



WILLIAN TADEU PEREIRA

**APLICAÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PAREDES
MÚLTIPLAS EM SEMENTES ENVELHECIDAS E MUDAS
DE *Coffea arabica* L.**

**LAVRAS-MG
2022**

WILLIAN TADEU PEREIRA

**APLICAÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PAREDES MÚLTIPLAS EM
SEMENTES ENVELHECIDAS E MUDAS DE *Coffea arabica L.***

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Agronomia, para a obtenção do título de Bacharel.

Profa. Dra. Michele Valquíria dos Reis
Orientadora

Ms. Afonso Ricardo de Souza
Coorientador

Ms. Michele Carla Nadal
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2022**

WILLIAN TADEU PEREIRA

**APLICAÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PAREDES MÚLTIPLAS EM
SEMENTES ENVELHECIDAS E MUDAS DE *Coffea arabica* L.**

**APPLICATION OF MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES IN AGED SEEDS
AND SEEDLINGS OF *Coffea arabica* L.**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Agronomia, para a obtenção do título de Bacharel.

Aprovada em 23 de setembro de 2022.

Profa. Dra. Michele Valquíria dos Reis UFLA

Ms. Afonso Ricardo de Souza UFLA

Ms. Michele Carla Nadal UFLA



Profa. Dra. Michele Valquíria dos Reis
Orientadora

Ms. Afonso Ricardo de Souza
Coorientador

Ms. Michele Carla Nadal
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2022**

*Aos meus pais.
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu forças nos momentos de dificuldades e me manteve firme durante o período da graduação.

Agradeço aos meus pais Sebastião e Odete, sem eles eu não teria o suporte e carinho que precisei durante toda minha vida e, principalmente, no período em que estive longe de casa para me desenvolver profissionalmente. Agradeço aos meus avós, principalmente minha avó Josefina que sempre me incentivou a estudar e a buscar minha felicidade.

Agradeço aos professores incríveis que tive durante o curso, que me inspiraram a buscar um mundo melhor para todos e me solidificar como um bom profissional após minha formação, em especial à minha orientadora Michele Reis e aos meus coorientadores, Michele Nadal e Afonso Souza, por todo o apoio e paciência durante a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os amigos e colegas de profissão que conheci nos anos que estive na Universidade, Luiza, Daniele, Gabriel, Pedro, Bruno, Otávio, Regiane, e ao Ítalo que mesmo de longe, sempre me apoiou e me ajudou nessa fase final da graduação, e a tantos outros que estiveram comigo e compartilharam das alegrias e aflições da graduação.

Por fim agradeço à Universidade Federal de Lavras que me propiciou esses anos de aprendizado e oportunidades, o meu muito obrigado.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

A cafeicultura tem grande representatividade dentro da agricultura brasileira, visto que o Brasil é o maior produtor e exportador de café. Uma fase muito importante para o sucesso da cultura é a produção de mudas de qualidade. Entretanto, as sementes de café apresentam um comportamento intermediário em relação à tolerância à dessecação; quando armazenadas por períodos superiores a 6 meses, pode ocorrer queda significativa na germinação e no vigor das mudas. Técnicas que proporcionam a melhoria na germinação de sementes envelhecidas e na qualidade das mudas se tornam fundamentais para a cultura. Na literatura científica, há relatos positivos da utilização de nanomateriais na germinação e no desenvolvimento de plantas. Desse modo, a utilização de nanomateriais, como os nanotubos de carbono, vem sendo cada vez mais empregada na ciência. Baseado no que foi exposto, objetivou -se: a) verificar a germinação de sementes envelhecidas de *Coffea arabica* L., embebidas em diferentes concentrações de nanotubos de carbono de paredes múltiplas funcionalizados com ácido carboxílico; b) avaliar o desenvolvimento de mudas com aplicação de diferentes concentrações de nanotubos de carbono de paredes múltiplas funcionalizados com ácido carboxílico. Este experimento é o primeiro a testar a influência dos nanotubos de carbono de paredes múltiplas em sementes e mudas de café. Foram avaliados porcentagem de germinação das sementes e parâmetros fitotécnicos das mudas produzidas. O experimento foi conduzido em estufa, no Horto Botânico do Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Lavras. Não foram observadas diferenças significativas na germinação de sementes de *Coffea arabica* L. da cultivar Topázio MG1190 e no desenvolvimento de mudas das cultivares Catuaí '62' e Catuaí '144' nas concentrações utilizadas neste estudo. Ademais, não foram observados sinais de toxicidade em ambos os experimentos nas concentrações aplicadas. Estudos posteriores devem ser realizados testando maiores concentrações de nanotubos de carbono de paredes múltiplas, e por maiores períodos.

Palavras-chave: Café. Sementes. Produção de Mudas. Nanotubo de carbono. Nanomateriais.

ABSTRACT

Coffee farming has great representation within Brazilian agriculture, since Brazil is the largest producer and exporter of coffee. A very important phase for the success of the culture is the production of quality seedlings. However, coffee seeds show an intermediate behavior in relation to desiccation tolerance; when stored for periods longer than 6 months, there may be a significant drop in germination and seedling vigor. Techniques that provide an improvement in the germination of aged seeds and in the quality of the seedlings become fundamental for the culture. In the scientific literature, there are positive reports of the use of nanomaterials in plant germination and development. Thus, the use of nanomaterials, such as carbon nanotubes, has been increasingly used in science. Based on what has been exposed, the objective was: a) to verify the germination of aged seeds of *Coffea arabica* L., soaked in different concentrations of multiwalled carbon nanotubes functionalized with carboxylic acid; b) to evaluate the development of seedlings with the application of different concentrations of multi-walled carbon nanotubes functionalized with carboxylic acid. This experiment is the first to test the influence of multi-walled carbon nanotubes on coffee seeds and seedlings. Percentage of seed germination and phytotechnical parameters of the seedlings produced were evaluated. The experiment was carried out in a greenhouse, in the Botanical Garden of the Department of Agronomy of the Federal University of Lavras. No significant differences were observed in the germination of seeds of *Coffea arabica* L. of the cultivar Topázio MG1190 and in the development of seedlings of the cultivars Catuaí '62' and Catuaí '144' at the concentrations used in this study. Furthermore, no signs of toxicity were observed in both experiments at the applied concentrations. Further studies should be carried out testing higher concentrations of multiwalled carbon nanotubes, and for longer periods.

Keywords: Coffee. Seeds. Seedling production. Carbon nanotube. Nanomaterials.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação dos nanotubos de carbono (a) MWCNTs (Multi-walled carbon nanotube) (b) SWCNTs (Single-walled carbon nanotube).....	17
Figura 2 - Plantio das sementes de <i>Coffea arabica</i> L., cultivar topázio MG1190, após aplicação das concentrações de MWNCTS.....	20
Figura 3 - Vista geral das mudas das cultivares Catuaí IAC 62, e Catuaí IAC 144, com aproximadamente 45 dias, individualizadas em tubetes.....	21
Figura 4 - Vista geral do estágio das mudas das cultivares Catuaí IAC 62, e Catuaí IAC 144, com 60 dias após a individualização, quando se iniciou as aplicações de MWNTs.....	22
Figura 5 - Avaliação da germinação das sementes de <i>Coffea arabica</i> L., cultivar Topázio MG1190, após 90 dias da aplicação de MWNCTS.....	24
Figura 6 - Vista geral das mudas das cultivares Catuaí IAC 62, e Catuaí IAC 144, separadas por tratamentos, passados os 25 dias, da última aplicação de MWNCTS.....	25

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Porcentagem de germinação de sementes submetidas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono de parede dupla, cultivar Topázio amarelo MG1190, após 90 dias de germinação. Lavras, 2022.....	24
Gráfico 2 - Desenvolvimento de mudas de cafeeiro cultivar Catuaí ‘62’ ao longo de 75 dias, submetidas a diferentes concentrações de nanotubo de carbono de parede dupla. Lavras, 2022.	26
Gráfico 3 - Diâmetro de caule (mm), área foliar (cm ²), massa fresca de parte aérea (g), massa fresca de raiz (g), massa fresca total (g), massa seca da parte aérea (g), massa seca da raiz (g), massa seca total (g), de mudas de cafeeiro cultivar Catuaí ‘62’ submetidas a diferentes concentrações de nanotubo de carbono de paredes múltiplas, após 75 dias de desenvolvimento. Lavras, 2022.....	27
Gráfico 4 - Desenvolvimento de mudas de cafeeiro cultivar Catuaí ‘144’ ao longo de 75 dias, submetidas a diferentes concentrações de nanotubo de carbono de parede dupla. Lavras, 2022	28
Gráfico 5 - Diâmetro de caule (mm), área foliar (cm ²), massa fresca de parte aérea (g), massa fresca de raiz (g), massa fresca total (g), massa seca da parte aérea (g), massa seca da raiz (g), massa seca total (g), de mudas de cafeeiro cultivar Catuaí ‘144’ submetidas a diferentes concentrações de nanotubo de carbono de parede dupla, após 75 dias de desenvolvimento. Lavras, 2022	29

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 O Café.....	13
2.2 Cultivares.....	14
2.3 Produção de Mudas.....	15
2.4 Nanotubos de Carbono.....	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 Material Vegetal.....	19
3.2 Nanotubo de carbono.....	19
3.3 Experimento I - Nanotubos de Carbono na germinação de sementes de café.....	20
3.4 Experimento II - Aplicação foliar de nanotubo de carbono em mudas de café.....	21
3.5 Análise estatística.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
4.1 Experimento I - Nanotubos de Carbono na germinação de sementes de café.....	24
4.2 Experimento II - Aplicação foliar de nanotubo de carbono em mudas de café.....	25
5. CONCLUSÃO	31
6. REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da cultura do café é de extrema importância econômica e social para o Brasil. De acordo com o Anuário Brasileiro de Café (2022), o país é o maior produtor e exportador de café, além de ser uma das bebidas mais consumidas pela população mundial. Segundo a Associação Brasileira da Indústria do Café - ABIC (2021), apesar da crise econômica gerada pela pandemia, entre novembro de 2020 e outubro de 2021, a demanda por café seguiu em ritmo de crescimento.

A implementação das lavouras cafeeiras é uma das bases para a sustentabilidade da cafeicultura. Por se tratar de uma cultura perene, erros cometidos nessa fase dificilmente poderão ser corrigidos. A utilização de mudas de qualidade é um fator primordial para a implantação de uma lavoura cafeeira produtiva, e impactarão na longevidade, qualidade do produto, produtividade, custos e por resultado, na rentabilidade da atividade (MESQUITA, 2016).

A produção de mudas de café ocorre basicamente por sementes, as quais são classificadas como intermediárias quanto ao seu armazenamento, ou seja, as sementes armazenadas possuem deterioração relativamente rápida, cerca de 6 meses, e são perdidas ao não serem utilizadas em tempo hábil para a produção de mudas (BENDAÑA, 1962; MATIELO, 1991). Nesse sentido, a utilização de tecnologias no desenvolvimento de mudas se faz necessária.

Atualmente o avanço da utilização de nanomateriais em diversas áreas da ciência, tem atraído pesquisadores para a utilização destes na agricultura. Dentre os nanomateriais, os produtos à base de carbono vem se mostrando interessantes devido a suas propriedades físico-químicas (RADJABIAM, 2020) em relação a outros nanomateriais. De acordo com Verna (2019), estes produtos têm sido aplicados na agricultura por exemplo, para estimular a germinação de sementes. Atuando também como reguladores de crescimento e estimulantes da atividade antioxidante em plantas (PATEL *et al*, 2017; GHORBANPOUR, 2015).

Além disso, existe uma variação no desempenho destes produtos conforme sua estrutura química. Segundo Liu *et al* (2009) os nanotubos de carbono de parede única (SWNCTs) demonstraram capacidade de penetrar na parede celular e nas membranas das células das plantas, auxiliando no desenvolvimento. Outros estudos relataram que os nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) têm a habilidade de influenciar a germinação da semente e o crescimento da planta, além de serem investigados para outros usos na biologia, como: Sistema

de entrega de material genético e produtos químicos, biossensores, engenharia de tecidos, dentre outros (VILLAGARCIA *et al.* 2012; TIWARI *et al.* 2014).

Diante disto, este trabalho teve como objetivo avaliar a resposta de sementes e de mudas de *Coffea arabica L.* expostas a nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) funcionalizados com ácido carboxílico. Este trabalho é composto por dois experimentos: I) Avaliar a germinação de sementes de *Coffea arabica L.* cultivar Topázio MG1190, embebidas em solução de MWCNTs. II) Avaliar o crescimento de mudas de *Coffea arabica L.* expostas a aplicações foliares de MWCNTs.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O Café

Segundo relatos históricos, o café foi descoberto pelos árabes no século XV, e tem como seu centro de origem as terras altas da Etiópia. (CARVALHO, 2007). Foi introduzido no Brasil por volta de 1730, inicialmente na região norte do país, entretanto a cultura cafeeira se desenvolveu e tornou-se importante de fato, na região sudeste a partir do século XIX.

Com a sua descoberta, o café se tornou uma das bebidas mais populares do mundo. Atualmente é uma das mais importantes commodities dos países produtores. O café gera benesses econômicas para cada elo da sua cadeia produtiva mundial, sendo que a receita anual gerada pelo setor cafeeiro é estimada em torno de mais de US\$ 220 bilhões de dólares (OIC, 2019).

Dentre as 103 espécies descritas, a mais cultivada é o *Coffea arabica* L. (DAVIS, 2006), sendo sucedido pelo *Coffea canephora*, também conhecido como robusta. O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de café, atualmente com uma área em produção de aproximadamente 1,8 milhões de hectares e uma área em formação de 400 mil hectares, totalizando uma área plantada total de 2,2 milhões de hectares da cultura (CONAB, 2022).

O café é um arbusto perene, com raízes pivotantes e ramos dimórficos de crescimento contínuo, suas folhas são coriáceas com pecíolos curtos e persistentes. As flores surgem nos ramos laterais, também chamados de plagiotrópicos, com inflorescência em forma de glomérulos, com flores brancas completas, hermafroditas e autoincompatíveis.

Possui reprodução autógama por cleistogamia, gerando frutos de cor vermelha ou amarela, quando estão maduros. Os frutos são do tipo drupa e possuem duas sementes. Fazem parte da semente de café: a película, que é uma camada fina que recobre o endosperma; o endosperma que é o órgão de reserva da semente e o embrião, que é pequeno e possuem de 3 a 4 milímetros (SAKIYAMA *et al.*, 2015).

Suas sementes perdem vigor na germinação, quando armazenadas por períodos superiores a 6 meses (MATIELLO, 1991). Portanto, o desenvolvimento de pesquisas com a utilização de tecnologias que possam resgatar essa viabilidade se torna interessante para a cultura.

2.2 Cultivares

De acordo com Carvalho (1985). Da cultivar típica introduzida no país em meados do século XVIII, até as cultivares atuais, houve ganho de 240% de produtividade, acumulado pelo processo de seleção, que se deu em grande parte pelo trabalho desenvolvido no IAC - Instituto agrônomo de Campinas, que vem desenvolvendo cultivares de café desde 1930.

A partir da década de 1930, houve o estabelecimento do plano geral de melhoramento do cafeeiro IAC, o melhoramento genético foi abordado de forma extensiva com o principal objetivo, a obtenção de plantas mais produtivas, vigorosas e com um produto de boa qualidade. Nas décadas seguintes, grandes avanços foram obtidos pelo programa de melhoramento genético do IAC com a seleção da cultivar Mundo Novo. Em 1972 obteve-se a cultivar Catuaí, através da hibridação artificial entre as cultivares, mundo novo e caturra amarelo, verificou-se um salto na cafeicultura brasileira (CARVALHO, 2007).

As cultivares Mundo Novo e Catuaí são a base da cafeicultura nacional, pois apresentam ampla adaptação, rusticidade e produtividade. Devido ao seu porte baixo, a cultivar Catuaí, causou mudanças significativas no sistema de cultivo de café, favorecendo o adensamento das plantas e facilitando a colheita manual, além de viabilizar a colheita mecanizada. (GIOMO *et al*, 2017)

De acordo com Sakiyama (2015), às plantas de Catuaí Amarelo são vigorosas, característica herdada da cultivar Mundo Novo, e apresentam altura média de 2,0 a 2,3 m e diâmetro de copa de 1,8 a 2,0 m, sendo susceptíveis à ferrugem, aos nematóides e outras doenças. A produção média de café beneficiado por hectare é de 30 a 40 sacas, entretanto, produtividades maiores podem ser alcançadas dependendo do espaçamento.

O Catuaí vermelho originou-se como produto de recombinação a partir de um cruzamento artificial entre cafeeiros selecionados, pela produtividade, das cultivares Caturra Amarelo, IAC 476-11 e Mundo Novo IAC 374-19, de *Coffea arábica L*. Aos descendentes desses cafeeiros na geração F4 e gerações subsequentes, caracterizados por serem vigorosos e altamente produtivos, deu-se a denominação de Catuaí Vermelho. A altura das plantas pode atingir 2,0 a 2,4m, em média e o diâmetro da copa, de 1,7 a 2,1 m. Com produtividade variando de 30 a 40 sacas também, podendo aumentar dependendo do espaçamento adotado na cultura. (CARVALHO, 2007; SAKIYAMA, 2015)

A cultivar Topázio MG1190, desenvolvida pela Epamig, é resultante do cruzamento entre as cultivares Catuaí Amarelo IAC H2077-2-12-70 e Mundo Novo IAC 515-20, realizado no IAC, em 1961. Posteriormente com a introdução desse material no estado de Minas Gerais,

vários cafeeiros deste cruzamento foram avaliados e conduzidos pelo método de seleção individual, com teste de progênie. Após várias gerações de seleção, originou-se a cultivar. (SAKIYAMA, 2015)

De acordo com Carvalho (2007), a cultivar Topázio selecionada e lançada em Minas Gerais possui porte baixo, como o das cultivares Catuaí, com altura por volta de 2,0 metros e diâmetro médio de copa de 1,8 m, aos sete anos. Tem excelente produtividade e elevado vigor vegetativo. A maturação de frutos é intermediária e uniforme. Os frutos são de coloração amarela e as folhas, quando novas, são, predominantemente, de cor bronze. A cultivar é suscetível à ferrugem e ao nematoide das galhas.

2.3 Produção de Mudas

Apesar dos esforços para que se viabilize a propagação do café por meio assexuado; ou seja, através de estacas, sua propagação se dá basicamente de forma sexuada, através de sementes (MATIELLO *et al*, 2005). A propagação por sementes se mostra mais vantajosa por conta da facilidade de implementação no plantio, redução de custos e melhor desenvolvimento radicular (ASCANIO, 1994).

Entretanto, segundo Matiello (1991), a viabilidade das sementes de café em condições ambientais é de cerca de seis meses, após esse período a semente perde seu poder germinativo rapidamente. Com isso a semeadura fica restrita a um breve período de tempo após a colheita, concentrando a obtenção de mudas em épocas que nem sempre serão as propícias para o transplântio no campo (PERTEL, 2001).

Sementes de café tem a germinação lenta e desuniforme. De acordo com Bewley & Black (1994) os fatores que podem estar associados a esta condição são a desuniformidade de maturação dos frutos, processos de maturação, processos de pós colheita, como secagem e armazenamento, e a presença do endocarpo, “pergaminho” (GUIMARÃES, 1995). Sendo que a principal causa da rápida perda de poder germinativo das sementes e a grande sensibilidade dessas sementes é a desidratação (ELLIS *et al*, 1990).

Inicialmente as sementes de café foram classificadas como recalcitrantes (KING, 1976), ou seja, não toleram desidratação em níveis abaixo de 20- 30% , sem que as mesmas sofram danos fisiológicos (PRITCHARD *et al*, 2004). Entretanto, posteriormente, Ellis *et al*. (1990), classificaram a semente de café como pertencente à categoria intermediária; pois, observaram que algumas cultivares de *Coffea arabica* L., não perderam viabilidade fisiológica ao serem

dessecadas até 10% de unidade, mas sofreram prejuízos ao serem armazenadas em temperaturas inferiores a 0 °C.

Por possuir mecanismos reprodutivos que assegurem um elevado índice de autofecundação, em torno de 99%, mantendo assim uma baixa variação genética, a implementação de cafezais de *Coffea arabica* L, é realizada a partir de mudas advindas de sementes (CARVALHO E MÔNACO, 1965).

De acordo com Sakiyama (2015) as mudas com elevado padrão genético, e com bom desenvolvimento, resultam em lavouras com crescimento mais precoce e mais vigoroso, o que torna a atividade mais sustentável; e que sementes de qualidade são o principal fator condicionante para o desenvolvimento das mesmas.

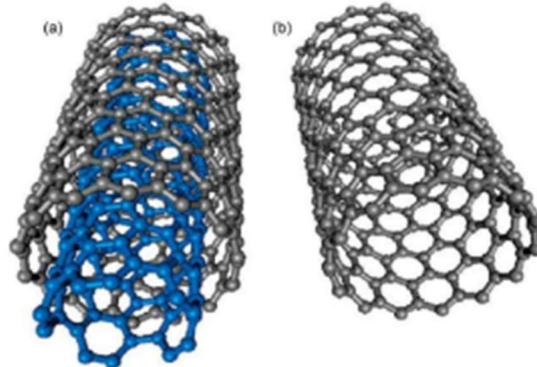
Na cultura do café, a obtenção de mudas de qualidade se torna um fator primordial na instalação de uma lavoura de alto rendimento produtivo (CARVALHO, 1978). Diante de tal importância, a utilização de novas tecnologias no desenvolvimento de mudas se faz necessária. Atualmente com o avanço da utilização de nanomateriais em diversas áreas da ciência, tem atraído pesquisadores para a utilização dos mesmos na agricultura (RAHMANI *et al*, 2020).

2.4 Nanotubos de Carbono

O carbono é um dos elementos mais abundantes encontrados na natureza, e até 1985 só se conheciam três formas alotrópicas livres: o carbono amorfo, o grafite e o diamante (PASTRANA-MARTÍNEZ *et al*, 2013). Com a descoberta de mais uma forma de carbono alotrópico, o fulereno em 1985 por Kroto (KROTO *et al*, 1985), cresceu significamente o interesse de pesquisadores pela descoberta de novas formas de nanomateriais de carbono.

Em 1991, os nanotubos de carbono foram descobertos por Sumio Ijima (IJIMA, 1991), e são descritos como estruturas nanométricas cilíndricas formadas por átomos de carbono (ZHANG,2003). Os nanotubos de carbono podem ser considerados, como sendo uma folha simples de grafeno enrolada em forma de cilindro, e se dividem em: SWCNTs do inglês “Single-walled”, que são cilindros simples de grafeno; e os MWCNTS ou “Multi-walled”, que são constituídos por cilindros concêntricos de grafeno. Atualmente existem vários tipos de nanomateriais à base de carbono. Dentre eles, o fulereno, fullerol, o grafeno e os nanotubos de carbono. (MOHAMMAD *et al*, 2018; RAHMANI *et al*, 2020).

Figura 1 - Representação dos nanotubos de carbono (a) MWCNTs (Multi-walled carbon nanotube) (b) SWCNTs (Single-walled carbon nanotube).



Fonte: Dehghani *et al* (2018.)

Os nanotubos de carbono podem ser sintetizados em laboratórios. Devido a sua nanoestrutura únicas, tem por propriedades: alta condutividade elétrica, grande área de superfície específica e estabilidade térmica (MILNE *et al*, 2004) proporcionando sua aplicação às mais diversas áreas, incluindo: energética, engenharia biomédica, biotecnologia, medicina e embalagem de alimentos (WANG, 2016).

Os MWCNTs primitivos são hidrofóbicos e formam agregados em meio aquoso, que reduzem sua eficácia. Portanto, pesquisadores em estudos anteriores, funcionalizam os nanotubos com diferentes grupos hidrofílicos (TIWARI, 2013).

Na agricultura os nanotubos surgem como uma fonte de pesquisa para interação de sistemas biológicos, como o desenvolvimento de plantas. De acordo com Verna (2019), os nanomateriais de carbono têm sido aplicados na agricultura para estimular a germinação de sementes. Atuam também como reguladores de crescimento e estímulo à atividade antioxidante das plantas (PATEL *et al*, 2017; GHORBANPOUR, 2015).

As nanopartículas interagem com as plantas causando alterações morfológicas e fisiológicas de acordo com suas propriedades, a eficácia das nanopartículas é determinada pela sua composição química, tamanho, área específica, reatividade e dose (KHODAKOVSKAYA *et al*, 2012).

Segundo Liu *et al* (2009), os nanotubos de carbono de parede única (SWCNTs) demonstraram a capacidade de penetrar na parede celular e membrana das células do tabaco. E em vários estudos, pesquisadores relataram que os nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) têm a habilidade de influenciar a germinação da semente e o crescimento da planta,

e funcionam como um sistema de entrega de material genético e produtos químicos para as células.

De acordo com Villagarcia *et al* (2012) e Tiwari *et al* (2014) os MWCTs induzem a entrada de água e melhora as concentrações de nutrientes essenciais, como cálcio e ferro, que podem melhorar a germinação de sementes, crescimento e desenvolvimento. Descobertas recentes indicaram que vários efeitos dos MWCNTs nas respostas das plantas são totalmente dependentes da concentração e variam entre a ativação do crescimento, até a toxicidade (RAHMANI *et al*, 2020)

Da mesma forma, devido ao seu pequeno tamanho e alta reatividade superficial, as nanopartículas podem atravessar a maioria das barreiras biológicas e interagir com estruturas intracelulares, contribuindo para potencial toxicidade celular e genética pela indução de estresse oxidativo (LANDSIEDEL *et al* 2009; KOVACIC, SOMANATHAN, 2010).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram instalados e conduzidos no Horto Botânico no Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras, UFLA, localizada no sul do Estado de Minas Gerais com altitude: 918 m; latitude: 21° 14' S; longitude: 45° 00' W. A classificação climática proposta por Köppen é o tipo Cwa, com inverno seco e chuvas predominantes no verão, com precipitação total média anual de 1530 mm e temperatura média anual de 19,4°C (BRASIL, 1992 e DANTAS, CARVALHO e FERREIRA, 2007).

3.1 Material Vegetal

Foram utilizadas cultivares distintas para os experimentos. Para o experimento de germinação foram utilizadas as sementes da cultivar Topázio MG1190, de coloração de fruto amarela. As mesmas foram colhidas no mês de agosto de 2021 na Fazenda Cafés Monte Alegre, no município de Alfenas - MG. Os frutos foram despolpados mecanicamente logo após a colheita e secos sem casca sob tela no sol, até atingirem 12% umidade. As sementes foram doadas pela EPAMIG de Lavras.

Para o experimento com as mudas foram utilizadas duas cultivares, sendo elas: Catuaí IAC 62 de coloração dos frutos amarelos e a Catuaí IAC 144 de coloração dos frutos vermelhos. As mudas originam-se de sementes advindas de doação da EPAMIG que foram plantadas em bandejas tendo como substrato vermiculita, e foram individualizadas em tubetes no estágio de “orelha de onça”. As mudas foram plantadas em tubetes de polietileno, de 19 cm de altura, com um volume de 250 ml, tendo como substrato vermiculita, e passados três meses após a individualização iniciou-se a aplicação dos tratamentos.

Após transplantadas as mudas também foram adubadas com três grânulos de adubo osmocote de formulação 16-8-12(+2), posteriormente as mudas foram regadas três vezes por semana com solução hidropônica Hidrogood.

3.2 Nanotubo de carbono

O material foi doado pelo Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno da Universidade Federal de Minas Gerais (CTNano/UFGM), funcionalizado com ácido carboxílico, diluído na proporção de 1g/L. O nanotubo de carbono de parede múltipla (MWNCTs), passou pelo processo de sonicação no Laboratório de Biomateriais na Universidade Federal de Lavras. O nanotubo foi sonicado em 3 repetições cada uma, com 50% da potência do equipamento, por 5 minutos.

3.3 Experimento I - Nanotubos de Carbono na germinação de sementes de café

Este experimento foi realizado com sementes envelhecidas da cultivar Topázio MG1190, que estavam armazenadas a 8 meses. Na qual se avaliou a taxa de germinação após 90 dias da aplicação dos nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs). Período descrito por Went (1957) como sendo o período de germinação do café em condições de baixas temperaturas. Utilizou-se as concentrações de 5, 10, 20 e 40 mg/L⁻¹ de MWNCTs, advindas da solução estoque inicial, mais o controle com água destilada. As respectivas concentrações foram pipetadas da solução estoque e diluídas em 60 ml de água destilada. Utilizou-se 50 sementes da cultivar, por tratamento totalizando 250 sementes.

As sementes foram colocadas em um frasco com as respectivas concentrações e mantidas no agitador por 24 horas. As mesmas foram plantadas em tubetes de polietileno de 19 cm de altura, com um volume 250 ml, com substrato comercial. Os tubetes foram mantidos em casa de vegetação, sendo regadas apenas com água, três vezes na semana.

Figura 2 - Plantio das sementes de *Coffea arabica* L., cultivar topázio MG1190, após aplicação das concentrações de MWNCTS.



Fonte: Do autor (2022).

As plântulas foram avaliadas 90 dias após o plantio das sementes nos tubetes, e foram avaliados os números de plântulas emergidas quando apresentaram as folhas cotiledonares

ainda envoltas pelo endosperma, estágio de “palito de fósforo” (ASCANIO, 1994), “joelho” e as falhas.

3.4 Experimento II - Aplicação foliar de nanotubo de carbono em mudas de café.

Foi realizada a aplicação de nanotubos de carbono de parede múltiplas (MWNCTs) via foliar, utilizando mudas. As mudas inicialmente foram germinadas em bandejas tendo como substrato vermiculita, quando as mesmas estavam com as folhas cotiledonares inteiramente desenvolvidas, foram individualizadas em tubetes de polietileno, de 19 cm de altura, com um volume de 250 ml, tendo vermiculita como substrato.

Figura 3 - Vista geral das mudas das cultivares Catuaí IAC 62, e Catuaí IAC 144, com aproximadamente 45 dias, individualizadas em tubetes.



Fonte: Do autor (2022).

Para o experimento com as mudas, foram utilizadas quatro concentrações de nanotubo de carbono de parede múltiplas, mais o controle, com apenas água destilada, as concentrações de MWNCTs, foram: 5, 10, 20 e 40 mg/L⁻¹, advindas de uma solução estoque. Iniciou-se as aplicações quando as mudas transplantadas já estavam estabilizadas e apresentavam três pares de folhas verdadeiras acima da folha cotiledonar. (Figura 5)

As concentrações aplicadas, foram pipetadas e diluídas em 80 ml de água destilada. Foi utilizado um borrifador para aplicação, sendo aplicada aproximadamente 2 ml de solução por planta. A solução de MWNCTs foi aplicada sempre ao entardecer.

Utilizou-se 16 plantas por cultivar, totalizando 32 plantas por tratamento. Foram feitas três aplicações, com intervalo de 25 dias cada. A cada aplicação eram retiradas três plantas de cada cultivar para análises morfométricas.

O experimento foi encerrado, passado os 25 dias após a terceira aplicação. Foram avaliados a altura de plantas, tamanho de raiz, número de pares de folha a partir da folha cotiledonar, diâmetro de caule, peso fresco da parte aérea e raiz, e peso seco da parte aérea e raiz, além da utilização de aplicativo para quantificação de área foliar, chamado “Canopeo”. Também foi realizada, análise visual, a fim de identificar possível toxicidade foliar na presença do MWNCTs.

Figura 4 - Vista geral do estágio das mudas das cultivares Catuaí IAC 62, e Catuaí IAC 144, com 60 dias após a individualização, quando se iniciou as aplicações de MWNTs.



Fonte: Do autor (2022).

3.5 Análise estatística.

Ambos os experimentos tiveram delineamento inteiramente casualizado; No experimento com as mudas foi realizado esquema fatorial 2 x 5. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), constatada diferença estatística, as médias foram comparadas pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de significância (Skott; Knott, 1974).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Experimento I - Nanotubos de Carbono na germinação de sementes de café.

Não foram observadas diferenças significativas na germinação das sementes submetidas às diferentes concentrações de nanotubo de carbono de paredes múltiplas (MWNCTs) funcionalizados com ácido carboxílico. Também não foram observados sinais de fitotoxicidades nas plântulas nas concentrações utilizadas.

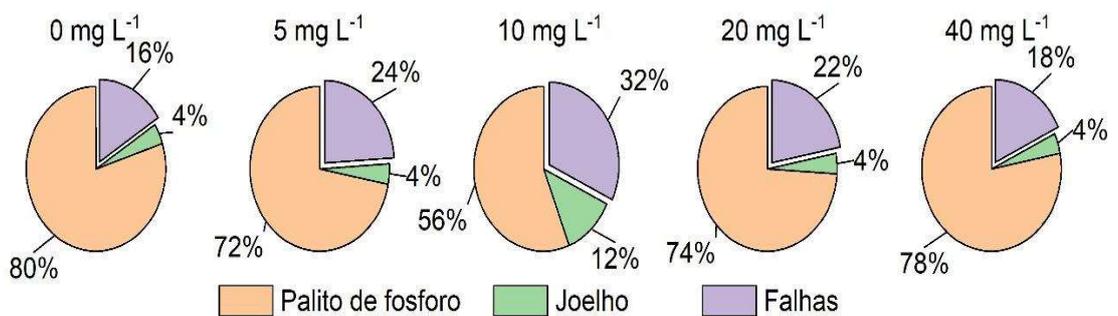
Foram avaliadas as plântulas germinadas em estágio de “palito de fósforo”, “joelho” e as não germinadas, 90 dias após a semeadura.

Figura 5 - Avaliação da germinação das sementes de *Coffea arabica* L., cultivar Topázio MG1190, após 90 dias da aplicação de MWNCTS.



Fonte: Do autor (2022).

Gráfico 1 - Porcentagem de germinação de sementes submetidas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono de parede dupla, cultivar Topázio amarelo MG1190, após 90 dias de germinação. Lavras, 2022



Fonte: Do autor (2022).

De acordo com Khodakovskaya *et al.* (2011) e Villagarcia *et al.* (2012), os nanotubos de carbono de paredes múltiplas estão relacionados a ativação de genes da proteína aquaporina (*LeAqp1*), esta é uma proteína chave para o desenvolvimento das plantas e está intimamente envolvida no processo de germinação. Lahiani *et al.* (2013) também demonstrou a atuação dos nanotubos na diminuição do período de germinação de várias culturas. No entanto, para sementes de café não foram observadas melhora ou maior velocidade na germinação do café, nas concentrações aplicadas.

Segundo Bergun *et al.* (2014), o tamanho das sementes pode ser um fator importante em como as sementes respondem aos MWCT. Sementes pequenas têm uma maior área superficial em relação ao volume, o que acarretaria em uma maior sensibilidade ao nanomaterial (PENNACCHIO *et al.*, 2005). Nesse sentido, a proporção entre o tamanho das sementes de café e as concentrações do produto aplicada, pode ter interferido nas possíveis respostas ao MWNCTs..

Pesquisas recentes indicam que vários efeitos dos MWCNTs nas respostas das plantas, são totalmente dependentes da concentração e variam desde indução de crescimento até a toxicidade (RAHMANI *et al.* 2020).

Portanto, novos testes com maiores concentrações, e sementes em diferentes períodos de armazenamento devem ser realizados, a fim de melhor elucidar a relação entre sementes de café e nanotubos de carbono de paredes múltiplas, e verificar se o benefício para germinação descrito na literatura se aplica também para sementes de café.

4.2 Experimento II - Aplicação foliar de nanotubo de carbono em mudas de café.

Quanto ao desenvolvimento das mudas de cafeeiro também não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos utilizados, em ambas as cultivares.

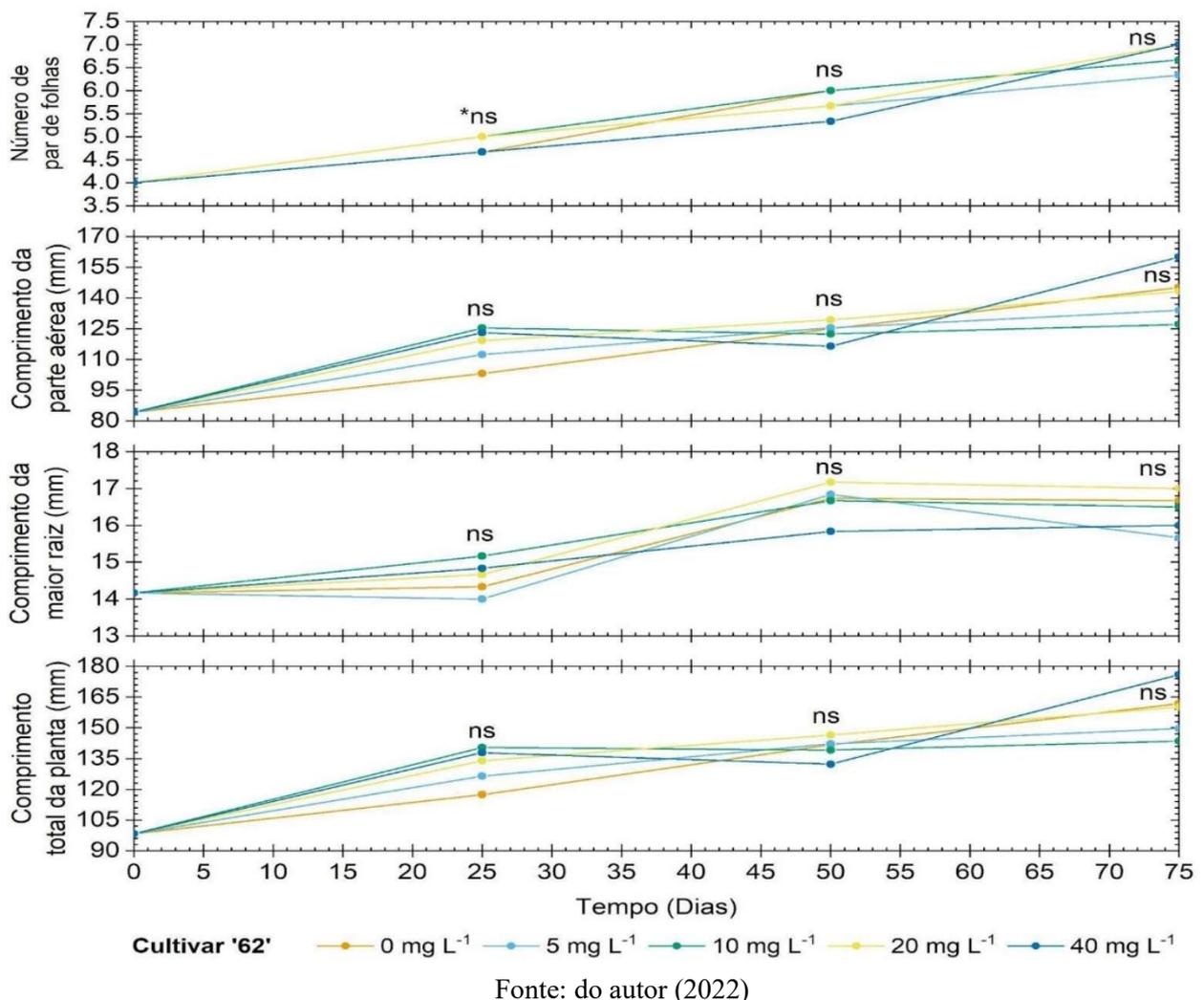
Figura 6 - Vista geral das mudas das cultivares Catuaí IAC 62, e Catuaí IAC 144, separadas por tratamentos, 25 dias após a última aplicação de MWNCTs.



Fonte: Do autor (2022).

No gráfico 2, podemos observar o desenvolvimento das mudas de cafeeiro, cultivar Catuaí 62, ao longo dos 75 dias. Aos 25 dias o número médio de pares de folhas variou entre 4,5 (40 mg L⁻¹) e 5 (0 mg L⁻¹). Aos 50 dias o número médio de par de folhas variou entre 5 (40 mg L⁻¹) e 6 (10 mg L⁻¹). E aos 75 dias o número médio de par de folhas variou entre 6 (5 mg L⁻¹) e 7 (40 mg L⁻¹).

Gráfico 2 - Desenvolvimento de mudas de cafeeiro cultivar Catuaí '62' ao longo de 75 dias, submetidas a diferentes concentrações de nanotubo de carbono de parede dupla. Lavras, 2022.



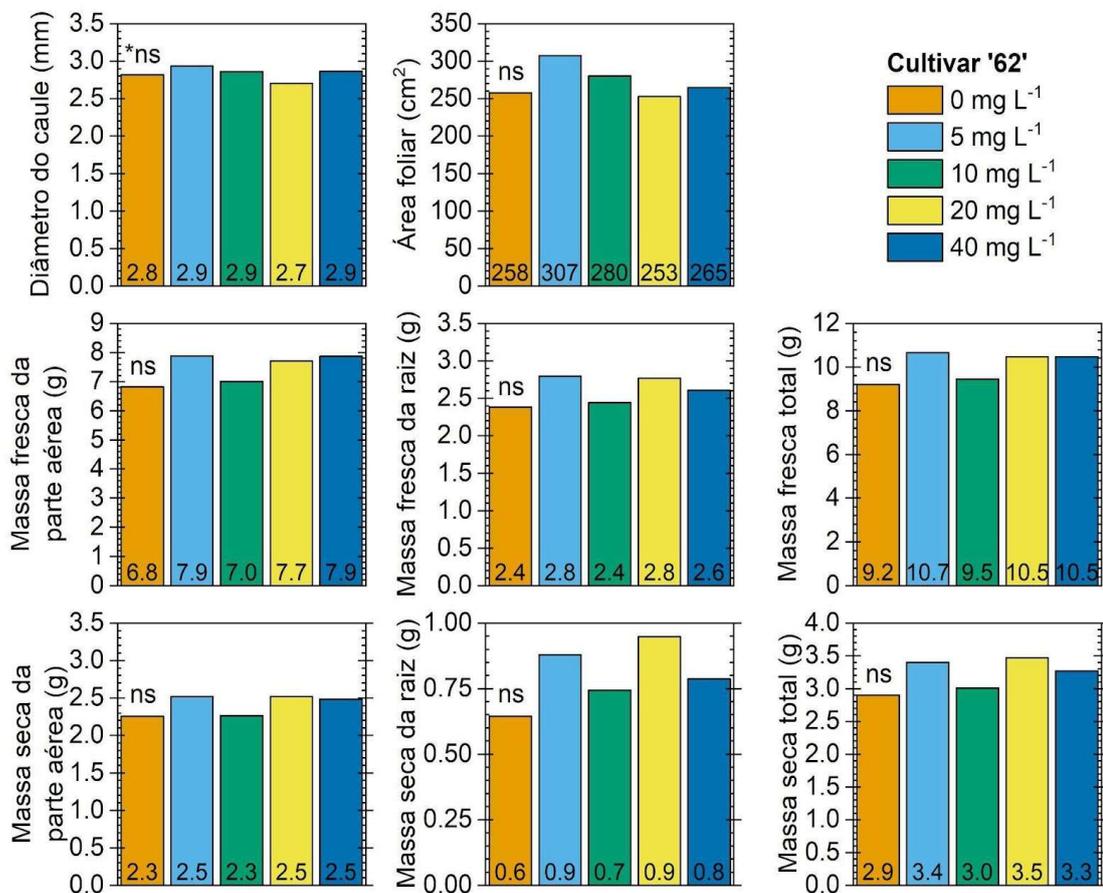
Para o comprimento da parte aérea da cultivar Catuaí 62, os valores médios ficaram em 116 mm aos 25 dias, 124 mm aos 50 dias, e 142 mm aos 75 dias. Para o comprimento de raiz, os valores médios ficaram em 14,5 cm aos 25 dias, 16,7 cm aos 50 dias, e 16,4 cm aos 75 dias.

Para as médias de comprimento total de planta, os valores médios aos 25 dias variaram entre 115 a 140 mm (0 e 5 mgL⁻¹, respectivamente); aos 50 dias 125 a 135 mm (0 e 5 mgL⁻¹, respectivamente); e aos 75 dias 140 e 180 mm (10 e 5 mgL⁻¹, respectivamente)

Figura 8 - Desenvolvimento de mudas de cafeeiro cultivar Catuaí '62' ao longo de 75 dias, submetidas a diferentes concentrações de nanotubo de carbono de parede dupla. Lavras, 2022.

O gráfico 3, pode se observar que para os valores de diâmetro de caule a média foi de 2,84 mm, área foliar de 272 cm², massa fresca da parte aérea de 7,46 g, massa seca da parte aérea de 2,42 g, massa fresca da raiz de 2,6 g, massa seca de raiz em 0,78 g, massa fresca total de 10,8 g, e a massa seca total teve média de 3,22 g.

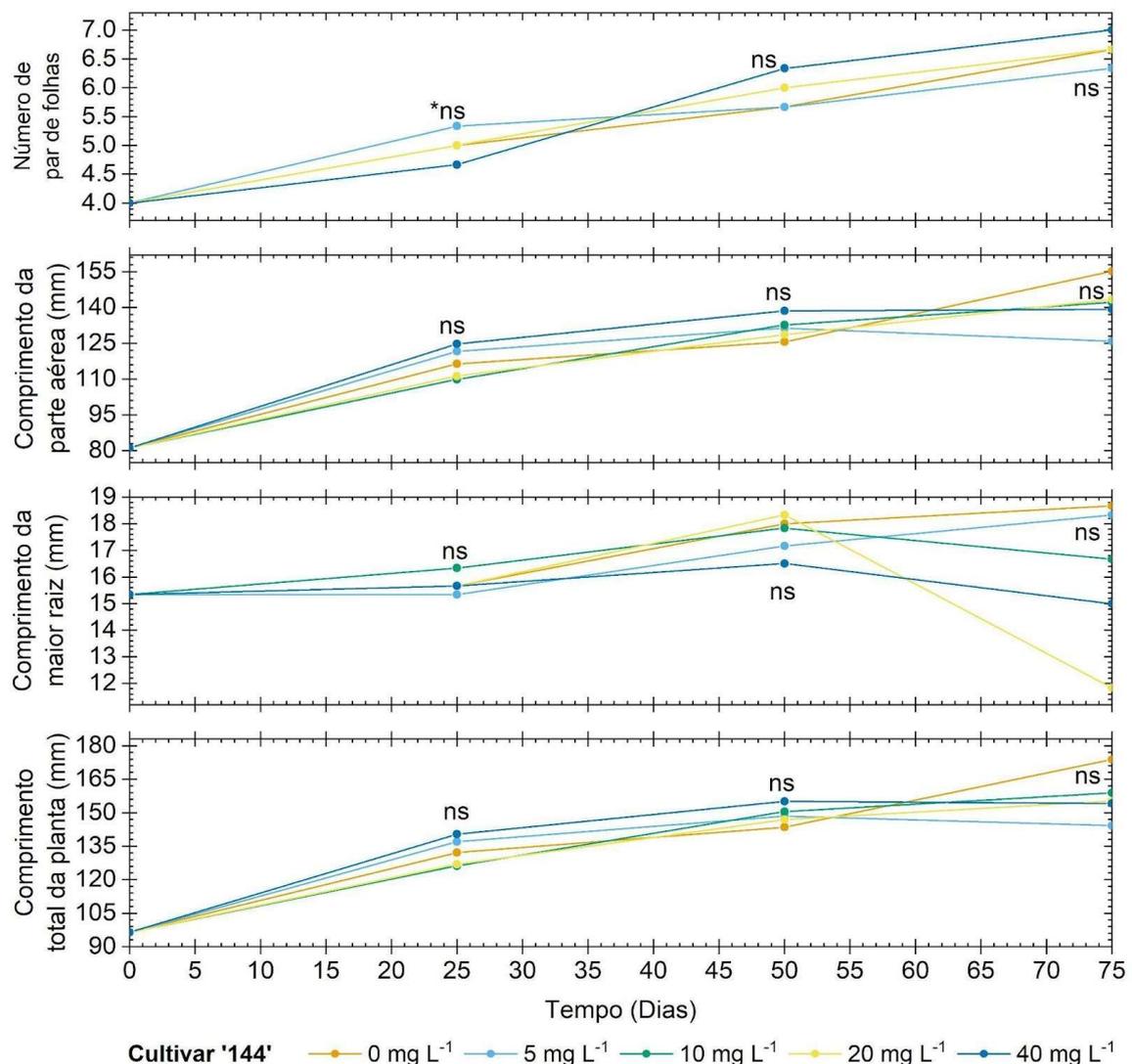
Gráfico 3 - Diâmetro de caule (mm), área foliar (cm²), massa fresca de parte aérea (g), massa fresca de raiz (g), massa fresca total (g), massa seca da parte aérea (g), massa seca da raiz (g), massa seca total (g), de mudas de cafeeiro cultivar Catuaí '62' submetidas a diferentes concentrações de nanotubo de carbono de paredes múltiplas, após 75 dias de desenvolvimento. Lavras, 2022.



Fonte: do autor (2022).

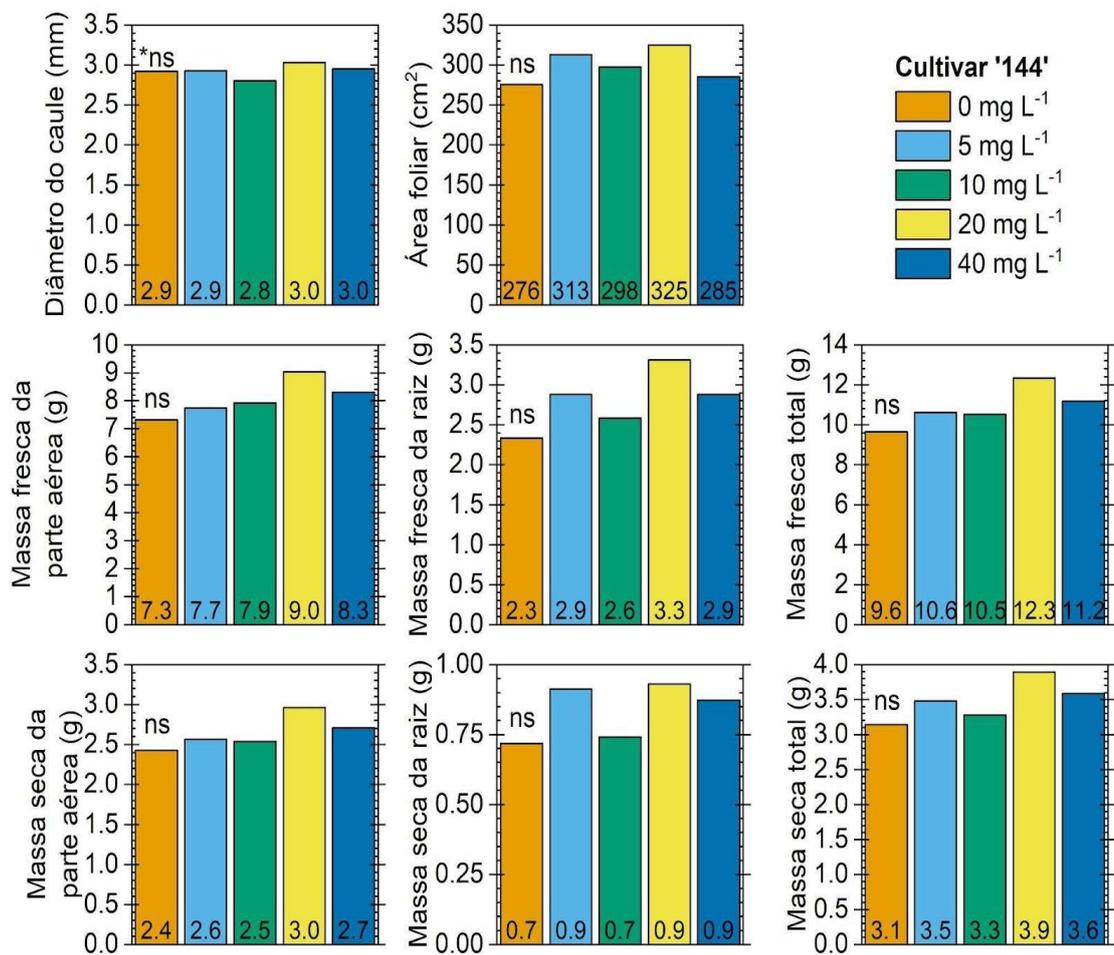
No gráfico 4, podemos observar o desenvolvimento das mudas de cafeeiro, cultivar Catuaí 144, ao longo dos 75 dias. Para a variável número de par de folhas os valores médios encontrados foram de 5 pares aos 25 dias, de 5 pares aos 50 dias e de 6,7 pares de folhas aos 75 dias. Para o comprimento de parte aérea, as médias foram de 116,75 mm aos 25 dias, de 131,35 aos 50 dias e de 141,13 aos 75 dias. Já para comprimento de raiz, os valores observados foram de, 15,77 cm em média aos 25 dias, de 17,56 cm aos 50 dias e de 16,1 cm em média aos 75 dias. Para as médias de comprimento total de planta, os valores médios aos 25 dias variaram entre 120 a 135 mm (10 e 40 mgL⁻¹, respectivamente); aos 50 dias 135 a 1150 mm (0 e 40 mgL⁻¹, respectivamente); e aos 75 dias 150 e 175 mm (5 e 0 mgL⁻¹, respectivamente). Não sendo observadas diferenças significativas entre os valores apresentados.

Gráfico 4 - Desenvolvimento de mudas de cafeeiro cultivar Catuaí '144' ao longo de 75 dias, submetidas a diferentes concentrações de nanotubo de carbono de parede dupla. Lavras, 2022



No gráfico 5, para diâmetro do caule em milímetros, o valor médio ficou em 2,92 mm, para área foliar o valor médio foi de 299,4 cm², massa fresca da parte aérea a média foi de 8,04 g, para massa seca da parte aérea de 2,64 g, massa fresca da raiz 28 g, massa seca da raiz 0,82 g, para massa fresca total o valor médio foi de 10,84 g e massa seca total com valor médio de 3,48 g.

Gráfico 5 - Diâmetro de caule (mm), área foliar (cm²), massa fresca de parte aérea (g), massa fresca de raiz (g), massa fresca total (g), massa seca da parte aérea (g), massa seca da raiz (g), massa seca total (g), de mudas de cafeeiro cultivar Catuaí '144' submetidas a diferentes concentrações de nanotubo de carbono de parede dupla, após 75 dias de desenvolvimento. Lavras, 2022



Fonte: Do autor (2022)

De acordo com Rahmani *et al* (2020), os MWCNTs podem ser captados através de células epidérmicas e depois translocados para células parenquimatosas. Entretanto, González-García (2019), demonstra que quando nanotubos de carbono foram aplicados via foliar, não

provocaram impacto nas biomassas das plantas, e também que não causaram toxicidade devido à presença de qualquer uma das doses aplicadas em seu estudo com mudas de tomate.

Os sinais de toxicidade se diferem grandemente entre as espécie de plantas e o impacto das nanoparticulas de carbono pode variar amplamente, sendo dependente da espécie, do estágio em que a mesma se encontra, tipo de nanopartícula, tamanho composição, estrutura de superfície dentre outras características (NEL *et al*, 2006).

De acordo com Bergun (2014), o número de folhas tem sido utilizado como parâmetro fitotoxicologia para nanomateriais, a diminuição de crescimento de raiz, parte aérea e biomassa é o sintoma mais geral de toxicidade de MWNTs nas plantas. Em estudo realizado por Mohamed *et al.* (2013), ao testar doses de MWCTs de 0, 25, 50 e 100 mg L⁻¹ em cevada milho e soja não constatou efeitos tóxicos para essas culturas em estágios iniciais. Em cevada utilizando doses de 100 e 200 mg L⁻¹ observou acelerada e significativa germinação. Já Bergun (2014), observou estresse severo no crescimento e da biomassa de pepino, arroz, alface e pimenta vermelha, nas concentrações mais altas de 1000 e 2000 mg L⁻¹.

Como supracitado, nas doses aplicadas neste trabalho, não se observou diferença significativa tanto no desenvolvimento, quanto em toxicidade, para sementes e mudas de café, abrindo a perspectiva de utilização dos nanotubos de carbono para outras aplicações.

Em nível celular, por exemplo, existe o interesse na possibilidade de os nanotubos de carbono penetrarem na parede celular da planta para funcionar como um sistema inteligente de entrega de produtos químicos para a célula (TIWARI, 2013). Além disso, foi documentado que as nanopartículas podem ser benéficas para o fornecimento de moléculas biológicas em células vegetais, para a melhoria da aplicação de herbicidas para a prevenção de doenças (PÉREZ-DE-LUQUE, RUBIALES, 2009; SERAG *et al*, 2011).

5. CONCLUSÃO.

Não foram observadas diferenças significativas na germinação de sementes da cultivar Topázio MG 1190, e no desenvolvimento de mudas das cultivares Catuaí IAC '62' e Catuaí IAC '144' nas concentrações utilizadas neste estudo. Ademais, não foram observados sinais de toxicidade em ambos os experimentos nas doses aplicadas.

Este foi o primeiro estudo realizado para testar a influência dos nanotubos de carbono de paredes múltiplas funcionalizados com ácido carboxílico em sementes e mudas de café, portanto, vale ressaltar que estudos posteriores devem ser realizados testando maiores concentrações de nanotubos de carbono de paredes múltiplas, e por maiores períodos de tempo.

6. REFERÊNCIAS.

- ANDRADE NETO, A. **Avaliação de substratos alternativos e tipos de adubação para a produção de mudas de cafeeiro (Coffea arabica L.) em tubetes.** 1998. 65 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- ASCANIO, E.C.E. **Biología del café.** Caracas: Universidad Central de Venezuela, 1994. 308p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ. **Indicadores da Indústria do Café** - 2021. Disponível em: <https://estatisticas.abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2021/> Acesso em Mai. 2022.
- BEGUM, Parvin; IKHTIARI, Refi; FUGETSU, Bunshi. **Potential impact of multi-walled carbon nanotubes exposure to the seedling stage of selected plant species.** *Nanomaterials*, v. 4, n. 2, p. 203-221, 2014.
- BENDANÃ, F. E. **Fisiología de lãs semillas de café.** I. Problemas relativos AL almacenamiento-café. *Turrialba, San José*, v. 15, n. 4, p. 93-96, out./dez. 1962.
- BEWLEY, J. Derek; BLACK, Michael. Seeds. In: **Seeds.** Springer, Boston, MA, 1994. p. 1-33.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas (1961- 1990).** Brasília: 1992. 84 p.
- CARVALHO, A. **Histórico do desenvolvimento do cultivo do café no Brasil.** Campinas: Instituto Agrônomo, 8 p. (Documentos IAC, 34), 2007. Versão online revisada. Disponível em: <https://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/arquivos/iacdoc34.pdf>. Acesso em Mai. 2022.
- CARVALHO, A.; MÔNACO, L.C. Botânica e melhoramento. In: KRUG et al. (Eds.). **Cultura e adubação do cafeeiro.** 2.ed. São Paulo: Instituto Brasileiro de Potassa, 1965. p.49-62.
- CARVALHO, C. H. S. de. **Cultivares de café.** / Carlos Henrique Siqueira de Carvalho. (Ed.) Brasília: EMBRAPA, 2007. 247 p. : il.
- CARVALHO, M. M. de. **Formação de mudas.** Informe Agropecuário. Belo Horizonte, v. 4, n. 44, p. 14-18, ago. 1978.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Safra Brasileira de Café Tabela de dados** - Produção e análise de mercado de Café. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe> Acesso em Jun 2022
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. de; FERREIRA, E. **Classificação e tendência climática em Lavras, MG.** *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, MG, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, nov./dez. 2007.

- DAVIS, A. P. *et al.* **An annotated taxonomic conspectus of the genus Coffea (Rubiaceae).** Botanical Journal of the Linnean Society, London, v. 152, n.4, p. 465-512, dec. 2006.
- DEHGHANI, Mohammad Hadi *et al.* **High-performance removal of diazinon pesticide from water using multi-walled carbon nanotubes.** Microchemical Journal, v. 145, p. 486-491, 2019.
- ELLIS, R.H.; HONG, T.D.; ROBERTS, E.H. **An intermediate category of seed storage behaviour?: I. Coffee.** Journal of Experimental Botany, Oxford, v.41, n.230, p.1167-1174, 1990.
- ENDO, Morinobu. **Grow carbon fibers in the vapor phase.** Chemtech, v. 18, n. 9, p. 568-576, 1988.
- GHORBANPOUR, Mansour; HADIAN, Javad. **Multi-walled carbon nanotubes stimulate callus induction, secondary metabolites biosynthesis and antioxidant capacity in medicinal plant *Satureja khuzestanica* grown in vitro.** Carbon, v. 94, p. 749-759, 2015.
- GIOMO, Gerson Silva.; MISTRO, Julio Cesar.; PEREIRA, Sergio Parreiras. **Cafés do Brasil – do IAC para o mundo.** O Agrônomo – Boletim técnico informativo do Instituto Agrônomo – 2017. Disponível em: <https://oagronomico.iac.sp.gov.br/?p=874>. Acesso em Mai. 2022.
- GONZÁLEZ-GARCÍA, Yolanda *et al.* **Impact of carbon nanomaterials on the antioxidant system of tomato seedlings.** International Journal of Molecular Sciences, v. 20, n. 23, p. 5858, 2019.
- GUIMARÃES, Rubens José. **Formação de mudas de cafeeiro:(*Coffea arabica* L.): efeitos de reguladores de crescimento e remoção do pergaminho na germinação de sementes e do uso de N e K em cobertura, no desenvolvimento de mudas.** 1995. Tese Doutorado – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- IJIMA, Sumio. **Helical microtubules of graphitic carbon.** nature, v. 354, n. 6348, p. 56-58, 1991.
- KHODAKOVSKAYA, Mariya V. *et al.* **Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells.** ACS nano, v. 6, n. 3, p. 2128-2135, 2012.
- VILLAGARCIA, Hector *et al.* **Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants.** Small, v. 8, n. 15, p. 2328-2334, 2012.
- KHODAKOVSKAYA, Mariya V. *et al.* **Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions.** Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 108, n. 3, p. 1028-1033, 2011.

- KING, M.W.; ROBERTS. E.H. **The storage of recalcitrant seeds: achievements and possible approaches.** Rome: International Board for Plant Genetic Resources, 1979. 96p.
- KIST, B. B. et al. **Anuário Brasileiro do Café.** Editora Gazeta Santa Cruz do Sul. v. 1, p. 40. 2022
- KOVACIC, Peter; SOMANATHAN, Ratnasamy. **Biomechanisms of nanoparticles (toxicants, antioxidants and therapeutics): electron transfer and reactive oxygen species.** Journal of nanoscience and nanotechnology, v. 10, n. 12, p. 7919-7930, 2010.
- KROTO, Harold W. et al. C60: **Buckminsterfullerene.** nature, v. 318, n. 6042, p. 162-163, 1985.
- LAHIANI, Mohamed H. et al. **Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops.** ACS applied materials & interfaces, v. 5, n. 16, p. 7965-7973, 2013.
- LANDSIEDEL, Robert et al. **Genotoxicity investigations on nanomaterials: methods, preparation and characterization of test material, potential artifacts and limitations—many questions, some answers.** Mutation Research/Reviews in Mutation Research, v. 681, n. 2-3, p. 241-258, 2009.
- LIU, Qiaoling et al. **Carbon nanotubes as molecular transporters for walled plant cells.** Nano letters, v. 9, n. 3, p. 1007-1010, 2009.
- MATIELLO, J. B. (1991). **O Café: do Cultivo ao Consumo.** São Paulo: Globo. 320p. Acesso em Mai. 2022.
- MESQUITA, Carlos Magno de et al. **Manual do café: implantação de cafezais *Coffea arabica* L.** Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016. 50 p. il.
- MILNE, W. I. et al. **Carbon nanotubes as field emission sources.** Journal of Materials Chemistry, v. 14, n. 6, p. 933-943, 2004.
- NEL, Andre et al. **Toxic potential of materials at the nanolevel.** science, v. 311, n. 5761, p. 622-627, 2006.
- ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ. **Relatório sobre o Desenvolvimento do Café da OIC – 2019.** Disponível em <https://www.ico.org/documents/cy2018-19/ed-2318p-overview-flagship-report.pdf>. Acesso em Mai. 2022
- PASTRANA-MARTÍNEZ, Luisa et al. **Nanotubos e grafeno: os primos mais jovens na família do carbono!.** Química, v. 128, p. 21-27, 2013.
- PATEL, Anuradha et al. **Carbon nanotubes as plant growth regulators: impacts on growth, reproductive system, and soil microbial community.** In: Nanomaterials in plants, algae and microorganisms. Academic Press, 2019. p. 23-42.

- PENNACCHIO, Marcello; JEFFERSON, Lara V.; HAVENS, Kayri. **Arabidopsis thaliana: A new test species for phytotoxic bioassays**. *Journal of chemical ecology*, v. 31, n. 8, p. 1877-1885, 2005.
- PÉREZ-DE-LUQUE, Alejandro; RUBIALES, Diego. **Nanotechnology for parasitic plant control**. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, v. 65, n. 5, p. 540-545, 2009.
- PERTEL, Josete. **Efeito do condicionamento fisiológico na germinação, no vigor e nas alterações enzimáticas em sementes de café (Coffea arabica L.)**. 2001.
- RAHMANI, Nosrat; RADJABIAN, Tayebah; SOLTANI, Bahram Mohammad. **Impacts of foliar exposure to multi-walled carbon nanotubes on physiological and molecular traits of Salvia verticillata L., as a medicinal plant**. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 150, p. 27-38, 2020.
- SAKIYAMA, N. S. *et al.* **Café arábica: do plantio a colheita**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2015, 316 p.
- SERAG, Maged F. *et al.* **Trafficking and subcellular localization of multiwalled carbon nanotubes in plant cells**. *ACS nano*, v. 5, n. 1, p. 493-499, 2011.
- MATIELLO, J. B. **Sucesso na formação, em larga escala, de mudas de café em bandejas plásticas** 2018 -<https://www.cafepoint.com.br/noticias/tecnicas-de-producao/sucesso-na-formacao-em-larga-escala-de-mudas-de-cafe-em-bandejas-plasticas-211510/> Acesso em Julho de 2022
- TIWARI, D. K. *et al.* **Interfacing carbon nanotubes (CNT) with plants: enhancement of growth, water and ionic nutrient uptake in maize (Zea mays) and implications for nanoagriculture**. *Applied Nanoscience*, v. 4, n. 5, p. 577-591, 2014.
- VALLONE, H. S. **Produção de mudas de cafeeiro (Coffea arábica L.) em tubetes com polímero hidrotentor, diferentes substratos e adubações** / Haroldo Silva Vallone. -- Lavras : UFLA, 2003. 75 p. : il.
- VERMA, Sandeep Kumar *et al.* **Applications of carbon nanomaterials in the plant system: A perspective view on the pros and cons**. *Science of the Total Environment*, v. 667, p. 485-499, 2019.
- WANG, Peng *et al.* **Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences**. *Trends in plant science*, v. 21, n. 8, p. 699-712, 2016.
- WENT, Frits Warmolt *et al.* **The experimental control of plant growth**. *The experimental control of plant growth.*, v. 17, 1957.