLUDGE AS A COMPONENT OF THE SUBSTRATE FOR CONILON COFFEE SEEDLING PRODUCTION IN TUBES; Orientador: D.Sc. Sílvia de Jesus Freitas; Coorientador: D.Sc. Sávio da Silva Berilli.

The application of waste in agriculture plays a key role in both environmental sustainability and crop production, as such materials serve as effective soil conditioners and promote nutrient cycling. Tannery sludge is a waste composed of organic matter of animal origin, rich in several nutrients considered essential for plants, showing potential for use as a substrate component in seedling production. However, its agricultural use still depends on further studies to ensure its viability. Research has shown that when tannery sludge is mixed with other organic residues, its harmful effects are reduced, making it more suitable for use as a plant substrate. Nevertheless, it is recommended that these materials undergo prior stabilization through composting, which prepares them for safe agricultural use. Therefore, the objective of this study was to evaluate the efficiency of organic substrates produced with different concentrations of composted dehydrated tannery sludge for the production of Conilon coffee seedlings in tubes. The experiment was conducted in a seedling propagation nursery using a randomized block design (RBD), with seven blocks and eight treatments per block. The treatments consisted of seven mixtures with varying proportions of tannery sludge, coffee husk, poultry litter, and wood shavings, all previously composted, in addition to one conventional substrate. Morphological, physiological, and anatomical characteristics of the plants were evaluated 150 days after planting. The substrates made from alternative materials showed inferior performance compared to the conventional substrate, possibly due to plant responses to high pH values and elevated sodium concentrations present in those substrates.

Keywords: *Coffea Canephora*, Composting, Organic substrates, Tannery sludge

1. INTRODUÇÃO

O café é uma das principais commodities agrícolas do mundo, com elevada importância econômica, social e ambiental. O Brasil lidera o mercado global na produção e exportação do grão, destacando-se como protagonista no setor cafeeiro (Soujanya et al., 2023). Entre as espécies de café cultivadas no Brasil, o *Coffea Canephora* (Conilon) representa uma significativa parcela da produção nacional, especialmente no estado do Espírito Santo, que concentra a maior área plantada e responde por mais de 70% do café Conilon produzido no país (CONAB, 2024).

Além de seu papel estratégico na economia, o cultivo do café Conilon é essencial para a geração de renda de milhares de agricultores familiares, principalmente em regiões de baixa renda e agricultura de base tradicional (Souza et al., 2020). O avanço na produtividade da cultura no Espírito Santo tem sido impulsionado pela adoção de novas tecnologias, como a renovação de lavouras, a modernização dos sistemas de cultivo e a ampliação das áreas produtivas, fatores que ampliaram a demanda por mudas de alta qualidade fisiológica (Dardengo et al., 2013).

Contudo, esse cenário de expansão impõe novos desafios, sobretudo, diante das crescentes pressões ambientais e das mudanças climáticas, que exigem práticas agrícolas mais sustentáveis e resilientes (Altieri et al., 2015). Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos orgânicos como insumos agrícolas se apresenta como alternativa promissora para reduzir custos de produção, diminuir o uso de fertilizantes sintéticos convencionais e promover a economia circular no campo, uma vez que a crescente industrialização e o aumento populacional têm elevado a preocupação global com a gestão de resíduos (Zhang et al., 2020).

Sabe-se que grande parte desses resíduos gerados pelas atividades humanas são ótimas fontes para a fabricação de substratos e adubos orgânicos, de grande relevância agrônômica, social e econômica, que podem ser usados sem causar impactos ecológicos negativos (Correa et al., 2019). Nesse contexto, uma das temáticas que têm se destacado é o aproveitamento de resíduos agroindustriais na agricultura, que, devido à sua abundância em matéria orgânica e nutrientes essenciais para as plantas, são considerados potenciais fertilizantes e condicionadores de solo (Berilli et al., 2018; Quartezi et al., 2018a; Berilli et al., 2020).

Entretanto, embora diversos resíduos sejam recomendados para uso em práticas agrícolas devido ao seu papel como corretivos, fertilizantes e condicionadores do solo pelo incremento da matéria orgânica, os autores Ferreira et al. (2003) destacaram a importância de estudar as alterações nas propriedades do solo e a resposta das plantas à aplicação dos diferentes resíduos orgânicos. Sendo assim, estudos para avaliar o potencial desses resíduos como fertilizantes, bem como sua contaminação ambiental por elementos tóxicos, são de grande relevância e se fazem necessários para a compreensão de seus efeitos sobre as plantas, além de mitigar possíveis impactos ambientais indesejados.

Entre os diversos resíduos existentes, o uso do lodo de curtume na agricultura tem ganhado destaque e sido foco de numerosos estudos, especialmente como substrato para a produção de mudas de café Conilon no Brasil (Berilli et al., 2014; Berilli et al., 2016; Quartezi et al., 2018b; Sales et al., 2018a; Berilli et al., 2020; Martineli et al., 2022; Berilli et al., 2023; Berilli et al., 2025). No entanto, esses estudos identificaram certo grau de toxicidade para as plantas, que, segundo Martineli et al. (2022), está associado principalmente à presença de sódio no resíduo, afetando os níveis de compostos secundários como flavonoides, antocianinas e o desenvolvimento das plantas.

Uma alternativa para mitigar os impactos adversos desse resíduo é a compostagem, um método estratégico que envolve a combinação de diferentes materiais com distintas características físico-químicas. Segundo Torres-Climent et al. (2015), essa prática requer uma proporção adequada de carbono para nitrogênio (C/N), em que o ideal deve variar entre 26/1 e 35/1, sendo o carbono fonte de energia e o nitrogênio um elemento essencial para a síntese das proteínas, promovendo um processo aeróbico eficiente onde microrganismos degradam a matéria orgânica, resultando em um produto estabilizado com menor impacto ao meio ambiente.

Segundo Alves et al. (2021), os resíduos orgânicos estabilizados por compostagem realizada de maneira adequada podem ser usados como substrato para a produção de plantas, pois contribuem para o fornecimento de nutrientes essenciais, apresentam boa aeração, boa infiltração e retenção de água, características importantes de um bom substrato, que proporcionam um ambiente propício ao crescimento das plantas.

Tais informações, portanto, reforçam a importância de estudos dessa natureza, considerados essenciais para se expandir o entendimento científico sobre a utilização de resíduos na agricultura, enfatizando seus potenciais como componentes de substratos para a produção de mudas, uma vez que são reconhecidos como fontes nutritivas valiosas para as plantas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de substratos orgânicos produzidos com diferentes concentrações de lodo de curtume desidratado, palha de café, cama de aviário, e maravalha de madeira tratados por um processo de compostagem, para a produção de mudas de café Conilon em tubetes.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar as variáveis de desenvolvimento, fisiológicas e anatômicas de mudas de café Conilon produzidas a partir de diferentes compostos orgânicos;
- Determinar a qualidade das mudas com base nas variáveis de desenvolvimento analisadas;
- Analisar a relação entre a qualidade das mudas e os parâmetros fisiológicos e anatômicos;
- Identificar a proporção de resíduos utilizada nas compostagens que proporcione maior eficiência na produção de mudas de café Conilon em tubetes.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Cafeicultura Conilon e o Espírito Santo

A cultura do *Coffea Canephora*, conhecida como café Conilon, exerce papel de destaque na economia agrícola do Espírito Santo, especialmente nas regiões de clima quente, onde constitui a principal atividade rural. Em comparação com o café arábica, o Conilon apresenta maior rusticidade, melhor vigor vegetativo e uma notável tolerância a estresses ambientais, incluindo altas temperaturas e períodos prolongados de estiagem, características que favorecem sua ampla adaptação às condições edafoclimáticas do estado e embasam sua crescente expansão ao longo das décadas (Taques e Dadalto, 2017).

A introdução da cafeicultura Conilon no Espírito Santo teve início no ano de 1912, quando o então governador Jerônimo Monteiro trouxe as primeiras mudas e sementes para a cidade de Cachoeiro de Itapemirim, na região Sul do estado, contudo, a grande expansão do café Conilon no Estado apenas se deu a partir da década de 60, por causa da crise mundial do café arábica, que levou à erradicação de grande parte das lavouras capixabas de Café Arábica (Schmidt, et al., 2004).

Segundo Glazar (2005), a partir de 1971 consolidaram-se as primeiras lavouras tecnificadas de café Conilon, com destaque para o município de São Gabriel da Palha, no norte capixaba, que assumiu papel estratégico na expansão da cultura para todas as regiões do Espírito Santo. Essa nova variedade de café passou a ganhar força com o surgimento e crescimento da indústria de cafés solúveis, bem como o emprego dessa espécie em misturas com o café arábica, sendo esses fatores determinantes para o estabelecimento do Conilon como cultura de elevado valor econômico no estado do Espírito Santo (Silva et al., 2017).

O Espírito Santo ocupa apenas 0,5% do território brasileiro, entretanto, atualmente se destaca como o segundo maior produtor de café do país e lidera com folga a produção nacional de café Conilon. Dados da Companhia Nacional de Abastecimento indicam que, em 2024, a produção capixaba atingiu 9,8 milhões de sacas beneficiadas de 60 kg, correspondendo a cerca de 67% do volume nacional dessa variedade (CONAB, 2024).

Esses números evidenciam o peso da cafeicultura Conilon na dinâmica socioeconômica rural Capixaba. Conforme o Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), a cultura constitui a principal fonte de renda para cerca de 80% das propriedades localizadas em áreas de clima quente, abrangendo, aproximadamente, 283 mil hectares distribuídos em 63 municípios, com envolvimento direto de, aproximadamente, 78 mil famílias produtoras. Estima-se que a cadeia produtiva gere um montante de 250 mil empregos diretos e indiretos, sendo responsável por cerca de 37% do Produto Interno Bruto (PIB) agrícola estadual (INCAPER, 2025).

A crescente demanda por mudas de qualidade genética e sanitária, sobretudo na região Noroeste, epicentro das lavouras produtivas, está relacionada ao processo de modernização e renovação dos cafezais. Esse movimento envolve a substituição de plantas oriundas de sementes por cultivares clonais selecionadas, que apresentam atributos superiores como produtividade elevada, maior resistência ao déficit hídrico e tolerância a doenças e pragas (Ferrão et al., 2017).

Historicamente, a propagação semínifera era o método predominante no cultivo de Conilon, o que gerava lavouras heterogêneas, que apresentavam variações acentuadas em fenótipo e produtividade. Essa heterogeneidade comprometia a padronização do manejo e dificultava a obtenção de alta produtividade e qualidade final. A partir de 1985, o avanço das pesquisas científicas viabilizou o desenvolvimento de um programa de melhoramento genético do *Coffea Canephora*, focado na disponibilização de materiais clonais com desempenho superior (Ferrão et al., 2017).

A técnica de estaquia, utilizando brotações ortotrópicas de plantas matrizes previamente selecionadas, tornou-se prática amplamente adotada. Esse método permite a reprodução fiel de características desejáveis da planta original (clones), resultando em lavouras mais uniformes, com ciclos de maturação mais previsíveis e elevada eficiência produtiva (Partelli et al., 2006). De acordo com Bragança et al. (2001), as mudas obtidas por estaquia também se destacam pela precocidade no início da produção, fator que reduz o tempo de retorno do investimento agrícola.

A qualidade das mudas constitui etapa crítica para o êxito do empreendimento cafeeiro. Braun et al. (2009) destacaram a importância de se produzir mudas de qualidade, pois, embora elas representem apenas um entre diversos fatores que

influenciam a produtividade das lavouras, sua qualidade deve atender a padrões técnicos rigorosos. Tatagiba et al. (2010) reiteram a importância da produção de mudas de alta qualidade, com aspectos sadios, vigorosas e bem nutridas, para a formação de uma lavoura produtiva e sustentável. Nesse mesmo sentido, Effegen et al. (2008) e Taques e Dadalto (2017) enfatizam que o desempenho agrônomo da cultura está vinculado não apenas às mudas, mas também às condições fisiológicas da planta, ao ambiente de cultivo e às práticas de manejo adotadas.

A produção de mudas de café no Espírito Santo era tradicionalmente realizada em sacos plásticos, com substratos compostos por terra de subsolo, matéria orgânica e fertilizantes minerais, seguindo as recomendações do INCAPER (Ferrão et al., 2012). Contudo, a utilização de tubetes plásticos como recipiente, tem sido cada vez mais comum entre os produtores de mudas de café conilon, graças a benefícios como economia de espaço nos viveiros, redução do volume de substrato por muda, facilidade no transporte e melhorias nas condições fitossanitárias (Verdin Filho et al., 2019; Mauri et al., 2015).

Além disso, o cultivo de mudas em tubetes favorece um desenvolvimento radicular mais eficiente, promovendo a formação de raízes bem distribuídas e funcionalmente ativas. Esse sistema também facilita o processo de transplântio para o campo, reduzindo danos ao sistema radicular, o que resulta em menores índices de mortalidade após o plantio e maior uniformidade no estabelecimento e na implantação das lavouras. (Andrade et al., 2021).

Apesar das vantagens, a utilização de tubetes também apresenta desafios, sobretudo, os custos elevados com substratos comerciais e fertilizantes, que afetam a rentabilidade do sistema e comprometem sua sustentabilidade. Diante disso, a pesquisa agropecuária tem direcionado esforços para a adoção de práticas mais sustentáveis, com foco na utilização de resíduos orgânicos e materiais regionais de baixo custo como componentes de substratos alternativos.

Essa abordagem tem ganhado relevância à luz dos princípios da economia circular e da agricultura regenerativa, os quais preconizam o reaproveitamento de recursos e a redução da dependência de insumos externos, contribuindo para a sustentabilidade econômica e ambiental da cafeicultura Conilon (Meneghelli et al., 2018).

3.2. Uso agrícola do lodo de curtume

O Brasil possui o maior rebanho bovino do planeta. São, aproximadamente, 238,6 milhões de cabeças de gado, segundo dados do *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística* (IBGE, 2024). Esse número expressivo da pecuária brasileira sustenta a cadeia produtiva do couro, consolidando o país como um dos principais produtores e exportadores mundiais desse insumo. De acordo com dados do *Centro das Indústrias de Curtumes do Brasil* (CICB, 2025), existem, aproximadamente, 214 curtumes em operação no território nacional, gerando, aproximadamente, 31 mil empregos diretos, com produção de mais de 40 milhões de peles por ano e exportações que alcançam cerca de 80 países e movimentam anualmente mais de 1,1 bilhão de dólares, evidenciando a relevância estratégica do setor para a economia brasileira.

Historicamente, a indústria do couro no Brasil teve origem no século XIX, especialmente no estado do Rio Grande do Sul, com a instalação de curtumes por imigrantes europeus, em especial alemães e italianos, que se aproveitaram da ampla disponibilidade de peles bovinas provenientes inicialmente das charqueadas e, posteriormente, dos frigoríficos, para desenvolver as primeiras unidades produtivas (Corrêa, 2001).

Segundo a Norma Brasileira ABNT NBR 15106, o couro é definido como um material obtido exclusivamente da pele animal, transformado por meio de processos de curtimento que conferem estabilidade química e resistência à decomposição biológica, sendo essencialmente constituído por fibras colágenas da derme, que passam por processos industriais que visam torná-lo flexível, durável e adequados ao uso comercial (ABNT, 2014).

O processo de produção do couro compreende três etapas principais, conforme descrito por Ganem (2007): ribeira, curtimento e acabamento. Segundo o autor, a etapa da ribeira envolve procedimentos preliminares como o pré-molho, depilação, descalcinação e lavagem, utilizando-se compostos químicos como o sulfeto de sódio (Na_2S) e o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que tem como objetivo remover tecidos não colagênicos e preparar a pele para reagir adequadamente às substâncias curtentes.

Efetivamente, o curtimento é a etapa em que a pele é transformada em um material imputrescível e estável de alta resistência e, que após esse processo, passa a

ser chamado de couro. Nesse processo, pode-se empregar curtimento mineral, vegetal ou sintético, sendo o curtimento mineral com sulfato de cromo trivalente (Cr^{3+}) o mais utilizado, em virtude da rapidez e da qualidade conferida ao couro (Ganem, 2007).

Entretanto, como em diversas atividades industriais, o setor de curtumes gera resíduos em larga escala, especialmente o chamado lodo de curtume, que provém do processo de tratamento de efluentes líquidos originados nas várias etapas da produção. Estima-se que para cada pele bovina processada sejam gerados, em média, 12 kg de lodo de curtume desidratado, o que representa um desafio logístico e ambiental significativo (Claas e Maia, 1994).

A composição do lodo de curtume apresenta-se complexa e heterogênea, incluindo materiais orgânicos de origem animal, sais inorgânicos, metais, além de macronutrientes essenciais às plantas, como nitrogênio, cálcio, enxofre, fósforo, magnésio e potássio, bem como compostos com potencial corretivo da acidez do solo, como carbonatos, hidróxidos de cálcio e sulfetos (Araujo, 2011; Santos et al., 2011). Diante dessas características, o lodo de curtume configura-se como um insumo agrícola potencialmente viável, apresentando propriedades tanto fertilizantes quanto condicionadoras do solo.

A utilização de resíduos industriais na agricultura é uma prática comum e estrategicamente relevante, especialmente na busca por alternativas sustentáveis ao uso de fertilizantes minerais, os quais, além de custosos, possuem impactos significativos na cadeia de produção. Nesse contexto, diversos estudos indicam que materiais orgânicos provenientes de resíduos das indústrias de couro podem ser incorporados ao solo com vistas a melhorar a fertilidade, o teor de matéria orgânica, e a atividade biológica, ao mesmo tempo em que promovem a redução dos passivos ambientais oriundos de sua disposição inadequada (Bassaco et al., 2015).

Entretanto, apesar dos potenciais benefícios, o uso agrícola desses resíduos exige criteriosa avaliação científica, sobretudo, no que diz respeito às possíveis alterações nas propriedades físico-químicas e biológicas do solo, além do risco de bioacumulação de elementos tóxicos, como metais pesados, que podem comprometer a saúde humana e ambiental (Ferreira et al., 2003). Por essa razão, o uso do lodo de curtume deve ser conduzido com base em estudos técnico-científicos que assegurem sua eficácia agronômica e segurança ecológica.

Autores como Konrad e Castilhos (2002) e Ferreira et al. (2003) reforçam que o uso agrícola do lodo de curtume pode contribuir de forma significativa para a recuperação da fertilidade dos solos empobrecidos, ao mesmo tempo em que representa uma alternativa segura de disposição do resíduo, quando comparada a outras formas, como a incineração ou o descarte em aterros. A capacidade do solo em reter, degradar e imobilizar poluentes o torna um meio preferencial para a destinação controlada de resíduos, sendo mais eficiente e seguro do que o ar ou a água, conforme argumenta Almeida (2017).

Nesse mesmo sentido, Borges (2003) destaca a função depuradora do solo, resultado da interação entre suas propriedades físico-químicas e a intensa atividade microbiana, capaz de degradar compostos orgânicos complexos. Assim, o emprego racional de resíduos orgânicos pode contribuir para a melhoria das propriedades edáficas e para a redução dos impactos ambientais, consolidando-se como uma estratégia de manejo sustentável. Araujo (2011) complementa que o uso agrícola de resíduos, como o lodo de curtume, constitui uma alternativa viável à adubação tradicional, oferecendo nutrientes essenciais e condicionando fisicamente o solo para melhor desempenho das culturas.

No âmbito da cafeicultura, especificamente no cultivo de mudas de café Conilon (*Coffea Canephora*), diversas pesquisas têm sido conduzidas com o objetivo de avaliar o uso do lodo de curtume como componente de substratos alternativos. Esses estudos indicam que, quando processado e aplicado corretamente, o lodo de curtume pode fornecer nutrientes importantes para o desenvolvimento inicial das mudas, além de melhorar a estrutura física dos substratos (Berilli et al., 2014; Berilli et al., 2015; Berilli et al., 2016; Berilli et al., 2018; Quartezi et al., 2018a; Quartezi et al., 2018b; Salles et al., 2018; Martineli et al., 2022; Berilli et al., 2023; Berilli et al., 2025).

Dessa maneira, podemos concluir que as pesquisas mencionadas reforçam a ideia de que o reaproveitamento agrícola de resíduos agroindustriais, como o lodo de curtume, constitui uma abordagem promissora para a promoção da sustentabilidade agroindustrial, integrando os princípios da economia circular e gestão ambiental responsável. Contudo, recomenda-se que a utilização desse insumo esteja sempre embasada em critérios técnicos e legais, com monitoramento dos teores de cromo,

salinidade e pH, e adequada compostagem e estabilização do material, a fim de mitigar quaisquer riscos potenciais ao ambiente e à saúde humana.

A aplicação do lodo de curtume em sistemas agrícolas permite o reaproveitamento de compostos orgânicos e minerais que, de outra forma, poderiam representar risco ambiental caso descartados de maneira inadequada. Quando incorporado ao solo, especialmente em presença de matéria orgânica estabilizada, o lodo tende a se tornar menos reativo, passando por processos naturais de estabilização e imobilização de compostos potencialmente tóxicos, como o cromo e o sódio (Lacalle et al., 2020). Segundo Almeida (2017), o solo pode ser considerado o melhor e mais seguro meio para a disposição de resíduos, pois as características químicas e biológicas do solo favorecem uma melhor oxidação e precipitação dos poluentes presentes nestes resíduos, reduzindo com maior eficiência os riscos de contaminação ambiental, de modo mais seguro que o ar ou a água.

Esses processos ocorrem em função da atividade biológica do solo, que atua na oxidação dos elementos contaminantes e na precipitação de poluentes, reduzindo significativamente sua mobilidade e, consequentemente, sua entrada na cadeia alimentar (Malafaia et al., 2015; Sales et al., 2018a).

A capacidade do solo em atuar como um sistema depurador é amplamente reconhecida, sobretudo, quando há adequada integração com resíduos orgânicos estabilizados. Tal interação favorece o aumento da atividade microbiana, a melhoria das propriedades físico-químicas do solo e a adsorção de metais pesados por partículas coloidais, contribuindo para um ambiente mais seguro em comparação com a exposição direta desses resíduos à atmosfera ou à hidrosfera (Borges, 2003).

Além disso, em um cenário aonde os custos dos insumos agrícolas, especialmente fertilizantes minerais que vêm se elevando de forma significativa, a utilização de resíduos industriais como o lodo de curtume apresenta-se como uma alternativa economicamente atrativa. Quando utilizado em quantidades controladas e tecnicamente recomendadas, esse resíduo pode contribuir para aumentos de produtividade agrícola, ao mesmo tempo em que promove a redução nos custos de produção, oferecendo uma solução de duplo benefício, ambiental e econômico (Malafaia et al., 2016; Sales et al., 2018a).

Apesar do elevado potencial agrônômico do lodo de curtume, sua utilização na agricultura ainda é limitada, tanto por desconhecimento técnico quanto por entraves regulatórios e receios quanto à segurança ambiental. No entanto, diversos estudos têm evidenciado que, quando aplicados de forma criteriosa, os resíduos industriais podem substituir parcial ou totalmente os fertilizantes convencionais, contribuindo para o aprimoramento da sustentabilidade na cadeia produtiva agrícola (Silva et al., 2019).

Berilli et al. (2015) também reforçam que, embora muitos estudos evidenciem os efeitos benéficos do uso do lodo de curtume como insumo agrícola, é fundamental reconhecer que existem restrições importantes ao seu uso, notadamente o alto teor de cromo, especialmente na forma trivalente (Cr^{6+}), e os elevados níveis de sódio (Na), elementos que podem comprometer o equilíbrio nutricional do solo e afetar negativamente o desenvolvimento das plantas. Esses fatores são considerados limitantes para sua aplicação direta e indiscriminada, sendo imprescindível adotar estratégias de manejo específicas, como a diluição do lodo em compostos orgânicos, monitoramento da salinidade, e ajustes no pH do solo, a fim de minimizar os riscos potenciais às culturas agrícolas e ao meio ambiente.

Portanto, a viabilidade do uso agrícola do lodo de curtume está intrinsecamente condicionada à adoção de práticas agrônômicas adequadas, à interpretação criteriosa das análises químicas do resíduo e à aplicação em doses compatíveis com a capacidade de retenção e tamponamento do solo. Com o conhecimento técnico apropriado e a supervisão de órgãos ambientais e de pesquisa, o lodo de curtume pode deixar de ser um passivo ambiental e transformar-se em um importante recurso na agricultura sustentável, contribuindo para a fertilidade dos solos, o reaproveitamento de resíduos industriais e a redução da dependência de insumos sintéticos.

3.3. Uso agrícola da cama aviária

A avicultura brasileira destaca-se no cenário mundial não apenas pelo volume de produção, mas também pela relevância econômica e social da cadeia produtiva, que alcançou alto nível de tecnologia. Em 2022, a avicultura brasileira registrou uma produção de, aproximadamente, 14,52 milhões de toneladas de carne de frango,

resultando em um valor bruto de produção estimado em R\$ 112,15 bilhões (ABPA, 2023).

Desse total, cerca de 4,8 milhões de toneladas foram destinadas ao mercado externo, gerando uma receita de US\$ 9,76 bilhões e representando 33,2% da produção nacional, o que consolidou o Brasil como o segundo maior produtor mundial do setor conforme dados da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2023).

Segundo Engel et al. (2023), tal desempenho está diretamente relacionado à adoção de sistemas intensivos de produção, nos quais a criação de frangos de corte ocorre, predominantemente, em regime de confinamento, caracterizado pelo uso de tecnologias avançadas de manejo, nutrição, ambiência e biossegurança, amplamente difundidas em território nacional, representando uma estratégia eficiente para atender à crescente demanda global por proteína animal, uma vez que viabiliza elevadas taxas de produtividade, racionalização do uso de insumos e maior controle sobre os parâmetros produtivos dentro da avicultura industrial.

Entretanto, a intensificação dos sistemas de produção implica também em desafios ambientais significativos. Conforme observado por Valente et al. (2016), a elevada densidade populacional nas granjas resulta em uma produção de resíduos orgânicos consideravelmente superior à capacidade natural de degradação do ambiente, comprometendo a qualidade dos recursos naturais quando esses resíduos são dispostos de maneira inadequada, especialmente na forma *in natura*.

Alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e da água são consequências frequentes da má gestão desses resíduos. Dessa forma, torna-se imprescindível o uso de tecnologias apropriadas de gerenciamento, que promovam a estabilização dos resíduos antes de sua aplicação agrícola, de modo a mitigar os riscos ambientais e potencializar seu aproveitamento como fertilizante orgânico (Dores-Silva et al. 2013).

Dentre os resíduos gerados pela atividade avícola, a cama de aviária destaca-se como uma fonte rica em nutrientes e matéria orgânica, com elevado potencial de utilização na agricultura. Trata-se de um resíduo composto por uma mistura de fezes, restos de ração, penas e o material seco utilizado como cobertura do piso, como por exemplo, a maravalha, casca de arroz ou a palhada de alguma cultura, e que pode ser acumulados ao longo de um ou mais ciclos de criação (Botega, 2019).

O uso desse resíduo na agricultura como fertilizante orgânico é incentivado em função da presença de teores expressivos de macro e micronutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal, destacando-se o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K), cuja demanda é elevada por parte das culturas agrícolas (Daronch et al., 2017). De acordo com Lin et al. (2022), uma meta-análise de 134 estudos (3.362 comparações) revelou que a aplicação de cama aviária aumenta significativamente a capacidade de troca catiônica (CTC), pH, carbono orgânico, além dos teores de N, P, K, cálcio (Ca), magnésio (Mg), cobre (Cu) e zinco (Zn) no solo quando comparada a fertilizantes comerciais.

Estudos conduzidos por Oliveira et al. (2008) demonstram que a cama de aviário apresenta composição nutricional superior às outras fontes comuns de adubação orgânica, como o esterco bovino. Os autores relataram teores médios de nitrogênio da ordem de $33,6 \text{ g kg}^{-1}$, fósforo de $13,3 \text{ g kg}^{-1}$, potássio de $19,2 \text{ g kg}^{-1}$ e cálcio de $25,5 \text{ g kg}^{-1}$, o que evidencia seu alto valor agronômico. Além do aporte nutricional, esse resíduo é uma fonte importante de matéria orgânica e microrganismos benéficos, que atuam na melhoria das características físico-químicas do solo, promovendo aumento da capacidade de retenção de água e nutrientes, bem como a atividade microbiana do solo.

Todavia, é importante salientar que a composição química e as características físicas da cama de frango podem apresentar variações consideráveis entre diferentes unidades produtivas, fatores como o tipo de material utilizado como cama, o número de lotes criados sobre o mesmo substrato, o sistema de alimentação e hidratação das aves, o acúmulo de resíduos e a forma de manejo, limpeza e armazenamento influenciam diretamente na qualidade final do produto (Staub et al. 2017). Essas variabilidades devem ser consideradas no momento do planejamento agrícola, sendo essencial a análise prévia do material a ser utilizado.

Apesar de seu potencial, a cama aviária pode levar à introdução de microrganismos patogênicos, antibióticos, metais pesados e outros contaminantes no solo e ambiente, especialmente quando mal processada, o que exige normas claras e práticas padronizadas para garantir a aplicação segura em sistemas agrícolas (Correa Junior, 2024).

Um estudo relatado por Holattko et al. (2022) em experimentos com plantas de milho mostrou que doses de 10% e 20% de biochar incorporado à cama aviária teve um efeito eficaz na estabilização dos nutrientes presentes na mistura, reduzindo perdas por volatilização. Além disso, o incremento de biochar proporcionou um aumento significativo da matéria seca do fertilizante e do teor de carbono orgânico elevando a atividade microbiana (enzimas e respiração do solo) e a produtividade das plantas em até 42%, mesmo sob acidificação moderada do solo.

Diante disso, a utilização da cama de frango como insumo agrícola deve ser pautada em critérios técnicos e ambientais que garantam seu uso racional, evitando impactos negativos ao ecossistema e promovendo a sustentabilidade dos sistemas produtivos. Quando adequadamente tratada e manejada, a cama de frango representa uma alternativa viável e eficiente de fertilização orgânica, capaz de reduzir os custos de produção, incrementar a produtividade e minimizar os passivos ambientais da cadeia avícola.

3.4. Uso agrícola da palha de café

A palha de café, resíduo agrícola oriundo do processamento do fruto do cafeeiro, pode ser gerada tanto na etapa de despulpamento do café via úmida quanto durante o beneficiamento do grão seco, conhecido como “café em coco”. Trata-se de um subproduto formado em grandes volumes nas propriedades produtoras, sobretudo, em regiões com cultivo intensivo. Conforme apontado por Matiello et al. (2010), estima-se que, para cada saca de café beneficiada, sejam produzidos entre 50 a 60 kg de palha, o que demonstra sua expressiva disponibilidade nas fazendas cafeeiras.

Devido a essa abundância, a palha de café tem sido aproveitada de diferentes formas. Um dos usos proeminentes da casca de café é na agricultura, como cobertura morta para controlar a erosão do solo e o escoamento superficial. Estudos demonstraram que os resíduos da casca de café podem reduzir significativamente as perdas de solo e a concentração de sedimentos, aumentando simultaneamente as taxas de infiltração e o tempo de escoamento superficial (Moreno-Ramón et al., 2014). Essa aplicação é particularmente valiosa em regiões com problemas de erosão, pois utiliza as propriedades naturais da casca para melhorar a saúde do solo.

Além de sua função como material orgânico de cobertura, a palha de café apresenta elevada concentração de nutrientes essenciais às plantas, destacando-se, sobretudo, como fonte significativa de potássio (K) e nitrogênio (N), o que lhe confere grande potencial como insumo na adubação agrícola. De acordo com Fernandes et al. (2013), a aplicação da palha diretamente nas lavouras pode contribuir de maneira relevante para o manejo nutricional das culturas, inclusive como alternativa parcial ou total à adubação potássica mineral convencional, dependendo da análise química do material e das exigências da cultura.

Bosa et al. (2019) relatam que produtores fazem uso recorrente da palha de café como fertilizante natural nas áreas de cultivo, impulsionados pelo seu elevado teor de nutrientes. No entanto, os autores ressaltam que muitos agricultores ainda carecem de informações mais precisas sobre a dinâmica de decomposição e mineralização desse resíduo no solo, o que dificulta a estimativa do momento ideal e das doses apropriadas para sua aplicação, comprometendo a eficiência da adubação e, eventualmente, o desempenho das plantas.

Uma das formas promissoras do aproveitamento agrícola da palha de café diz respeito ao seu uso como componente de substratos na produção de mudas, em especial de cafeeiros. Santos et al. (2008), ao avaliarem o efeito de diferentes fontes nutricionais orgânicas na formação de mudas em tubetes, verificaram que a adição da palha de café proporcionou os maiores teores foliares de potássio nas plantas, em comparação com outras fontes orgânicas testadas. Esse resultado evidencia o potencial do resíduo como adubo orgânico com ação direta sobre o estado nutricional das mudas, especialmente no fornecimento de potássio, nutriente fundamental para o desenvolvimento inicial do cafeeiro.

Corroborando esses achados, Meneghelli et al. (2018), estudando substratos para a produção de mudas de café em tubetes, também observaram efeitos positivos da inclusão da palha de café como componente de substrato orgânico. Neste estudo, os autores destacaram que além de sua função nutricional, a palha de café também contribui para melhorar características físicas do substrato, como aeração e capacidade de retenção de água, favorecendo o crescimento radicular e o estabelecimento inicial das plantas.

Apesar dos benefícios apresentados, a palha de café contém compostos fenólicos e taninos que podem apresentar efeitos alelopáticos, inibindo o crescimento inicial de algumas plantas se aplicada em excesso ou de forma incorreta, entretanto, para minimizar tais efeitos, recomenda-se o uso em quantidades moderadas e processos de compostagem prévia em mistura com outros resíduos orgânicos para a degradação desses compostos (Costa et al., 2017).

Diante do exposto, a utilização da palha de café no preparo de substratos orgânicos representa uma alternativa economicamente viável, ambientalmente sustentável e tecnicamente eficiente para o setor cafeeiro, especialmente em contextos de economia circular e valorização de resíduos agroindustriais.

3.5. Uso agrícola da maravalha de madeira

A maravalha de madeira, também conhecida como cepilho, serragem grossa, aparas, cascas ou retalhos de madeira, é um resíduo sólido oriundo do beneficiamento industrial da madeira. Esse resíduo é gerado, principalmente, durante o processamento mecânico de toras em serrarias e marcenarias, tanto na fase de corte bruto da matéria-prima quanto em etapas posteriores de desdobramento e acabamento (Owoyemi et al., 2016).

O acúmulo da maravalha, quando não tratado de forma adequada, representa um desafio ambiental, se descartado de maneira incorreta, contribuindo para a poluição do solo e dos corpos hídricos, além de representar riscos à saúde pública e ao equilíbrio ecológico. Para minimizar os impactos negativos a maravalha pode ser integrada em sistemas de cultivo protegidos, que são bastante eficientes em aumentar a produtividade agrícola e melhorar a qualidade das colheitas, especialmente em regiões de clima desfavorável. As técnicas de cultivo protegido, como coberturas de solo e plantas, ajudam a controlar pragas, plantas invasoras e condições climáticas, tornando o cultivo agrícola mais resiliente às mudanças climáticas e biológicas (Nordey et al., 2017).

Alternativas sustentáveis para o reaproveitamento da maravalha têm se destacado no contexto da agricultura e da produção de mudas. Uma dessas estratégias consiste no uso da maravalha como componente orgânico em substratos agrícolas,

especialmente após passar por processos de compostagem. Segundo Ebeid et al. (2015), a compostagem da maravalha promove melhorias significativas na estrutura física e química dos substratos, como o aumento da porosidade e da aeração, a redução da densidade aparente e a contribuição com nutrientes essenciais às plantas. Essa prática, além de agregar valor ao resíduo, reduz os custos com aquisição de insumos comerciais e promove a sustentabilidade nas cadeias produtivas rurais.

No aspecto nutricional, a maravalha apresenta concentrações relevantes de macronutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal. De acordo com Araújo (2019), sua composição química é caracterizada pela presença de nitrogênio (1,45%), fósforo (0,60%) e potássio (0,45%), nutrientes que estão entre os mais demandados pelas plantas, principalmente em fases iniciais de crescimento. Essa característica amplia o potencial da maravalha como alternativa à fertilização convencional, desde que seu uso seja tecnicamente orientado.

Aparas de madeira, embora potencialmente utilizáveis como componente de substrato no cultivo de plantas, apresentam diversos desafios que podem afetar negativamente o crescimento das plantas. De acordo com Hietikko et al. (2024), um dos principais problemas é o potencial para fermentações ácidas quando as aparas de madeira são usadas em grandes volumes, que pode criar um ambiente inadequado para muitas plantas, dificultando seu crescimento. Além disso, substratos com alta proporção de aparas de madeira tendem a ter baixa capacidade de retenção de umidade, o que pode comprometer o suprimento de água para as mudas e impactar negativamente seu desenvolvimento (Koukounaras, 2020).

Portanto, a utilização agrícola da maravalha de madeira representa uma alternativa ambientalmente adequada e economicamente viável para o aproveitamento de resíduos madeireiros, contribuindo para a sustentabilidade da cadeia produtiva e para a redução da pressão sobre os recursos naturais. Seu uso, no entanto, deve ser pautado em critérios técnicos que considerem suas características físico-químicas, a necessidade de pré-tratamento e os requisitos específicos das culturas a serem cultivadas.

3.6. Compostagem de Resíduos Orgânicos

A agricultura brasileira destaca-se por sua alta competitividade, gerando empregos, riqueza, alimentos, fibras e bioenergia para o mercado interno e externo. Em 2025, cerca de 29% do PIB do país está associado ao agronegócio, que emprega mais de 28,5 milhões de pessoas (26,2% das ocupações) e responde por, aproximadamente, 49% das exportações nacionais, com receitas que ultrapassam US\$ 150 bilhões anuais (CEPEA/USP e CNA, 2025).

Entretanto, as atividades agrícolas são grandes geradoras de resíduos orgânicos, e a disposição inadequada dos resíduos produzidos pode acarretar graves impactos ao meio ambiente como, por exemplo, a contaminação dos solos e a eutrofização dos corpos d'água, desta forma, torna-se importante a disposição desses resíduos de maneira ambientalmente adequada (Dores-Silva et al., 2013).

Uma estratégia eficaz para reduzir tais impactos é o aproveitamento controlado desses resíduos na própria agricultura. Segundo Dores-Silva et al. (2013), essa prática, além de ser economicamente viável, contribui para o sequestro de carbono no solo, ajudando a conter o aumento do CO₂ na atmosfera decorrente das atividades agrícolas, melhora a estrutura física do solo, favorece a retenção de umidade, além de fornecer macro e micronutrientes às plantas.

No entanto, alguns autores alertam que, embora os resíduos orgânicos sejam fontes valiosas de nutrientes e matéria orgânica que podem aumentar a fertilidade do solo e a produtividade das culturas, sua aplicação inadequada ou indiscriminada pode levar a diversos resultados negativos para as culturas agrícolas e provocar a degradação ambiental (Olowoyo e Mugivhisa, 2019).

Nesse contexto, a estabilização dos resíduos antes de sua aplicação é recomendada por vários autores, sendo a compostagem uma solução eficiente para garantir a biodegradação controlada da matéria orgânica. Esse processo pode ser descrito como uma decomposição aeróbia conduzida por microrganismos benéficos, resultando em um material mais estável e seguro para uso agrícola (Inácio e Miller, 2009).

Entretanto, alguns autores ressaltam que, para os microrganismos realizarem a atividade metabólica de forma eficiente, é preciso um conjunto de fatores que favoreça este processo, como temperatura, pois afeta diretamente a taxa de metabolismo microbiológico; a umidade, pois influencia diretamente a atividade dos microrganismos

responsáveis pela decomposição da matéria orgânica, sendo a faixa ideal de umidade para a compostagem entre 40% e 60%; o oxigênio, que desempenha um papel significativo no controle da atividade metabólica dos microrganismos; a relação carbono/nitrogênio (C/N) dos resíduos utilizados, que é fundamental, pois a disponibilidade de carbono e nitrogênio afeta diretamente a atividade e o crescimento microbiano (Morono et al., 2011; Seibel et al., 2016; McNichol et al., 2021). Portanto, para maximizar a eficiência da atividade metabólica dos microrganismos, é essencial gerenciar de forma adequada esses fatores ambientais críticos, ajustando-os em conformidade com a comunidade microbiana e o tipo de resíduos orgânicos envolvidos.

De acordo com Zanotto et al. (2024), a compostagem corresponde a um processo natural de decomposição de resíduos vegetais e animais, cujo produto é um material rico em nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas e em húmus, que melhora a qualidade física e biológica dos solos. Para Leal (2006), a compostagem se apresenta como uma alternativa sustentável para o manejo dos resíduos, com potencial de gerar fertilizantes orgânicos, além de oferecer benefícios econômicos, sociais e ambientais.

A compostagem de resíduos orgânicos é uma tecnologia sustentável e eficaz para tratar uma variedade de resíduos orgânicos, desenvolvendo materiais crus, como restos de alimentos, folhas e resíduos agrícolas, em substâncias húmicas obtidas de forma semelhante (Cooperband, 2000).

Essa prática é valorizada por sua capacidade de reciclar resíduos biodegradáveis de maneira controlada com o auxílio de microrganismos, oferecendo uma solução alternativa de baixo custo para o gerenciamento de resíduos que poderiam, de outra forma, criar problemas ambientais (Gonawala; Jardosh, 2018).

A integração da compostagem em sistemas agrícolas e de gestão de resíduos desempenha um papel crucial na criação de uma economia circular, contribuindo, em última análise, para a sustentabilidade ambiental ao reduzir a dependência de fertilizantes químicos e diminuir a pegada de carbono associada ao descarte de resíduos (Noor et al., 2024). De modo geral, a compostagem é uma ferramenta poderosa para melhorar a saúde do solo, gerenciar resíduos orgânicos e apoiar práticas agrícolas sustentáveis.

De acordo com Nemet et al., (2021), um dos desafios da compostagem é a estabilização e a concentração de contaminantes orgânicos em resíduos sólidos urbanos, nos quais agentes como a serragem podem reduzir o tempo necessário para alcançar a estabilidade do composto, melhorando a atividade microbiana. Outro desafio é o controle de fatores como temperatura, pH, umidade e a relação carbono-nitrogênio, necessários para garantir um processo de compostagem eficiente e a qualidade final do composto (Gonawala; Jardosh, 2018).

Em geral, a compostagem de resíduos orgânicos é um método robusto para a gestão de resíduos sólidos, proporcionando benefícios significativos em termos de valor ecológico e agrônômico. No entanto, ainda existem desafios como o controle de parâmetros de processo e a qualidade do composto, que trazemos de uma atenção cuidadosa para maximizar a eficácia desta prática (Ayilara et al., 2020).

Os compostos orgânicos obtidos pela compostagem apresentam características vantajosas para a formulação de substratos usados na produção de mudas. Entre esses atributos, destaca-se a alta porosidade, presença de microporos que favorecem a aeração e a retenção de água, além de ser fonte de nutrientes (Guisolfi et al., 2020).

Os substratos desempenham um papel crucial na criação das condições ideais necessárias para o desenvolvimento das plantas, fornecendo suporte essencial, água, oxigênio e nutrientes em quantidades adequadas. Para o crescimento ideal das plantas, um substrato deve sustentá-las de forma eficaz, garantindo estabilidade e facilitando o acesso adequado à água e ao ar, pois é vital para as raízes, que precisam de umidade e oxigênio para funcionar adequadamente e manter a saúde das plantas (Karthika et al., 2018).

Em termos de fornecimento de nutrientes, os substratos devem ser ricos em macro e micronutrientes essenciais para o crescimento e as funções fisiológicas das plantas. Esses nutrientes devem estar disponíveis em uma forma que as plantas possam absorver prontamente, e seu equilíbrio é crucial para prevenir deficiências ou toxicidades que possam prejudicar o desenvolvimento das plantas (Pessarakli, 2001).

Por isso, a utilização de produtos orgânicos como substratos é recomendada, pois apresentam boas propriedades químicas, físicas e biológicas, ao mesmo tempo

em que reduz a dependência de fertilizantes minerais, resultando em custos de produção mais baixos.

3.7. Substratos para produção de mudas

Os substratos orgânicos desempenham um papel essencial na produção de mudas, oferecendo uma alternativa sustentável aos meios de crescimento tradicionais que frequentemente dependem de fertilizantes inorgânicos. A utilização de meios orgânicos pode contribuir significativamente para práticas agrícolas mais ecossustentáveis (Grunert et al., 2016).

Os substratos usados na produção de mudas funcionam como um verdadeiro “berço”, oferecendo o suporte necessário para o crescimento saudável das plantas. Além de garantir sustentação física, eles devem fornecer oxigênio, nutrientes e manter o pH adequado, evitando a presença de elementos químicos em concentrações tóxicas e possuírem condutividade elétrica apropriada, apresentando fatores que, juntos, favoreçam a disponibilidade de água e permitam trocas gasosas essenciais ao desenvolvimento das mudas (Watthier et al., 2019).

Entre as propriedades químicas do substrato, o pH exerce papel fundamental que afeta a solubilidade e disponibilidade de nutrientes pelas plantas, em geral, um pH neutro a levemente ácido é ideal para a maioria das plantas, pois permite a máxima biodisponibilidade de nutrientes essenciais, como fósforo, nitrogênio e potássio (Gillespie et al., 2020). Enquanto no que se refere aos aspectos biológicos, destaca-se a importância da presença de microrganismos benéficos, como os fungos micorrízicos arbusculares, eles transformam nutrientes em formas utilizáveis pelas plantas e aumentam a área de superfície das raízes, o que facilita uma maior captação de nutrientes (De Andrade et al., 2023).

A boa qualidade dos substratos contribui para a produção de mudas saudáveis e bem formadas, que favorecem o estabelecimento de colheitas precoces e o aumento da produtividade na agricultura. Mudas de alta qualidade levam a um melhor desempenho da cultura, colheitas mais rápidas e maior lucratividade, pois formam a base para o crescimento e desenvolvimento robusto das plantas. Por outro lado, mudas

de baixa qualidade podem comprometer significativamente a quantidade e a qualidade da produção final, gerando prejuízos para os produtores (Gallegos-Cedillo et al., 2024).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi conduzido no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Campus Itapina, localizado no município de Colatina, região noroeste do estado, com coordenadas geográficas de 19° 32' 22" de latitude sul; 40° 37' 50" de longitude oeste e altitude de 71 metros. O clima da região é Tropical Aw, de acordo com a classificação climática de Köppen, com estação chuvosa bem definida entre outubro e janeiro e precipitação média climatológica de 1029,9 mm (Alvares et al., 2013; Sales et al., 2018b).

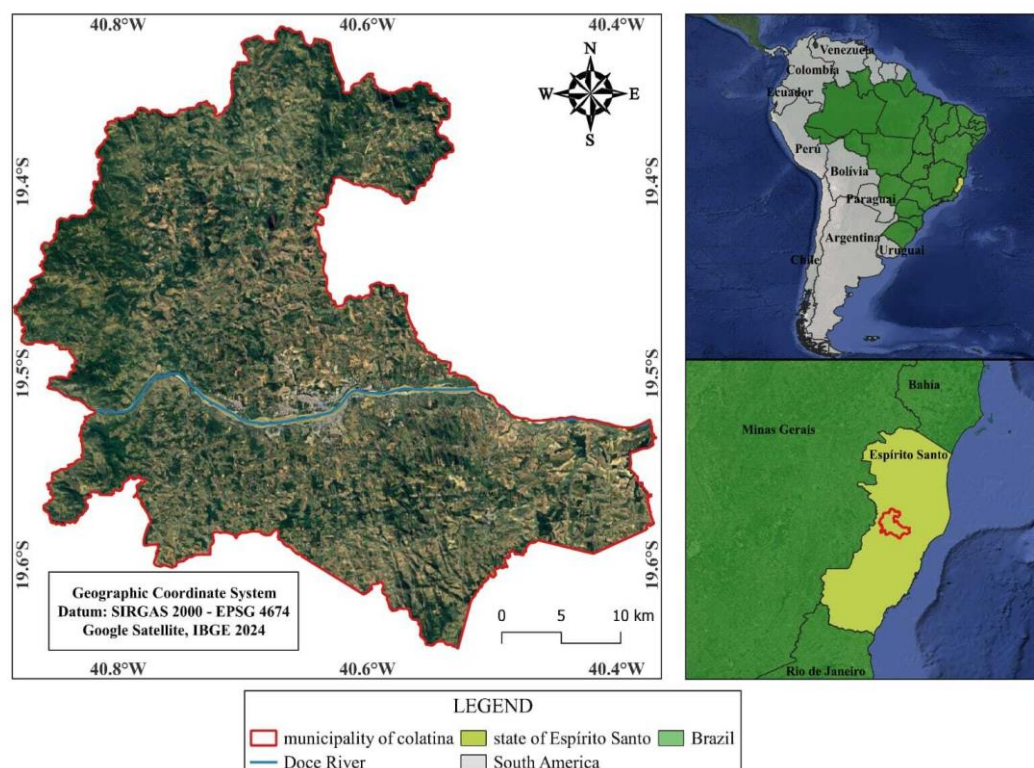


Figura 1: Localização geográfica de Colatina, localizada no estado do Espírito Santo, Brasil. Fonte: Google Satellite, IBGE 2024.

O experimento foi conduzido entre os meses de fevereiro e outubro de 2023, em viveiro de propagação de mudas irrigado e foi montado em delineamento em blocos casualizados (DBC), contendo 8 tratamentos, 7 blocos e parcelas compostas por 8

plantas para cada tratamento no bloco, contabilizando 64 mudas por bloco e um total de 448 plantas no experimento. Os tratamentos aplicados estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Descrição dos componentes de cada tratamento e respectiva relação carbono/nitrogênio inicial.

Tratamentos	Componentes dos Substratos	C/N
SC	Substrato Convencional.	23/1
T0	0% de Lodo de Curtume + 25% de Palha de Café + 25% de Cama de Frango + 50% de Maravalha.	35/1
T10	10% de Lodo de Curtume + 25% de Cama de Aviário + 20% de Palha de Café + 45% de Maravalha.	34/1
T20	20% de Lodo de Curtume + 25% de Cama de Aviário + 15% de Palha de Café + 40% de Maravalha.	33/1
T30	30% de Lodo de Curtume + 20% de Cama de Aviário + 15% de Palha de Café + 35% de Maravalha.	30/1
T40	40% de Lodo de curtume + 20% de Cama de Aviário + 10% de Palha de Café + 30% de Maravalha.	29/1
T50	50% de lodo de curtume + 10% de Cama de Aviário + 10% de Palha de Café + 30% de Maravalha.	28/1
T60	60% de lodo de curtume + 10% de Cama de Aviário + 5% de Palha de Café + 25% de Maravalha.	26/1

O tratamento convencional utilizado nesse estudo foi uma mistura recomendada por produtores de mudas de café Conilon da região, contendo 80% v/v de um substrato para produção de mudas comercial (Tropstrato[®]), 20% v/v de palha de café e enriquecido com uma dose de 1,7g por tubete do fertilizante de liberação controlada (Osmocote[®]) com formulação 15 - 09 - 12, sendo a mistura homogeneizada previamente ao enchimento dos tubetes como mostra a Figura 2.

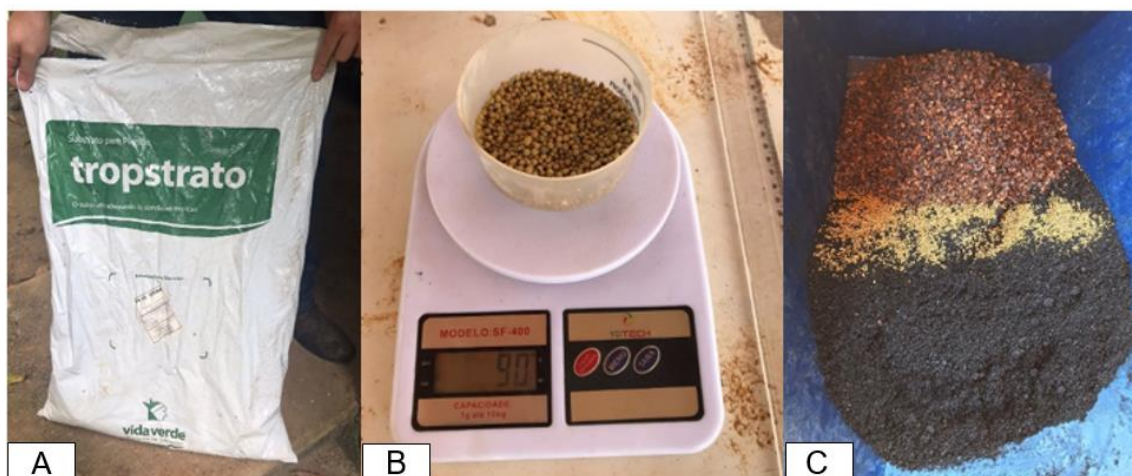


Figura 2: Materiais utilizados no preparo do substrato convencional.

Os demais tratamentos foram produzidos com diferentes níveis de concentrações de uma mistura utilizando lodo de curtume desidratado, cama de aviário, palha de café Conilon e maravalha de madeira, com a relação C/N inicial variando entre 26/1 e 35/1 como recomendado por Kiehl (2004) e apresentado na Figura 3.



Figura 3: Procedimento de montagem dos tratamentos para compostagem.

Os materiais utilizados na composição dos tratamentos foram previamente submetidos à análise química com o objetivo de promover sua adequada caracterização físico-química, garantindo maior precisão na interpretação dos

resultados experimentais. Essas análises permitiram a quantificação dos principais constituintes e propriedades relevantes de cada material, fornecendo subsídios para a compreensão de seu comportamento no sistema avaliado. Os procedimentos analíticos foram realizados conforme metodologias padronizadas e reconhecidas na literatura, assegurando a confiabilidade e a reprodutibilidade dos dados obtidos. Os resultados dessas caracterizações encontram-se apresentados na Tabela 2, onde estão descritos os parâmetros analisados e seus respectivos valores.

Tabela 2: Caracterização química dos resíduos utilizados nos substratos. Lodo de curtume (LC), cama de aviário (CA), palha de café (PC) e maravalha (Ma).

Resíduo	pH	C/N	N	P	K	Fe	Ca	Mg	S	Cu	B	Mn	Zn
----- g dm ⁻³ -----										-----mg dm ⁻³ -----			
LC	8,10	7/1	19,0	1,6	0,5	1,9	159,0	14,8	26,1	7,5	336,0	101,2	98,7
CA	7,40	12/1	24,9	4,3	21,8	1,1	72,8	6,7	5,5	57,5	24,0	400,0	370,0
PC	6,00	23/1	17,4	4,1	27,2	0,3	4,2	1,4	2,8	31,2	32,0	68,75	11,2
Ma	5,20	258/1	1,8	0,7	0,5	0,4	0,9	0,2	0,4	220,0	21,0	21,25	58,7

Valores do potencial hidrogeniônico em água (pH), relação carbono e nitrogênio (C/N), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), ferro (Fe), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), cobre (Cu), boro (B), manganês (Mn), zinco (Zn)

As misturas dos materiais descritos na Tabela 1 e representados na Figura 3 foram submetidas a um processo de compostagem com o objetivo de promover a estabilização da matéria orgânica e a formação de um composto mais homogêneo e agronomicamente adequado. O processo teve duração total de 120 dias, período considerado suficiente para a maturação do material, com base em parâmetros como redução de temperatura, coloração e odor característicos de composto estabilizado.

A compostagem foi conduzida por meio do sistema de leiras revolvidas, conforme metodologia recomendada por Rosa e Borges (2013), o qual consiste na formação de pilhas alongadas que são periodicamente revolvidas. Esse procedimento teve como finalidade garantir a aeração adequada do material, favorecer a atividade microbiológica e assegurar a uniformidade do processo de decomposição. Além disso, esse sistema permite maior controle operacional do processo, facilitando a dissipação

do calor gerado e evitando a formação de zonas anaeróbias indesejáveis. A escolha desse método também se justifica por sua ampla aplicação em estudos experimentais e por sua eficiência na transformação de resíduos orgânicos em composto de qualidade agronômica.

Durante o período de compostagem, foram realizados revolvimentos periódicos e monitoramento das condições do material, visando otimizar fatores como temperatura, umidade e oxigenação. O acompanhamento da temperatura foi realizado como indicador da atividade microbiológica, especialmente durante a fase termofílica, enquanto a umidade foi mantida em níveis adequados para não comprometer a decomposição. A oxigenação, por sua vez, foi garantida tanto pelos revolvimentos quanto pela estrutura física do material, prevenindo processos de fermentação indesejados. Essas práticas contribuíram para a eficiência do processo e para a redução do tempo necessário à estabilização. Ao final do processo, obteve-se um composto estabilizado, cujas características são apresentadas nas Figuras 4 e 5, evidenciando as transformações ocorridas ao longo da compostagem.

O processo de compostagem foi conduzido ao longo de um período de 120 dias, tempo necessário para que ocorresse a completa estabilização dos materiais orgânicos. Durante esse período, foram observadas as diferentes fases da compostagem, incluindo a fase inicial mesofílica, seguida pela fase termofílica e, posteriormente, a fase de maturação. A estabilização foi caracterizada pela redução da atividade biológica intensa, diminuição da temperatura das leiras para níveis próximos à temperatura ambiente e pela obtenção de um material com características homogêneas, coloração escura e ausência de odores desagradáveis, indicativos de maturidade do composto e adequada degradação da matéria orgânica, agora, estabilizada e com potencial de uso como substrato para produção de mudas.



Figura 4: Montagem dos tratamentos e condução do processo de compostagem em sistema de leiras revolvidas.



Figura 5: Substratos estabilizados após processo de compostagem.

Após a conclusão dessa etapa, procedeu-se à coleta de amostras representativas de cada composto orgânico produzido, seguindo critérios de amostragem que garantissem a fidedignidade dos resultados. Essas amostras foram então encaminhadas para análises químicas e nutricionais, com o objetivo de determinar a concentração de macro e micronutrientes, bem como outros parâmetros relevantes à sua utilização agrônômica.

As análises foram realizadas conforme metodologias padronizadas e amplamente aceitas na literatura científica, assegurando a confiabilidade dos dados obtidos. Os resultados dessas caracterizações encontram-se apresentados na Tabela 3, possibilitando a comparação entre os diferentes compostos orgânicos e subsidiando a interpretação dos efeitos observados nos tratamentos experimentais.

Tabela 3: Análise nutricional dos substratos orgânicos utilizados no presente estudo após processo de compostagem.

Trat	pH	N	P	K	Fe	Ca	Mg	S	Na	Cu	B	Mn	Zn
----- g dm ⁻³ -----								-----mg dm ⁻³ -----					
SC	5,6	10,7	4,2	5,9	7,4	5,1	9,0	2,0	0,6	44,4	6,0	181,2	53,1
T0	6,3	19,4	15,4	6,7	6,2	30,0	4,4	1,8	1,3	46,9	22,0	261,2	178,7
T10	7,2	21,9	19,6	4,4	5,5	78,1	7,9	4,5	1,6	48,7	69,9	258,7	217,5
T20	7,7	22,7	15,9	3,8	5,2	95,7	9,4	5,1	1,6	38,1	109,9	235,0	178,7
T30	7,9	19,6	14,7	2,5	5,5	117,9	11,0	6,3	1,5	35,6	137,3	214,4	166,5
T40	8,0	17,1	11,8	2,1	6,5	120,7	10,8	7,1	1,2	25,0	150,4	170,6	144,4
T50	8,1	17,5	11,8	1,0	5,1	140,7	11,2	8,3	1,0	26,2	181,2	175,6	130,0
T60	8,1	17,6	12,3	1,6	4,4	136,5	11,5	8,1	1,5	25,0	180,0	165,6	122,5

Valores do potencial Hidrogeniônico em água (pH), matéria orgânica (M.O), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), cálcio (Ca) e sódio (Na).

Em seguida à estabilização dos substratos orgânicos e ao preparo do substrato convencional, estes foram acondicionados em tubetes de polipropileno antitóxico com o fundo cônico perfurado no centro e nas laterais, e volume de 250 cm³, apropriados para a produção de mudas de café, sendo dispostos em suportes apropriados dentro do viveiro de mudas irrigado, como mostra a Figura 6. Antes do enchimento dos recipientes, os substratos foram previamente homogeneizados, visando garantir uniformidade física e química entre as unidades experimentais. O preenchimento dos tubetes foi realizado de forma manual, evitando a compactação excessiva do material, a fim de preservar a adequada porosidade e aeração do substrato. Após o acondicionamento, procedeu-se à irrigação inicial para promover o assentamento do substrato e eliminar possíveis bolsões de ar. Os tubetes foram organizados de acordo com o delineamento experimental adotado, assegurando a correta identificação e distribuição dos tratamentos. Durante todo o período experimental, foram mantidas condições adequadas de manejo hídrico e sanitário, de modo a favorecer o desenvolvimento uniforme das mudas.



Figura 6: Tratamentos acondicionados em tubetes e dispostos em suportes apropriados, dentro do viveiro de mudas irrigado com delineamento em blocos casualizados.

Foram utilizadas mudas de café Conilon (*Coffea Canephora* Pierre) da cultivar clonal LB1, produzidas a partir de estacas obtidas do tecido adulto de ramos ortotrópicos, sendo estas retiradas de lavouras com bom aspecto fitossanitário e nutricional. Após a retirada dos ramos das plantas mãe, estes foram preparados para o plantio eliminando-se as extremidades dos ramos ortotrópicos e realizando a padronização das estacas, com 3 a 4 cm de altura, extremidade inferior com corte reto, folhas com 1/3 do limbo foliar, ramos plagiotrópicos e acima da inserção do par de folhas com 1 cm, seguindo as recomendações de (Ferrão et al., 2017). Após o preparo as estacas foram plantadas nos referidos substratos e manejadas seguindo as recomendações destes mesmos autores conforme mostra a Figura 7.



Figura 7: Preparo e plantio das estacas de café Conilon da variedade LB1.

As condições climático-ambientais do viveiro foram monitoradas continuamente ao longo de todo o ciclo experimental, com o intuito de garantir o controle e a caracterização precisa do ambiente de cultivo. Para isso, utilizou-se um aparelho do tipo data logger, modelo HOBO Onset Data Logger, devidamente instalado em local representativo da área experimental, permitindo a coleta automatizada e sistemática de dados.

O equipamento foi programado para registrar, em intervalos regulares previamente definidos, variáveis ambientais essenciais ao desenvolvimento das plantas, tais como temperatura do ar, umidade relativa e intensidade luminosa. Esses parâmetros são fundamentais para a compreensão das condições de cultivo e para a interpretação dos resultados obtidos, uma vez que influenciam diretamente os processos fisiológicos das espécies avaliadas.

Os dados coletados foram posteriormente organizados, tratados e analisados, possibilitando a verificação da estabilidade e das variações das condições ambientais ao longo do período experimental. Os registros obtidos encontram-se apresentados na Figura 8, permitindo a visualização do comportamento das variáveis monitoradas durante todo o experimento.

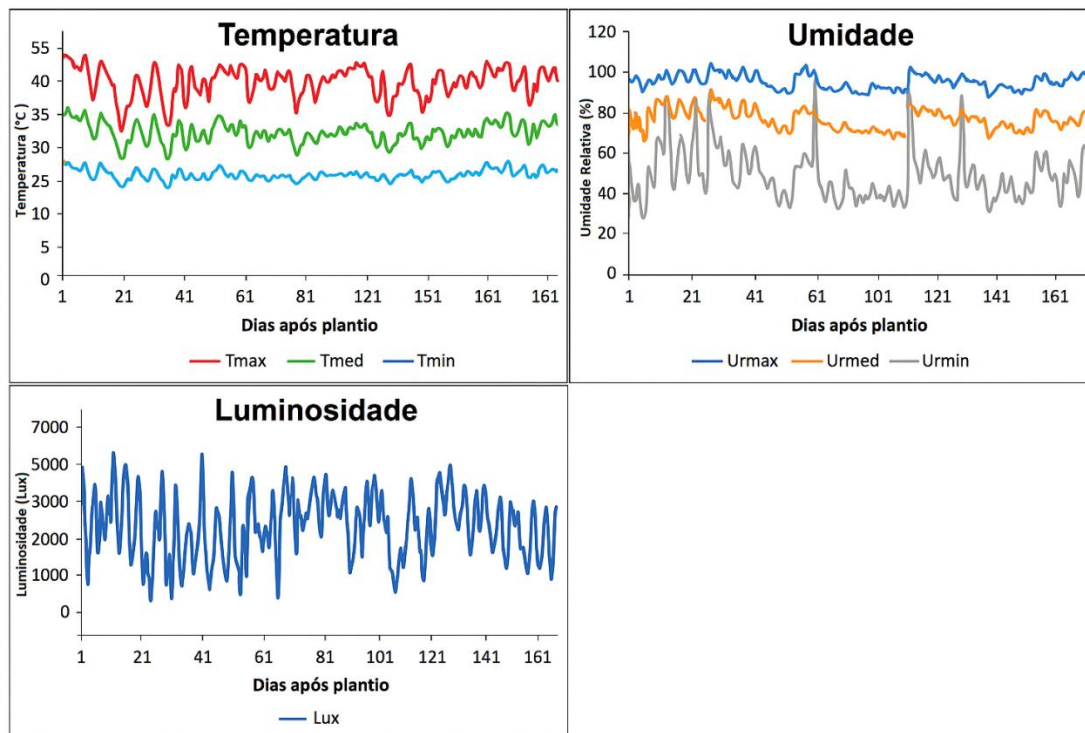


Figura 8: Monitoramento de temperatura, umidade relativa e luminosidade no viveiro de propagação de mudas do IFES-Campus Itapina durante o ciclo experimental.

Foram realizadas avaliações das características morfológicas e fisiológicas das plantas aos 150 dias após o plantio (DAP). Com relação à morfologia das plantas, as características avaliadas foram: altura da planta (AP); diâmetro do caule (DCa); diâmetro da copa (DCo); número de folhas (NF), área foliar (AF), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST).

Para a obtenção da altura da planta e do diâmetro da copa utilizou-se uma régua milimetrada. Para o diâmetro da copa, mediu-se a distância entre as extremidades do maior par de folhas. O diâmetro do caule foi obtido medindo-se a região do coleto, por meio de um paquímetro digital de precisão (Figura 9). A área foliar foi obtida por meio de um aparelho medidor de área foliar (Li-cor®, mod: Li-3100C).



Figura 9: Início das avaliações de desenvolvimento 150 dias após o plantio.

A massa seca da parte aérea foi obtida através do corte das mudas na região do coleto. Para a obtenção da massa seca radicular, as raízes foram cuidadosamente lavadas em água corrente, sobre peneira. Posteriormente, os materiais foram acondicionados em sacos de papel e alocados em estufa com circulação de ar forçado a 65°C por 72 horas. Em seguida, foi realizada a pesagem dos materiais em balança eletrônica de precisão de 0,001 g como mostra a Figura 10.



Figura 10: Preparo das amostras e avaliação das massas secas.

A partir dos parâmetros morfológicos avaliados, foi possível determinar o índice de qualidade de Dickson, conforme apresentado pela equação 1 (Dickson et al., 1960).

(Equação 01)

$$IQD = \frac{MST}{\left(\left(\frac{AP}{DCa} \right) + \left(\frac{MSPA}{MSR} \right) \right)}$$

Foram mensurados os seguintes atributos radiculares: comprimento de raízes (CR), volume de raízes (VR), projeção superficial de raízes (PSR), área superficial de raízes (AR) e diâmetro médio de raiz (DMR), obtidos com escâner de raízes EPSON® e software WinRhizo® (WR, versão 2013d, *Regent Instrument*, Quebec, Canadá)

A avaliação anatômica foi realizada para determinação da espessura dos diferentes grupos de células das folhas, sendo realizada por meio de microscopia óptica (Leica®, mod: DM500). As amostras foram coletadas em folhas completamente expandidas e fixadas ainda no campo de experimentação e as etapas subsequentes ocorreram em laboratório de fitotecnia.

As avaliações fisiológicas foram realizadas através de um fluorômetro (Opti-Science, MPM-100®), que realiza medição direta de fluorescência induzida por três fontes de excitação separadas e medição direta de transmitância em dois comprimentos de onda, estimando índices de vários compostos, como balanço de nitrogênio, índice de clorofilas, antocianina e flavonoides presentes nas folhas.

Finalizada a etapa de coleta de dados após as avaliações de todos os parâmetros mencionados, foram iniciadas as análises estatísticas dos dados. Antes da análise de variância, foi realizada a verificação ao atendimento dos pressupostos de normalidade dos erros e homogeneidade de variâncias, pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$), e também ao teste de Dunnett ao nível de 0,1%, 1% e 5% de significância ($p < 0,001$; $p < 0,01$; $p < 0,05$). As principais variáveis avaliadas neste estudo foram submetidas ao coeficiente de correlações de Pearson aos níveis de significância: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Todo o procedimento estatístico foi realizado pelo programa de código aberto R®.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Avaliação das características morfológicas das plantas

A avaliação das características morfológicas das plantas (Tabela 4) mostrou a ocorrência de diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos aplicados, indicando a existência de diferentes padrões de resposta morfofisiológica das plantas em função das condições experimentais impostas a elas. Esses resultados sugerem que os tratamentos influenciaram de maneira diferenciada o desenvolvimento estrutural das plantas, refletindo em variações nos processos de crescimento e adaptação.

Tabela 4: Parâmetros morfológicos em mudas de café Conilon cultivadas em diferentes substratos, aos 150 dias após o plantio.

TRAT	NF	AP	DCo	DCa	AF
	Und	-----cm-----		mm	cm ²
TC	6,40 a	8,64 a	26,38 a	3,33 a	312,69 a
T0	5,45 b*	5,53 b***	21,25 b***	2,81 b***	184,00 b***
T10	5,66 b ^{ns}	5,15 b***	20,20 b***	2,88 b***	158,70 b***
T20	4,85 c***	4,59 b***	18,83 b***	2,70 c***	166,43 b***
T30	5,45 b*	4,68 b***	19,62 b***	2,82 b***	151,23 b***
T40	4,60 c***	4,10 c***	16,69 c***	2,63 c***	129,17 b***
T50	4,61 c***	3,77 c***	16,31 c***	2,58 c***	148,04 b***
T60	5,08 c**	4,08 c***	17,70 c***	2,65 c***	126,37 b***
CV (%)	11,48	15,74	10,37	5,96	19,27

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância; ^{ns}, *, ** e *** são: não significativo e significativo a 5%, 1%, 0,1% pelo teste de Dunnett. Número de folhas (NF), altura da planta (AP), diâmetro da copa (DCo), diâmetro do caule (DCa), área foliar (AF)

A Tabela 4 apresenta os parâmetros morfológicos avaliados em mudas de café Conilon aos 150 dias após o plantio, cultivadas em diferentes substratos. Observa-se que o tratamento controle (TC) apresentou os maiores valores médios para todas as variáveis analisadas: número de folhas (NF), altura da planta (AP), diâmetro da copa (DCo), diâmetro do caule (DCa) e área foliar (AF), classificando-se no grupo “a” segundo o teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Em relação ao NF, apenas o tratamento T10 não diferiu estatisticamente do controle (ns) para o teste de Dunnett, enquanto T0 e

T30 apresentaram reduções significativas de menor magnitude ($p < 0,05$) e T60 mostrou redução moderada ($p < 0,01$). Os tratamentos T20, T40 e T50 apresentaram reduções mais expressivas no NF ($p < 0,001$), sendo classificados no grupo “c”.

Para AP, todos os tratamentos diferiram significativamente do controle, com reduções variando de 35,9% (T0) a 56,4% (T50), todas com alta significância ($p < 0,001$), classificados no grupo “c” pelo teste de Scott-Knott. O DCo seguiu padrão semelhante, com reduções significativas em todos os tratamentos (**, $p < 0,001$) e destaque negativo para T40, T50 e T60, que apresentaram os menores valores médios. O DCa também apresentou reduções significativas de grande magnitude em todos os tratamentos ($p < 0,001$), sendo que T20, T40, T50 e T60 foram agrupados no grupo “c” e apresentaram as menores médias pelo teste Scott-Knott. Quanto à AF, todos os tratamentos diferiram do controle ($p < 0,001$), com reduções expressivas que variaram de 41,2% (T0) a 59,6% (T60), sem variação no agrupamento de letras, já que todos os tratamentos foram classificados no grupo “b”.

Esses resultados indicam que a substituição do substrato convencional (TC) pelos tratamentos testados promoveu reduções significativas no crescimento e desenvolvimento foliar das mudas, sendo os efeitos mais acentuados observados nos tratamentos T40, T50 e T60, os quais apresentaram desempenho inferior de forma consistente em todos os parâmetros avaliados.

Dessa forma, como a área foliar mostrou-se prejudicada para os tratamentos T0, T10, T20, T30, T40, T50, T60, pode-se afirmar que houve menor radiação solar interceptada por essas plantas, reduzindo a fotossíntese e, conseqüentemente, a assimilação de carbono, ocasionando menor ganho de massa seca pelas plantas (Tabela 5). Segundo Sales et al. (2017), a área foliar é responsável por interceptar a radiação solar e, através do complexo coletor de luz e uma série de outros processos fotoquímicos e bioquímicos, produz os fotoassimilados responsáveis pela sua manutenção e crescimento das plantas.

Ainda com relação à Tabela 4, nota-se que doses superiores a 30% de lodo de curtume causaram maiores efeitos deletérios às plantas, que apresentaram resultados inferiores aos demais tratamentos para as características de número de folhas, altura da planta, diâmetro da copa e diâmetro do caule. Diversos estudos relatam efeitos nocivos que causam prejuízos ao desenvolvimento de mudas de café Conilon em

doses superiores a 30% de lodo de curtume e atribuem tal efeito principalmente à alta concentração de sódio e aos altos valores de pH dos substratos (Berilli et al., 2014; Berilli et al., 2016; Quartezeni et al., 2018a; Sales et al., 2018a, Martineli et al., 2022).

Contudo, outras características observadas nas análises químicas dos substratos (Tabela 3) também podem ter contribuído para os efeitos relatados neste estudo. Notadamente, observa-se que o aumento da concentração de lodo de curtume nos substratos levou a uma redução significativa dos teores de potássio e cobre presentes nos substratos, mas, por outro lado, também levou a um aumento expressivo na concentração de boro nos substratos.

Segundo Xu et al. (2020) e Yruela (2009), esses nutrientes são fundamentais para o desenvolvimento das plantas e possuem funções distintas, fazendo parte diretamente do metabolismo vegetal. O potássio é um macronutriente altamente demandado por grande parte das plantas cultivadas, sendo o potássio responsável por atuar nas plantas como um catalisador, desempenhando um papel crucial de ativação de enzimas que estão envolvidas nas atividades fotossintéticas das plantas. Já o cobre, mesmo sendo um micronutriente, desempenha função relevante sendo responsável por ativar enzimas que sintetizam a lignina, ajuda na fotossíntese, respiração e metabolismo das plantas. Sua indisponibilidade é fator limitante ao desenvolvimento vegetal (Zaheer et al., 2018).

No caso do boro, apesar de ser um micronutriente essencial para as plantas, existem estudos científicos que relatam que a aplicação de doses elevadas de ácido bórico pode ter efeitos fitotóxicos sobre mudas de café, semelhante ao que se observa em outras plantas agrícolas expostas a concentrações elevadas de boro. Os sintomas mais comuns são observados nas folhas e incluem clorose e necrose que se espalham a partir das pontas das folhas, com lesões marrons que se formam inicialmente nas margens e, em seguida, cobrem grande parte da superfície foliar. (Brdar-Jokanović, 2020). O elemento Boro, em concentrações elevadas, também pode causar fitotoxicidade, sendo que os principais efeitos negativos incluem inibição do crescimento das plantas e estresse oxidativo, detectada pelo aumento de enzimas antioxidantes na planta, como o superóxido dismutase e catalase, que tenta contrabalançar o estresse causado pelo excesso desse micronutriente (Surgun et al., 2016).

Os resultados de estudos em plantas de milho mostram que a toxicidade do boro se manifesta através da redução do crescimento das raízes das partes aéreas, provocando a diminuição da biomassa fresca e seca, que ocorre por alterações nas configurações bioquímicas e fisiológicas das plantas, como redução do conteúdo de clorofila e carotenoides, que são essenciais para o processo de fotossíntese (Nawaz et al., 2020).

5.2. Avaliação das características morfométricas das plantas

Com relação aos parâmetros morfométricos analisados (Tabela 5), observa-se o estabelecimento de uma relação direta entre essas características com as características de desenvolvimento das plantas (Tabela 4). Notadamente, plantas cujos tratamentos apresentaram menor desenvolvimento também apresentaram menores acúmulos de massa nas suas diferentes partes, resultando, conseqüentemente, em piores índices de qualidade de Dickson (IQD). A análise dos parâmetros morfométricos das mudas de café Conilon cultivadas em diferentes substratos, aos 150 dias após o plantio, revela diferenças significativas entre os tratamentos para massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST) e índice de qualidade de Dickson (IQD).

Tabela 5: Parâmetros morfométricos em mudas de café Conilon cultivadas em diferentes substratos, aos 150 dias após o plantio.

TRAT	MSPA	MSR	MST	IQD
	----- g -----			Índice
TC	3,17 a	1,48 a	4,65 a	0,98 a
T0	1,11 b***	0,33 b***	1,44 b***	0,27 b***
T10	0,97 b***	0,42 b***	1,39 b***	0,33 b***
T20	1,19 b***	0,37 b***	1,56 b***	0,31 b***
T30	1,01 b***	0,35 b***	1,37 b***	0,30 b***
T40	0,99 b***	0,36 b***	1,35 b***	0,31 b***
T50	0,87 b***	0,24 c***	1,11 c***	0,22 c***
T60	1,02 b***	0,23 c***	1,24 c***	0,21 c***
CV (%)	13,72	13,42	11,08	12,02

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância; ^{ns}, *, ** e *** são: não significativo e significativo a

5%, 1%, 0,1% pelo teste de Dunnett. Massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), índice de qualidade de Dickson (IQD)

A análise dos parâmetros morfométricos das mudas de café Conilon cultivadas em diferentes substratos, aos 150 dias após o plantio, revela diferenças significativas entre os tratamentos para massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST) e índice de qualidade de Dickson (IQD).

O tratamento controle (TC) apresentou valores significativamente superiores para todos os parâmetros avaliados (MSPA = 3,17 g; MSR = 1,48 g; MST = 4,65 g; IQD = 0,98), confirmando que o substrato de referência proporcionou melhor desenvolvimento morfológico das mudas. Esse desempenho pode estar associado a um equilíbrio adequado de nutrientes, textura e aeração do substrato, favorecendo tanto o crescimento radicular quanto o da parte aérea. Segundo estudos Taiz et al. (2017), a qualidade física e química do substrato é determinante para a eficiência na absorção de nutrientes e, conseqüentemente, para a produção de biomassa.

Por outro lado, todos os outros tratamentos (T0 a T60) apresentaram reduções significativas nesses parâmetros em relação ao controle. Entre esses, os tratamentos T50 e T60 obtiveram os menores valores para MSR (0,24g e 0,23g) e para MST (1,11g e 1,24g), sugerindo possível efeito inibitório em doses mais elevadas do resíduo lodo de curtume. Tal efeito pode estar relacionado à presença de elementos potencialmente tóxicos, como o sódio e as alterações no pH dos substratos. Conforme relatado por Martineli et al. (2022), esses fatores podem comprometer o metabolismo vegetal e reduzir a taxa de crescimento.

Observa-se também que o índice de qualidade de Dickson (IQD), que integra informações sobre a biomassa e a relação entre parte aérea e raiz, apresentou comportamento semelhante ao da massa seca total, com reduções acentuadas em todos os tratamentos com resíduo em comparação ao controle. Valores de IQD acima de 0,5 são geralmente associados às mudas de alta qualidade para o plantio a campo, o que foi alcançado apenas pelo tratamento controle. Desse modo, pode-se inferir que o índice de qualidade de Dickson (Tabela 5) reflete os resultados encontrados para os demais parâmetros vistos nas Tabelas 4 e 5, apresentando melhor índice de qualidade para o tratamento convencional, que se diferiu significativamente ($p < 0,05$) e se mostrou superior em relação aos demais tratamentos.

5.2. Avaliação das características biométricas do sistema radicular das plantas

A avaliação dos parâmetros biométricos do sistema radicular das mudas de café Conilon (Tabela 6) mostrou-se coerente com os demais parâmetros discutidos anteriormente. O tratamento convencional foi significativamente ($p < 0,05$) superior aos demais tratamentos para todas as características avaliadas, de acordo com o teste de Scott Knott.

Tabela 6: Parâmetros biométricos do sistema radicular em mudas de café Conilon cultivadas em diferentes substratos, aos 150 dias após o plantio.

TRAT	CR	APR	ASR	DMR	VR
	cm	-----cm ² -----		mm	cm ³
TC	1004,54 a	74,23 a	233,20 a	0,75 a	4,41 a
T0	515,76 b***	27,13 b***	85,25 b ***	0,51 c***	1,22 b***
T10	453,02 b***	26,67 b***	83,80 b***	0,59 c**	1,26 b***
T20	398,98 b***	27,54 b***	90,82 b***	0,67 b ^{ns}	1,53 b***
T30	561,25 b***	31,43 b***	98,75 b***	0,56 c***	1,40 b***
T40	364,36 b***	22,96 b***	72,15 b***	0,64 b**	1,14 b***
T50	482,86 b***	29,14 b***	91,55 b***	0,61 c***	1,38 b***
T60	387,87 b***	21,29 b***	66,88 b***	0,54 c***	0,92 b***
CV (%)	25,40	26,31	26,09	12,59	26,37

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância; ^{ns}, *, ** e *** são: não significativo e significativo a 5%, 1%, 0,1% pelo teste de Dunnett. Comprimento de raiz (CR); Área projetada da raiz (APR); Área Superficial da raiz (ASR); Diâmetro médio da raiz (DMR); Volume da raiz (VR)

Para o comprimento da raiz, o TC apresentou valor médio de 1004,54 cm, significativamente superior ($p < 0,001$) aos demais tratamentos, cujas médias variaram entre 364,36 cm (T40) e 561,25 cm (T30). Tendência semelhante foi observada para a área projetada da raiz e área superficial da raiz, cujos valores no TC foram, respectivamente, 74,23 cm² e 233,20 cm², enquanto os demais tratamentos registraram reduções acentuadas, com diferenças significativas a 0,1% de probabilidade pelo teste de Dunnett.

O diâmetro médio da raiz também foi superior no TC (0,75 mm), diferindo significativamente de todos os tratamentos, exceto T20, que apresentou valor estatisticamente semelhante (0,69 mm). Já para o volume de raiz, o TC apresentou

4,41 cm³, cerca de três a quatro vezes maior que a maioria dos tratamentos, que variaram de 0,92 cm³ (T60) a 1,53 cm³ (T20).

Possivelmente, o sistema radicular das plantas dos tratamentos T0, T10, T20, T30, T40, T50 e T60 tiveram seu desenvolvimento comprometido pelo quadro de deficiência nutricional apresentado pelas plantas, como relatado anteriormente. Entende-se que, esse efeito tenha sido provocado pelo elevado pH destes tratamentos somado ao desequilíbrio nutricional dos substratos produzidos a partir de resíduos alternativos, pois estes não foram enriquecidos com fertilizante de liberação controlada, como no caso do tratamento convencional (TC).

Esses resultados evidenciam que o substrato utilizado no tratamento controle proporcionou condições mais favoráveis para o crescimento radicular das mudas, possivelmente em função de melhor aeração, retenção de água e disponibilidade de nutrientes. A redução expressiva dos parâmetros radiculares nos demais tratamentos sugere que alterações na composição do substrato podem comprometer o desenvolvimento inicial das plantas.

Visivelmente, os resultados observados nas Tabelas 4 e 5 refletem os resultados encontrados na avaliação dos parâmetros biométricos do sistema radicular das mudas de café Conilon. Um sistema radicular bem desenvolvido promove maior desenvolvimento da muda permitindo que ela absorva maiores quantidades de nutrientes presentes na solução do solo, contudo, a falta de raízes absorventes para retirar água e nutrientes do substrato, retarda os processos fotossintéticos das plantas e diminuem a produção de fotoassimilados, resultando em uma redução no acúmulo de matéria da parte aérea (Zakaria et al., 2020).

5.3. Avaliação das características fisiológicas das plantas

A análise dos índices fisiológicos obtidos por meio do fluorômetro MPM-100[®] evidencia diferenças expressivas entre os substratos avaliados para as mudas de café Conilon aos 150 dias após o plantio. Ao analisar os resultados dos diversos índices fisiológicos (Tabela 7), podem ser observadas diferenças significativas em todos os parâmetros avaliados. Para o balanço de nitrogênio (Nitro), o teste de Scott-Knott agrupou os tratamentos em quatro classes distintas, destacando valores superiores nos

tratamentos T0 (0,36) e TC (0,32) em relação aos demais. O teste de Dunnett indicou que somente T0 não diferiu significativamente do controle (^{ns}), enquanto todos os demais tratamentos apresentaram reduções altamente significativas ($p < 0,001$) ou significativas a 5%, sugerindo que concentrações mais elevadas de lodo de curtume reduziram o acúmulo de nitrogênio nas folhas.

Para o índice de balanço de nitrogênio presente nas folhas das plantas, nota-se, que apesar de todos os tratamentos que continham lodo de curtume apresentar em sua composição uma concentração de nitrogênio maior que o tratamento convencional (Tabela 3), ocorreu uma redução significativa na absorção desse nutriente pelas plantas como mostra os testes estatísticos aplicados, revelando um possível problema na disponibilidade deste elemento para as plantas nos tratamentos que continham lodo de curtume.

Tabela 7: Médias dos índices fisiológicos, obtidas por meio de fluorômetro MPM-100[®] em folhas de mudas de café Conilon cultivadas em diferentes substratos, aos 150 dias após o plantio.

Tratamentos	Nitro	Clorofila	Flav	Antoc
TC	0,32 b	0,35 a	1,16 a	0,09 c
T0	0,36 a ^{ns}	0,38 a ^{ns}	1,06 a ^{ns}	0,08 c ^{ns}
T10	0,14 c***	0,16 b***	0,95 b*	0,15 a***
T20	0,16 c***	0,13 c***	0,72 c***	0,16 a***
T30	0,14 c***	0,11 c***	0,99 b ^{ns}	0,11 b ^{ns}
T40	0,14 c***	0,15 b***	0,99 b ^{ns}	0,10 b ^{ns}
T50	0,10 d***	0,10 c***	0,94 b**	0,12 b ^{ns}
T60	0,17 c***	0,17 b***	0,95 b*	0,15 a***
CV (%)	15,26	16,31	12,31	21,09

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância; ^{ns}, *, ** e *** são: não significativo e significativo a 5%, 1%, 0,1% pelo teste de Dunnett. Balanço de Nitrogênio (Nitro), Clorofila, Flavonoides (Flav) e Antocianina (Antoc)

O conteúdo relativo de clorofila seguiu tendência semelhante, com TC e T0 apresentando os maiores valores (0,35 e 0,38, respectivamente), formando grupos distintos no Scott-Knott. De acordo com o teste de Dunnett, T0 não diferiu do controle, mas todos os demais tratamentos apresentaram reduções significativas, sendo a

maioria com $p < 0,001$. Essa resposta sugere estreita relação entre o menor teor de nitrogênio e a redução da clorofila, corroborando a relação funcional entre esses parâmetros fisiológicos.

Os níveis de clorofilas nas folhas das plantas reduziram significativamente na presença do lodo de curtume, e podem ter influenciado diretamente os resultados de desenvolvimento das plantas apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6. Sabe-se que esses pigmentos presentes nos cloroplastos são fundamentais para a captura da luz solar utilizada na fotossíntese, sendo as clorofilas essenciais na conversão da radiação luminosa em energia química, na forma de ATP e NADPH, desempenhando um papel crucial na regulação do processo fotossintético, garantindo a absorção eficiente da radiação solar e produzindo nas plantas a energia necessária para o seu crescimento (Taiz e Zeiger, 2017).

Possivelmente, alguns dos fatores observados na Tabela 3 contribuíram para a indisponibilidade do nitrogênio para as plantas tratadas com lodo de curtume. O primeiro fator pode ser evidenciado pela faixa de pH dos tratamentos, uma vez que, os que continham lodo de curtume apresentaram pH entre 7,2 e 8,1, enquanto o tratamento convencional apresentou pH 5,6. Alguns autores explicam a relação do pH com a disponibilidade dos nutrientes para as plantas. Malavolta (1980) e Kämpf (2005), reportaram que valores de pH acima de 6,5 causam, progressivamente, a indisponibilidade de nitrogênio e diversos outros nutrientes essenciais às plantas, levando a quadros de deficiência nutricional.

Gentili et al. (2018) citaram que a atividade de microrganismos, bem como a solubilidade e disponibilidade de nutrientes, são alguns dos processos mais importantes que dependem do pH. Deste modo, fica evidente que, no presente estudo, o pH elevado pode ter reduzido consideravelmente a atividade da microbiota do substrato, que por sua vez, interferiu na solubilização dos nutrientes, contribuindo para a redução da disponibilidade e absorção pelas plantas.

Outro fator observado foi a concentração de sódio (Na) nos tratamentos que continham lodo de curtume. Martineli et al. (2022) relataram distúrbios fisiológicos e mau desenvolvimento de plantas de café Conilon causadas pela elevada concentração de sódio presente no substrato. Segundo Hessini et al. (2019), a salinidade causada pelo sódio aumenta a competição na superfície das raízes entre nitrato (NO_3^-) e cloreto

(Cl⁻), bem como por amônio (NH₄⁺) e sódio (Na⁺), levando a uma redução na absorção de nitrogênio pelas plantas.

Com relação aos índices de clorofila nas folhas das plantas (Tabela 4), nota-se que estes apresentam forte correlação positiva com os índices de balanço de nitrogênio (Figura 2), mostrando que, à medida que houve uma redução nos índices de nitrogênio nas plantas, também se observou a redução dos índices de clorofila nas folhas. Segundo Bowman et al. (2002), a intensidade da cor verde nas folhas, proveniente das clorofilas, serve como indicador indireto da quantidade de nitrogênio absorvida pelas plantas, uma vez que esse é o elemento mineral requerido em maiores quantidades para manutenção dos processos fotossintéticos das plantas, promovendo a eficiência no funcionamento do fotossistema II (PSII). Portanto, ficou evidenciado que a menor concentração de clorofila presente nos tratamentos contendo lodo de curtume se deve, principalmente, pela menor quantidade de N disponível para as plantas, em resposta aos seus altos valores de pH (Novais et al., 2007).

A análise dos compostos fenólicos (Tabela 7) evidenciou uma redução significativa ($p < 0,05$) nos índices de flavonoides nas mudas dos tratamentos que continham lodo de curtume comparado às mudas do controle, e um efeito contrário para os índices de antocianinas, que aumentaram significativamente ($p < 0,05$) nas mudas dos tratamentos contendo lodo de curtume. Entretanto, os metabólitos secundários são compostos que não são essenciais para o crescimento ou desenvolvimento imediato das plantas, mas sim, desempenham papéis importantes na interação com o meio ambiente (Taiz; Zeiger, 2017).

Nos índices de flavonoides (Flav), observou-se, pelo teste de Scott-Knott, três grupos distintos, com o controle (1,16) e T0 (1,06) compondo o grupo superior. Pelo teste de Dunnett, T0 não diferiu do controle, mas a maioria dos demais tratamentos apresentou reduções significativas, especialmente T20, que registrou queda de, aproximadamente, 38% ($p < 0,001$). Essa diminuição sugere que, sob condições de menor equilíbrio nutricional, as plantas podem ter alterado a rota de biossíntese de compostos secundários, reduzindo a produção de flavonoides.

Ainda em relação aos flavonoides, os resultados encontrados contrastam com estudos anteriores, uma vez que, uma correlação bem estabelecida seria negativa, apresentando menor quantidade de metabólitos fenólicos sendo produzida em

condições de fornecimento abundante de nitrogênio (Gobbo-Neto e Lopes, 2007). Neste estudo, os resultados observados mostram uma correlação positiva moderada (Figura 2) entre os índices de balanço de nitrogênio e flavonoides, visto que, à medida que o balanço de nitrogênio diminuiu, também se reduziu os teores de flavonoides nas plantas.

Gobbo-Neto e Lopes (2007) relataram que a deficiência de micronutrientes, tais como manganês e molibdênio, pode impactar diretamente a produção de metabólitos secundários, reduzindo sua concentração. Esse relato pode explicar os resultados encontrados, uma vez que os elevados valores de pH dos tratamentos contendo lodo de curtume causaram a indisponibilidade de diversos micronutrientes para as plantas.

Em contrapartida, para índices antocianinas (Antoc), a resposta foi oposta aos relatados para os flavonoides, sendo que, os maiores teores foram observados em T10, T20 e T60 (0,15 a 0,16), todos diferindo estatisticamente do controle e de T0, com significância máxima ($p < 0,001$) no teste de Dunnett. Esse aumento de antocianinas em determinados tratamentos pode indicar ativação de mecanismos de defesa frente a estresses fisiológicos, uma vez que esses pigmentos estão associados à proteção antioxidante e fotoprotetora.

Segundo Freitas (2019), as antocianinas são pigmentos presentes nas diferentes partes das plantas (caules, folhas, flores e frutos), sendo seu acúmulo influenciado por fatores ambientais como iluminação intensa ou insuficiente, carência de certos nutrientes, como nitrogênio, fósforo e enxofre, além da temperatura e do pH do meio. No caso do presente estudo, é possível que a alteração da antocianina observada nos tratamentos contendo lodo de curtume esteja sendo influenciada pela deficiência de nutrientes em decorrência do elevado valor de pH, ou mesmo em decorrência de um desequilíbrio nutricional desses substratos, uma vez que não receberam fertilização convencional.

De forma geral, os resultados apontam que o uso de lodo de curtume em concentrações elevadas comprometeu significativamente o balanço de nitrogênio e o conteúdo de clorofila, o que pode afetar a fotossíntese e o crescimento das mudas. Paralelamente, a modulação dos compostos fenólicos (flavonoides e antocianinas)

sugere que o estresse nutricional e possivelmente salino induzido pelo resíduo desencadeou respostas adaptativas.

5.4. Avaliação das características anatômicas foliares das plantas

A análise anatômica foliar das mudas de café Conilon aos 150 dias após o plantio revelou que os diferentes substratos exerceram influência marcante sobre a estrutura das folhas.

Com relação às características anatômicas, não foram observadas diferenças na espessura das epidermes na face abaxial e adaxial. Entretanto, houve redução progressiva na espessura da lâmina foliar, assim como do mesofilo, tanto no parênquima paliçádico quanto no parênquima lacunoso, com o aumento das concentrações de lodo de curtume.

Tabela 8: Parâmetros anatômicos foliares de mudas de café Conilon cultivadas em diferentes substratos, aos 150 dias após o plantio.

Tratamentos	L.F	EP.AD	P.PAL	P.LAC	EP.AB
-----(μm)-----					
TC	216,94 a	18,83 a	67,42 a	109,43 a	13,55 a
T0	206,11 b*	17,25 a ^{ns}	67,54 a ^{ns}	97,35 b ^{ns}	15,66 a ^{ns}
T10	200,66 b***	16,61 a ^{ns}	59,84 b ^{ns}	101,84 b ^{ns}	14,32 a ^{ns}
T20	197,17 b***	17,79 a ^{ns}	60,38 b ^{ns}	97,14 b ^{ns}	13,55 a ^{ns}
T30	183,86 c***	17,77 a ^{ns}	57,08 b*	85,20 c***	16,07 a ^{ns}
T40	172,41 d***	16,32 a ^{ns}	42,49 c***	91,98 c***	14,44 a ^{ns}
T50	168,76 d***	16,77 a ^{ns}	41,18 c***	87,92 c***	14,88 a ^{ns}
T60	167,90 d***	18,02 a ^{ns}	41,15 c***	87,24 c***	13,89 a ^{ns}
CV (%)	3,54	12,80	11,34	7,45	14,04

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns}, *, ** e *** são: não significativo e significativo a 5%, 1%, 0,1% pelo teste de Dunnett. Lâmina Foliar (L.F), Epiderme Adaxial (EP.AD), Parênquima Paliçádico (P.PAL), Parênquima Lacunoso (P. LAC) e Epiderme Abaxial (EP.AB)

Para a espessura das epidermes adaxial (EP.AD) e abaxial (EP. AB), o teste de Scott-Knott não indicou diferenças estatísticas entre os tratamentos (mesma letra “a”), e o teste de Dunnett corroborou a ausência de significância para todos, sugerindo que as

epidermes foliares são mais conservadas estruturalmente frente às variações de substrato e não são impactadas por esse tipo de influência.

A espessura da lâmina foliar (L.F) apresentou variações significativas, com o controle (216,94 μm) exibindo o maior valor, formando grupo distinto no teste de Scott-Knott. Pelo teste de Dunnett, apenas T0 não diferiu significativamente do controle ($p > 0,05$), enquanto todos os demais tratamentos apresentaram reduções significativas, a maioria delas altamente significativas ($p < 0,001$). Essa diminuição da lâmina foliar, especialmente nos tratamentos T40, T50 e T60 (reduções acima de 20%), pode estar associada a estresses fisiológicos e restrições no crescimento celular.

O parênquima paliçádico (P.PAL) mostrou três agrupamentos distintos pelo Scott-Knott, com TC e T0 no grupo superior. Já o Dunnett indicou que apenas T30, T40, T50 e T60 apresentaram reduções significativas, com destaque para os dois últimos, que atingiram valores próximos de 41 μm ($p < 0,001$), indicando redução expressiva da densidade e organização do tecido fotossintético.

Para o parênquima lacunoso (P.LAC) observa-se que o controle apresentou o maior valor (109,43 μm), seguido de reduções gradativas à medida que a concentração de lodo de curtume aumentou. O teste de Scott-Knott separou os tratamentos em três grupos, e o Dunnett apontou diferenças altamente significativas ($p < 0,001$) para T30, T40, T50 e T60. Essas alterações sugerem comprometimento na porosidade e no arranjo interno do mesofilo, possivelmente prejudicando a difusão de gases e a eficiência fotossintética (Ren et al., 2018).

Esses resultados observados para as características anatômicas das folhas aparentemente estão relacionados ao desequilíbrio nutricional causado pelo alto valor de pH, somado à presença de maiores concentrações de sódio nesses tratamentos. Segundo Reinhardt e Rost (1995), os efeitos inibitórios da salinidade na estrutura foliar podem ser observados tanto na inibição do crescimento de elementos vasculares quanto na inibição da atividade do procâmbio, além da diminuição do tamanho das células do mesofilo.

Estudos realizados por Lima et al. (2014) relatam que, após 25 dias de estresse salino, as plantas de *Coffea arábica* L. apresentavam menor espessura foliar e as células do parênquima paliçádico estavam mais separadas, com paredes mais finas e com menor espessura em relação às plantas que não estavam sob estresse salino.

Resultados semelhantes aos resultados obtidos no estudo em questão com mudas de café foram relatados por Barhoumi et al. (2007) e Agami (2014), que observaram que a salinidade levou à redução do mesofilo foliar e, conseqüentemente, da espessura da folha.

Variações na espessura do mesofilo, principalmente do parênquima paliçádico, podem afetar diretamente o desenvolvimento das plantas, pois estão intimamente relacionadas às atividades fotossintéticas. Um maior desenvolvimento desses tecidos pode permitir maior fixação de CO₂ pelas plantas, reduzindo o tempo de abertura dos estômatos e aumentando a eficiência do uso da água por meio da redução da transpiração (Castro et al., 2009). Desse modo, as correlações apresentadas neste estudo entre as variações nas características anatômicas foliares observadas, podem ter influenciado diretamente a fisiologia e o desenvolvimento das plantas.

5.5. Análise de correlação de Pearson entre as principais características avaliadas

As análises de correlação de Pearson (Figura 11) entre as variáveis morfofisiológicas e anatômicas das mudas de *Coffea Canephora* revelaram padrões estatisticamente significativos, indicando interdependência entre os atributos avaliados. Observou-se que os teores de antocianinas apresentaram correlação negativa significativa com a maioria dos parâmetros avaliados, como teor de nitrogênio, clorofila, flavonoides, espessura da lâmina foliar, área foliar, massa seca total, volume e comprimento de raízes, bem como com o índice de qualidade de Dickson (IQD).

Esse comportamento sugere que a elevação nos níveis de antocianinas pode estar associada às condições de estresse abiótico nas plantas, possivelmente causado por deficiência nutricional, uma vez que a síntese de antocianinas é frequentemente ativada em resposta a esse quadro de adversidade (Chaves et al., 2011).

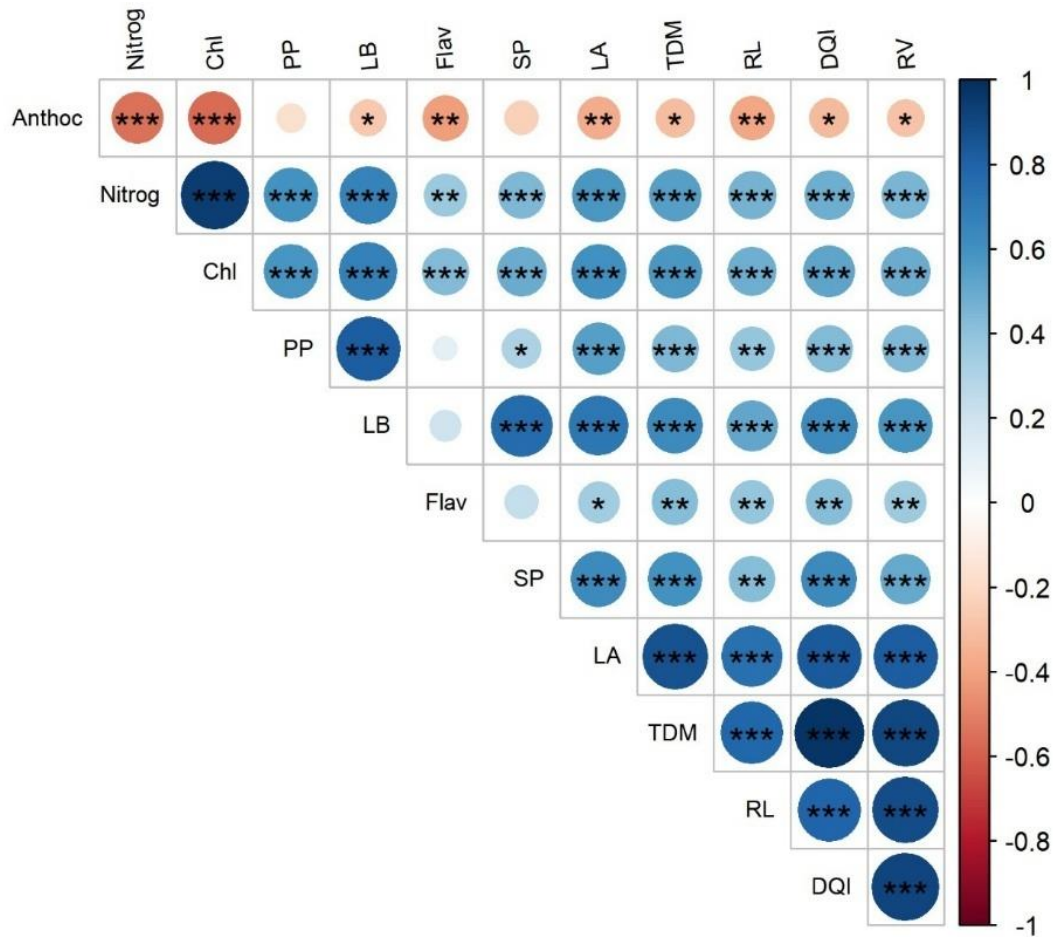


Figura 11: Associação (correlação de Pearson) entre as principais variáveis avaliadas.

Significativo em * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$. Para Balanço de nitrogênio (Nitrog), Clorofila (Chl), Lâmina foliar (LB), Parênquima Paliçádico (PP), Parênquima Lacunoso (SP), Flavonoides (Flav), Área foliar (LA), Massa seca total (TDM), Comprimento de raiz (RL), Volume de raiz (RV), índice de qualidade de Dickson (DQI)

Por outro lado, os teores de clorofila apresentaram correlação positiva e altamente significativa com atributos indicativos de vigor das plantas, como IQD, MST e as variáveis radiculares, comprimento e volume de raízes, reforçando o papel da clorofila como indicador do estado nutricional e da capacidade fotossintética das plantas (Taiz et al., 2017). Além disso, o teor de nitrogênio, fundamental para a síntese de clorofila e para o metabolismo das plantas, mostrou-se positivamente correlacionado com variáveis estruturais, como espessura da lâmina foliar (LF), área foliar (AF) e os parênquimas paliçádico e lacunoso, evidenciando sua importância para o crescimento e desenvolvimento de mudas vigorosas (Marschner, 2012).

Os resultados deste estudo apresentam relações importantes entre as características fisiológicas, anatômicas e morfológicas das mudas de *Coffea Canephora*, com impactos diretos sobre sua qualidade. Os dados obtidos indicam, de forma evidente, que a qualidade das mudas de *Coffea Canephora* foi significativamente afetada por alterações fisiológicas associadas ao desequilíbrio nutricional e ao estresse oxidativo, os quais, presumivelmente, resultam dos elevados valores de pH observados nos substratos utilizados.

6. CONCLUSÕES

Em mudas de café Conilon, os substratos produzidos com materiais alternativos mostram-se inferiores ao substrato convencional, apresentando níveis de qualidade mais baixos.

Notadamente, o baixo desenvolvimento das mudas em substratos contendo lodo de curtume tem principal relação com elevados valores de pH, somado ao desequilíbrio nutricional destes substratos e à presença do sódio.

Estudos futuros devem se atentar a estas importantes condições dos substratos, buscando alternativas eficientes para a adequação dos valores de pH, redução na concentração do sódio e níveis de fertilidade já recomendados pela literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agami R. A. (2014) Applications of ascorbic acid or proline increase resistance to salt stress in barley seedlings. *Biologia plantarum* 58(2):341-347. <https://doi.org/10.1007/s10535-014-0392-y>

Almeida, N. C. (2017) Estudo de possibilidades de tratamentos Microbiológico e com adsorventes para chorume e influências ecotóxicas do seu descarte no ambiente. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas), Rio Claro-SP, Universidade Estadual de São Paulo – UNESP, 110p.

Altieri M. A., Nicholls C. I., Henao A., Lana M. A. (2015) Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for sustainable development*, 35(3): 869-890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>

Alvares C. A., Stape J. L., Sentelhas P. C. (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22(6):711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Alves, R. O., Dias M. B., Santos C. D., Silva M. I. D. S., Silva, W. B. T. (2021) Produção de adubo orgânico: benefícios para o meio ambiente e agricultura familiar no sertão de Alagoas. *Revista de Agroecologia no Semiárido*, 5(3):1-8. <https://doi.org/10.35512/ras.v5i3.5971>

Andrade, C. R., de Melo, B. M. R., Mendes, C. T. E., Castro, D. G., Coelho, E. L., Francisco, K. C. P. (2021). Crescimento e qualidade de mudas de diferentes cultivares de cafeeiro sob diferentes substratos e recipientes. *Research, Society and Development*, 10(2): e2810212073. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i1.XX>

Araújo F. F. (2011) Disponibilização de fósforo, correção do solo, teores foliares e rendimento de milho após a incorporação de fosfatos e lodo de curtume natural e

compostado. Acta Scientiarum. Agronomy, 33(2):355-60.
<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.1021>

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) NBR 15106 - Símbolos de cuidado para limpeza e conservação de vestuários em couro e para montagem de etiquetas. Rio de Janeiro. 2p.

Associação Brasileira de Proteína Animal (2024) Relatório Anual 2024. Disponível em: <https://abpa-br.org/relatorios>. Acesso em junho de 2025.

Ayilara, M. S., Olanrewaju, O. S., Babalola, O. O., Odeyemi, O. (2020) Waste management through composting: Challenges and potentials. Sustainability, 12(11):4456. <https://doi.org/10.3390/su12114456>

Bassaco, A. C., Antonioli, Z. I., Júnior, B. D. S. B., Eckhardt, D. P., Montagner, D. F; Bassaco, G. P. (2015) Caracterização química de resíduos de origem animal e comportamento de *Eisenia andrei*. Ciência e Natura, 37(1):45-51.
<http://dx.doi.org/10.5902/2179460X13241>

Barhoumi Z., Djebali W., Chaïbi W., Abdelly C., Smaoui A. (2007) Salt impact on photosynthesis and leaf ultrastructure of *Aeluropus littoralis*. Journal of Plant Research, 120(4):529-537. <https://doi.org/10.1007/s10265-007-0094-z>

Berilli S. S, Quiuqui JPC, Rembinski J. (2014) Use of sludge tan nery substrate as alternative to prepare conilon coffee seedlings. Coffee Science 9(4):472-479.
<https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/728>

Berilli S. S., Zooca A. A. F., Rembinski J., Salla P. H. H., Almeida J. D., Martineli L. (2016) Influence of chromium accumulation in index of secondary compounds in seedlings of Conilon coffee. Coffee Science, 11(4):512-520.
<https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1156>

Berilli S. S., Martineli L., Ferraz T. M., Figueiredo F. A. M. M. A., Rodrigues W. P., Berilli A. P. C. G., Freitas S. J. (2018) Substrate stabilization using humus with tannery sludge in conilon coffee seedlings. *Journal of Experimental Agriculture International*, 21(1):1-10. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/39851>

Berilli S. S., Sales R. A., Ribeiro H. R. (2020a) Foliar fertilization in the propagation of conilon coffee in alternative substrates. *International Journal of Agriculture and Natural Resources* 47(1):58-68. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v47i1.2085>

Berilli S. S., Salles R. A., Sales R. A., Zooca A. A. F., Ribeiro H. R., Berilli A. P. C. G., Costa T. S., Mendes T. P., Quartezi W. Z. (2020b) Propagation of coffee conilon “Vitória” in conventional and alternative substrates. *Coffee Science*, (15):e151732. <https://doi.org/10.25186/v15i.1732>

Berilli S. S., Oliveira D. S., Martineli L., Pereira L. L., Cunha M., Pireda S. (2023) Influence of humus on chromium absorption by coffee seedlings grown on substrate containing tannery sludge. *Revista Ceres*, 70(1):87-97. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202370010010>

Berilli S. S., Rodrigues L. A., Sales R. A., Berilli A. P. C. G., Martineli L., Henrique E. P., Amorim N. S., Freitas S. (2025) Leaf fertilization with vinasse associated with liquid tannery sludge in the development and physiology of conilon coffee seedlings. *Journal of Plant Nutrition*, 48(15):2689-2703. <https://doi.org/10.1080/01904167.2025.2492890>

Borges, J. D. (2003) Efeitos do lodo de curtume nas culturas do milho (*Zea mays* L.) e do capim braquiário [Brachiaria brizanta (Hochst ex A. Rick) Sapf.] cultivar Marandu em latossolo vermelho-amarelo. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Goiás, Goiânia - Go, 244p.

Bosa, I. R., Monaco, P. A. V. L., Haddade, I. R., Barth, H. T., Vieira, G. H. S., Meneghelli, C. M., Berilli, S. (2019). Coffee straw mineralization applied to the soil

surface. Emirates Journal of Food and Agriculture, 31(5):380-385.
<https://doi.org/10.9755/ejfa.2019.v31.i5.1956>

Bowman D. C., Cherney C. T., Ruffy Jr T. W. (2002) Fate and transport of nitrogen applied to six warm-season turfgrasses. Crop Science, 42(3):833-841. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.8330>

Bragança, S. M., Carvalho, C. H. S. D., Fonseca, A. F. A. D., Ferrão, R. G. (2001) Variedades clonais de café Conilon para o Estado do Espírito Santo. Pesquisa Agropecuária Brasileira 36(5):765-770. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000500006>

Braun, H., Zonta, J. H., Soares, J. S. L., Reis, E. F., Silva, D. P. (2009) Desenvolvimento inicial do café Conilon (*Coffea Canephora* Pierre) em solos de diferentes texturas com mudas produzidas em diferentes substratos. Idesia, 27(3):35-40.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292009000300006>

Brdar-Jokanović, Milka. (2020) Toxicidade e Deficiência de Boro em Plantas Agrícolas. International Journal of Molecular Sciences, 21(4):1424.
<https://doi.org/10.3390/ijms21041424>

CICB - Centro Das Indústrias De Curtumes Do Brasil (2025) Disponível em: <https://cicb.org.br/producao>. Acesso em: junho 2025.

CEPEA/CNA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. (2025) PIB do Agronegócio: Avanço do PIB do agronegócio atinge 6,5% no 1º trimestre de 2025. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.cepea.org.br/br/releases/pib-agro-cepea-avanco-do-pib-do-agronegocio-atinge-6-5-no-1-trimestre.aspx>. Acesso em: julho de 2025.

CEPEA/CNA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada e Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. (2025) PIB do agronegócio brasileiro registra

crescimento de 6,49% no primeiro trimestre de 2025. Cepea/Esalq-USP; CNA. Disponível em: <https://www.cepea.org.br/upload/kceditor/files/ct-pib-do-agro-17jun25.pdf>. Acesso em: julho de 2025.

Claas, I. C., Maia, R. A. M. (1994) Manual básico de resíduos industriais de curtume. Porto Alegre: 664p.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (2025) Acompanhamento da safra brasileira: Café - Safra 2024 - Quarto levantamento: 11(4):37-47 . <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/4o-levantamento-de-cafe-safra-2024/boletim-cafe-janeiro-2025>

Cooperband, L. R. (2000) Composting: Art and Science of Converting Organic Waste into a Valuable Soil Resource. Laboratory Medicine, 31(5):283–290. <https://doi.org/10.1309/W286-LQF1-R2M2-1WNT>

Corrêa, A. R. (2001) O complexo coureiro-calçadista brasileiro. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, (14):65-92. <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/10196>

Correa B. A., Parreira M. C., Martins J. D. S., Ribeiro R. C., Silva E. D. (2019) Reaproveitamento de resíduos orgânicos regionais agroindustriais da Amazônia Tocantina como substratos alternativos na produção de mudas de alface. Brazilian Journal of Sustainable Agriculture, 9(1):97-104. <https://doi.org/10.21206/rbas.v9i1.7970>

Corrêa-Junior, D., Parente, C. E. T., Frases, S. (2024) Perigos associados à aplicação combinada de fungicidas e cama de frango em áreas agrícolas. Jornal de xenobióticos, 14(1):110–134. <https://doi.org/10.3390/jox14010007>

Dardengo M. C. J. D., Sousa E. D., Reis E. D., Gravina G. D. A. (2013) Growth and quality of conilon coffee seedlings produced at different containers and shading levels. Coffee Science, 8(4):500-509. Disponível

em: <https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/512>. Acesso em: jul. 2025.

Daronch, A. G. C. C., Chiapetti, T. P., Rinaldi, L. K., Barbosa, J. D. A., Ritter, G., Rocha, M. E. L., Perego, I. (2017) Chemical Characterization of Soil with Superficial Application of Avian Bed in Succession to Canola Cultivation. *Journal of Agricultural Science*, 9(10):220-225. <https://doi.org/10.5539/jas.v9n10p220>

Damatta, F. M., Ramalho, J. D. C. (2006) Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(1): 55-81. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100006>

De Andrade, L. A., Sales, L. R., Santos, C. H. B., Rigobelo, E. C., Frezarín, E. T. (2023) Plant Growth-Promoting Rhizobacteria for Sustainable Agricultural Production. *Microorganisms*, 11(4):1088,1-16. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088>

Dickson A., Leaf A. L., Hosner J. F. (1960) Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *For Chron* 36(1):10-13. <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>

Dores-Silva, P. R., Landgraf, M. D., Rezende, M. O. D. O. (2013) Processo de estabilização de resíduos orgânicos: vermicompostagem versus compostagem. *Química Nova*, 36(5):640-645. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000500005>

Ebeid, A. F. A., Sayed, R. M. M., Abdel-Hameed, N. S., Rabie, A. R. (2015). Effect of using composted sawdust as soil amendment on the growth of certain woody trees in aswan. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 93(3):175-189.

Engel, W., de Paula, G., Knaul, E., Hanel, S. N. (2023) Estudo de caso de custos de produção da avicultura: integrado e integradora na região oeste do Paraná. *Revista De Gestão E Secretariado*, 14(6):8802–8823. <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i6.2267>

Fernandes, A. L. T., Santinato, F., Ferreira, R. T., Santinato, R. (2013) Redução da adubação mineral do cafeeiro arábica com a utilização de palha de café. *Coffee Science*, 8(3):324-336. <https://sbicafe.ufv.br/items/8f91f685-297b-42f8-afb6-615190af2aed>

Ferrão, R. G. (2012) Café conilon: técnicas de produção com variedades melhoradas. Circular Técnica - Incaper, n03-I, 4ed, 21p. <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/1071/1/BRT-circulartecnicacafeconilon-rferrao.pdf>

Ferrão, R. G., Ferrão, M. A. G., Fonseca, A. F. A. Volpi, P. S. (2017) Cultivares de Café Conilon. In: Ferrão, R. G., Fonseca, A. F. A., Ferrão, M. A. G., De Muner, L. H. Café Conilon, Incaper-ES, 2ed., (9):219-237.

Ferreira A. D. S., Camargo F. A. O., Tedesco M. J., Bissani C. A. (2003) Effects of tannery and coal mining residues on chemical and biological soil properties and on corn and soybean yields. *Revista Brasileira de Ciência Solo* 27(4):755–763. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400020>

Freitas V. (2019) O mundo colorido das antocianinas. *Revista de Ciência Elementar*, 7(2):1-17. <http://doi.org/10.24927/rce2019.017>

Gallegos-Cedillo, V. M., Gallegos-Cedillo, V. M., Nájera, C., Egea-Gilabert, C., Gruda, N. S., Gallegos, J., Gruda, N. S., Signore, A., Signore, A., Fernández, J. A., Ochoa, J., Nájera, C. (2024) Analysis of global research on vegetable seedlings and transplants and their impacts on product quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(9):4950–4965. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13309>

Ganem, R. S. (2007). Curtumes: aspectos ambientais. Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados, Centro de Documentação e Informação. Brasília, 4-5p. file:///C:/Users/User/Downloads/curtumes_aspectos_senna.pdf

Gentili R., Ambrosini R., Montagnani C., Caronni S., Citterio S. (2018) Effect of soil pH on the growth, reproductive investment and pollen allergenicity of *Ambrosia artemisiifolia* L. *Frontiers Plant Science* (9):e1335. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01335>

Gillespie, D. P., Kubota, C., Miller, S. A. (2020). Effects of low pH of hydroponic nutrient solution on plant growth, nutrient uptake, and root rot disease incidence of basil (*Ocimum basilicum* L.). *HortScience*, 55(8):1251-1258. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14986-20>

Glazar, E. (2005) Brava gente polonesa: Memórias de um imigrante, formação histórica de São Gabriel da Palha e expansão do café conilon no Espírito Santo. *Flor e Cultura-Vitória*, ES, 207p.

Gobbo-Neto L., Lopes N. P. (2007) Plantas medicinais: fatores de influência no conteúdo de metabólitos secundários. *Química Nova*, 30(2):374-381. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000200026>

Gonawala, S. S., Jardosh, H. (2018) Organic Waste in Composting: A brief review. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 8(01):36-38. <https://doi.org/10.14741/ijcet.v8i01.10884>

Grunert, O., Reheul, D., Van Labeke, M., Perneel, M., Hernandez-Sanabria, E., Vlaeminck, S. E, Boon, N. (2016) Growing media constituents determine the microbial nitrogen conversions in organic growing media for horticulture. *Microbial Biotechnology*, 9 (3): 389-399. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12354>

Guisolfi, L. P., Lo Monaco, P. A. V., Krause, M. R., Meneghelli, C. M., Almeida, K. M., Meneghelli, L. A. M., Vieira, G. H. S. (2020) Agricultural wastes as alternative substrates in the production of conilon coffee seedlings. *Bioscience journal*, 36(3):792-798. <https://doi.org/10.14393/BJ-v36n3a2020-47718>

Hessini K., Issaoui K., Ferchichi S., Saif T., Abdelly C., Siddique K. H., Cruz C. (2019) Interactive effects of salinity and nitrogen forms on plant growth, photosynthesis and osmotic adjustment in maize. *Plant Physiology and Biochemistry*, (139):171-178. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.005>

Hietikko, J., Tuominen, E., Valovirta, I., Vinha, J. (2024) Timber-framed exterior walls insulated with wood shavings: A field study in a nordic climate. *Building and Environment*, (254):e111371. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111371>

Holátko, J., Hammerschmiedt, T., Kucerik, J., Baltazar, T., Radziemska, M., Havlíček, Z., Kintl, A., Jaskulska, I., Malíček, O., Brtnický, M. (2022). Soil Properties and Maize Yield Improvement with Biochar-Enriched Poultry Litter-Based Fertilizer. *Materials*, 15 (24):e9003. <https://doi.org/10.3390/ma15249003>

Inácio, C. D. T., Miller, P. R. M. (2009) *Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos*. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 144p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento sistemático da produção agrícola: Estatística da Produção Agrícola. (2024) Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/bovinos/br>. Acesso em: julho. 2025. (site)

Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (2025) Disponível em: <https://incaper.es.gov.br/cafeicultura-conilon>. Acesso em: junho de 2025. (site)

Kämpf A. N. (2005) *Commercial production of ornamental plants*. Guaíba: Agrolivros Brasil (2):45-72.

Karthika, K. S., Rashmi, I., Parvathi, M. S. (2018). Biological functions, uptake and transport of essential nutrients in relation to plant growth. *Plant nutrients and abiotic stress tolerance*, (1):1-49. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_1

Kiehl E. J. (2004) Composting Manual: Compost Maturation and Quality, Piracicaba – SP. (4): 173p.

Konrad, E. E., Castilhos, D. D. (2002) Alterações químicas do solo e crescimento do milho decorrentes da adição de lodos de curtume. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 26(1):257-266. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000100027>

Koukounaras, A. (2020) Advanced Greenhouse Horticulture: New Technologies and Cultivation Practices. Horticulturae, 7(1):1-5 <https://doi.org/10.3390/horticulturae7010001>

Lacalle, R. G., Garbisu, C., Becerril, J. M. (2020) Effects of the application of an organic amendment and nanoscale zero-valent iron particles on soil Cr(VI) remediation. Environmental Science and Pollution Research, (27):31726–31736. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09449-x>

Leal, M. A. A. (2006) Produção e eficiência agrônômica de compostos obtidos com palhada de gramínea e leguminosa para o cultivo de hortaliças orgânicas. Tese (Doutorado em Ciência em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 133p.

Lin, Y., Watts, D. B., Runion, G. B. (2022) Influence of poultry litter on nutrient availability and fate in plant-soil systems: A meta-analysis. Journal of Soil and Water Conservation, 77(3): 230–239. <https://doi.org/10.2489/jswc.2022.00043>

Malafaia, G., Rodrigues, A. S. D. L., Araújo, F. G. D., Leandro, W. M. (2015) Growth of corn plants in soil containing tannery sludge vermicompost and irrigated with sewage wastewater. Revista Ambiente e Água, 10(4):847-862. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1625>

Malavolta, E. (1980) Elementos de nutrição mineral de plantas. Piracicaba - SP, Agrônômica Ceres, 251p.

Martineli L., Berilli S. S., Sales R. A., Cunha M., Monaco P. A. V. L., Freitas S. J., Martineli, M, Berilli APCG, Pireda S, Oliveira DS, Pereira L. L (2022) Influence of chromium and sodium on development, physiology, and anatomy of Conilon coffee seedlings. *Environmental Science and Pollution Research International* (29):44986–44997. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18563-x>

Matiello, J. B., Santinato, R., Garcia, A. W. R., Almeida, S. R., Fernandes, D. R. (2010) *Cultura de café no Brasil: Manual de recomendações*. Rio de Janeiro: MAPA/Procafé, 542p.

Mauri, A. L. (2015) Produção de mudas: clones e sementes. In: Fonseca, A. F. A.; Sakiyama, N. S.; Borém, A. *Café conilon: do plantio a colheita*. Viçosa, UFV, 50-69p.

McNichol J, Dyksma S, Mußmann M, Seewald JS, Sylva SP, Sievert SM. (2022) Genus-Specific Carbon Fixation Activity Measurements Reveal Distinct Responses to Oxygen among Hydrothermal Vent *Campylobacteria*. *Applied and Environmental Microbiology* (88):e02083-21. <https://doi.org/10.1128/AEM.02083-21>

Meneghelli, L. A. M., Monaco, P. A. V. L., Krause, M. R., Guisolfi, L. P., Almeida, K. M., Valle, J. M., Vieira, G. H. S. (2018) Utilization of Agricultural Residues as Alternative Substrates in the Production of Conilon Coffee Seedlings. *Journal of Experimental Agriculture International*. 21(4):1-6. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/39797>

Ministério da Agricultura e Pecuária. (2024) Brazilian agribusiness exports surpass USD 153 billion in 2024. Governo Federal - Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/en/news/brazilian-agribusiness-exports-surpass-usd-153-billion-in-2024>. Acesso em julho de 2025.

Moreno-Ramón, H., Quizembe, S. J., Ibáñez-Asensio, S. (2014) Coffee husk mulch on soil erosion and runoff: experiences under rainfall simulation experiment. *Solid Earth*, (5):851–862, <https://doi.org/10.5194/se-5-851-2014>

Morono, Y., Hillion, F., Nishizawa, M., Terada, T., Inagaki, F., Ito, M., Takahata, N., Sano, Y. (2011) Carbon and nitrogen assimilation in deep subseafloor microbial cells. *Proceedings of the National. Academy. Sciences of the U.S.A.*, 108(45):18295-18300. <https://doi.org/10.1073/pnas.1107763108>

Nawaz, M., Alsahli, A. A., Rizwan, M., Ishaq, S., Iqbal, N., Ishaq, H., Khan, N., Alyemeni, M. N., Ali, S. (2020) Salicylic Acid Improves Boron Toxicity Tolerance by Modulating the Physio-Biochemical Characteristics of Maize (*Zea mays* L.) at an Early Growth Stage. *Agronomy*, 10(12):e2013. <https://doi.org/10.3390/agronomy10122013>

Nemet, F., Perić, K., Lončarić, Z. (2021) Microbiological activities in the composting process: A review. *Columella: Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 8(2):41-53. <https://doi.org/10.18380/szie.colum.2021.8.2.41>

Noor, R. S., Shah, A. N., Ali, A., Ercisli, S., Tahir, M. B., Ali, H. M., Yang, S. H., Nawaz, M., Umair, M., Ullah, S., Assiri, M. A., Abdelsalam, N. R. (2024) Recent Trends and Advances in Additive-Mediated Composting Technology for Agricultural Waste Resources: A Comprehensive Review. *ACS Omega*, 9(8):8632–8653. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06516>

Novais R. F., Alvarez V. H., Barros N. F., (2007) Fertilidade do solo. *Sociedade Brasileira De Ciência Do Solo* (1):75-932.

Oliveira, F. L. D., Guerra, J. G. M., de Almeida, D. L., Ribeiro, R. D. L., da Silva, E. E., Silva, V. V., Espindola, J. A. A. (2008) Desempenho de taro em função de doses de cama de aviário, sob sistema orgânico de produção. *Horticultura Brasileira*, 26(2):149-153. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362008000200004>

Olowoyo, J. O., Mugivhisa, L. L. (2019) Evidence of uptake of different pollutants in plants harvested from soil treated and fertilized with organic materials as source of soil

nutrients from developing countries. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 6(28):1-11. <https://doi.org/10.1186/s40538-019-0165-0>

Owoyemi, J. M., Elegbede, I. O., Zakariya, H. O. (2016) Sustainable wood waste management in Nigeria. *Environmental & Socio-Economic Studies*, 4(3):1-9. <https://doi.org/10.1515/environ-2016-0012>

Partelli, F. L., Vieira, H. D., Santiago, A. R., Barroso, D. G. (2006) Produção e desenvolvimento radicular de plantas de café Conilon propagadas por sementes e por estacas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(6):949-954. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000600008>

Pessarakli, M. (2001) *Handbook of Plant and Crop Physiology*, CRC Press, (2):681-696. <https://doi.org/10.1201/9780203908426>

Quartezani W. Z., Sales R. A., Pletsch T. A., Berilli S. S., Nascimento A. L., Hell L. R., Mantoanelli E., Berilli A. P. C. G., Silva R. T. P., Toso R. (2018a) Conilon plant growth response to sources of organic matter. *African Journal of Agricultural Research*, 13(4): 181-188. <https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12801>

Quartezani W. Z., Sales R. A., Berilli S. S., Pletsch T. A., Rodrigues W. P., Campostrini E., Mantoanelli E. (2018b) Effect of different sources of organic matter added to the substrate on physiological parameters of clonal plants of Conilon coffee. *Australian Journal of Crop Science* 12(8):1328-1334. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.08.PNE1150>

Reinhardt D. H., Rost T. L. (1995) On the correlation of primary root growth and tracheary element size and distance from the tip in cotton seedlings grown under salinity. *Environmental and Experimental Botany* 35(4):575-588. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(95\)00018-6](https://doi.org/10.1016/0098-8472(95)00018-6)

Ren, T., Weraduwege, S. M., Sharkey, T. D. (2018) Prospects for enhancing leaf photosynthetic capacity by manipulating mesophyll cell morphology. *Journal of Experimental Botany*, 70(4):1153-1165. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery448>

Rosa R. C. C., Borges A. L. (2013) Produção de composto orgânico em pequenas propriedades. Embrapa Mandioca e Fruticultura-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), Bahia – Brasil, 2p. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/965119>

Sales R. A., Sales R. A., Nascimento T. A., Silva T. A., Berilli S. S., Santos R. A. (2017) Influence of different sources of organic matter in the spread of *Schinus terebinthifolius* Raddi). *Scientia Agraria*, 18(4):99-106. <https://doi.org/10.5380/rsa.v18i4.54203>

Sales R. A., Rossini F. P., Berilli S. S., Galvão E. R., Mendes T. P., Freitas S. J. (2018a) Foliar fertilization using liquid tannery sludge in conilon coffee seedlings production. *Journal of Experimental Agriculture International* 22(2):1-8. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/40201>

Sales R. A., Oliveira E. C., Delgado R. C., Leite M. C. T., Ribeiro W. R., Berilli S. S. (2018b) Sazonal and interannual rainfall variability for Colatina, Espírito Santo, Brazil. *Scientia Agraria* 19(2):186-196. <https://doi.org/10.5380/rsa.v19i2.54244>

Santos, F. D. S., Souza, P. E. D., Pozza, E. A., Miranda, J. C., Carvalho, E. A., Fernandes, L. H. M., Pozza, A. A. A. (2008) Adubação orgânica, nutrição e progresso de cercosporiose e ferrugem-do-cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43(7):783-791. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000700001>

Santos, K. C. F. D., Silva, M. S. L. D., Silva, L. E. D., Miranda, M. A., Freire, M. B. G. D. S. (2011) Atividade biológica em solo salino sódico saturado por água sob cultivo de *Atriplex Nummularia*. *Revista Ciência Agronômica*, 42(3):619-627. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000300007>

Schmidt, H., De Muner, L. H., Fornazier, M. J. (2004) Cadeia produtiva do café arábica da agricultura familiar no Espírito Santo. Vitória, ES: Incaper, 10-52p. <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/961/1/CadeiaprodutivadocafearabicadaagriculturafamiliarnoEspiritoSanto-ResearchGate.compressed.pdf>

Seibel, B. A., Wishner, K. F., Daly, K. L., Schneider, J. L., Kaartvedt, S. (2016) Hypoxia Tolerance and Metabolic Suppression in Oxygen Minimum Zone Euphausiids: Implications for Ocean Deoxygenation and Biogeochemical Cycles. Integrative and Comparative Biology, 56(4):510-523. <https://doi.org/10.1093/icb/icw091>

Silva, A. E. S, Maso, L. J., Costa, E. B., Bassani, L. A., Galeano, E. A. V. (2017) Importância Econômica e Social do Café Conilon no Estado do Espírito Santo. In: Ferrão, R. G., Fonseca, A. F. A., Ferrão, M. A. G., De Muner, L. H. Café Conilon, Incaper-ES (2):35-66.

Soujanya C. K., Venkataramana M. N., Babu B. N. P. (2023) Growth in production and export performance of indian coffee in international market. Mysore Journal of Agricultural Sciences 57(2):395-402. <https://uasbangalore.edu.in/images/2023-2nd-Issue/44.pdf>

Souza P. M., Fornazier A., Ponciano N. J. (2020) Distribuição espacial da produção agropecuária do estado do espírito santo: Uma análise dos segmentos familiar e não familiar. Revista Ifes Ciência 6(4):78-91. <https://doi.org/10.36524/RIC.V6I4.775>

Staub, L., Souza, T. V., Ton, A. P. S. (2017) Management for reuse of avian bed. Scientific Electronic Archives, 10(5):163-176. <https://doi.org/10.36560/1052017362>
<https://scientificalelectronicarchives.org/index.php/SEA/article/view/362>

Surgun, Y., Çöl, B., e Bürün, B. (2016) 24-Epibrassinolide ameliorates the effects of boron toxicity on *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh by activating an antioxidant system and decreasing boron accumulation. Acta Physiologiae Plantarum , 38(71):1-11. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2088-8>

Taiz L., Zeiger E., Møller I. M., Murphy A. (2017) Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6. ed. Artmed Editora, Porto Alegre – Brasil, 858-887.

Taques, R. C., Dadalto, G. G. (2017) Zoneamento agroclimático para a cultura do café Conilon no Estado do Espírito Santo. In: Ferrão, R. G., Fonseca, A. F. A., Ferrão, M. A. G., De Muner, L. H. Café Conilon, Incaper-ES, 2(3):69-79.

Tatagiba, S. D., Santos, E. A., Pezzopane, J. E. M., Reis, E. F. D. (2010) Mudanças de *Coffea Canephora* cultivadas sombreadas e a pleno sol. Revista Engenharia na Agricultura, 18(3):219-226. <https://doi.org/10.13083/reveng.v18i3.104>

Torres-Climent, A., Martín-Mata, J., Marhuenda-Egea, F., Moral, R., Barber, X., Pérez-Murcia, MD, Paredes, C. (2015) Compostagem da fase sólida do digestato da produção de biogás: otimização das condições de umidade, relação C/N e pH. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 46(1):197-207. <https://doi.org/10.1080/00103624.2014.988591>

Valente, B. S., Xavier, E. G., Lopes, M., Pereira, H. D. S., Roll, V. F. (2016) Compostagem e vermicompostagem de dejetos líquidos de bovinos leiteiros e cama aviária. Archivos de Zootecnia, 65(249):79-88. <https://www.redalyc.org/pdf/495/49544737012.pdf>

Verdin Filho, A. C., Rodrigues, W. N., Colodetti, T. V., Volpi, P. S., Comério, M., Fonseca, A. F. A. D., Tomaz, M. A. (2019) Desenvolvimento foliar de mudas de café conilon produzidas em diferentes tipos de tubetes. In: Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil, Vitória-ES. 6p. <https://sbicafe.ufv.br/bitstreams/e992152b-1b3d-441d-9d3b-900bd06494ad/download>

Verdin Filho A. C., Fornaciari G, Borghi E. J. A., Freitas S. J, Colodetti T. V., Rodrigues W. N., Posse S. C. P. (2022) Proporção de corte nas folhas de estacas alterando a

formação e a qualidade de mudas clonais de cafeeiro conilon. Pensar Acadêmico, 20(2):423-434. <https://doi.org/10.21576/pa.2022v20i2.2770>

Watthier, M., Schwengber, J. E., Fonseca, F. D. da, Silva, M. A. S. da. (2019) Húmus de minhoca e casca de arroz carbonizada como substratos para produção de mudas de alface/ Carbonized rice week and rush humus as substrates for lettuce seedlings. Brazilian Applied Science Review, 3(5):2065-2071. <https://doi.org/10.34115/basrv3n5-011>

Xu X., Du X., Wang, F., Sha J., Chen Q., Tian G., Zhu Z., Ge S., Jiang, Y. (2020) Effects of potassium levels on plant growth, accumulation and distribution of carbon, and nitrate metabolism in apple dwarf rootstock seedlings. Frontiers in Plant Science, (11):e904. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00904>

Yruela I. (2009) Copper in plants: acquisition, transport and interactions. Functional Plant Biology, 36(5):409-430. <https://doi.org/10.1071/FP08288>

Zaheer M. M., Yasin N. A., Ahmad S. R., Khan, W. U., Ahmad A., Ali A., Rehman S. U. (2018) Amelioration of cadmium stress in gladiolus (*Gladiolus grandiflora* L.) by application of potassium and silicon. Journal of Plant Nutrition, 41(4):461-476. <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1385808>

Zakaria, N. I., Ismail, M. R., Awang, Y., Megat Wahab, P. E., Berahim, Z. (2020). Effect of Root Restriction on the Growth, Photosynthesis Rate, and Source and Sink Relationship of Chilli (*Capsicum annuum* L.) Grown in Soilless Culture. BioMed Research International, (2020): e2706937. <https://doi.org/10.1155/2020/2706937>

Zanotto, G., Mann, M. da S. M., Faccin, C., Silva, R. S. (2024). Produção de composto orgânico para fertilização de horta comunitária. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, 7(3):e73254. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n3-116>

Zhang L., Yang L., Shen W. (2020) Dramatic altitudinal variations in leaf mass per area of two plant growth forms at extreme heights. *Ecological Indicators*, (110):e105890. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105890>