



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de São José do Rio Preto

Gabriella Fernanda Miranda Rodrigues

Avaliação do tempo de contato do Carvão Hidrotérmico no
solo para o crescimento de *Solanum Lycipersieum*

São José do Rio Preto
2021

Gabriella Fernanda Miranda Rodrigues

Avaliação do tempo de contato do Carvão Hidrotérmico no solo para
o crescimento de *Solanum Lycipersieum*

Dissertação apresentada
como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Química, junto ao Programa de
Pós-Graduação em Química, do
Instituto de Biociências, Letras e
Ciências Exatas da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, Câmpus de São
José do Rio Preto.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Márcia
Cristina Bisinoti
Coorientador: Altair Benedito
Moreira

São José do Rio Preto
2021

R696a

Rodrigues, Gabriella Fernanda Miranda

Avaliação do tempo de contato do Carvão Hidrotérmico no solo para o crescimento de *Solanum Lycipersieum* / Gabriella Fernanda Miranda

Rodrigues. -- São José do Rio Preto, 2021

93 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

Orientadora: Márcia Cristina Bisinoti

Coorientadora: Altair Benedito Moreira

1. Carvão Hidrotérmico. 2. Solo. 3. Crescimento de planta. 4. *Solanum lycipersieum*. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Gabriella Fernanda Miranda Rodrigues

Avaliação do tempo de contato do Carvão Hidrotérmico no solo para o
crescimento de *Solanum Lycipersieum*

Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Química, junto ao
Programa de Pós-Graduação em
Química, do Instituto de Biociências,
Letras e Ciências Exatas da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, Câmpus de São José
do Rio Preto.

COMISSÃO EXAMINADORA

Profa . Dra . Márcia Cristina Bisinoti
UNESP – S. J. Rio Preto
Orientadora

Prof. Dr. Altair Benedito Moreira
UNESP – S. J. Rio Preto
Co-orientador

Prof. Dr. Odair Pastor Ferreira
Professor Centro de Ciências, Departamento de Física.
Universidade Federal do Ceará - Fortaleza

Prof. Dr. Diego Stéfani Teodoro Martinez
Laboratório Nacional de Nanotecnologia
Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais

São José do Rio Preto
30 de Agosto de 2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Valter e Ana Lucia, e à minha irmã, Ana Luiza, que se fizeram presentes em todos os momentos desta caminhada, me apoiando e me encorajando frente a cada dificuldade e a cada novo desafio.

AGRADECIMENTOS

À Deus que me deu o dom da vida e que me guiou sempre pelos caminhos corretos, para que hoje eu pudesse estar aqui, me dando força pela fé frente a cada obstáculo.

Aos meus pais, Valter e Ana Lucia, e minha irmã, Ana Luiza, pelo incentivo, força e apoio incondicional durante todos esses anos, não deixando que eu desistisse ou perdesse a coragem frente aos novos desafios que surgiram. Com certeza, sem eles este trabalho não seria concluído.

Ao meu tio Álvaro (in memoriam) pelas muitas palavras e mensagens de incentivo e carinho, sempre acreditando em mim. Aos meus primos, meus tios e avós, em especial a minha avó Altina, que sempre se preocupou e me encorajou a seguir nos caminhos que eu escolhi.

Às minhas amigas Verônica e Karen, pela paciência e apoio nos momentos difíceis, pelos momentos de descontração, quando eu precisava, e pelos muitos e muitos anos de amizade.

À professora Dra. Márcia Cristina Bisinoti pela amizade, orientação, paciência e ajuda no desenvolvimento deste trabalho. E, também, ao professor Dr. Altair Benedito Moreira pela atenção e auxílio com o mesmo.

A todos os amigos do LECA e do LIQAV, pelas amizades e momentos de descontração ao longo destes dois anos de convivência.

Aos amigos Guilherme, Bernardo, Vinicius, Bruna, Henrique, entre outros que o mestrado me trouxe: o meu muito obrigada pelos momentos de descontração e alegria.

Aos professores da pós-graduação e todos aqueles que passaram pela minha vida, me ensinando, incentivando e dando a base necessária para que eu chegasse até aqui.

Ao pessoal da Central Analítica da Universidade Federal do Ceará pelas imagens de microscopia eletrônica de varredura.

A todos os amigos, colegas e funcionários do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, que contribuíram de forma direta ou indiretamente para meu crescimento pelo conhecimento adquirido e para a realização deste trabalho.

A vocês, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Carvões hidrotérmicos (CH) obtidos a partir da Carbonização Hidrotérmica de subprodutos da indústria sucroenergética são ricos em nutrientes e matéria orgânica, tendo apresentado substâncias tipo húmicas na sua composição. Estudos de liberação de nutrientes e matéria orgânica, bem como de germinação e crescimento de diversas plantas, têm demonstrado potencial de uso do CH como condicionador do solo. Os efeitos do tempo de contato do CH com o solo na liberação de nutrientes são ainda escassos. Nesse contexto o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito do tempo de contato entre o carvão hidrotérmico e os solos no cultivo de *Solanum lycopersium*. Para isto, um total de 35 vasos contendo solo e CH (0, 10 e 20 t ha⁻¹) foram montados seguido de crescimento de *Solanum lycopersium*. Foram avaliados dois tempos de contato entre CH e solo, o tempo 30 dias (Solo_{t0}) e o tempo 24 meses (Solo_{t1}) em latossolo, argissolo e terra mulata. No solo, antes e após o experimento de crescimento, foram determinadas a umidade, cinza, matéria orgânica, pH, acidez potencial e nutrientes. Nas plantas foram medidos o comprimento total e a massa seca da parte aérea, e comprimento e massa seca da raiz, bem como a microscopia eletrônica de varredura da raiz (MEV) e das folhas. Em todos os tipos de solos após a plantação de culturas ocorreu a diminuição do pH. Nas análises de MEV das folhas das plantas do solo em contato com o carvão por 30 dias, os estômatos anomocítico se mostraram presentes nas superfícies abaxiais. O solo com maior tempo de contato com o carvão hidrotérmico apresentou concentração maior de nutrientes antes do plantio do tomate, sugerindo que a presença do CH proporcionou uma maior disponibilidade de nutrientes com o passar do tempo.

Palavras-chave: Carvão hidrotérmico. Solo. Crescimento de planta. *Solanum lycopersium*.

ABSTRACT

*Hydrochars obtained from the hydrothermal carbonization of by-products from the sugar-energy industry are rich in nutrients and organic matter, having presented humic-like substances in their composition. Studies on the release of nutrients and organic matter, as well as on the germination and growth of several plants, have demonstrated the potential for using CH as a soil conditioner. The effects of CH contact time with the soil on nutrient release are still scarce. In this context, the objective of this work was to evaluate the effect of the contact time between the hydrothermal coal and the soils in the cultivation of *Solanum lycopersium*. For this a total of 35 pots containing soil and CH (0, 10 and 20 t ha⁻¹) were mounted followed by growth of *Solanum lycopersium*. Two times of contact between CH and soil were evaluated, the time 30 days (Solo_{t0}) and the time 24 months (Solo_{t1}) in oxisol, argisol and terra mulata. In the soil before and after the growth experiment, moisture, ash, organic matter, pH, potential acidity and nutrients were determined. In the plants, the total length and dry mass of shoots and length and dry mass of the root were measured, as well as scanning electron microscopy of the root and leaves. In all types of soils after planting crops there was a decrease in pH. In SEM analyzes of the leaves of soil plants in contact with charcoal for 30 days, the anomocytic stomata were present on the abaxial surfaces. The soil with longer contact time with hydrothermal charcoal had a higher concentration of nutrients before planting the tomato, suggesting that the presence of CH provided a greater availability of nutrients over time.*

*Keywords: Hydrochars. Soil. Plant growth, *Solanum lycopersium*.*

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Representação esquemática das regiões constituintes de uma raiz da planta de um tomateiro. 38
- Figura 2.** Valores da capacidade de troca catiônica do Solo_{t0} (solo em contato com CH por 30 dias) e do Solo_{t1} (solo em contato com o CH por 24 meses), antes e após o experimento de crescimento. 44
- Figura 3.** Valores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), manganês (Mn), sódio (Na) e potássio (K) totais para todos os solos, e todos os tempos de contato com o CH, antes e após o experimento de crescimento para as diferentes taxas de aplicação de carvão hidrotérmico 46
- Figura 4.** Foto dos vasos dentro da câmara de crescimento após 12 dias de semeadura de tomate. 50
- Figura 5.** Quantidade de sementes de tomate germinadas por vaso nos diferentes solos, sendo AC, A10, A20, LC, L10, L20 e TM, respectivamente argissolo controle, argissolo 10t ha⁻¹, argissolo 20t ha⁻¹, latossolo controle, latossolo 10t ha⁻¹, argissolo 200t ha⁻¹ e terra mulata. 51
- Figura 6.** Gráfico da massa seca das plantas que foram retiradas do vaso no momento do desbaste, 12 dias após o plantio. 53
- Figura 7.** Gráfico da massa seca da parte aérea das plantas após o plantio de 97 dias. 55
- Figura 8.** Gráfico da massa seca da raiz das plantas após o plantio de 97 dias. 55
- Figura 9.** Foto dos vasos de plantas após 97 dias da semeadura dos solos. A) argissolo controle; B) argissolo 10tha⁻¹; C) argissolo 20tha⁻¹; D) latossolo controle; E) latossolo 10tha⁻¹; F) latossolo 20tha⁻¹, G) terra mulata e H) tomate produzido. 57
- Figura 10.** Imagens de microscopia eletrônica de varredura das folhas dos tomateiros plantados no Solo_{t0}, (1) argissolo controle, (2) argissolo 10tha⁻¹, (3) argissolo 20tha⁻¹, (4) latossolo controle, (5) latossolo 10tha⁻¹, (6) latossolo 20tha⁻¹. 60

Figura 11. Imagens de microscopia eletrônica de varredura das folhas dos tomateiros plantados no Solo_{t1}. (1) argissolo controle, (2) argissolo 10tha⁻¹, (3) argissolo 20tha⁻¹, (4) latossolo controle, (5) latossolo 10tha⁻¹, (6) latossolo 20tha⁻¹ e (7) terra mulata.

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Condições instrumentais para determinação dos elementos cálcio (Ca), potássio(K), magnésio(Mg), manganês(Mn) e sódio(Na). 36

Tabela 2. Valores de umidade, cinza e matéria orgânica dos solos em contato com o CH por 30 dias e por 24 meses, antes e após o plantio de tomate. 40

Tabela 3. Valores de pH e acidez potencial do Solo_{t0} (solo em contato com CH por 30 dias) e do Solo_{t1} (solo em contato com o CH por 24 meses) antes e depois do experimento de crescimento de tomate. 42

Tabela 4. Valores referente a média de número de folhas, massa total e comprimento total das plantas de tomate de cada vaso, do Solo_{t0} (solo em contato com CH por 30 dias) e do Solo_{t1} (solo em contato com o CH por 24 meses), após 97 dias de crescimento 54

LISTA DE ABREVIATURAS

A10 – argissolo e adição de 10 t de CH ha⁻¹

A20 – argissolo e adição de 20 t de CH ha⁻¹

Ac - argissolo controle

ADJ- Solo adjacente

CH- Carvão hidrotérmico

CHT- Carbonização Hidrotérmica

COT – Carbono orgânico total

CTC – Capacidade de troca catiônica

INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial

L10 – latossolo e adição de 10 t de CH ha⁻¹

L20 – latossolo e adição de 20 t de CH ha⁻¹

Lc – latossolo controle

Solo_{t0} – Solo em contato com o carvão hidrotérmico há 30 dias

Solo_{t1} - Solo em contato com o carvão hidrotérmico há 24 meses

TM – Terra mulata

TPI-Terras Pretas de Índio (TPI)

US EPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1.	Subprodutos das indústrias sucroenergéticas.....	17
2.2.	Carbonização hidrotérmica (CHT).....	18
2.3.	Solos.....	21
2.4.	Estudos de biochar e carvão hidrotérmico em solos.....	24
3.	OBJETIVOS.....	30
4.	MATERIAL E MÉTODO.....	31
4.1.	Carvão hidrotérmico.....	31
4.2.	Solos.....	31
4.3.	Experimento de crescimento de tomate na presença de diferentes taxas de carvão hidrotérmico.....	32
4.3.1.	Análise dos solos.....	33
4.3.1.1.	Determinação de teor de umidade, cinzas e matéria orgânica.....	33
4.3.1.2.	Determinação do pH.....	34
4.3.1.3.	Acidez potencial do solo.....	34
4.3.1.4.	Capacidade de troca catiônica (CTC).....	35
4.3.1.5.	Quantificação de Inorgânicos.....	35
4.3.2.	Análises das plantas.....	36
4.3.2.1.	Análises de crescimento das plantas.....	36
4.3.2.2.	Análise da massa seca.....	37
4.3.2.3.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das raízes e das folhas.....	37
4.3.3.	Análise estatística.....	38
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1.	Solos.....	39
5.1.1.	Determinação do teor de umidade, cinza e matéria orgânica.....	39
5.1.2.	pH e acidez potencial em solos.....	41
5.1.3.	Determinação da capacidade de troca catiônica.....	44

5.1.4.	Nutrientes totais nos solos, antes e após o plantio de tomate.....	45
5.2.	Análise das plantas.....	49
5.2.1.	Experimento de crescimento.....	49
5.2.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) Da Folha e da Raiz.....	59
6.	CONCLUSÃO.....	66
	REFERÊNCIAS.....	67
	ANEXO A - Imagens de microscopia eletrônica de varredura ampliada....	76

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é conhecido mundialmente pela produção agrícola, principalmente a produção de cana-de-açúcar, que é localizada na região centro-sul, com destaque ao estado de São Paulo (UNICA, 2020). Esse processo leva à geração de uma quantidade elevada de biomassa. Os processos de pirólise e de carbonização hidrotérmica (CHT), produzindo biochar e carvão hidrotérmico (CH), respectivamente, são vias alternativas que dão novos destinos para a biomassa (BERGE, et al., 2011). A pirólise, é um processo que ocorre em alta temperatura, sem a presença de água com no produto final denominado biochar e a CHT é um processo que ocorre sob temperaturas médias (<300 °C), em meio aquoso, sob pressão autogerada, com o produto final denominado carvão hidrotérmico (CH) (TITIRICI et al, 2012).

Estudos demonstraram que o carvão hidrotérmico em comparação ao biochar, sofre uma decomposição mais rápida, e isso se deve a sua menor quantidade de estruturas aromáticas e uma maior quantidade de carbono lábil em sua estrutura (CAO et al., 2011; LIBRA et al., 2011; STEINBEISS; GLEIXNER; ANTONIETTI, 2009), sendo capaz de prover um maior acesso ao carbono e nitrogênio para os microrganismos e vegetais presentes no solo (BARGMANN et al., 2014).

A ideia é que o carvão hidrotérmico possa ser aplicado em solos pobres em carbono ou nutrientes, de maneira que possam merolhará-los, sem a necessidade de adição de fertilizantes minerais, se tornando, assim, similar aos solos antropogênicos denominados Terras Pretas de Índios (TPI) da Amazônia e terra mulata (TM) (EMBRAPA, 2013; VERHEIJEN et al., 2009; REZENDE et al., 2011). Estes solos são reconhecidos internacionalmente pela elevada fertilidade.

Vários estudos têm sido conduzidos demonstrando que a produção de carvão hidrotérmico a partir da carbonização hidrotérmica de bagaço de cana-de-açúcar e vinhaça utilizando ácido fosfórico como aditivo gera um material sólido rico em carbono e nutrientes que contém substâncias tipo húmicas, no

processo ocorre formação de estruvita K ($\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ e $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$), que é reconhecida pelo potencial de uso agrícola (MELO et al., 2016). Também foram identificadas diferentes classes de compostos, destacando-se os fenóis, cetonas, furanos, compostos nitrogenados, ácidos carboxílicos e hidrocarbonetos (LARANJA, 2018; BENTO et al., 2020; SANTOS et al., 2020). Estudos em coluna com a adição de 0, 20, 50, 100 e 200 t ha⁻¹ de carvão hidrotérmico em solos argissolos, demonstraram liberação lenta de carbono e nutrientes (BENTO et al., 2019; SANTANA et al., 2019), sendo que maiores taxas de CH (10,0% m/m) no solo, resultaram nas maiores liberações de carbono orgânico total (2891 µg g⁻¹) e sulfato (2046 µg g⁻¹) para o solo, permitindo concluir que é possível melhorar as propriedades desses solos (SANTANA et al., 2019).

Os ácidos húmicos (HA) desempenham um papel importante na distribuição, toxicidade e biodisponibilidade de metais no meio ambiente. Através de extração, com NaOH, de carvão hidrotérmico produzidos com bagaço de cana-de-açúcar e vinhaça, produziu-se ácidos semelhantes ao húmicos, mas com propriedades análogas, como sua capacidade de interagir com compostos orgânicos e inorgânicos (SANTOS et. al., 2020). Estas mesmas substâncias, parecidas com as substâncias húmicas quando isoladas, tiveram a maior bioatividade, como a presença de metades anfílicas, as quais facilitam a liberação de moléculas bioativas de estruturas supramoleculares e estimula a germinação de sementes. A carbonização hidrotérmica de biomassa lignocelulósica foi considerada um método viável de produção substâncias tipo húmicas anfífilico para uso como promotores de crescimento de plantas (BENTO et al., 2019)

Os principais solos agriculturáveis no Brasil são os solos argissolos e latossolos. Eles são intemperizados e possuem baixa disponibilidade de nutrientes, requerendo o uso de fertilizantes. Os solos antropogênicos têm chamado a atenção da comunidade científica internacional devido a sua elevada fertilidade, que é proporcionada por liberação lenta de nutrientes e de carbono. Os carvões hidrotérmicos parecem ter características atrativas para serem empregados como condicionador de solos intemperizados. Segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE)

(2003), para avaliar se um composto ou substância química pode ser aplicada ao solo, estudos de germinação e crescimento em câmara, estufa e em campo devem ser realizados. Recomenda-se realizar testes com diversas culturas, além de usar um solo que seja arenoso e outro argiloso, deve-se ainda avaliar diversas concentrações do composto ou substância química, a fim de estabelecer uma relação dose-resposta (OCDE, 2003).

Dentre as culturas a serem testadas, se destaca o tomate, pois é uma das principais frutas processadas e frescas, e o segundo maior produto de colheita vegetal mundial. O tomate tem várias características relevantes, como frutas carnudas e folhas compostas, que não podem ser estudadas em outras plantas modelo. Desta forma, tornou-se um modelo para estudar a fisiologia de plantas e frutos, bioquimicamente (HEUVELINK, 2018).

O uso de carvão hidrotérmico em larga escala em solos agrícolas requer uma melhor especificação de sua persistência e disponibilidade em longo prazo, bem como uma avaliação do comportamento benéfico ou maléfico dos componentes de CH quando liberados na solução do solo. O carbono presente no carvão hidrotérmico, obtido com bagaço e vinhaça de cana-de-açúcar, e ácido fosfórico como aditivo, apresenta elevada estabilidade térmica, estimulando o estudo do CH em cultivo de culturas sucessivas, esperando que o mesmo libere lentamente nutrientes e matéria orgânica, melhorando, então, as propriedades do solo, como ocorre com os solos antropogênicos. Frente ao exposto, o objetivo principal desse trabalho foi avaliar o efeito do tempo de contato entre o carvão hidrotérmico e os dois tipos de solo: argissolo e latossolo, no crescimento de tomate.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Subprodutos das indústrias sucroenergéticas

O maior produtor mundial de cana-de-açúcar é o Brasil, e a maior produção localizada na região centro-sul, se destacando São Paulo, alcançando 337,24 milhões de toneladas na safra 2018/19 (CONAB; ÚNICA, 2020). O crescimento da produção, a intensificação das áreas de cana-de-açúcar e a busca pelo melhoramento da qualidade do produto final causam uma quantidade considerável de subprodutos, denominados biomassa.

A biomassa é um material lignocelulósico derivado da matéria orgânica viva ou recentemente viva, como madeira e resíduos agrícolas. A biomassa é um recurso de energia renovável que pode ser convertido em qualquer forma de combustível, incluindo sólido, líquido e gasoso (ÖZBAY et al., 2001). Normalmente, a biomassa é composta por três componentes principais: celulose, hemicelulose e lignina. Esses componentes são fortemente entremeados, fornecendo estrutura e rigidez à planta.

Os principais subprodutos das indústrias sucroenergéticas são a vinhaça e o bagaço de cana-de-açúcar. A quantidade de 1 tonelada de cana-de-açúcar moída gera aproximadamente 250 kg de bagaço de cana-de-açúcar, e a forma mais empregada do descarte é na produção de energia elétrica, na qual o bagaço de cana-de-açúcar é queimado em caldeiras. A produção de um litro de álcool gera de 10 a 15 litros de vinhaça (ALVARENGA E QUEIROZ, 2009), e seu descarte é feito em solos, como fonte de fertilizantes por meio da fertirrigação.

O bagaço de cana-de-açúcar é uma matéria fibrosa sólida, gerada ao final do processo de moagem. Na produção de etanol, ele representa de 24 a 40% da cana-de-açúcar, sendo constituído basicamente por uma matriz de polissacarídeos associados quimicamente entre si (celulose e hemicelulose), recoberta por uma substância polifenólicas (SANTOS et al., 2012), representando cerca de 26,6 a 54,3% de celulose, de 14,3 a 24,4% de hemicelulose e de 22,7 a 29,7% de lignina (SILVA et al., 2007). A vinhaça é um resíduo líquido, gerado na etapa de destilação do etanol a partir do mosto, de

coloração escura, com alto teor de matéria orgânica, temperatura elevada, pH baixo, corrosividade (SILVA et al., 2014), além de grandes quantidades de ânions e cátions, como nitrato ($0,1$ a $1,2 \text{ g L}^{-1}$), sulfato ($1,1$ a $4,2 \text{ g L}^{-1}$) e potássio ($2,3$ – $5,1 \text{ g L}^{-1}$) (MORAES et al., 2015).

A disposição de vinhaça no solo agrícola do Estado de São Paulo foi regulamentada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), por meio da Norma Técnica P 4.231/2005, que estabelece os critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça. Brito e colaboradores (2007) estudaram a aplicação de diferentes taxas de vinhaça em solos e demonstraram que o teor de sódio no lixiviado aumentava de acordo com o aumento da dose de aplicação, podendo acarretar poluição das águas do lençol freático.

Neste contexto, outros estudos que demonstrem novos usos para estes subprodutos parecem ser interessantes, como, por exemplo, empregá-los na carbonização hidrotérmica, para produzir carvão hidrotérmico utilizando o ácido fosfórico como aditivo (BENTO et al., 2020; BENTO et al., 2019; MELO et al., 2016; SANTOS et al., 2019).

2.2. Carbonização hidrotérmica (CHT)

A pirólise e a carbonização hidrotérmica são processos de conversão térmica. A pirólise é um processo de decomposição termoquímica cuja biomassa é aquecida em temperatura elevada (300 – $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e com ausência de oxigênio. O processo resulta na formação de três produtos principais: produto sólido rico em carbono (biochar), um produto volátil, que pode ainda ser parcialmente condensada na fase líquida (bio-óleo), e os restantes gases chamados "não condensáveis", como CO , CO_2 , CH_4 e H_2 (BROWNSORT, 2009; MOHAN et al., 2006).

A carbonização hidrotérmica é o método para converter diversas biomassas úmidas em produtos à base de carbono, gerando um material sólido e hidrofílico, e de valor agregado, denominado de carvão hidrotérmico. O processo consiste em submeter a biomassa úmida para aquecer em um reator fechado, no qual a temperatura é, relativamente, baixa (150 a $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$), sob

pressões autogeradas pela própria água contida no material (BRIDGWATER, 2012). Com essa técnica há formação do carvão hidrotérmico (CH), da água de processo e de gases.

A biomassa pode ser classificada de acordo com suas características químicas: as biomassas que contêm principalmente ácidos graxos, proteínas, pequenas quantidades de hemicelulose, celulose e lignina são denominadas biomassas não-lignocelulósicas, como, por exemplo, lodo de esgoto e esterco animal; se a biomassa contêm principalmente hemicelulose, celulose e lignina, é denominada biomassa lignocelulósica, como, por exemplo, resíduos sólidos biológicos e resíduos agrícolas (HEIDARI et al., 2019). Cada biomassa utilizada no processo de carbonização pode fornecer um carvão hidrotérmico com propriedades estruturais ou físico-química diferenciadas.

O processo de carbonização hidrotérmica promove uma série de reações, incluindo hidrólise, desidratação, descarboxilação, polimerização e condensação (FUNKE e ZIEGLER, 2010; TIRIRICI et al., 2012). Devido à presença de água subcrítica, o mecanismo de reação é iniciado por hidrólise. Como ela tem energia de ativação menor que a maioria das outras reações, pode-se afirmar que o HTC é regido pela hidrólise. Durante hidrólise, as ligações éster e éter da hemicelulose (em $T > 180\text{ }^{\circ}\text{C}$), celulose (em $T > 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) e lignina (em $T > 220\text{ }^{\circ}\text{C}$) se quebram em muitos fragmentos, favorecendo a rápida degradação e despolimerização desses polímeros em produtos solúveis como oligômeros e monômeros (BRUNNER, 2009; BOBLETER, 1994; FUNKE, ZIEGLER, 2010; YU et al., 2007). As reações de desidratação e de descarboxilação são responsáveis pela redução da razão H/C e das razões O/C.

A vantagem de HTC é que se pode utilizar material úmido para ser convertido em um carbonáceo sólido, com rendimentos altos e sem a necessidade de usar energia para secar a matéria antes ou durante o processo. Com isto, se abrange o potencial de matéria-prima que pode ser utilizada, tais como os resíduos humanos e os resíduos da agricultura (LIBRA et al, 2011).

O carvão hidrotérmico possui alto poder energético e tem tido diversas aplicações: na agricultura (LIBRA, et al., 2011), nos meios para sequestro de carbono (TIRIRICI, et al., 2007; SEVILLA, et al., 2011), no combustível (BERGE,

et al., 2011) e, também, como adsorvente em tratamentos de águas, para aplicações biológicas e agrícolas (TITIRICI et al., 2012; ZHAO et al., 2013). E, ainda, devido ao fato de o carvão hidrotérmico apresentar uma elevada área superficial e porosidade, quando tratado, estudos apontam que este material poderia ser utilizado como “reservatório de água” para cultivos agrícolas irrigados, para posterior liberação ao solo. Além disto, os elementos químicos constituintes da biomassa poderiam fazer parte do carvão hidrotérmico, sendo recuperado pelas plantas como micro e macro nutrientes (BARGMANN et al., 2013; BILLER et al., 2012; ROSS et al., 2010).

Análises do CH proveniente da vinhaça indicaram a presença de estruturas aromáticas, provavelmente condensadas, evidenciadas tanto pela baixa razão atômica H/C, quanto pela identificação por meio de análise de infravermelho desse material (FREGOLENTE, 2015). Assim, este material pode apresentar recalcitrância considerável quando aplicado ao solo, pois é um material eficiente para a retenção e liberação de carbono no mesmo. Características estas que podem o aproximar daquelas exibidas pelas terras mulatas.

Melo e colaboradores (2017) estudaram o efeito do tempo, da temperatura e da acidez no processo de carbonização hidrotérmica de vinhaça e bagaço de cana-de-açúcar, utilizando ácido fosfórico como aditivo, e demonstrou que esse nutriente foi imobilizado no material sólido, possivelmente através da precipitação de estruvita K ($\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ e $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$). Já Silva et al., (2017) avaliaram o efeito de aditivos de ácidos (H_2SO_4 , H_3PO_4 , H_3BO_3), básicos (NaOH , KOH) e salinos (FeCl_2 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) na síntese de CH a partir de subprodutos da usina sucroenergética e os resultados indicaram que, com a adição de H_3PO_4 e $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, aumentou o rendimento de CH, resultado da precipitação de fosfatos e sulfatos. O aumento da temperatura da reação proporcionou maior imobilização de Ca, Mg, K, Mn, B, P e Fe, sendo que a adição de H_3PO_4 proporcionou maior imobilização de nutrientes. Estes resultados indicaram que o CH produzido pode ser utilizado como fornecedor de nutrientes para o solo. Foram realizadas as caracterizações inorgânica e orgânica do material, estudos de liberação de nutrientes, de germinação e

crescimento de plantas, com objetivos de sua utilização como condicionador do solo (BENTO et al., 2019; MELO et al., 2016; SILVA et al., 2017).

Estudos da disponibilidade de carbono e nutrientes para solos brasileiros, a partir desse carvão hidrotérmico, foram conduzidos. Os resultados mostraram que no carvão hidrotérmico, após 30 dias de experimento, não foram observadas diferenças entre a estrutura do carvão hidrotérmico e das fases cristalinas, evidenciando, então, que o carvão possui a capacidade de liberar lentamente os nutrientes presentes em sua estrutura (BENTO et al., 2019; SANTANA et al., 2019). O estudo de lixiviação em coluna, utilizando a aplicação de 4%(m/m) de carvão hidrotérmico, apresentou uma liberação superior de 40% de C, N, P, K, Mg e Fe em comparação à aplicação realizada com de 1%(m/m) do mesmo carvão, após o experimento de liberação de nutrientes de 30 dias na areia e no argissolo (BENTO et al., 2019).

2.3. Solos

Solo é a formação natural que se desenvolveu na porção superficial da crosta terrestre, resultado de interações de processos físicos, químicos e biológicos sob as rochas superficiais da crosta terrestre. A sua formação depende do clima, da natureza, dos organismos, do material de origem, do relevo e do tempo. O solo é constituído por material mineral, água, ar e matéria orgânica (BRADY; WEIL, 2016; MANAHAN, 2000).

As características de cada componente dos solos são dependentes do processo de formação e variam de acordo com o horizonte. Existem os horizontes que dividem os solos. Normalmente, no horizonte A (20-50cm) há uma intensa atividade biológica, que é importante no crescimento de vegetação. No horizonte B (50-150cm), se recebe matéria lixiviada e matéria orgânica modificada. Por fim, horizonte C (1-5m) contém material mineral não consolidado e pouca ação biológica. O horizonte A é o empregado para a agricultura (EMBRAPA, 2017).

A matéria orgânica do solo (MOS) exerce influência significativa e direta no crescimento das plantas, afetando os processos fisiológicos, morfológicos e bioquímicos da germinação de sementes, na absorção de íons, na diferenciação

celular e no crescimento total das plantas (CANELLAS e OLIVARES, 2014), valendo-se como a principal responsável pela fertilidade do solo e pelos processos que ocorrem nele, como a degradação e a erosão. (SENESI et al., 2007; PICCOLO, 1996). Essa matéria orgânica pode ser dividida em duas frações, a não-humificada e as substâncias húmicas. Esta última composta por ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) e humina, que, presentes em diferentes proporções, irão conferir diferentes características aos solos em termos de fertilidade (SENESI et al., 2007)

Os solos mais expressivos do território brasileiro, presentes em praticamente todas as regiões, são o argissolo e o latossolo. Estes são muito intemperizados, os quais geralmente apresentam pouca fertilidade e certa acidez. Os problemas de fertilidade são resolvidos pela adubação e a acidez pela calagem (EMBRAPA, 2017).

Argissolos representam aproximadamente 24% da superfície do Brasil, apresentam textura arenosa no horizonte A, enquanto no horizonte B, argilosa. O horizonte A contém maior teor de matéria orgânica, que consiste em material orgânico decomposto misturado com quartzo, e o horizonte E, que se encontra sob o horizonte A, geralmente é empobrecido de partículas argilosas devido sua migração para o horizonte B. Os horizontes A e E apresentam alta taxa de infiltração, o que está associado às partículas arenosas presentes, facilitando a lixiviação dos nutrientes (IAC, 2015; BATISTA; PAIVA; MARCOLINO, 2014). Os minerais predominantes são argilas de atividade baixa (caulinita) e/ou óxidos (SANTOS et al., 2018). A fertilidade desse tipo de solo é bastante diversificada, com predomínio de relativa pobreza de nutrientes e são moderadamente ácidos.

O solo mais representativo do Brasil é o latossolo, encontrado em todo o território nacional, ocupando aproximadamente 39% da área total do país. É constituído por material mineral, altamente intemperizado e sem incremento de argila em profundidade. Possui, em geral, textura média ou argilosa, sendo solo mineral e caracterizados pela coloração, independente da profundidade, além de possuir baixa capacidade de troca de cátions (CTC) (IAC, 2015; KER, 2013). Latossolo está distribuído pelo território nacional, diferenciando-se pela cor e teores de óxido de ferro (IBGE, 2007). Os minerais predominantes na fração

argila são caulinita e óxidos de ferro e alumínio (SANTOS et al., 2018). De modo geral, são solos ácidos e de baixa fertilidade.

A formação dos solos da Amazônia envolvia detritos das tribos, como fezes e restos de comidas e a utilização do fogo, e, este último, ao invés de mineralizar o solo, produzia carvão que continha nutrientes (devido à baixa temperatura da chama), aumentando a troca catiônica do solo e estabilizando a matéria orgânica (GLASER; BIRK, 2012). A floresta amazônica contém faixas de terras chamadas de Terra Preta de Índio (TPI) e de Terra Mulata (TM), as quais ambos os solos são de fonte antropogênica, derivados de tribos indígenas (HECKENBERGER et al., 2007). Esses solos estão presentes na região da bacia amazônica e foram formados por ação antropogênica, envolvendo a prática realizada pelos índios, a qual queimavam seus resíduos, entre 600 e 8700 anos atrás, o que pode explicar a estabilidade a longo prazo no solo (JORIO et al., 2010, NOVOTNY et al., 2009; GROSSMAN et al., 2010).

Entre os solos Terra Preta de Índio, destacam-se uma classe de solos, conhecida como solos Terra Mulata, os quais apresentam coloração mais clara que os solos TPI, porém com as mesmas propriedades químicas e físicas, destacando-se a elevada fertilidade. A origem destes solos é reportada como sendo consequência das atividades de povos indígenas (NOVOTNY et al., 2009; KERN et al., 2009). A terra preta de índio apresenta restos de cerâmica e artefatos indígenas, assim como elevado teor de Mg, Ca, Mn, Zn, P e C (KERN et al., 2009). Uma das principais características deste solo é a sua capacidade de manter a elevada fertilidade, mesmo com seu uso intensivo, fator devido às propriedades e características da matéria orgânica/ presente (NOVOTNY et al., 2009), devido, também, não somente a presença de carbono na sua composição, mas ainda ao perfil desse carbono, com estruturas aromáticas mais condensadas conferindo maior recalcitrância à matéria orgânica (ARAÚJO et al., 2014).

A diferença entre os solos TPI e TM são causadas principalmente pelo tempo que os solos foram utilizados e os tipos de utilização. A terra preta se diferencia principalmente por vários decímetros de espessura na camada horizontal superior, com uma alta concentração de matéria orgânica e nutrientes

(principalmente o fósforo) (GLASER; BIRK, 2012). A terra mulata possui uma coloração mais clara, uma camada horizontal superior menos espessa e uma menor concentração de nutrientes e conseqüentemente uma menor fertilidade (TEIXEIRA et al., 2009), porém, é ainda maior quando comparado aos outros tipos de solos originais.

A Terra Preta de Índio (TPI), que é um solo de interesse global devido às suas características intrínsecas (KAMBO E DUTTA, 2015), é a motivação da utilização do carvão hidrotérmico como condicionante do solo. Esse solo é rico em nutrientes, principalmente cálcio, fósforo e magnésio, tem alta fertilidade, possui alto teor de matéria orgânica recalcitrante (PAGANO et al., 2016). Estas características podem fornecer uma maior quantidade de nutrientes para as plantas e aumentar a capacidade de troca de cátions.

As propriedades dos solos “Terra Preta de Índio” e Terra Mulata com uma elevada concentração de P, Ca, Mg, Zn, Mn e de C na fração orgânica do solo (OLIVEIRA et al., 2018), auxiliam na explicação da estabilização de matéria orgânica, aumento da atividade microbiana e capacidade de troca catiônica observada nesses solos, conferindo uma elevada fertilidade (LEHMANN et al., 2003; TEIXEIRA, 2010). Por esta razão, estes solos acabaram despertando o interesse de muitos pesquisadores.

2.4. Estudos de biochar e carvão hidrotérmico em solos

A produção do biochar foi feita idealizando produzir um novo material que apresentasse características funcionais similares as encontradas nas Terra Preta de Índio (GLASER et al., 2001; GLASER E BIRK, 2012; NOVOTNY et al., 2009; THINES et al., 2017). A aplicação de biochar em solos melhorou as propriedades químicas, conferindo aumento da capacidade de troca catiônica, maior retenção de água e armazenamento de carbono (MUKHERJEE E ZIMMERMAN, 2013; ZHAO et al., 2013), favorecendo a fertilidade do solo.

Os nutrientes e carbono orgânico oriundos do biochar produzido com diferentes matérias-primas foram estudadas por alguns autores (RIEDEL et al., 2015; YUAN et al., 2016; ZHENG et al., 2013). Nesses estudos foram demonstrados que a liberação de nutrientes e carbono era dependente das

condições de preparação do material, como a natureza da biomassa e a temperatura de carbonização. Também foi verificado que a quantidade de nutrientes liberada é dependente do tipo de solo em que o biochar foi aplicado (MUKHERJEE e ZIMMERMAN, 2013)

Sun e colaboradores (2017) avaliaram o biochar, originário do processo de pirólise de trigo e de milho, na germinação de semente de milho. Os estudos foram conduzidos em extratos de biochar que foram obtidos empregando extrator ácido ($\text{HCl } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$), bem como em solução sintética produzida com a concentração apenas dos compostos inorgânicos presentes. Os resultados de crescimento inicial mostraram que há diferença no desenvolvimento das sementes entre a solução extraída e a solução artificialmente preparada, indicando que os resultados encontrados são, provavelmente, devidos a fração orgânica do biochar solúvel no extrator. Sun et al. (2017) atribuiu os efeitos positivos observados no crescimento da raiz à quantidade de carbono presente na solução extraída de biochar

Vaccari e colaboradores (2011) avaliaram o emprego de biochar na cultura de trigo. Os autores trabalharam com duas concentrações em solos (30 e 60 t ha^{-1}) e avaliaram o efeito de duas safras sucessivas. Os resultados obtidos indicaram aumento na produção de grãos e um maior rendimento de biomassa para ambas taxas de aplicação quando comparados com o controle, mostrando que o biochar promoveu melhora na qualidade do solo, sendo esta melhora persistente na safra subsequente.

Mia e colaboradores (2014) avaliaram os efeitos da aplicação de biochar, com taxas de 0 , 10 , 50 e 120 t ha^{-1} , na fixação biológica de nitrogênio em *Trifolium pratense* (trevo vermelho) em monoculturas, e também na presença de grama *Festuca rubra L.* e *Plantago lanceolata L.* Os autores concluíram que diferentes taxas de aplicação provocavam mudanças distintas quanto à produção de biomassa e na fixação biológica de nitrogênio. A taxa de aplicação de 120 t ha^{-1} diminuiu a produção de biomassa tanto em culturas mistas quando em monocultura do trevo vermelho. Já a taxa de 10 t ha^{-1} proporcionou maior taxa de fixação biológica de nitrogênio, e, também, maior produção de biomassa.

Butnan e colaboradores (2015), relataram o efeito do biochar aplicado no solo em culturas subsequentes de milho, investigando os efeitos do tempo na aplicação. Foram analisados dois biochars, um obtido a temperatura de 350 °C e outro a 800 °C, e taxas de aplicação de 0, 1, 2 e 4% t ha⁻¹ em latossolo e argissolo, no período de 32 e 82 dias. O biochar produzido a 350 °C, e taxa de aplicação de 1 a 2 % t ha⁻¹, proporcionou melhores benefícios ao solo, na correção do pH (calagem) e diminuição dos níveis de alumínio no mesmo. Foi também constatado aumento na concentração de K nas folhas e diminuição das concentrações de Ca e Mg, nos solos, para todas as taxas de aplicação, mostrando-se mais significativa para a taxa de aplicação de 4%. Já para experimentos realizados utilizando trigo foi observada diminuição da biomassa, assim como aumento da concentração de K e Mg e diminuição de Ca nas plantas, com o aumento da taxa de aplicação de biochar no solo (BORCHARD et al., 2014).

A avaliação do potencial de uso do carvão hidrotérmico para fins agrícola tem sido conduzida por meio de experimentos com plantas, avaliando tanto o processo de germinação (BARGMANN et al., 2013; FANG et al., 2015) quanto o de crescimento (REIBE et al., 2015; RILLIG et al., 2010), bem como as alterações provocadas na biota do solo pelo carvão hidrotérmico (GEORGE et al., 2012; MELO et al., 2017; SALEM et al., 2013).

Estudos de crescimento de milho em argissolo e latossolo na presença de diferentes doses de carvão hidrotérmico (10 t ha⁻¹ e 20 t ha⁻¹ de CH), obtidos de subprodutos da cana-de-açúcar, vinhaça e bagaço da cana-de-açúcar, não demonstraram resultados significativos na estimulação do desenvolvimento inicial do milho, com relação a massa seca do grupo controle (FREGOLENTE, 2019). Contudo, resultados positivos foram obtidos quanto a aplicação de CH feito a partir do lodo de esgoto para a taxa de aplicação de 16 t ha⁻¹, proporcionando um aumento de 96% na massa seca do feijão, com relação ao controle, na segunda safra (MELO et al., 2018).

Biochar foram utilizados para remediação de solos, considerando sua alta capacidade de adsorção de poluentes orgânicos e inorgânicos e estimulação de consórcio microbiano do solo. Gonçalves e colaboradores, 2018, usou o

biochar como ferramenta para acelerar a degradação de PHBV e compostos de PHBV contendo AgNP em um sistema de solo tropical, em condições de laboratório, o efeito positivo está associado à melhoria da comunidade microbiana, que aumentou a taxa de degradação dos materiais poliméricos. A adição de 5–10% de biochar de bagaço de cana-de-açúcar ao solo aumentou a degradação desses materiais poliméricos 2 a 3 vezes após 30 dias de incubação no solo. Concluiu que íons AgNP ou Ag^+ causaram um declínio no número total de bactérias e fungos, o que diminuiu a taxa de degradação do polímero no solo.

Ainda, estudos trabalhando com a aplicação de 10 e 20 t ha⁻¹ CH a partir de subprodutos da cana-de-açúcar na presença de ácido fosfórico, nos experimentos de crescimento da beterraba, a concentração de 10 t ha⁻¹ apresentou resultados significativamente positivos com relação a massa seca, além de melhoras no enraizamento das plantas de beterraba e nas características das folhas (estômatos), indicaram aumento na concentração de alguns nutrientes no solo, a destacar, o cálcio(105 mg g⁻¹) , boro (800 mg g⁻¹), cobre(2,5 mg g⁻¹), ferro(100 mg g⁻¹) e zinco (10 mg g⁻¹) (CANCELLA, 2020)

O tipo de solo em que o carvão é aplicado pode influenciar a quantidade de nutrientes liberados devido às interações entre os nutrientes do lixiviado e os demais constituintes do solo (MUKHERJEE e ZIMMERMAN, 2013). Em estudos de liberação de nutrientes e matéria orgânica em experimentos de coluna, empregando solos argiloso e arenoso com diferentes doses de carvão hidrotérmica, tem sido demonstrada que solos argilosos tendem a reter mais carbono orgânico e nutriente e solos arenosos tendem a liberar maiores concentrações de nutrientes. Os autores também concluíram que o CH, oriundo da biomassa de bagaço e vinhaça, causa a lenta liberação de carbono e nutrientes em longo prazo, assim, se aplicado racionalmente o material pode servir como um fertilizante organo-mineral de liberação lenta (Bento et al., 2019).

Santana e colaboradores (2019) concluíram que é possível melhorar as propriedades dos solos, tais como a liberação de carbono orgânico total (COT) e sulfato, tornando possível, também, ajustar a melhor taxa de aplicação em função das necessidades da cultura que venha a ser cultivada. Tudo isto foi

através do estudo de coluna, utilizando o carvão hidrotérmico lavado (1,0, 2,5, 5,0 e 10,0 %) e o não lavado (10,0 %), produzido por a carbonização hidrotérmica com vinhaça e bagaço de cana-de-açúcar, em solos antropogênicos, latossolo, argissolo e areia, analisando a liberação de nitrato, de ortofosfato, de sulfatos, de carbono orgânico total (COT), H^+ foram avaliados por 30 dias, concluiu que maiores quantidades de nutrientes foram liberadas para os experimentos realizados com CH não lavado e que com maiores taxas de CH lavado, maior a quantidade de nutrientes liberados. COT e sulfatos foram liberados ao longo do experimento. Em solos de baixa fertilidade, como argissolo e latossolo, observaram maior liberação de nutrientes, o que é indicativo de que o CH melhora as propriedades desses solos. Apresentou que a liberação de carbono orgânico total, nitrato, sulfato e ortofosfato nos solos antropogênicos é lenta, o que justifica a fertilidade elevada por longo tempo deste material, sendo assim concluíram que é possível ajustar a taxa de aplicação de CH em solos com menor fertilidade de forma a aumentar como observado para solos antropogênicos.

Considerando as características do CH produzido na presença de ácido fosfórico, Bento e colaboradores (2019) avaliaram a liberação de nutrientes e carbono orgânico em experimentos de coluna de solo com a aplicação de CH nas proporções de 1 e 4% (m/m) em argissolo e latossolo, durante período de 30 dias, e obtiveram, como resultado, que a aplicação de 4% de carvão no experimento de colunas forneceu a maior liberação de nutrientes e carbono orgânico em comparação para aplicação de 1%. Foi demonstrado, também, que a liberação de nutrientes de CH depende do tipo de solo: solos arenosos tendem a liberar mais concentrações de nutrientes, e solos argilosos tendem a reter mais nutrientes e carbono orgânico, nenhuma diferença foi observada em a estrutura do CH e as fases cristalinas após 30 dias de experimento, sugerindo que este material pode causar a liberação lenta de nutrientes e carbono em longo prazo. Assim, para cada tipo de solo pode haver uma proporção adequada de hidrocarboneto a ser aplicada, dependendo nas necessidades de solo e tipo de cultivo, e, se aplicado de forma racional, pode servir como fertilizante organomineral, uma vez que libera macronutrientes e carbono orgânico.

Titirici e colaboradores (2012) relataram que o CH pode ser aplicado como condicionante do solo e com finalidade de promover benefícios para a biota do solo, melhorando o armazenamento de água e de carbono em longo prazo, disponibilizando, ainda, matéria orgânica e nutriente. No entanto, são escassos os estudos sobre possíveis efeitos do carvão hidrotérmico na biota do solo e crescimento de plantas.

Estudos apontam que a aplicação de 10 t ha⁻¹ de carvão hidrotérmico, obtido pela CHT de vinhaça e bagaço de cana-de-açúcar, empregando o ácido fosfórico como aditivo, apresentaram melhoras nas características de solos intemperizados, tais como argissolo e latossolo, em termos de aumento na retenção de água, nutrientes e no carbono orgânico total. Os resultados demonstraram melhoras no desenvolvimento da parte aérea e raízes das culturas de beterraba e milho, sugerindo que o carvão hidrotérmico tenha potencial para ser empregado como condicionante do solo (CANCELLA, 2020; FREGOLENTE, 2019; SANTANA, 2019).

A tendência crescente do uso de carvão hidrotérmico em larga escala em solos agrícolas requer uma melhor especificação de sua persistência e biodisponibilidade a longo prazo, bem como uma avaliação do comportamento benéfico ou maléfico dos componentes de CH, quando liberados na solução do solo.

3. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito do tempo de contato entre o carvão hidrotérmico e solos intemperizados no crescimento de tomate.

4. MATERIAL E MÉTODO

4.1. Carvão hidrotérmico

O carvão hidrotérmico empregado neste trabalho foi produzido de acordo com a patente registrada BR102016002221-5 (MELO et al., 2016). A carbonização hidrotérmica foi feita em um reator de teflon revestido de aço inox utilizando bagaço de cana-de-açúcar, vinhaça e ácido fosfórico (H_3PO_4). O processo ocorreu a temperatura de 230 °C, com adição de 4 % (v/v) ácido fosfórico e tempo de reação de 13 h. Após a reação, o reator foi imerso em banho de gelo para cessar a reação. Em seguida ele foi aberto, e o conteúdo separado por filtração a vácuo, separando a água-mãe e o carvão. Em seguida o carvão foi seco em estufa a 50 °C, e depois armazenado (MELO et al., 2017).

O carvão hidrotérmico empregado neste estudo apresenta como principais características a presença de macronutrientes essenciais para o desenvolvimento da planta como: P (21,1 g Kg⁻¹), Ca (8,1 g Kg⁻¹), Mg (12,9 g Kg⁻¹), K (12,6 g Kg⁻¹), bem como 58,20% de carbono (MELO et al., 2016).

4.2. Solos

Os procedimentos de amostragem e preservação de amostras de solo seguiram as recomendações propostas pelo método 2012 US EPA (US EPA, 2000), na qual foram utilizados solos de regiões diferentes, sendo o latossolos coletados na cidade de Maringá (PR) (23°23'16.63"S e 51°59'29.37"W), o argissolos coletados na cidade de Quatá (SP) (20°48'19.79"S e 49°19'43.51"W) e solo antropogênicos da Amazônia, Terra Mulata (TM) (3°04'05.17"S e 58°34'11.68"O). Os solos antropogênicos foram coletados e tiveram liberação do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos recursos Ambientais Renováveis (Autorização de Coleta SISBIO nº 50042-2) e cadastro no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado

(SISGen) número A0018C2. Os solos utilizados foram coletados nas camadas superficiais de 0-20cm, secas ao ar a temperatura ambiente (SANTANA et al., 2019).

Os solos utilizados neste trabalho foram caracterizados por (BENTO et al., 2019; SANTANA et al., 2019), cujos dados relevantes são elencados em umidade (0,61 % em argissolo e 1,97 % em latossolo), cinzas (96,51 % em argissolo e 87,36 % em latossolo), pH (6,41 em argissolo e 5,39 em latossolo), argila (16,52 % em argissolo e 42,85 % em latossolo) e silte (9,04 % em argissolo e 23,50 % em latossolo).

Nos solos em questão foi adicionado o fertilizante NPK (20,20,20) para uma maior disponibilidade de nutrientes. O solo latossolo sofreu correção de pH com calcário para que o pH não estivesse abaixo de 5, não sendo ideal para plantios.

4.3. Experimento de crescimento de tomate na presença de diferentes taxas de carvão hidrotérmico

Foram montados dois experimentos de crescimento de tomate empregando argissolo e latossolo. No experimento 1 os solos argissolo e latossolo foram mantidos 30 dias em contato com o carvão hidrotérmico denominado Solo_{t0}. No experimento 2 o crescimento de tomate foi realizado em argissolo e latossolo que receberam adição de carvão hidrotérmico tendo sido mantido por 24 meses, após o plantio de duas culturas, a cultura de milho e de beterraba, denominado Solo_{t1}.

Foram montados 30 potes no experimento 1 e 35 potes no experimento 2. Cada condição foi realizada em quintuplicata, sendo que foram realizados experimentos com argissolo controle (Ac) contendo apenas solos; argissolo e adição de 10 t de CH ha⁻¹ (A10), contendo 10 t de CH ha⁻¹ (0,5% m/m); argissolo 20 t de CH ha⁻¹ (A20), contendo 20 t de CH ha⁻¹ (1% m/m), latossolo controle (Lc) contendo apenas solos; latossolo 10 t de CH ha⁻¹ (L10), contendo 10 t de CH ha⁻¹ (0,5% m/m); latossolo 20 t de CH ha⁻¹ (L20), contendo 20 t de CH ha⁻¹ (1% m/m) e terra mulata (TM). Somente para o experimento 1 foi realizado um controle positivo com terra mulata.

Cada pote (vasos de 7 cm de diâmetro; 13 cm de altura) recebeu a adição de 500 g de solo, sendo que a homogeneização de cada condição foi realizada previamente. Os potes foram colocados aleatoriamente em câmara climática (TE-4002, Tecnal), mantidos à 23 °C, 60 % de umidade, fotoperíodo de 16 h dia e 8 h noite, sendo irrigados quando necessário. Fez o plantio de 5 sementes de tomate por pote. As sementes de tomate (*Solanum lycopersicum*, *Solanaceae*) (Sakata, 95% germinação) adquiridas comercialmente foram plantadas à 1,0-2,0 cm de profundidade. Após doze dias, foi feito o desbaste, deixando apenas a planta que apresentou o melhor desenvolvimento no vaso. As plantas ficaram no período de crescimento durante 97 dias. Após o período de crescimento, os vasos foram desmontados, onde a planta e o solo foram separados, nas plantas foram medidas o comprimento da parte aérea e da raiz, foi determinada a massa seca de ambas as partes e foi feita a análise de microscopia eletrônica de varredura da raiz e da folha. Nos solos foram analisados a umidade, cinza e matéria orgânica, o pH, a acidez potencial, a capacidade de troca catiônica, e análise dos nutrientes (Na, Mg, Ca, Mn, K.).

4.3.1. Análise dos solos

Todas as análises dos solos foram feitas antes e após o experimento de crescimento.

4.3.1.1. Determinação de teor de umidade, cinzas e matéria orgânica.

Em todos os solos (antes e após o plantio) se determinou os teores de umidade, cinzas e matéria orgânica, por meio do método ASTM Standard D2974-14 (ASTM INTERNATIONAL, 2014). O teor de umidade foi determinado pesando-se cerca de 1,0 g das amostras de solo em cadinhos de porcelana previamente tarados, sendo esses cadinhos aquecidos em estufa a 105 °C por 16h. A massa final foi obtida após resfriamento em dessecador até peso constante. Para obter o teor de cinzas, as amostras, descontadas da umidade, foram calcinadas em forno mufla (Marconi, MA 385) a 750 °C por 4h. Após

resfriamento em dessecador, a massa final foi obtida após o peso constante. A massa resultante (C) é denominada de cinzas e seu teor pode ser calculado pela Equação 1 e o teor de matéria orgânica (MO) foi determinado pela diferença (Equação 2).

$$\text{Cinzas, \%} = (C \times 100) / B \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

C= Solo calcinado a 750 °C na mufla durante 4 h; B= massa do solo após 16 h a 105 °C na estufa;

$$\text{Matéria Orgânica, \%} = 100 - D \quad \text{Equação 2}$$

Onde,

D= Porcentagem de cinzas presente no solo.

4.3.1.2. Determinação do pH

Em todos os solos foram determinados o pH, antes e depois do experimento de crescimento, por meio do método de análise de solo da EMBRAPA (EMBRAPA, 2017). O pH foi determinado em água deionizada e em CaCl_2 0,01 mol L^{-1} . Pesou-se 3,0 g de amostra de solo, seguido da adição de 25,0 mL de água deionizada e 25,0 mL de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} . As amostras foram agitadas com bastão de vidro por 60 segundos, sendo mantidas em repouso por 1 hora e, posteriormente, fez-se a leitura de pH no pHmetro - Marconi PA 200.

4.3.1.3. Acidez potencial do solo

Em todos os solos foram determinadas a acidez potencial por meio do método de análise de solo da EMBRAPA (EMBRAPA, 2017). A acidez foi determinada pesando-se cerca de 5,0 g das amostras de solo, transferidas para erlenmeyer de 125,0 mL, em seguida foram adicionados 75,0 mL da solução de acetato de cálcio 0,5 mol L^{-1} pH 7,0 e agitados na mesa de agitação orbital - Logen Scientific por 10 minutos. Após agitação, a amostra ficou em repouso durante uma noite, posteriormente titulou com uma solução padronizada de

NaOH 0,025 mol L⁻¹. Para obter a acidez potencial do solo (H⁺ + Al³⁺), utilizou a Equação 1:

$$(H^{+} + Al^{3+}) = (V_a - V_b) \cdot 1,65 \cdot f \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

(H⁺ + Al³⁺) é a acidez potencial do solo em cmol kg⁻¹, V_a é o volume da solução de NaOH gasto na titulação da amostra, em mL, V_b é o volume da solução de NaOH gasto na titulação da prova em branco, em mL, cuja 1,65 é o fator de correção e f é o fator de correção da padronização de NaOH, onde f = 0,025/[NaOH]_{pad}

4.3.1.4. Capacidade de troca catiônica (CTC)

Em todos os solos foram determinadas a capacidade de troca catiônica, antes e depois do experimento de crescimento, seguindo o método de análise de solo da EMBRAPA (EMBRAPA, 2001). A CTC é feita em duas etapas, a primeira etapa pesou-se 7,5 g de solo, adicionou 150,0 mL de KCl 1,0 mol L⁻¹, deixou agitando por 24 horas e determinou Cálcio (Ca⁺²) e Magnésio (Mg⁺²) trocáveis através do FAAS. A segunda etapa pesou-se 10g de solo, adicionou 100 mL de HCl 0,05 mol L⁻¹, deixou agitando por 24 horas e determinou Sódio (Na⁺) e Potássio (K⁺) trocáveis através do FAAS no modo emissão. A CTC foi calculada empregando a Equação 3:

$$CTC \text{ (cmol/kg)} = Ca^{+2} + Mg^{+2} + Na^{+} + K^{+} \quad \text{Equação 4}$$

4.3.1.5. Quantificação de Inorgânicos

Foram realizadas a determinação de fósforo total, sódio, potássio, cálcio, magnésio, manganês, zinco, cobre e ferro. O solo previamente digerido (EPA 3050B) em placa quente a 95 ° C com HNO₃ concentrado (Synth, 65%) e H₂O₂ 30% v/v (Vetec,) (USEPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, 1996). A quantificação dos elementos potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e manganês (Mn) foram feitas empregando um espectrofotômetro de absorção atômica com atomização por chama

(FAAS) da marca Varian modelo AA24OFS. Os elementos K e Na foram feitos no modo de emissão atômica e os demais elementos no modo de absorção atômica.

Tabela 1. Condições instrumentais para determinação dos elementos cálcio (Ca), potássio(K), magnésio(Mg), manganês(Mn) e sódio(Na).

Elemento	Comprimento de onda (nm)	Corrente da lâmpada (mA)	Chama	Estequiometria da chama (L min ⁻¹)
Ca	239,0	10	N2O/Acetileno	Oxidante (11,20/7,15)
K	766,5	-	Ar/Acetileno	Oxidante (13,50/2,00)
Mg	202,6	4	Ar/Acetileno	Oxidante (13,50/2,00)
Mn	279,5	5	Ar/Acetileno	Oxidante (13,50/2,00)
Na	589,9	-	Ar/Acetileno	Oxidante (13,50/2,00)

Fonte: Próprio autor.

4.3.2. Análises das plantas

4.3.2.1. Análises de crescimento das plantas

Em todas as plantas submetidas ao experimento foram feitos a contagem do número de folhas (NF) através de uma contagem simples de cada vaso e medido o comprimento total da planta (AP), para a medida AP a planta foi colocada sobre um fundo branco com uma régua aferida ao lado, tirou uma foto e usou o Software ImageJ 1.37v[®].

Depois de feita a contagem de folhagem e a medição do comprimento total, foi calculada a média e o desvio padrão para cada experimento. A Equação 4 e 5 são as formulas empregadas para o cálculo da média e a Equação 5 e do desvio padrão.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Equação 5

Onde:

Σ = símbolo que indica soma na matemática; n = número de elementos da série, amostra ou população; i = 1 => indica que a soma inicia-se com o primeiro elemento da série; X_i = valores de cada elemento da série e $\bar{X}$ = o 'x' com a linha em cima indica o valor da média aritmética simples.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Equação 6

Onde:

Σ : símbolo que indica soma na matemática; X_i : valores de cada elemento da série; $\bar{X}$: o 'x' com a linha em cima indica o valor da média aritmética simples; n: número de elementos da série, amostra ou população.

4.3.2.2. Determinação da massa seca

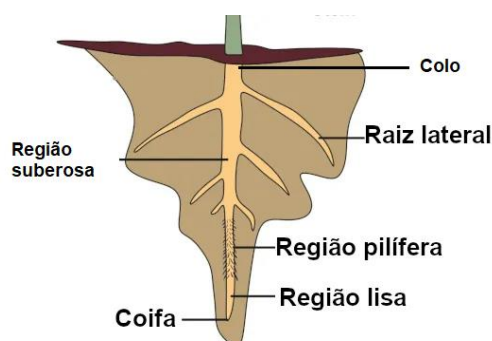
Em todas as plantas submetidas ao experimento foram determinadas as massas secas de raízes e partes aéreas de cada planta. Primeiramente separou a parte aérea da raiz, colocou a raiz inteira e a parte aérea cortada em cadinhos, levou a estufa à 105 °C até obter massa constante. A massa seca foi determinada com o auxílio da balança analítica (SHIMADZU, modelo AX200).

4.3.2.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das raízes e das folhas

A raiz da planta foi dividida em cinco partes (colo, zona suberosa, zona porífera, zona lisa e coifa), como demonstrado na Figura 1, e essas parte e a folha mais alta da planta foram submetidas a análise de MEV. As partes da

raiz e a folha foram colocadas em um ependorf seguida da adição de 2 mL de solução fixadora contendo 4% de paraformaldeído ((CH₂O)_n) e 2,5% glutaraldeído (C₅H₈O₂) em meio de solução tampão fosfato (pH entre 6,4 e 7,4).

Figura 1. Representação esquemática das regiões constituintes de uma raiz da planta de um tomateiro.



As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram obtidas por meio do microscópio da FEI Company: INSPECT 50. Realizou-se um recobrimento da amostra com ouro, através da técnica de sputtering utilizando um equipamento da Quorum, modelo Q150TES. As imagens foram obtidas utilizando o detector de elétrons secundário (SE) e tensão do feixe entre 5 e 20 kV. Esta caracterização foi realizada no Laboratório da Central Analítica da Universidade Federal do Ceará, localizado na cidade de Fortaleza (CE)

4.3.3. Análise estatística

Para avaliar a diferença entre os grupos controles e as condições empregadas, no experimento de crescimento de tomate, a análise estatística foi realizada utilizando um modelo linear generalizado (GLM, ANOVA), juntamente com o uso do software BioEstat. Quando os resultados do GLM eram significativos ($p < 0,05$) os resultados foram, então, comparados aplicando o teste Tukey HSD assumindo significância estatística ($p < 0,05$).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Solos

5.1.1. Determinação do teor de umidade, cinza e matéria orgânica.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores do teor umidade, cinza e matéria orgânica do argissolo, do latossolo e da terra mulata dos solos ($Solo_{t0}$ e do $Solo_{t1}$) antes e depois do experimento de crescimento.

Verifica-se que o menor valor de cinza, conseqüentemente maior teor de matéria orgânica é da terra mulata, tendo antes de plantar 86,4 % de cinza e 13,6% de MO e depois do plantio 87,1% de cinza e 12,8% de matéria orgânica (Tabela 2). Destaca-se ainda aumento da porcentagem de MO com o aumento da adição de CH aos solos.

Tabela 2. Valores de umidade, cinza e matéria orgânica dos solos em contato com o CH por 30 dias e por 24 meses, antes e após o plantio de tomate.

		Antes do plantio			Depois do plantio		
		Umidade (%)	Cinza (%)	MO (%)	Umidade (%)	Cinza (%)	MO (%)
Solo _{t0}	argissolo controle	0,4 ± 0,1	98,1 ± 0,1	1,9 ± 0,1	0,9 ± 0,4	97,1 ± 0,4	2,9 ± 0,4
	argissolo 10t ha ⁻¹	0,5 ± 0,1	97,6 ± 0,1	2,4 ± 0,1	1,7 ± 1,1	97,2 ± 0,4	2,8 ± 0,4
	argissolo 20t ha ⁻¹	0,4 ± 0,1	97,4 ± 0,2	2,6 ± 0,2	4,5 ± 3,1	96,4 ± 0,2	3,5 ± 0,2
	latossolo controle	1,7 ± 0,6	92,3 ± 0,5	7,7 ± 0,5	15,5 ± 3,0	92,2 ± 0,3	7,8 ± 0,3
	latossolo 10t ha ⁻¹	3,2 ± 0,1	92,3 ± 0,2	7,7 ± 0,2	14,2 ± 3,0	91,9 ± 0,1	8,0 ± 0,1
	latossolo 20t ha ⁻¹	1,9 ± 0,1	91,3 ± 0,1	8,7 ± 0,1	14,3 ± 4,3	91,5 ± 0,1	8,5 ± 0,1
Terra Mulata		2,8 ± 0,1	86,4 ± 0,4	13,6 ± 0,4	3,7 ± 4,2	87,1 ± 0,3	12,8 ± 0,3
Solo _{t1}	argissolo controle	0,4 ± 0,1	97,5 ± 0,2	2,4 ± 0,2	3,1 ± 4,0	98,3 ± 0,5	1,7 ± 0,5
	argissolo 10t ha ⁻¹	0,3 ± 0,1	96,7 ± 0,2	3,2 ± 0,2	0,5 ± 0,1	97,5 ± 0,1	2,5 ± 0,1
	argissolo 20t ha ⁻¹	0,5 ± 0,1	96,9 ± 0,1	3,1 ± 0,1	1,7 ± 1,8	97,6 ± 0,2	2,4 ± 0,2
	latossolo controle	1,2 ± 0,1	91,3 ± 0,2	8,7 ± 0,2	2,0 ± 0,2	92,2 ± 0,5	7,8 ± 0,5
	latossolo 10t ha ⁻¹	0,8 ± 0,1	91,2 ± 0,2	8,8 ± 0,2	6,1 ± 3,3	91,9 ± 0,1	8,1 ± 0,1
	latossolo 20t ha ⁻¹	1,0 ± 0,1	90,5 ± 0,1	9,5 ± 0,1	7,2 ± 4,8	91,2 ± 0,4	8,8 ± 0,4

Fonte: Próprio autor.

Conforme pode ser visualizado na Tabela 2 a concentração de matéria orgânica foi maior com a adição de maiores doses de CH, sendo que após o plantio, mantiveram, no argissolo e no latossolo com 20 t ha⁻¹, as maiores concentrações de matéria orgânica. Quando avaliamos o efeito do tempo de contato do CH com o solo, observa-se que não houve diferença significativa. p<0,05), no entanto comparando o Solo_{t0} e o Solo_{t1} antes de plantar o argissolo controle e o argissolo 20 t ha⁻¹ não apresentaram significância, já o argissolo 10 t ha⁻¹ e latossolo 20 t ha⁻¹ apresentaram significância p<0,05, o latossolo controle e o latossolo 10 t ha⁻¹ apresentou significância p<0,01. Todos os solos comparados com a terra mulata apresentaram significância p<0,01. Essa

diferença significativa entre os solos sugere que o maior tempo de contato do carvão hidrotérmico com o solo, libera uma maior quantidade de matéria orgânica, sugerindo uma melhora nas propriedades do solo, como uma maior retenção de água, melhor agregação do solo, facilitando o armazenamento de carbono, facilitando o crescimento das populações microbianas do solo e sua atividade (SUN e LU, 2014; DOMENE et al., 2014; SANTANA, et al., 2019).

O aumento do teor de matéria orgânica, demonstrado na tabela 2, pode estar associado a presença do CH, resultado o qual também foi observado por Cancelli (2020) ao empregar o mesmo carvão hidrotérmico no estudo com cultivo de beterraba, para a taxa de aplicação de 10 t ha⁻¹. O aumento no teor de matéria orgânica com o maior tempo de contato com o solo se assemelha ao modelo dos solos antropogênicos.

5.1.2. pH e acidez potencial em solos.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores de pH e de acidez potencial do argissolo, do latossolo e da terra mulata do Solo_{t0} e do Solo_{t1} antes e depois do experimento de crescimento.

Tabela 3. Valores de pH e acidez potencial do Solo_{t0} (solo em contato com CH por 30 dias) e do Solo_{t1} (solo em contato com o CH por 24 meses) antes e depois do experimento de crescimento de tomate.

		pH H ₂ O AP	pH H ₂ O DP	pH CaCl ₂ AP	pH CaCl ₂ DP	Acidez Pot AP	Acidez Pot DP
Solo _{t0}	argissolo	6,80 ±	6,41 ±	5,98 ±	5,70 ±		
	controle	0,01	0,21	0,01	0,08	1,56	1,81
	argissolo	6,53 ±	6,20 ±	5,78 ±	5,25 ±		
	10t ha ⁻¹	0,01	0,26	0,01	0,22	0,78	2,28
	argissolo	6,44 ±	6,30 ±	5,78 ±	5,37 ±		
	20t ha ⁻¹	0,01	0,12	0,01	0,05	0,78	2,51
	latossolo	6,01 ±	6,25 ±	5,32 ±	5,36 ±		
Solo _{t1}	controle	0,01	0,27	0,02	0,16	3,81	4,10
	latossolo	6,20 ±	6,16 ±	5,43 ±	5,39 ±		
	10t ha ⁻¹	0,03	0,33	0,01	0,17	4,76	4,90
	latossolo	5,94 ±	6,16 ±	5,36 ±	5,30 ±		
	20t ha ⁻¹	0,05	0,28	0,01	0,22	5,28	5,76
	Terra	6,90 ±	6,41 ±	6,14 ±	5,80 ±		
	Mulata	0,01	0,04	0,01	0,05	3,90	6,55
Solo _{t1}	argissolo	6,64 ±	5,93 ±	6,06 ±	5,45 ±		
	controle	0,05	0,10	0,03	0,02	0,69	1,14
	argissolo	6,60 ±	5,72 ±	5,92 ±	5,04 ±		
	10t ha ⁻¹	0,01	0,05	0,03	0,15	1,04	2,00
	argissolo	6,56 ±	5,74 ±	5,77 ±	5,07 ±		
	20t ha ⁻¹	0,05	0,03	0,02	0,12	1,21	2,03
	latossolo	5,88 ±	6,10 ±	5,05 ±	5,17 ±		
Solo _{t1}	controle	0,05	0,04	0,03	0,08	7,02	6,90
	latossolo	5,96 ±	6,11 ±	5,25 ±	5,18 ±		
	10t ha ⁻¹	0,01	0,14	0,01	0,15	7,10	6,99
Solo _{t1}	latossolo	6,22 ±	6,01 ±	5,52 ±	4,96 ±		
	20t ha ⁻¹	0,03	0,8	0,03	0,05	7,40	7,39

*AP: antes do experimento de crescimento, DP: depois do experimento de crescimento

Fonte: Próprio autor

Foi observado para o solo argissolo que esteve em contato com carvão durante 24 meses o pH é maior antes do plantio do que o solo argissolo em contato com o CH por 30 dias. Sugerindo que o CH está liberando uma quantidade de matéria orgânica que está conseguindo manter a capacidade tamponante do solo (Tabela 3).

A terra mulata apresentou valores de pH de 6,14 e 5,80, e de acidez potencial 3,90 e 6,55, antes e após o cultivo, respectivamente (Tabela 3).

Os valores mostrados na Tabela 3 permitem inferir uma acidificação do solo após o plantio. Essa acidificação é decorrente da troca de nutrientes do solo para a planta, evidenciados pela atividade de microrganismo e a umidade do solo, que podem ter acelerado a decomposição da matéria orgânica, gerando assim H^+ e acidificado o solo. Pois ao adicionar o fertilizante ao solo, temos uma intensificação na atividade microbiana, possivelmente transformando o N pelo processo de nitrificação que é acidificante, justificando assim, as quedas de pH (SPRICIGO et al., 2018). Segundo Sobral e colaboradores (2015) se faz a medida de pH em água e em $CaCl_2$ para analisar fertilidade do solo e o pH em KCl para análises pedológicas. O pH em cloreto de cálcio representa a atividade de H^+ mais adjacente ao que ocorre nos vegetais, devido a sua concentração salina se assemelhar com os solos considerados férteis, associado ao excesso de íon Ca^{+2} na maioria dos solos.

O latossolo sem adição de carvão e sem nenhuma plantação é considerado um solo de acidez elevada, apresentando concentrações elevadas de Al^{+3} (considerado tóxico), baixa concentração de Ca^{+2} e Mg^{+2} , deficiência de fósforo, baixa atividade microbiana. Já o latossolo com adição de carvão e com plantação de duas culturas apresenta pH de acidez média, apresentando ausência de Al^{+3} , disponibilidade intermediária de micronutrientes. A Terra Mulata apresenta pH entre 6,0 e 6,5 considerado adequado para o crescimento e desenvolvimento de plantas. (PREZOTTI, 2013)

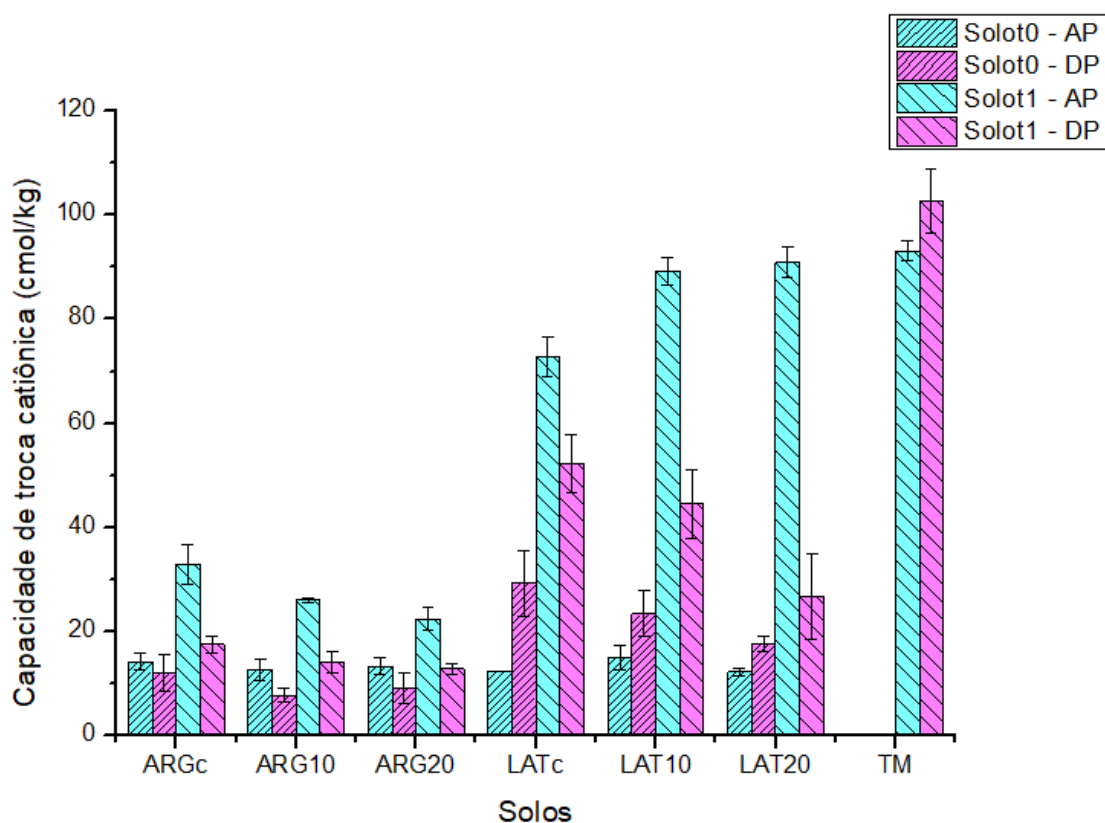
A acidez do solo está ligada a capacidade do solo em liberar H^+ . A acidez do solo direta está ligada ao pH, a acidez indireta está ligada a capacidade de troca catiônica e a acidez potencial ou trocável está ligada as substâncias que funcionam no solo como ácidos fracos (formação do solo proporciona a liberação de H^+). O carvão hidrotérmico produz cinzas (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002), que disponibilizam cátions trocáveis para a solução do solo e entram em equilíbrio com a superfície de adsorção dos colóides por forças eletrostáticas, ficando rapidamente disponíveis para as plantas (SANCHEZ; VILLACHICA; BANDY, 1983; GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002). Isto conseqüentemente, aumenta a acidez potencial, uma vez que diminui as bases trocáveis e conseqüentemente, a competição de sítios de troca,

ocasionando o aumento de H^+ e Al (VAN RAIJ et al., 1997). Ainda, a absorção dos nutrientes pelas plantas, as perdas de íons por lixiviação, a adsorção dos cátions trocáveis no complexo de trocas e, ou a complexação pela matéria orgânica pode ter influenciado na acidez potencial do solo.

5.1.3. Determinação da capacidade de troca catiônica

Foi feita a determinação da capacidade de troca catiônica do Solo_{t0}, do Solo_{t1} e da terra mulata por meio da determinação de sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) adsorvidos no solo. Na Figura 2 está a CTC dos solos antes e depois do cultivo do tomate.

Figura 2. Valores da capacidade de troca catiônica do Solo_{t0} (solo em contato com CH por 30 dias) e do Solo_{t1} (solo em contato com o CH por 24 meses), antes e após o experimento de crescimento.



Fonte: Próprio autor.

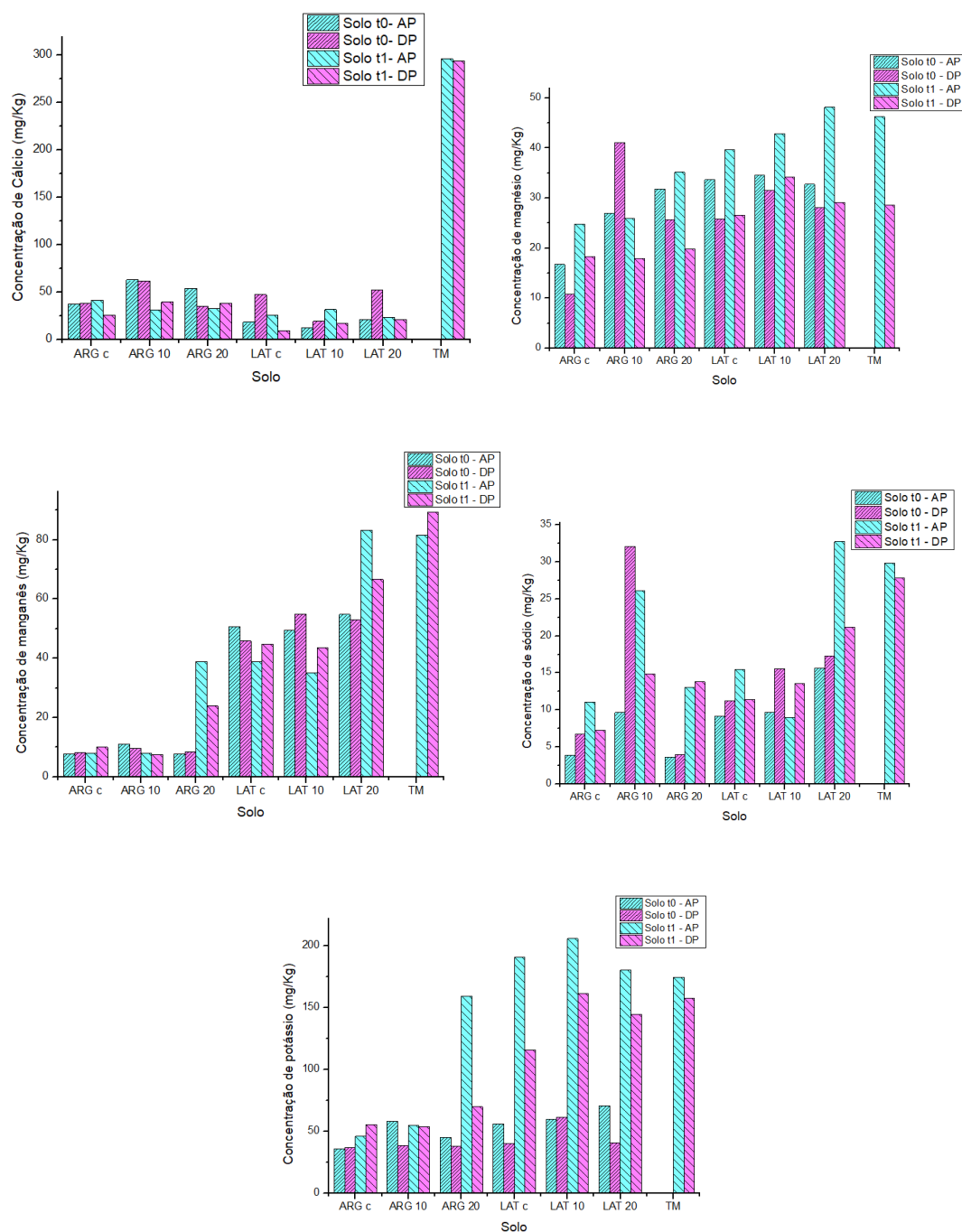
Como demonstrado na Figura 2, o maior tempo de contato dos solos com o carvão hidrotérmico proporciona uma maior capacidade de troca catiônica, pois a CTC do Solo_{t1} antes do cultivo do tomate é maior do que a CTC do Solo_{t0} na mesma condição. Sugerindo que o tempo de adição de CH no solo influencia na estabilidade do solo, na disponibilidade de nutrientes.

No solo argissolo para os diferentes tempos de contato com o CH, após o plantio houve uma diminuição da CTC enquanto que para o solo latossolo, para os tempos de contato com o CH de 30 dias, após o plantio houve um aumento da CTC (Figura 2). O mesmo ocorreu com a terra mulata, que é o controle positivo.

5.1.4. Nutrientes totais nos solos, antes e após o plantio de tomate.

Antes e após a execução do procedimento proposto para o cultivo do tomate foi feita a determinação dos nutrientes cálcio (Ca), magnésio (Mg), manganês (Mn), sódio (Na) e potássio (K) no Solo_{t0}, no Solo_{t1} e na terra mulata. Após decomposição dos solos, os nutrientes totais foram quantificados sendo os resultados, evidenciados na Figura 3.

Figura 3. Valores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), manganês (Mn), sódio (Na) e potássio (K) totais para todos os solos, e todos os tempos de contato com o CH, antes e após o experimento de crescimento para as diferentes taxas de aplicação do carvão hidrotérmico.



Fonte: Próprio autor.

As concentrações de todos os nutrientes analisados foram em sua maioria mais elevadas nas amostras utilizando a taxa de aplicação de 10 t ha⁻¹.

¹. Os solos latossolos utilizados nos experimentos passaram pelo processo de calagem, elevando a concentração de cálcio presente na amostra e no solo. Cálcio e magnésio são elementos que desempenham papel fundamental no controle de salinização do solo e outros papéis essenciais para a planta, melhorando a tolerância do vegetal aos efeitos da salinidade, facilitando a seletividade Na/K e protegendo a membrana celular (HASEGAWA; BRESSAN, 2000; LARBI et al., 2020).

Como demonstrado na Figura 3, o Solo_{t1}, solo que está em contato com o CH por 24 meses, apresenta valores maiores dos nutrientes cálcio, sódio, potássio, magnésio e manganês antes de plantar do que os Solo_{t0} que está em contato com o CH por 30 dias, demonstrando que o maior tempo de contato do carvão hidrotérmico com o solo garante uma maior disponibilidade de nutrientes, como sugerido no estudo realizado por (BENTO et al., 2019) no qual foi demonstrado que com o aumento da porcentagem de aplicação do carvão hidrotérmico, maior a liberação de nutrientes e carbono orgânico para os solos.

Dentro da planta, o potássio (K) atua no controle de abertura e fechamento dos estômatos, na transpiração, no transporte de carboidratos, na qualidade das frutas, na regulação do potencial osmótico das células, na ativação várias enzimas envolvidas na respiração e na fotossíntese, dentre outras funções (BECKER et al, 2016; ARAÚJO, 2018). Pode-se notar que no Solo_{t1} (solo em maior tempo de contato com o CH) antes de ocorrer o experimento de crescimento, o solo apresentou elevada concentração de potássio, e após o experimento de crescimento ocorreu um decréscimo, sugerindo que esse micronutriente foi incorporado pela planta.

O Cálcio (Ca) desempenha importante papel na planta, já que é um nutriente presente na lamela média das paredes celulares, regulando a permeabilidade e sua presença é indispensável para o desenvolvimento do sistema radicular. Para a cultura do tomate, a disponibilidade e a absorção de cálcio são de grande interesse, pois a podridão apical é um distúrbio fisiológico bastante comum na cultura do tomateiro, diretamente associado à deficiência

localizada de cálcio na região apical dos frutos (BECKER et al, 2016). Como demonstrado na Figura 3, a terra mulata apresenta valores elevados de cálcio, superior a 250 mg kg⁻¹, já os demais solos apresentam valores de cálcio inferior a 100 mg kg⁻¹.

O Magnésio (Mg) é absorvido pelas plantas na forma de Mg²⁺, participa de várias reações enzimáticas que envolvem ATP e ADP. Também possui o papel fundamental nas estruturas como componente da molécula de clorofila (ARAÚJO, 2018). Tanto no Solo_{t0}, quanto no Solo_{t1}, antes o crescimento do tomate o solo apresenta valor superior de magnésio quando comparado ao valor do magnésio no solo após o plantio, sugerindo que a planta absorveu esse micronutriente. Ocorreu uma exceção, o argissolo 10 t ha⁻¹ do solo em contato com o CH por 30 dias, onde a concentração de magnésio no solo após o plantio é superior a concentração antes do plantio.

O Manganês (Mn) atua na fotossíntese, sendo envolvido na estrutura, funcionamento e multiplicação de cloroplastos, além de realizar o transporte eletrônico. Está envolvido com outras enzimas ativadas por cátions e na evolução fotossintética de oxigênio. No solo, o Mn pode ser encontrado em três formas principais: trocável, complexado organicamente e associado a óxidos. Da interação entre essas três formas resulta sua disponibilidade para as plantas (BENETT et al., 2011). Como observado na Figura 3, o solo latossolo contém maior concentração de manganês do que o solo argissolo, pois o latossolo é um solo rico em óxidos.

As concentrações desses micronutrientes aumentam em conformidade com o aumento da taxa de aplicação de carvão hidrotérmico, fato que estava previsto pois SANTANA e colaboradores no experimento em coluna, onde os resultados mostraram que os lixiviados tenderam a um aumento de acordo com o acréscimo da taxa de aplicação do carvão hidrotérmico, obtendo as maiores concentrações do lixiviado em argissolo seguido do latossolo.

No estudo realizado por (BENTO et al., 2019) também foi demonstrado que com o aumento da porcentagem de aplicação do carvão hidrotérmico,

maior a liberação de nutrientes e carbono orgânico para os solos. Além de ter sido comprovado que devido as propriedades dos latossolos, esse solo é capaz de realizar uma maior retenção da fração de carbono lixiviado e menor concentração de nutrientes.

O aumento da concentração de potássio no Solo_{t0} e no Solo_{t1}, presente na figura 3, pode ser evidenciado pelo fato de que durante a produção de carvão hidrotérmico a partir da vinhaça, ocorre a formação da fase estruvita K (MgKPO₄.6H₂O), a qual é conhecida por ser um fertilizante de baixa taxa de liberação (MELO et al., 2016), que devido às reações de dissociação, os nutrientes acabam sendo disponibilizados para as plantas (SANCHEZ; VILLACHICA; BANDY, 1983).

No estudo aqui trazido foi demonstrado que a taxa de aplicação de 10 t ha⁻¹ no latossolo, todas as análises realizadas, apresentaram uma maior concentração em sua estrutura, levando-nos a acreditar na eficiência da presença do carvão hidrotérmico no solo no papel de disponibilizar nutrientes essenciais para o desenvolvimento e crescimento vegetal corroborando com resultados atingidos por outros autores (BENTO et al., 2019; SANTANA et al., 2019).

5.2. Análise das plantas

5.2.1. Experimento de crescimento

Antes de ser feito o experimento de crescimento de planta, o solo foi submetido a análise de pH como já mencionado e para o latossolo foi realizado a correção com calcário. A Figura 4 exhibe os vasos na câmara de crescimento após 12 dias da semeadura, antes de ocorrer o desbaste.

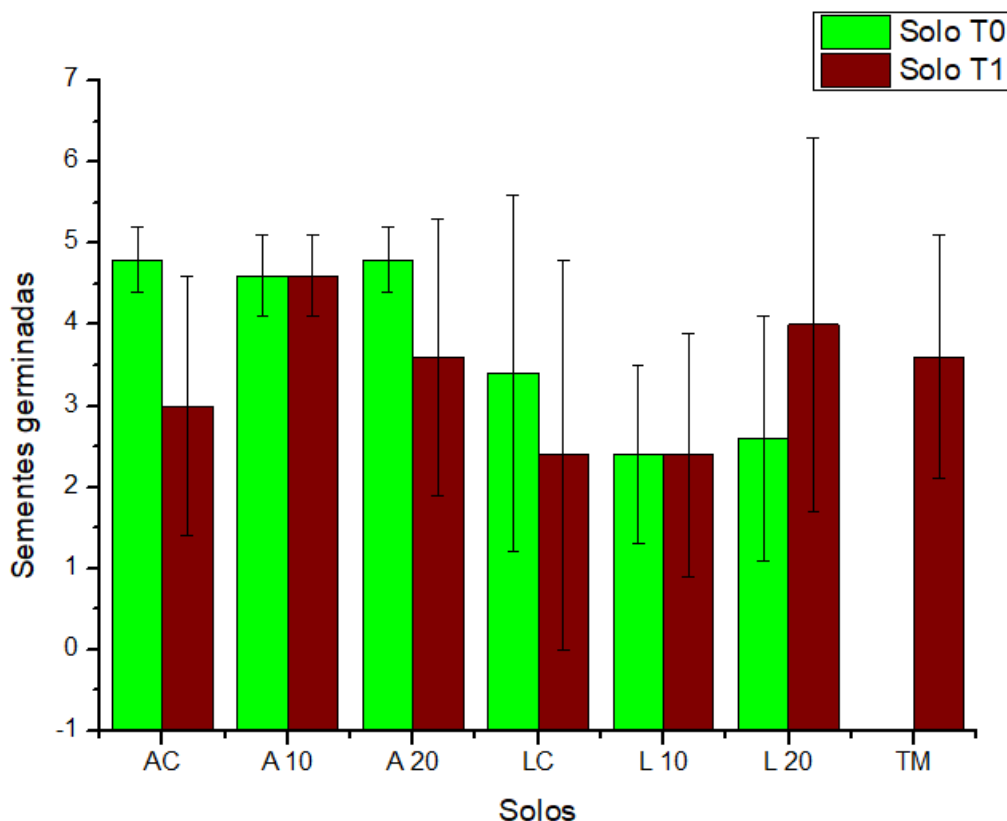
Figura 4. Foto dos vasos dentro da câmara de crescimento após 12 dias de semeadura de tomate.



Fonte: próprio autor

As avaliações iniciais do desenvolvimento do tomate na presença de carvão hidrotérmico em diferentes taxas de aplicação foram feitas em 12 dias após o plantio. A primeira avaliação foi realizada antes do desbaste, na qual todas as sementes germinadas tiveram sua parte aérea medida, número de folhas contabilizadas, e então a plântula com melhor estágio de desenvolvimento foi selecionada, sendo as demais removidas do vaso de crescimento. A Figura 5 ilustram os valores das médias de quantidade de sementes germinadas por vaso.

Figura 5. Quantidade de sementes de tomate germinadas por vaso nos diferentes solos, sendo AC, A10, A20, LC, L10, L20 e TM, respectivamente argissolo controle, argissolo 10 t ha⁻¹, argissolo 20 t ha⁻¹, latossolo controle, latossolo 10 t ha⁻¹, argissolo 20 t ha⁻¹ e terra mulata.



Fonte: Próprio autor.

Ao observar o valor de massa seca das plantas desbastadas (Figura 5) nota-se que o argissolo 10 t ha⁻¹ e o latossolo 10 t ha⁻¹ se destacam nas primeiras avaliações das plantas, sendo essa em relação a maior quantidade de massa, superando a massa da Terra Mulata.

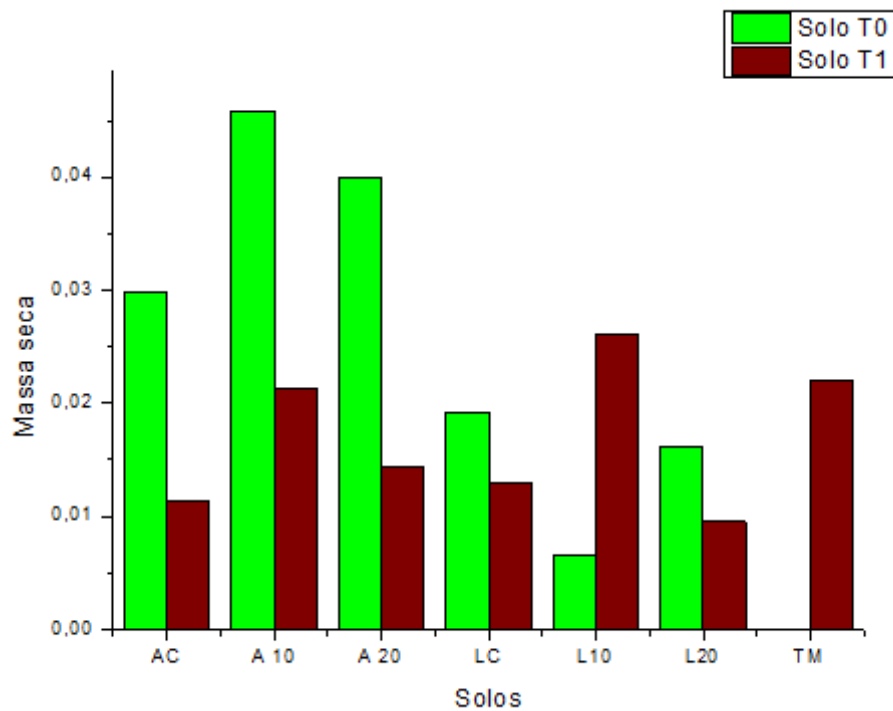
Não foi observado diferença entre as taxas de aplicação no Solo_{T0} para massa seca das plantas desbastadas entre os tratamentos com carvão hidrotérmico. Para o Solo_{T1} tanto o latossolo, quanto o argissolo com a concentração de 10 t ha⁻¹ tiveram maior massa seca que o controle e que a concentração de 20 t ha⁻¹. Resultado semelhante ao encontrado para o Solo_{T1} foi encontrado para estudo realizado por Melo e colaboradores de aplicação de CH nas doses de 4, 8 16 e 32 tha⁻¹ na primeira safra de cultivo de feijão. Os autores também avaliaram o efeito numa segunda safra e observaram efeitos positivos em relação a massa seca, no qual a taxa de aplicação de 16 t ha⁻¹ proporcionou

um aumento de 96% de massa seca em relação ao controle (MELO et al., 2018). Ainda, Melo et al. (2018) relatou que houve melhora nas condições do solo, em termos de nutrientes, após a aplicação de carvão hidrotérmico, analisando as características do solo após o plantio.

Não foi observado diferença entre as taxas de aplicação no Solo_{t0} para massa seca das plantas desbastadas entre os tratamentos com carvão hidrotérmico. Para o Solo_{t1} tanto o latossolo, quanto o argissolo com a concentração de 10 t ha⁻¹ tiveram maior massa seca que o controle e que a concentração de 20 t ha⁻¹. Resultado semelhante ao encontrado para o Solo_{t1} foi encontrado para estudo realizado por Melo e colaboradores de aplicação de CH nas doses de 4, 8, 16 e 32 t ha⁻¹ na primeira safra de cultivo de feijão. Os autores também avaliaram o efeito numa segunda safra e observaram efeitos positivos em relação a massa seca, no qual a taxa de aplicação de 16 t ha⁻¹ proporcionou um aumento de 96% de massa seca em relação ao controle (MELO et al., 2018). Ainda, Melo et al. (2018) relatou que houve melhora nas condições do solo, em termos de nutrientes, após a aplicação de carvão hidrotérmico, analisando as características do solo após o plantio.

A Figura 6 apresenta o gráfico da massa seca das plantas que foram retiradas dos vasos após o desbaste que ocorreu após 12 dias do plantio.

Figura 6. Gráfico da massa seca das plantas que foram retiradas do vaso pelo desbaste.



Fonte: Próprio autor.

Com o aumento da dose de carvão hidrotérmico foi possível notar as folhas das plantas apresentaram cor mais clara e um crescimento maior nos solos argissolo, sendo que coloração mais escura e um maior desenvolvimento de folhas foi observado no latossolo. Na tabela 4 está demonstrado as médias do comprimento total, massa total e os números de folhas das plantas de cada vaso no dia do desmonte do experimento de crescimento.

Tabela 4. Valores referente a média de número de folhas, massa total e comprimento total das plantas de tomate de cada vaso, do Solo_{t0} (solo em contato com CH por 30 dias) e do Solo_{t1} (solo em contato com o CH por 24 meses), após 97 dias de crescimento.

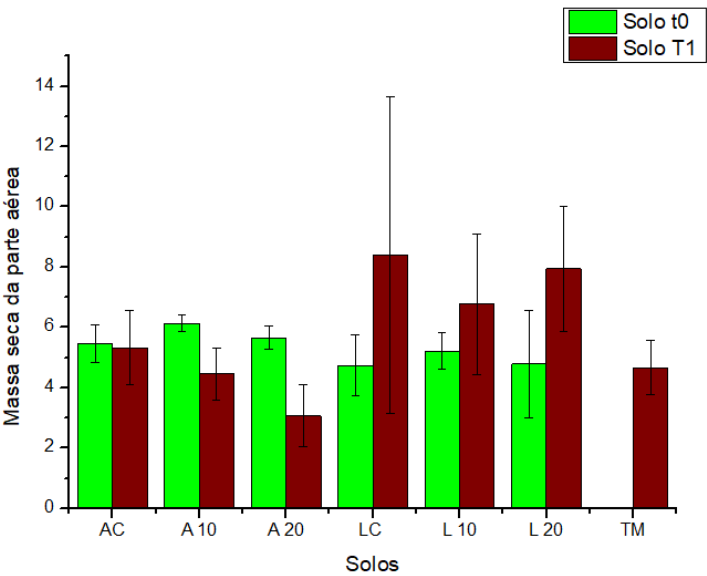
		Massa total (g)	Comprimento total (cm)	Número de folhas
Solo _{t0}	argissolo controle	49,77 ± 5,5	68,80 ± 17,0	110,8 ± 11,1
	argissolo 10t ha ⁻¹	52,47 ± 6,4	69,40 ± 6,3	118,0 ± 9,2
	argissolo 20t ha ⁻¹	55,83 ± 3,9	62,20 ± 4,0	105,6 ± 6,3
	latossolo controle	52,11 ± 11,6	54,00 ± 7,5	105,0 ± 18,3
	latossolo 10t ha ⁻¹	41,35 ± 21,5	46,80 ± 13,4	83,6 ± 30,8
	latossolo 20t ha ⁻¹	46,99 ± 13,5	64,80 ± 17,5	85,8 ± 30,7
	Terra Mulata	57,72 ± 4,8	40,75 ± 12,8	78,8 ± 24,3
Solo _{t1}	argissolo controle	51,79 ± 5,9	51,00 ± 16,1	106,5 ± 26,0
	argissolo 10t ha ⁻¹	44,24 ± 0,9	43,60 ± 13,2	75,6 ± 10,0
	argissolo 20t ha ⁻¹	30,33 ± 8,6	49,20 ± 7,6	69,6 ± 13,7
	latossolo controle	98,71 ± 2,1	49,50 ± 12,0	165,0 ± 17,0
	latossolo 10t ha ⁻¹	80,55 ± 3,6	44,75 ± 26,1	121,0 ± 17,9
	latossolo 20t ha ⁻¹	74,17 ± 5,6	49,00 ± 22,0	143,3 ± 43,2

Fonte: Próprio autor.

Ocorreu floração nos tomateiros cultivados em ambos os solos, Solo_{t0} e Solo_{t1}, entretanto no Solo_{t1} o quarto vaso do argissolo 10 t ha⁻¹ teve a produção de um tomate pesando 15,77g. Em comparação do solo latossolo do solo que teve o plantio após 30 dias (Solo_{t0}) com o solo que teve o plantio após 24 meses (Solo_{t1}), o melhor desenvolvimento foi no Solo_{t1}, no qual apresentou maior massa e maior quantidade de folhas, sendo no latossolo 20 t ha⁻¹ a planta com maior quantidade de folhas. Já em comparação do argissolo, o melhor desenvolvimento foi no Solo_{t0}, com a maior quantidade de

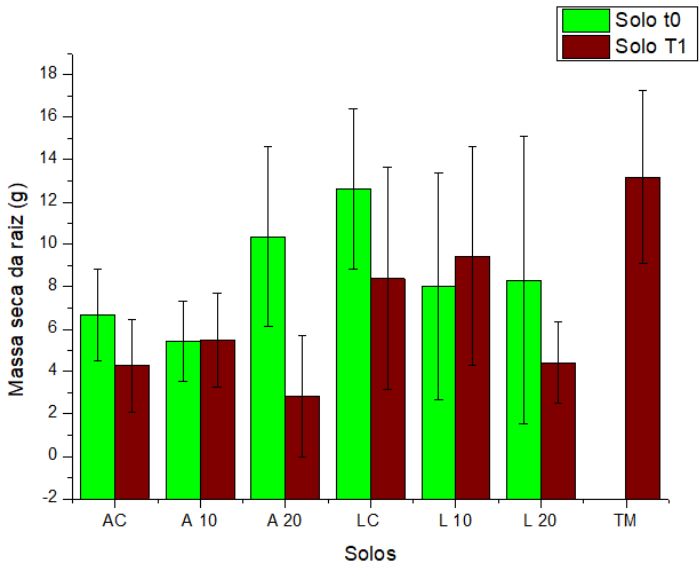
folhas, comprimento total e massa. Após o desmonte do experimento de crescimento fez a massa seca da parte aérea e da raiz que estão representados na Figura 7 e 8.

Figura 7. Gráfico da massa seca da parte aérea das plantas após o plantio de 97 dias.



Fonte: Próprio autor.

Figura 8. Gráfico da massa seca da raiz das plantas após o plantio de 97 dias.



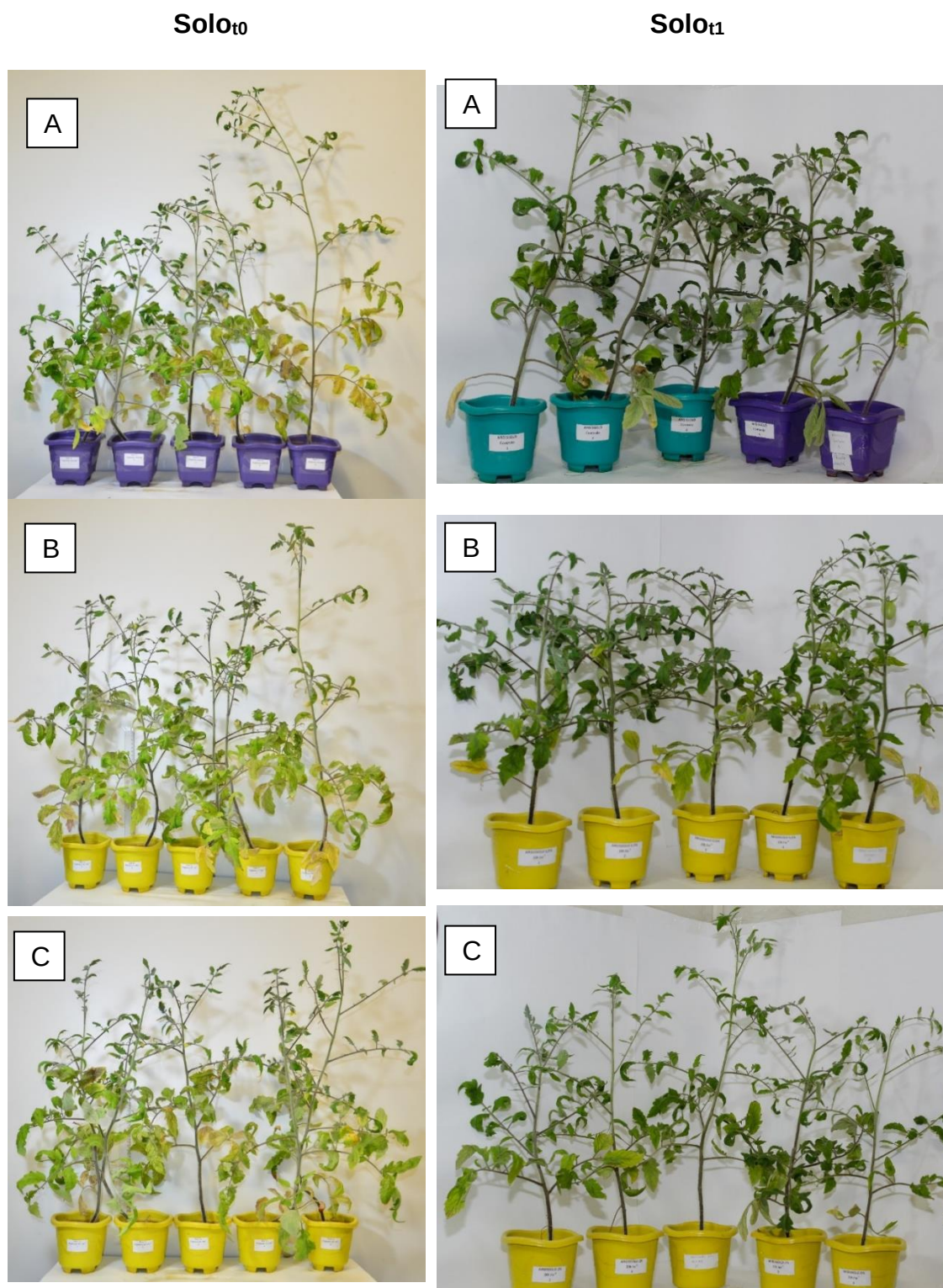
Fonte: Próprio autor.

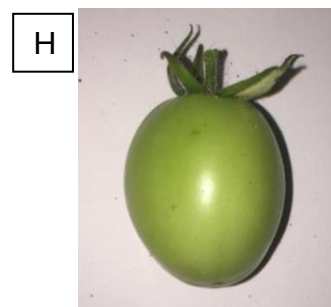
Embora resultados positivos significativos da aplicação de carvão hidrotérmico não tenham sido encontrados, foi possível observar aumento na massa seca para a taxa de aplicação de 20 t ha^{-1} no Solo_{t0}, e principalmente para massa seca da raiz, comparado ao controle, para o Argissolo (Figura 8). Para Latossolo, embora não observada diferença, foi observado diminuição na massa seca das folhas para ambas as taxas de aplicação avaliadas.

No Solo_{t1}, a taxa de aplicação de 10 t ha^{-1} foi a que apresentou os melhores resultados de crescimento quando comparado ao grupo controle (Figura 8). Estes resultados corroboram com os obtidos por outros autores (GEORGE et al., 2012; MELO et al., 2018) e sugerem que o carvão hidrotérmico possa melhorar as características do solo favorecendo o desenvolvimento de algumas culturas.

Contudo, a massa seca das raízes para tomate cultivado em solos Terra Mulata foi a melhor. Solos tipo Terra Mulata são considerados como solos com elevada fertilidade, motivo pelo qual este foi utilizado neste trabalho como controle positivo, ou seja, foi considerado como sendo o melhor desenvolvimento esperado para este cultivo

Figura 9. Foto dos vasos de plantas após 97 dias da semeadura dos solos. A) argissolo controle; B) argissolo 10tha⁻¹; C) argissolo 20tha⁻¹; D) latossolo controle; E) latossolo 10tha⁻¹; F) latossolo 20tha⁻¹, G) terra mulata e H) tomate produzido.





Posteriormente o desmonte do experimento de crescimento, a folha e a raiz da planta foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura.

5.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) Da Folha e da Raiz

Em toda essa seção, estão apresentadas as imagens de microscopia eletrônica de varredura das folhas e das raízes dos tomateiros plantados. Com as amostras, foi possível caracterizar, juntamente com o professor Dr. Emílio de Castro Miguel, da central analítica, da Universidade Federal do Ceará, uma série de informações. Todas as Figuras do MEV se encontram ampliadas no Anexo 1.

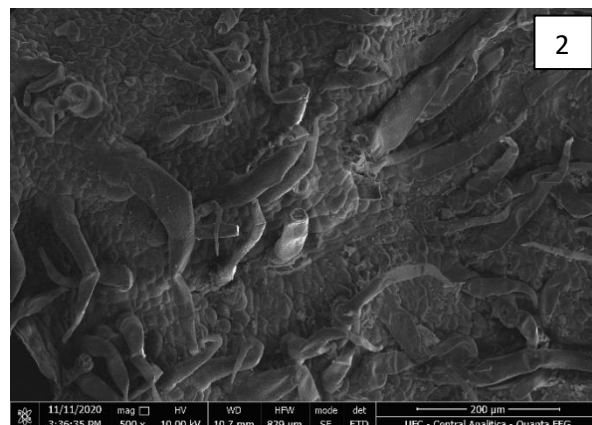
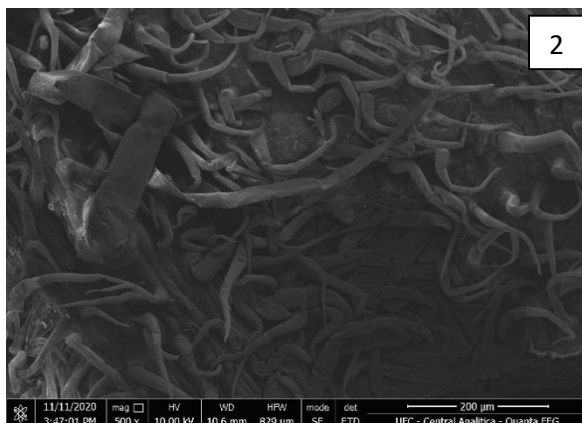
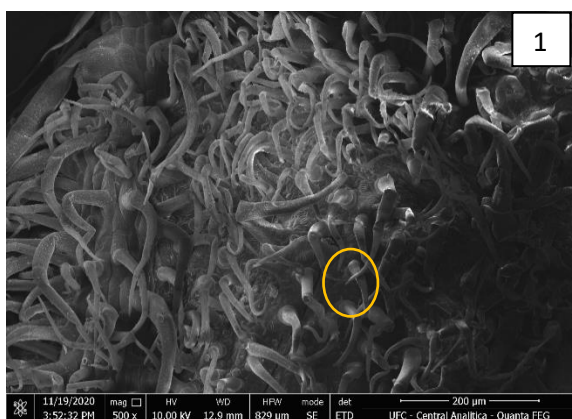
Na Figura 10 estão apresentadas as imagens de microscopia eletrônica de varredura das folhas dos tomateiros plantados no Solo_{t0}, no argissolo controle, no argissolo 10tha⁻¹, argissolo 20tha⁻¹, latossolo controle, latossolo 10tha⁻¹, latossolo 20tha⁻¹.

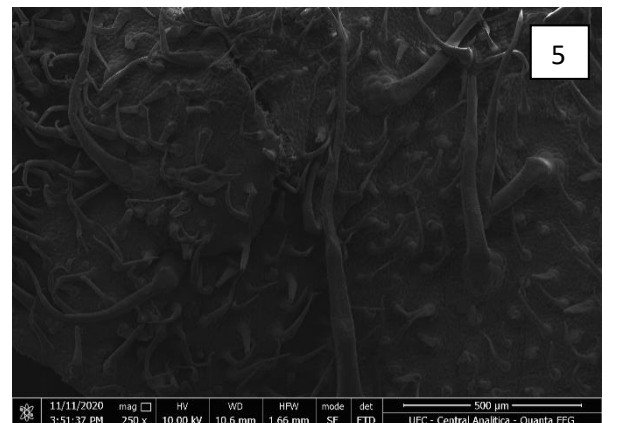
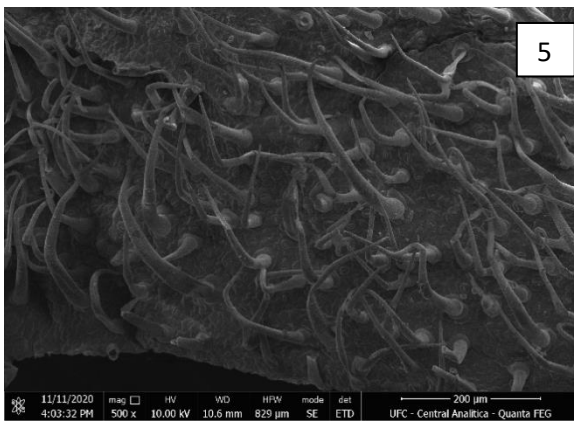
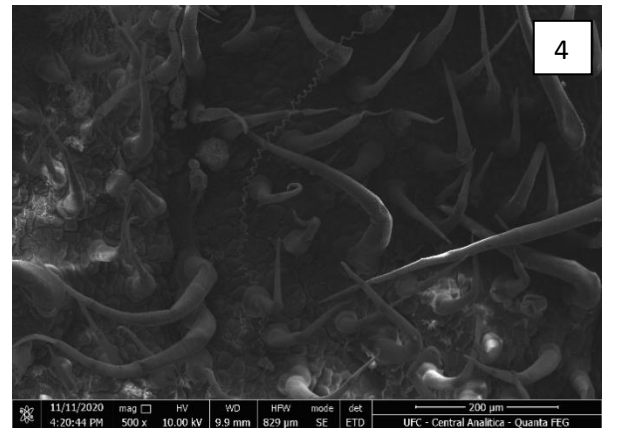
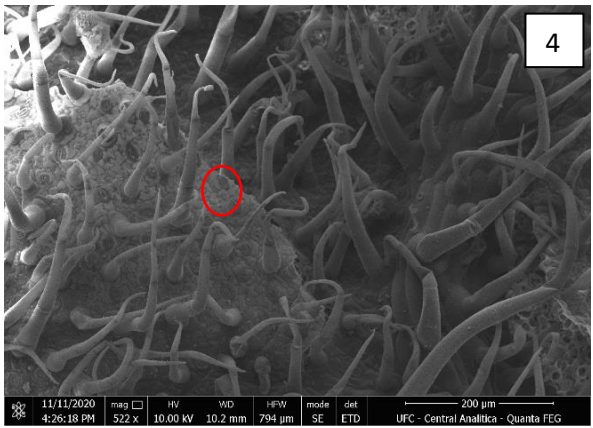
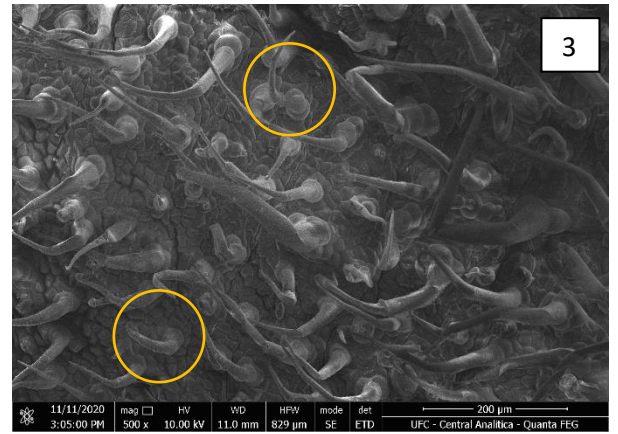
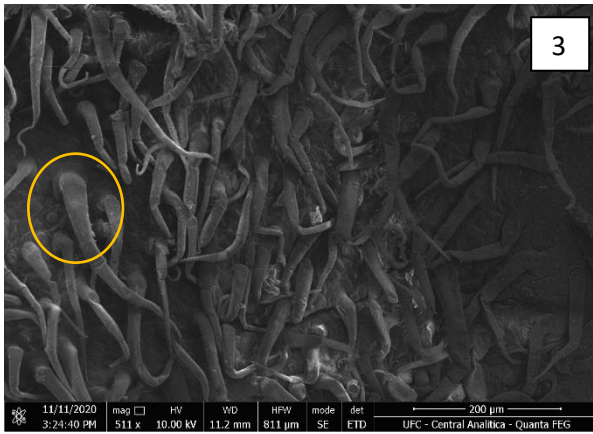
Na figura 11 estão apresentadas as imagens de microscopia eletrônica de varredura das folhas dos tomateiros plantados no Solo_{t1}, no argissolo controle, no argissolo 10tha⁻¹, argissolo 20tha⁻¹, latossolo controle, latossolo 10tha⁻¹, latossolo 20tha⁻¹ e terra mulata

É possível identificar que as superfícies, abaxial e adaxial, apresentaram uma pequena quantidade de tricomas do tipo tectores multicelular (identificado pelo círculo amarelo), sendo ao menos de dois tipos. Os tricomas tectores, se assemelham muito com pelos, e são responsáveis por reduzir a perda de água, por transpiração, das plantas que vivem em ambientes escassos, podem dificultar a locomoção dos predadores sobre as folhas, ocasionar proteção contra a ação direta de raios solares e ser um isolante térmico pela retenção de ar (ALMEIDA; ALMEIDA, 2018). Todas as folhas apresentaram uma superfície epidérmica sinuosa e enrugada.

Figura 10. Imagens de microscopia eletrônica de varredura das folhas dos tomateiros plantados no Solo₀, (1) argissolo controle, (2) argissolo 10tha⁻¹, (3) argissolo 20tha⁻¹, (4) latossolo controle, (5) latossolo 10tha⁻¹, (6) latossolo 20tha⁻¹.

Superfície Abaxial





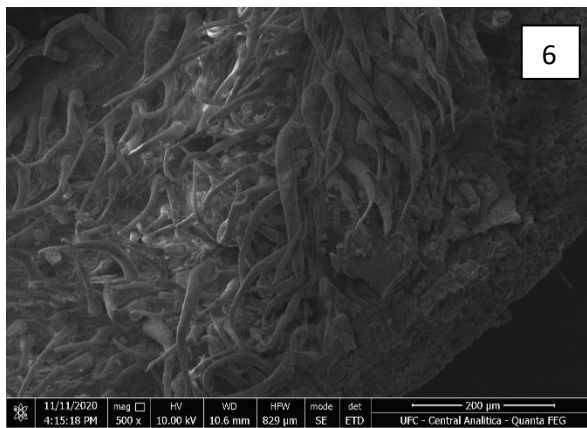
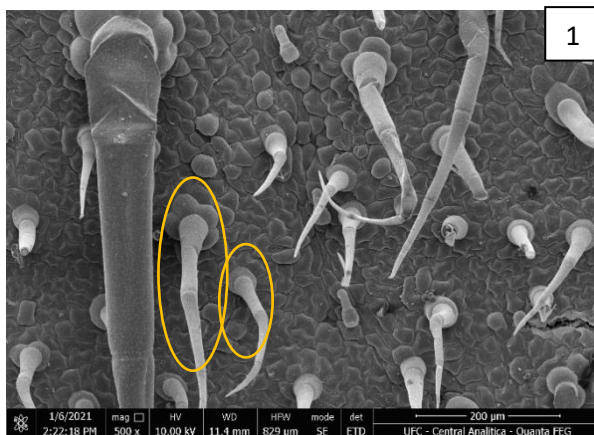


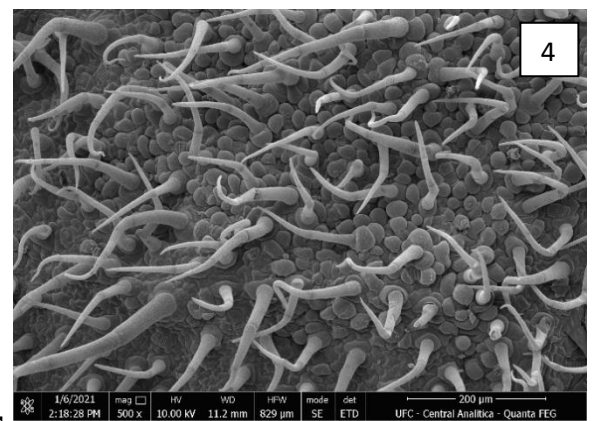
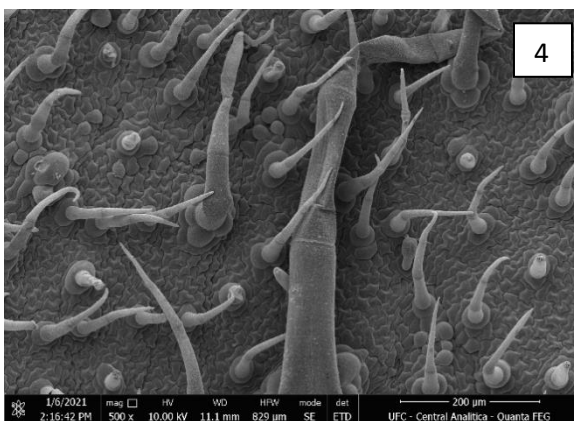
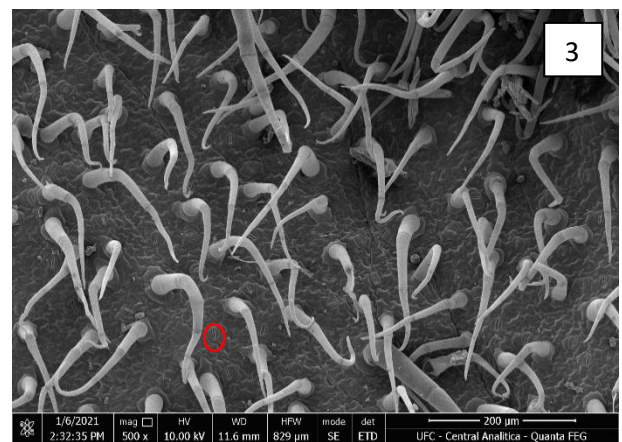
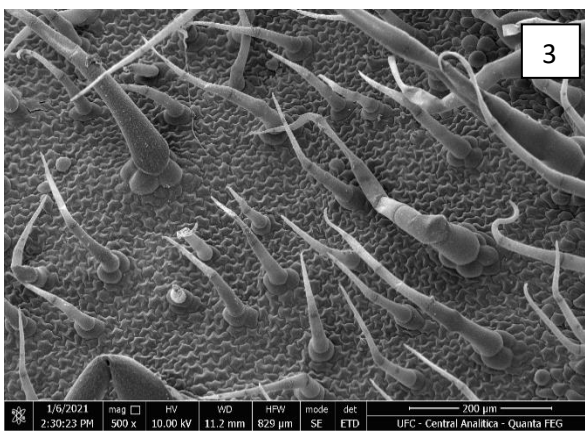
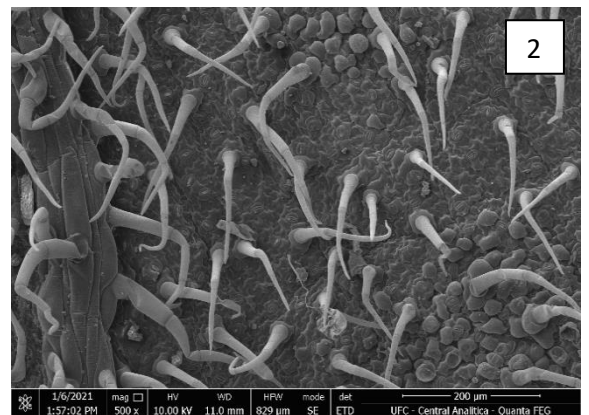
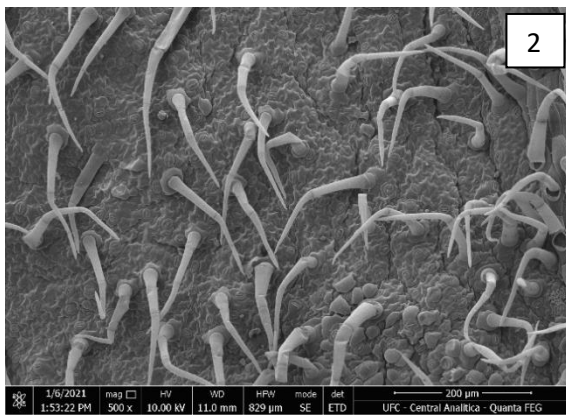
Figura 11. Imagens de microscopia eletrônica de varredura das folhas dos tomateiros plantados no Solo₁. (1) argissolo controle, (2) argissolo 10tha⁻¹, (3) argissolo 20tha⁻¹, (4) latossolo controle, (5) latossolo 10tha⁻¹, (6) latossolo 20tha⁻¹ e (7) terra mulata.

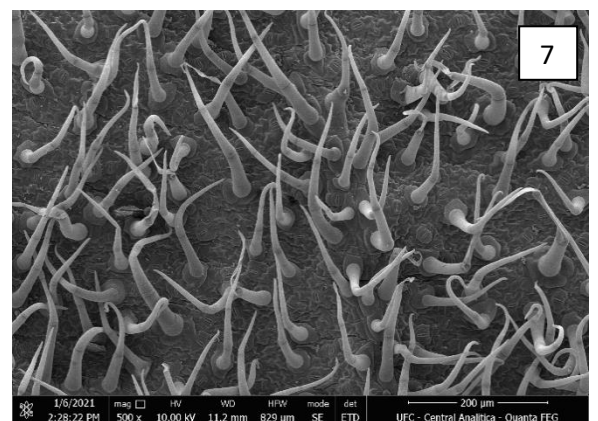
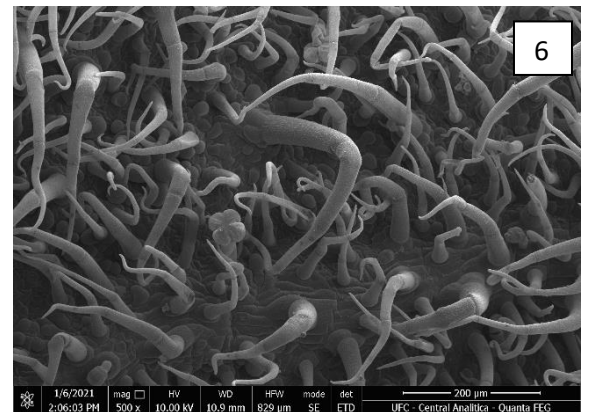
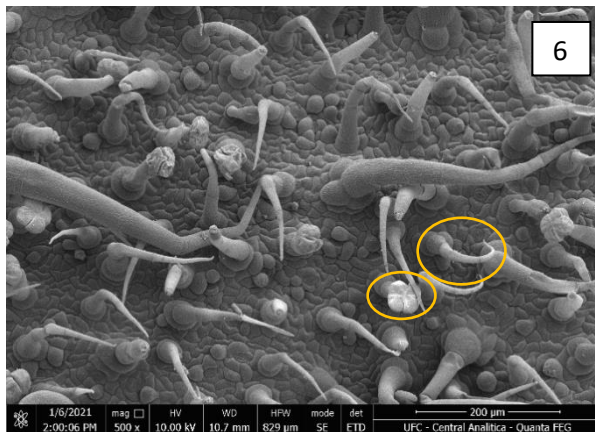
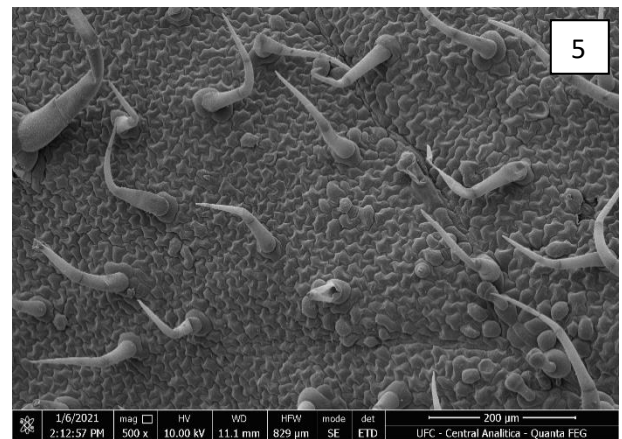
Superfície Abaxial



Superfície Adaxial







Com relação as folhas do tomateiro plantados Solo_{t0} (Figura 3), as paredes periclinais são convexas, as paredes anticlinal é levemente sinuosa, com exceção do argissolo controle e latossolo controle que é sinuosa, a cera epicuticular é lisa. Na superfície abaxial os estômatos anomocíticos (círculo

vermelho) são raros, na superfície adaxial os estômatos anomocíticos são frequentes, em ambos os casos, os estômatos estão fechados, indicando um possível estresse hídrico (LARCHER, 2006).

Cancella e colaboradores, 2020, analisou o CH produzido com bagaço de cana-de-açúcar e vinhaça com adição de ácido fosfórico no crescimento de beterraba nos solos latossolo e argissolo. No latossolo as análises de MEV das folhas foi possível verificar que as paredes da célula vegetal permaneceram com a mesma sinuosidade aparente, porém com uma diminuição de sua convexidade e diminuição da presença de cera epicuticular, possivelmente pela disponibilidade de água. Os estômatos paracíticos fechados se mostraram presentes em uma quantidade aparentemente menor, evidenciando o provável aumento de disponibilidade de água no solo na presença de carvão hidrotérmico conforme a presença da cera epicuticular. No argissolo foi possível a observação de células menores com uma menor sinuosidade e em maior quantidade com sua parede anticlinal convexa e uma presença maior de cera epicuticular, limite entre as células menos definidas, todos os estômatos paracíticos fechados e numerosos.

6. CONCLUSÃO

No argissolo e no latossolo há um aumento da matéria orgânica após adição do CH, implicando uma melhora nas propriedades do solo, no argissolo o tempo de contato com o carvão e a plantação de duas culturas diferentes fez com que o valor do pH diminuísse, pois, as plantas ao absorverem nutrientes de carga positivas, como K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , liberam H^+ das raízes para solução de solo, também apresenta valores baixos de acidez potencial. A Terra Mulata apresentou pH entre 6,0 e 6,5 considerado adequado para o crescimento e desenvolvimento de plantas.

Os vasos que contêm solo na presença de carvão hidrotérmico apresentam folhas em tons mais escuros de verde, enquanto que os solos sem a presença do CH apresentaram folhas com tons mais claro de verde.

Em comparação do solo latossolo do Solo_{t0}, solo em contato com o carvão por 30 dias, com o Solo_{t1}, solo em contato com o carvão hidrotérmico por 24 meses, o melhor desenvolvimento foi no Solo_{t1}. Já em comparação do argissolo, o melhor desenvolvimento foi no Solo_{t0}, com a maior quantidade de folhas, comprimento total e massa. Em relação aos nutrientes, o solo com maior tempo de contato com o carvão hidrotérmico apresenta concentração maior de nutrientes antes do plantio do tomate, sugerindo que a presença do CH proporciona uma maior biodisponibilidade de nutrientes com o passar do tempo.

REFERENCIAS

ALMEIDA, M. De; ALMEIDA, C. V. De. Morfologia da folha de plantas com sementes. In: Coleção Botânica. 1a ed. São Paulo. p. 126. 2018

ALVARENGA R., QUEIROZ T., Produção mais Limpa e Aspectos Ambientais na Indústria Sucroalcooleira. Adv. Cleaner Prod. 2009

ARAÚJO, W. A. de. Acúmulo de matéria seca e marcha de absorção de nutrientes em soja de crescimento determinado e indeterminado. 2018. 48 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2018

ARAUJO, J. R. et al. Selective extraction of humic acids from an anthropogenic Amazonian dark earth and from a chemically oxidized charcoal. *Biology and Fertility of Soils*, p. 1223–1232, 2014.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D 2974 - Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils. ASTM International, Estados Unidos, 2014. p. 1–4.

BARGMANN I, RILLIG MC, BUSS W, KRUSE A, KUECKE M. Hydrochar and biochar effects on germination of spring barley. *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 199, n. 5, p. 360–373, 2013.

BARGMANN I, RILLIG MC, KRUSE A, GREEF JM, KÜCKE M. Effects of hydrochar application on the dynamics of soluble nitrogen in soils and on plant availability. *J Plant Nutr Soil Sci*;177:48– 58, 2014

BATISTA, M. de A.; PAIVA, D. W. de; MARCOLINO, A. Solos para todos: perguntas e respostas. Rio de Janeiro:Embrapa Solos, 2014.

BECKER. W.F.; WAMSER, A.F.; FELTRIM, A.L.; SUZUKI, A.; SANTOS, J.P.; VALMORBIDA, J.; HAHN, L.; MARCUZZO, L.L; MUELLER, S. Sistema de produção integrada para o tomate tutorado em Santa Catarina. Florianópolis, SC: Epagri, 2016

BENETT, C. G. S.; BUZETTI, S.; SILVA, K. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GARCIA, C. M. D. P.; MAESTRELO, P. R. Produtividade e desenvolvimento da cana-planta e soca em função de doses e fontes de manganês. *Revista Brasileira de Ciencia do solo*, Viçosa, MG. v. 35, n. 5, p. 1661-1667, 2011.

BENTO, L. R. et al. Humic extracts of hydrochar and Amazonian Dark Earth: Molecular characteristics and effects on maize seed germination. *Science Of The Total Environment*, v. 708, p. 135000, 2020

BENTO, L.R., CASTRO, A.J.R., MOREIRA, A.B., FERREIRA, O.P., BISINOTI, M.C., MELO, C.A., Release of nutrients and organic carbon in different soil types from hydrochar obtained using sugarcane bagasse and vinasse. *Geoderma* 334, 24–32, 2019.

BERGE, N.D.; RO, K.S.; MAO, J.; FLORA, J.R.V.; CHAPPELL, M.A.; BAE, S. Hydrothermal Carbonization of Municipal Waste Streams. *Environmental Science and Technology*, V. 45, P. 5696–5703, 2011.

BILLER, P. et al. Nutrient recycling of aqueous phase for microalgae cultivation from the hydrothermal liquefaction process. *Algal Research*, v. 1, n. 1, p. 70–76, 2012.

BISINOTI, M. C.; MOREIRA, A. B.; MELO, C. A.; FREGOLENTE, L. G.; BENTO, L. R.; VITOR DOS SANTOS, J.; FERREIRA, O. P. Application of Carbon-Based Nanomaterials as Fertilizers in Soils. In: *Nanomaterials Applications for Environmental Matrices*. 1. ed. Fortaleza: Elsevier, 2019.

BOBLETER O. Hydrothermal degradation of polymers derived from plants. *Prog Polym Sci* 1994.

BORCHARD, N. , SIEMENS, J. ; LADD, B. ; MÖLLER, A. ; AMELUNG, W., Application of biochars to sandy and silty soil failed to increase maize yield under common agricultural practice. *Soil and Tillage Research*, v. 144, p. 184–194, 2014.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *The Nature and Properties of soils*. 15 th ed. [s.l.] Columbus: Pearson, 2016., 2016.

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

BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A.; PEDROSA, E. M. R. Qualidade do percolado de solos que receberam vinhaça em diferentes doses e tempo de incubação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.3, p.318–323, 2007.

BROWNSORT PA. Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on biochar system benefits. (MAsc thesis). The University of Edinburg. 2009.

BRUNNER G., Near critical and supercritical water. Part I. Hydrolytic and hydrothermal processes. *The Journal of Supercritical Fluids*, Volume 47, 2009.

BUTNAN, SOMCHAI; DEENIK, JONATHAN L.; TOOMSAN, BANYONG; ANTAL, MICHAEL J.; VITYAKON, PATMA. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy. *Geoderma*, v. 237–238, p. 105–116, 2015

CANCELLA, Erick Paiva. Efeito do uso de carvão hidrotérmico em cultivo de beterraba em diferentes tipos de solos.[s.l.]. Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São José do Rio Preto, 2020.

CANELLAS, L.P., OLIVARES, F.L. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 1, 3 (2014).14

CAO, X.; RO, K. S.; CHAPPELL, M.; LI, Y.; MAO, J. Chemical structures of swine- manure chars produced under different carbonization conditions investigated by advanced solid state ¹³C nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy. *Energy and Fuels*, Estados Unidos, v. 25, n. 1, p. 388–397, 2011

CHEN, H.; MA, J.; WEI, J.; GONG, X.; YU, X.; GUO, H.; ZHAO, Y. Biochar increases plant growth and alters microbial communities via regulating the moisture and temperature of green roof substrates. *Science of the Total Environment*, Holanda, v. 635, p. 333–342, 2018.

DOMENE X, MATTANA S., HANLEY K, ENDERS A., LEHMANN J., Medium-term effects of corn biochar addition on soil biota activities and functions in a temperate soil cropped to corn, *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 72, 2014.

EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. 3ª edição. Rio de Janeiro. 2017.

FANG, J. FANG J, GAO B, CHEN J, ZIMMERMAN AR. Hydrochars derived from plant biomass under various conditions: Characterization and potential applications and impacts. *Chemical Engineering Journal*, v. 267, p. 253–259, 2015.

FANG, J., ZHAN, L., OK, Y. S., GAO, B. Minireview of potential applications of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of biomass. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 57, p. 15–21, 2018.

FAO, 2015. World fertilizer trends and outlook to 2018, Food and Agriculture Organization of United Nations.

FREGOLENTE, L. G. et al. New Proposal for Sugarcane Vinasse Treatment by Hydrothermal Carbonization: An Evaluation of Solid and Liquid Products. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 00, n. 00, p. 1–11, 2019.

FREGOLENTE, Lais Gomes. Carvão hidrotérmico : avaliação das características húmicas e do efeito no desenvolvimento de plantas. [s.l.] Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São José do Rio Preto, 2019

FUNKE A, ZIEGLER F. Hydrothermal carbonization of biomass: a summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels Bioprod Biorefining* 2010;4:160–77.

GEORGE, C, WAGNER M, KÜCKE M, RILLIG MC. Divergent consequences of hydrochar in the plant-soil system: Arbuscular mycorrhiza, nodulation, plant growth and soil aggregation effects. *Applied Soil Ecology*, v. 59, p. 68–72, 2012.

GEORGE, C.; WAGNER, M.; KÜCKE, M.; RILLIG, M. C. Divergent consequences of hydrochar in the plant-soil system: Arbuscular mycorrhiza, nodulation, plant growth and soil aggregation effects. *Applied Soil Ecology*, Holanda, v. 59, p. 68–72, 2012.

GLASER, B., HAUMAIER, L., GUGGENBERGER, G., ZECH, W.. The “Terra Preta” phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* 88, 37–41. 2001.

GLASER, B.; BIRK, J. J. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 82, p. 39–51, 2012

GONÇALVES, S. P. C., STRAUSS, M., & MARTINEZ, D. S. T. The positive fate of biochar addition to soil in the degradation of PHBV-silver nanoparticles composites. *Environmental Science & Technology*. 2018.

GROSSMAN JM, O'NEILL BE, TSAI SM, LIANG B, NEVES E, LEHMANN J. Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy. *Microb Ecol.* 60:192–205, 2010.

HASEGAWA P. M.; BRESSAN R. A., Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 2000;

HECKENBERGER, M. J., RUSSELL, J. C., TONEY, J. R., SCHIMIDT. M. J. The legacy of cultural landscapes in the Brazilian Amazon: implications for biodiversity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 362, n. 1478, p. 197–208, 2007.

HEIDARI M., DUTTA, A., ACHARYA, B., MAHMUD, S., A review of the current knowledge and challenges of hydrothermal carbonization for biomass conversion. *Journal of the Energy Institute*. Volume 92, Issue 6, Pages 1779-1799. 2019

HEUVELINK E., Tomatoes. 2^oed. 2018

IAC. Instituto Agronômico de Campinas. Solos do estado de São Paulo- Argissolo, disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solospdf/Argissolos.pdf>. Acesso em 29 de setembro de 2020.

IAC. Instituto Agronômico de Campinas. Solos do estado de São Paulo-Latossolo, disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solospdf/Latossolos.pdf> . Acesso em 29 de setembro de 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual técnico de pedologia, 2^a ed. Rio de Janeiro, 2007

JORIO, A. et al. Brazilian science towards a phase transition. *Nature materials*, v. 9, n. 7, p. 528–531, 2010

KAMBO, H. S.; DUTTA, A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Reino Unido, v. 45, p. 359–378, 2015

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. *Revista Geonomos*, v. 5, n. 1, 2013.

KERN, C. D. et al. Parte II - As Terras Pretas de Índio na Amazônia: Evolução do Conhecimento em Terra Preta de Índio. In: *As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas*. [s.l.: s.n.]. p. 72–81.

KNEŽEVIĆ D. Hydrothermal conversion biomass, MS thesis University of Twente. 2009

LARANJA, M. J. Identificação de compostos orgânicos semivoláteis e voláteis nos produtos obtidos a partir do processo de carbonização hidrotérmica de bagaço de cana e vinhaça. [s.l.] Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2018.

LARANJA, M.J., DA SILVA, R.C.J., BISINOTI, M.C, MOREIRA, A.B., BOSCOLO, M, FERREIRA, O. P., MELO, C. A. Factorial design of experiments for extraction and screening analysis of organic compounds in hydrochar and its process water of sugar cane bagasse and vinasse. *Biomass Conv. Bioref.* (2020)

LARBI, A.; KCHAOU, H.; GAALICHE, B.; GARGOURI, K.; BOULAL, H.; MORALES, F. Supplementary potassium and calcium improves salt tolerance in olive plants. *Scientia Horticulturae*, Holanda, v. 260, n. October 2019, p. 108912, 2020.

LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. 3º ed. São Carlos: Rima, 2006.

LEHMANN . J, GAUNT J, RONDON M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 11:395–419, 2006.

LEHMANN J. Terra Preta Nova – where to from here? In: Woods W, Teixeira W, Lehmann J, Steiner C, WinklerPrins A, Rebellato L, editors. *Amazonian dark earths: Wim Sombroek's vision*. Netherlands: Springer; p. 473–86, 2009.

LEHMANN, J.; DA SILVA, J. P.; STEINER, C. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, Holanda, v. 249, n. 15, p. 343–358, 2003

LIBRA JA, RO KS, KAMMANN C, FUNKE A, BERGE ND, NEUBAUER Y, et al. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*;2:71–106, 2011.

M. M. TITIRICI, A. THOMAS, M. ANTONIETTI. Back in the black: hydrothermal carbonization of plant material as an efficient chemical process to treat the CO₂ problem? *New J. Chem.* 2007

M. SEVILLA, J. A. MACIÁ-AGULLÓ, A. B. FUERTES. Hydrothermal carbonization of biomass as a route for the sequestration of CO₂: Chemical and structural properties of the carbonized products *Biomass Bioenergy*, 35 (7), 3152–3159, 2011

MANAHAN, S.E.; *Introducción a la química ambiental*. Barcelona: Reverté; México: Universidad Nacional Autónoma de México, 200

MELO, C. A. et al. Transforming sugarcane bagasse and vinasse wastes into hydrochar in the presence of phosphoric acid: an evaluation of nutrient contents and structural properties. *Waste and Biomass Valorization*, n. 8, p. 1139–1151, 2016.

MELO, T. M. et al. Plant and soil responses to hydrothermally converted sewage sludge (sewchar). *Chemosphere*, v. 206, p. 338–349, 2018.

MELO, T. M., BOTTLINGER, M., SCHULZ, E., LEANDRO, W. M. Effect of biosolid hydrochar on toxicity to earthworms and brine shrimp. *Environmental Geochemistry and Health*, p. 1–14, 2017

MIA, S.; VAN GROENIGEN, J.; VAN DE VOORDE, T.; ORAM, N.; BEZEMER, T.; MOMMER, L.; JEFERRY, S. Biochar applications rate affects biological nitrogen fixation in red clover conditional on potassium availability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. v191. p 83–91. 2014

MOHAN D, PITTMAN CU, STEELE PH. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy Fuels*, 20:848–8955,56, 2006.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 888–903, 2015.

MUKHERJEE, A., ZIMMERMAN, A.R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures. *Geoderma* 193– 194, 122–130. 2013.

MUKHERJEE, A., ZIMMERMAN, A.R., HARRIS, W., *Geoderma* Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars 163, 247–255., 2011

NOVOTNY, E.H., HAYES, M.H.B., MADARI, B.E., BONAGAMBA, T.J., DEAZEVEDO, E.R., DE SOUZA, A.A., SONG, G., NOGUEIRA, C.M., MANGRICH, A.S. Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon Region for the utilisation of charcoal for soil amendment. *J. Braz. Chem. Soc.* 20, 1003–1010. 2009.

O Futuro da Agricultura Brasileira, Embrapa, 2018 OCDE, 2003

OLIVEIRA, N. C. et al. Morphological analysis of soil particles at multiple length-scale reveals nutrient stocks of Amazonian Anthrosols. *Geoderma*, Amsterdam, v. 311, n. 1, p. 58–66, 2018.

ÖZBAY N, PÜTÜN AE, UZUN BB, PÜTÜN E. Biocrude from biomass: pyrolysis of cottonseed cake. *Renew Energy*;24:615–25, 2001.

PAGANO M., Ribeiro-Soares J., Cançado L. G., Falcão N. P.S., Gonçalves V. N., Rosa L. H., Takahashi J. A., Achete C. A., Jorio A., Depth dependence of black carbon structure, elemental and microbiological composition in anthropic Amazonian dark soil, *Soil and Tillage Research*, Volume 155, 2016.

PICCOLO, A. Chapter 5 - Humus and Soil Conservation. *Humic Substances in Terrestrial Ecosystems*, p. 225–264, 1996

PRASAD, M.; TZORTZAKIS, N.; MCDANIEL, N. Chemical characterization of biochar and assessment of the nutrient dynamics by means of preliminary plant growth tests. *Journal of Environmental Management*, Reino Unido, v. 216, p. 89–95, 2018

PREZOTTI LC, GUARÇONI MA. Guia de interpretação de análise de solo e foliar. Vitória: Incaper; 2013.

REIBE, K., GOTZ, K. ROB, C. DORING, T. Impact of quality and quantity of biochar and hydrochar on soil Collembola and growth of spring wheat. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 83, p. 84– 87, 2015.

REZENDE, C. et al. Chemical and morphological characterization of sugarcane bagasse submitted to a delignification process for enhanced enzymatic digestibility. *Biotechnology for Biofuels*, v. 4, n. 1, p. 54, 2011

RIEDEL, T., HENNESSY, P., IDEN, S.C., KOSCHINSKY, A. Leaching of soil-derived major and trace elements in an arable topsoil after the addition of biochar. *Eur. J. Soil Sci.* 66, 823–834. 2015

RILLIG MC, WAGNER M, SALEM M, ANTUNES PM, GEORGE C, RAMKE H-G, et al. Material derived from hydrothermal carbonization: effects on plant growth and arbuscular mycorrhiza. *Applied Soil Ecology*, v. 45, n. 3, p. 238–242, 2010.

ROSS, A. B. et al. Hydrothermal processing of microalgae using alkali and organic acids. *Fuel*, v. 89, p. 2234–2243, 2010

SALEM, M.; KOHLER, J.; WURST, S.; RILLIG, M. C. Earthworms can modify effects of hydrochar on growth of *Plantago lanceolata* and performance of arbuscular mycorrhizal fungi. *Pedobiologia*, v. 56, n. 4–6, p. 219–224, 2013.

SANCHEZ P. A.; VILLACHICA H.; BANDY D. E., Soil Fertility Dynamics after Clearing a Tropical Rainforest in Peru. *Soil Science Society of America Journal*. Volume 47, Issue 6 p. 1171-1178. 1983

SANTANA, Ariane Maziero et al. Disponibilidade de nutrientes e carbono orgânico em solos contendo carvão hidrotérmico lavado e não lavado e comparação com solos antropogênicos. *Quím. Nova*, São Paulo, v. 42, n. 3, p. 262-272, 2019.

SANTOS, D. R. et al. Hydrochars produced with by-products from the sucroenergetic industry: a study of extractor solutions on nutrient and organic carbon release. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, p. 9137-9145, 2019.

SANTOS, H. G. et al. I - Estudo do Solo. In: *Solos Para Todos, Perguntas e Respostas*. 1ª Edição, EMBRAPA, Rio de Janeiro, Brasil, p.11-50, 2014.

SANTOS, J. V. et al. Humic-like acids from hydrochars: Study of the metal complexation properties compared with humic acids from anthropogenic soils using PARAFAC and time-resolved fluorescence. *Science Of The Total Environment*. Amsterdam: Elsevier, v. 722, 10 p., 2020.

SENESI, N. et al. A comparative survey of recent results on humic-like fractions in organic amendments and effects on native soil humic substances. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 39, n. 6, p. 1244–1262, 2007. 46

SEVILLA M, FUERTES AB. Sustainable porous carbons with a superior performance for CO₂ capture. *Energy Environ Sci* 2011;4:1765–71].

SILVA, C. C. et al. Effect of the reaction medium on the immobilization of nutrients in hydrochars obtained using sugarcane industry residues. *Bioresource Technology*, v. 237, p. 213–221, 2017.

SPRICIGO, J. G., ANTUNES DA CRUZ, D. C., CANDIDO, W. E., GUERRA, J., SOUZA, C. T. DE, & ALVES, M. V. DOSES DE FERTILIZANTE ORGÂNICO NA PRODUTIVIDADE DO MILHO E NOS TEORES NUTRICIONAIS DO SOLO. 2018.

STEINBEISS, S.; GLEIXNER, G.; ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, Reino Unido, v. 41, n. 6, p. 1301–1310, 2009.

SUN, F.; LU, S. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Weinheim, v.177, n. 1, p. 26–33, 2014.

SUN, J., DROSOS, M., MAZZEI, P. SAVY, D. The molecular properties of biochar carbon released in dilute acidic solution and its effects on maize seed germination. *Science of the Total Environment*, v. 576, p. 858–867, 2017.

TEIXEIRA, W. G., KERN, D. C., MADARI, B. E., LIMA, H. N., WOODS, W. As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. 2009.

TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. EMBRAPA Amazônia Ocidental, Amazônia, p. 420, 2009. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/684554>

THINES, K.R., ABDULLAH, E.C., MUBARAK, N.M., RUTHIRAN, M. Synthesis of magnetic biochar from agricultural waste biomass to enhancing route for waste water and polymer application: a review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 67, 257–276. 2017.

TITIRICI, M. M.; WHITE, R. J.; FALCO, C.; SEVILLA, M. Black perspectives for a green future: Hydrothermal carbons for environment protection and energy storage. *Energy Environmental Science*, v. 5, p. 6796-6822, 2012.

ÚNICA.2020. União da Indústria de Cana-de-açúcar. UNICADATA. Disponível em:.. Acesso em 21 de Novembro de 2020

US EPA. Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts for Total Metals for Analysis by FLAA or ICP Spectroscopy. In: *Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846)*. [s.l: s.n.]. p. 1–5.

US EPA. Acid Digestion Of Sediments, Sludges, and Soils. In: *Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846)*. [s.l: s.n.]. p. 1– 12.

VACCARI, F. P.; BARONTI, E. L.; GENESIO, L.; CASTALDI, S.; FORNASIER, F. MIGLIETTA, F. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *European Journal of Agronomy*, 34: 231-238, 2011

VAN RAIJ, B. et al. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. *Boletim Técnico IAC*, Campinas, n. 100, 285 p. 1997.

VERHEIJEN, F. G. A. et al. Biochar application to soils: a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. Luxembourg: EUR 24099 EN, Office for the Official Publications the European Communities, 149 p, 2009.

YU Y, LOU X, WU H. Some recent advances in hydrolysis of biomass in hotcompressed water and its comparisons with other hydrolysis methods†. *Energy Fuels*; 22:46–60, 2007.

Yuan, H., Lu, T., Wang, Y., Chen, Y., Lei, T. Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients. *Geoderma* 267, 17–23. 2016.

ZHAO, X., YAN, X., WANG, S., XING, G., ZHOU, Y. Effects of the addition of rice-strawbased biochar on leaching and retention of fertilizer N in highly fertilized cropland soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 59, 771–782. 2013.

ZHENG, H., WANG, Z., DENG, X., HERBERT, S., XING, B. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma* 206, 32–39, 2013.

ANEXO A - Imagens de microscopia eletrônica de varredura ampliada.

Figura 1. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no argissolo controle do Solo_{t0}, superfície abaxial.

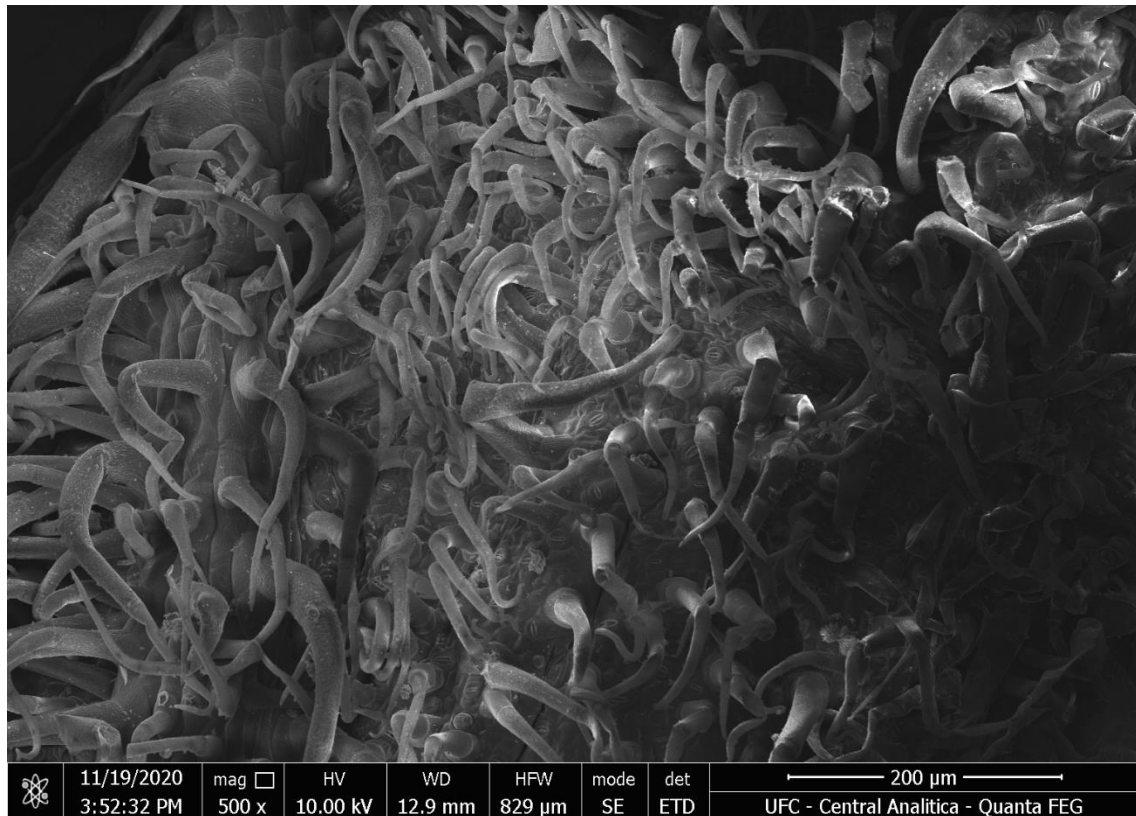


Figura 2. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no argissolo controle do Solo_{t0}, superfície adaxial.

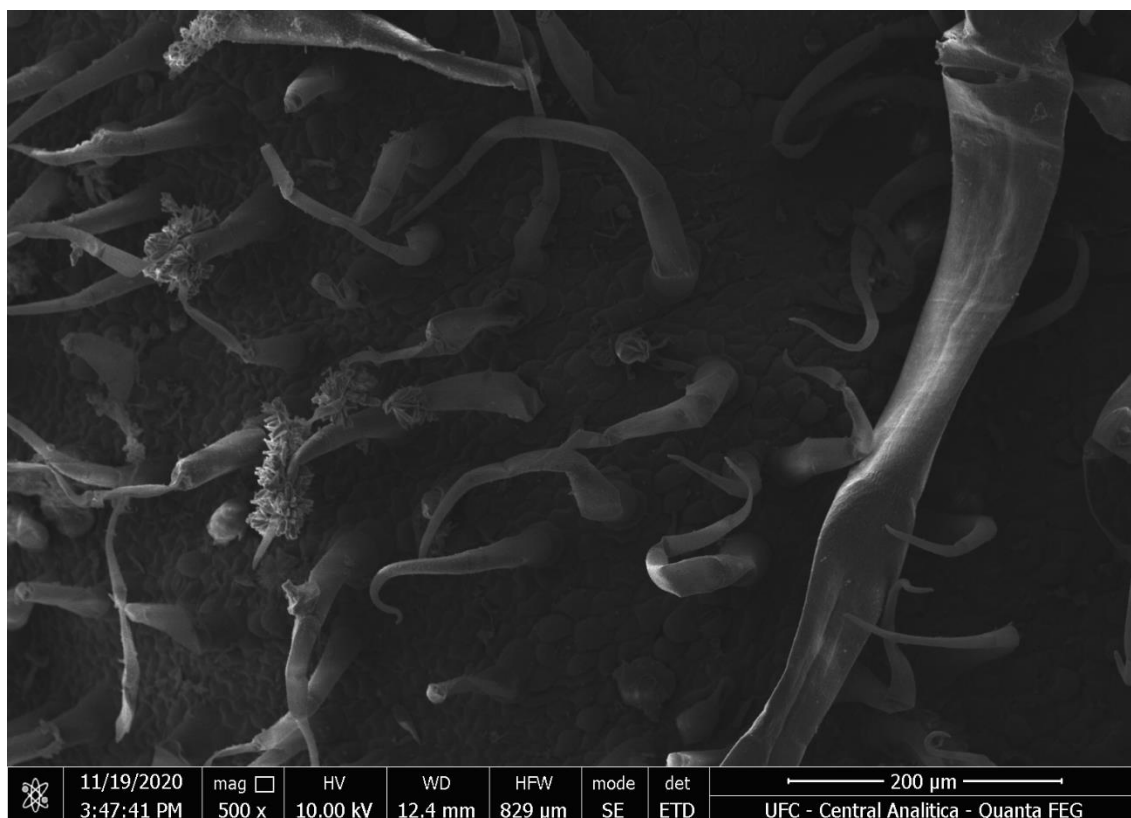


Figura 3. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no argissolo 10 t ha⁻¹ do Solo_{to}, superfície abaxial.

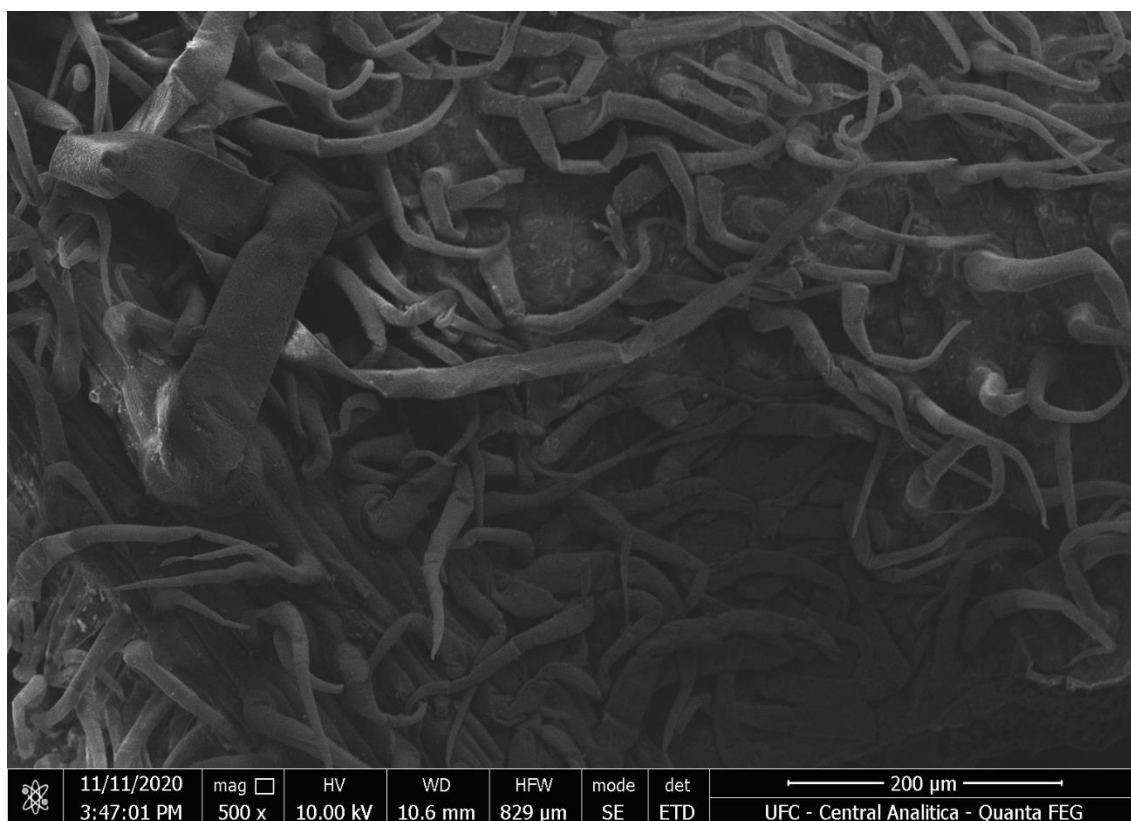


Figura 4. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no argissolo 10 t ha⁻¹ do Solo_{t0}, superfície adaxial.

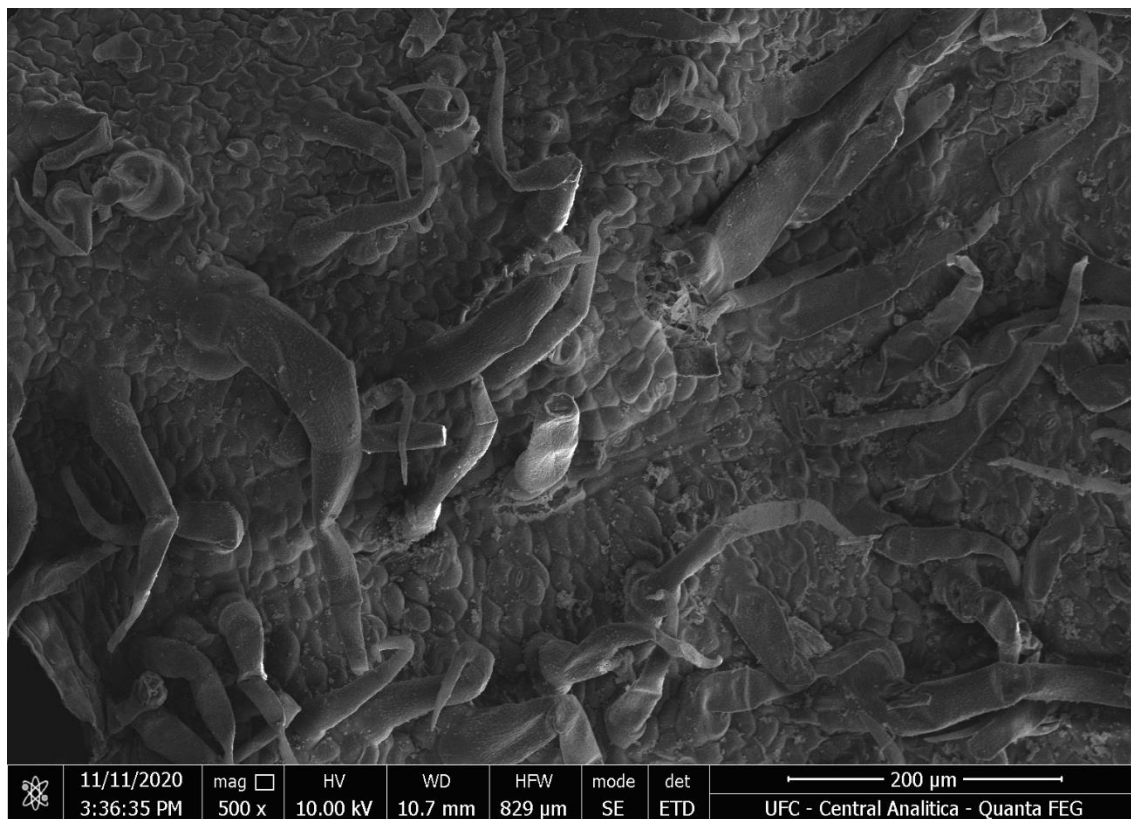


Figura 5. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no argissolo 20 t ha⁻¹ do Solo_{t0}, superfície abaxial.

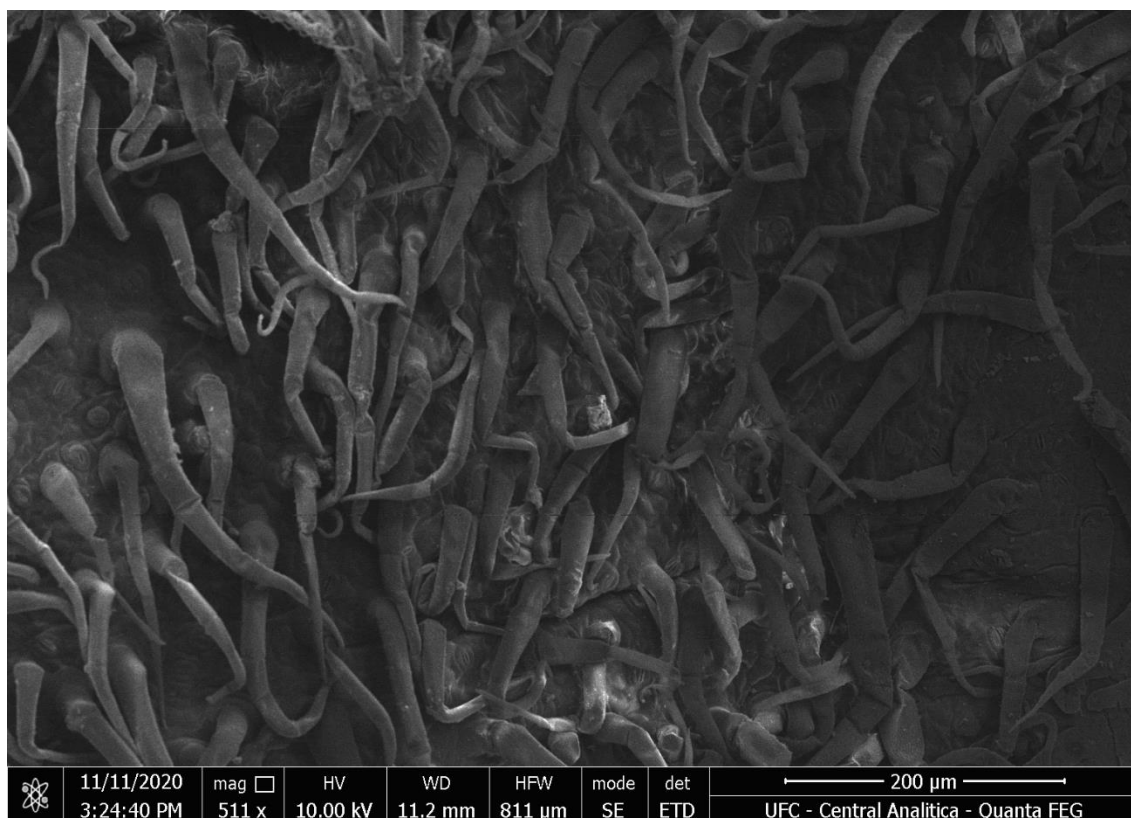


Figura 6. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no argissolo 20 t ha⁻¹ do Solo_{to}, superfície adaxial.

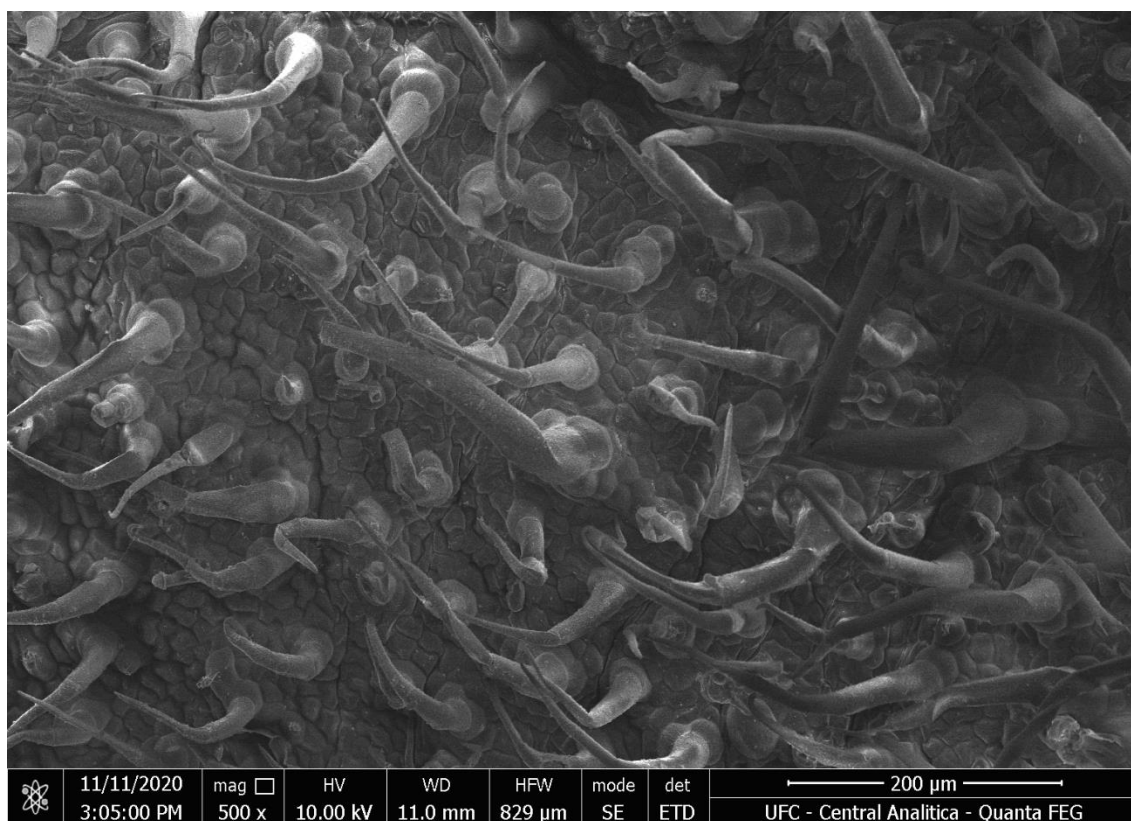


Figura 7. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no latossolo controle do Solo_{to}, superfície abaxial.

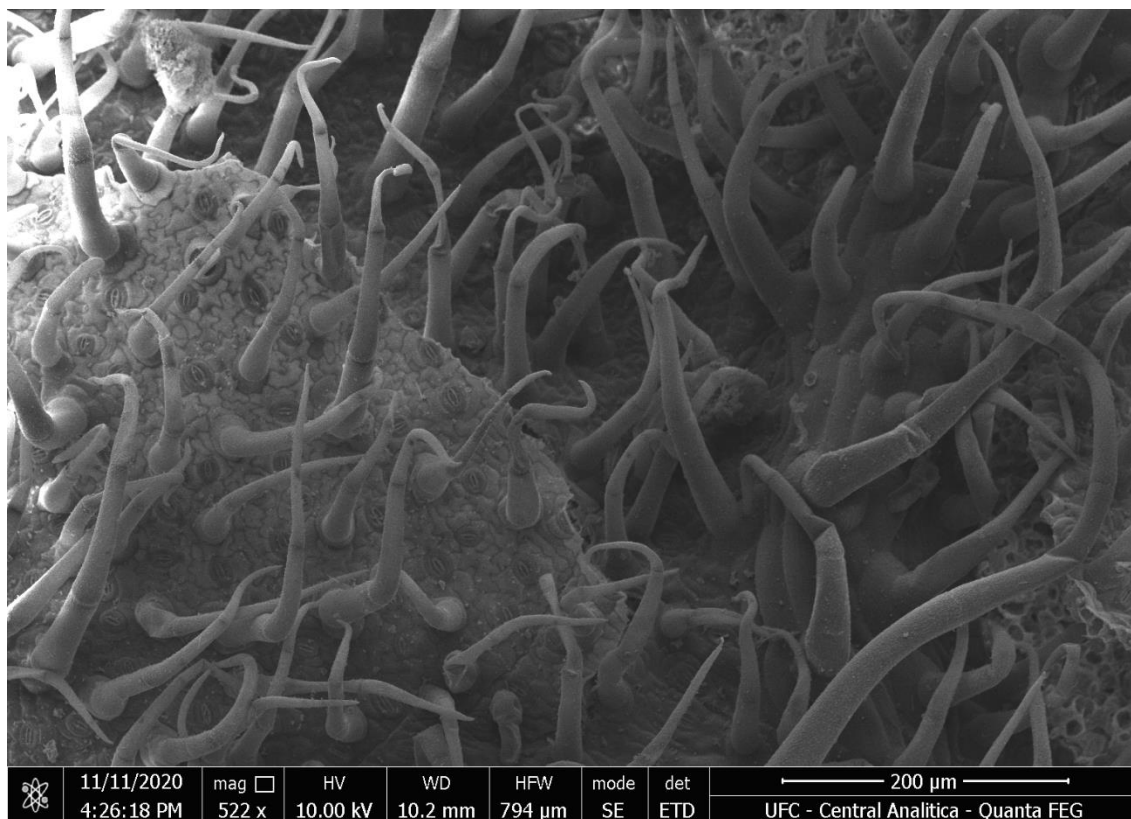


Figura 8. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no latossolo controle do Solo_{to}, superfície adaxial.

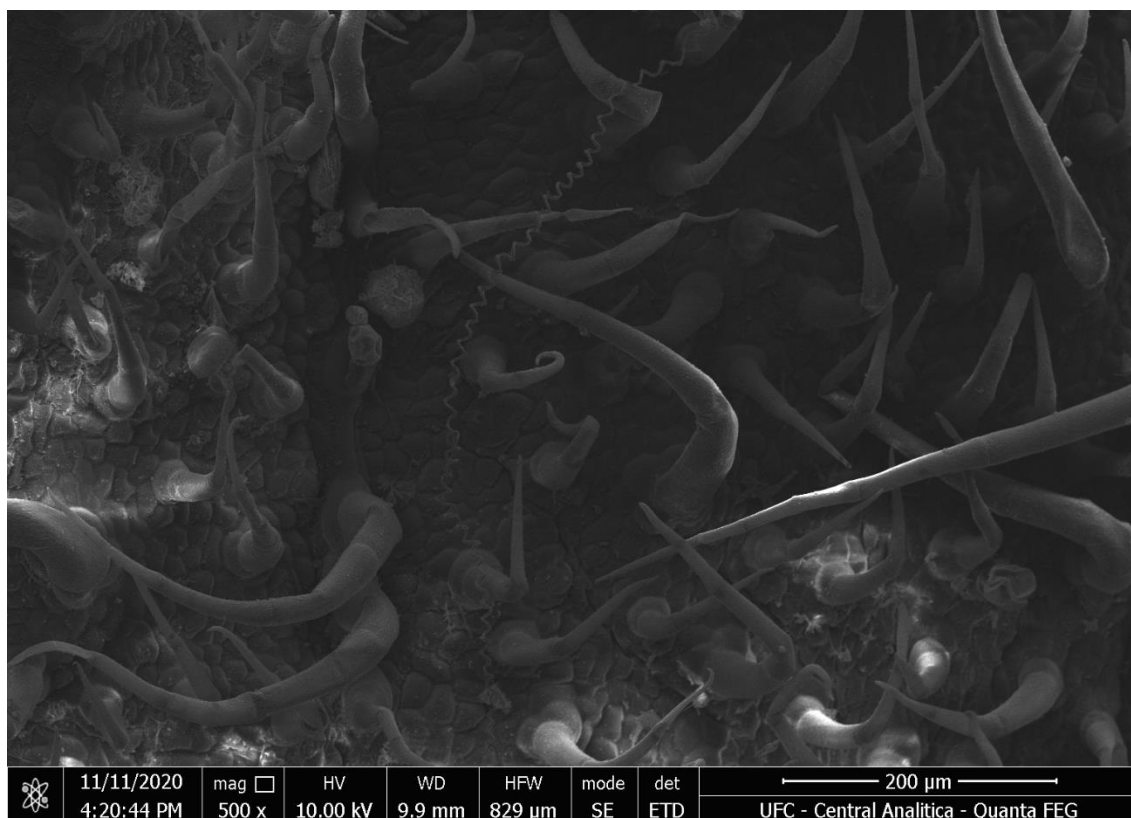


Figura 9. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no latossolo 10 t ha⁻¹ do Solo_{t0}, superfície abaxial.

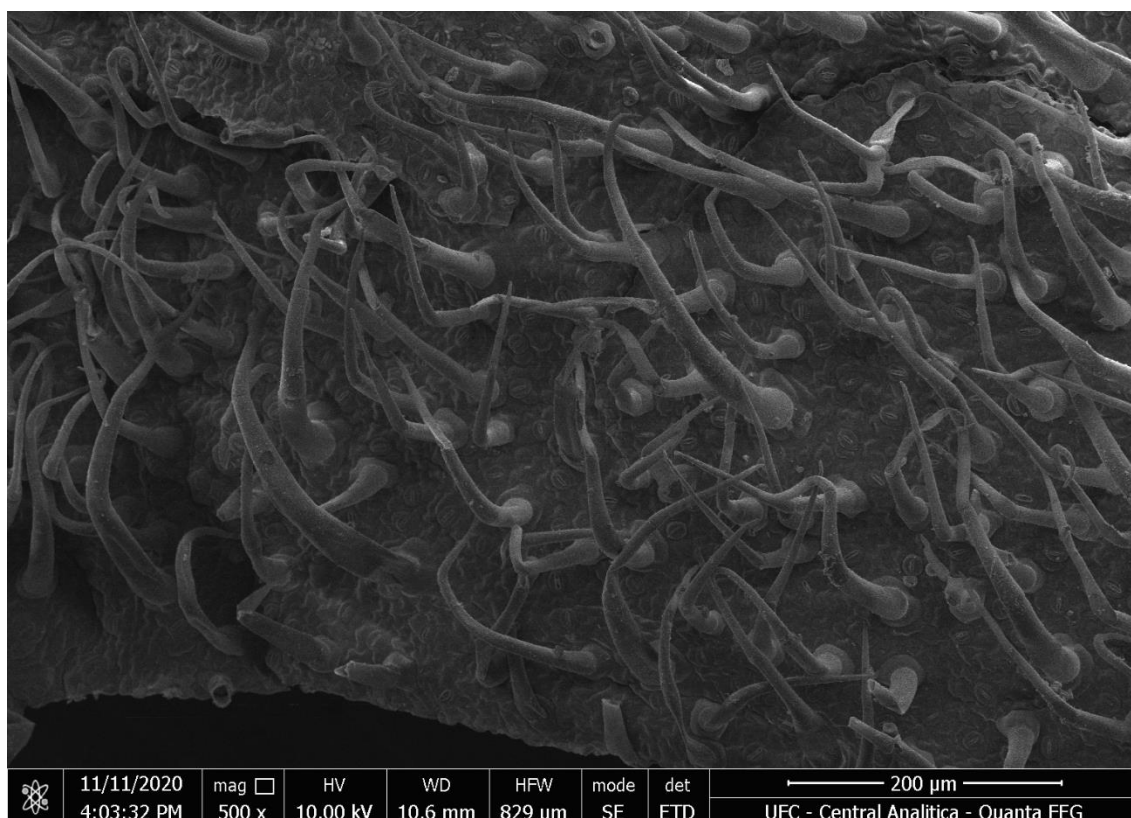


Figura 10. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no latossolo 10 t ha⁻¹ do Solo_{t0}, superfície adaxial.

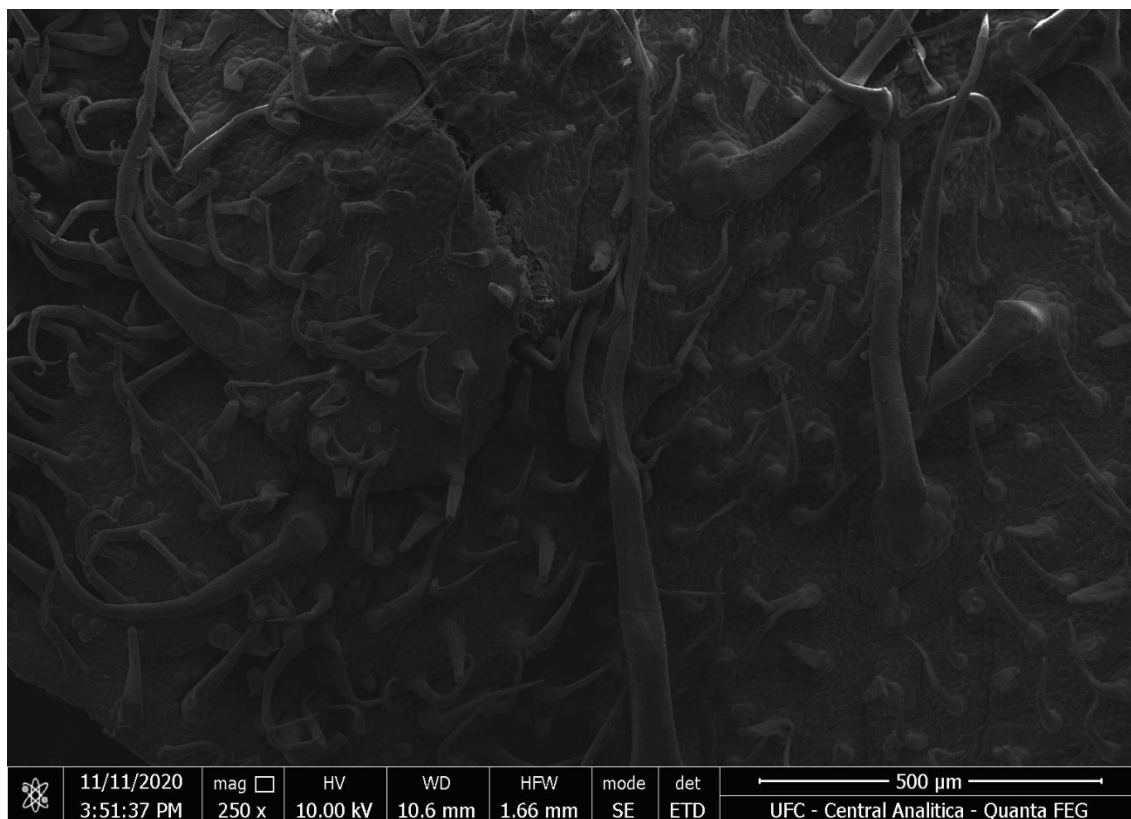


Figura 11. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no latossolo 20 t ha⁻¹ do Solo_{t0}, superfície abaxial.

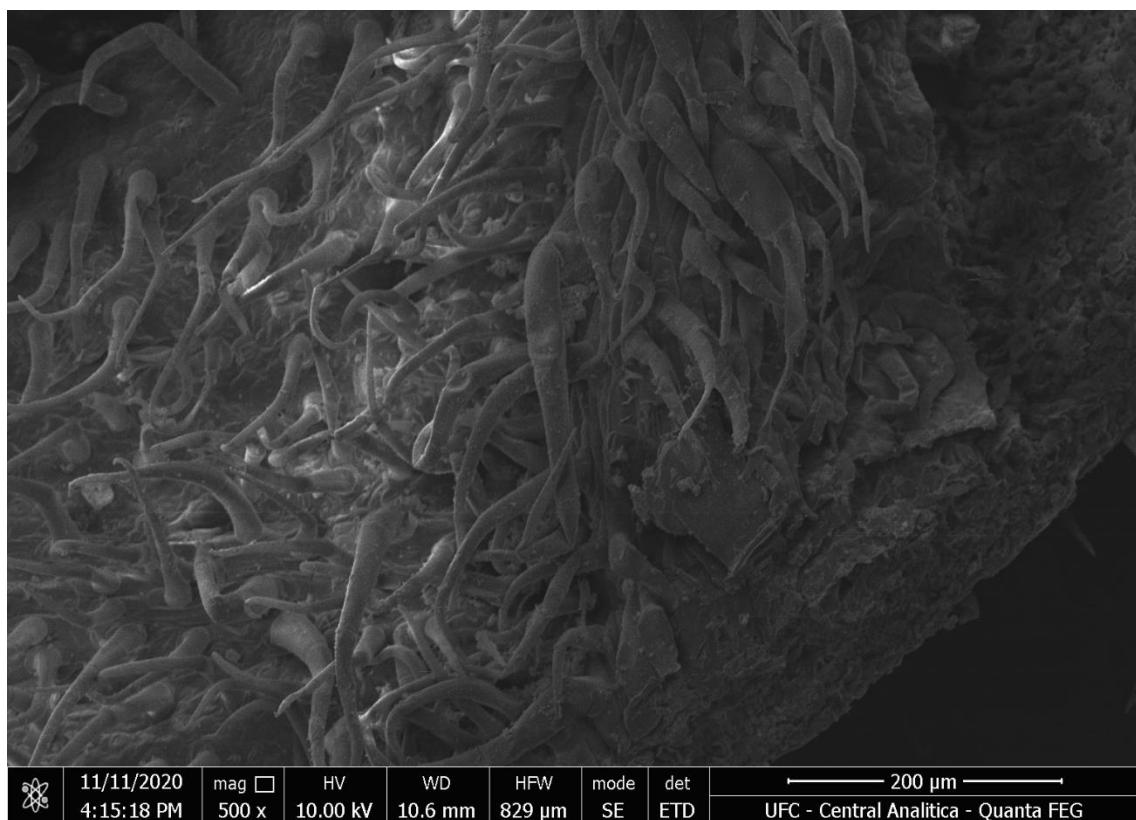


Figura 12. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no latossolo 20 t ha⁻¹ do Solo_{t0}, superfície adaxial.



Figura 13. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no argissolo controle do Solo_{t1}, superfície abaxial.

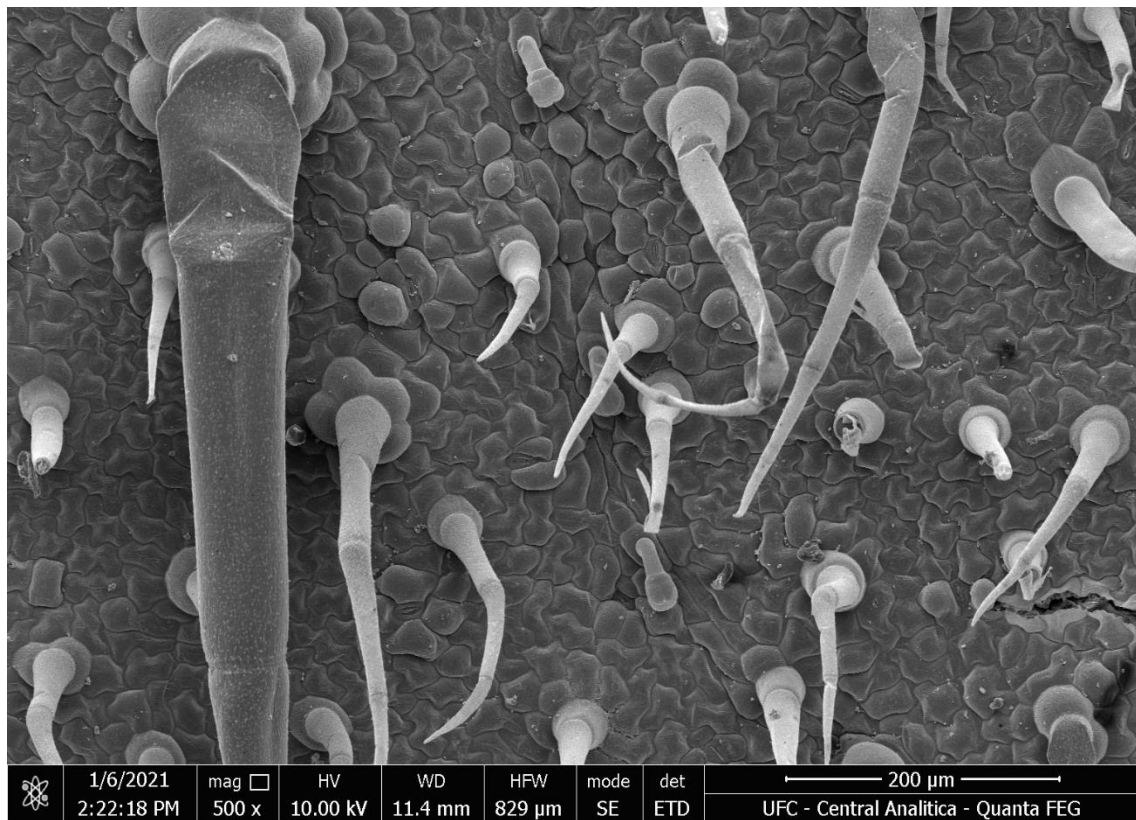


Figura 14. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no argissolo controle do Solo_{t1}, superfície adaxial.



Figura 15. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no argissolo 10 t ha⁻¹ do Solo_{t1}, superfície abaxial.

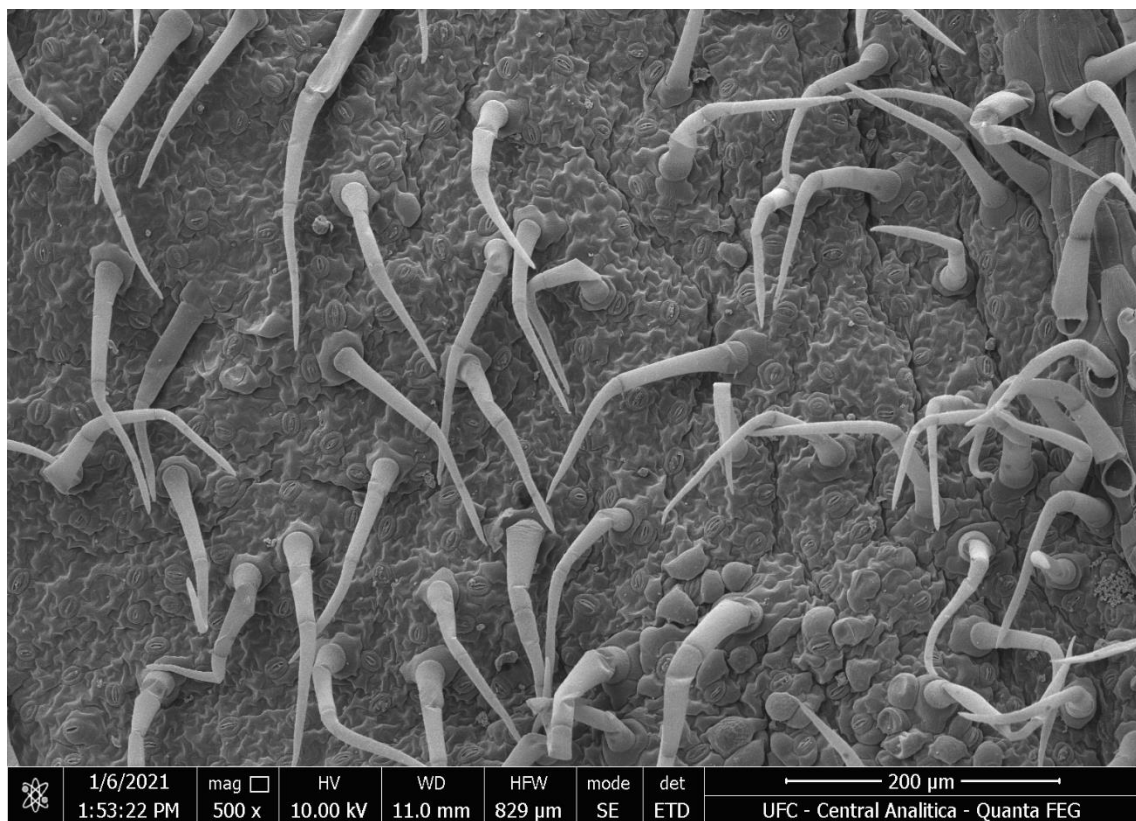


Figura 16. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no argissolo 10 t ha⁻¹ do Solo_{t1}, superfície adaxial.

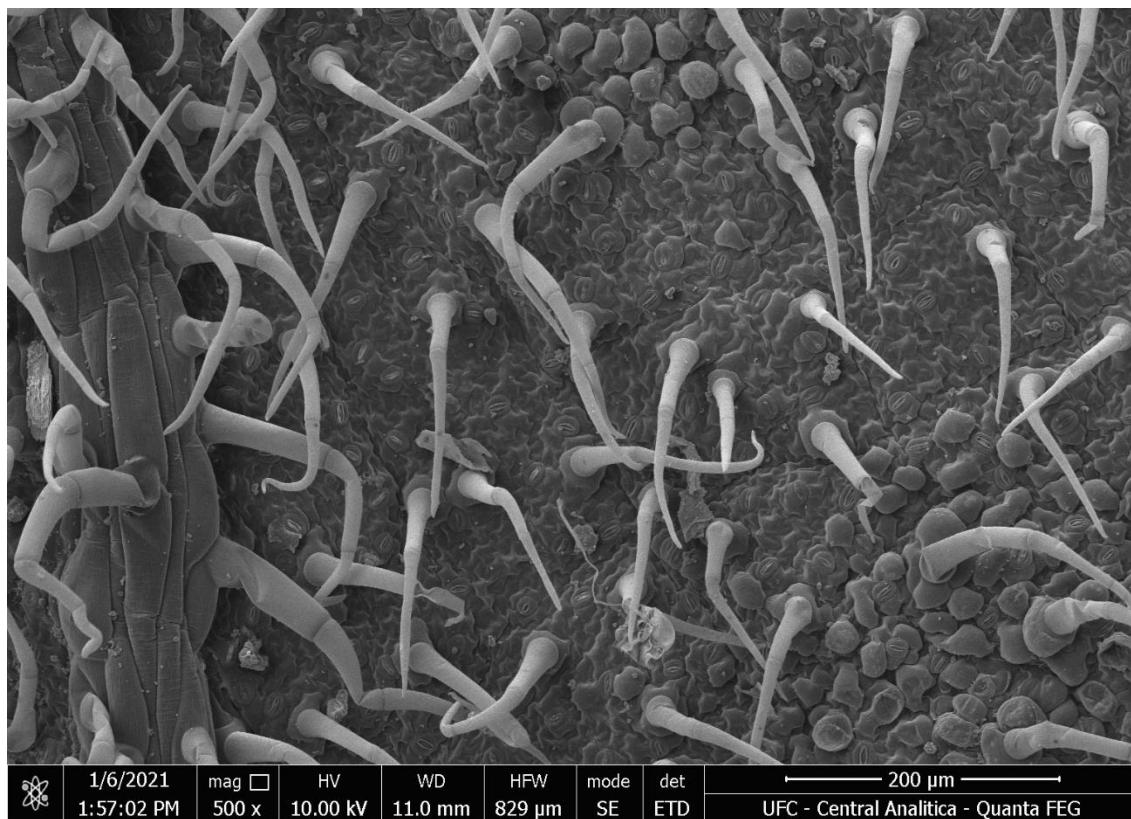


Figura 17. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no argissolo 20 t ha⁻¹ do Solo_{t1}, superfície abaxial.

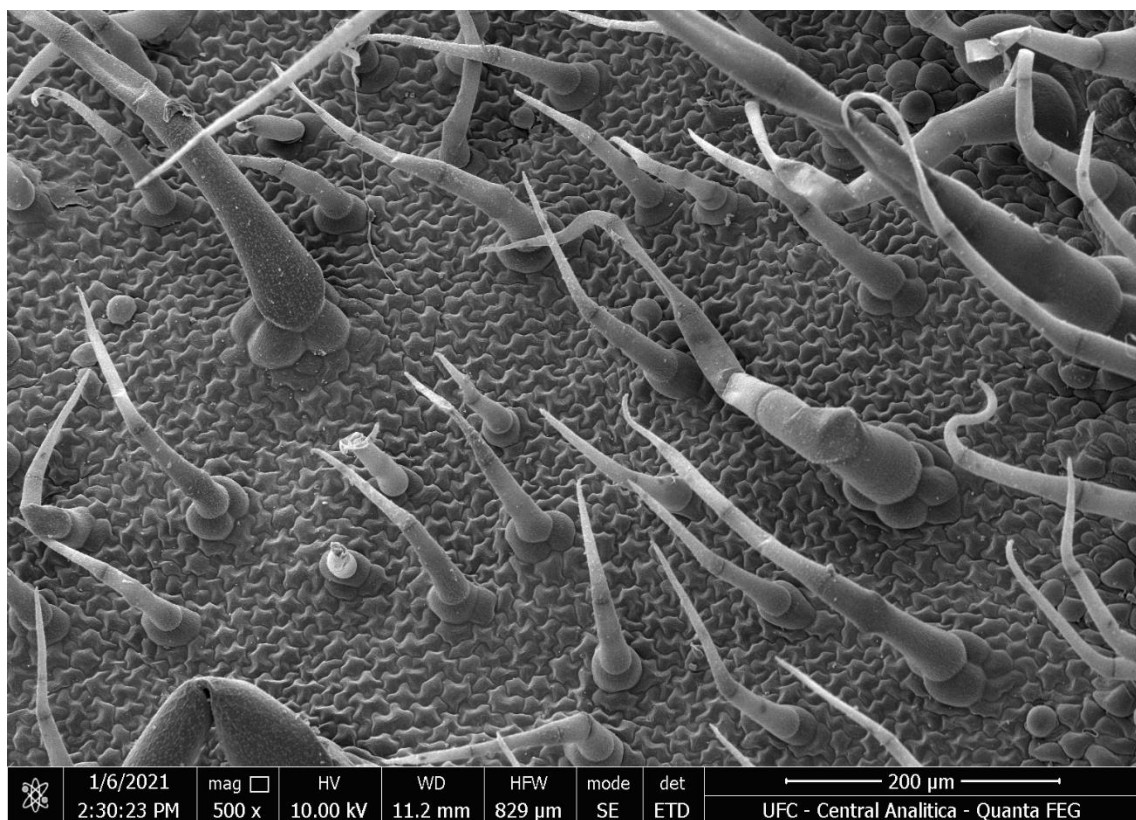


Figura 18. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no argissolo 20 t ha⁻¹ do Solo_{t1}, superfície adaxial.

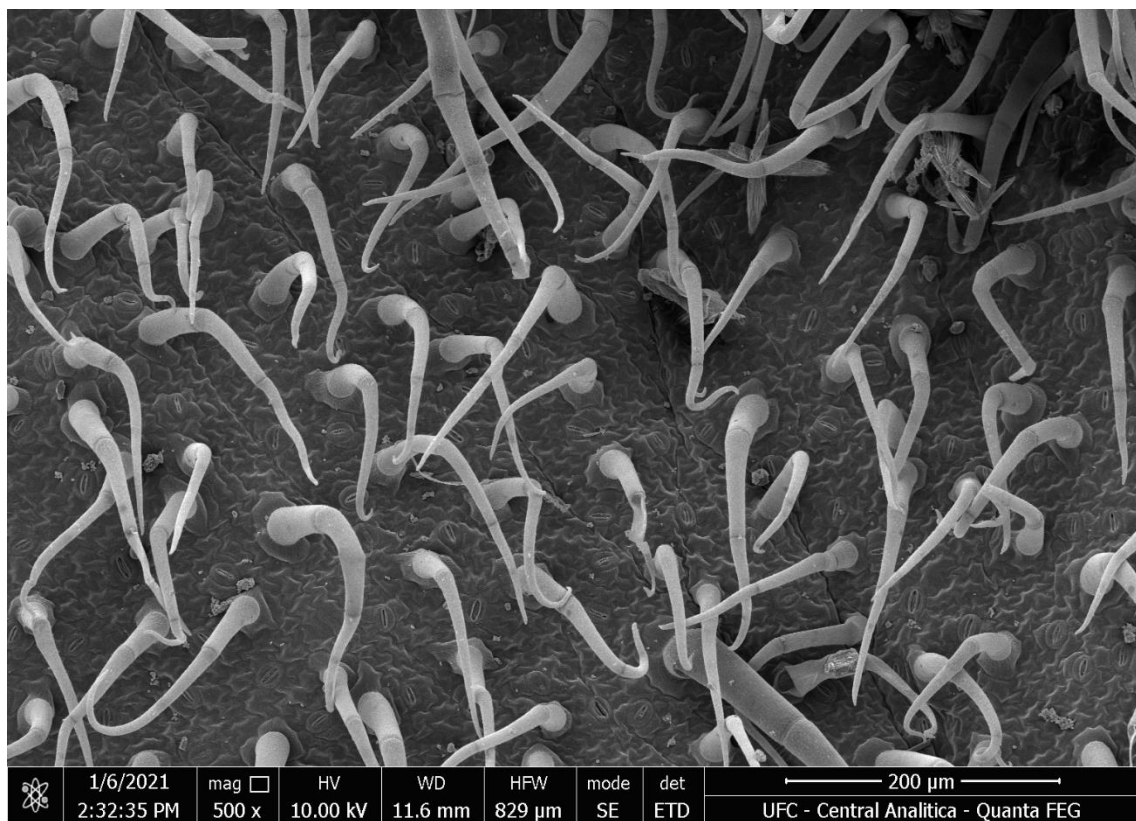


Figura 19. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no latossolo controle do Solo_{t1}, superfície abaxial.

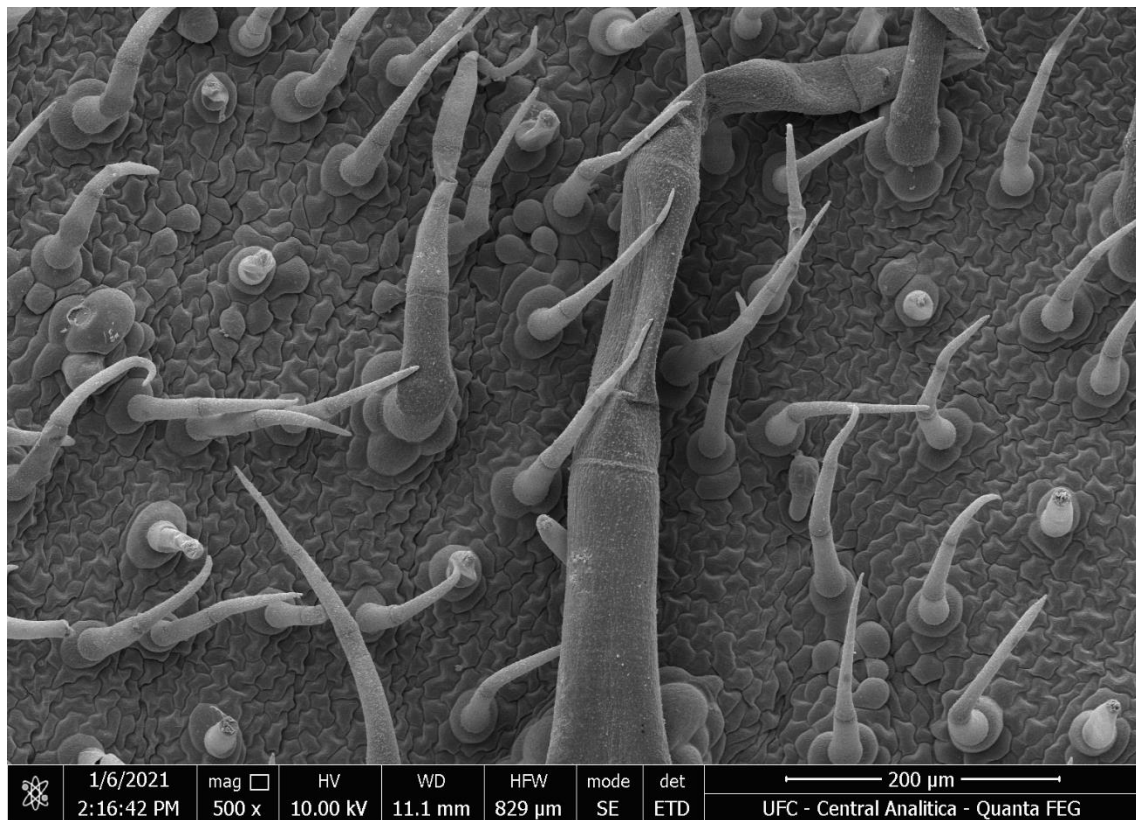


Figura 20. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no latossolo controle do Solo_{t1}, superfície adaxial.

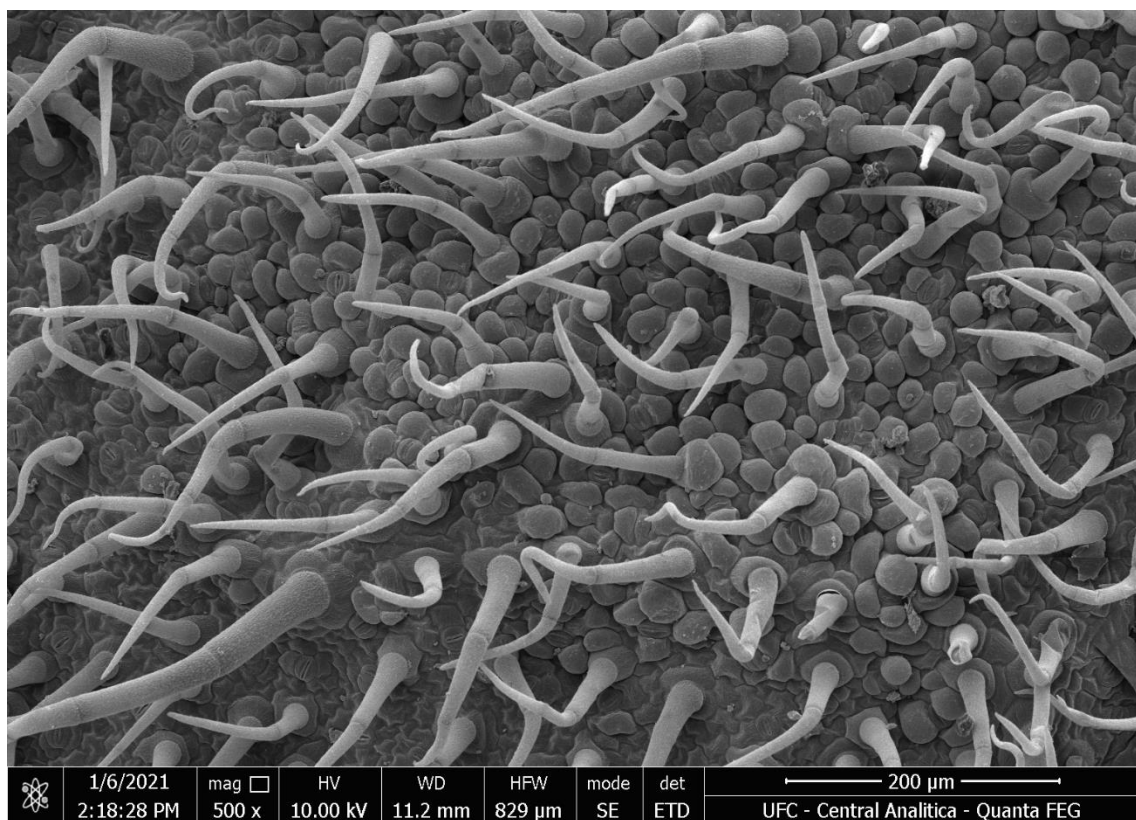


Figura 21. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no latossolo 10 t ha⁻¹ do Solo_{t1}, superfície abaxial.



Figura 22. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no latossolo 10 t ha⁻¹ do Solo_{t1}, superfície adaxial.

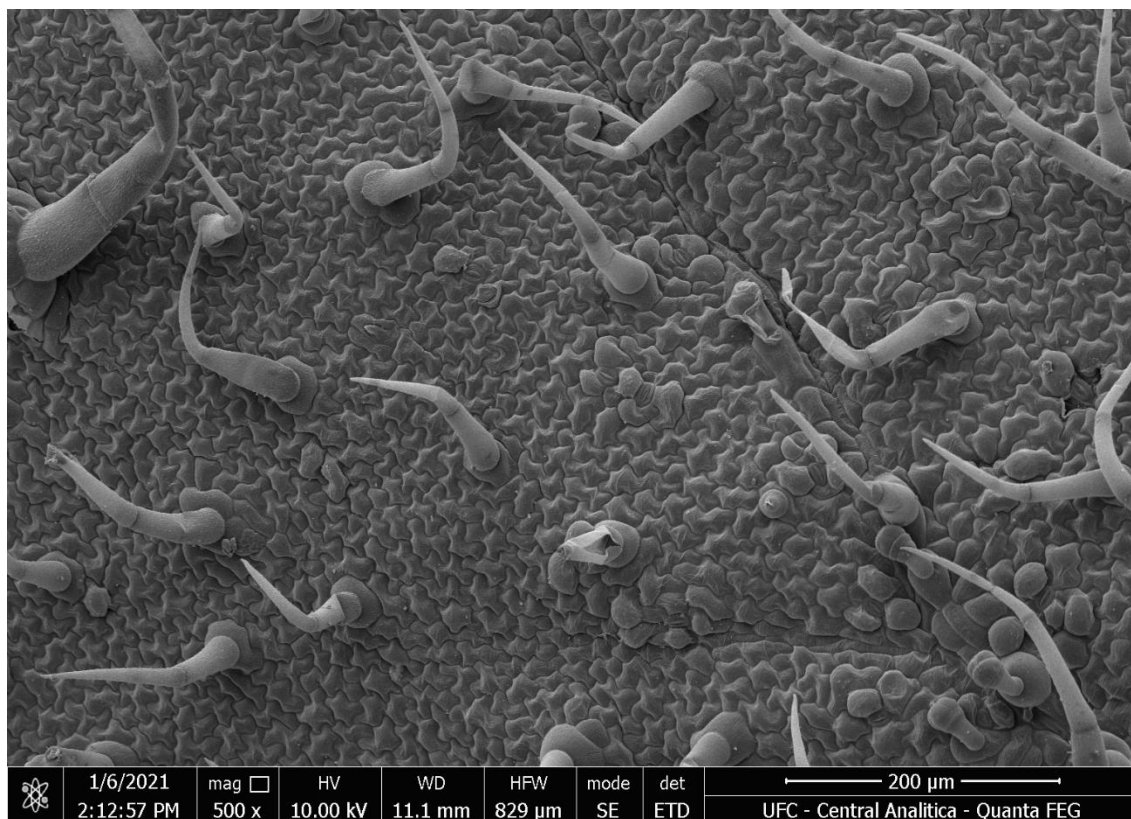


Figura 23. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no latossolo 20 t ha⁻¹ do Solo_{t1}, superfície abaxial.

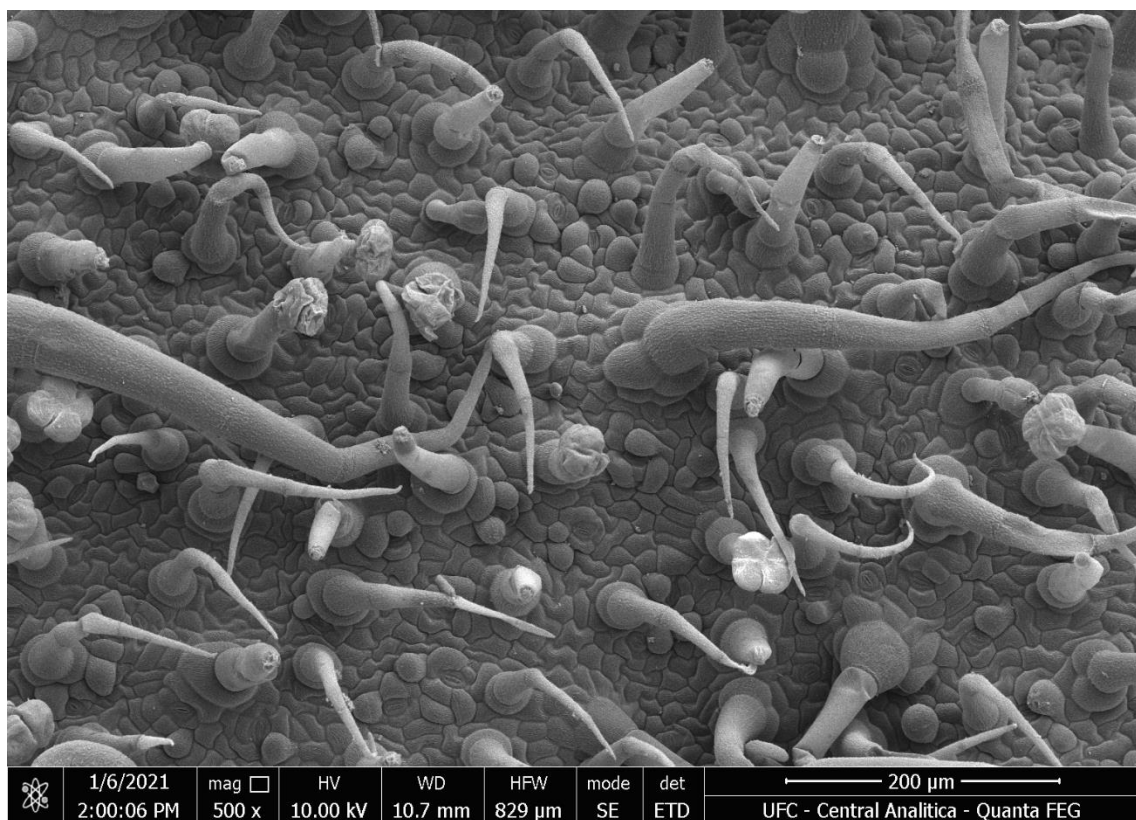


Figura 24. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro no latossolo 20 t ha⁻¹ do Solo_{t1}, superfície adaxial.



Figura 25. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro na terra mulata, superfície abaxial.



Figura 26. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da folha do tomateiro na terra mulata, superfície adaxial.

