



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**LEILA PIRES BEZERRA**

**DESENVOLVIMENTO DE CITROS EM SISTEMAS  
AGROFLORESTAIS SOB DIFERENTES DENSIDADES  
ARBÓREAS EM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO**

**DEVELOPMENT OF CITRUS IN AGROFORESTRY  
SYSTEMS UNDER DIFFERENT TREE DENSITIES IN  
QUARTZARENIC NEOSOL**

Campinas

2022

**LEILA PIRES BEZERRA**

**DESENVOLVIMENTO DE CITROS EM SISTEMAS  
AGROFLORESTAIS SOB DIFERENTES DENSIDADES  
ARBÓREAS EM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola, da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutorado em Engenharia Agrícola, na Área de Água e Solos.

Orientador: Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA LEILA PIRES BEZERRA, E ORIENTADA PELO PROF. DR. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA.

Campinas

2022

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

B469d Bezerra, Leila Pires, 1973-  
Desenvolvimento de citros em sistemas agroflorestais sob diferentes densidades arbóreas em neossolo quartzarênico / Leila Pires Bezerra. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Zigomar Menezes de Souza.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Sistemas agroflorestais. 2. Citros. 3. Solos - Qualidade. 4. Solos - Teor de carbono. 5. Agricultura regenerativa. 6. Frutas cítricas - cultivo. I. Souza, Zigomar Menezes de, 1970-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Development of citrus in agroforestry systems under different tree densities in quartzarenic neosol

**Palavras-chave em inglês:**

Agroforestry systems

Citrus

Soils - Quality

Soils - Carbon content

Regenerative agriculture

Citrus fruits - cultivation

**Área de concentração:** Água e Solo

**Titulação:** Doutora em Engenharia Agrícola

**Banca examinadora:**

Zigomar Menezes de Souza [Orientador]

Fernando Silveira Franco

José Maria Gusman Ferraz

Luiz Octávio Ramos Filho

Marlene Cristina Alves

**Data de defesa:** 04-07-2022

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Agrícola

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-6385-3041>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/3005875732798244>

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Leila Pires Bezerra**, aprovada pela Comissão Julgadora em 04 de julho de 2022, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

**Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza – Presidente e Orientador**

**Dr. Fernando Silveira Franco – Membro Titular**

**Dr. José Maria Gusman Ferraz – Membro Titular**

**Dra. Marlene Cristina Alves – Titular**

**Dr. Luiz Octávio Ramos Filho – Titular**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, José e Francisca, ao meu filho, Eduardo, aos meus irmãos, Sandra, Edgar, Luciana e Charles e as minhas sobrinhas, Isabela e Luiza, por serem o meu ninho de amor nesta vida, meu alicerce e suporte, sempre!

Ao meu companheiro, Juca, por ser fonte de alegria, felicidade, paz, inspiração, proteção e amor!

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela minha existência, amor incondicional, força, luz e proteção, sempre! Lhe tenho tanto amor e gratidão, Pai!

Agradeço aos meus amados pais, Francisca Pires Bezerra e José Bezerra Sobrinho, pela minha vida, por todos os cuidados, apoio e suporte sempre que precisei! Eu não teria conseguido realizar este trabalho sem a ajuda constante de vocês. Gratidão eterna, meus pais!

Ao meu amado filho, Eduardo Bezerra Kurtz, minha maior benção nesta vida! Eu fiz tudo isso por você, meu amor!!

Ao meu orientador, professor Zigomar Menezes de Souza, por não ter poupado esforços para que a pesquisa tivesse todo recurso e estrutura necessária, além de toda orientação e apoio em tudo que precisei. Muito obrigada por tudo, Zigomar!!

Ao meu irmão, Edgar José Bezerra, por ter me ajudado nas estatísticas da pesquisa e compreensão dos dados! Valeu, Keega, sua ajuda foi fundamental!!

À minha irmã, Luciana Pires Bezerra, por ser puro amor, luz e generosidade na minha vida. Obrigada Fofis, por ter cuidado do Dudu para mim e me amparado sempre!

À minha irmã, Sandra Francisca Bezerra Gemma, por ser fonte de inspiração e amor, por toda ajuda emocional e científica toda vez que precisei! Obrigada, Sandy!! Obrigada, Bela, minha florzinha!

Ao meu irmão, Charles Eduardo Pires Bezerra, por estar sempre presente com seu amor, apoio e atenção e pela minha florzinha, Luiza!

Ao meu companheiro, Osvaldo Viu Serrano Júnior (Juca), por ter me ajudado o tempo todo na pesquisa, desde a idealização do experimento até as discussões dos resultados, fazendo questionamentos e trazendo ideias. Por estar sempre ao meu lado, me apoiando, trazendo luz e amor! Que benção compartilhar a vida com você, meu amor!! Obrigada por todo carinho e paciência neste processo!!

Ao meu amigo, Diego Esteban Aguilera, pelo apoio nas estatísticas, correções da tese e discussão dos resultados.

Ao Prof. Carlos Tadeu pelo apoio nas análises estatísticas.

Aos meus colegas e amigos do grupo de pesquisa do Laboratório de Solos da FEAGRI, Elizeu de Souza Lima, Lenon Loveira, Marina Carneiro, Jeison Parra, Diego Aguilera, Christtiane Fernandes, Mayara Gomes, Vagner Ariedi Júnior, Itallo Dirceu, Maria

Cecília Totti, Camila Viana, Ingrid Nehmi de Oliveira e Willian Viana, por todo apoio nos trabalhos de campo, discussões técnicas e apoio nas dificuldades.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo recebimento de bolsa de estudo (Processo nº 149540/2018-3), recurso imprescindível para realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo apoio ao trabalho.

Unicamp e FEAGRI pela infraestrutura fornecida, aos funcionários que ajudaram nas análises de solos, Célia Panzarim e, em especial, Antônio Javarez Júnior.

Aos membros da banca examinadora, Dra. Marlene C. Alves, Dr. Fernando S. Franco, Dr. José Maria G. Ferraz e Dr. Luiz Octávio Ramos Filho.

A empresa Rizoma Agricultura Regenerativa e Fazenda da Toca por concederem espaço para realização da pesquisa, implantação e condução do experimento, além de recursos para realização de análises, hospedagem, alimentação da equipe e fornecimento de informações técnicas. Agradeço a toda a equipe da Rizoma pelo apoio, em especial ao Pedro Paulo Diniz, Osvaldo Viu Serrano Júnior, Ana Clara Rocha, Fernando Tersi, Matheus, Felipe Noronha e Paulo Rocha que ajudaram muito no início da pesquisa. Aos trabalhadores do campo que realizaram toda a manutenção do experimento e auxiliaram na pesquisa.

Aos alunos de bolsa trabalho, iniciação científica, ensino médio e graduação que ajudaram nas análises do laboratório.

Agradeço a todas as plantas e seres da natureza que estiveram a serviço neste trabalho e pela inspiração e conexão!

Muita gratidão a todos que contribuíram de alguma forma para este trabalho!

## EPÍGRAFE

“Sim, todo amor é sagrado  
E o fruto do trabalho  
É mais que sagrado  
Meu amor”

Beto Guedes

## RESUMO

O modelo agroindustrial adotado no Brasil nos últimos anos se baseia em práticas de cultivo intensivo do solo, monocultura, fertilizantes inorgânicos e controle químico de insetos e doenças, resultando em diversos impactos negativos. Diante deste cenário, é de fundamental importância a proposição de um modelo de desenvolvimento rural pautado na sustentabilidade. Os Sistemas Agroflorestais (SAF) se apresentam como modelo sustentável de produção, possibilitando o redesenho dos agroecossistemas, pautado na lógica dos processos ecológicos. A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a qualidade do solo, o desenvolvimento e a produtividade de citros em Sistemas Agroflorestais orgânicos sob diferentes densidades arbóreas. O estudo foi conduzido em condições de campo, nas dependências da Fazenda da Toca, localizada no município de Itirapina, estado de São Paulo, Brasil. O experimento foi baseado no delineamento de blocos casualizados, com quatro tratamentos e três repetições, somando 12 parcelas, com área útil de 4.960 m<sup>2</sup> cada e 59.520 m<sup>2</sup> total. A área experimental possui ainda uma bordadura de 25.580 m<sup>2</sup>, totalizando 85.100 m<sup>2</sup>. Os tratamentos definidos foram: T1 - Citros com densidade de 446 plantas ha<sup>-1</sup> (Citros 446); T2 - SAF citros com densidade de 713 plantas ha<sup>-1</sup> (SAF Citros 713); T3 - SAF citros com densidade de 780 plantas ha<sup>-1</sup> (SAF Citros 780) e T4 - SAF citros com densidade de 1.040 plantas ha<sup>-1</sup> (SAF Citros 1.040). As diferentes densidades dos sistemas agroflorestais foram realizadas por meio de consórcio dos citros com espécies arbóreas madeiráveis: Jequitibá, Ipê-felpudo, Peroba e Louro-pardo e espécies de serviço: Ingá, Eritrina, Farinha Seca, Eucalipto e Gliricídia. As variedades cítricas estudadas foram: Laranja Valência Americana, Laranja Rubi, Tangerina Cravo, Tangerina Murcote, Mexerica do Rio, Limão Cravo, Limão Siciliano e Limão caviar. Os Sistemas Agroflorestais T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780) apresentaram tendência de melhoria da qualidade do solo, com diferenças significativas relacionadas ao maior teor de carbono orgânico, estoque de carbono e porosidade total. Na média das variedades cítricas, houve maior crescimento das plantas no tratamento T3 (SAF Citros 780). A produtividade média por planta e por hectare das variedades estudadas não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. Não houve diferença significativa da mortalidade por Greening das variedades cítricas entre os tratamentos, com exceção da laranja rubi que apresentou diferença entre os tratamentos T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040), sendo este último menor.

**Palavras-chave:** Sistemas biodiversos, sombreamento, consórcios, qualidade do solo e produtividade citros.

## ABSTRACT

The agro-industrial model adopted in Brazil in recent years is based on intensive soil cultivation practices, monoculture, inorganic fertilizers and chemical control of insects and diseases, resulting in several negative impacts. Given this scenario, it is of fundamental importance to propose a model of rural development based on sustainability. Agroforestry Systems (SAF) are presented as a sustainable production model, enabling the redesign of agroecosystems, based on the logic of ecological processes. The present research aimed to evaluate the soil quality, the development and the productivity of citrus in organic Agroforestry Systems under different tree densities. The study was conducted under field conditions, on the premises of Fazenda da Toca, located in the municipality of Itirapina, state of São Paulo, Brazil. The experiment was based on a randomized block design, with four treatments and three replications, totaling 12 plots, with a useful area of 4,960 m<sup>2</sup> each and 59,520 m<sup>2</sup> total. The experimental area also has a border of 25,580 m<sup>2</sup>, totaling 85,100 m<sup>2</sup>. The treatments defined were: T1 - Citrus with a density of 446 plants ha<sup>-1</sup> (Citrus 446); T2 - AFS citrus with a density of 713 plants ha<sup>-1</sup> (SAF Citrus 713); T3 - AFS citrus with a density of 780 plants ha<sup>-1</sup> (SAF Citrus 780) and T4 - AFS citrus with a density of 1.040 plants ha<sup>-1</sup> (SAF Citrus 1.040). The different densities of the agroforestry systems were carried out by intercropping citrus with woody tree species: Jequitibá, Ipê-felpudo, Peroba and Louro-pardo and service species: Ingá, Eritrina, Farinha Seca, Eucalyptus and Gliricidia. The citrus varieties studied were: Orange Valencia American, Orange Ruby, Tangerine Rangpur, Tangerine Murcote, Tangerine Rio, Lemon-Rangpur, Lemon Sicilian and Lemon caviar. The Agroforestry Systems T2 (SAF Citrus 713) and T3 (SAF Citrus 780) showed a tendency to improve soil quality, with significant differences related to higher organic carbon content, carbon stock and total porosity. In the average of citrus varieties, there was greater plant growth in treatment T3 (SAF Citrus 780). The average productivity per plant and per hectare of the studied varieties did not present significant difference between treatments. There was no significant difference in mortality by Greening of citrus varieties between treatments, with the exception of ruby orange, which showed a difference between treatments T1 (Citrus 446) and T4 (SAF Citrus 1.040), the latter being lower.

**Keywords:** Biodiverse systems, shading, intercropping, soil quality, citrus productivity.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Mapa de localização da área experimental, em Itirapina, São Paulo, Brasil.....                                                                                                                                                                                                               | 41 |
| <b>Figura 2.</b> Precipitação e valores médios de temperatura da área experimental, em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                                                     | 42 |
| <b>Figura 3.</b> Imagem da área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil, representando os 4 tratamentos, 3 repetições e 12 parcelas. ....                                                                                                                                                                | 44 |
| <b>Figura 4.</b> Vistas dos Sistemas Agroflorestais com diferentes densidades arbóreas, em novembro de 2021, na área experimental, em Itirapina, São Paulo, Brasil. A = Vista do T1 (Citros 446); B = Vista do T2 (SAF Citros 713); C = Vista do T3 (SAF Citros 780); D = Vista do T4 (SAF Citros 1.040)..... | 45 |
| <b>Figura 5.</b> Croqui do tratamento T1 (Citros 446) na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                                                              | 47 |
| <b>Figura 6.</b> Croqui do tratamento T2 (SAF Citros 713) na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                                                          | 48 |
| <b>Figura 7.</b> Croqui do tratamento T3 (SAF Citros 780) na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                                                          | 48 |
| <b>Figura 8.</b> Croqui do tratamento T4 (SAF Citros 1.040) na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                                                        | 49 |
| <b>Figura 9.</b> Trincheira de coleta de solo em Sistema Agroflorestal de citros sob diferentes densidades arbóreas, em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                    | 50 |
| <b>Figura 10.</b> Sensor de umidade em Sistema Agroflorestal de citros sob diferentes densidades arbóreas, em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                              | 51 |
| <b>Figura 11.</b> Medidor eletrônico de compactação do solo em Sistema Agroflorestal de citros sob diferentes densidades arbóreas, em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                      | 52 |
| <b>Figura 12.</b> Imagem da área experimental na Fazenda da Toca, em Itirapina, São Paulo, Brasil, representando os 4 tratamentos, 3 repetições e 12 parcelas. ....                                                                                                                                           | 62 |
| <b>Figura 13.</b> Croqui do tratamento T1 (Citros 446), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                                                            | 64 |
| <b>Figura 14.</b> Croqui do tratamento T2 (SAF Citros 713), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                                                        | 65 |
| <b>Figura 15.</b> Croqui do tratamento T3 (SAF Citros 780), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                                                        | 65 |
| <b>Figura 16.</b> Croqui do tratamento T4 (SAF Citros 1.040), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.....                                                                                                                                                                                       | 66 |
| <b>Figura 17.</b> Teste de Tukey para o teor de água no solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nos anos 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                | 76 |
| <b>Figura 18.</b> Teste Tukey para resistência do solo à penetração (MPa) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nos anos 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                   | 78 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 19.</b> Gráfico de Intervalos para pH, MO, P, K, Ca, Mg, Al, H+Al, CTC, V%, S, Na, Mn, Cu, Zn e B, em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nos anos 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                             | 78  |
| <b>Figura 20.</b> Teste Tukey para o teor de matéria orgânica ( $\text{g dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nos anos 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                     | 80  |
| <b>Figura 21.</b> Teste Tukey para capacidade de troca catiônica ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nos anos 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                     | 84  |
| <b>Figura 22.</b> Teste Tukey para o estoque de carbono ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nos anos 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                          | 88  |
| <b>Figura 23.</b> Gráfico “Scree-plot” da ACP dos atributos químicos, físicos e estoque de carbono em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, mostrando autovalores maiores que um e variância explicada cumulativa pelo número de componentes principais. .... | 91  |
| <b>Figura 24.</b> Gráfico Biplot (CP1 e CP2) dos atributos físicos, químicos e estoque de carbono do solo em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                      | 93  |
| <b>Figura 25.</b> Gráfico Biplot (CP1 e CP3) dos atributos físicos, químicos do solo e estoque de carbono em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                      | 95  |
| <b>Figura 26.</b> Elipses de confiança de 95% para os vetores de médias das variáveis canônicas (CAN1 e CAN2) associados aos atributos físicos, químicos e estoque de carbono do solo, em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....         | 97  |
| <b>Figura 27.</b> Agrupamento de Tukey dos atributos físicos, químicos do solo e estoque de carbono em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                            | 98  |
| <b>Figura 28.</b> Imagem da área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil, representando os 4 tratamentos, 3 repetições e 12 parcelas. ....                                                                                                                                                            | 117 |
| <b>Figura 29.</b> Croqui do tratamento T1 (Citros 446), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                                                         | 119 |
| <b>Figura 30.</b> Croqui do tratamento T2 (SAF Citros 713), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                                                     | 119 |
| <b>Figura 31.</b> Croqui do tratamento T3 (SAF Citros 780), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                                                     | 120 |
| <b>Figura 32.</b> Croqui do tratamento T4 (SAF Citros 1.040), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                                                                   | 120 |
| <b>Figura 33.</b> Índice de vigor vegetativo das variedades cítricas sob Sistema Agroflorestal com diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                              | 123 |

|                                                                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 34.</b> Gráfico de intervalos para índice de vigor vegetativo (IVV) de variedades cítricas sob Sistema Agroflorestal com diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil..... | 125 |
| <b>Figura 35.</b> Teste de Tukey para índice de vigor vegetativo (IVV) de variedades cítricas sob Sistema Agroflorestal com diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.....        | 125 |
| <b>Figura 36.</b> Distribuição do índice de vigor vegetativo das espécies arbóreas de sombreamento em Sistema Agroflorestal, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                      | 126 |
| <b>Figura 37.</b> Teste de Tukey para produtividade (kg/planta) de variedades cítricas em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....               | 130 |
| <b>Figura 38.</b> Mortalidade das variedades cítricas por incidência de Greening em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                     | 131 |
| <b>Figura 39.</b> Teste de Tukey para mortalidade das variedades cítricas por incidência de Greening em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.....  | 134 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Caracterização física do solo antes da instalação do experimento, em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                        | 43 |
| <b>Tabela 2.</b> Espaçamento (Esp) e número de plantas (NP), por parcela, nos tratamentos do experimento, em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                 | 43 |
| <b>Tabela 3.</b> Número de plantas por parcela, tratamento e total, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                  | 46 |
| <b>Tabela 4.</b> Caracterização física do solo antes da instalação do experimento, em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                        | 60 |
| <b>Tabela 5.</b> Espaçamento (Esp) e número de plantas (NP), por parcela, nos tratamentos do experimento, em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                 | 61 |
| <b>Tabela 6.</b> Número de plantas por parcela, tratamento e total, no experimento em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                        | 63 |
| <b>Tabela 7.</b> Densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....             | 70 |
| <b>Tabela 8.</b> Macroporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....        | 72 |
| <b>Tabela 9.</b> Microporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....        | 73 |
| <b>Tabela 10.</b> Porosidade total ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....      | 74 |
| <b>Tabela 11.</b> Teor de água no solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....  | 75 |
| <b>Tabela 12.</b> Resistência do solo à penetração (MPa) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....               | 77 |
| <b>Tabela 13.</b> Teor de matéria orgânica ( $\text{g dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....      | 79 |
| <b>Tabela 14.</b> Teor de fósforo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....              | 81 |
| <b>Tabela 15.</b> Valor de magnésio ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. .... | 82 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabela 16.</b> Capacidade de troca catiônica ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.....                                                    | 83  |
| <b>Tabela 17.</b> Valor de zinco ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                              | 85  |
| <b>Tabela 18.</b> Teor de carbono orgânico ( $\text{g kg}^{-1}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.....                                                                      | 86  |
| <b>Tabela 19.</b> Estoque de carbono ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                          | 87  |
| <b>Tabela 20.</b> Estoque de carbono (EC) e incremento médio de carbono anual (IMCA) de um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                               | 89  |
| <b>Tabela 21.</b> Resumo dos componentes principais (CP1, CP2 e CP3) da análise multivariada dos atributos físicos, químicos e estoque de carbono em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. .... | 92  |
| <b>Tabela 22.</b> Coeficientes das variáveis canônicas (CAN1 e CAN2) associados aos atributos físicos, químicos e estoque de carbono em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.....                                                | 96  |
| <b>Tabela 23.</b> Caracterização física do solo antes da instalação na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.....                                                                                                                                                                  | 115 |
| <b>Tabela 24.</b> Espaçamento (Esp) e número de plantas (NP), por parcela, nos tratamentos do experimento, em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                               | 115 |
| <b>Tabela 25.</b> Número de plantas por parcela, tratamento e total do experimento realizado na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                                        | 117 |
| <b>Tabela 26.</b> Índice de vigor vegetativo (IVV) das variedades cítricas sob Sistema Agroflorestal com diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil..                                                                                                | 124 |
| <b>Tabela 27.</b> Índice de vigor vegetativo (IVV) das espécies arbóreas de sombreamento em Sistema Agroflorestal, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.....                                                                                                                   | 127 |
| <b>Tabela 28.</b> Teste de Tukey para radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA) em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                   | 128 |
| <b>Tabela 29.</b> Sombreamento em Sistemas Agroflorestais sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.....                                                                                                                                        | 128 |
| <b>Tabela 30.</b> Teste de Tukey para produtividade de variedades cítricas em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil..                                                                                                 | 129 |
| <b>Tabela 31.</b> Produtividade de variedades cítricas em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. ....                                                                                                                 | 130 |

|                                                                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabela 32.</b> Mortalidade por incidência de Greening das variedades cítricas em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil. .... | 132 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO, REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E METODOLOGIA GERAL                                                                                  | 19 |
| 1. INTRODUÇÃO                                                                                                                                      | 19 |
| 2. HIPÓTESE DO ESTUDO                                                                                                                              | 23 |
| 3. OBJETIVOS                                                                                                                                       | 23 |
| 3.1 Objetivo Geral                                                                                                                                 | 23 |
| 3.2 Objetivos Específicos                                                                                                                          | 23 |
| 4. ORGANIZAÇÃO DA TESE                                                                                                                             | 23 |
| 5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA                                                                                                                           | 25 |
| 5.1 Sistemas Agroflorestais                                                                                                                        | 25 |
| 5.2 Qualidade do solo                                                                                                                              | 27 |
| 5.3 Qualidade do solo em Sistemas Agroflorestais                                                                                                   | 29 |
| 5.4 Citricultura                                                                                                                                   | 32 |
| 5.5 Sombreamento na citricultura                                                                                                                   | 35 |
| 5.6 Citrus Huanglongbing (HLB ou Citrus Greening)                                                                                                  | 38 |
| 6. METODOLOGIA GERAL                                                                                                                               | 41 |
| 6.1 Localização e descrição da área de estudo                                                                                                      | 41 |
| 6.2 Delineamento experimental e tratamentos                                                                                                        | 44 |
| 6.3 Análises físicas do solo                                                                                                                       | 49 |
| 6.3.1 Análise granulométrica                                                                                                                       | 50 |
| 6.3.2 Densidade e porosidade do solo                                                                                                               | 50 |
| 6.3.3 Teor de água no solo e resistência do solo à penetração                                                                                      | 51 |
| 6.4 Análise química do solo                                                                                                                        | 52 |
| 6.5 Estoques de carbono orgânico do solo                                                                                                           | 52 |
| 6.6 Desenvolvimento vegetativo das plantas                                                                                                         | 53 |
| 6.7 Radiação solar fotossinteticamente ativa                                                                                                       | 54 |
| 6.8 Produtividade dos citros                                                                                                                       | 54 |
| 6.9 Mortalidade dos citros por HLB ou Greening                                                                                                     | 54 |
| 6.10 Análises estatísticas dos dados                                                                                                               | 54 |
| CAPÍTULO 2: QUALIDADE DO SOLO NA PRODUÇÃO DE CITROS EM SISTEMA AGROFLORESTAL ORGÂNICO SOB DIFERENTES DENSIDADES ARBÓREAS EM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO | 56 |
| 7. INTRODUÇÃO                                                                                                                                      | 58 |
| 8. MATERIAL E MÉTODOS                                                                                                                              | 60 |
| 8.1 Local de estudo                                                                                                                                | 60 |
| 8.2 Tratamentos                                                                                                                                    | 62 |
| 8.3 Atributos físicos do solo                                                                                                                      | 66 |
| 8.3.1 Granulometria                                                                                                                                | 66 |
| 8.3.2 Densidade e porosidade do solo                                                                                                               | 67 |
| 8.3.3 Teor de água no solo e resistência do solo à penetração                                                                                      | 67 |
| 8.4 Atributos químicos do solo                                                                                                                     | 67 |
| 8.5 Teores de carbono orgânico e estoques de carbono do solo                                                                                       | 68 |

|                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.6 Análises estatísticas                                                                                                               | 68  |
| 9. RESULTADOS                                                                                                                           | 69  |
| 9.1 Atributos físicos do solo                                                                                                           | 69  |
| 9.1.1 Densidade e porosidade do solo                                                                                                    | 69  |
| 9.1.2 Teor de água no solo e resistência do solo à penetração                                                                           | 74  |
| 9.2 Atributos químicos do solo                                                                                                          | 78  |
| 9.3 Teor de carbono orgânico e estoques de carbono do solo                                                                              | 85  |
| 9.4 Análise multivariada dos atributos químicos, físicos e estoque de carbono do solo                                                   | 90  |
| 10. DISCUSSÃO                                                                                                                           | 98  |
| 11. CONCLUSÕES                                                                                                                          | 109 |
| CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO, PRODUTIVIDADE E MORTALIDADE DE CITROS EM SISTEMA AGROFLORESTAL ORGÂNICO SOB DIFERENTES DENSIDADES ARBÓREAS | 110 |
| 12. INTRODUÇÃO                                                                                                                          | 112 |
| 13. MATERIAL E MÉTODOS                                                                                                                  | 114 |
| 13.1 Local de estudo                                                                                                                    | 114 |
| 13.2 Tratamentos                                                                                                                        | 116 |
| 13.3 Desenvolvimento vegetativo das plantas                                                                                             | 121 |
| 13.4 Radiação fotossinteticamente ativa (RFA)                                                                                           | 121 |
| 13.5 Produtividade dos citros                                                                                                           | 122 |
| 13.6 Incidência de Greening ou Huanglongbing (HLB)                                                                                      | 122 |
| 13.7 Análises estatísticas                                                                                                              | 122 |
| 14. RESULTADOS                                                                                                                          | 123 |
| 14.1 Desenvolvimento vegetativo dos citros                                                                                              | 123 |
| 14.2 Desenvolvimento vegetativo das plantas de sombreamento                                                                             | 126 |
| 14.3 Radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA)                                                                                     | 128 |
| 14.4 Produtividade dos citros                                                                                                           | 128 |
| 14.5 Incidência de Greening ou Huanglongbing (HLB)                                                                                      | 131 |
| 15. DISCUSSÃO                                                                                                                           | 134 |
| 16. CONCLUSÕES                                                                                                                          | 140 |
| 17. CONSIDERAÇÕES FINAIS                                                                                                                | 141 |
| 18. REFERÊNCIAS                                                                                                                         | 142 |

## **CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO, REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E METODOLOGIA GERAL**

### **1. INTRODUÇÃO**

O modelo agroindustrial adotado nos últimos 40 anos no Brasil e no mundo, considerado agricultura “moderna”, possui uma "espinha dorsal" que o sustenta por meio de seis práticas básicas: cultivo intensivo do solo, monocultivo, irrigação, aplicação de fertilizantes inorgânicos, controle químico de insetos e doenças e manipulação genética de plantas cultivadas, objetivando a maximização da produção e do lucro, desconsiderando a dinâmica natural dos ecossistemas e desenvolvendo técnicas que impactam negativamente o ambiente e a sociedade em curto, médio e longo prazo (GLIESSMAN, 2009; VILPOUX *et al.*, 2021).

Esse conjunto de práticas produz alimentos, porém, com diversas implicações ambientais, sociais e econômicas, incorrendo em situações danosas como a erosão do solo e o consequente assoreamento de cursos d'água, perda da fertilidade dos solos e da agrobiodiversidade, destruição de florestas, contaminação dos solos e água e dos trabalhadores rurais expostos a substâncias químicas, assim como dos consumidores destes alimentos (HURT, 2020). Nesse contexto, os sistemas agroindustriais mostram-se, frequentemente, com baixa ou nenhuma sustentabilidade (ALTIERI, 2012; JACOBI *et al.*, 2020).

O Brasil, uma das maiores potências agrícolas do planeta, também se destaca por estar entre os maiores consumidores mundiais de agrotóxicos. Em 2020, os agricultores brasileiros usaram 686 mil toneladas de agrotóxicos, enquanto em 2009 esse número era de 306 mil toneladas, (IBAMA, 2022). Por outro lado, no país, no período de 1999 a 2009, ocorreram 1.876 casos de morte por intoxicação com agrotóxicos registrados pelo SINITOX (Sistema Nacional de Informações Toxicológicas), ou seja, cerca de 170 mortes por ano (BOMBARDI, 2017).

Atualmente, o Brasil é responsável por cerca de 8% do consumo global de fertilizantes, sendo o quarto país do mundo, atrás apenas de China, Índia e Estados Unidos (SAE, 2020). As entregas de fertilizantes ao consumidor final no Brasil, em 2021, totalizaram 42,5 milhões de toneladas de produtos, representando expansão de 14,2% em comparação a igual período do ano anterior (IEA, 2021).

Um dos principais agronegócios do Brasil é a citricultura, sendo os cultivos de laranjeiras, tangerineiras e limoeiros realizados por milhares de produtores rurais em todas as unidades da federação, cujos frutos fazem parte da dieta alimentar de consumidores de todas as

classes sociais (SULZBACH *et al.*, 2017). Em todo o mundo, 146.866.263 toneladas de citros são produzidas por ano, sendo a China o maior produtor mundial de citros, com 38.392.847 toneladas de volume de produção por ano e o Brasil ocupa o segundo lugar, com 19.591.623 toneladas (FAO, 2021).

Apesar do impacto econômico da citricultura no Brasil e no mundo, há também impactos ambientais negativos deste setor. Usualmente, a cultura dos citros é realizada em monocultivo e a pleno sol. A falta de biodiversidade desses agroecossistemas gera desequilíbrio ambiental e, com isso, há um aumento na incidência de insetos e doenças, controlados, frequentemente, com o uso intensivo de agrotóxicos (MORAIS *et al.*, 2016; ANDRADE *et al.*, 2019), causando degradação e contaminação dos recursos naturais, resultando em um sistema agrícola insustentável.

Conforme o Relatório do Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos (PARA), período de 2017/2018, em uma análise de 382 amostras de laranja foram encontrados 242 ingredientes ativos. Concentrações iguais ou inferiores ao limite máximo de resíduo (LMR) foram encontrados em 173 amostras e concentrações acima do LMR foram detectados em 5 amostras e agrotóxicos não autorizados para a cultura de laranja foram encontrados em 48 amostras, sendo que as substâncias mais detectadas nesta situação foram carbofurano, 2,4-D e mepiquate (ANVISA, 2019).

Estudando os resíduos, distribuições e riscos de exposição alimentar de 16 inseticidas e acaricidas mais comumente usados em nove cultivares cítricas, produzidas em 12 províncias da China, Li *et al.* (2022), verificaram que os níveis de oito pesticidas excederam seus limites máximos de resíduos e mais de 50% das amostras continham múltiplos resíduos e até 12 pesticidas foram detectados em amostras únicas. Os autores concluíram ainda que, os riscos agudos de triazophos, na maioria das cultivares de citros para toda a população, bem como bifenthrin para crianças, estavam além dos níveis de segurança e representavam um potencial risco agudo para a saúde.

Diante deste cenário, é de fundamental importância a proposição e adoção de um modelo de desenvolvimento rural pautado na sustentabilidade em seu aspecto mais amplo, envolvendo as dimensões econômica, social e ambiental (SCHREEFEL *et al.*, 2020). Para tanto, é necessária uma profunda mudança, que passa por níveis de transição para uma agricultura mais sustentável. A agroecologia se coloca como base teórico metodológica para a construção de modos de agricultura mais sustentáveis e se propõe a apoiar os processos de

transição da agricultura industrializada em direção ao desenvolvimento rural sustentável (CAPORAL; COSTABEBER, 2004; CARLISLE *et al.*, 2019; TITTONELL, 2020).

A transição agroecológica pode ser definida como o processo gradual de mudança por meio do tempo nas formas de manejo e gestão dos agroecossistemas, tendo como meta a passagem de um sistema de produção “convencional”, baseado em agroquímicos, a outro sistema que incorpore princípios, métodos e tecnologias de base ecológica (COSTABEBER, 1998). Guzmán *et al.* (2000) apontam que, muitas vezes a transição estaciona na fase de substituição dos insumos químicos pelos de base ecológica e nunca atinge o redesenho do agroecossistema, que se baseia em processos ecológicos, de forma análoga aos sistemas naturais. Segundo o autor, isto se deve aos altos custos exigidos (novas máquinas e instalações), mas também porque passar de monocultura para policultura requer novos conhecimentos de gestão.

Nesse sentido, os Sistemas Agroflorestais (SAF) se apresentam como um caminho para a transição agroecológica, possibilitando o redesenho dos agroecossistemas, pautado na lógica dos processos ecológicos e sociais (SACHET *et al.*, 2021). “Sistema Agroflorestral é o nome coletivo para sistemas de uso da terra e tecnologias em que plantas lenhosas perenes (árvores, arbustos, palmeiras, bambus, entre outras) são deliberadamente usadas na mesma unidade de manejo de culturas agrícolas e/ou animais, ambas na forma de arranjos espaciais ou sequências temporais. Nos SAF existem ambas as interações ecológicas e econômicas entre os diferentes componentes” (NAIR, 1984).

Os SAF vêm sendo desenvolvidos em todo o mundo, há milênios, principalmente pelas populações tradicionais, proporcionando sustento de pelo menos 1,2 bilhão de pessoas (NAIR, 1984). Somente há 50 anos, no entanto, a ciência tem se dedicado a estudar esses sistemas, seus benefícios e custos e as complexas interações entre os componentes vegetais, animais e humanos (MICCOLIS *et al.*, 2016).

Apesar dos benefícios sociais, econômicos e ambientais dos sistemas produtivos agroecológicos, que promovem a conservação da biodiversidade, a preservação dos recursos naturais e a redução das contaminações químicas por agrotóxicos, verifica-se que esse modelo agrícola ainda é pouco difundido e implementado, devido à falta de incentivos financeiros, políticas públicas, assistência técnica e pesquisas científicas que demonstrem sua viabilidade e contribuam para o seu desenvolvimento (ALVARES, 2018; SOLLEN-NORRLIN *et al.*, 2020).

Em um trabalho sobre o desenvolvimento e produção de citros em Sistema Agroflorestral, realizado no Rio Grande do Sul, Gonzatto (2009), concluiu que o rendimento de

frutos cítricos neste sistema é maior em laranjeira ‘Valência’ e similar em ‘Monte Parnaso’, na média das safras, em relação ao cultivo em pleno sol e que a evolução da intensidade e severidade dos sintomas de pinta-preta (*Guignardia citricarpa* Kiely) em frutos, ao longo de sua maturação, é atenuada pelo cultivo em Sistema Agroflorestal, demonstrando que o citros tem potencial para ser cultivado sob sombreamento.

A presença de espécies arbóreas dentro dos Sistemas Agroflorestais pode exercer uma ação reguladora sobre o microclima (KUMAR, 2016). Os efeitos das espécies arbóreas na temperatura do ar e do solo são fatores importantes no planejamento dos SAF, uma vez que as inter-relações de fotossíntese e respiração dependem fortemente da temperatura (MARIN *et al.*, 2006). A resposta fisiológica dos citros ao ambiente que os circundam é essencial para aumentar a produção de frutos e o desenvolvimento das plantas. Em um estudo realizado com plantas cítricas em condições controladas, avaliando a fotossíntese das folhas maduras e jovens, o crescimento das plantas e o status de carboidratos, os autores comprovaram que as plantas cítricas apresentam um balanço positivo no metabolismo do carbono, como um mecanismo de aclimação às mudanças de temperatura, com plantas apresentando aumento da fotossíntese (RIBEIRO *et al.*, 2012).

A literatura nacional e internacional apresenta poucos trabalhos sobre sombreamento natural de citros, com diferentes densidades arbóreas, e sua interferência na qualidade do solo, desenvolvimento e produtividade das plantas. Considerando a importância econômica mundial dos citros e o seu atual sistema de cultivo, baseado no uso intensivo de agroquímicos, que gera impactos ambientais, prejuízo à saúde humana e implica em alto custo de produção, verifica-se a necessidade de buscar o desenvolvimento de modelos agrícolas mais sustentáveis, que garantam maior equilíbrio do sistema e a redução, ou até mesmo eliminação de insumos químicos.

## **2. HIPÓTESE DO ESTUDO**

Citros cultivado em Sistema Agroflorestal, com densidade arbórea entre 713 e 780 plantas ha<sup>-1</sup>, melhora a qualidade do solo, o desenvolvimento e produtividade das plantas (Laranja Valência e Rubi, Tangerina Cravo e Murcote, Mexerica do Rio, Limão Cravo, Siciliano e Caviar).

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo Geral**

Avaliar a qualidade do solo, o desenvolvimento e a produtividade de citros em Sistemas Agroflorestais orgânicos sob diferentes densidades arbóreas.

### **3.2 Objetivos Específicos**

Para o cumprimento do objetivo geral, são apresentados a seguir os objetivos específicos:

I. Avaliar os atributos químicos (pH, fósforo disponível, cátions trocáveis, acidez potencial, capacidade de troca de cátions, saturação de bases, teor de matéria orgânica e micronutrientes), físicos (densidade do solo, granulometria do solo, porosidade do solo, resistência do solo à penetração e teor de água no solo) e estoque de carbono no solo nos diferentes tratamentos.

II. Determinar aspectos morfológicos (altura, diâmetro do caule e da copa) de oito variedades de citros e de nove espécies florestais nos diferentes tratamentos.

III. Aferir a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) nos diferentes tratamentos.

IV. Avaliar a produtividade e a incidência de Greening ou HLB de variedades de citros nos diferentes tratamentos.

## **4. ORGANIZAÇÃO DA TESE**

O primeiro capítulo foi desenvolvido com o propósito de trazer uma visão geral do tema de interesse, por meio da introdução, definição da hipótese, objetivo geral e específicos, revisão bibliográfica com os tópicos: sistemas agroflorestais, qualidade do solo, qualidade do solo em sistemas agroflorestais, citricultura e sombreamento na citricultura, Greening ou Huanglongbing (HLB) e metodologia geral para os procedimentos realizados em campo e análises em laboratório.

Os resultados do trabalho são apresentados no segundo e terceiro capítulo, em estrutura de artigos científicos, sendo o segundo correspondente a “Qualidade do solo na produção de citros em Sistema Agroflorestal orgânico sob diferentes densidades arbóreas em Neossolo Quartzarênico”, o terceiro sobre “Desenvolvimento, produtividade e mortalidade de citros em Sistema Agroflorestal orgânico sob diferentes densidades arbóreas”.

## 5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 5.1 Sistemas Agroflorestais

A agricultura convencional demonstra cada vez mais sua insustentabilidade, resultando em altos custos de produção, com o consumo elevado de adubos químicos e agrotóxicos, causando degradação ambiental, como erosão do solo, contaminação da água e dos alimentos, com prejuízos até mesmo para a saúde humana. Assim, é premente o desenvolvimento de um novo modelo de agricultura que se baseie na sustentabilidade. Os Sistemas Agroflorestais (SAF), se apresentam como um caminho para a sustentabilidade, conciliando a produção agrícola e a conservação ambiental, por meio da restauração florestal.

Mudanças na paisagem estão ocorrendo em muitos países, tanto nas zonas tropicais quanto temperadas. Durante a década de 1990, 38% dos países do mundo experimentaram aumentos na cobertura florestal, particularmente na Europa, América do Norte e leste e sul da Ásia. Preocupações sobre a disponibilidade e o custo dos recursos madeireiros, a crescente conscientização sobre as questões ambientais e as oportunidades de agroflorestamento para enfrentar melhor a insegurança alimentar, aumentaram a expansão do plantio de árvores em fazendas em muitos países tropicais (GONÇALVES *et al.*, 2021). Há, no entanto, vários países, com abundantes recursos florestais, como o Brasil e a Indonésia, onde o desmatamento ainda continua (GARRITY, 2012; SILVA JUNIOR *et al.*, 2021).

Para Bene *et al.* (1977), em uma das definições mais antigas, SAF é o “Sistema de manejo sustentável da terra que busca aumentar a produção de forma geral, combinando culturas agrícolas com árvores e plantas da floresta e/ou animais simultâneos ou sequencialmente e aplica práticas de gestão que são compatíveis com os padrões culturais da população local”. Na definição de Sistemas Agroflorestais adotada na legislação brasileira, SAF são: “Sistemas de uso e ocupação do solo em que plantas lenhosas perenes são manejadas em associação com plantas herbáceas, arbustivas, arbóreas, culturas agrícolas e forrageiras em uma mesma unidade de manejo, de acordo com arranjo espacial e temporal, com diversidade de espécies nativas e interações entre estes componentes” (MMA, 2009).

Há diversos tipos de SAF, desde sistemas simplificados com poucas espécies e baixa intensidade de manejo até sistemas altamente complexos, com alta biodiversidade e intensidade de manejo e, entre esses, vários tipos intermediários (LORENZ; LAL, 2018). Para cada um deles existem denominações distintas que variam de acordo com os principais produtos gerados em cada sistema (MICOOLIS *et al.*, 2016). Os sistemas mais diversificados e similares aos ecossistemas florestais naturais são conhecidos por agroflorestas sucessionais ou

biodiversas, caracterizadas por alta diversidade de espécies e cujo manejo baseia-se na sucessão natural das espécies (GOTSCH, 1992; PENEIREIRO, 1999; HOFFMANN, 2013; VIÉGAS *et al.*, 2019).

No SAF a energia e a matéria contida nos vegetais servem de alimento para os organismos do solo. Ao utilizarem essa energia e matéria e excretando resíduos, os organismos fazem movimentar esse fluxo e, assim, o Sistema Agroflorestal se mantém e evolui, tornando-se cada vez menos dependente de insumos externos ao longo do tempo. A estrutura multiestratificada de raízes, a elevada densidade de plantas, a poda frequente e a disposição do material podado na superfície, promovem condições adequadas para o incremento da matéria orgânica no solo agroflorestal. Além da importância como reservatório de nutrientes e de seu papel na sua ciclagem, o SAF cumpre a função fundamental de ser fornecedor de energia e matéria para toda a vida do solo, transformando gradativamente o ecossistema (STEENBOCK; VEZZANI, 2013; MATOS *et al.*, 2020).

O papel dos Sistemas Agroflorestais como estratégia de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, ganhou considerável importância na última década após a percepção da capacidade destes sistemas em capturar dióxido de carbono atmosférico (CO<sub>2</sub>) e armazenar carbono (C) em partes das plantas e no solo (KIM *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2022). Sistemas Agroflorestais têm atraído atenção especial a esse respeito, tendo em vista suas vantagens com relação ao grande volume de biomassa formada acima do solo e os sistemas radiculares profundos das árvores (NAIR, 2012; SARKAR; DAS, 2020).

Os Sistemas Agroflorestais podem oferecer muitos serviços ecossistêmicos, por exemplo, absorção de carbono e mitigação do aquecimento global, conservação da biodiversidade, controles biológicos e redução da aplicação de agrotóxicos, controle da erosão, fixação biológica de nitrogênio e ciclagem de nutrientes, reduzindo a dependência de fertilizantes industriais. A maioria de seus serviços está relacionada diretamente a mudanças no solo, como o aumento de carbono, a porosidade do solo e o fluxo de nutrientes (COELHO, 2017; CHERUBIN *et al.*, 2019; SCHMIDT *et al.*, 2021; LIMA *et al.*, 2022).

Além das vantagens ecológicas e produtivas dos SAF, Farrell e Altieri (2002), descrevem uma série de benefícios socioeconômicos das agroflorestas como: a) eficiência ecológica da produção total por unidade de terra, que pode ser incrementada; b) a inclusão de cultivares agrícolas normalmente resulta em maior produtividade de árvores e menores custos com o manejo florestal, além de promover maior diversidade de produtos; c) os produtos florestais também podem ser obtidos por todo o ano, oferecendo empregos permanentes; d)

alguns produtos florestais podem ser obtidos com baixa atividade de manejo, dando a eles a função de reserva para períodos nos quais houver falhas nos cultivos agrícolas; e) devido à produção diversificada, pode-se obter distribuição dos riscos, uma vez que esses produtos são afetados de modo diferenciado por condições desfavoráveis; e f) a produção pode ser direcionada para autossuficiência ou para o mercado.

Os Sistemas Agroflorestais possuem potencial de gerar trabalho e renda tanto para agricultores familiares como para agricultura em larga escala (REIS *et al.*, 2020). Segundo o Censo Agropecuário de 2021 (IBGE, 2021), a agricultura familiar continua representando o maior contingente (77%) dos estabelecimentos agrícolas do país, mas, por serem de pequeno porte, ocupam uma área menor, 80,89 milhões de hectares, o equivalente a 23% da área agrícola total, porém com participação significativa nos alimentos que vão para a mesa dos brasileiros. Assim, há grande potencial para produção de alimentos saudáveis em Sistemas Agroflorestais em diferentes setores agrícolas.

Considerando a importância dos SAF na proposição de uma agricultura sustentável é necessário aprofundar as pesquisas sobre esse sistema de manejo, de forma a demonstrar sua viabilidade econômica, ambiental e social.

## 5.2 Qualidade do solo

O manejo do solo interfere diretamente na sua qualidade, demonstrando que práticas conservacionistas, como plantio em nível, cobertura do solo e aporte de matéria orgânica tendem a beneficiá-la, assim como práticas não conservacionistas, como mecanização intensa e falta de cobertura morta, tendem a prejudicá-la.

Segundo Simon *et al.* (2022), as publicações que mencionam o termo qualidade do solo no Brasil têm crescido substancialmente nos últimos sete anos. No entanto, muito pouco (menos de 10%) desses estudos se concentraram na avaliação da qualidade do solo, incluindo uma avaliação abrangente dos atributos químicos, físicos e indicadores biológicos de forma integrada. A maioria dos estudos (mais de 90%) apenas abordou atributos específicos do solo, ou processos, e incluiu o termo qualidade do solo em um contexto amplo, não avaliando verdadeiramente a qualidade do solo.

As pesquisas realizadas sobre manejo dos solos, até a década de 1990, tinham como foco o controle da erosão e a produtividade, fatores influenciados pela segurança alimentar e qualidade de vida (KARLEN *et al.*, 1992). No entanto, as necessidades humanas resultaram em degradação e poluição ambiental, com consequente perda da capacidade produtiva dos solos,

aliadas à negligência e imperícia nos manejos realizados (SILVEIRA, 2011; RICKSON *et al.*, 2015; NUNES *et al.*, 2020).

Os números alarmantes de áreas degradadas física e quimicamente, contaminadas por agroquímicos e, as perspectivas catastróficas fizeram Lal e Pierce (1991) instigar a comunidade científica a buscar sistemas de manejo inovadores, capazes de balancear o requerimento do solo e das culturas. “A ênfase não está em maximizar a produção, mas sim em otimizar o uso do recurso e sustentar produtividade por um longo período”, alertaram eles.

É neste contexto que são ampliados os estudos sobre Qualidade do Solo (QS), advindos da preocupação dos cientistas quanto às práticas convencionais da agricultura, indicando que manejos mais ecológicos e considerados mais sustentáveis deveriam ser resgatados, assim como metodologias para identificar e monitorar a qualidade ou saúde dos solos (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009; YLAGAN *et al.*, 2021).

Embora existam inúmeras definições para qualidade do solo, a maioria delas converge para o estabelecimento de índices qualitativos e quantitativos, tal como se observa para a qualidade do ar e das águas (SIMON *et al.*, 2022). A literatura sugere para a criação de tais índices a observação de alguns critérios que possibilitem o monitoramento do solo, dentre os quais se destacam a integração de atributos biológicos, físicos e químicos e acessibilidade de uso, desde cientistas e instituições governamentais até agricultores (RIBEIRO *et al.*, 2014; SIMON *et al.*, 2022).

Conforme Vezzani (2001), o sistema solo na produção agrícola é o resultado de uma rede de relações não lineares entre os minerais, as plantas e os organismos edáficos conectados com o ambiente. Os fluxos que passam pelo sistema solo são dirigidos pelo fluxo de compostos orgânicos, constituído pela matéria vegetal adicionada pelas culturas e transformada pela biota edáfica, resultando na produção de uma sequência de compostos orgânicos intermediários. Os compostos orgânicos que entram no sistema interagem com os demais componentes e promovem a formação dos agregados do solo, seguindo uma sequência de eventos no tempo, que resulta na formação de estruturas numa hierarquia de tamanho e complexidade, caracterizando os diferentes níveis de ordem do sistema.

Além de aumentar a biodiversidade, o Sistema Agroflorestal pode contribuir para a promoção e manutenção da qualidade do solo (TAVARES *et al.*, 2018). A presença de árvores nos sistemas agrícolas auxilia no controle da erosão e fornece aporte contínuo de matéria orgânica ao solo (SOLLEN-NORRLIN *et al.*, 2020). Em agroecossistemas tropicais, a qualidade do solo depende em grande parte da biomassa vegetal (JANDL *et al.*, 2014;

MARÇAL *et al.*, 2022; SIMON *et al.*, 2022) e a permanência da serapilheira, que proporcionam proteção ao solo e substratos para corpos edáficos, auxiliando na melhoria da agregação do solo, retenção de água e ciclagem de nutrientes (NOTARO *et al.*, 2014; MARSDEN *et al.*, 2020).

O manejo intensivo dos sistemas agrícolas, com a utilização de maquinários pesados no preparo, implantação, manejo e colheita das culturas, promove alterações no solo, nos seus atributos físico-hídricos, prejudicando o crescimento vegetal (KOPITKE *et al.*, 2019). Essas alterações provocadas pelo manejo agrícola ficam nítidas quando comparadas com o estado do solo sob vegetação natural (SANTOS *et al.*, 2011; GOMES *et al.*, 2019; PAGE-DUMROESE *et al.*, 2021).

Segundo o relatório "Status of the World's Soil Resources" da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), 33% dos solos do mundo estão degradados, apresentando erosão, salinização, compactação, acidificação e contaminação. No Brasil os maiores problemas estão relacionados a erosão, compactação, perda de carbono orgânico e desequilíbrio de nutrientes. A erosão elimina 25 a 40 bilhões de toneladas de solo por ano, reduzindo significativamente a produtividade das culturas e capacidade de armazenar carbono, nutrientes e água (FAO; ITPS, 2015).

Apesar das extensas pesquisas com preparos convencionais de solo, ainda há poucas pesquisas sobre os efeitos dos SAF nos solos, principalmente os tropicais. Assim, pesquisas sobre sistemas de manejo mais sustentáveis e sua interferência na qualidade dos solos devem ser realizadas, de forma a comprovar os impactos positivos destes sistemas.

### **5.3 Qualidade do solo em Sistemas Agroflorestais**

Os Sistemas Agroflorestais podem impactar de forma substancial a qualidade do solo interferindo nos atributos químicos, físicos e biológicos por meio da ciclagem de nutrientes, acúmulo de matéria orgânica, aumento da porosidade do solo e da atividade biológica. Estudos mais profundos destas interferências, principalmente em condições tropicais, precisam ser realizados para comprovar cientificamente estes resultados.

As práticas agroflorestais também mostraram evidências significativas de seu potencial para melhorar a qualidade do solo, além de fornecer serviços ecossistêmicos (TORRALBA *et al.*, 2016; DOLLINGER; JOSE, 2018; MATOS *et al.*, 2020). Existem inúmeros serviços ecossistêmicos potenciais que os Sistemas Agroflorestais fornecem, incluindo melhoria da qualidade da água, aumento da biodiversidade, redução da erosão do

solo, sequestro de carbono e mitigação das mudanças climáticas (JOSE, 2009; KIM *et al.*, 2016, GURMESSA *et al.*, 2021; LIMA *et al.*, 2022). Os benefícios da qualidade do solo das práticas de SAF incluem maior fertilidade do solo (DOLLINGER; JOSE, 2018; GOMES *et al.*, 2019; SCHMIDT *et al.*, 2021), armazenamento de carbono orgânico do solo e aumento do estoque de carbono (LORENZ; LAL, 2014; SARKAR; DAS, 2020; MARÇAL *et al.*, 2021; EDDY; YANG, 2022), estrutura do solo (GELAW *et al.*, 2015), conservação da biodiversidade e diversidade de produção (JOSE, 2009).

Um estudo realizado na Índia demonstrou que um Sistema Agroflorestal, baseado em álamos (*Populus alba*), melhorou a agregação do solo por meio do aumento da quantidade de matéria orgânica na forma de biomassa foliar. As amostras de solo superficial e subsuperficial de sítios agroflorestais e não agroflorestais adjacentes, com diferentes anos de plantio de álamos (1, 3 e 6 anos) e texturas de solos variadas, foram analisadas quanto ao carbono orgânico do solo, seu sequestro e agregado. O carbono orgânico médio no solo aumentou de 0,36% na cultura solteira para 0,66% nos solos agroflorestais. Os solos sob SAF apresentaram de 2,9 a 4,8 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono orgânico no solo do que na lavoura solteira. O diâmetro médio ponderado dos agregados do solo (DMP) aumentou em 3,2, 7,3 e 13,3 vezes nos solos com 1, 3 e 6 anos de cultivo, respectivamente, em relação ao cultivo solteiro (GUPTA *et al.*, 2009).

Conforme Cherubin *et al.* (2019), em uma avaliação pioneira da qualidade física do solo em três usos típicos da terra (floresta, pastagem e SAF), usando o método de Avaliação Visual de Estrutura do Solo (VESS), no noroeste da Amazônia colombiana, verificaram que a conversão da floresta amazônica para pastagem de baixo insumo degradou intensamente a qualidade física do solo. No entanto, a adoção do SAF melhora a qualidade física do solo em áreas anteriormente ocupadas com pastagens, indicando maior potencial de recuperação do solo em sistemas mais diversificados.

No Estado do Piauí, Lima *et al.* (2011), avaliaram as mudanças nos atributos químicos, estoque de carbono (COT) e nitrogênio (NT), de um ARGISSOLO VERMELO-AMARELO, sob Sistemas Agroflorestais com seis (SAF6) e dez anos (SAF10); sistema com base ecológica com três anos (SE3); agricultura de corte e queima (ACQ) e floresta nativa (FN). Os resultados demonstraram que o teor de fósforo no SAF10 (12,27 mg dm<sup>-3</sup>), no período seco, foi seis a sete vezes maior do que ACQ e FN, respectivamente. Os maiores estoques de COT e NT foram observados no período seco, respectivamente, no SAF10 (48,54 Mg ha<sup>-1</sup> e 4,43 Mg ha<sup>-1</sup>) e SAF6 (43,30 Mg ha<sup>-1</sup> e 3,45 Mg ha<sup>-1</sup>), respectivamente. Os SAF melhoraram os atributos

químicos do solo em comparação as áreas de agricultura de corte e queima (ACQ) e o sistema com base ecológica (SE3). O aumento nos estoques de carbono orgânico e nitrogênio total nos SAF mostra a eficiência do manejo agroflorestal para a melhoria da qualidade do solo.

A macroporosidade acima de  $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  indica boa capacidade de aeração, pois é uma medida da taxa de difusão de oxigênio no solo, que atende à demanda respiratória das raízes e ao adequado crescimento da atividade de microrganismos (LIMA *et al.*, 2007). Em um estudo realizado por Bezerra (2018), na região de Campinas-SP, onde comparou cinco áreas de SAF com a mesma idade, porém, com solos diferentes, verificou-se baixa macroporosidade em três áreas de SAF, onde o solo possuía qualidade inferior e nas outras duas áreas de SAF, com melhor qualidade do solo, a macroporosidade foi de 0,15 e  $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente, na camada 0,00-0,10 m, indicando boa aeração do solo nestas áreas.

Na quantificação dos efeitos dos Sistemas Agroflorestais, com diferentes tempos de adoção, em comparação com agricultura de corte e queima, sobre os atributos químicos de um ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO, em áreas de cerrado do Estado do Piauí, Iwata *et al.* (2012), verificaram nos solos sob SAF, em todas as camadas avaliadas, redução dos teores de  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$  e aumento do pH, dos teores de nutrientes e do carbono orgânico total em relação aos demais sistemas. Os Sistemas Agroflorestais garantiram melhoria da qualidade química do solo em áreas de cerrado no Estado do Piauí.

Na avaliação de atributos físicos, microbiológicos e conteúdo de carbono orgânico de dois sistemas de manejo agroflorestais, em Amambai-MS, esses sistemas foram comparados a outros sistemas de produção (erva em sistema silvicultural e lavoura com soja), além de uma área sob vegetação natural (mata), como referência da condição original do solo. Dentre os sistemas avaliados, uma das áreas de SAF apresentou os índices de qualidade do solo mais próximos à área de vegetação nativa. A área de lavoura foi o ambiente mais afetado quanto à qualidade do solo, indicando tendências de degradação ambiental com o uso continuado do monocultivo. Por outro lado, a diversificação das espécies nos SAF possibilitou condições mais favoráveis para a melhoria da qualidade do solo, quando comparados aos sistemas sob monocultivo (PEZARICO *et al.*, 2013).

Conforme Junqueira *et al.* (2013), em estudo realizado no Assentamento Sepé-Tiarajú, localizado na região canavieira de Ribeirão Preto, sobre os efeitos dos SAF na qualidade do solo, por meio de 10 indicadores qualitativos, os resultados mostraram que os SAF contribuíram para a descompactação do solo, controle de erosão, aumento de retenção de água no solo, aumento da ocorrência de plantas indicadoras de solos de boa qualidade, aumento da

ocorrência de minhocas, insetos e outros organismos no solo e diminuição do ataque de pragas e doenças.

Um estudo realizado em Itirapina-SP, com o objetivo de avaliar a influência de SAF, desenvolvidos para produção em larga escala, na estrutura do solo e estoque de carbono, comparativamente a uma área de pasto e um fragmento florestal em processo de regeneração natural como referência, demonstrou que os SAF foram eficientes em melhorar os atributos químicos e físicos que refletem a qualidade do solo, especialmente nas camadas mais superficiais nas leiras de plantio, superando o processo natural de regeneração. Concluindo que, os Sistemas Agroflorestais, desenvolvidos tanto para a fruticultura como pecuária, foram mais eficientes em estocar carbono no solo, do que a área de pastagem e do fragmento florestal em regeneração natural estudados (MARÇAL *et al.*, 2022).

Segundo Atangana *et al.* (2014), as árvores contribuem para a produtividade em agroflorestas por meio da fertilização e conservação do solo. A contribuição da árvore para a fertilização se dá pela fixação simbiótica de nitrogênio, rotatividade de raízes, ciclagem de nutrientes e seu envolvimento na formação da camada de húmus. A manutenção dos atributos físicos do solo é realizada por meio do controle da erosão e da estabilização do solo pelas raízes.

Em estudo realizado por Nyaga *et al.* (2017) sobre o manejo e o efeito espacial de seis espécies de árvores (*Eucalyptus spp.*, *Sesbania sesban*, *Grevillea robusta*, *Calliandra calothyrsus*, *Markhamia lutea* e *Croton macrostachyus*) na disponibilidade de água e desempenho de culturas em campos de milho, de pequenos agricultores do Quênia, verificaram que produção de milho, sob as espécies arbóreas, mostrou diferenças significativas com as leguminosas (*Calliandra calothyrsus* e *Sesbania sesban*), registrando a maior quantidade de peso de grãos.

Percebe-se, com os estudos apresentados, como os Sistemas Agroflorestais apresentam influência positiva na qualidade do solo, interferindo nos atributos físicos, químicos e biológicos e, conseqüentemente, na produtividade das plantas. No entanto, outras pesquisas necessitam ser realizadas, a fim de demonstrar os efeitos de diferentes sistemas de manejos agroflorestais e variadas culturas na qualidade do solo.

#### 5.4 Citricultura

O Brasil lidera o ranking mundial de produção de laranjas, sendo também o maior exportador do seu suco, detendo 75% das exportações mundiais. Na safra 2020/21, o país foi responsável por 32,8% da produção mundial da fruta e por 62% do volume global de suco de

laranja. A atividade é concentrada no Estado de São Paulo que detém 63,1% da área cultivada com laranja no país (USDA, 2021). Em 2021, a área de pomares das laranjas no Brasil foi de 574.563 hectares e a safra foi de 16,70 milhões de toneladas (IBGE, 2021).

Outro setor que têm adquirido destaque no mercado citrícola é o de produção de óleos essenciais, os quais podem ser extraídos da casca de frutos maduros, neste caso sendo subproduto da indústria de sucos e de frutos verdes, quando oriundos do raleio especialmente de tangerineiras (AMORIM *et al.*, 2016). Neste mercado, o Brasil encontra-se entre os principais fornecedores mundiais, ao lado da Índia, China e Indonésia (ZULIAN *et al.*, 2013).

Segundo dados do Caged (Cadastro Geral de Empregados e Desempregados) compilados pela Associação Brasileira dos Exportadores de Citros, a cultura cítrica continua sendo uma das principais culturas geradoras de empregos no país. O setor gerou um total de 10.554 novos empregos de julho a setembro de 2020. Os pomares de laranjeiras detêm uma participação importante no total de empregos gerados no país, respondendo por 8,89%. Do total de empregos gerados pela citricultura, 86% estão no Estado de São Paulo, com um total de 9.163 admissões. Isso significa que dos 63.547 empregos gerados pela agropecuária paulista entre julho e setembro de 2020, a produção de laranja representou 14,42% (CITRUSBR, 2021).

Apesar do impacto econômico da citricultura no Brasil e no mundo, estimativas de uso de agrotóxicos em pomares de laranja na Flórida (EUA), em 2005, demonstram que, em 2002-2003, o uso de agrotóxicos em pomares de laranja incluía herbicidas (50% do total), inseticidas (29%) e fungicidas (21%). Herbicidas, inseticidas e fungicidas foram aplicados em 95, 91 e 61%, respectivamente, dos pomares de laranja da Flórida em 2002-2003 (USDA, 2004).

Em um estudo sobre agrotóxicos e nitratos (como nitrogênio) realizado em 31 poços aquíferos superficiais na Rede de Monitoramento de Ridge, na Flórida (EUA), localizados adjacentes a pomares cítricos, em amostragem trimestral, durante o período de abril de 1999 a janeiro de 2005, concluiu que entre os 44 agrotóxicos analisados, 17 foram detectados em amostras de águas subterrâneas (CHOQUETTE, 2014).

Segundo Neves *et al.* (2010), em 2009 houve aumento de 7,7% no volume de vendas de agrotóxicos agrícolas no Brasil em relação ao ano anterior. Desse total, 4,2% das vendas de produtos comerciais, o equivalente a 5,7% dos ingredientes ativos, foram consumidos pela citricultura, movimentando um total de R\$ 201 milhões. Do total de ingrediente ativo consumido pela citricultura, os acaricidas participaram com 39%, seguido pelos inseticidas foliares com 29% e pelos fungicidas de aplicação foliar com 14%. Essas três classes

representaram 55% dos gastos com agrotóxicos no setor. A maior pressão do Greening (HLB) e da Clorose Variegada dos Citros (CVC) tem aumentado exponencialmente o consumo de inseticidas na citricultura, de 2003 até 2010 houve um crescimento de cerca de 600%. Em 2009, a citricultura foi a segunda cultura mais intensiva em uso de agrotóxicos, o primeiro lugar ficou com o algodão e o terceiro com a soja.

Conforme Cordeiro (2016), em uma pesquisa realizada em Sergipe estudando a associação entre a exposição ocupacional aos agrotóxicos organofosforados e os marcadores de função tireoidiana de citricultores, onde participaram do estudo 208 trabalhadores rurais envolvidos na cultura de laranja do município de Boquim, no período de abril 2015 a abril 2016, a análise do perfil de saúde demonstrou presença de sintomatologia característica frequentemente associada à intoxicação por organofosforados. A maioria dos entrevistados relataram ter algum tipo de contato, direto ou indireto, com o agrotóxico (92,3%) e estavam expostos aos agrotóxicos a um período superior a 5 anos (66,1%). Níveis alterados de anticorpo anti-tireoperoxidase (Anti-TPO) e anti-tireoglobulina (AntiTg) foram encontrados em 14,7% e em 9,3% dos casos, respectivamente.

Em pesquisa realizada em Araraquara-SP sobre a mortalidade de abelhas europeias (*Apis mellifera*) em apiários e a utilização de agrotóxicos em citros, foi demonstrado que os inseticidas neonicotinoides e organofosforados, em especial os princípios ativos tiametoxam, imidacloprido, clorpirifós, malationa e dimetoato, são potenciais causas de enfraquecimento de colônias e morte destas abelhas. Ressaltando a região de estudo selecionada no trabalho e o levantamento de princípios ativo realizado, o autor considera válida a hipótese de que a atividade apícola e as abelhas estejam sendo impactadas negativamente pela utilização de agrotóxicos em monoculturas de laranja no interior do Estado de São Paulo (CERQUEIRA, 2018). Em estudo desenvolvido por Graham *et al.* (2022), verificaram-se o risco de pesticidas para abelhas manejadas durante a polinização de mirtilo é impulsionado principalmente por exposições fora da fazenda.

Agricultores do Assentamento Rural de Sumaré (Sumaré-SP) iniciaram a transição agroecológica de suas áreas produtivas, cultivadas anteriormente sob sistema convencional, por meio da implantação de Sistemas Agroflorestais e, após o período de dois anos, eliminaram o uso de agrotóxicos e certificaram a produção como orgânica. Este fato demonstra o potencial dos sistemas agroflorestais sucessoriais biodiversos em promover saltos no processo de transição agroecológica, uma vez que permitem o redesenho direto dos agroecossistemas, baseado na lógica dos processos ecológicos e sociais, garantindo a independência de insumos

externos em médio e longo prazo, na perspectiva de uma agricultura mais sustentável (BEZERRA *et al.*, 2019).

Para Coelho (2017), as principais categorias produtivas que apresentam experiências bem estabelecidas e com grande potencial para a conversão bem-sucedida do cultivo convencional em Sistemas Agroflorestais no Sul do Brasil são os sistemas silvipastoris, pomares de citros e plantações de banana, principalmente devido à grande extensão dessas atividades no Brasil. Em ambas as atividades, as vantagens ecológicas e econômicas são convergentes e reconhecidas também no nível acadêmico. A conversão de citros e banana para Sistemas Agroflorestais também apresenta grande potencial de absorção de carbono, além de reduzir doenças fúngicas e bacterianas.

Considerando o uso insustentável de insumos químicos pela citricultura no Brasil e no mundo e seus impactos negativos no meio ambiente e na saúde humana, tanto dos trabalhadores rurais como dos consumidores destes produtos, verifica-se a necessidade de pesquisas que apoiem o desenvolvimento de uma citricultura mais ecológica, que gere produtividade, mas ao mesmo tempo não degrade os recursos naturais e não coloque em risco a vida humana.

## 5.5 Sombreamento na citricultura

Os citros são comumente plantados em pleno sol, fundamentado no fato de que a produtividade dos frutos decai sob sombreamento. Considerando que os citros são espécies de estrato médio, ou seja, que no seu local de origem ocupam este estrato do dossel, é provável que estas plantas produzam bem sob algum nível de sombreamento. Há poucas pesquisas sobre sombreamento de frutíferas, como café, banana, entre outras, mas especialmente em citros as pesquisas são muito mais escassas.

Um experimento de dois anos realizado para investigar os efeitos do uso de redes brancas de sombreamento pré-colheita e armazenamento pós-colheita a 13,5 °C ou 25 °C nas respostas fisiológicas e na qualidade dos frutos de tangerina 'Ponkan', verificou que as árvores cultivadas sob rede branca tiveram uma porcentagem significativamente maior de suco, menor perda de peso, menor porcentagem de granulação e menor percentual de decaimento quando armazenada a 13,5 °C pós-colheita do que a cultivar sem sombreamento e armazenada a 25 °C (LEE *et al.*, 2015a).

Em um estudo comparativo realizado por Abouatallah *et al.* (2012), do impacto do déficit de irrigação e redes de sombreamento sobre o crescimento de citros e a queda de frutos,

a fim de economizar água sem afetar o status fisiológico e o desempenho das árvores, mostrou que a aplicação de telas de sombreamento atende às necessidades das árvores sem causar efeito adverso no desempenho das culturas. A rede de sombreamento melhorou o crescimento dos frutos e mitigou os fenômenos de queda de frutos em 50%. O estudo conclui que a adoção de 50% da necessidade de água das árvores usando a rede é uma boa maneira de maximizar a eficiência da água de irrigação, sem afetar o crescimento das árvores e seu estado fisiológico.

O efeito do sombreamento com a tela Aluminet-50 (que reduz em cerca de 50% a radiação fotossinteticamente ativa incidente) sobre a produção, qualidade dos frutos, composição mineral das folhas e parâmetros de crescimento dos limões 'Fino 49' enxertados em dois porta-enxertos, *Citrus macrophylla* e laranja azeda, demonstrou que o sombreamento aumentou a altura das árvores e o perímetro do dossel, produzindo árvores com volume de copa cerca de 60% maior do que as árvores de controle cultivadas a pleno sol. No entanto, enquanto as árvores em *Citrus macrophylla* e laranja azeda sob luz solar total produziram 81 e 45 kg árvore, árvores semelhantes à sombra produziram 70 e 33 kg árvore, respectivamente. O sombreamento afetou as características físicas dos frutos das árvores de *Citrus macrophylla*, sendo os frutos sombreados menores do que os de árvores sob pleno sol (GIMENO *et al.*, 2015).

Segundo Lado *et al.* (2015), o acúmulo de pigmento caroteno vermelho, licopeno, em frutas cítricas é uma característica incomum restrita a toranja e algumas laranjas mutantes. Nas frutas cítricas a luz afeta positivamente o desenvolvimento da cor e consequentemente o conteúdo e a composição do carotenoide. No entanto, é paradoxal que, em um estudo realizado na Espanha em toranja vermelha sombreada e exposta à luz, em condições de sombreamento pelo ensacamento dos frutos, o amadurecimento foi acelerado e a cor externa da fruta foi ampliada (maior coloração vermelha). Os níveis de licopeno na casca dos frutos à sombra foram 49 vezes maiores do que nos frutos expostos à luz. O sombreamento acentuou a cor vermelha no fruto e o acúmulo de carotenoide na toranja.

A doença Huanglongbing (HLB) ou Greening é uma ameaça para a maioria das áreas produtoras de citros. A doença é transmitida pelo vetor asiático *Psyllid citrus* (ALVAREZ *et al.*, 2016). Estufas com telas antipsilóide podem potencialmente reduzir e eliminar o desenvolvimento de HLB em plantações jovens de citros, excluindo o inseto vetor. Um estudo realizado na Florida demonstrou que a tela antipsilóide excluiu o vetor de HLB das estufas e as condições ambientais dentro destas indicaram uma redução na radiação solar cumulativa e na rajada de vento quando comparadas com as parcelas a céu aberto. Essas observações demonstraram que o cultivo de árvores cítricas jovens dentro dessas estufas teladas pode

representar um ambiente de melhor crescimento em comparação com as plantações convencionais a céu aberto (FERRAREZI *et al.*, 2017).

Em pesquisa realizada na Costa Rica, por Charbonnier *et al.* (2017), onde foi monitorada a produtividade primária, durante dois anos, em escalas variando de cafeeiros individuais para cafeeiros com sombreamento completo, descobriu-se que, embora a irradiância tenha sido reduzida em 60% abaixo das copas das árvores de sombra, a eficiência do uso da luz no café aumentou em 50%, deixando a produtividade primária relativamente estável em todos os níveis de densidade. A variabilidade da produtividade primária de plantas cafeeiras foi causada principalmente pela idade das plantas e pela competição intraespecífica entre elas (fatores geralmente negligenciados na literatura agroflorestal) e não pela presença de árvores de sombra.

Em estudo de dois anos realizado na Florida, por Jifon e Syvertsen (2001), para examinar o potencial de aplicação de sombra moderada em diferentes estágios fisiológicos do desenvolvimento de frutos cítricos, Toranja 'Ruby Red' com dez anos de idade (*Citrus paradisi* L.) e laranja 'Hamlin' de oito anos de idade (*Citrus sinensis* L.) foram sombreadas com telas de 50%, desde a floração até a colheita (sombra contínua), de abril a julho (sombra inicial) e de agosto até a colheita (sombra tardia). Em toranja, o sombreamento tardio aumentou a produção de frutos em 35% em 1999. A sombra contínua reduziu a produção de frutos em ambas as variedades. O teor de suco de toranja foi aumentado pelos tratamentos de sombreamento tardios e contínuos em relação aos controles.

Diferentes espécies de citros podem ser cultivadas sob o dossel de árvores de sombreamento. As espécies arbóreas do estrato superior podem proporcionar benefícios para o cultivo de várias maneiras: fixação biológica de nitrogênio, ciclagem de nutrientes e proteção contra estresses climáticos. O sombreamento aumenta a longevidade dos citros, que mantém alta produtividade por um longo período. Plantas cítricas em pomares sombreados do Estado do Rio Grande do Sul proporcionam altos rendimentos mesmo após 25 anos. Apesar da forte evidência de benefícios econômicos e ecológicos da agrossilvicultura em relação aos pomares convencionais, essa forma de cultivo ainda é uma exceção (COELHO, 2017).

Conforme apresentado, verifica-se que a literatura nacional e internacional possui poucos trabalhos com sombreamento natural de citros, seja em SAF ou outros sistemas de produção. Os poucos trabalhos existentes na área são realizados com sombreamento artificial em citros que implicam também em maiores investimentos na produção. Além disto, percebe-se uma concentração de trabalhos na região da Flórida (EUA), que possui clima temperado,

sendo necessárias quantificações dos efeitos do sombreamento em áreas tropicais, como é o caso do Brasil. Assim, percebe-se a necessidade de pesquisas que avaliem o efeito do sombreamento natural em citros, no consórcio com espécies arbóreas, especialmente em condições tropicais, sobre a qualidade do solo, produtividade e qualidade dos frutos.

## 5.6 Citrus Huanglongbing (HLB ou Citrus Greening)

Citrus Huanglongbing (HLB ou Citrus Greening), cujo nome em chinês significa "doença do dragão amarelo", identificada inicialmente no Sudeste Asiático em 1870 (LIN, 1956), é considerada a doença mais destrutiva e a maior ameaça a citricultura em todo o mundo devido à rápida disseminação, graves danos à produção de citros e à qualidade dos frutos e à dificuldade de controle (BOVÉ, 2006). O HLB foi relatado pela primeira vez no Brasil em 2004 (COLETTA-FILHO *et al.*, 2004; TEIXEIRA *et al.*, 2005). Inicialmente, a doença limitava-se aos municípios localizados no centro do Estado de São Paulo, mas atualmente apresenta ocorrência também nos Estados de Minas Gerais (CASTRO *et al.*, 2010) e Paraná (MENEGUIM *et al.*, 2008).

O agente causador da doença é uma bactéria, restrita aos vasos do floema das plantas, pertencente ao gênero *Candidatus Liberibacter*, das quais são conhecidas três espécies, *Candidatus Liberibacter asiaticus*, *Candidatus Liberibacter africanus* e *Candidatus Liberibacter americanus*. Cada espécie de liberibacter evoluiu no continente que lhe deu o nome, no entanto, os sintomas do HLB são os mesmos em todos os locais de ocorrência. No Brasil, o *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLas) é o agente causador da doença, sendo o psílido cítrico asiático, *Diaphorina citri* (Kuwayama), inseto sugador do floema, o vetor natural da doença, que a transfere de planta para planta (COLETTA-FILHO *et al.*, 2004; MENEGUIM *et al.*, 2008; MACHADO *et al.*, 2010; MARIANO *et al.*, 2018).

Os danos causados pela doença são severos em todos os citros, tanto as variedades de copa como de porta-enxerto são afetadas, além disso não se conhece resistência genética, não havendo cura em plantas doentes (TEIXEIRA *et al.*, 2005, BOWMAN *et al.*, 2016; TIRADO-CORBALÁ *et al.*, 2018). Os sintomas característicos do HLB são manchas cloróticas nas folhas das plantas, formando um mosqueado assimétrico em relação à nervura central, manchas conhecidas como “ilhas verdes” e nos estágios mais avançados ramos com folhas totalmente amareladas, além de frutos pequenos, deformados, com maturação desuniforme e queda prematura (BASSANEZI *et al.*, 2009; DALA-PAULA *et al.*, 2019). Anteriormente aos

sintomas na parte área, o HLB provoca a redução da matéria seca do sistema radicular de plantas infectadas (JOHNSON *et al.*, 2014; MORGAN *et al.*, 2016).

A Flórida, maior produtor de laranja dos Estados Unidos, foi o estado que mais sofreu o impacto do HLB com dano estimado da doença nos últimos 5 anos de mais de US\$ 1 bilhão por ano (COURT *et al.*, 2017). Como o HLB não possui métodos de controle curativo, a principal medida a ser adotada é a prevenção. Estratégias de controle são uso de mudas e borbulhas sadias, monitoramento constante de plantas com sintomas, erradicação de plantas com sintomas e controle químico do vetor (psílídeos adultos e ninfas) (BELASQUE JUNIOR *et al.*, 2009; LEE *et al.*, 2015b; LI *et al.*, 2021).

O uso de inseticidas de amplo espectro para controle do vetor, psílídio, é o principal método de controle da propagação da doença, enquanto os bactericidas têm como alvo direto a própria bactéria (*Candidatus Liberibacter asiaticus*). No entanto, as pulverizações de agrotóxicos para controle da doença geram preocupações sobre resíduos químicos em frutas e sucos (CHEN *et al.*, 2017) e pode aumentar a probabilidade de desenvolver resistência aos pesticidas (NAEEM *et al.*, 2019; TIAN *et al.*, 2019) e afetar os inimigos naturais que desempenham um papel importante no controle de pragas (CORALLO *et al.*, 2021). Assim, a busca por estratégias alternativas de mitigação de doenças do Greening dos citros é considerada uma prioridade urgente para uma citricultura mais sustentável.

Cepas de fungos entomopatogênicos, *Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae*, apresentaram resultados promissores como agentes de biocontrole contra D. citri. Ambas as cepas de fungos também apresentaram baixíssima virulência contra os predadores naturais de D. Citri, coccinelídeos e crisopídeos e, conseqüentemente, poderiam ser utilizadas juntas em um programa de manejo integrado de pragas (CORALLO *et al.*, 2021). Estudando o uso de compostos extraídos do carvalho, *Quercus hemisphaerica*, para avaliar os efeitos antibacterianos destes contra plantas cítricas infectadas com *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLas), Pitino *et al.* (2020), concluíram que o extrato aquoso de *Q. hemisphaerica* melhorou a fisiologia geral das árvores de citros afetadas por HLB e que estas se recuperaram após o tratamento, indicando que os efeitos deletérios do CLas podem ser revertidos, demonstrando o potencial de uma nova estratégia de controle orgânico para os produtores manejarem o HLB de maneira mais eficaz.

O psílideo asiático (D. citri) orienta-se preferencialmente para hospedeiros cítricos infectados com a bactéria CLas. Investigando se essa preferência por odores de plantas infectadas poderia ser útil para o desenvolvimento de um dispositivo de atrair e matar (AM)

para *D. citri*, foram testadas vinte e nove misturas de compostos orgânicos voláteis derivados do odor de citros infectados com CLas. Uma mistura de sete componentes atraiu duas vezes mais *D. citri* para armadilhas pegajosas amarelas em comparação com armadilhas de controle em branco. A atraente mistura foi subsequentemente formulada com inseticida spinosad para criar um protótipo de formulação AM contra *D. citri*. Esta formulação reduziu efetivamente a densidade populacional de *D. citri* em até 84% quando aplicado a uma densidade de oito porções de 2,5 g por árvore. Os resultados indicam que uma formulação de AM, incorporando spinosad e uma mistura volátil de Greening cítrico, pode ser útil para suprimir populações de *D. citri* (MARTINI *et al.*, 2020).

Após três anos de tratamentos com macro e micronutrientes (Ca + Mg + B), o rendimento da Laranja de *Umbigo Gannan* apresentou aumento entre 20,5% e 45,8%, quando comparado com o controle. A adubação do solo diminuiu a incidência de HLB e reduziu a concentração da bactéria nas folhas. O tratamento alterou ainda a estrutura das comunidades microbianas e melhorou a biodiversidade microbiana na filosfera e rizosfera, provocando enriquecimento e aparecimento de microrganismos benéficos que podem melhorar a resistência ao estresse e manter a planta saudável (ZHOU *et al.*, 2021).

A aplicação fúngica de *C. fumosorosea* interrompe o sistema de defesa de populações *Diaphorina Citri* adultas e ninfas, reduzindo a população do vetor em citros (QASIM *et al.*, 2021). Oligonucleotídeos antibacterianos confirmaram capacidade de redução da bactéria (Clas), penetrando nas células dos insetos, além de reprimir os genes essenciais bacterianos e apresentar ação na quantificação das reduções no título bacteriano, como na transmissão da doença, sugerindo que o bactericida pode ser uma ferramenta útil para o manejo integrado de patógenos agrícolas (SANDOVAL-MOJICA *et al.*, 2021).

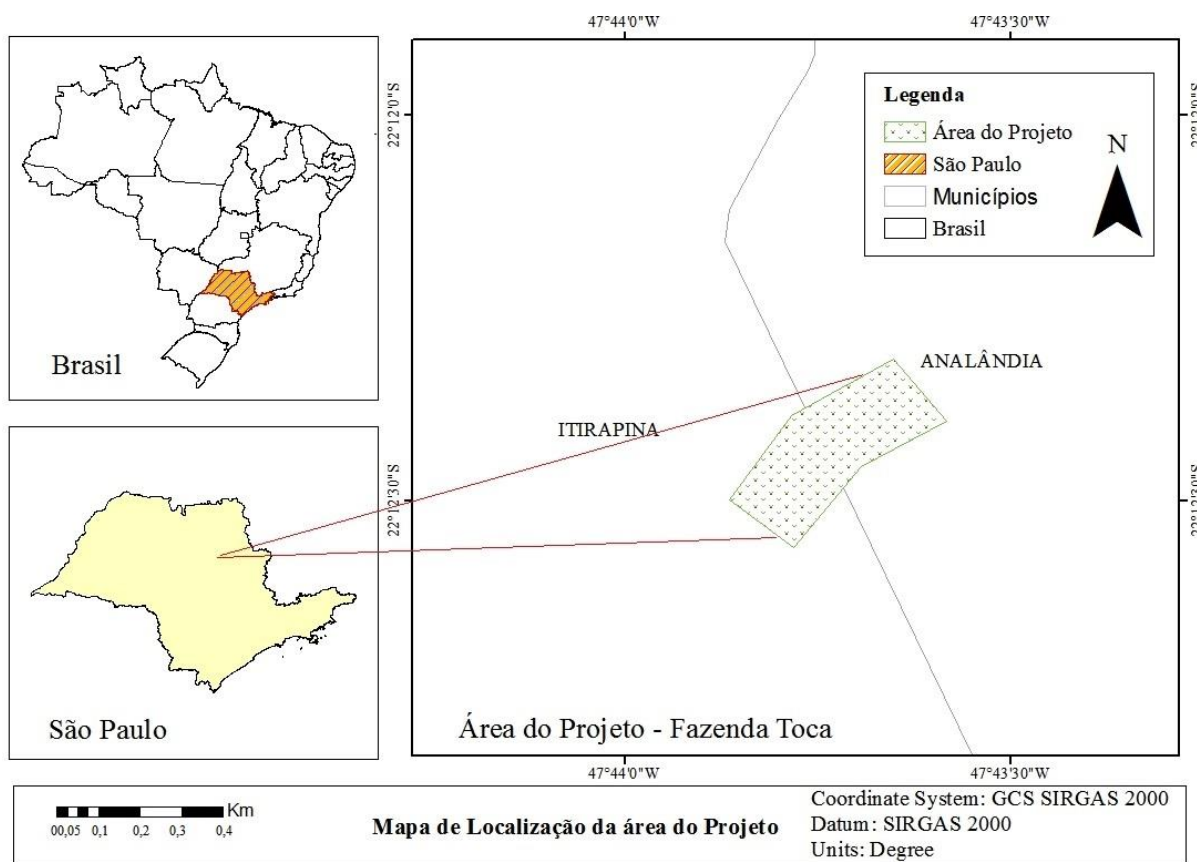
Devido a importância do Greening para a citricultura, há necessidade de estudos sobre formas de controle da doença. O sombreamento natural dos citros, por meio do consórcio com espécies arbóreas, em sistema agroflorestal, pode contribuir para o controle biológico do psílido, vetor da doença, por meio do aumento da biodiversidade, além de diminuir o estresse das plantas pelo conforto térmico. Assim, a pesquisa pretende estudar o efeito das diferentes densidades arbóreas, e consequente sombreamento, sobre a incidência do Greening nos citros.

## 6. METODOLOGIA GERAL

### 6.1 Localização e descrição da área de estudo

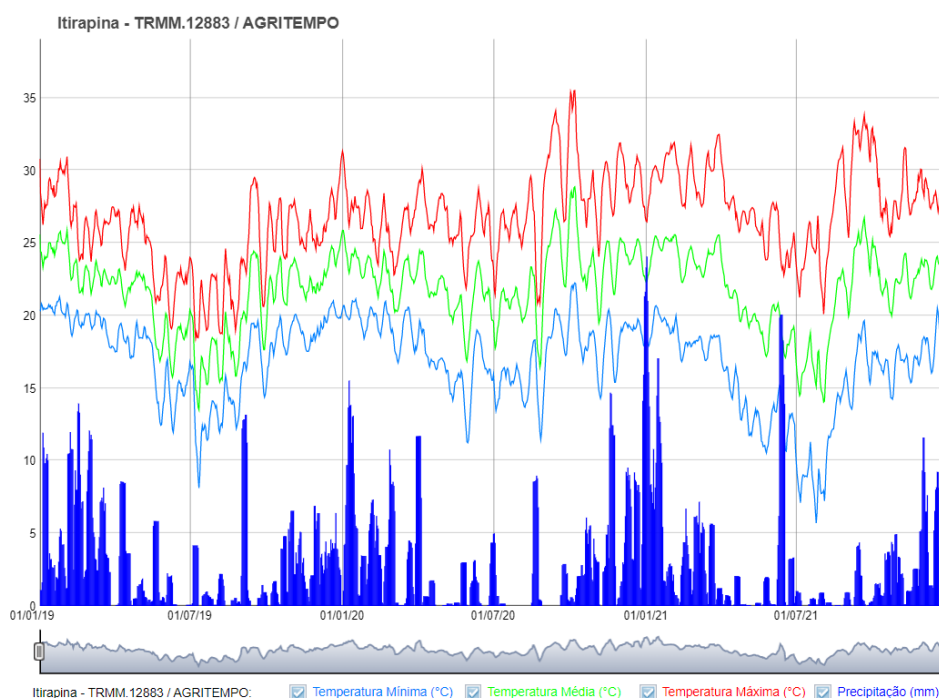
O estudo foi realizado em condições de campo na Fazenda da Toca, situada nas coordenadas geográficas de 22°13'36.63" de latitude sul e 47°44'56.02" de longitude oeste, com altitude aproximada de 800 m, localizada no município de Itirapina, São Paulo, Brasil (Figura 1).

**Figura 1.** Mapa de localização da área experimental, em Itirapina, São Paulo, Brasil.



O clima da região é considerado tropical de altitude, com chuvas no verão e seca no inverno (Cwa) segundo a classificação de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013). Na Figura 2 apresentam-se os valores de temperatura média e precipitação do município no período da pesquisa. O solo foi classificado como um ENTISOLS QUARTZIPSAMMENTS (SOIL SURVEY STAFF, 2014) e como NEOSSOLO QUARTZARÊNICO segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018). A caracterização do solo da área experimental foi realizada em junho de 2017, onde foram determinados os atributos físicos do solo (Tabela 1).

**Figura 2.** Precipitação e valores médios de temperatura da área experimental, em Itirapina, São Paulo, Brasil.



Fonte: Série histórica do município de Itirapina, entre os anos de 2019 e 2021, estado de São Paulo, Brasil, AGRITEMPO, 2022.

Esta área foi ocupada anteriormente, no período de 2012 a 2015, por um pomar de citros manejado no sistema orgânico de produção, com insumos de base ecológica, porém, em monocultivo. A erradicação deste pomar ocorreu em 2016 com corte raso das plantas, destocagem das raízes e preparo do solo com grade aradora e grade niveladora. Em seguida, no verão 2016/2017, foi realizado plantio do feijão guandu (*Cajanus cajan*) em consórcio com o capim Mombaça (*Megathyrsus maximus*), para descompactação do solo e produção de biomassa. Posteriormente, foi realizada a roçada da área com roçadeira “sega pasto” (marca Casale) e realizado o desenleiramento desta biomassa, no período de 2017/2018, com o desenleirador “Speedrake” (marca Kuhn), maquinário que afasta a biomassa permitindo o preparo do solo para plantio em leiras.

**Tabela 1.** Caracterização física do solo antes da instalação do experimento, em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Profundidade     | MaP                                       | MiP  | PT   | DS                | RP   | TAS                 | DMP  | AG                            | AF  | AT  | ARG | SIL |
|------------------|-------------------------------------------|------|------|-------------------|------|---------------------|------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                  | .....m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ..... |      |      | Mg m <sup>3</sup> | MPa  | kg kg <sup>-1</sup> | mm   | .....g kg <sup>-1</sup> ..... |     |     |     |     |
| <b>0,00-0,10</b> | 0,14                                      | 0,30 | 0,44 | 1,35              | 0,83 | 0,05                | 2,56 | 622                           | 281 | 903 | 76  | 21  |
| <b>0,10-0,20</b> | 0,14                                      | 0,28 | 0,42 | 1,44              | 2,45 | 0,06                | 2,43 | 607                           | 292 | 899 | 81  | 20  |
| <b>0,20-0,40</b> | 0,11                                      | 0,28 | 0,39 | 1,51              | 3,95 | 0,05                | 1,88 | 598                           | 298 | 896 | 88  | 16  |
| <b>0,40-0,60</b> | 0,12                                      | 0,26 | 0,38 | 1,49              | 3,88 | 0,05                | 1,18 | 575                           | 309 | 884 | 97  | 19  |

MaP = macroporosidade; MiP = microporosidade; PT = porosidade total; DS = densidade do solo; RP = resistência do solo à penetração; TAS = teor de água no solo; DMP = diâmetro médio ponderado; AG = areia grossa; AF = areia fina; AT = areia total; ARG = argila; SIL = silte.

O preparo das linhas de plantio foi realizado com equipamento “Penta” (marca Mafes). Este equipamento realizou três operações em uma: capina com enxadas rotativas; subsolagem a 0,40 m de profundidade e aplicação de calcário (1,5 Mg ha<sup>-1</sup>) misturado com fosfato natural reativo (500 kg ha<sup>-1</sup>). Após o preparo da linha foram aplicados pó de rocha basáltica produzido pelo grupo Siqueira (2,0 Mg ha<sup>-1</sup>), esterco bovino (5,0 Mg ha<sup>-1</sup>) e Azospirillum (gênero bacteriano fixador de nitrogênio, da família Rhodospirillaceae, que promove o crescimento das plantas).

O plantio das espécies arbóreas nativas e exóticas ocorreu em janeiro de 2018, com mudas em tubete do viveiro Camará, localizado em Ibaté-SP. O plantio das variedades de citros ocorreu em abril de 2018, devido a atraso na entrega das mudas. Os berços de plantio das mudas foram abertos manualmente, em linha, seguindo o espaçamento descrito na Tabela 2 e nas entrelinhas de plantio foi mantido o capim Mombaça (*Megathyrsus maximus*).

**Tabela 2.** Espaçamento (Esp) e número de plantas (NP), por parcela, nos tratamentos do experimento, em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Espécies    | T1        |     | T2          |     | T3         |     | T4         |     |
|-------------|-----------|-----|-------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Esp       | NP  | Esp         | NP  | Esp        | NP  | Esp        | NP  |
| Citros      | 5,6x4,0 m | 200 | 5,6x4,0 m   | 200 | 5,6x4,0 m  | 200 | 5,6x4,0 m  | 200 |
| Serviços    | -         | -   | 11,2x5,0 m  | 80  | 11,2x4,0 m | 100 | 11,2x2,0 m | 200 |
| Madeiráveis | -         | -   | 11,2x10,0 m | 40  | 11,2x8,0 m | 50  | 11,2x6,0 m | 70  |
| Total       | -         | 200 | -           | 320 | -          | 350 | -          | 470 |

T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

Foi realizada adubação de cobertura das plantas, em maio de 2018, com esterco bovino (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) e composto (3,0 Mg ha<sup>-1</sup>) e duas aplicações anuais de micronutrientes com ácido bórico (4,0 kg ha<sup>-1</sup>), sulfato de zinco (2,0 kg ha<sup>-1</sup>) e sulfato de manganês (1,5 kg ha<sup>-1</sup>).

Ainda no primeiro ano de cultivo foram realizadas uma aplicação de torta de mamona ( $630 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e duas aplicações de cama de frango ( $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

Um sistema de irrigação por gotejamento foi instalado nas linhas de plantio do experimento em dezembro de 2018. As roçadas do capim Mombaça, nas entrelinhas, ocorreram de três a quatro vezes no verão e uma vez no inverno, com posterior enleiramento do capim na linha de plantio. O aporte médio anual de matéria seca na área experimental foi em torno de  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

Foram realizadas pulverizações preventivas quinzenais alternadas para controle de Greening ou Huanglongbing (HLB) e psilídeo (*Diaphorina citri*) com: Challenger (*Isaria fumosorosea*) ( $100 \text{ ml ha}^{-1}$ ) + óleo de Neem (*Azadirachta indica*) ( $150 \text{ ml ha}^{-1}$ ) e Boveril (*Beauveria Bassiana*) ( $100 \text{ ml ha}^{-1}$ ) + óleo de Neem (*Azadirachta indica*) ( $150 \text{ ml ha}^{-1}$ ).

## 6.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento possui delineamento de blocos casualizados, com quatro tratamentos e três repetições, totalizando 12 parcelas com dimensões de  $62 \times 80 \text{ m}$  e área útil de  $4.960 \text{ m}^2$  cada, somando  $59.520 \text{ m}^2$  (Figura 3). A área experimental possui ainda uma bordadura de  $25.580 \text{ m}^2$ , totalizando  $85.100 \text{ m}^2$ .

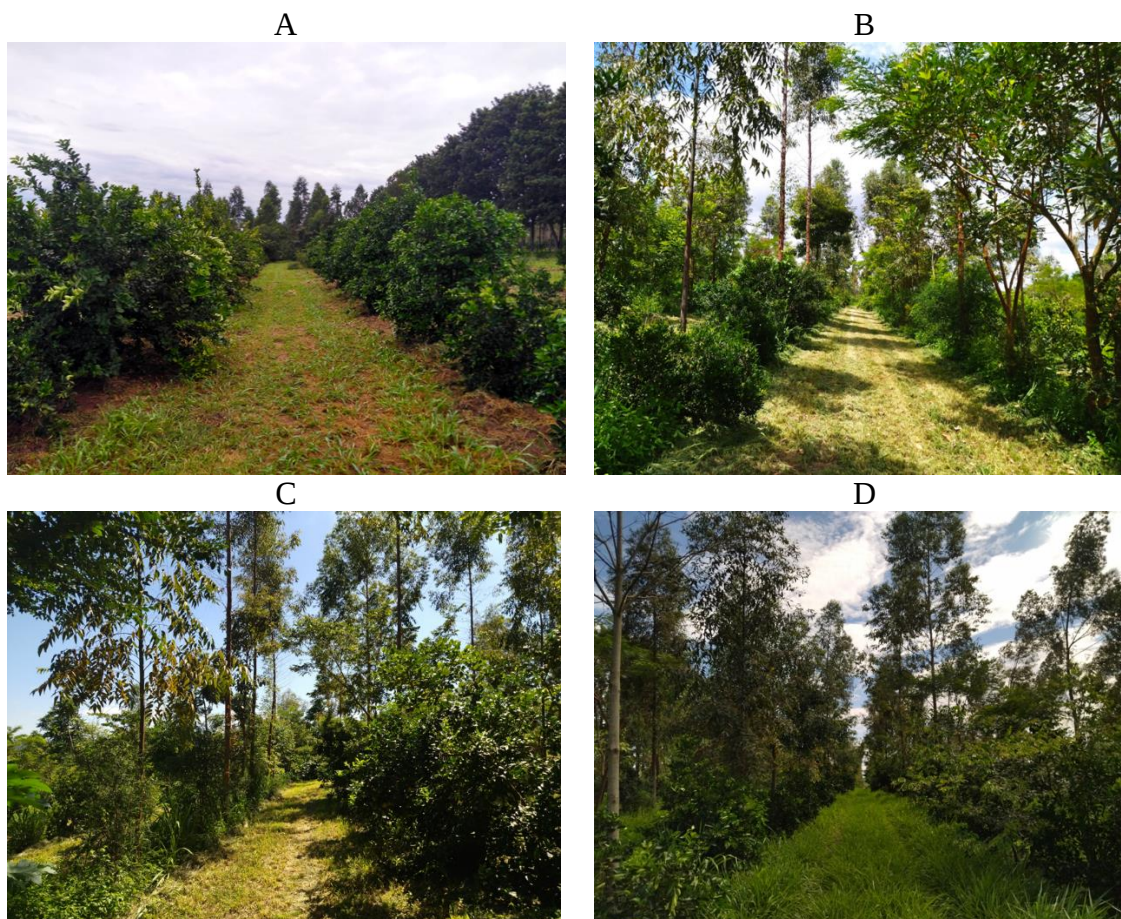
**Figura 3.** Imagem da área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil, representando os 4 tratamentos, 3 repetições e 12 parcelas.



T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040. Fonte: Imagem Google Earth, 2018.

O delineamento experimental foi definido em um workshop realizado pela Fazenda da Toca, contando com a participação de especialistas da área da citricultura e de Sistemas Agroflorestais, buscando respostas para um sistema agroflorestal mecanizado em larga escala. Os tratamentos estudados foram: T1 - Citros com densidade de 446 plantas  $\text{ha}^{-1}$  (Citros 446); T2 - SAF citros com densidade de 713 plantas  $\text{ha}^{-1}$  (SAF Citros 713); T3 - SAF citros com densidade de 780 plantas  $\text{ha}^{-1}$  (SAF Citros 780); e T4 - SAF citros com densidade de 1.040 plantas  $\text{ha}^{-1}$  (SAF Citros 1.040) (Figura 4).

**Figura 4.** Vistas dos Sistemas Agroflorestais com diferentes densidades arbóreas, em novembro de 2021, na área experimental, em Itirapina, São Paulo, Brasil. A = Vista do T1 (Citros 446); B = Vista do T2 (SAF Citros 713); C = Vista do T3 (SAF Citros 780); D = Vista do T4 (SAF Citros 1.040).



As oito variedades de citros estudadas foram: Laranja Valência Americana e Laranja Rubi (*Citrus sinensis* L. Osbeck), Tangerina Cravo (*Citrus tangerina* Hort. ex Tanaka), Tangerina Murcote (*Citrus reticulata* Blanco x *Citrus sinensis* Osbeck), Mexerica do Rio (*Citrus deliciosa* Tenore), Limão Cravo (*Citrus limonia* Osbeck), Limão Siciliano (*Citrus*

limon) e Limão caviar (*Citrus australasica*). A bordadura do experimento é composta por Limão Taiti (*Citrus aurantifolia*), mas por sofrer efeito de borda não foi estudado nesta pesquisa (Figura 4).

A escolha das variedades de citros buscou uma representação da citricultura brasileira, com as variedades mais cultivadas de limão, tangerina e laranja. O limão caviar foi escolhido por ser um produto diferenciado, com alto valor comercial e que no seu centro de origem (Austrália) é cultivado sob floresta. O detalhamento do número de plantas cítricas por parcela, tratamento e total encontra-se na Tabela 3.

**Tabela 3.** Número de plantas por parcela, tratamento e total, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Variedade              | Nº plantas/parcela | Nº plantas/tratamento | Nº total de plantas |
|------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|
| Laranja valência       | 18                 | 54                    | 216                 |
| Laranja rubi           | 18                 | 54                    | 216                 |
| Tangerina cravo        | 18                 | 54                    | 216                 |
| Tangerina murcote      | 18                 | 54                    | 216                 |
| Mexerica do rio        | 18                 | 54                    | 216                 |
| Limão cravo            | 18                 | 54                    | 216                 |
| Limão siciliano        | 18                 | 54                    | 216                 |
| Limão caviar           | 18                 | 54                    | 216                 |
| <b>Total</b>           | <b>144</b>         | <b>432</b>            | <b>1.728</b>        |
| Bordadura limão tahiti | 56                 | 168                   | 672                 |
| <b>Total geral</b>     | <b>200</b>         | <b>600</b>            | <b>2.400</b>        |

Os citros foram consorciados com as seguintes espécies arbóreas:

- Madeiráveis: Jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*), Ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), Louro-pardo (*Cordia trichotoma*) e Peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron*).
- Serviços: Farinha Seca (*Albizia niopoides*), Inga (*Inga edulis*), Eritrina (*Erythrina speciosa*), Eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) e Gliricídia (*Gliricídia sepium*).

As espécies madeiráveis foram selecionadas com base nos critérios: crescimento vegetativo, estrato da planta, comportamento das folhas e valor de mercado. Estas plantas apresentam bom desempenho no crescimento, são do estrato alto ou emergente, evitando a competição com os citros de estrato médio; são decíduas ou semidecíduas, favorecendo a entrada de luz no sistema no inverno.

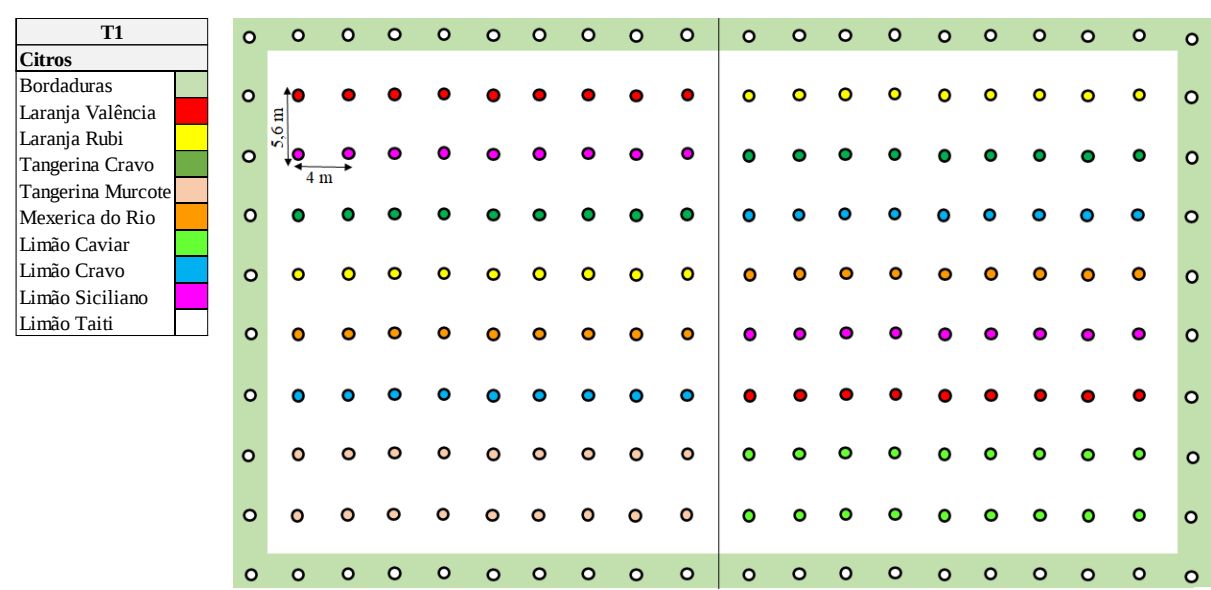
As espécies de serviço foram selecionadas com base nos critérios: crescimento vegetativo, estrato da planta, comportamento das folhas, fixação de nitrogênio e resposta a

podas. A maioria das plantas são leguminosas, possibilitando a fixação de nitrogênio do ar, decíduas, do estrato alto ou emergente possuem rápido crescimento e toleram podas.

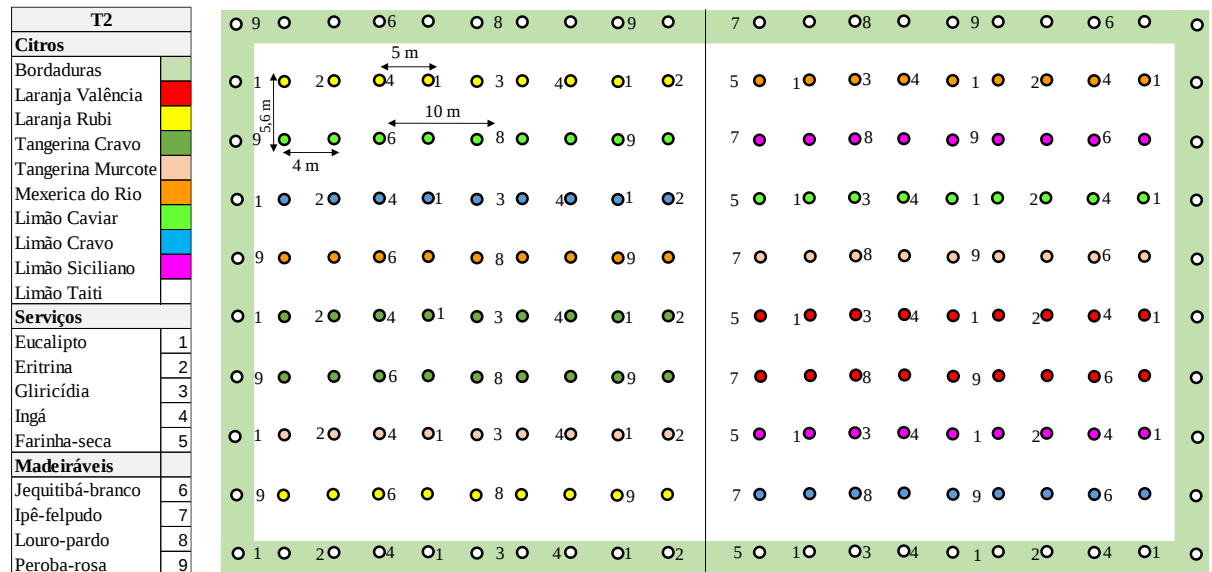
As distintas densidades arbóreas dos tratamentos tiveram o intuito de promover diferentes níveis de sombreamento natural dos citros, aumentar a produção de biomassa, propiciar o controle biológico, aumento da biodiversidade e melhoria da qualidade do solo, de forma a garantir o pleno desenvolvimento e produtividade dos citros e a diminuição do Greening ou HLB.

As Figuras 5, 6, 7 e 8 apresentam os croquis dos quatro tratamentos da pesquisa, os espaçamentos entre plantas e as variedades de citros, espécies arbóreas nativas e exóticas utilizadas nos tratamentos.

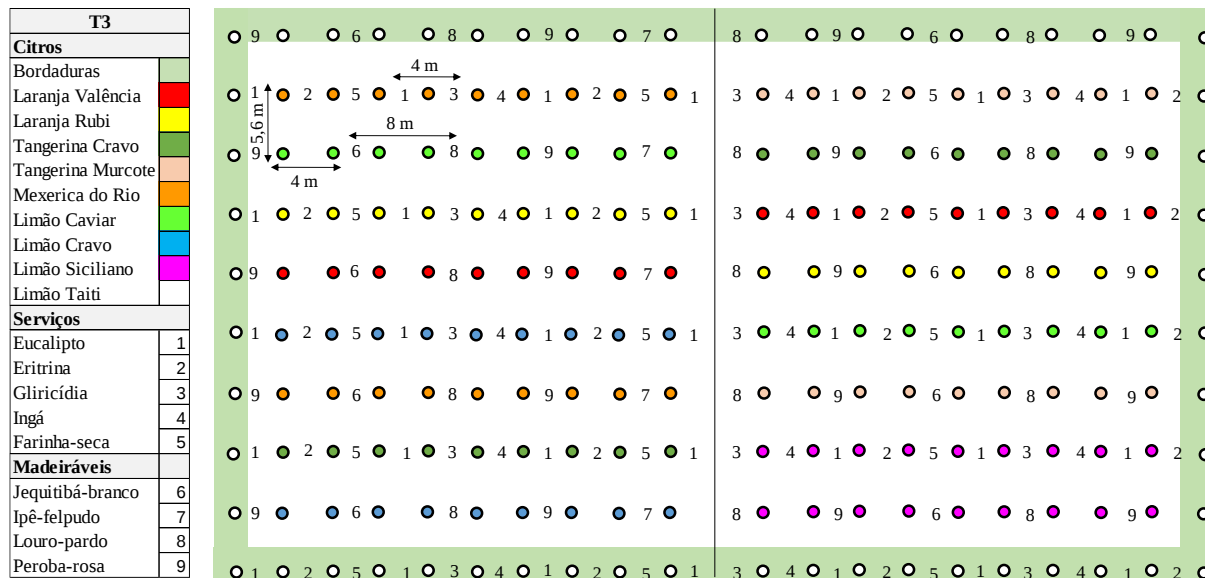
**Figura 5.** Croqui do tratamento T1 (Citros 446) na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



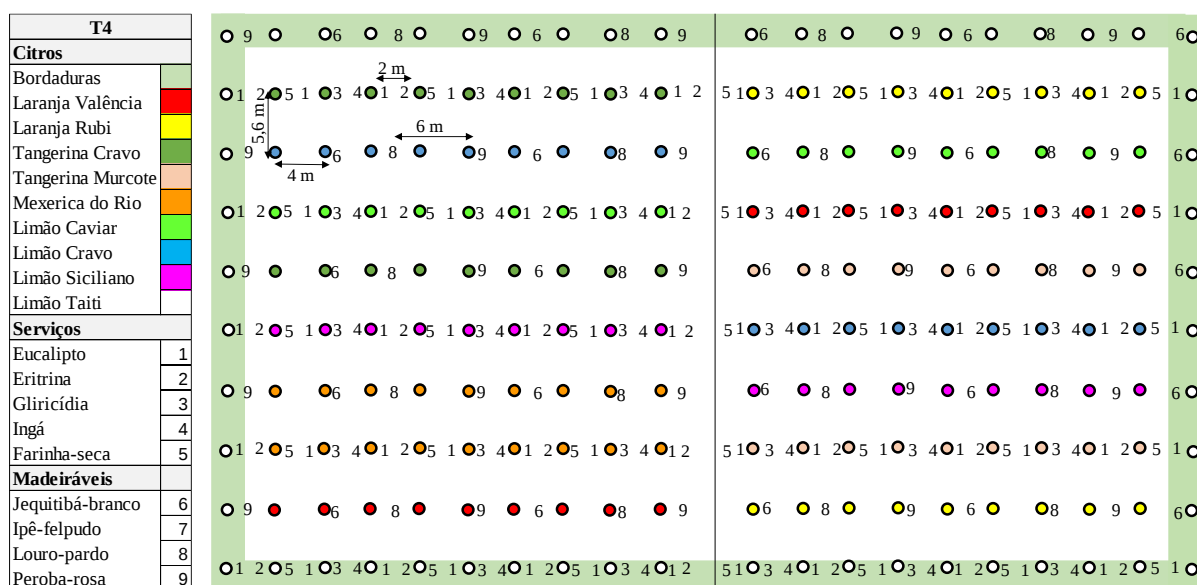
**Figura 6.** Croqui do tratamento T2 (SAF Citros 713) na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



**Figura 7.** Croqui do tratamento T3 (SAF Citros 780) na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



**Figura 8.** Croqui do tratamento T4 (SAF Citros 1.040) na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



Para condução das plantas de sombreamento foram realizadas podas de desgalhe de todas as árvores de serviço durante o primeiro e segundo ano, retirando galhos mais baixos, além de poda apical anual nos eucaliptos, a partir do terceiro ano, no inverno e podas anuais de esqueletamento nas leguminosas (ingá, eritrina, gliricídia e farinha seca).

### 6.3 Análises físicas do solo

Para avaliação da influência das diferentes densidades de cobertura de dossel sobre os atributos físicos do solo foram coletadas, nos três primeiros anos da pesquisa, amostras nas linhas e entrelinhas de plantio dos citros, com três repetições por tratamento. Para determinação da granulometria foram coletadas amostras deformadas, nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Para realização da porosidade do solo foram coletadas amostras indeformadas, nas mesmas profundidades. Para analisar a densidade do solo foram coletadas amostras indeformadas nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 e 0,60-1,00 m. O teor de água no solo e resistência do solo à penetração foram medidos em campo, nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m.

Foram abertas 12 trincheiras no experimento, em cada coleta, sendo três por tratamento, com dimensões de 1,5 m de profundidade, 1,0 m de largura e 3,0 m de comprimento, de forma a possibilitar coleta na linha e entrelinha (Figura 9). As coletas de solo foram realizadas em março de 2019 e junho de 2019 e 2021.

**Figura 9.** Trincheira de coleta de solo em Sistema Agroflorestal de citros sob diferentes densidades arbóreas, em Itirapina, São Paulo, Brasil.



### **6.3.1 Análise granulométrica**

Na análise granulométrica foram determinadas as frações de areia, silte e argila utilizando terra fina seca ao ar pelo método da pipeta com solução de Hidróxido de Sódio 0,1 (NaOH) com agente dispersante (TEIXEIRA *et al.*, 2017). As areias grossa e fina foram separadas por tamisação e o silte calculado por diferença. A granulometria do solo foi determinada apenas no primeiro ano do projeto.

### **6.3.2 Densidade e porosidade do solo**

A densidade do solo foi calculada pela relação entre a massa do solo seco em estufa a 105 °C e volume da amostra (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A porosidade foi calculada a partir da mesa de tensão e a microporosidade correspondeu à umidade volumétrica da amostra submetida a uma tensão de 6 kPa. A porosidade total foi obtida pelo método direto e a macroporosidade por diferença entre a porosidade total e a microporosidade (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

### 6.3.3 Teor de água no solo e resistência do solo à penetração

O teor de água no solo foi obtido *in situ*, utilizando um sensor de umidade e temperatura do solo, TEROS 12 (Decagon Devices), acoplado a um dispositivo de leitura ProCheck (Decagon Devices) (Figura 10). A resistência do solo à penetração foi realizada com o equipamento automatizado de compactação do solo Falker Solo Track PLG5200 (Figura 11). Este equipamento é motorizado, permitindo maior controle na velocidade de penetração e acuracidade nas informações coletadas. A medição tem início quando a ponta do cone toca o solo e é encerrada quando são alcançados 0,60 m de profundidade, sendo que os dados são salvos na memória de modo automático. O módulo eletrônico de medição retorna à posição inicial automaticamente.

**Figura 10.** Sensor de umidade em Sistema Agroflorestal de citros sob diferentes densidades arbóreas, em Itirapina, São Paulo, Brasil.



**Figura 11.** Medidor eletrônico de compactação do solo em Sistema Agroflorestal de citros sob diferentes densidades arbóreas, em Itirapina, São Paulo, Brasil.



#### 6.4 Análise química do solo

Foram coletadas amostras deformadas de solo nas linhas e entrelinhas de plantio nas parcelas experimentais para caracterização química. As coletas foram realizadas nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, com três repetições por tratamento, somando 72 amostras anuais. As amostras foram levadas ao laboratório de solos, secas ao ar e em seguida passadas em peneira de 2,0 mm e encaminhadas para análise. Foram realizadas determinações do pH do solo ( $\text{CaCl}_2$  0,01 mol  $\text{L}^{-1}$ ), fósforo disponível, cátions trocáveis ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^{+}$ ), acidez potencial e cálculo da capacidade de troca de cátions e saturação de bases de acordo com metodologia proposta por Raij *et al.* (2001). O teor de matéria orgânica foi obtido por meio da metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017). O método utilizado para análise do boro foi água quente e os demais micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) foram extraídos pelo método DTPA, conforme descrito por Lindsay e Norwell (1978).

#### 6.5 Estoques de carbono orgânico do solo

As determinações do teor de carbono orgânico total (C) foram realizadas por combustão a seco usando analisador elementar marca Leco, modelo Truspec CN. Os estoques de carbono (EC) foram calculados para as mesmas profundidades das análises dos atributos

físicos (0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 e 0,60-1,00 m) e para as profundidades acumuladas até 1,0 m. Foram corrigidas em massa equivalente, usando os resultados das análises de caracterização da área em 2017 como referência, considerando que haja variações de densidade nas diferentes áreas de estudo, usando equação proposta por Bayer *et al.* (2000). O EC em cada uma das camadas amostradas foi estimado a partir da Equação 1.

$$EC = (C \times Ds \times h)/10 \quad (1)$$

em que, o EC = carbono acumulado (Mg ha<sup>-1</sup>); C = teor de carbono na camada (g kg<sup>-1</sup>); Ds = densidade do solo (kg dm<sup>-3</sup>); h = espessura da camada em análise, em metro.

## 6.6 Desenvolvimento vegetativo das plantas

Foram adotadas três variáveis sendo elas altura da planta, diâmetro do caule e diâmetro da copa, para avaliar o desenvolvimento vegetativo das variedades de citros e das plantas de sombreamento. A altura das plantas foi medida em distância vertical do solo até o ponto mais alto da planta. O diâmetro da copa foi medido no sentido paralelo e perpendicular à linha de plantio e estimada a média, sendo que estas medidas foram realizadas com régua graduada, em centímetro. O diâmetro do caule foi medido com paquímetro, em milímetro, na base das plantas, a 0,3 m acima do solo. Quando as plantas atingiram mais de 2,0 m de altura passaram a ser medidas com clinômetro digital Haglof.

Adicionalmente, foi calculado o índice de vigor vegetativo (IVV) das plantas de citros, conforme Bordignon *et al.* (2003), segundo a fórmula:

$$IVV = [altura + diâmetro da copa + 10(diâmetro do caule)]/100 \quad (2)$$

Foram realizadas medições trimestrais nas plantas de citros (oito variedades), com amostragem de duas plantas por variedade em cada parcela, somando 16 plantas por parcela e 192 plantas no total. Nas plantas de sombreamento (nove espécies) foram realizadas medições semestrais, com amostragem de duas plantas por espécie em cada parcela, somando 18 plantas por parcela e 162 plantas no total.

### **6.7 Radiação solar fotossinteticamente ativa**

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foi medida nas linhas de citros, em todas as parcelas, com o auxílio do sensor QSO-S RFA que mede o Fluxo de Fótons Fotossintéticos (FFF) em  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de um campo de visão de 180 graus. Foram realizadas 4 medições por planta, no sentido norte, sul, leste e oeste, em duas plantas por variedade em cada parcela, somando 16 plantas por parcela e 192 plantas no total.

### **6.8 Produtividade dos citros**

As laranjas valência e rubi, as tangerinas cravo e murcote e a mexerica rio não tiveram uma produção significativa neste período, sendo necessário realizar derriça em frutos verdes para estimar a produção. A derriça ocorreu em dezembro de 2021, para isto, foi realizada uma amostragem de três plantas, de cada uma das cinco variedades de citros, por parcela, somando 15 plantas por parcela, em um total de 180 plantas colhidas. A derriça foi realizada manualmente, contando os frutos separadamente por variedade e tratamento. O número de frutos por planta foi multiplicado pelo peso médio do fruto de cada variedade, para obter o peso médio de frutos por planta, posteriormente esse valor foi multiplicado pelo número de plantas produtivas em cada tratamento e então estimada a produtividade em toneladas de frutos por hectare.

O limão caviar não apresentou produção no período de estudo. A produtividade dos limões siciliano e cravo não foi registrada por não apresentar produção no momento da derriça dos frutos. A produção do limão tahiti não foi contabilizada por se tratar de bordadura do experimento.

### **6.9 Mortalidade dos citros por HLB ou Greening**

A mortalidade dos citros por HLB ou Greening foi registrada em 3 períodos, 02/06/2020, 24/03/2021 e 20/12/2021 identificando todas as plantas erradicadas por variedade, tratamento e bloco do experimento. Por se tratar de um dado relevante para a citricultura, a mortalidade do limão tahiti, bordadura do experimento, também foi registrada.

Todas as plantas erradicadas foram identificadas no croqui do experimento e posteriormente registradas em planilhas.

### **6.10 Análises estatísticas dos dados**

Os dados dos atributos físicos e químicos do solo (pH, MO, P, K, Ca, Mg, H+Al, CTC, V%, S, Na, Fe, Mn, Cu, Zn, B e RP) para as camadas de solo (0,00-0,10, 0,10-0,20 e

0,20-0,40 m) e (PT, MaP, MiP, Ds, U, C e EC), para as camadas (0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 e 0,60-1,00 m), na linha (L) e entrelinha (E), foram submetidos a análise de variância (ANOVA) para comparar os efeitos dos tratamentos nas diferentes profundidades e locais do solo. Quando o teste F foi significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Dentro da sessão da ANOVA, foi feita a análise das médias de dois fatores para  $\alpha = 0,05$  (ANOM) e teste de Tukey simultâneo para um intervalo de confiança de 95%.

Posteriormente, foi realizada uma abordagem multivariada por meio de análise de componentes principais (ACP) e análise discriminante canônica (ADC), para caracterizar e diferenciar os tratamentos. Na análise multivariada todos os tratamentos devem ter o mesmo número de amostras, assim foram utilizadas as camadas (0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) de todas as variáveis, considerando que atributos químicos do solo foram medidos somente nestas camadas.

## **CAPÍTULO 2: QUALIDADE DO SOLO NA PRODUÇÃO DE CITROS EM SISTEMA AGROFLORESTAL ORGÂNICO SOB DIFERENTES DENSIDADES ARBÓREAS EM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO**

### **Resumo**

O modelo agrícola adotado no Brasil nos últimos anos se baseia no cultivo intensivo do solo, e no uso de fertilizantes inorgânicos e agrotóxicos, resultando em compactação do solo, assoreamento, perda da fertilidade e contaminações. Assim, é premente a busca por uma agricultura mais sustentável. Os Sistemas Agroflorestais de base ecológica se apresentam como um modelo de agricultura regenerativa. Portanto, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a qualidade do solo na produção de citros em Sistemas Agroflorestais orgânicos sob diferentes densidades arbóreas. O estudo foi conduzido em condições de campo, nas dependências da Fazenda da Toca, localizada no município de Itirapina, Estado de São Paulo, Brasil. O solo da área experimental foi classificado como NEOSSOLO QUARTZARÊNICO. O experimento foi baseado no delineamento de blocos casualizados, com quatro tratamentos e três repetições, somando 12 parcelas com área útil de 4.960 m<sup>2</sup> cada e 59.520 m<sup>2</sup> no total. Os tratamentos definidos foram: T1 - Citros com densidade de 446 plantas ha<sup>-1</sup> (Citros 446); T2 - SAF citros com densidade de 713 plantas ha<sup>-1</sup> (SAF Citros 713); T3 - SAF citros com densidade de 780 plantas ha<sup>-1</sup> (SAF Citros 780) e T4 - SAF citros com densidade de 1.040 plantas ha<sup>-1</sup> (SAF Citros 1.040). As diferentes densidades dos sistemas agroflorestais foram realizadas por meio do consórcio dos citros com espécies arbóreas em diferentes espaçamentos. Para avaliação da qualidade do solo foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas linhas e entrelinhas de plantio dos citros, com três repetições por tratamento, nas profundidades 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 e 0,60-1,00 m para análise de atributos químicos e físicos. Os resultados demonstraram que os sistemas agroflorestais T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780), estocaram mais carbono no solo, na camada 0,10-0,20 m, no terceiro ano da pesquisa, quando comparados aos tratamentos T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040). O incremento médio anual de carbono orgânico, na camada de 0,00-0,10 m, no T2 (SAF Citros 713), foi de 7,51 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e no T3 (SAF Citros 780) 6,76 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, repetindo o resultado de estudos com estoque de carbono em sistemas agroflorestais em outras regiões. Os sistemas agroflorestais com densidade arbórea entre 713 e 780 plantas ha<sup>-1</sup> apresentaram tendência de melhoria da qualidade do solo, com diferenças significativas relacionadas ao maior teor de carbono orgânico, estoque de carbono e porosidade total.

**Palavras-chave:** Agricultura regenerativa, atributos do solo, estoque de carbono, citros.

## CHAPTER 2: SOIL QUALITY IN CITRUS PRODUCTION IN ORGANIC AGROFORESTRY SYSTEM UNDER DIFFERENT TREE DENSITIES IN QUARTZARENIC NEOSOL

### Abstract

The agricultural model adopted in Brazil in recent years is based on intensive soil cultivation, and the use of inorganic fertilizers and pesticides, resulting in soil compaction, silting, loss of fertility and contamination. Thus, the search for a more sustainable agriculture is urgent. Ecologically based Agroforestry Systems present themselves as a model of regenerative agriculture. Therefore, the present research aimed to evaluate soil quality in citrus production in organic Agroforestry Systems under different tree densities. The study was conducted under field conditions, on the premises of Fazenda da Toca, located in the municipality of Itirapina, State of São Paulo, Brazil. The soil of the experimental area was classified as QUARTZARENIC NEOSOL. The experiment was based on a randomized block design, with four treatments and three replications, totaling 12 plots with a useful area of 4,960 m<sup>2</sup> each and 59,520 m<sup>2</sup> in total. The treatments defined were: T1 - Citrus with a density of 446 plants ha<sup>-1</sup> (Citrus 446); T2 - AFS citrus with a density of 713 plants ha<sup>-1</sup> (SAF Citrus 713); T3 - AFS citrus with a density of 780 plants ha<sup>-1</sup> (SAF Citrus 780) and T4 - AFS citrus with a density of 1.040 plants ha<sup>-1</sup> (SAF Citrus 1.040). The different densities of the agroforestry systems were carried out by intercropping citrus with tree species at different spacings. To evaluate the soil quality, deformed and undisturbed samples were collected in the rows and between rows of citrus planting, with three replications per treatment, at depths 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, 0.40-0.60 and 0.60-1.00 m for analysis of chemical and physical attributes. The results showed that agroforestry systems T2 (SAF Citrus 713) and T3 (SAF Citrus 780) stored more carbon in the soil, in the 0.10-0.20 m layer, in the third year of the research, when compared to treatments T1 (Citrus 446) and T4 (SAF Citrus 1.040). The average annual increment of organic carbon, in the layer of 0.00-0.10 m, in T2 (SAF Citrus 713), was 7.51 Mg C ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> and in T3 (SAF Citrus 780) 6.76 Mg C ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, repeating the results of studies with carbon stock in agroforestry systems in other regions. Agroforestry systems with tree density between 713 and 780 plants ha<sup>-1</sup> showed a tendency to improve soil quality, with significant differences related to higher organic carbon content, carbon stock and total porosity.

**Key words:** Regenerative agriculture, soil attributes, carbon stock and citrus.

## 7. INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial aumentou a demanda da agricultura, que apresenta um grande potencial de degradação ambiental quando praticada de forma predatória, com manejo intensivo e inadequado do solo, prática de monocultivos, uso indiscriminado de agroquímicos, resultando em perda da produtividade agrícola, erosão do solo e até mesmo a desertificação de extensas áreas, gerando degradação ambiental acentuada (MICCOLIS *et al.*, 2016; BUENO *et al.*, 2018; ALZUBAIR *et al.*, 2020).

O relatório "Status of the World's Soil Resources" da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), apresenta que 33% dos solos do mundo estão degradados, com problemas com erosão, salinização, compactação, acidificação e contaminação. A erosão elimina 25 a 40 bilhões de toneladas de solo por ano e a acidez do solo também é um grave entrave à produção de alimentos em todo o mundo, sendo que os solos mais ácidos do mundo, decorrente de desmatamento e agricultura intensiva, estão localizados na América do Sul (FAO; ITPS, 2015).

A agricultura de base ecológica se diferencia da agricultura convencional pela promoção da melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, que refletem na melhoria da qualidade do solo e recursos hídricos (BEILEN, 2016). Portanto, é fundamental a adoção de práticas agrícolas que promovam a conservação e a utilização dos serviços ecossistêmicos para o desenvolvimento sustentável (SILVA *et al.*, 2015; BÜNEMANN *et al.*, 2018). Os Sistemas Agroflorestais (SAF) utilizam essas práticas e se baseiam em processos ecológicos, como a decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes, fluxo de energia, sucessão ecológica e estratificação, promovendo a regulação do ciclo hidrológico, controle da erosão e do assoreamento e aumento da fertilidade do solo (JUNQUEIRA *et al.*, 2013; MICCOLIS *et al.*, 2016; CHERUBIN *et al.*, 2019; CARLISLE *et al.*, 2019; EDD; YANG, 2022; LIMA *et al.*, 2022).

Para Marques *et al.* (2014) e Bueno *et al.* (2018), a qualidade do solo envolve os componentes físicos, químicos, biológicos e ecológicos, podendo ser definida como a capacidade do solo funcionar como sustento para a manutenção da qualidade ambiental, promovendo o aumento de produtividade e sustentabilidade das culturas.

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018), os NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS, apresentam textura arenosa ou franco arenosa em todos os horizontes. São essencialmente quartzosos, com baixo teor de nutrientes, elevada acidez e a predominância de argilas de baixa atividade (caulinitas e óxi-hidróxidos de Fe e Al)

(FRAZÃO *et al.*, 2008). Apresentam sérias limitações ao uso agrícola, devido à textura excessivamente arenosa, baixa fertilidade natural, toxidez por alumínio, baixa capacidade de retenção de água e elevada erodibilidade (COELHO *et al.*, 2002).

Segundo Spera *et al.* (1999) e Reichert *et al.* (2016), o uso inadequado de solos arenosos tem resultado em processos de degradação acentuados em diferentes regiões do país, elevando o potencial de desertificação destas áreas. Os autores afirmam ainda que, a capacidade de troca catiônica destes solos depende quase que exclusivamente da matéria orgânica, assim, o uso sustentável dos NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS deve ser baseado no aporte constante de matéria orgânica ao solo (DONAGEMMA *et al.*, 2016; YOST; HARTEMINK, 2019).

Atualmente, no entanto, a agropecuária nacional tem-se estabelecido nos solos arenosos, em razão dos avanços nos sistemas de produção e nas práticas agrícolas (DONAGEMMA *et al.*, 2016). Para isso, entretanto, sistemas adaptados a cada região devem ser considerados, com destaque para o sistema plantio direto (SPD) e os sistemas integrados de produção, como o de integração lavoura-pecuária (ILP), o de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o agroflorestal (SAF) (NAIR, 2011; DONAGEMMA *et al.*, 2016, BALBINO *et al.*, 2019; SARTO *et al.*, 2022).

Os Sistemas Agroflorestais podem impactar de forma substancial a qualidade do solo, interferindo nos atributos químicos, físicos e biológicos, por meio da ciclagem de nutrientes, acúmulo de matéria orgânica, aumento da porosidade do solo, da atividade biológica e estoque de carbono e, conseqüentemente, na produtividade das plantas. A presença de espécies arbóreas dentro dos Sistemas Agroflorestais pode exercer uma ação reguladora sobre o microclima, interferindo na temperatura do ar e do solo (MARIN *et al.*, 2006), contribuindo para melhoria da sua qualidade. Estudos científicos demonstram que os SAF em pleno desenvolvimento podem fixar quantidades muito significativas de carbono, pois quanto maior o metabolismo e taxa fotossintética, maior a absorção de carbono pelas plantas (STEENBOCK; VEZZANI, 2013), atuando assim como sumidouros de carbono e bancos de biodiversidade, contribuindo para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas (MONTAGNINI *et al.*, 2013).

Assim, estudos mais profundos sobre o impacto dos Sistemas Agroflorestais e diferentes densidades arbóreas na qualidade do solo, principalmente em condições tropicais, precisam ser realizados para comprovar cientificamente estes resultados. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar os atributos químicos (pH, fósforo disponível, cátions trocáveis, acidez

potencial, capacidade de troca de cátions, saturação de bases, teor de matéria orgânica e micronutrientes), físicos (granulometria, densidade e porosidade do solo, teor de água no solo e resistência do solo à penetração) e estoque de carbono no solo, em um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, com produção de citros em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas.

## 8. MATERIAL E MÉTODOS

### 8.1 Local de estudo

O estudo foi realizado em condições de campo na Fazenda da Toca, situada nas coordenadas geográficas de 22°13'36.63" de latitude sul e 47°44'56.02" de longitude oeste, com altitude aproximada de 800 m, localizada em Itirapina, São Paulo, Brasil. O clima da região é considerado tropical de altitude, com chuvas no verão e seca no inverno (Cwa) segundo a classificação de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013). O solo da área experimental foi classificado como NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018) ou, como ENTISOLS QUARTZIPSAMMENTS segundo o Soil Taxonomy System (SOIL SURVEY STAFF, 2014). A caracterização do solo da área experimental foi realizada em junho de 2017, onde foram determinados os atributos físicos do solo (Tabela 4).

**Tabela 4.** Caracterização física do solo antes da instalação do experimento, em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Profundidade     | MaP                                       | MiP                                  | PT    | DS                | RP   | TAS                 | DMP  | AG                            | AF                            | AT                            | ARG                           | SIL                           |
|------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|-------|-------------------|------|---------------------|------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                  | .....m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ..... | m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ..... | ..... | Mg m <sup>3</sup> | MPa  | kg kg <sup>-1</sup> | mm   | .....g kg <sup>-1</sup> ..... | .....g kg <sup>-1</sup> ..... | .....g kg <sup>-1</sup> ..... | .....g kg <sup>-1</sup> ..... | .....g kg <sup>-1</sup> ..... |
| <b>0,00-0,10</b> | 0,14                                      | 0,30                                 | 0,44  | 1,35              | 0,83 | 0,05                | 2,56 | 622                           | 281                           | 903                           | 76                            | 21                            |
| <b>0,10-0,20</b> | 0,14                                      | 0,28                                 | 0,42  | 1,44              | 2,45 | 0,06                | 2,43 | 607                           | 292                           | 899                           | 81                            | 20                            |
| <b>0,20-0,40</b> | 0,11                                      | 0,28                                 | 0,39  | 1,51              | 3,95 | 0,05                | 1,88 | 598                           | 298                           | 896                           | 88                            | 16                            |
| <b>0,40-0,60</b> | 0,12                                      | 0,26                                 | 0,38  | 1,49              | 3,88 | 0,05                | 1,18 | 575                           | 309                           | 884                           | 97                            | 19                            |

MaP = macroporosidade; MiP = microporosidade; PT = porosidade total; DS = densidade do solo; RP = resistência do solo à penetração; TAS = teor de água no solo; DMP = diâmetro médio ponderado; AG = areia grossa; AF = areia fina; AT = areia total; ARG = argila; SIL = silte.

Esta área foi ocupada anteriormente, no período de 2012 a 2015, por um pomar de citros manejado no sistema orgânico de produção, com insumos de base ecológica, porém, em monocultivo. A erradicação deste pomar ocorreu em 2016 com corte raso das plantas, destocagem das raízes e preparo do solo com grade aradora e grade niveladora. Em seguida, no verão 2016/2017, foi realizado plantio do feijão guandu (*Cajanus cajan*) em consórcio com o

capim Mombaça (*Megathyrsus maximus*), para descompactação do solo e produção de biomassa. Posteriormente, foi realizada a roçada da área com roçadeira “sega pasto” (marca Casale) e realizado o desenleiramento desta biomassa, no período de 2017/2018, com o desenleirador “Speedrake” (marca Kuhn), maquinário que afasta a biomassa permitindo o preparo do solo para plantio em leiras.

O preparo das linhas de plantio foi feito com equipamento “Penta” (marca Mafes). Este equipamento realizou três operações em uma: capina com enxadas rotativas; subsolagem a 0,40 m de profundidade e aplicação de calcário ( $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) misturado com fosfato natural reativo ( $500 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Após o preparo da linha foram aplicados pó de rocha basáltica produzido pelo grupo Siqueira ( $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), esterco bovino ( $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e *Azospirillum* (gênero bacteriano fixador de nitrogênio, da família Rhodospirillaceae, que promove o crescimento das plantas). O plantio das espécies arbóreas nativas e exóticas ocorreu em janeiro de 2018, com mudas em tubete do viveiro Camará, localizado em Ibaté, São Paulo. O plantio das variedades de citros ocorreu em abril de 2018, devido a atraso na entrega das mudas. Os berços de plantio das mudas foram abertos manualmente, em linha, seguindo o espaçamento descrito na Tabela 5 e nas entrelinhas de plantio foi mantido o capim Mombaça.

**Tabela 5.** Espaçamento (Esp) e número de plantas (NP), por parcela, nos tratamentos do experimento, em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Espécies    | T1        |     | T2          |     | T3         |     | T4         |     |
|-------------|-----------|-----|-------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Esp       | NP  | Esp         | NP  | Esp        | NP  | Esp        | NP  |
| Citros      | 5,6x4,0 m | 200 | 5,6x4,0 m   | 200 | 5,6x4,0 m  | 200 | 5,6x4,0 m  | 200 |
| Serviços    | -         | -   | 11,2x5,0 m  | 56  | 11,2x4,0 m | 120 | 11,2x3,0 m | 240 |
| Madeiráveis | -         | -   | 11,2x10,0 m | 48  | 11,2x8,0 m | 60  | 11,2x6,0 m | 72  |
| Total       | -         | 200 | -           | 304 | -          | 380 | -          | 512 |

T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

Foi realizada adubação de cobertura das plantas, em maio de 2018, com esterco bovino ( $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e composto ( $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e duas aplicações anuais de micronutrientes com ácido bórico ( $4,0 \text{ kg ha}^{-1}$ ), sulfato de zinco ( $2,0 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e sulfato de manganês ( $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Ainda no primeiro ano de cultivo foram realizadas uma aplicação de torta de mamona ( $630 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e duas aplicações de cama de frango ( $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

As roçadas do capim Mombaça, nas entrelinhas, ocorreram de três a quatro vezes no verão e uma vez no inverno, com posterior enleiramento do capim na linha de plantio. O aporte médio anual de matéria seca na área experimental foi em torno de  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

Foram realizadas pulverizações preventivas quinzenais alternadas para controle de Greening ou Huanglongbing (HLB) e psíldeo (*Diaphorina citri*) com: Challenger (*Isaria fumosorosea*) (100 ml ha<sup>-1</sup>) + óleo de Neem (*Azadirachta indica*) (150 ml ha<sup>-1</sup>) e Boveril (*Beauveria Bassiana*) (100 ml ha<sup>-1</sup>) + óleo de Neem (*Azadirachta indica*) (150 ml ha<sup>-1</sup>).

## 8.2 Tratamentos

O experimento possui delineamento de blocos casualizados, com quatro tratamentos e três repetições, totalizando 12 parcelas com dimensões de 62 x 80 m e área útil de 4.960 m<sup>2</sup> cada, somando 59.520 m<sup>2</sup> (Figura 12). A área experimental possui ainda uma bordadura de 25.580 m<sup>2</sup>, totalizando 85.100 m<sup>2</sup>. Os tratamentos estudados foram: T1 - Citros com densidade de 446 plantas ha<sup>-1</sup> (Citros 446); T2 - SAF citros com densidade de 713 plantas ha<sup>-1</sup> (SAF Citros 713); T3 - SAF citros com densidade de 780 plantas ha<sup>-1</sup> (SAF Citros 780) e T4 - SAF citros com densidade de 1.040 plantas ha<sup>-1</sup> (SAF Citros 1.040)

**Figura 12.** Imagem da área experimental na Fazenda da Toca, em Itirapina, São Paulo, Brasil, representando os 4 tratamentos, 3 repetições e 12 parcelas.



T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040. Fonte: Imagem Google Earth, 2018.

As oito variedades de citros estudadas foram: Laranja Valência Americana e Rubi (*Citrus sinensis* L. Osbeck), Tangerina Cravo (*Citrus tangerina* Hort. ex Tanaka), Tangerina Murcote (*Citrus reticulata* Blanco x *Citrus sinensis* Osbeck), Mexerica do Rio (*Citrus deliciosa*

Tenore), Limão Cravo (*Citrus limonia Osbeck*), Limão Siciliano (*Citrus limon*) e Limão caviar (*Citrus australasica*). A bordadura do experimento é composta por Limão Taiti (*Citrus aurantifolia*), mas por sofrer efeito de borda não foi estudado nesta pesquisa. O detalhamento do número de plantas cítricas por parcela, tratamento e total, encontra-se na Tabela 6.

**Tabela 6.** Número de plantas por parcela, tratamento e total, no experimento em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Variedade                  | Nº plantas/parcela | Nº plantas/tratamento | Nº total plantas |
|----------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| Laranja valência           | 18                 | 54                    | 216              |
| Laranja rubi               | 18                 | 54                    | 216              |
| Tangerina cravo            | 18                 | 54                    | 216              |
| Tangerina murcote          | 18                 | 54                    | 216              |
| Mexerica do rio            | 18                 | 54                    | 216              |
| Limão cravo                | 18                 | 54                    | 216              |
| Limão siciliano            | 18                 | 54                    | 216              |
| Limão caviar               | 18                 | 54                    | 216              |
| <b>Total</b>               | <b>144</b>         | <b>432</b>            | <b>1.728</b>     |
| Bordadura com limão tahiti | 56                 | 168                   | 672              |
| <b>Total geral</b>         | <b>200</b>         | <b>600</b>            | <b>2.400</b>     |

A escolha das variedades de citros buscou uma representação da citricultura brasileira, com as variedades mais cultivadas de limão, tangerina e laranja. O limão caviar foi escolhido por ser um produto diferenciado, com alto valor comercial e que no seu centro de origem (Austrália) é cultivado sob floresta.

Os citros foram consorciados com as seguintes espécies arbóreas:

- Madeiráveis: Jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*), Ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), Louro-pardo (*Cordia trichotoma*) e Peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron*).
- Serviços: Farinha Seca (*Albizia niopoides*), Inga (*Inga edulis*), Eritrina (*Erythrina speciosa*), Eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) e Gliricídia (*Gliricídia sepium*).

As espécies madeiráveis foram selecionadas com base nos critérios: crescimento vegetativo, estrato da planta, comportamento das folhas e valor de mercado. Estas plantas apresentam bom desempenho no crescimento, são do estrato alto ou emergente, evitando a competição com os citros de estrato médio, são decíduas ou semidecíduas, favorecendo a entrada de luz no sistema no inverno e possuem bom valor de mercado.

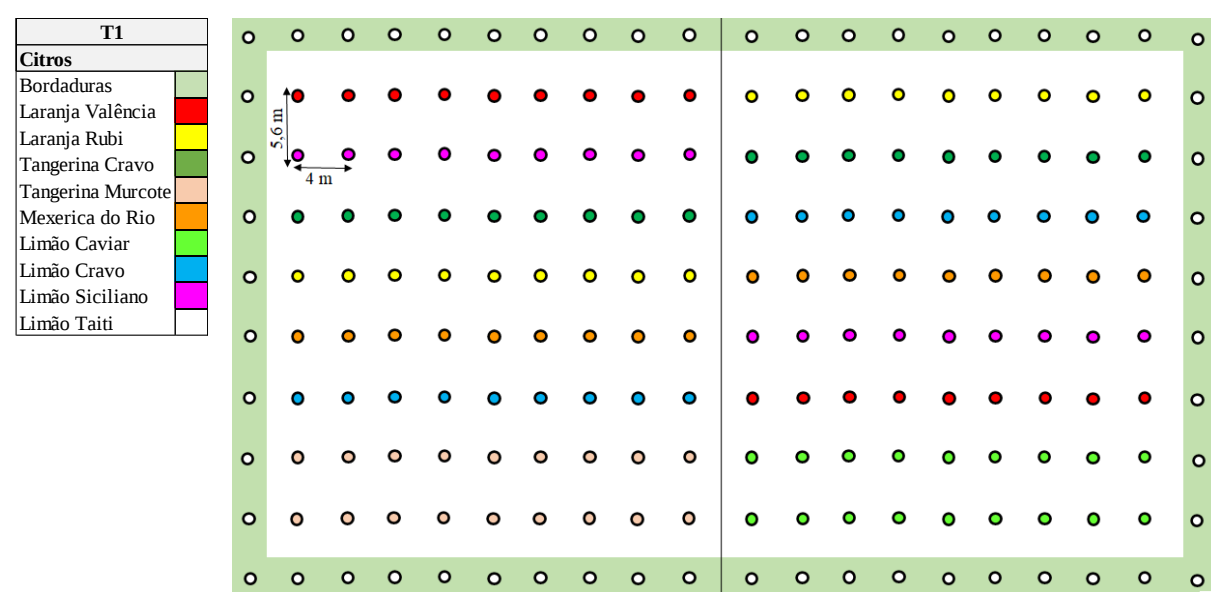
As espécies de serviço foram selecionadas com base nos critérios: crescimento vegetativo, estrato da planta, comportamento das folhas, fixação de nitrogênio e resposta a

podas. A maioria das plantas são leguminosas, possibilitando a fixação de nitrogênio do ar, decíduas, do estrato alto ou emergente, possuem rápido crescimento e toleram podas.

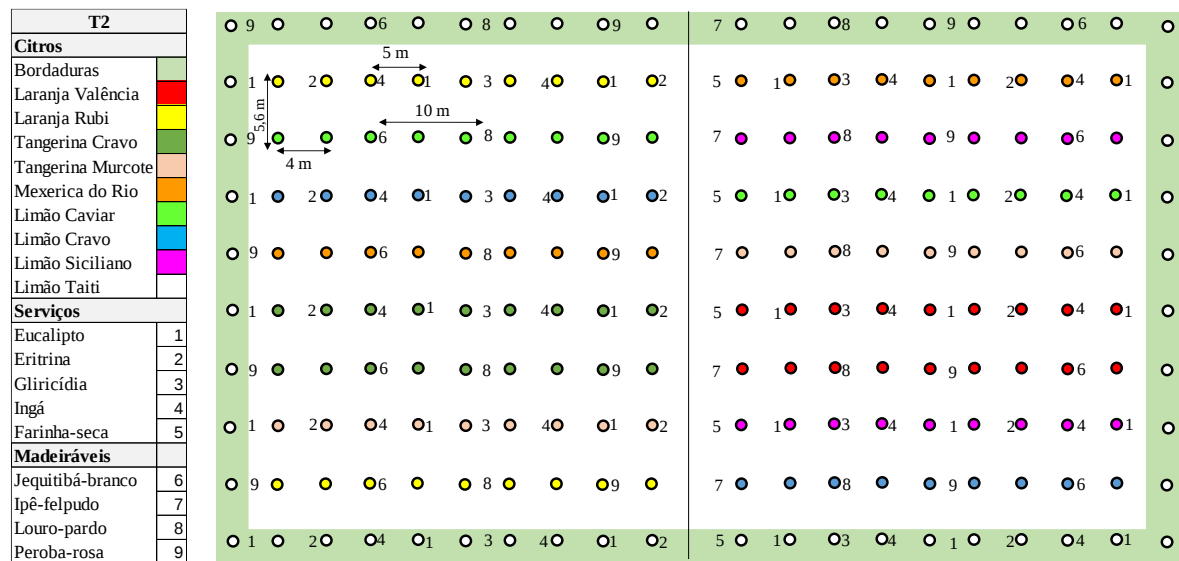
As distintas densidades arbóreas dos tratamentos tiveram o intuito de promover diferentes níveis de sombreamento natural dos citros, aumentar a produção de biomassa, propiciar o controle biológico, aumento da biodiversidade e melhoria da qualidade do solo, de forma a garantir o pleno desenvolvimento e produtividade dos citros e a diminuição do Greening ou HLB.

As Figuras 13, 14, 15 e 16 apresentam os croquis dos quatro tratamentos da pesquisa, os espaçamentos entre plantas e as variedades de citros, espécies arbóreas nativas e exóticas utilizadas nos tratamentos.

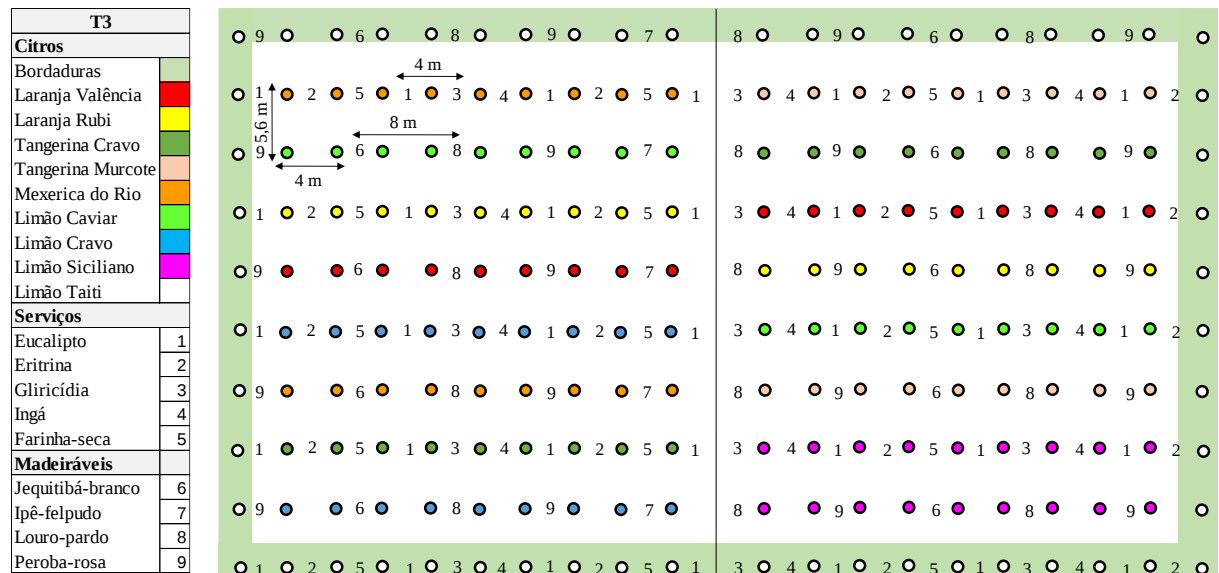
**Figura 13.** Croqui do tratamento T1 (Citros 446), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



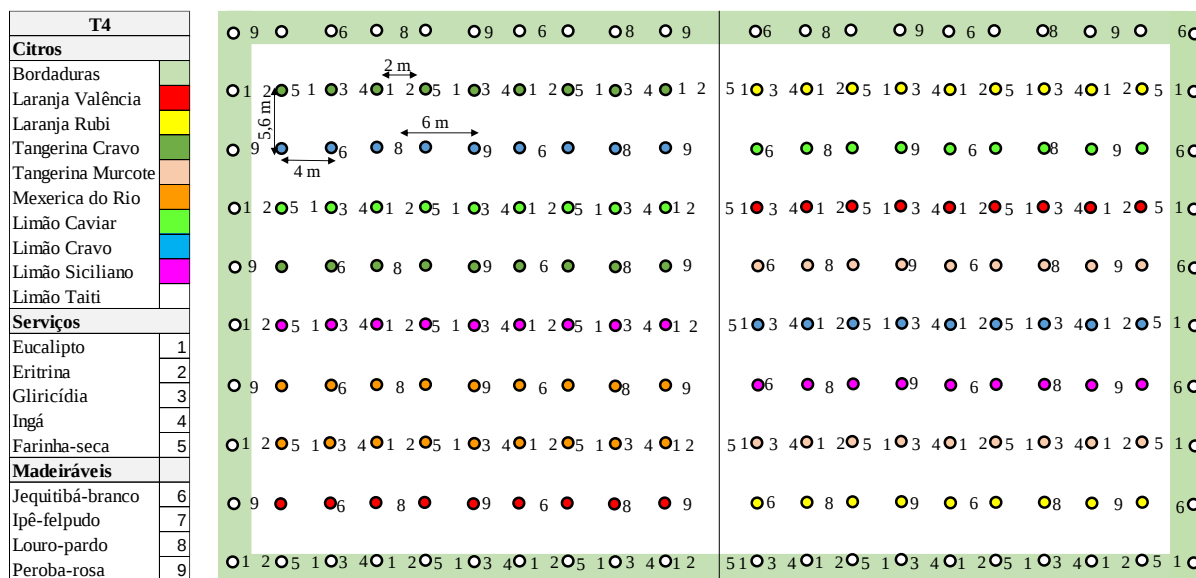
**Figura 14.** Croqui do tratamento T2 (SAF Citros 713), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



**Figura 15.** Croqui do tratamento T3 (SAF Citros 780), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



**Figura 16.** Croqui do tratamento T4 (SAF Citros 1.040), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



Para condução das plantas de sombreamento foram realizadas podas de desgalhe de todas as árvores de serviço durante o primeiro e segundo ano, retirando galhos mais baixos, além de poda apical anual nos eucaliptos, a partir do terceiro ano, no inverno e podas anuais de esqueletamento nas leguminosas (ingá, eritrina, glicíndia e farinha seca).

### 8.3 Atributos físicos do solo

Para avaliação da influência das diferentes densidades de cobertura de dossel sobre os atributos físicos do solo foram coletadas, nos três primeiros anos da pesquisa, amostras nas linhas e entrelinhas de plantio dos citros, com três repetições por tratamento. Para determinação da granulometria foram coletadas amostras deformadas, nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, somando 144 amostras. Para realização da porosidade foram coletadas amostras indeformadas, nas mesmas profundidades e quantidades. Para analisar a densidade do solo foram coletadas amostras indeformadas nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 e 0,60-1,00 m. O teor de água no solo e resistência do solo à penetração foram medidos em campo, nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Sendo que as coletas de solo foram realizadas em março de 2019 e junho de 2019 e 2021.

#### 8.3.1 Granulometria

Na análise granulométrica foram determinadas as frações de areia, silte e argila utilizando terra fina seca ao ar pelo método da pipeta com solução de Hidróxido de Sódio 0,1

(NaOH) com agente dispersante (TEIXEIRA *et al.*, 2017). As areias grossa e fina foram separadas por tamisação e o silte calculado por diferença. A granulometria do solo foi determinada apenas no primeiro ano do projeto.

### 8.3.2 Densidade e porosidade do solo

A densidade do solo foi calculada pela relação entre a massa do solo seco em estufa a 105 °C e volume da amostra (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A porosidade foi calculada a partir da mesa de tensão e a microporosidade correspondeu à umidade volumétrica da amostra submetida a uma tensão de 6 kPa. A porosidade total foi obtida pelo método direto e a macroporosidade por diferença entre a porosidade total e a microporosidade (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

### 8.3.3 Teor de água no solo e resistência do solo à penetração

O teor de água no solo foi obtido *in situ*, utilizando um sensor de umidade e temperatura do solo, TEROS 12 (Decagon Devices), acoplado a um dispositivo de leitura ProCheck (Decagon Devices). A resistência do solo à penetração foi realizada com o equipamento automatizado de compactação do solo Falker Solo Track PLG5200. Este equipamento é motorizado, permitindo maior controle na velocidade de penetração e acuracidade nas informações coletadas. A medição tem início quando a ponta do cone toca o solo e é encerrada quando são alcançados 0,60 m de profundidade, sendo que os dados são salvos na memória de modo automático. O módulo eletrônico de medição retorna à posição inicial automaticamente.

## 8.4 Atributos químicos do solo

Foram coletadas amostras deformadas de solo nas linhas e entrelinhas de plantio nas parcelas experimentais para caracterização química. As coletas foram realizadas nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, com três repetições por tratamento, somando 72 amostras anuais. As amostras foram levadas ao laboratório de solos, secas ao ar e em seguida passadas em peneira de 2,0 mm e encaminhadas para análise. Foram realizadas determinações do pH do solo ( $\text{CaCl}_2$  0,01 mol L<sup>-1</sup>), fósforo disponível, cátions trocáveis ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^{+}$ ), acidez potencial e cálculo da capacidade de troca de cátions e saturação de bases de acordo com metodologia proposta por Raij *et al.* (2001). O teor de matéria orgânica foi obtido por meio da metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017). O método utilizado para

análise do boro foi água quente e os demais micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) foram extraídos pelo método DTPA, conforme descrito por Lindsay e Norwell (1978).

### 8.5 Teores de carbono orgânico e estoques de carbono do solo

As determinações do teor de carbono orgânico total (C) foram realizadas por combustão a seco usando analisador elementar marca Leco, modelo Truspec CN. Os estoques de carbono (EC) foram calculados para as mesmas profundidades das análises dos atributos físicos (0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 e 0,60-1,00 m) e para as profundidades acumuladas até 1,0 m. Foram corrigidas em massa equivalente, usando os resultados das análises de caracterização da área em 2017 como referência, considerando que haja variações de densidade nas diferentes áreas de estudo, usando equação proposta por Bayer *et al.* (2000). O EC em cada uma das camadas amostradas foi estimado a partir da Equação 3.

$$EC = (C \times Ds \times h) / 10 \quad (3)$$

em que, o EC = carbono acumulado (Mg ha<sup>-1</sup>); C = teor de carbono na camada (g kg<sup>-1</sup>); Ds = densidade do solo (kg dm<sup>-3</sup>); h = espessura da camada em análise, em metro.

### 8.6 Análises estatísticas

Os dados dos atributos do solo (pH, MO, P, K, Ca, Mg, H+Al, CTC, V%, S, Na, Fe, Mn, Cu, Zn, B e RP) para as camadas de solo (0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) e (PT, MaP, MiP, Ds, U, C e EC), para as camadas (0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 e 0,60-1,00 m), na linha (L) e entrelinha (E), foram submetidos a análise de variância (ANOVA) para comparar os efeitos dos tratamentos nas diferentes profundidades e locais do solo. Quando o teste F foi significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Dentro da sessão da ANOVA, foi feita a análise das médias de dois fatores para alpha = 0,05 (ANOM) e teste de Tukey simultâneo para um intervalo de confiança de 95%.

Posteriormente, foi realizada uma abordagem multivariada por meio de análise de componentes principais (ACP) e análise discriminante canônica (ADC), para caracterizar e diferenciar os tratamentos. Na análise multivariada todos os tratamentos devem ter o mesmo número de amostras, assim foram utilizadas as camadas (0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) de todas as variáveis, considerando que atributos químicos do solo foram medidos somente nestas camadas.

Em uma primeira etapa foi calculada uma matriz de correlação linear de Pearson, a partir da matriz de resíduos, com o objetivo de individualizar informações redundantes ou semelhantes, bem como informações diferentes ou únicas.

As variáveis dentro do conjunto de dados têm variâncias e unidades diferentes, portanto, para evitar a dominância da variável de maior variância foram utilizados os dados padronizados das variáveis selecionadas (pH, MO, P, K, Ca, Mg, H+Al, CTC, V%, S, Na, Fe, Mn, Cu, Zn, B, PT, MaP, MiP, Ds, U, RP, C e EC), resultando em valores relativos com média nula e variância unitária. A não padronização das variáveis pode resultar em inconsistências nos resultados, uma vez que a maioria das medidas de distância são muito sensíveis a diferentes escalas ou magnitudes das variáveis.

Posteriormente, foi realizada a ACP a qual cria variáveis não correlacionadas denominadas componentes principais (CPs) que são combinações lineares das variáveis brutas originais e que maximizam a variabilidade explicada pelo conjunto de variáveis (JOHNSON, 1998). Os valores e os vetores próprios foram extraídos da matriz de correlação em vez da matriz de covariância, por conseguinte, os componentes principais (PCs) mantidos foram selecionados com base nos autovalores maiores que 1 e na proporção da variabilidade total explicada pelos CPs (KAISER, 1958).

Além disso, foi realizada a análise discriminante canônica com o intuito de agrupar e reduzir as variáveis originais em variáveis canônicas e examinar as relações das variáveis e as diferenças dos tratamentos em uma abordagem multivariada. Assim, foi possível reduzir as variáveis em apenas duas variáveis canônicas (CAN1 e CAN2) que contêm as informações dos atributos do solo originais e que explicam a alta variabilidade experimental. Os valores médios das variáveis canônicas para cada tratamento foram comparados por elipses de confiança para os vetores de médias de 95%. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SAS 3.8, versão livre e software Minitab, versão 18.1.

## **9. RESULTADOS**

### **9.1 Atributos físicos do solo**

#### **9.1.1 Densidade e porosidade do solo**

A densidade do solo não apresentou diferença estatística significativa nos diferentes tratamentos e profundidades, nos anos de 2019, 2020 e 2021 (Tabela 7). A menor densidade foi de 1,39 kg dm<sup>-3</sup> no T1 (Citros 446), na camada 0,00-0,10 m e na linha de plantio, em 2019 e a maior densidade de 1,76 kg dm<sup>-3</sup> no T3 (SAF Citros 780), na camada 0,20-0,40 m, na linha, em 2021.

**Tabela 7.** Densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| TTO         | 0,00-0,10 |    | 0,10-0,20 |    | 0,20-0,40 |    | 0,40-0,60 |    | 0,60-1,00 |    |
|-------------|-----------|----|-----------|----|-----------|----|-----------|----|-----------|----|
|             | L         | E  | L         | E  | L         | E  | L         | E  | L         | E  |
| <b>2019</b> |           |    |           |    |           |    |           |    |           |    |
| T1          | 1,39      | Aa | 1,62      | Aa | 1,64      | Aa | 1,62      | Aa | 1,65      | Aa |
| T2          | 1,43      | Aa | 1,55      | Aa | 1,44      | Aa | 1,62      | Aa | 1,59      | Aa |
| T3          | 1,44      | Aa | 1,50      | Aa | 1,47      | Aa | 1,59      | Aa | 1,65      | Aa |
| T4          | 1,56      | Aa | 1,60      | Aa | 1,56      | Aa | 1,68      | Aa | 1,67      | Aa |
| Média       | 1,45      |    | 1,57      |    | 1,53      |    | 1,63      |    | 1,64      |    |
| <b>2020</b> |           |    |           |    |           |    |           |    |           |    |
| T1          | 1,45      | Aa | 1,65      | Ab | 1,66      | Aa | 1,66      | Aa | 1,69      | Aa |
| T2          | 1,45      | Aa | 1,62      | Aa | 1,56      | Aa | 1,68      | Aa | 1,64      | Aa |
| T3          | 1,46      | Aa | 1,57      | Aa | 1,67      | Aa | 1,64      | Aa | 1,68      | Aa |
| T4          | 1,46      | Aa | 1,67      | Aa | 1,61      | Aa | 1,67      | Aa | 1,71      | Aa |
| Média       | 1,46      |    | 1,63      |    | 1,63      |    | 1,66      |    | 1,67      |    |
| <b>2021</b> |           |    |           |    |           |    |           |    |           |    |
| T1          | 1,55      | Aa | 1,69      | Ab | 1,70      | Aa | 1,74      | Aa | 1,68      | Aa |
| T2          | 1,46      | Aa | 1,66      | Aa | 1,62      | Aa | 1,68      | Aa | 1,70      | Aa |
| T3          | 1,45      | Aa | 1,58      | Aa | 1,70      | Aa | 1,68      | Aa | 1,76      | Aa |
| T4          | 1,45      | Aa | 1,71      | Ab | 1,68      | Aa | 1,61      | Aa | 1,69      | Aa |
| Média       | 1,48      |    | 1,66      |    | 1,68      |    | 1,71      |    | 1,68      |    |

TTO = tratamento; T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L = linha; E = entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical ou por letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

Na linha, considerando a média dos tratamentos, a densidade do solo aumentou ao longo dos anos 2019, 2020 e 2021, apresentando na camada de 0,00-0,10 m valores de 1,45, 1,46 e 1,48  $\text{kg dm}^{-3}$ , respectivamente, 1,53, 1,63 e 1,68  $\text{kg dm}^{-3}$  na profundidade 0,10-0,20 m, respectivamente, 1,64, 1,68 e 1,71  $\text{kg dm}^{-3}$  na profundidade 0,20-0,40 m, respectivamente, 1,66, 1,70 e 1,72  $\text{kg dm}^{-3}$  na profundidade 0,40-0,60 m, respectivamente e 1,60, 1,64 e 1,66  $\text{kg dm}^{-3}$  na profundidade 0,60-1,00 m, respectivamente (Tabela 7). Na entrelinha, considerando a média dos tratamentos, a densidade aumentou nos três anos, apresentando na camada 0,00-0,10 m os valores de 1,57, 1,63 e 1,66  $\text{kg dm}^{-3}$ , respectivamente, 1,63, 1,66 e 1,73  $\text{kg dm}^{-3}$  na profundidade 0,10-0,20 m, respectivamente e 1,63, 1,65 e 1,67  $\text{kg dm}^{-3}$  na profundidade 0,40-0,60 m, respectivamente. Manteve valores semelhantes nas camadas de 0,20-0,40 m com 1,69, 1,67 e 1,68  $\text{kg dm}^{-3}$ , respectivamente e com 1,62, 1,61 e 1,63  $\text{kg dm}^{-3}$  na profundidade 0,60-1,00 m, respectivamente.

Considerando os valores médios dos tratamentos e anos, na linha, a camada 0,00-0,10 m apresentou a menor Ds (1,46  $\text{kg dm}^{-3}$ ) (Tabela 7). As camadas de 0,10-0,20 m e 0,60-

1,0 m apresentaram valores intermediários de Ds, 1,61 e 1,63 kg dm<sup>-3</sup>, respectivamente e as camadas 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m os maiores valores médios de Ds (1,67 e 1,69 kg dm<sup>-3</sup>, respectivamente). Na mesma interação, na entrelinha, as camadas 0,00-0,10 m e 0,60-1,0 m apresentaram a menor Ds de 1,62 kg dm<sup>-3</sup>, a camada 0,40-0,60 m apresentou valor intermediário de Ds (1,65 kg dm<sup>-3</sup>) e as camadas 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m os maiores valores médios de Ds 1,67 e 1,68 kg dm<sup>-3</sup>, respectivamente. A média da Ds foi menor na linha do que na entrelinha nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m e semelhante nas demais camadas.

Comparando os locais de amostragem (linha e entrelinha), dentro do mesmo tratamento, a densidade do solo apresentou diferença significativa no ano 2019, na camada 0,60-1,00 m no tratamento T1 (Citros 446) o valor de 1,57 kg dm<sup>-3</sup> na linha e 1,65 kg dm<sup>-3</sup> na entrelinha (Tabela 7). No ano 2020 as diferenças foram obtidas na camada 0,00-0,10 m do mesmo tratamento (1,45 kg dm<sup>-3</sup> na linha e 1,65 kg dm<sup>-3</sup> na entrelinha) e na camada 0,40-0,60 m do tratamento T3 (SAF Citros 780) de 1,75 kg dm<sup>-3</sup> na entrelinha e 1,64 kg dm<sup>-3</sup> na linha. Em 2021, diferenças foram constatadas no tratamento T1 (Citros 446) na camada de 0,00-0,10 m (1,55 kg dm<sup>-3</sup> na linha e 1,68 kg dm<sup>-3</sup> na entrelinha) e no tratamento T4 (SAF Citros 1.040) na mesma camada de solo (1,45 kg dm<sup>-3</sup> na linha e 1,70 kg dm<sup>-3</sup> na entrelinha).

A macroporosidade (MaP) não apresentou diferença estatística significativa entre os tratamentos, nas diferentes profundidades, nos anos de 2019, 2020 e 2021 (Tabela 8). O maior valor de MaP foi de 0,18 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> no tratamento T2 (SAF Citros 713), em 2019, na camada 0,00-0,10 m na linha, enquanto o menor valor foi de 0,02 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> em 2021, no tratamento T3 (SAF Citros 780), na camada 0,40-0,60 m na linha e entrelinha e T1 (Citros 446), na camada 0,10-0,20 m na linha.

Considerando a média de todos os tratamentos para a macroporosidade, na linha, diminuiu ao longo dos anos 2019, 2020 e 2021, apresentando na camada 0,00-0,10 m (0,16, 0,12 e 0,07 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente), de 0,10-0,20 m (0,15, 0,09 e 0,04 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente), 0,20-0,40 m (0,13, 0,08 e 0,04 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente), 0,40-0,60 m (0,11, 0,07 e 0,04 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente) e 0,60-1,0 m (0,11, 0,08 e 0,04 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente). Na entrelinha, a MaP diminuiu ao longo dos anos apresentando nas camadas de 0,00-0,10 m (0,13, 0,07 e 0,05 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente), 0,10-0,20 m (0,12, 0,06 e 0,05 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente), 0,20-0,40 m (0,12, 0,08 e 0,05 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente), 0,40-0,60 m (0,11, 0,09 e 0,06 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente) e 0,60-1,0 m (0,11, 0,09 e 0,05 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente).

**Tabela 8.** Macroporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| TTO         | 0,00-0,10 |    | 0,10-0,20 |    | 0,20-0,40 |    | 0,40-0,60 |    | 0,60-1,00 |    |
|-------------|-----------|----|-----------|----|-----------|----|-----------|----|-----------|----|
|             | L         | E  | L         | E  | L         | E  | L         | E  | L         | E  |
| <b>2019</b> |           |    |           |    |           |    |           |    |           |    |
| T1          | 0,17      | Aa | 0,11      | Ab | 0,10      | Aa | 0,10      | Aa | 0,13      | Aa |
| T2          | 0,19      | Aa | 0,13      | Aa | 0,18      | Aa | 0,12      | Aa | 0,15      | Aa |
| T3          | 0,18      | Aa | 0,16      | Aa | 0,19      | Aa | 0,14      | Aa | 0,12      | Aa |
| T4          | 0,14      | Aa | 0,12      | Aa | 0,15      | Aa | 0,14      | Aa | 0,13      | Aa |
| Média       | 0,17      |    | 0,13      |    | 0,15      |    | 0,12      |    | 0,11      |    |
| <b>2020</b> |           |    |           |    |           |    |           |    |           |    |
| T1          | 0,08      | Aa | 0,08      | Aa | 0,08      | Aa | 0,08      | Aa | 0,07      | Aa |
| T2          | 0,12      | Aa | 0,03      | Aa | 0,09      | Aa | 0,03      | Ab | 0,08      | Aa |
| T3          | 0,14      | Aa | 0,08      | Aa | 0,07      | Aa | 0,08      | Aa | 0,09      | Aa |
| T4          | 0,15      | Aa | 0,10      | Aa | 0,16      | Aa | 0,05      | Aa | 0,10      | Aa |
| Média       | 0,12      |    | 0,07      |    | 0,10      |    | 0,06      |    | 0,09      |    |
| <b>2021</b> |           |    |           |    |           |    |           |    |           |    |
| T1          | 0,03      | Aa | 0,03      | Aa | 0,02      | Aa | 0,04      | Aa | 0,04      | Aa |
| T2          | 0,09      | Aa | 0,05      | Aa | 0,04      | Aa | 0,05      | Aa | 0,06      | Aa |
| T3          | 0,07      | Aa | 0,04      | Ab | 0,03      | Aa | 0,03      | Aa | 0,04      | Aa |
| T4          | 0,11      | Aa | 0,08      | Aa | 0,07      | Aa | 0,08      | Aa | 0,06      | Aa |
| Média       | 0,08      |    | 0,05      |    | 0,04      |    | 0,05      |    | 0,05      |    |

TTO = tratamento; T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L = linha; E = entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical ou por letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

Comparando a macroporosidade na linha e entrelinha (Tabela 8), no mesmo tratamento, houve diferença com significância estatística em 2019, na camada 0,00-0,10 m, no tratamento T1 (Citros 446) com  $0,17 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na linha e  $0,11 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na entrelinha, em 2020, na camada 0,00-0,10 m, no tratamento T1 (Citros 446) com  $0,17 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na linha e entrelinha e na camada 0,10-0,20 m, no tratamento T2 (SAF Citros 713) com  $0,09 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na linha e  $0,03 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na entrelinha e em 2021, na camada de 0,00-0,10 m, no tratamento T3 (SAF Citros 780) com  $0,07 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na linha e  $0,04 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na entrelinha.

A microporosidade (MiP) não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, nas diferentes profundidades, nos anos de 2019, 2020 e 2021 (Tabela 9). Considerando a média dos tratamentos, a MiP aumentou ao longo dos anos nas camadas e locais, com exceção das camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m, na entrelinha em 2021.

**Tabela 9.** Microporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| TTO         | 0,00-0,10 |    | 0,10-0,20 |    | 0,20-0,40 |    | 0,40-0,60 |    | 0,60-1,00 |    |
|-------------|-----------|----|-----------|----|-----------|----|-----------|----|-----------|----|
|             | L         | E  | L         | E  | L         | E  | L         | E  | L         | E  |
| <b>2019</b> |           |    |           |    |           |    |           |    |           |    |
| T1          | 0,26      | Aa | 0,25      | Aa | 0,26      | Aa | 0,26      | Aa | 0,23      | Aa |
| T2          | 0,26      | Ab | 0,27      | Aa | 0,25      | Aa | 0,26      | Aa | 0,23      | Aa |
| T3          | 0,24      | Aa | 0,25      | Aa | 0,23      | Aa | 0,22      | Aa | 0,20      | Aa |
| T4          | 0,28      | Aa | 0,25      | Aa | 0,24      | Aa | 0,23      | Aa | 0,24      | Aa |
| Média       | 0,26      |    | 0,25      |    | 0,24      |    | 0,24      |    | 0,22      |    |
| <b>2020</b> |           |    |           |    |           |    |           |    |           |    |
| T1          | 0,37      | Aa | 0,36      | Aa | 0,33      | Aa | 0,28      | Aa | 0,26      | Aa |
| T2          | 0,33      | Aa | 0,37      | Aa | 0,29      | Ab | 0,31      | Aa | 0,29      | Aa |
| T3          | 0,33      | Aa | 0,34      | Aa | 0,31      | Aa | 0,30      | Aa | 0,27      | Aa |
| T4          | 0,35      | Aa | 0,35      | Aa | 0,31      | Aa | 0,30      | Aa | 0,29      | Aa |
| Média       | 0,34      |    | 0,35      |    | 0,31      |    | 0,30      |    | 0,28      |    |
| <b>2021</b> |           |    |           |    |           |    |           |    |           |    |
| T1          | 0,38      | Aa | 0,33      | Aa | 0,32      | Aa | 0,31      | Aa | 0,33      | Aa |
| T2          | 0,37      | Aa | 0,33      | Ab | 0,35      | Aa | 0,33      | Aa | 0,31      | Aa |
| T3          | 0,38      | Aa | 0,34      | Aa | 0,34      | Aa | 0,32      | Aa | 0,32      | Aa |
| T4          | 0,35      | Aa | 0,28      | Aa | 0,32      | Aa | 0,26      | Aa | 0,28      | Aa |
| Média       | 0,37      |    | 0,32      |    | 0,34      |    | 0,30      |    | 0,31      |    |

TTO = tratamento; T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L = linha; E = entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical ou por letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

Comparando a linha e entrelinha, no mesmo tratamento, houve diferença significativa em 2019, na camada de 0,00-0,10 m, no tratamento T2 (SAF Citros 713) com  $0,26 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na linha e  $0,27 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na entrelinha, em 2020, na camada 0,10-0,20 m, no tratamento T2 (SAF Citros 713) com  $0,29 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na linha e  $0,31 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na entrelinha e em 2021, na camada 0,00-0,10 m, no tratamento T2 (SAF Citros 713) com  $0,37 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na linha e  $0,33 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na entrelinha (Tabela 9).

A porosidade total (PT) apresentou diferença estatística significativa entre os tratamentos no ano de 2021, na camada de 0,00-0,10 m na linha, sendo que o tratamento T2 (SAF Citros 713) com  $0,46 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  foi maior que o tratamento T1 (Citros 446) com  $0,41 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  (Tabela 10). Os tratamentos T3 (SAF Citros 780) e T4 (SAF Citros 1.040) apresentaram a mesma PT de  $0,45 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ . No ano de 2019 e 2020 não houve diferença significativa entre os tratamentos e profundidades.

**Tabela 10.** Porosidade total ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| TTO         | 0,00-0,10 |     | 0,10-0,20 |    | 0,20-0,40 |    | 0,40-0,60 |    | 0,60-1,00 |    |
|-------------|-----------|-----|-----------|----|-----------|----|-----------|----|-----------|----|
|             | L         | E   | L         | E  | L         | E  | L         | E  | L         | E  |
| <b>2019</b> |           |     |           |    |           |    |           |    |           |    |
| T1          | 0,43      | Aa  | 0,37      | Ab | 0,36      | Aa | 0,36      | Aa | 0,35      | Aa |
| T2          | 0,44      | Aa  | 0,39      | Aa | 0,43      | Aa | 0,38      | Aa | 0,38      | Aa |
| T3          | 0,42      | Aa  | 0,41      | Aa | 0,42      | Aa | 0,36      | Aa | 0,33      | Aa |
| T4          | 0,41      | Aa  | 0,37      | Aa | 0,39      | Aa | 0,37      | Aa | 0,35      | Aa |
| Média       | 0,43      |     | 0,38      |    | 0,40      |    | 0,37      |    | 0,36      |    |
| <b>2020</b> |           |     |           |    |           |    |           |    |           |    |
| T1          | 0,45      | Aa  | 0,43      | Aa | 0,40      | Aa | 0,36      | Aa | 0,33      | Aa |
| T2          | 0,45      | Aa  | 0,40      | Aa | 0,39      | Aa | 0,35      | Aa | 0,37      | Aa |
| T3          | 0,47      | Aa  | 0,42      | Aa | 0,37      | Aa | 0,38      | Aa | 0,37      | Aa |
| T4          | 0,51      | Aa  | 0,45      | Aa | 0,46      | Aa | 0,35      | Aa | 0,39      | Aa |
| Média       | 0,47      |     | 0,42      |    | 0,41      |    | 0,36      |    | 0,36      |    |
| <b>2021</b> |           |     |           |    |           |    |           |    |           |    |
| T1          | 0,41      | Ba  | 0,35      | Aa | 0,35      | Aa | 0,35      | Aa | 0,37      | Aa |
| T2          | 0,46      | Aa  | 0,38      | Ab | 0,40      | Aa | 0,38      | Aa | 0,36      | Aa |
| T3          | 0,45      | ABa | 0,38      | Aa | 0,37      | Aa | 0,34      | Aa | 0,36      | Aa |
| T4          | 0,45      | ABa | 0,36      | Ab | 0,39      | Aa | 0,34      | Ab | 0,33      | Ab |
| Média       | 0,41      |     | 0,37      |    | 0,38      |    | 0,35      |    | 0,36      |    |

TTO = tratamento; T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L = linha; E = entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical ou por letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

Comparando a PT na linha e entrelinha, no mesmo tratamento, houve diferença com significância estatística em 2019, na camada 0,00-0,10 m, no tratamento T1 (Citros 446) com  $0,43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na linha e  $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na entrelinha e na camada 0,40-0,60 m, no tratamento T2 (SAF Citros 713) com  $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na linha e  $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na entrelinha (Tabela 10). Em 2021, na camada 0,40-0,60 m, no tratamento T1 (Citros 446) com  $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na linha e  $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na entrelinha, no tratamento T2 (SAF Citros 713) na camada 0,00-0,10 m,  $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na linha e  $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na entrelinha, no tratamento T4 (SAF Citros 1.040), na camada 0,00-0,10 m com  $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na linha e  $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na entrelinha, na camada 0,10-0,20 m com  $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na linha e  $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na entrelinha e na camada 0,20-0,40 m com  $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na linha e  $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na entrelinha.

### 9.1.2 Teor de água no solo e resistência do solo à penetração

Nos três anos de avaliação o teor de água no solo, que foi medido no mesmo momento da resistência do solo à penetração, não apresentou diferença significativa entre os

tratamentos e camadas (Tabela 11). Na média geral dos resultados, considerando todos os tratamentos, profundidades e locais, o teor de água no solo em 2019 foi significativamente maior do que em 2020 e 2021 (Figura 17). No entanto, a coleta de solo realizada em 2019 ocorreu no período das águas (março), enquanto as demais ocorreram no período da seca (junho), motivo provável da diferença entre os anos.

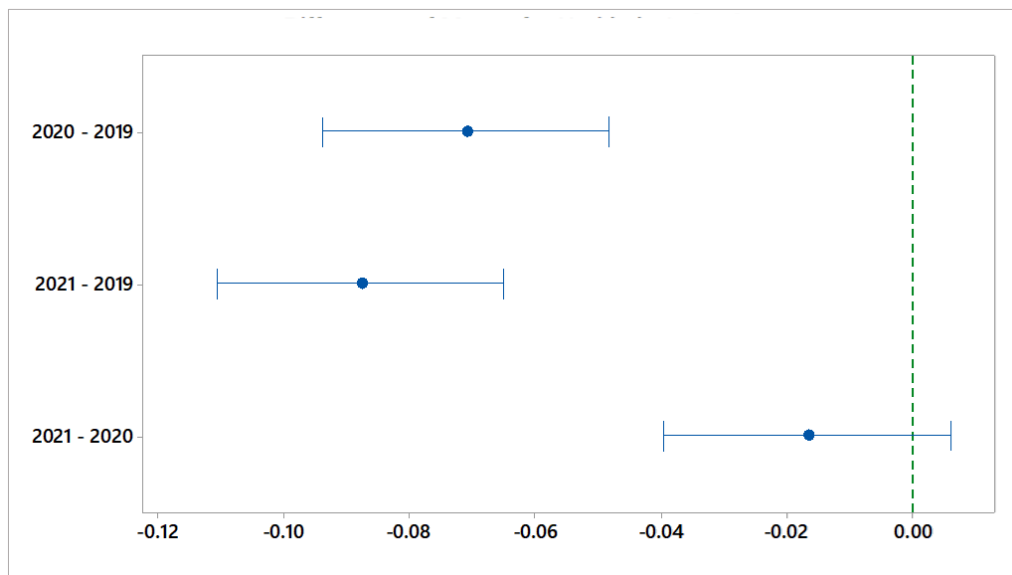
**Tabela 11.** Teor de água no solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| TTO   | 0,00-0,10 |    |      |    | 0,10-0,20 |    |      |    | 0,20-0,40 |    |      |    | 0,40-0,60 |    |      |    | 0,60-1,00 |    |      |    |  |
|-------|-----------|----|------|----|-----------|----|------|----|-----------|----|------|----|-----------|----|------|----|-----------|----|------|----|--|
|       | L         |    | E    |    | L         |    | E    |    | L         |    | E    |    | L         |    | E    |    | L         |    | E    |    |  |
| 2019  |           |    |      |    |           |    |      |    |           |    |      |    |           |    |      |    |           |    |      |    |  |
| T1    | 0,22      | Ab | 0,23 | Aa | 0,21      | Aa | 0,22 | Aa | 0,21      | Aa | 0,22 | Aa | 0,21      | Aa | 0,21 | Aa | 0,22      | Aa | 0,23 | Aa |  |
| T2    | 0,23      | Aa | 0,23 | Aa | 0,22      | Aa | 0,22 | Aa | 0,22      | Aa | 0,22 | Aa | 0,23      | Aa | 0,24 | Aa | 0,24      | Aa | 0,24 | Aa |  |
| T3    | 0,25      | Aa | 0,26 | Aa | 0,25      | Aa | 0,23 | Aa | 0,24      | Aa | 0,25 | Aa | 0,27      | Aa | 0,29 | Aa | 0,27      | Aa | 0,30 | Aa |  |
| T4    | 0,25      | Ab | 0,26 | Aa | 0,23      | Aa | 0,23 | Aa | 0,24      | Aa | 0,23 | Aa | 0,24      | Aa | 0,24 | Aa | 0,24      | Aa | 0,24 | Aa |  |
| Média | 0,24      |    | 0,25 |    | 0,23      |    | 0,23 |    | 0,23      |    | 0,23 |    | 0,24      |    | 0,24 |    | 0,24      |    | 0,25 |    |  |
| 2020  |           |    |      |    |           |    |      |    |           |    |      |    |           |    |      |    |           |    |      |    |  |
| T1    | 0,24      | Aa | 0,09 | Aa | 0,24      | Aa | 0,12 | Aa | 0,23      | Aa | 0,13 | Aa | 0,21      | Aa | 0,11 | Ab | 0,22      | Aa | 0,11 | Ab |  |
| T2    | 0,23      | Aa | 0,11 | Ab | 0,20      | Aa | 0,12 | Aa | 0,20      | Aa | 0,13 | Aa | 0,23      | Aa | 0,12 | Ab | 0,22      | Aa | 0,13 | Ab |  |
| T3    | 0,18      | Aa | 0,10 | Aa | 0,19      | Aa | 0,10 | Aa | 0,20      | Aa | 0,08 | Aa | 0,23      | Aa | 0,08 | Aa | 0,26      | Aa | 0,07 | Aa |  |
| T4    | 0,20      | Aa | 0,13 | Aa | 0,22      | Aa | 0,15 | Ab | 0,22      | Aa | 0,15 | Aa | 0,22      | Aa | 0,14 | Ab | 0,20      | Aa | 0,11 | Ab |  |
| Média | 0,21      |    | 0,11 |    | 0,21      |    | 0,12 |    | 0,21      |    | 0,12 |    | 0,22      |    | 0,11 |    | 0,22      |    | 0,10 |    |  |
| 2021  |           |    |      |    |           |    |      |    |           |    |      |    |           |    |      |    |           |    |      |    |  |
| T1    | 0,14      | Aa | 0,09 | Aa | 0,19      | Aa | 0,06 | Aa | 0,23      | Aa | 0,06 | Aa | 0,21      | Aa | 0,05 | Aa | 0,20      | Aa | 0,10 | Aa |  |
| T2    | 0,20      | Aa | 0,09 | Aa | 0,24      | Aa | 0,10 | Aa | 0,21      | Aa | 0,09 | Aa | 0,23      | Aa | 0,09 | Aa | 0,22      | Aa | 0,12 | Ab |  |
| T3    | 0,21      | Aa | 0,07 | Aa | 0,24      | Aa | 0,07 | Aa | 0,27      | Aa | 0,03 | Aa | 0,25      | Aa | 0,11 | Aa | 0,27      | Aa | 0,11 | Aa |  |
| T4    | 0,15      | Aa | 0,09 | Aa | 0,20      | Aa | 0,10 | Aa | 0,21      | Aa | 0,08 | Ab | 0,22      | Aa | 0,06 | Aa | 0,22      | Aa | 0,09 | Ab |  |
| Média | 0,17      |    | 0,08 |    | 0,22      |    | 0,08 |    | 0,23      |    | 0,06 |    | 0,23      |    | 0,08 |    | 0,23      |    | 0,11 |    |  |

TTO = tratamento; T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L = linha; E = entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical ou por letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

Na linha, considerando a média dos tratamentos, a camada de 0,00-0,10 m teve um decréscimo entre os anos de 2019, 2020 e 2021 com 0,24, 0,21 e 0,17  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , respectivamente, as demais camadas mantiveram valores semelhantes ao longo do tempo, entre 0,21 e 0,24  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (Tabela 11). Na entrelinha, na média dos tratamentos, houve um decréscimo no teor de água no solo entre os anos de 2019, 2020 e 2021, apresentando na camada 0,00-0,10 m 0,25, 0,11 e 0,08  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , respectivamente, em 0,10-0,20 m 0,23, 0,12 e 0,08  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , respectivamente, em 0,20-0,40 m 0,23, 0,12 e 0,06  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , respectivamente, em 0,40-0,60 m 0,24, 0,11 e 0,08  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , respectivamente e em 0,60-1,00 m 0,25, 0,10 e 0,11  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , respectivamente.

**Figura 17.** Teste de Tukey para o teor de água no solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nos anos 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



Se um intervalo não contém zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes.

Comparando o teor de água no solo na linha e entrelinha, no mesmo tratamento, houve diferença significativa em 2019, 2020 e 2021 em alguns tratamentos, como, por exemplo, em 2021, no tratamento T2 (SAF Citros 713) na camada 0,60-1,00 m, com  $0,22 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na linha e  $0,12 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na entrelinha (Tabela 11). No tratamento T4 (SAF Citros 1.040) na camada 0,20-0,40 m, com  $0,21 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na linha e  $0,08 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na entrelinha e na camada 0,60-1,00 m, com  $0,21 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na linha e  $0,09 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  na entrelinha.

A resistência do solo à penetração (RP) apresentou diferença significativa entre os tratamentos no ano de 2019, na camada 0,10-0,20 m na entrelinha, onde T4 (SAF Citros 1.040) com 1,62 MPa e T3 (SAF Citros 780) com 1,54 MPa tiveram maiores valores do que T2 (SAF Citros 713) com 1,00 MPa (Tabela 12). Nos demais anos e profundidades, a resistência do solo à penetração não apresentou diferença significativa.

A RP em 2019 foi menor em todas as profundidades, em 2020 e 2021 os valores foram semelhantes, principalmente na profundidade 0,20-0,40 m (Tabela 12). Na média geral dos dados, considerando todos os tratamentos, camadas e locais, a RP apresentou diferenças significativas entre os anos, sendo que o ano de 2019 foi diferente de 2020 e 2021 com menores valores (Figura 18).

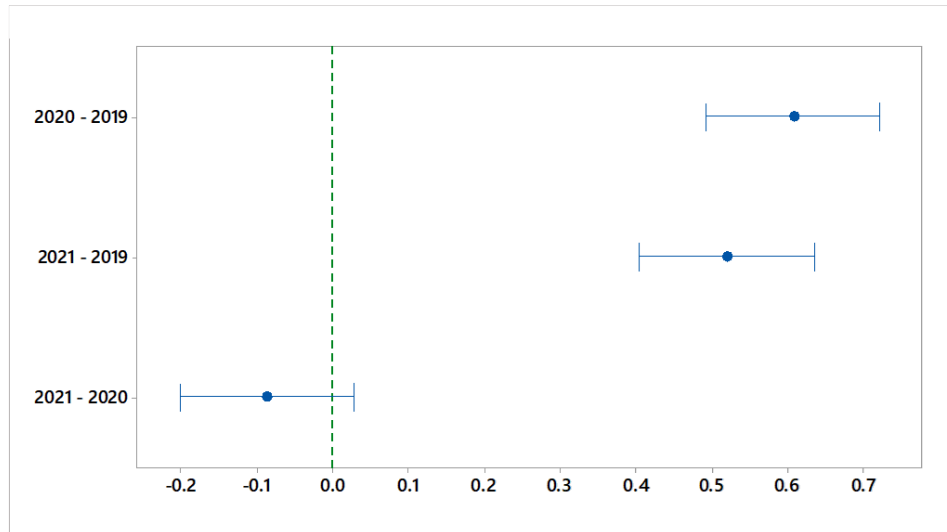
**Tabela 12.** Resistência do solo à penetração (MPa) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Tratamento | 0,00-0,10 |    |      |    | 0,10-0,20 |    |      |     | 0,20-0,40 |    |      |    |
|------------|-----------|----|------|----|-----------|----|------|-----|-----------|----|------|----|
|            | L         |    | E    |    | L         |    | E    |     | L         |    | E    |    |
| 2019       |           |    |      |    |           |    |      |     |           |    |      |    |
| T1         | 0,07      | Aa | 0,29 | Aa | 0,55      | Ab | 1,40 | ABa | 1,21      | Aa | 2,04 | Aa |
| T2         | 0,13      | Aa | 0,10 | Aa | 0,71      | Aa | 1,00 | Ba  | 1,29      | Aa | 2,20 | Aa |
| T3         | 0,08      | Aa | 0,32 | Aa | 0,61      | Ab | 1,54 | Aa  | 1,13      | Aa | 1,83 | Aa |
| T4         | 0,08      | Aa | 0,34 | Aa | 0,53      | Aa | 1,61 | Aa  | 1,31      | Aa | 2,41 | Aa |
| Média      | 0,09      |    | 0,26 |    | 0,60      |    | 1,39 |     | 1,23      |    | 2,12 |    |
| 2020       |           |    |      |    |           |    |      |     |           |    |      |    |
| T1         | 0,23      | Aa | 0,91 | Aa | 0,82      | Aa | 3,62 | Aa  | 1,51      | Aa | 3,80 | Aa |
| T2         | 0,12      | Aa | 1,31 | Aa | 0,50      | Aa | 2,48 | Aa  | 0,83      | Aa | 2,88 | Aa |
| T3         | 0,19      | Aa | 1,73 | Aa | 0,51      | Ab | 3,50 | Aa  | 0,70      | Ab | 2,77 | Aa |
| T4         | 0,19      | Aa | 0,98 | Aa | 0,54      | Ab | 3,19 | Aa  | 1,19      | Ab | 3,14 | Aa |
| Média      | 0,18      |    | 1,23 |    | 0,59      |    | 3,20 |     | 1,06      |    | 3,15 |    |
| 2021       |           |    |      |    |           |    |      |     |           |    |      |    |
| T1         | 0,12      | Aa | 0,47 | Aa | 0,54      | Ab | 3,53 | Aa  | 1,13      | Ab | 3,81 | Aa |
| T2         | 0,02      | Ab | 0,43 | Aa | 0,37      | Aa | 2,15 | Aa  | 0,71      | Ab | 3,30 | Aa |
| T3         | 0,04      | Aa | 0,72 | Aa | 0,47      | Aa | 2,35 | Aa  | 0,86      | Aa | 2,82 | Aa |
| T4         | 0,11      | Aa | 0,48 | Aa | 0,62      | Ab | 3,09 | Aa  | 1,00      | Ab | 3,62 | Aa |
| Média      | 0,07      |    | 0,53 |    | 0,50      |    | 2,78 |     | 0,92      |    | 3,39 |    |

T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L = linha; E = entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical ou por letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

Os valores médios de RP na entrelinha foram maiores em todos os tratamentos e anos comparados a linha (Tabela 12). Em relação às profundidades avaliadas, considerando todos os tratamentos, a RP na linha foi menor na profundidade de 0,00-0,10 m, nos anos de 2019, 2020 e 2021, apresentando valores médios de 0,09, 0,08 e 0,07 MPa, respectivamente, valores médios intermediários na camada de 0,10-0,20 m com 0,60, 0,59 e 0,50 MPa, respectivamente e valores médios maiores na camada de 0,20-0,40 m 1,23, 1,06 e 0,92 MPa respectivamente. Na entrelinha a RP foi menor na profundidade de 0,00-0,10 m, nos anos de 2019, 2020 e 2021, apresentando valores médios de 0,26, 1,23 e 0,53 MPa, respectivamente e valores médios mais altos na camada 0,10-0,20 m com 1,39, 3,20 e 2,78 MPa, respectivamente e na camada de 0,20-0,40 m valores de 2,12, 3,15 e 3,39 MPa, respectivamente.

**Figura 18.** Teste Tukey para resistência do solo à penetração (MPa) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nos anos 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

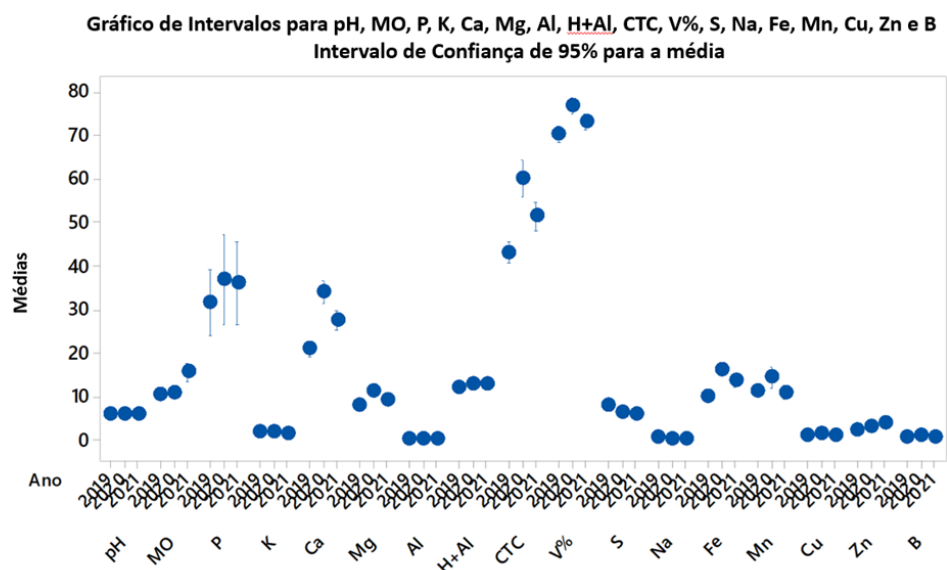


Se um intervalo não contém zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes.

## 9.2 Atributos químicos do solo

Comparando as variáveis dos atributos químicos pH, MO, P, K, Ca, Mg, Al, H+Al, CTC, V%, S, Na, Mn, Cu, Zn e B, entre os anos 2019, 2020 e 2021, somente as variáveis MO, P, Ca, Mg, CTC, V%, Fe e Mn tiveram variação entre os anos, com valores maiores em 2020 e 2021 (Figura 19).

**Figura 19.** Gráfico de Intervalos para pH, MO, P, K, Ca, Mg, Al, H+Al, CTC, V%, S, Na, Mn, Cu, Zn e B, em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nos anos 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



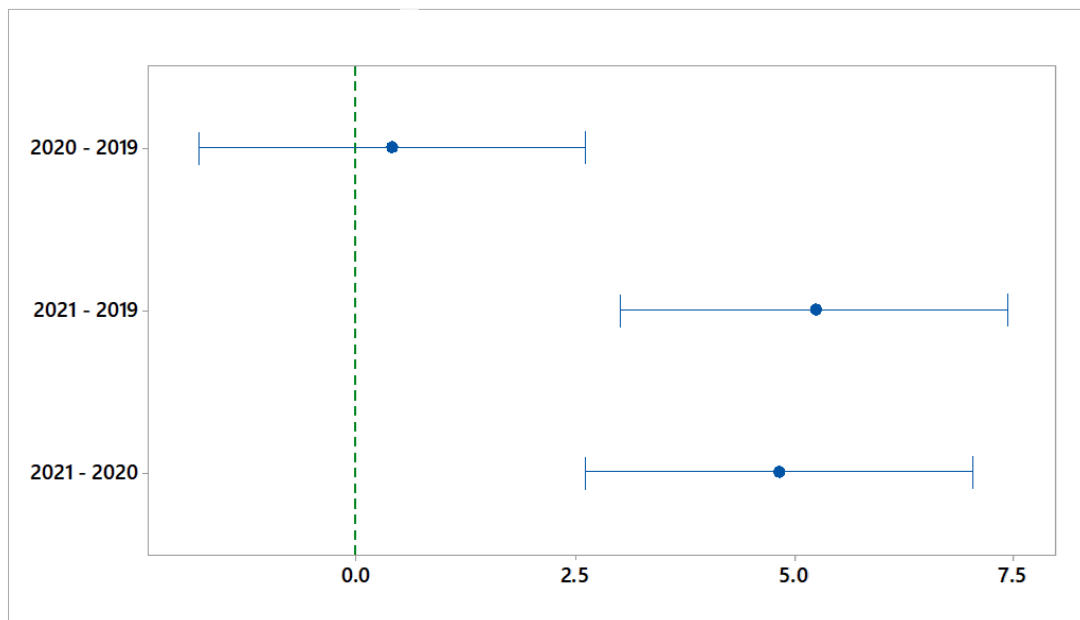
O teor de matéria orgânica do solo (MO) não apresentou diferença significativa entre os tratamentos e profundidades, nos anos de 2019, 2020 e 2021 (Tabela 13). Houve diferença estatística significativa da MO entre os anos, sendo que o ano de 2021 diferiu de 2020 e 2019, apresentando maiores valores (Figura 20). Na linha, considerando todos os tratamentos, a MO aumentou entre os anos de 2019, 2020 e 2021, apresentando na camada de 0,00-0,10 m valores médios de 13,67, 16,50 e 25,83 g dm<sup>-3</sup>, respectivamente, na camada 0,10-0,20 m valores de 10,67, 10,50 e 14,58 g dm<sup>-3</sup>, respectivamente, e em 0,20-0,40 m 8,33, 7,83 e 10,00 g dm<sup>-3</sup>, respectivamente. Na entrelinha, a MO aumentou nos três anos, apresentando na camada 0,00-0,10 m valores médios de 12,33, 13,67 e 21,33 g dm<sup>-3</sup>, respectivamente, em 0,10-0,20 m 9,58, 8,92 e 12,25 g dm<sup>-3</sup>, respectivamente e na camada 0,20-0,40 7,17, 6,75 e 9,08 g dm<sup>-3</sup>, respectivamente.

**Tabela 13.** Teor de matéria orgânica (g dm<sup>-3</sup>) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Tratamento | 0,00-0,10 |    |       |    | 0,10-0,20 |    |       |    | 0,20-0,40 |    |       |    |
|------------|-----------|----|-------|----|-----------|----|-------|----|-----------|----|-------|----|
|            | L         |    | E     |    | L         |    | E     |    | L         |    | E     |    |
| 2019       |           |    |       |    |           |    |       |    |           |    |       |    |
| T1         | 12,67     | Aa | 11,67 | Aa | 9,00      | Aa | 7,33  | Aa | 7,00      | Aa | 6,33  | Aa |
| T2         | 13,33     | Aa | 13,67 | Aa | 11,00     | Aa | 11,00 | Aa | 8,67      | Aa | 7,67  | Aa |
| T3         | 14,33     | Aa | 12,67 | Aa | 12,33     | Aa | 9,66  | Ab | 9,00      | Aa | 7,33  | Aa |
| T4         | 14,33     | Aa | 11,33 | Aa | 10,33     | Aa | 10,33 | Aa | 8,67      | Aa | 7,33  | Aa |
| Média      | 13,67     |    | 12,33 |    | 10,67     |    | 9,58  |    | 8,33      |    | 7,17  |    |
| 2020       |           |    |       |    |           |    |       |    |           |    |       |    |
| T1         | 19,33     | Aa | 15,33 | Aa | 11,33     | Aa | 8,67  | Aa | 7,33      | Aa | 6,33  | Aa |
| T2         | 14,33     | Aa | 13,33 | Aa | 10,00     | Aa | 8,33  | Aa | 7,00      | Aa | 6,67  | Aa |
| T3         | 16,33     | Aa | 12,67 | Aa | 10,67     | Aa | 9,33  | Aa | 8,67      | Aa | 7,67  | Aa |
| T4         | 16,00     | Aa | 13,33 | Aa | 10,00     | Aa | 9,33  | Aa | 8,33      | Aa | 6,33  | Aa |
| Média      | 16,50     |    | 13,67 |    | 10,50     |    | 8,92  |    | 7,83      |    | 6,75  |    |
| 2021       |           |    |       |    |           |    |       |    |           |    |       |    |
| T1         | 25,67     | Aa | 26,33 | Aa | 14,33     | Aa | 12,00 | Aa | 10,33     | Aa | 10,33 | Aa |
| T2         | 29,33     | Aa | 20,67 | Aa | 17,33     | Aa | 13,33 | Aa | 11,00     | Aa | 8,00  | Aa |
| T3         | 28,67     | Aa | 24,00 | Aa | 15,67     | Aa | 13,00 | Aa | 12,00     | Aa | 8,33  | Aa |
| T4         | 19,67     | Aa | 14,33 | Aa | 11,00     | Aa | 10,67 | Aa | 6,67      | Aa | 9,67  | Aa |
| Média      | 25,83     |    | 21,33 |    | 14,58     |    | 12,25 |    | 10,00     |    | 9,08  |    |

T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L = linha; E = entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical ou por letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

**Figura 20.** Teste Tukey para o teor de matéria orgânica ( $\text{g dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nos anos 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



Se um intervalo não contém zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes.

O teor de fósforo (P) do solo não apresentou diferença estatística significativa nos diferentes tratamentos e profundidades, nos anos de 2019, 2020 e 2021 (Tabela 14). Na linha, considerando todos os tratamentos, o P aumentou entre os anos de 2019, 2020 e 2021, na camada 0,00-0,10 m apresentando valores médios de 79,75, 96,42 e 100,4  $\text{mg dm}^{-3}$ , respectivamente, na camada 0,10-0,20 m foi de 35,17, 40,25 e 46,40  $\text{mg dm}^{-3}$ , respectivamente, e na camada 0,20-0,40 m apresentou resultados semelhantes de 16,08, 19,58 e 15,30  $\text{mg dm}^{-3}$ , respectivamente. Na entrelinha, o P apresentou nos três anos resultados semelhantes na camada 0,00-0,10 m com valores médios de 39,50, 35,17 e 40,17  $\text{mg dm}^{-3}$ , respectivamente, na camada 0,10-0,20 m foi de 10,67, 9,0 e 10,3  $\text{mg dm}^{-3}$ , respectivamente e na camada 0,20-0,40 m teores de 8,92, 6,25 e 3,17  $\text{mg dm}^{-3}$ , respectivamente. As primeiras camadas apresentaram os maiores valores de P, assim como a linha em relação a entrelinha.

**Tabela 14.** Teor de fósforo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Tratamento | 0,00-0,10 |    |       |    | 0,10-0,20 |    |       |    | 0,20-0,40 |    |       |    |
|------------|-----------|----|-------|----|-----------|----|-------|----|-----------|----|-------|----|
|            | L         |    | E     |    | L         |    | E     |    | L         |    | E     |    |
| 2019       |           |    |       |    |           |    |       |    |           |    |       |    |
| T1         | 90,00     | Aa | 42,00 | Aa | 25,66     | Aa | 9,00  | Aa | 7,00      | Aa | 11,00 | Aa |
| T2         | 79,33     | Aa | 37,33 | Aa | 30,00     | Aa | 15,67 | Aa | 13,33     | Aa | 11,00 | Aa |
| T3         | 79,67     | Aa | 34,00 | Aa | 45,67     | Aa | 8,00  | Aa | 22,67     | Aa | 6,67  | Aa |
| T4         | 68,00     | Aa | 44,67 | Aa | 39,33     | Aa | 10,00 | Aa | 21,33     | Aa | 7,00  | Aa |
| Média      | 79,75     |    | 39,50 |    | 35,17     |    | 10,67 |    | 16,08     |    | 8,92  |    |
| 2020       |           |    |       |    |           |    |       |    |           |    |       |    |
| T1         | 125,67    | Aa | 38,33 | Aa | 38,33     | Aa | 8,67  | Aa | 17,00     | Aa | 5,33  | Aa |
| T2         | 101,67    | Aa | 40,33 | Aa | 49,33     | Aa | 8,33  | Aa | 30,67     | Aa | 8,00  | Aa |
| T3         | 91,00     | Aa | 21,66 | Aa | 32,67     | Aa | 7,67  | Aa | 11,33     | Aa | 6,00  | Aa |
| T4         | 67,33     | Aa | 40,33 | Aa | 40,67     | Aa | 11,33 | Aa | 19,33     | Aa | 5,67  | Aa |
| Média      | 96,42     |    | 35,17 |    | 40,25     |    | 9,0   |    | 19,58     |    | 6,25  |    |
| 2021       |           |    |       |    |           |    |       |    |           |    |       |    |
| T1         | 114,33    | Aa | 38,00 | Aa | 46,67     | Aa | 9,33  | Aa | 14,00     | Aa | 3,33  | Aa |
| T2         | 110,00    | Aa | 42,33 | Aa | 42,00     | Aa | 8,33  | Aa | 18,33     | Aa | 2,67  | Aa |
| T3         | 90,33     | Aa | 47,67 | Aa | 54,33     | Aa | 7,33  | Aa | 17,67     | Aa | 3,00  | Aa |
| T4         | 87,00     | Aa | 32,67 | Aa | 42,67     | Aa | 16,33 | Aa | 11,00     | Aa | 3,67  | Aa |
| Média      | 100,4     |    | 40,17 |    | 46,40     |    | 10,30 |    | 15,30     |    | 3,17  |    |

T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L = linha; E = entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical ou por letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

O valor de magnésio (Mg) apresentou diferença estatística significativa entre tratamentos no ano de 2021, na camada de 0,00-0,10 m na linha, onde o tratamento T2 (SAF Citros 713) com valor de  $20,67 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  foi maior que T4 (SAF Citros 1.040) que apresentou  $11,67 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (Tabela 15). Nos demais anos, profundidades e tratamentos o valor de Mg do solo não apresentou diferença estatística significativa.

Comparando o valor de Mg na linha e entrelinha, no mesmo tratamento, houve diferença estatística significativa em 2019, na camada 0,00-0,10 m, no tratamento T1 (Citros 446) com valor de  $11,00 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na linha e  $8,00 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na entrelinha, no tratamento T3 (SAF Citros 780), na camada 0,10-0,20, com  $12,33 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na linha e  $5,66 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na entrelinha e em 2021, na camada de 0,00-0,10 m, no tratamento T1 (Citros 446) com  $15,00 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na linha e  $9,00 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na entrelinha, na camada de 0,10-0,20 m, com  $10,00 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na linha e  $5,66 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na entrelinha e T3 (SAF Citros 780), na camada de 0,10-0,20 m  $10,33 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na linha e  $5,56 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na entrelinha e na camada de 0,20-0,40 m com  $7,66 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na linha e  $4,33 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na entrelinha. Considerando todos os

tratamentos, as primeiras camadas apresentaram os maiores valores de Mg, assim como a linha em relação a entrelinha.

**Tabela 15.** Valor de magnésio ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Tratamento | 0,00-0,10 |     |       |    | 0,10-0,20 |    |      |    | 0,20-0,40 |    |      |    |
|------------|-----------|-----|-------|----|-----------|----|------|----|-----------|----|------|----|
|            | L         |     | E     |    | L         |    | E    |    | L         |    | E    |    |
| 2019       |           |     |       |    |           |    |      |    |           |    |      |    |
| T1         | 11,00     | Aa  | 8,00  | Ab | 6,67      | Aa | 5,00 | Aa | 5,00      | Aa | 4,00 | Aa |
| T2         | 11,33     | Aa  | 10,67 | Aa | 10,67     | Aa | 7,67 | Aa | 6,00      | Aa | 3,33 | Aa |
| T3         | 14,67     | Aa  | 9,00  | Aa | 12,33     | Aa | 5,66 | Ab | 7,33      | Aa | 4,33 | Aa |
| T4         | 13,00     | Aa  | 8,33  | Aa | 9,33      | Aa | 5,67 | Aa | 6,67      | Aa | 5,67 | Aa |
| Média      | 12,50     |     | 9,00  |    | 9,75      |    | 6,00 |    | 6,25      |    | 4,33 |    |
| 2020       |           |     |       |    |           |    |      |    |           |    |      |    |
| T1         | 21,00     | Aa  | 13,67 | Aa | 12,67     | Aa | 7,67 | Aa | 9,00      | Aa | 7,00 | Aa |
| T2         | 15,67     | Aa  | 11,67 | Aa | 10,00     | Aa | 8,67 | Aa | 7,00      | Aa | 6,00 | Aa |
| T3         | 21,33     | Aa  | 9,67  | Aa | 14,33     | Aa | 6,33 | Aa | 11,00     | Aa | 5,67 | Aa |
| T4         | 18,33     | Aa  | 14,67 | Aa | 14,00     | Aa | 8,67 | Aa | 9,67      | Aa | 6,00 | Aa |
| Média      | 19,08     |     | 12,42 |    | 12,75     |    | 7,83 |    | 9,17      |    | 6,17 |    |
| 2021       |           |     |       |    |           |    |      |    |           |    |      |    |
| T1         | 15,00     | ABa | 9,00  | Ab | 10,00     | Aa | 5,66 | Ab | 7,33      | Aa | 5,00 | Aa |
| T2         | 20,67     | Aa  | 13,67 | Aa | 12,67     | Aa | 9,67 | Aa | 10,00     | Aa | 5,67 | Aa |
| T3         | 14,00     | ABa | 11,00 | Aa | 10,33     | Aa | 5,66 | Ab | 7,66      | Aa | 4,33 | Ab |
| T4         | 11,67     | Ba  | 7,67  | Aa | 8,33      | Aa | 5,67 | Aa | 5,67      | Aa | 5,33 | Aa |
| Média      | 15,3      |     | 10,3  |    | 10,3      |    | 6,66 |    | 7,67      |    | 5,08 |    |

T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L=linha; E = entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical ou por letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

A capacidade de troca catiônica (CTC) não apresentou diferença estatística significativa nos diferentes tratamentos e profundidades, nos anos de 2019, 2020 e 2021 (Tabela 16). Houve diferença estatística significativa da CTC comparando os anos de 2019, 2020 e 2021, considerando todos os tratamentos, camadas e locais, sendo que o ano de 2020 apresentou maiores valores médios com  $60,11 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , seguido do ano de 2021 com  $51,51 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e 2019 com  $43,22 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (Figura 21).

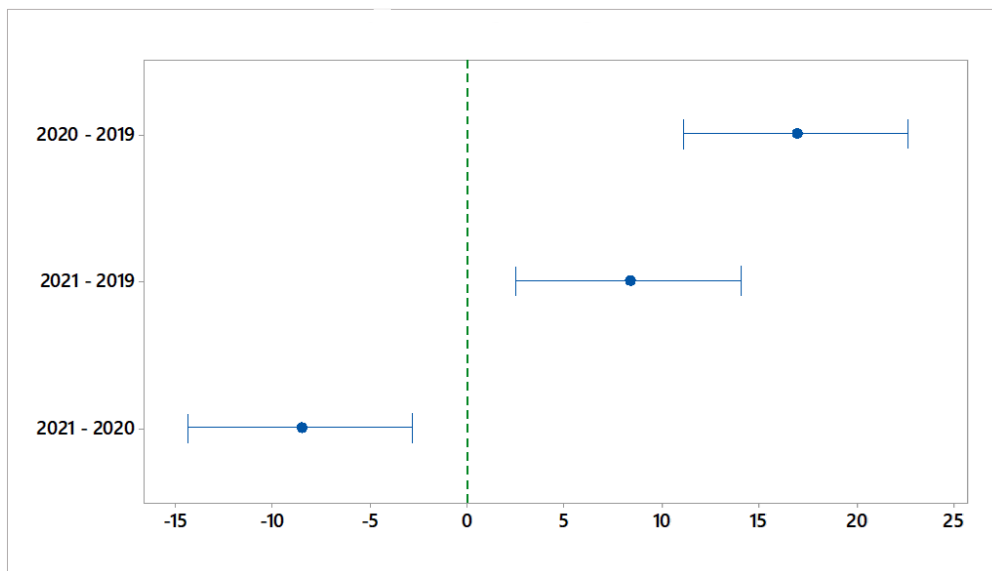
**Tabela 16.** Capacidade de troca catiônica ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Tratamento | 0,00-0,10 |    |       |    | 0,10-0,20 |    |       |    | 0,20-0,40 |    |       |    |
|------------|-----------|----|-------|----|-----------|----|-------|----|-----------|----|-------|----|
|            | L         |    | E     |    | L         |    | E     |    | L         |    | E     |    |
| 2019       |           |    |       |    |           |    |       |    |           |    |       |    |
| T1         | 43,57     | Aa | 45,47 | Aa | 40,13     | Aa | 35,50 | Aa | 39,50     | Aa | 30,10 | Aa |
| T2         | 49,60     | Aa | 48,77 | Aa | 55,83     | Aa | 42,80 | Aa | 40,60     | Aa | 34,87 | Aa |
| T3         | 51,70     | Aa | 46,13 | Aa | 51,83     | Aa | 41,30 | Aa | 45,10     | Aa | 35,63 | Aa |
| T4         | 52,17     | Aa | 46,63 | Aa | 43,07     | Aa | 41,57 | Aa | 40,07     | Aa | 35,80 | Aa |
| Média      | 49,26     |    | 46,75 |    | 47,72     |    | 40,29 |    | 41,32     |    | 34,10 |    |
| 2020       |           |    |       |    |           |    |       |    |           |    |       |    |
| T1         | 83,67     | Aa | 71,03 | Aa | 65,43     | Aa | 49,93 | Ab | 47,57     | Aa | 44,97 | Aa |
| T2         | 71,67     | Aa | 66,20 | Aa | 59,70     | Aa | 56,37 | Aa | 47,73     | Aa | 44,13 | Aa |
| T3         | 88,10     | Aa | 58,93 | Aa | 66,53     | Aa | 50,03 | Aa | 56,57     | Aa | 46,20 | Aa |
| T4         | 77,23     | Aa | 68,03 | Aa | 64,80     | Aa | 52,87 | Aa | 52,37     | Aa | 42,63 | Aa |
| Média      | 82,67     |    | 66,05 |    | 64,12     |    | 52,30 |    | 51,06     |    | 44,48 |    |
| 2021       |           |    |       |    |           |    |       |    |           |    |       |    |
| T1         | 63,07     | Aa | 45,77 | Aa | 61,46     | Aa | 46,50 | Ab | 45,60     | Aa | 41,43 | Ab |
| T2         | 72,40     | Aa | 57,87 | Aa | 63,37     | Aa | 51,70 | Aa | 50,53     | Aa | 40,87 | Aa |
| T3         | 75,50     | Aa | 58,27 | Aa | 64,47     | Aa | 46,13 | Aa | 47,03     | Aa | 41,83 | Ab |
| T4         | 57,60     | Aa | 44,57 | Aa | 45,40     | Aa | 38,30 | Aa | 38,10     | Aa | 38,53 | Aa |
| Média      | 67,1      |    | 51,6  |    | 58,7      |    | 45,7  |    | 45,3      |    | 40,67 |    |

TTO = tratamento; T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L = linha e E = entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical ou por letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

Na linha, considerando todos os tratamentos, a CTC apresentou nos anos de 2019, 2020 e 2021, na camada de 0,00-0,10 m valores médios de 49,26, 82,67 e 67,10  $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente, na camada 0,10-0,20 m valores de 47,72, 64,12 e 58,70  $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente, e em 0,20-0,40 m foi de 41,32, 51,06 e 45,30  $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente (Tabela 16). Na entrelinha, a CTC apresentou na camada 0,00-0,10 m valores médios nos anos de 2019, 2020 e 2021 de 46,75, 66,05, 51,06  $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente, em 0,10-0,20 m 40,29, 52,30 e 45,70  $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente e de 0,20-0,40 m com 34,10, 44,48 e 40,67  $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente.

**Figura 21.** Teste Tukey para capacidade de troca catiônica ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nos anos 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



Se um intervalo não contém zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes.

Comparando a CTC na linha e entrelinha, no mesmo tratamento, houve diferença estatística significativa em 2020 (Tabela 16), na camada 0,10-0,20 m, no tratamento T1 (Citros 446) com  $65,43 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na linha e  $49,93 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na entrelinha e em 2021, no tratamento T1 (Citros 446), na camada 0,10-0,20 m, com valores de  $61,46 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na linha e  $46,50 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na entrelinha e na camada 0,20-0,40 m, com  $45,60 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na linha e  $41,43 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na entrelinha e no tratamento T3 (SAF Citros 780), na camada 0,20-0,40 m, com  $47,03 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na linha e  $41,83 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na entrelinha.

Considerando todos os tratamentos, as primeiras camadas apresentaram os maiores valores de CTC, assim como a linha em relação a entrelinha (Tabela 16). Na média dos três anos, os tratamentos T1 (Citros 446), T2 (SAF Citros 713), T3 (SAF Citros 780) e T4 (SAF Citros 1.040) apresentaram a CTC de 50,59, 53,05, 53,96 e 48,87  $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente.

O valor de zinco (Zn) apresentou diferença estatística significativa entre tratamentos no ano de 2019, na camada 0,20-0,40 m na linha, onde o tratamento T3 (SAF Citros 780) foi de  $1,63 \text{ mg dm}^{-3}$  maior que o T1 (Citros 446) de  $0,93 \text{ mg dm}^{-3}$  e em 2021, na camada de 0,20-0,40 m na entrelinha, onde o tratamento T4 (SAF Citros 1.040) com valor de  $0,77 \text{ mg dm}^{-3}$  foi maior que o T2 (SAF Citros 713)  $0,33 \text{ mg dm}^{-3}$  (Tabela 17). Nos demais anos, profundidades e tratamentos o Zn do solo não apresentou diferença estatística significativa.

**Tabela 17.** Valor de zinco ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Tratamento | 0,00-0,10 |    |      |    | 0,10-0,20 |    |      |    | 0,20-0,40 |     |      |     |
|------------|-----------|----|------|----|-----------|----|------|----|-----------|-----|------|-----|
|            | L         |    | E    |    | L         |    | E    |    | L         |     | E    |     |
| 2019       |           |    |      |    |           |    |      |    |           |     |      |     |
| T1         | 5,97      | Aa | 2,13 | Aa | 1,93      | Aa | 0,83 | Ab | 0,93      | Ba  | 0,73 | Aa  |
| T2         | 3,10      | Aa | 2,07 | Aa | 2,27      | Aa | 1,87 | Aa | 1,10      | ABa | 0,93 | Aa  |
| T3         | 3,10      | Aa | 2,10 | Aa | 2,47      | Aa | 1,17 | Aa | 1,63      | Aa  | 0,73 | Aa  |
| T4         | 4,57      | Aa | 4,60 | Aa | 1,73      | Aa | 1,70 | Aa | 1,03      | ABa | 0,93 | Aa  |
| 2020       |           |    |      |    |           |    |      |    |           |     |      |     |
| T1         | 9,86      | Aa | 3,56 | Ab | 3,13      | Aa | 1,47 | Aa | 1,23      | Aa  | 1,13 | Aa  |
| T2         | 7,40      | Aa | 1,90 | Aa | 2,90      | Aa | 1,23 | Aa | 0,83      | Aa  | 0,83 | Aa  |
| T3         | 5,83      | Aa | 2,66 | Ab | 2,10      | Aa | 1,60 | Aa | 1,33      | Aa  | 0,93 | Aa  |
| T4         | 12,67     | Aa | 4,77 | Aa | 2,87      | Aa | 1,50 | Ab | 1,97      | Aa  | 0,87 | Aa  |
| 2021       |           |    |      |    |           |    |      |    |           |     |      |     |
| T1         | 13,30     | Aa | 3,77 | Aa | 3,17      | Aa | 1,33 | Aa | 0,93      | Aa  | 0,46 | ABa |
| T2         | 13,57     | Aa | 4,10 | Aa | 3,16      | Aa | 1,23 | Ab | 0,87      | Aa  | 0,33 | Ba  |
| T3         | 15,33     | Aa | 8,13 | Aa | 5,37      | Aa | 1,70 | Aa | 1,47      | Aa  | 0,56 | ABa |
| T4         | 9,93      | Aa | 2,80 | Aa | 2,03      | Aa | 1,07 | Aa | 0,60      | Aa  | 0,77 | Aa  |

T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L = linha; E = entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical ou por letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

### 9.3 Teor de carbono orgânico e estoques de carbono do solo

O teor de carbono orgânico total (C) do solo, em 2021, apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, na camada 0,10-0,20 m, na linha e entrelinha, sendo que o tratamento T2 (SAF Citros 713) apresentou maior teor de C com  $1,00 \text{ g kg}^{-1}$  em relação ao tratamento T1 (Citros 446) com  $0,65 \text{ g kg}^{-1}$  na linha e o tratamento T3 (SAF Citros 780) apresentou maior teor de C com  $0,81 \text{ g kg}^{-1}$  comparado ao tratamento T1 (Citros 446) com  $0,63 \text{ g kg}^{-1}$  na entrelinha (Tabela 18). Os demais tratamentos não apresentaram diferenças entre si, sendo que em 2019 e 2020, o C não obteve diferenças entre os tratamentos nas diferentes camadas analisadas.

As camadas superficiais apresentaram maiores teores de C em comparação com as camadas mais profundas (Tabela 18). Na linha, considerando a média dos tratamentos, o C nos anos de 2019, 2020 e 2021 apresentou valores na camada 0,00-0,10 m de 0,96, 0,98 e  $1,31 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente, em 0,10-0,20 m de 0,78, 0,72 e  $0,78 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente, em 0,20-0,40 m de 0,59, 0,56 e  $0,57 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente, em 0,40-0,60 m de 0,46, 0,49 e  $0,51 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente, e 0,60-1,0 m de 0,42, 0,41 e  $0,41 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente. Na entrelinha, considerando a média dos tratamentos, o C nos anos de 2019, 2020 e 2021 apresentou valores

na camada 0,00-0,10 m de 0,89, 0,96 e 0,95 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, em 0,10-0,20 m 0,68, 0,64 e 0,70 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, em 0,20-0,40 m 0,55, 0,54 e 0,56 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, em 0,40-0,60 m 0,46, 0,47 e 0,48 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente e 0,60-1,0 m o valor de 0,41 g kg<sup>-1</sup> nos três anos.

**Tabela 18.** Teor de carbono orgânico (g kg<sup>-1</sup>) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| TTO         | 0,00-0,10 |    | 0,10-0,20 |    | 0,20-0,40 |     | 0,40-0,60 |     | 0,60-1,00 |    |
|-------------|-----------|----|-----------|----|-----------|-----|-----------|-----|-----------|----|
|             | L         | E  | L         | E  | L         | E   | L         | E   | L         | E  |
| <b>2019</b> |           |    |           |    |           |     |           |     |           |    |
| T1          | 0,88      | Aa | 0,81      | Aa | 0,66      | Aa  | 0,57      | Aa  | 0,51      | Aa |
| T2          | 0,96      | Aa | 1,05      | Aa | 0,82      | Aa  | 0,75      | Aa  | 0,62      | Aa |
| T3          | 0,93      | Aa | 0,89      | Aa | 0,84      | Aa  | 0,72      | Aa  | 0,58      | Aa |
| T4          | 1,09      | Aa | 0,83      | Aa | 0,82      | Aa  | 0,66      | Aa  | 0,67      | Aa |
| Média       | 0,96      |    | 0,89      |    | 0,78      |     | 0,68      |     | 0,59      |    |
| <b>2020</b> |           |    |           |    |           |     |           |     |           |    |
| T1          | 1,05      | Aa | 1,11      | Aa | 0,77      | Aa  | 0,64      | Aa  | 0,55      | Aa |
| T2          | 0,96      | Aa | 0,94      | Aa | 0,64      | Aa  | 0,61      | Aa  | 0,53      | Aa |
| T3          | 0,97      | Aa | 0,90      | Aa | 0,74      | Aa  | 0,68      | Aa  | 0,61      | Aa |
| T4          | 0,94      | Aa | 0,87      | Aa | 0,72      | Aa  | 0,64      | Aa  | 0,56      | Aa |
| Média       | 0,98      |    | 0,96      |    | 0,72      |     | 0,64      |     | 0,56      |    |
| <b>2021</b> |           |    |           |    |           |     |           |     |           |    |
| T1          | 1,17      | Aa | 1,01      | Aa | 0,66      | Ba  | 0,66      | ABa | 0,56      | Ab |
| T2          | 1,52      | Aa | 1,03      | Ab | 1,00      | Aa  | 0,68      | ABa | 0,55      | Aa |
| T3          | 1,47      | Aa | 1,01      | Aa | 0,78      | ABa | 0,81      | Aa  | 0,65      | Aa |
| T4          | 1,09      | Aa | 0,77      | Aa | 0,69      | ABa | 0,64      | Ba  | 0,52      | Aa |
| Média       | 1,31      |    | 0,95      |    | 0,78      |     | 0,70      |     | 0,57      |    |

TTO = tratamento; T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L = linha; E = entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical ou por letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

Considerando os valores médios da linha e entrelinha, no ano de 2019, os tratamentos T1 (Citros 446), T2 (SAF Citros 713), T3 (SAF Citros 780) e T4 (SAF Citros 1.040) apresentaram valores de C variando de 0,55, 0,65, 0,64 e 0,64 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, em 2020 valores de 0,63, 0,60, 0,63 e 0,61 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente e em 2021 de 0,64, 0,71, 0,72 e 0,60 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

Comparando o teor de C na linha e entrelinha, no mesmo tratamento, houve diferença com significância estatística em 2021, na camada 0,00-0,10 m, no tratamento T2 (SAF Citros 713) com 1,51 g kg<sup>-1</sup> na linha e 1,03 g kg<sup>-1</sup> na entrelinha e na camada de 0,20-0,40 m, no tratamento T1 (Citros 446) de 0,56 g kg<sup>-1</sup> na linha e 0,64 g kg<sup>-1</sup> na entrelinha.

O estoque de carbono (EC) do solo foi analisado nas mesmas camadas dos atributos físicos (0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 e 0,60-1,00 m), conforme Tabela 19. E, posteriormente, analisado o incremento médio de carbono no ano (IMCA) (Tabela 20). Em 2021, o EC apresentou diferenças significativas entre os tratamentos na camada 0,10-0,20 m, sendo que o T2 (SAF Citros 713) obteve maior EC com 14,67 Mg ha<sup>-1</sup> em relação ao T1 (Citros 446) com 9,62 Mg ha<sup>-1</sup> na linha e T3 (SAF Citros 780) obteve maior EC com 11,90 Mg ha<sup>-1</sup> do que o T4 (SAF Citros 1.040) com 9,29 Mg ha<sup>-1</sup> na entrelinha. Os demais tratamentos não apresentaram diferenças entre si. Em 2019 e 2020 não houve diferenças significativas entre tratamentos, nas diferentes camadas e locais.

**Tabela 19.** Estoque de carbono (Mg ha<sup>-1</sup>) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

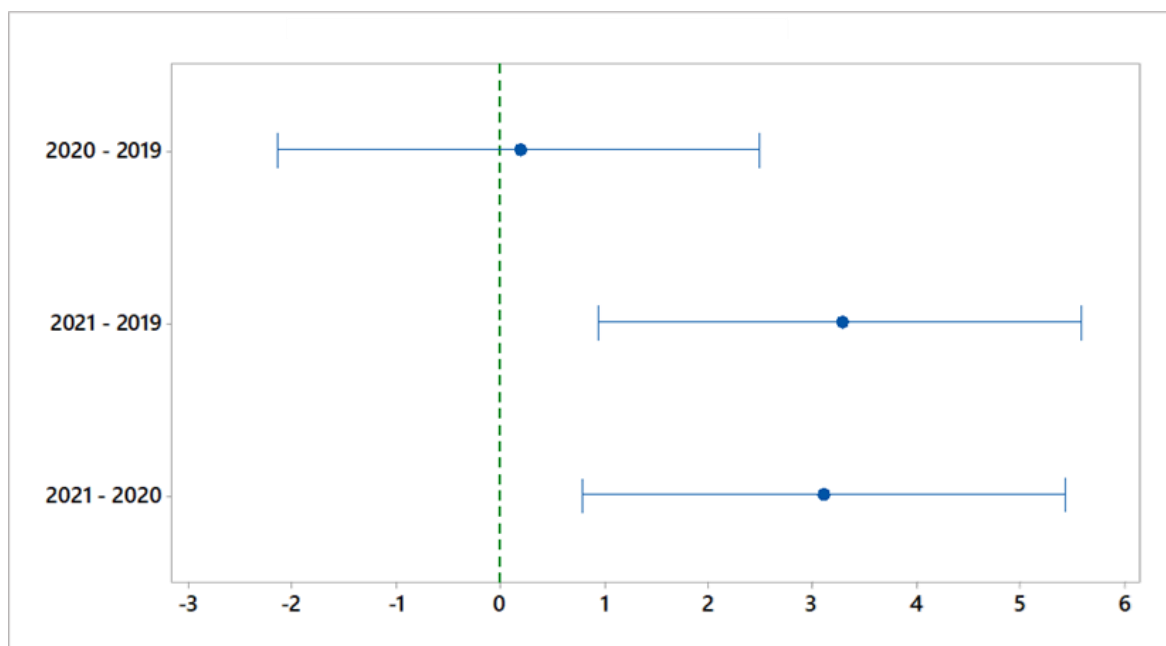
| TTO   | 0,00-0,10 |    |       |    | 0,10-0,20 |     |       |     | 0,20-0,40 |    |       |    | 0,40-0,60 |    |       |    | 0,60-1,00 |    |       |    |  |
|-------|-----------|----|-------|----|-----------|-----|-------|-----|-----------|----|-------|----|-----------|----|-------|----|-----------|----|-------|----|--|
|       | L         |    | E     |    | L         |     | E     |     | L         |    | E     |    | L         |    | E     |    | L         |    | E     |    |  |
| 2019  |           |    |       |    |           |     |       |     |           |    |       |    |           |    |       |    |           |    |       |    |  |
| T1    | 11,82     | Aa | 10,94 | Aa | 9,68      | Aa  | 8,36  | Aa  | 15,63     | Aa | 14,90 | Aa | 13,07     | Aa | 12,56 | Aa | 23,90     | Aa | 20,50 | Aa |  |
| T2    | 12,90     | Aa | 14,12 | Aa | 12,08     | Aa  | 11,01 | Aa  | 18,90     | Aa | 16,97 | Aa | 13,91     | Aa | 13,82 | Aa | 25,09     | Aa | 23,90 | Aa |  |
| T3    | 12,54     | Aa | 11,95 | Aa | 12,31     | Aa  | 10,55 | Aa  | 17,60     | Aa | 16,97 | Aa | 15,54     | Aa | 15,19 | Aa | 26,17     | Aa | 28,89 | Aa |  |
| T4    | 14,72     | Aa | 11,22 | Aa | 12,06     | Aa  | 9,77  | Aa  | 20,44     | Aa | 17,95 | Aa | 13,08     | Aa | 13,66 | Aa | 26,09     | Aa | 25,58 | Aa |  |
| Média | 12,99     |    | 12,06 |    | 11,53     |     | 9,92  |     | 18,14     |    | 16,70 |    | 13,90     |    | 13,81 |    | 25,31     |    | 24,72 |    |  |
| 2020  |           |    |       |    |           |     |       |     |           |    |       |    |           |    |       |    |           |    |       |    |  |
| T1    | 14,13     | Aa | 14,99 | Aa | 11,37     | Aa  | 9,39  | Aa  | 16,86     | Aa | 16,10 | Aa | 13,71     | Aa | 13,94 | Aa | 22,00     | Aa | 22,70 | Aa |  |
| T2    | 12,98     | Aa | 12,72 | Aa | 9,34      | Aa  | 9,02  | Aa  | 16,28     | Aa | 15,44 | Aa | 14,29     | Aa | 14,50 | Aa | 24,36     | Aa | 25,02 | Aa |  |
| T3    | 13,05     | Aa | 12,20 | Aa | 10,81     | Aa  | 10,01 | Aa  | 18,59     | Aa | 17,46 | Aa | 14,31     | Aa | 14,37 | Aa | 27,02     | Aa | 27,92 | Aa |  |
| T4    | 12,71     | Aa | 11,79 | Aa | 10,63     | Aa  | 9,39  | Aa  | 17,07     | Aa | 16,50 | Aa | 16,05     | Aa | 13,47 | Aa | 26,20     | Aa | 23,86 | Aa |  |
| Média | 13,22     |    | 12,93 |    | 10,54     |     | 9,45  |     | 17,20     |    | 16,38 |    | 14,59     |    | 14,07 |    | 24,90     |    | 24,88 |    |  |
| 2021  |           |    |       |    |           |     |       |     |           |    |       |    |           |    |       |    |           |    |       |    |  |
| T1    | 15,75     | Aa | 13,68 | Aa | 9,63      | Ba  | 9,78  | ABa | 17,11     | Aa | 19,74 | Ab | 13,84     | Aa | 13,39 | Aa | 24,33     | Aa | 24,34 | Aa |  |
| T2    | 20,49     | Aa | 13,94 | Ab | 14,68     | Aa  | 10,01 | ABa | 16,82     | Aa | 16,36 | Aa | 16,34     | Aa | 14,03 | Aa | 23,66     | Aa | 24,13 | Aa |  |
| T3    | 19,82     | Aa | 13,57 | Aa | 11,44     | ABa | 11,90 | Aa  | 19,76     | Aa | 16,98 | Aa | 17,06     | Aa | 14,32 | Aa | 27,68     | Aa | 26,02 | Aa |  |
| T4    | 14,76     | Aa | 10,33 | Aa | 10,16     | ABa | 9,29  | Ba  | 16,03     | Aa | 15,80 | Aa | 13,50     | Aa | 15,43 | Aa | 23,83     | Aa | 23,73 | Aa |  |
| Média | 17,70     |    | 12,88 |    | 11,48     |     | 10,24 |     | 17,43     |    | 17,22 |    | 15,18     |    | 14,29 |    | 24,87     |    | 24,56 |    |  |

TTO=tratamento; T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L = linha; E = entrelinha. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical ou por letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tukey,  $p \leq 0,05$ ).

Comparando o EC na linha e entrelinha, no mesmo tratamento, houve diferença com significância estatística em 2021, na camada 0,00-0,10 m, no tratamento T2 (SAF Citros 713) com teor de 20,48 Mg ha<sup>-1</sup> na linha e 13,93 Mg ha<sup>-1</sup> na entrelinha e na camada de 0,20-0,40 m, no tratamento T1 (Citros 446) com 17,11 Mg ha<sup>-1</sup> na linha e 19,73 Mg ha<sup>-1</sup> na entrelinha.

Considerando os dados médios dos tratamentos e camadas, houve diferença significativa entre os anos, onde o ano de 2021 foi maior que 2019 e 2020 (Figura 22).

**Figura 22.** Teste Tukey para o estoque de carbono ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nos anos 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



Se um intervalo não contém zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes.

Comparando o estoque de carbono do solo dos diferentes tratamentos nos anos de 2019, 2020 e 2021, o maior incremento médio de carbono anual (IMCA) ocorreu entre 2020 e 2021, na linha no T2 (SAF Citros 713) na camada 0,00-0,10 m com  $7,51 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e na camada de 0,10-0,20 m  $5,34 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , seguido do tratamento T3 (SAF Citros 780) na camada 0,00-0,10 m com  $6,76 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Tabela 20). Os tratamentos T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040) apresentaram os menores valores de IMCA ( $1,62$  e  $2,05 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente), no mesmo período, na camada 0,00-0,10 m na linha.

**Tabela 20.** Estoque de carbono (EC) e incremento médio de carbono anual (IMCA) de um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas, locais e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Tratamento | Local | Profundidade<br>(m) | EC 19<br>(Mg há <sup>-1</sup> ) | EC 20<br>(Mg há <sup>-1</sup> ) | EC 21<br>(Mg há <sup>-1</sup> ) | IMCA 19/20<br>(Mg C há <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) | IMCA 20/21<br>(Mg C há <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ) |
|------------|-------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| T1         | L     | 0,00-0,10           | 11,82                           | 14,13                           | 15,75                           | 2,31                                                     | 1,62                                                     |
| T1         | L     | 0,10-0,20           | 9,68                            | 11,37                           | 9,63                            | 1,69                                                     | -1,75                                                    |
| T1         | L     | 0,20-0,40           | 15,63                           | 16,86                           | 17,11                           | 1,23                                                     | 0,25                                                     |
| T1         | L     | 0,40-0,60           | 13,07                           | 13,71                           | 13,84                           | 0,64                                                     | 0,13                                                     |
| T1         | L     | 0,60-1,00           | 23,90                           | 22,00                           | 24,33                           | -1,90                                                    | 2,33                                                     |
| T1         | L     | 0,00-1,00           | 74,10                           | 78,07                           | 80,65                           | -                                                        | -                                                        |
| T1         | E     | 0,00-0,10           | 10,94                           | 14,99                           | 13,68                           | 4,05                                                     | -1,31                                                    |
| T1         | E     | 0,10-0,20           | 8,36                            | 9,39                            | 9,78                            | 1,03                                                     | 0,38                                                     |
| T1         | E     | 0,20-0,40           | 14,90                           | 16,10                           | 19,74                           | 1,20                                                     | 3,64                                                     |
| T1         | E     | 0,40-0,60           | 12,56                           | 13,94                           | 13,39                           | 1,38                                                     | -0,55                                                    |
| T1         | E     | 0,60-1,00           | 20,50                           | 22,70                           | 24,34                           | 2,20                                                     | 1,64                                                     |
| T1         | E     | 0,00-1,00           | 67,26                           | 77,12                           | 80,93                           | -                                                        | -                                                        |
| T2         | L     | 0,00-0,10           | 12,90                           | 12,98                           | 20,48                           | 0,08                                                     | 7,51                                                     |
| T2         | L     | 0,10-0,20           | 12,08                           | 9,34                            | 14,68                           | -2,74                                                    | 5,34                                                     |
| T2         | L     | 0,20-0,40           | 18,90                           | 16,28                           | 16,82                           | -2,62                                                    | 0,54                                                     |
| T2         | L     | 0,40-0,60           | 13,91                           | 14,29                           | 16,34                           | 0,38                                                     | 2,05                                                     |
| T2         | L     | 0,60-1,00           | 25,09                           | 24,36                           | 23,66                           | -0,73                                                    | -0,70                                                    |
| T2         | L     | 0,00-1,00           | 82,89                           | 77,25                           | 91,97                           | -                                                        | -                                                        |
| T2         | E     | 0,00-0,10           | 14,12                           | 12,72                           | 13,94                           | -1,40                                                    | 1,22                                                     |
| T2         | E     | 0,10-0,20           | 11,01                           | 9,02                            | 10,01                           | -1,99                                                    | 0,99                                                     |
| T2         | E     | 0,20-0,40           | 16,97                           | 15,44                           | 16,35                           | -1,53                                                    | 0,91                                                     |
| T2         | E     | 0,40-0,60           | 13,82                           | 14,50                           | 14,03                           | 0,69                                                     | -0,47                                                    |
| T2         | E     | 0,60-1,00           | 23,90                           | 25,02                           | 24,13                           | 1,12                                                     | -0,89                                                    |
| T2         | E     | 0,00-1,00           | 79,81                           | 76,70                           | 78,46                           | -                                                        | -                                                        |
| T3         | L     | 0,00-0,10           | 12,54                           | 13,05                           | 19,82                           | 0,52                                                     | 6,76                                                     |
| T3         | L     | 0,10-0,20           | 12,31                           | 10,81                           | 11,45                           | -1,50                                                    | 0,64                                                     |
| T3         | L     | 0,20-0,40           | 17,60                           | 18,59                           | 19,76                           | 1,00                                                     | 1,16                                                     |
| T3         | L     | 0,40-0,60           | 15,54                           | 14,31                           | 17,06                           | -1,23                                                    | 2,75                                                     |
| T3         | L     | 0,60-1,00           | 26,17                           | 27,02                           | 27,68                           | 0,85                                                     | 0,66                                                     |
| T3         | L     | 0,00-1,00           | 84,16                           | 83,79                           | 95,75                           | -                                                        | -                                                        |
| T3         | E     | 0,00-0,10           | 11,95                           | 12,20                           | 13,57                           | 0,25                                                     | 1,37                                                     |
| T3         | E     | 0,10-0,20           | 10,55                           | 10,01                           | 11,90                           | -0,54                                                    | 1,89                                                     |
| T3         | E     | 0,20-0,40           | 16,97                           | 17,46                           | 16,98                           | 0,49                                                     | -0,48                                                    |
| T3         | E     | 0,40-0,60           | 15,19                           | 14,37                           | 14,32                           | -0,82                                                    | -0,05                                                    |
| T3         | E     | 0,60-1,00           | 28,89                           | 27,92                           | 26,02                           | -0,97                                                    | -1,90                                                    |
| T3         | E     | 0,00-1,00           | 83,55                           | 81,97                           | 82,79                           | -                                                        | -                                                        |
| T4         | L     | 0,00-0,10           | 14,72                           | 12,71                           | 14,76                           | -2,01                                                    | 2,05                                                     |
| T4         | L     | 0,10-0,20           | 12,06                           | 10,63                           | 10,16                           | -1,43                                                    | -0,47                                                    |
| T4         | L     | 0,20-0,40           | 20,44                           | 17,07                           | 16,03                           | -3,36                                                    | -1,04                                                    |
| T4         | L     | 0,40-0,60           | 13,08                           | 16,05                           | 13,50                           | 2,97                                                     | -2,55                                                    |
| T4         | L     | 0,60-1,00           | 26,09                           | 26,20                           | 23,83                           | 0,11                                                     | -2,37                                                    |
| T4         | L     | 0,00-1,00           | 86,39                           | 82,67                           | 78,29                           | -                                                        | -                                                        |

|    |   |           |       |       |       |       |       |
|----|---|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T4 | E | 0,00-0,10 | 11,22 | 11,79 | 10,33 | 0,58  | -1,47 |
| T4 | E | 0,10-0,20 | 9,77  | 9,39  | 9,29  | -0,38 | -0,10 |
| T4 | E | 0,20-0,40 | 17,95 | 16,50 | 15,80 | -1,44 | -0,70 |
| T4 | E | 0,40-0,60 | 13,66 | 13,47 | 15,43 | -0,19 | 1,96  |
| T4 | E | 0,60-1,00 | 25,58 | 23,86 | 23,73 | -1,72 | -0,13 |
| T4 | E | 0,00-1,00 | 78,18 | 75,02 | 74,58 | -     | -     |

T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040; L=linha e E=entrelinha; EC19 = estoque de carbono em 2019; EC20 = estoque de carbono em 2020; EC21 = estoque de carbono em 2021; IMCA = incremento médio de carbono anual. As médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Entre os anos de 2020 e 2021, ocorreram perdas de estoque de carbono no T1 (Citros 446), na linha, na camada 0,10-0,20 m de  $1,75 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e na entrelinha, nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,40-0,60 m de  $1,31$  e  $0,55 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente, no T2 (SAF Citros 713), na linha, na camada 0,60-1,00 m de  $0,70 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e na entrelinha, nas camadas de 0,40-0,60 e 0,60-1,00 m de  $0,47$  e  $0,89 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente, no T3 (SAF Citros 780), na entrelinha, nas camadas de 0,20-0,40, 0,40-0,60 e 0,60-1,00 m de  $0,48$  e  $0,05$  e  $1,90 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente (Tabela 20). O tratamento T4 (SAF Citros 1.040) teve perdas de estoque de carbono em todas as camadas na linha, com exceção da camada 0,00-0,10 m que apresentou estoque positivo de  $2,05 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e em todas as camadas na entrelinha, com exceção da camada 0,40-0,60 m que apresentou estoque positivo de  $1,96 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . A maior perda de estoque de carbono foi obtida no T4 (SAF Citros 1.040), na camada de 0,20-0,40 m na linha ( $3,36 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ).

Comparando o estoque de carbono do solo dos diferentes tratamentos em 2019, 2020 e 2021, na camada 0,00-1,00 m, os maiores valores ocorreram em 2021, na linha, no T3 (SAF Citros 780) de  $95,75 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , seguido do tratamento T2 (SAF Citros 713) com  $91,97 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (Tabela 20). Verificou-se os menores valores no T1 (Citros 446) com  $67,26 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , em 2019, seguido do T4 (SAF Citros 1.040) com  $74,58 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , em 2021, ambos na entrelinha.

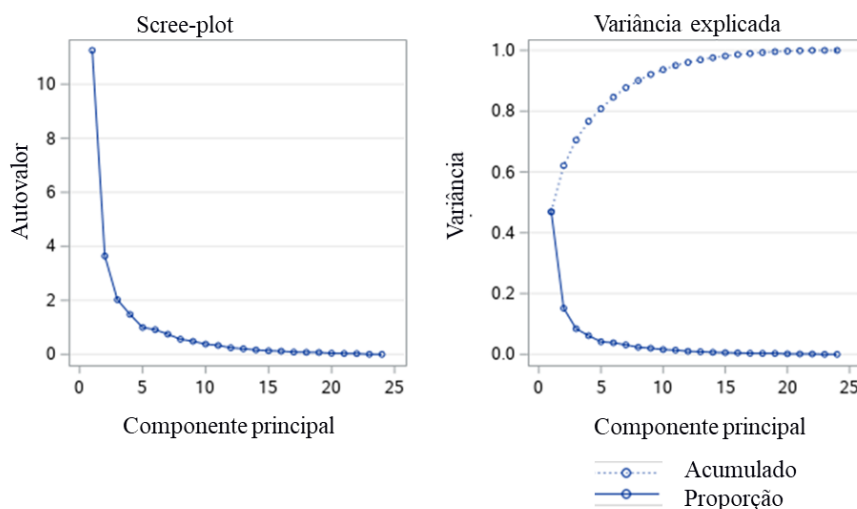
#### 9.4 Análise multivariada dos atributos químicos, físicos e estoque de carbono do solo

A análise de componentes principais (ACP) apresentada neste estudo expressa o comportamento do conjunto de dados de solos, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, na linha (L) e entrelinha (E) e nos anos de 2019, 2020 e 2021, referentes aos atributos: densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (MaP), microporosidade (MiP), teor de água no solo (TAS), resistência do solo à penetração (RP), pH do solo, fósforo disponível (P), cátions trocáveis ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^{+}$ ), enxofre (S), sódio (Na),

micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), teor de matéria orgânica do solo (MO), acidez potencial ( $H^+ + Al^{3+}$ ), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação de bases (V%), teor de carbono orgânico (C) e estoque de carbono (EC).

Na ACP, para seleção do número de Componentes Principais (CP), foi adotado o critério de Kaiser (1958), que seleciona os componentes principais que apresentaram autovalores acima de 1,00 e conseguem sintetizar uma variância acumulada acima de 70% (HAIR *et al.*, 2005), resultando na seleção dos três primeiros componentes principais CP1, CP2 e CP3 (Figura 23 e Tabela 21). Os resultados indicaram que, o primeiro componente principal (CP1) explicou 46,89% da variabilidade total, o segundo (CP2) 15,17% e o terceiro (CP3) 8,42%, totalizando 70,48% da variabilidade contida nos dados originais.

**Figura 23.** Gráfico “Scree-plot” da ACP dos atributos químicos, físicos e estoque de carbono em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em diferentes camadas e tratamentos, em 2019, 2020 e 2021, mostrando autovalores maiores que um e variância explicada cumulativa pelo número de componentes principais.



pH = potencial hidrogeniônico em  $CaCl_2$ ; MO = matéria orgânica; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio;  $H^+ + Al$  = acidez potencial; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = saturação de bases; S = enxofre; Na = sódio; Fe = ferro; Mn = manganês; Cu = cobre; Zn = zinco; B = boro; PT = porosidade total; MaP = macroporosidade; MiP = microporosidade; Ds = densidade do solo; TAS = teor de água no solo; RP = resistência do solo à penetração; C = teor de carbono orgânico; EC = estoque de carbono.

O primeiro componente (CP1) foi constituído pelos atributos Mg, CTC, P, PT, V%, C, Zn, Ds e RP sendo que, Mg, CTC, P, PT, V%, C e Zn se correlacionaram de maneira positiva, enquanto RP e Ds, negativamente (Tabela 21). Esses atributos tiveram maior poder discriminatório e o primeiro componente (CP1) expressa que o Mg, CTC, P, PT, V%, C e Zn

formam um contraste com a Ds e RP. O segundo componente principal (CP2) teve as variáveis MaP e U com maior poder discriminatório, que apresentaram correlações negativas, enquanto MiP,  $H^+ + Al^{3+}$ , Fe e Ds positivas. O terceiro componente principal (CP3) apresentou as variáveis pH e V% com maior variância e correlações negativas, enquanto a  $H^+ + Al^{3+}$ , Mn, Cu, S e MaP correlacionaram-se positivamente.

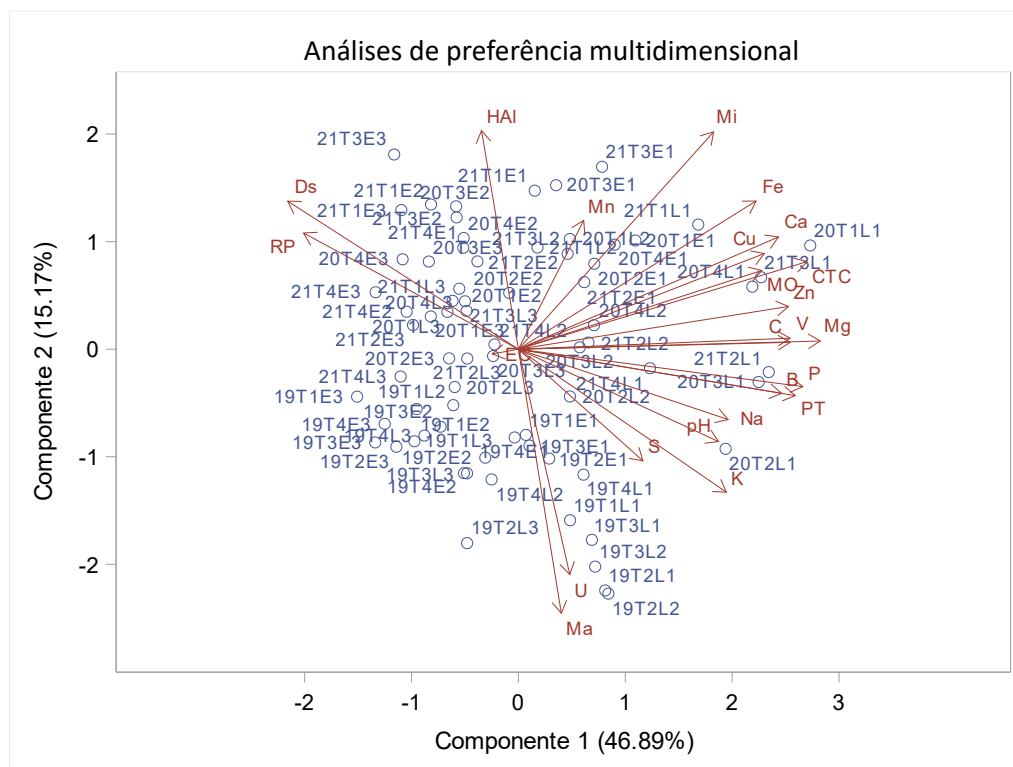
**Tabela 21.** Resumo dos componentes principais (CP1, CP2 e CP3) da análise multivariada dos atributos físicos, químicos e estoque de carbono em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Componentes Principais                | CP1    | CP2    | CP3    |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|
| Autovalor                             | 11,25  | 3,64   | 2,02   |
| Variância explicada (%)               | 46,89% | 15,17% | 8,42%  |
| pH                                    | 0,186  | -0,151 | -0,457 |
| Matéria orgânica (MO)                 | 0,227  | 0,128  | 0,059  |
| Fósforo (P)                           | 0,265  | -0,062 | 0,019  |
| Potássio (K)                          | 0,193  | -0,233 | 0,109  |
| Cálcio (Ca)                           | 0,242  | 0,180  | -0,189 |
| Magnésio (Mg)                         | 0,281  | 0,012  | -0,045 |
| Acidez potencial ( $H^+ + Al^{3+}$ )  | -0,034 | 0,355  | 0,432  |
| Capacidade de troca catiônica (CTC)   | 0,268  | 0,140  | -0,096 |
| Saturação de bases (V%)               | 0,253  | 0,016  | -0,313 |
| Enxofre (S)                           | 0,115  | -0,181 | 0,257  |
| Sódio (Na)                            | 0,195  | -0,115 | 0,055  |
| Ferro (Fe)                            | 0,221  | 0,240  | 0,113  |
| Manganês (Mn)                         | 0,061  | 0,206  | 0,298  |
| Cobre (Cu)                            | 0,229  | 0,154  | 0,275  |
| Zinco (Zn)                            | 0,251  | 0,069  | 0,142  |
| Boro (B)                              | 0,244  | -0,075 | -0,189 |
| Porosidade total (PT)                 | 0,257  | -0,067 | 0,102  |
| Microporosidade (MiP)                 | 0,181  | 0,357  | -0,142 |
| Macroporosidade (MaP)                 | 0,041  | -0,429 | 0,237  |
| Densidade do solo (Ds)                | -0,214 | 0,240  | -0,141 |
| Teor de água no solo (TAS)            | 0,045  | -0,366 | 0,108  |
| Resistência do solo à penetração (RP) | -0,200 | 0,190  | -0,110 |
| Teor de carbono orgânicos (C)         | 0,253  | 0,012  | 0,083  |
| Estoque de carbono (EC)               | -0,024 | -0,006 | 0,070  |

A representação gráfica Biplot (entre CP1 e CP2) permitiu caracterizar as observações com as variáveis que apresentaram maior variância na caracterização dos componentes principais 1 e 2 (Figura 24). As variáveis magnésio (0,281), capacidade de troca catiônica (0,268), fósforo (0,265), porosidade total (0,257), teor de carbono orgânico (0,253) e

saturação de bases (0,253) apresentaram as maiores variâncias no CP1, enquanto no CP2 foram macroporosidade (-0,429), teor de água no solo (-0,366), microporosidade (0,357) e acidez potencial (0,355) (Tabela 21).

**Figura 24.** Gráfico Biplot (CP1 e CP2) dos atributos físicos, químicos e estoque de carbono do solo em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



pH = potencial hidrogeniônico  $\text{CaCl}_2$ ; MO = matéria orgânica; P = fósforo, K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; H+Al = acidez potencial; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = saturação de bases; S = enxofre; Na = sódio; Fe = ferro; Mn = manganês; Cu = cobre; Zn = zinco; B = boro; PT = porosidade total; MaP = macroporosidade; MiP = microporosidade; Ds = densidade do solo; TAS = teor de água no solo; RP = resistência do solo à penetração; C = teor de carbono orgânico; EC = estoque de carbono; T1 = Citros 446; T2 = SAF citros 713; T3 = SAF citros 780, T4 = SAF citros 1.040; em um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nas camadas L1 (0,00-0,10m ), L2 (0,10-0,20 m) e L3 (0,20-0,40m ), na linha e E1 (0,00-0,10 m), E2 (0,10-0,20 m) e E3 (0,20-0,40 m), na entrelinha.

No quadrante 1 (lado superior direito) todos os tratamentos em 0,00-0,10 m, na linha, em 2020 e 2021, foram caracterizados por altos valores das variáveis magnésio, capacidade de troca catiônica, saturação de bases, teor de carbono orgânico e zinco (Figura 24). No quadrante 3 (lado inferior esquerdo), todos os tratamentos, em 0,20-0,40 m, na entrelinha e T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040) na linha, em 2019 e T4 (SAF Citros 1.040) em 0,20-0,40 m, na linha, em 2021 apresentaram baixos valores para as variáveis magnésio, capacidade de troca catiônica, teor de fósforo, porosidade total e saturação de bases.

No quadrante 2 (lado superior esquerdo), os tratamentos T1 (Citros 446), T3 (SAF Citros 780) e T4 (SAF Citros 1.040) em 0,20-0,40 m, na entrelinha em 2020 e T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040) em 0,20-0,40 m e 0,10-0,20 m na entrelinha, em 2021, apresentaram altos valores para as variáveis densidade do solo, resistência do solo à penetração e acidez potencial e baixos para a macroporosidade, teor de água no solo, potássio, porosidade total e fósforo (Figura 24). No quadrante 4 (lado inferior direito), todos os tratamentos, em 0,00-0,10 m e T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780) em 0,10-0,20 m na linha, em 2019 com valor inverso ao do quadrante 2, ou seja, baixos valores para as variáveis densidade do solo, resistência do solo à penetração e acidez potencial e alto valor para macroporosidade, teor de água no solo, potássio, porosidade total e fósforo.

Analisando o gráfico Biplot verifica-se que, pelo ângulo formado entre os vetores, existe forte correlação (baixa angulação) entre as variáveis Mg, CTC, C, Zn, P e PT, entre Ds e RP e entre TAS e MaP (Figura 24).

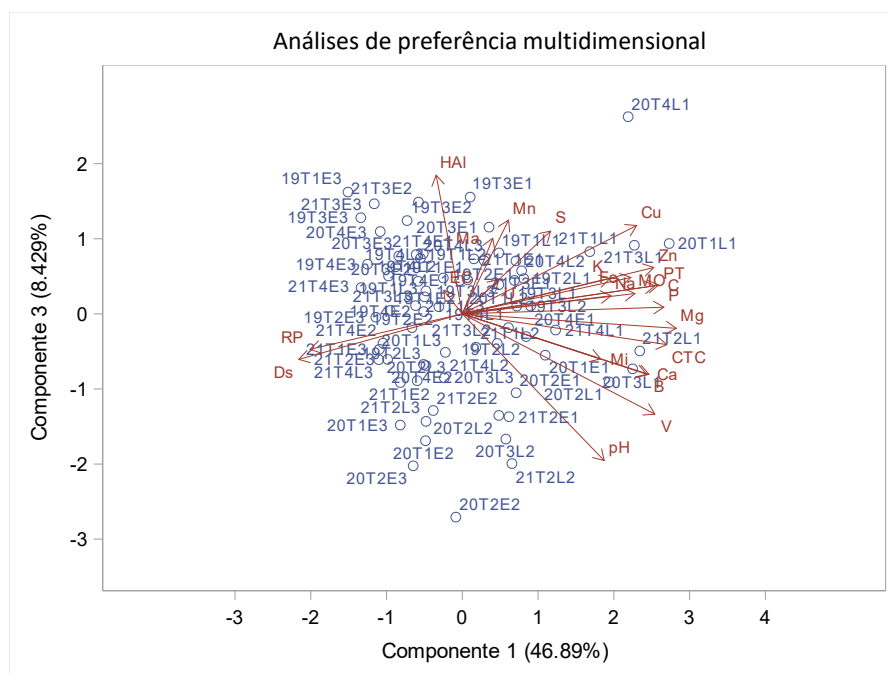
A representação gráfica Biplot (CP1 e CP3) permitiu caracterizar as observações com as variáveis que apresentaram maior variância na caracterização dos componentes principais 1 e 3 (Figura 25). As variáveis, magnésio (0,281), capacidade de troca catiônica (0,268), teor de fósforo (0,265), porosidade total (0,257), teor de carbono orgânico (0,253) e saturação de bases (0,253) apresentaram as maiores variâncias no CP1, enquanto na CP3, as variáveis de maiores variâncias responsáveis pela discriminação foram pH (-0,457),  $H^+ + Al^{3+}$  (0,432), V% (-0,313), Mn (0,298) e Cu (0,275) (Tabela 21).

No quadrante 1 (lado superior direito), os tratamentos T1 (Citros 446) e T3 (SAF Citros 780), em 0,00-0,10 m na linha para o ano de 2021 e T1 (Citros 446) na mesma camada e local, em 2021 foram caracterizados por altos valores para as variáveis Cu e Zn e baixos para RP e Ds (Figura 25). No quadrante 3 (lado inferior esquerdo), os tratamentos T1 (Citros 446) e T2 (SAF Citros 713), em 0,20-0,40 m na entrelinha, T4 (SAF Citros 1.040) em 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m na entrelinha, apresentaram altos valores para as variáveis Ds e RP e baixos para Cu, Zn e PT.

No quadrante 2 (lado superior esquerdo), o tratamento T3 (SAF Citros 780) em 0,10-0,20 m na entrelinha, em 2019 e 2021, apresentou altos valores para a variável  $H^+ + Al^{3+}$  e baixos para V%, pH, Ca e CTC (Figura 25). No quadrante 4 (lado inferior direito), os tratamentos T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780) em 0,00-0,10 m na linha, em 2020 e o tratamento T2 (SAF Citros 713) em 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m na linha, em 2021, com as

variáveis apresentando relação inversa ao quadrante 2, ou seja, baixos valores para a variável  $H^+ + Al^{3+}$  e altos para V%, pH, Ca e CTC.

**Figura 25.** Gráfico Biplot (CP1 e CP3) dos atributos físicos, químicos do solo e estoque de carbono em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



pH = potencial hidrogeniônico  $CaCl_2$ ; MO = matéria orgânica; P = fósforo, K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio;  $H^+ + Al$  = acidez potencial; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = saturação de bases; S = enxofre; Na = sódio; Fe = ferro; Mn = manganês; Cu = cobre; Zn = zinco; B = boro; PT = porosidade total; MaP = macroporosidade; MiP = microporosidade; Ds = densidade do solo; U = teor de água no solo; RP = resistência do solo à penetração; C = teor de carbono orgânico; EC = estoque de carbono; T1 = Citros 446; T2 = SAF citros 713; T3 = SAF citros 780, T4 = SAF citros 1.040; em um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, nas camadas L1 (0,00-0,10m), L2 (0,10-0,20 m) e L3 (0,20-0,40m), na linha e E1 (0,00-0,10 m), E2 (0,10-0,20 m) e E3 (0,20-0,40 m), na entrelinha.

A partir do gráfico Biplot observa-se por meio do ângulo formado entre os vetores, que existe forte correlação (baixa angulação) entre PT, C, P e Cu e uma fraca correlação destas variáveis com a Ds e RP (Quadrantes 1 e 3). Verifica-se que  $H^+ + Al^{3+}$  está em contraste com pH, V%, Ca e CTC (Quadrantes 2 e 4) (Figura 25).

Em resumo, analisando os gráficos Biplot com os resultados da análise de componentes principais (Figuras 23 e 24), verifica-se que os altos valores de CTC estão relacionados à camada 0,00-0,10 m na linha, nos anos de 2020 e 2021, em T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780) e baixos valores estão relacionados à camada 0,20-0,40 m na entrelinha, no ano de 2019 em T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040). A Ds e RP tiveram altos valores nos anos de 2020 e 2021, na camada 0,20-0,40 m, na entrelinha e estiveram relacionadas aos

tratamentos T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040). As variáveis TAS e Mg apresentaram altos valores na camada 0,00-0,10 m na linha no ano de 2019, nos tratamentos T3 (SAF Citros 780) e T2 (SAF Citros 713). Os tratamentos T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780), na camada 0,00-0,10 m na linha, nos anos de 2020 e 2021 apresentaram altos valores para a PT e P e baixos valores de Ds e RP.

**Tabela 22.** Coeficientes das variáveis canônicas (CAN1 e CAN2) associados aos atributos físicos, químicos e estoque de carbono em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

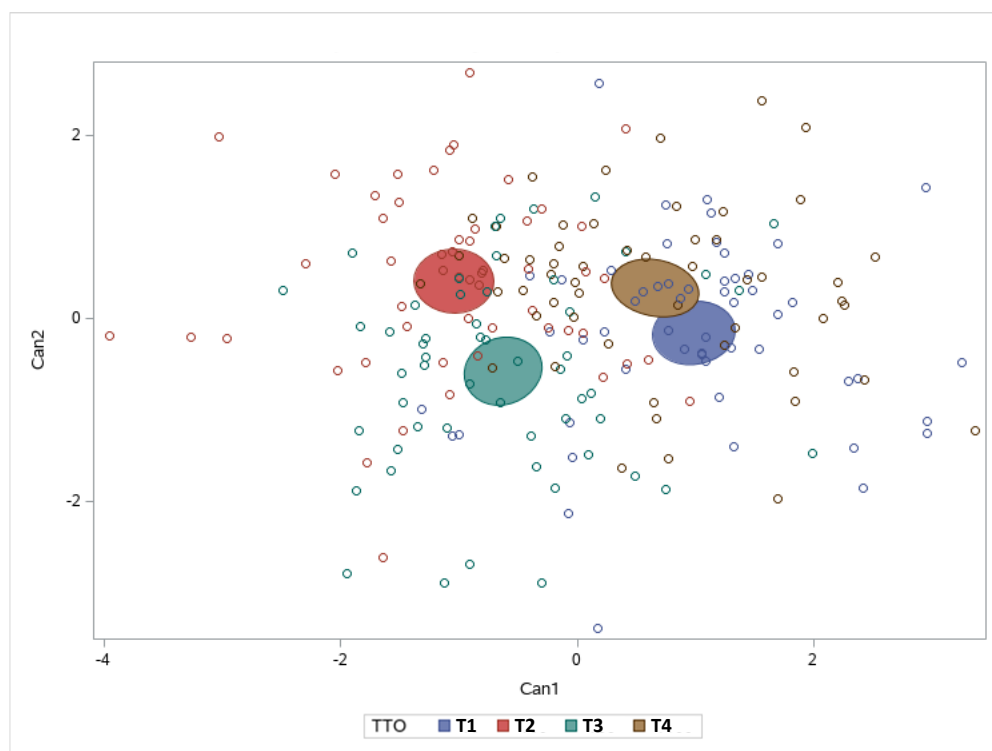
| Coeficientes canônicos brutos         |       |        |        |
|---------------------------------------|-------|--------|--------|
| Variável                              | Can1  | Can2   | Can3   |
| pH                                    | -4,12 | 0,45   | -1,80  |
| Matéria orgânica (MO)                 | 0,00  | -0,11  | 0,10   |
| Fósforo (P)                           | 0,01  | 0,00   | 0,01   |
| Potássio (K)                          | -0,77 | -1,53  | 1,31   |
| Cálcio (Ca)                           | -0,51 | -1,38  | 1,37   |
| Magnésio (Mg)                         | -0,44 | -1,27  | 1,19   |
| Acidez potencial (H+Al)               | -1,01 | -1,10  | 0,92   |
| Capacidade de troca catiônica (CTC)   | 0,49  | 1,33   | -1,34  |
| Saturação de bases (V%)               | -0,02 | 0,05   | 0,03   |
| Enxofre (S)                           | -0,07 | -0,11  | -0,02  |
| Ferro (Fe)                            | -0,04 | -0,15  | -0,02  |
| Manganês (Mg)                         | 0,15  | -0,05  | 0,01   |
| Cobre (Cu)                            | 0,19  | -0,20  | 0,79   |
| Zinco (Zn)                            | 0,13  | 0,06   | -0,23  |
| Boro (B)                              | 0,33  | 1,16   | 0,02   |
| Porosidade total (PT)                 | 6,25  | -27,02 | 13,55  |
| Microporosidade (MiP)                 | 1,98  | 38,21  | -13,29 |
| Macroporosidade (MaP)                 | -2,78 | 34,10  | -20,42 |
| Densidade do solo (Ds)                | 0,88  | 2,09   | -2,40  |
| Teor de água no solo (U)              | 0,45  | 2,72   | 0,33   |
| Resistência do solo à penetração (RP) | 0,17  | 0,06   | 0,02   |
| Carbono orgânico (C)                  | -1,33 | 2,27   | -0,44  |
| Estoque de carbono (EC)               | -0,03 | -0,04  | 0,06   |

A partir da análise discriminante canônica, as variáveis originais contribuíram na formação das duas primeiras variáveis canônicas (CAN1 e CAN2) (Tabela 22). Desse modo, as vinte e quatro variáveis originais (Ds, PT, MaP, MiP, TAS, RP, pH, P, Ca, Mg, K, S, Na, B, Cu, Fe, Mn, Zn, MO,  $H^+ + Al^{3+}$ , CTC, V%, C e EC) foram reduzidas a somente duas (CAN1 e CAN2). A primeira variável canônica (CAN1), apresenta combinação linear das variáveis centralizadas  $CAN1 = PT (6,24), pH (-4,11), MaP (-2,78), MiP (1,97) e C (-1,33)$

proporcionando a maior diferença entre as médias dos tratamentos. A segunda variável canônica CAN2 = MiP (38,20), MaP (34,09), PT (-27,01), TAS (2,71) e C (2,26) fornece a segunda maior diferença entre as médias dos tratamentos. Verifica-se para as duas variáveis canônicas, que as variáveis originais PT, MaP, MiP e C se mostraram como uma fonte importante de variação, demonstrando que esses atributos foram importantes para discriminar os tratamentos.

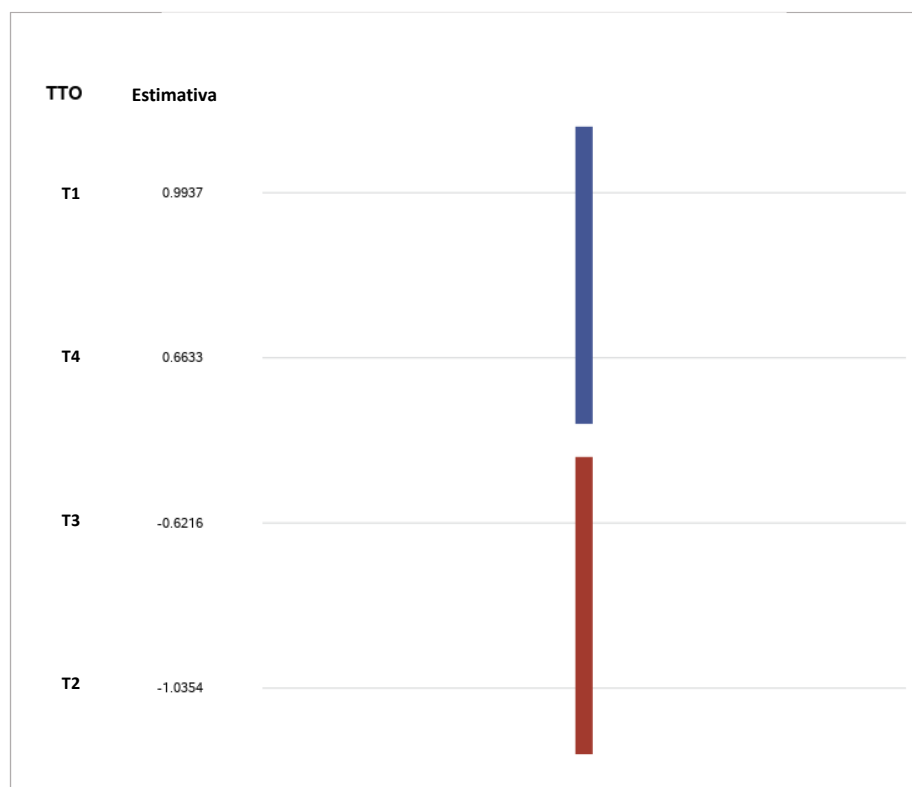
A Figura 26 apresenta as regiões (elipses) de confiança de 95% para os vetores de médias dos tratamentos das novas variáveis canônicas (CAN1 e CAN2). Na CAN1 os maiores valores das classes médias foram obtidos para os tratamentos T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040) com valores de 0,993 e 0,663, respectivamente (Figura 27). E os menores valores foram encontrados no T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780), de -1,035 e -0,621, respectivamente. O teste de agrupamento de Tukey demonstra que T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040) foram semelhantes e diferiram de T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780), que também foram semelhantes entre si.

**Figura 26.** Elipses de confiança de 95% para os vetores de médias das variáveis canônicas (CAN1 e CAN2) associados aos atributos físicos, químicos e estoque de carbono do solo, em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



TTO = tratamento; T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

**Figura 27.** Agrupamento de Tukey dos atributos físicos, químicos do solo e estoque de carbono em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, em 2019, 2020 e 2021, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



Médias cobertas pela mesma barra não são significativamente diferentes. TTO = tratamento; T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

## 10. DISCUSSÃO

A densidade do solo não apresentou diferença significativa entre os tratamentos nos diferentes anos da pesquisa, no entanto, aumentou ao longo do tempo. Antes da implantação do experimento (2017), na camada 0,00-0,10 m, a densidade do solo foi de 1,35 kg dm<sup>-3</sup>, em 0,10-0,20 m 1,44 kg dm<sup>-3</sup>, em 0,20-0,40 m 1,51 kg dm<sup>-3</sup> e em 0,40-0,60 m 1,49 kg dm<sup>-3</sup>. Em 2021, considerando os valores médios dos tratamentos e anos na linha, a camada 0,00-0,10 m apresentou 1,46 kg dm<sup>-3</sup>, 0,10-0,20 m 1,61 kg dm<sup>-3</sup>, respectivamente e 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m com 1,67 e 1,69 kg dm<sup>-3</sup>, respectivamente. Na entrelinha, a camada 0,00-0,10 m com 1,62 kg dm<sup>-3</sup>, 0,40-0,60 m 1,65 kg dm<sup>-3</sup> e 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m 1,67 e 1,68 kg dm<sup>-3</sup>, respectivamente. Os maiores valores de densidade do solo, entre tratamentos e anos, ocorreram nas camadas 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m.

Esse aumento na densidade do solo é, provavelmente, decorrente do tráfego de máquinas, efetuado com a finalidade de adubação das plantas, controle biológico de insetos e doenças e roçada do capim na entrelinha para formação das leiras. Conforme Hamza e

Anderson (2005), a densidade do solo pode aumentar devido ao pisoteio animal, tráfego de máquinas e implementos agrícolas e cultivo intensivo. Lima *et al.* (2004), estudando a compactação do solo em pomar de laranja, verificaram que a compactação do solo aumentou no sentido das posições de amostragem: linha de plantio, entre rodado, rodado das máquinas e implementos agrícolas e projeção da copa das plantas cítricas.

A média da Ds foi menor na linha do que na entrelinha, nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m, e semelhante nas demais camadas. A alta biomassa sobre a superfície do solo, o teor de matéria orgânica e uso e manejo do solo reduz os efeitos negativos do tráfego de máquinas, por absorverem parte das pressões exercidas na superfície (CORSINI; FERRAUDO, 1999; BRAIDA *et al.*, 2006). As práticas agrícolas podem induzir a compactação do solo, principalmente onde há tráfego pesado de máquinas e implementos, causando impactos negativos nos atributos físicos do solo em pomares de citros (FIDALSKI *et al.*, 2007), principalmente na entrelinha (HOMMA *et al.*, 2012), podendo diminuir a produção de frutos. Segundo Spinelli *et al.* (2005), o impacto no solo de máquinas agrícolas representa uma preocupação secundária nos Sistema Agroflorestais, uma vez que o tráfego ocorre com cobertura na entrelinha.

Em solos arenosos, o valor crítico de densidade do solo para o desenvolvimento das raízes é acima de  $1,75 \text{ kg dm}^{-3}$  (CORSINI; FERRAUDO, 1999; REICHERT *et al.*, 2003). Portanto, nenhum dos tratamentos obteve valores críticos para o desenvolvimento radicular, com exceção do tratamento T3 (SAF Citros 780), em 2021 na camada 0,20-0,40 m na linha, que apresentou  $1,76 \text{ kg dm}^{-3}$ . Em NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS, a compactação do solo não deve ser vista como permanente, uma vez que, a decomposição dos restos de raízes e da biomassa do sistema formam bioporos, melhorando a aeração e a infiltração da água no solo (STONE; SILVEIRA, 2001). Spinelli *et al.* (2019) estudando a redução da compactação do solo após trabalhos de desbaste mecanizado em plantios agroflorestais, verificaram que a densidade do solo pós-tráfego estava abaixo dos valores críticos para o crescimento das raízes, que são estimados em torno de  $1,70 \text{ kg dm}^{-3}$  para solos arenosos segundo Heilman (1981).

Analisando os resultados da análise de componentes principais, verifica-se que a Ds e RP tiveram altos valores nos anos de 2020 e 2021, na camada 0,20-0,40 m na entrelinha e estiveram relacionadas, principalmente, aos tratamentos T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040). Os tratamentos T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780), na camada 0,00-0,10 m, na linha, nos anos de 2020 e 2021 apresentaram altos valores de PT e baixos valores de Ds e RP. Tu *et al.* (2021), estudando os efeitos em longo prazo da cobertura por gramíneas na

conservação do solo e da água e na produção de frutas de pomares de citros no sul da China, observaram que nos primeiros cinco anos após o plantio, o tratamento sem cobertura aumentou a densidade do solo superficial em  $0,03 \text{ kg dm}^{-3}$ , enquanto a porosidade total e a capacidade de campo do solo diminuiu 0,56% e 1,71%, respectivamente, em relação às áreas com cobertura de gramíneas.

A correta aeração do solo é fundamental para o desenvolvimento adequado das raízes, portanto, atributos como a MaP e a RP são importantes na avaliação da condição no solo (REYNOLDS *et al.*, 2002). A macroporosidade (MaP) não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, nos anos da pesquisa e diminuiu ao longo do tempo. Antes da implantação do experimento (2017), nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m, a macroporosidade foi de  $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , em 0,20-0,40 m foi  $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e em 0,40-0,60 m de  $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Em 2021, na camada 0,00-0,10 m na linha, o T4 (SAF Citros 1.040) apresentou a maior macro com  $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , enquanto os tratamentos T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780) com 0,09 e  $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente e T1 (Citros 446) a menor macro com  $0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , no entanto essas diferenças não foram significativas. Avaliando a qualidade física do solo de pomares cítricos sob cultivo, herbicida e manejo orgânico, Di Prima *et al.* (2018), verificaram as práticas de manejo adotadas na agricultura orgânica (como cobertura vegetal entre as árvores, corte após a poda e espalhamento dos cavacos na superfície do solo) aumentaram a macroporosidade. Por outro lado, as estratégias convencionais de manejo levaram à degradação do solo devido à perda de matéria orgânica, compactação do solo e redução da estabilidade estrutural.

A macroporosidade crítica, considerada limitante ao melhor desenvolvimento da maior parte das plantas cultivadas é de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (ERICKSON, 1982). Na média dos tratamentos, em 2019, nenhuma camada, tanto na linha como entrelinha, apresentou valores críticos. Em 2020, todas as camadas apresentaram valores críticos, com exceção de 0,00-0,10 m na linha e em 2021, todos os resultados apresentaram valor crítico. Müller *et al.* (2011) estudando os atributos físicos e químicos de um ARGISSOLO VERMELHO em pomar orgânico de citros com manejo da vegetação nas entrelinhas, verificaram para todos os tratamentos que o valor da macroporosidade esteve acima  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  nas profundidades 0,00-0,10 m e 0,00-0,20 m.

Com a compactação há um aumento da densidade e da resistência do solo à penetração, redução da porosidade, principalmente da macroporosidade, afetando o fluxo de água, oxigênio, dióxido de carbono, nutrientes e temperatura, que podem limitar o crescimento e desenvolvimento das plantas (STEPNIEWSKI *et al.*, 2002; SHAHED *et al.*, 2021). Na média

dos tratamentos, a MaP foi maior na linha do que na entrelinha, em 2019, nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, em 2020, nas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m e em 2021, na camada 0,00-0,10 m. A biomassa na leira de plantio, provavelmente contribuiu para uma maior macroporosidade na linha, nas camadas mais superficiais. O cultivo intensivo é responsável pela degradação da estrutura do solo e sua redução, com o acúmulo de resíduos orgânicos na superfície do solo, pode reverter tal situação (HUANG *et al.*, 2017). A matéria orgânica na superfície do solo favorece a formação de agregados, ocasionando melhoria na qualidade estrutural com aumento de macroporosidade na camada superficial (CHERUBIN *et al.*, 2019).

A microporosidade (MiP) não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, nos anos da pesquisa e aumentou ao longo do tempo. Antes da implantação do experimento, em 2017, apresentou na camada 0,00-0,10 m o valor de  $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , em 0,10-0,20 m com  $0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , em 0,20-0,40 m foi de  $0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e em 0,40-0,60 m de  $0,26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Em 2021, a microporosidade na linha e entrelinha, na camada 0,00-0,10 m foi de 0,37 e 0,32  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente, em 0,10-0,20 m de 0,34 e 0,30  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente, em 0,20-0,40 m de 0,31 e 0,30  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente e em 0,40-0,60 m com 0,32 e 0,31  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente. Sales *et al.* (2010), estudando um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO em Goiás, sob diferentes sistemas de manejo, obteve microporosidade média de  $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  nas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m. Pesarico *et al.* (2013), pesquisando sistemas agroflorestais encontrou MiP de 0,37 e 0,42  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ , nas camadas 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m, respectivamente, em um NITOSSOLO VERMELHO de textura argilosa.

Verificou-se que os valores de macro em relação aos microporos foram inferiores na área experimental em um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO. Segundo Oliveira *et al.* (2007), o incremento da microporosidade é resultado da compactação do solo, promovendo a transformação de parte dos macroporos em microporos. Considerando que, em condições naturais, a porosidade de aeração é elevada em solos arenosos, o aumento na microporosidade pode ser benéfico, até certo limite, para este tipo de solo por aumentar a retenção de água disponível (ROSA *et al.*, 2018).

Porosidade total superior a 50% é considerado o valor ideal para o desenvolvimento das plantas (ERICKSON, 1982). A matéria orgânica do solo é responsável pelo aumento da agregação das partículas, elevando a porosidade do solo e melhorando sua estabilidade (BAYER; MIELNICZUK, 2008) Segundo Oliveira *et al.* (2016), o cultivo de cafeeiro com diferentes densidades de araucária promoveu aumento no teor de matéria orgânica e melhorias na qualidade física do solo, com incremento do volume total de poros.

A porosidade total apresentou diferença estatística significativa entre os tratamentos, no ano de 2021, na camada 0,00-0,10 m, na linha, sendo que no tratamento T2 (SAF Citros 713) foi de  $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , maior do que o tratamento T1 (Citros 446) com  $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Os tratamentos T3 (SAF Citros 780) e T4 (SAF Citros 1.040) apresentaram a mesma PT ( $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Segundo Six *et al.* (2000), a cobertura viva do solo é responsável pelo aporte de matéria orgânica que, por meio de sua biomassa, alimenta os microorganismos do solo e contribui para formação de microagregados, aumentando a porosidade, razão pela qual, provavelmente, resultou em maior porosidade total na camada mais superficial do solo, na linha, nos tratamentos com diferentes densidades arbóreas de sombreamento. A intensa utilização de resíduos vegetais provenientes da roçagem das entrelinhas e das podas para manejo do sistema proporciona uma espessa camada de cobertura do solo ao longo das leiras de plantio, com renovação frequente.

A partir da análise discriminante canônica, verifica-se que as variáveis originais PT, MaP, MiP e C se mostraram como uma fonte importante de variação, demonstrando que esses atributos foram determinantes para discriminar os tratamentos. O teste de agrupamento de Tukey demonstrou que T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040) foram semelhantes e diferiram de T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780), que também foram semelhantes entre si.

O teor de água no solo não apresentou diferença significativa entre os tratamentos e camadas nos anos da pesquisa. Na média dos tratamentos, profundidades e locais, o teor de água no solo em 2019 foi significativamente maior do que em 2020 e 2021. Porém, a coleta de solo em 2019 foi realizada no período das águas, enquanto as demais na seca (Figura 2), o que contribuiu para essa diferença. Na linha, somente a camada de 0,00-0,10 m teve decréscimo da umidade ao longo dos anos. Na entrelinha, onde não há irrigação e o solo possui maior densidade, todas as camadas tiveram decréscimo do teor de água no solo. Conforme Jesus *et al.* (2015), solos com maior densidade possuem uma menor capacidade de retenção de água e a compactação afeta as propriedades hidráulicas do solo, infiltração e o fluxo de água associado ao solo, sendo que as propriedades de retenção e transporte de água do solo são alteradas em resposta a mudanças na geometria do espaço poroso. Segundo Spinelli *et al.* (2019) o tráfego de máquinas causou aumento da compactação, principalmente na entrelinha, justificando a perda do teor de água no solo ao longo dos anos nestes locais.

As árvores em sistemas agroflorestais usam água do solo que as raízes mais rasas das plantas agrícolas não conseguem acessar (GILLESPIE *et al.*, 2000; JOSE *et al.*, 2000; ANDERSON *et al.*, 2009; TU *et al.*, 2021). Em um estudo realizado por Anderson *et al.* (2009),

no intuito de examinar as influências de Sistemas Agroflorestais na infiltração e mudanças no teor de água ao longo da estação de crescimento das plantas, demonstrou que o tratamento agroflorestal apresentou menor teor de água em comparação com o tratamento de cultivo em linha. Em avaliações dos atributos físicos do solo em Sistemas Agroflorestais, utilizando ampla cobertura de espécies arbóreas, houve aumento da velocidade de infiltração da água no solo e a melhoria da qualidade do solo (BARGUÉS TOBELLA *et al.*, 2014).

A resistência do solo à penetração, na média geral dos dados, considerando todos os tratamentos, camadas e locais, apresentou diferenças significativas entre os anos, sendo que o ano de 2019 foi diferente de 2020 e 2021, com menores valores. Porém, a coleta de solo em 2019 foi realizada no período das águas, motivo pelo qual, provavelmente, a RP foi menor. Segundo Vaz *et al.* (2011), a resistência do solo à penetração varia com o teor de água, potencial matricial, densidade do solo ou porosidade total. Conforme os mesmos autores, experimentos realizados com vários tipos de solos revelaram que a RP está diretamente correlacionada com a densidade do solo e exibe uma relação inversa com o teor de água no solo, apontando que para solos muito úmidos a RP foi menor. O mesmo aconteceu no experimento, onde a RP e a densidade do solo aumentaram ao longo do tempo, principalmente na entrelinha, enquanto o teor de água diminuiu.

Valores de RP acima de 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes da maioria das plantas (CANARACHE, 1990). Em 2019 nenhuma das camadas atingiu esse valor, no entanto, em 2020 e 2021 a RP apresentou valores críticos, nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m na entrelinha, devido ao tráfego de máquinas. De acordo com Dedecek e Gava (2005), o ponto de máxima compactação acontece no solo argiloso na camada de 0,10-0,20 m e no solo arenoso na camada de 0,20-0,30 m. As linhas de plantio não apresentaram valores críticos, em nenhuma camada, demonstrando que a umidade devido a irrigação e cobertura do solo, nas leiras, contribuiu para melhor qualidade do solo.

Com relação aos atributos químicos do solo, as variáveis MO, P, Ca, Mg, CTC, V%, Fe e Mn tiveram variação entre os anos, com valores maiores em 2020 e 2021. Em estudo avaliando os atributos químicos de Sistemas Agroflorestais, Iwata *et al.* (2012), verificaram teores de cálcio, magnésio e potássio mais elevados nos solos sob SAF, superando os teores encontrados em floresta nativa. Segundo Campanha *et al.* (2007) esses resultados são associados à alta atividade de decomposição realizada pela biota do solo que este ambiente proporciona, influenciando as reações químicas e contribuindo para a melhoria dos atributos de fertilidade do solo.

O teor de fósforo foi mais alto na linha de plantio devido ao aporte dos restos vegetais na leira de plantio. Lima *et al.* (2011) avaliando as mudanças nos atributos químicos e no estoque de carbono em Sistemas Agroflorestais, verificaram que o teor de fósforo em um SAF de 10 anos foi seis a sete vezes maior do que agricultura de corte e queima e floresta nativa, respectivamente. Ainda segundo os autores, os maiores estoques de COT foram observados no período seco, respectivamente, no SAF de 10 anos com 8,54 Mg ha<sup>-1</sup> e no SAF de 6 anos com 43,30 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Houve diferença estatística significativa da MO entre os anos, sendo que o ano de 2021 diferiu de 2020 e 2019, apresentando maiores valores. Segundo Rosset *et al.* (2022) a dinâmica da matéria orgânica no solo depende das práticas de gerenciamento dos sistemas, somado a fatores ambientais, determinando se o teor orgânico estabiliza ou diminui. O acúmulo do material vegetal proveniente das roçadas do capim nas entrelinhas e das podas das espécies arbóreas plantadas nas leiras foi considerado o principal fator responsável pelos resultados avaliados, que estão de acordo com diversos estudos presentes na literatura, que afirmam que a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) é alterada pela deposição contínua de resíduos vegetais (IWATA *et al.*, 2012; SANTIAGO *et al.*, 2013; GMACH *et al.*, 2020).

Analisando os gráficos Biplot com os resultados da análise de componentes principais, verifica-se que altos valores de CTC estão relacionados à camada de 0,00-0,10 m na linha de plantio, nos anos de 2020 e 2021, em T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780) e baixos valores estão relacionados à camada 0,20-0,40 m, na entrelinha, no ano de 2019 em T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040). Marçal *et al.* (2021), em estudo no município de Itirapina-SP, observaram que as variáveis como a SB, CTC e V% foram altamente correlacionadas entre si e altamente correlacionadas com as bases trocáveis Ca, Mg e K, bem como com o pH.

Houve diferença estatística significativa para a CTC comparando os anos de 2019, 2020 e 2021, considerando todos os tratamentos, camadas e locais, sendo que o ano de 2020 apresentou maiores valores médios. No geral, os solos arenosos possuem elevada permeabilidade de gases e calor específico e baixa concentração de carbono orgânico e capacidade de troca catiônica (HUANG; HARTEMINK, 2020). Mesmo em um solo arenoso, houve aumento da capacidade de troca catiônica, principalmente nos tratamentos T3 (SAF Citros 780) e T2 (SAF Citros 713). Arévalo-Gardini *et al.* (2015) estudando as mudanças nos atributos físicos e químicos do solo em manejo agroflorestal natural e tradicional, verificaram que o pH do solo, CTC, Mg trocável e soma das bases foram maiores no Sistema Agroflorestal melhorado e natural onde árvores sem valor econômico foram removidas seletivamente para

fornecer 50% de sombra, do que no Sistema Agroflorestal tradicional melhorado onde todas as árvores nativas foram cortadas e queimadas no local.

O teor de carbono orgânico do solo em 2021, na camada 0,10-0,20 m, apresentou diferença significativa entre os tratamentos, sendo que o tratamento T2 (SAF Citros 713) teve maior valor, com  $1,00 \text{ g kg}^{-1}$  em relação ao tratamento T1 (Citros 446), com  $0,65 \text{ g kg}^{-1}$ , na linha e o tratamento T3 (SAF Citros 780) apresentou maior valor, com  $0,81 \text{ g kg}^{-1}$  comparado ao tratamento T4 (SAF Citros 1.040), com  $0,63 \text{ g kg}^{-1}$ , na entrelinha. Lima *et al.* (2011) associam os maiores estoques de C em SAF à melhoria da qualidade do solo proporcionada pelo maior aporte de fitomassa proveniente do manejo. Os autores apontam que, além de atuar como fonte de carbono e de nutrientes, a cobertura do solo atenua as oscilações de temperatura e de umidade, intensificando a atividade biológica. Para Nair *et al.* (2009), as espécies arbóreas e a forma como são combinadas em diferentes Sistemas Agroflorestais influenciam na quantidade e na qualidade da biomassa devolvida ao solo.

As principais diferenças, entre o material vegetal utilizado para cobertura do solo no T1 (Citros 446) e demais tratamentos, estão na composição e o volume do resíduo. O T1 (Citros 446) contou com roçadas do capim Mombaça para formação das leiras, enquanto os demais tratamentos contaram também com as podas de espécies fornecedoras de biomassa, como o eucalipto, gliricídia, ingá, farinha seca, eritrina, entre outras. O material proveniente do manejo, especialmente do eucalipto, é lenhoso e rico em carbono, que tende a ser decomposto mais lentamente, mantendo o solo coberto por mais tempo, motivo que pode ter ocasionado menor teor de carbono no T1 (Citros 446). Em estudo desenvolvido por Islam *et al.* (2015), avaliando o efeito da diversidade de árvores no teor de carbono orgânico do solo em Sistema Agroflorestal, verificaram que carbono orgânico do solo aumentou com a profundidade do solo, mas não foi encontrada diferença no pH do solo. Segundo os autores as raízes da árvore contribuem para a variação observada no teor de carbono orgânico do solo entre profundidades, destacando que, tanto a densidade de árvores quanto a riqueza de espécies afetam o teor de carbono.

A razão do tratamento T4 (SAF Citros 1.040) ter apresentado baixo teor carbono pode estar relacionado com o sombreamento intenso, que diminui a atividade biológica e a decomposição da matéria orgânica. De acordo com Nair *et al.* (2009) as plantas sintetizam  $\text{CO}_2$  em biomassa e parte desta biomassa vegetal se acumula, como carbono orgânico do solo, por meio da decomposição. Melloni *et al.* (2018) obtiveram resultados semelhantes quando estudaram o efeito do sombreamento em café, concluindo que o sombreamento mediano em

cafeeiro proporcionou maior acúmulo de matéria orgânica no solo com valor de  $2,70 \text{ dag dm}^{-3}$ , com efeito positivo nos atributos físicos, quando comparado aos tratamentos com sombreamento intenso obtendo um  $2,35 \text{ dag dm}^{-3}$  e sem sombreamento com  $2,28 \text{ dag dm}^{-3}$ . Já Fernandes *et al.* (2018), verificaram que os desenhos com uma maior densidade relativa de frutíferas e árvores de sombra proporcionaram um maior armazenamento de carbono, influenciados pela riqueza e diversidade de espécies na fase inicial de implantação de SAF biodiversos.

Em 2021, o estoque de carbono (EC) apresentou o mesmo padrão com diferenças significativas entre os tratamentos na camada 0,10-0,20 m, sendo que o T2 (SAF Citros 713) obteve maior EC com o valor de  $14,67 \text{ Mg ha}^{-1}$  em relação ao T1 (Citros 446) com  $9,62 \text{ Mg ha}^{-1}$  na linha e T3 (SAF Citros 780) obteve maior EC com  $11,90 \text{ Mg ha}^{-1}$  comparado ao T4 (SAF Citros 1.040) com  $9,29 \text{ Mg ha}^{-1}$  na entrelinha. Marçal *et al.* (2021), estudando Sistemas Agroflorestais para pecuária e fruticultura em Itirapina (SP), em comparação com outros sistemas de manejo, constataram que o SAF para fruticultura apresentou valores médios mais elevados de estoque de carbono do solo nas camadas superficiais, com valores de  $7,73$  e  $7,09 \text{ Mg ha}^{-1}$  nas camadas 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m, respectivamente. Em contraste, o SAF para pecuária, nas camadas mais profundas, apresentou estoque de carbono de  $10,66 \text{ Mg ha}^{-1}$  para a camada 0,10-0,20 m e  $15,40 \text{ Mg ha}^{-1}$  para a camada 0,20-0,40 m, concluindo que os Sistemas Agroflorestais desenvolvidos para a fruticultura e pecuária foram mais eficientes na estocagem de carbono no solo do que uma área de pastagem e um fragmento florestal em regeneração natural.

Mais de um terço do carbono assimilado pelas plantas durante o crescimento é proporcionado pela renovação das raízes, exsudatos das raízes e a deposição de resíduos vegetais (NAIR *et al.*, 2009; MONTAGNINI; NAIR, 2004; CARDINAELE *et al.*, 2017; FERNANDES *et al.*, 2018). De acordo com Tate *et al.* (1993), a renovação radicular é a maior fonte de carbono, e a decomposição das raízes mortas resulta no maior aporte de matéria orgânica no solo. Segundo Schroth (1999) a longevidade das raízes no solo superficial é menor do que no solo mais profundo, consequentemente, a taxa de rotatividade é maior nas camadas superficiais do solo. As raízes grossas lignificadas se decompõem muito mais lentamente e podem, assim, contribuir substancialmente para os estoques de carbono abaixo do solo (VANLAUWE *et al.*, 1996). Assim, o sombreamento moderado e a biomassa das espécies arbóreas podem ter contribuído para um aumento das raízes no solo e consequentemente do

carbono, nos tratamentos T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780), nas camadas mais superficiais.

Os estoques de carbono no presente estudo foram maiores nas linhas de plantio do que nas entrelinhas. Cardinael *et al.* (2017) obtiveram os mesmos resultados em SAF na França, especialmente na camada 0,00-0,10 m, indicando que o manejo destas linhas deve ser um fator chave no incremento da capacidade de estocar carbono. Os autores afirmam que, os estoques de carbono do solo são maiores sobretudo nas linhas das árvores de SAF e principalmente nos 0,30 m superiores do solo, atribuindo este fato a matéria orgânica que retorna para o solo por meio do carbono das árvores (serrapilheira, raízes finas e exsudados) e carbono da vegetação herbácea sob as árvores.

Comparando o estoque de carbono do solo dos diferentes tratamentos nos anos 2019, 2020 e 2021, na camada 0,00-1,00 m, os maiores valores ocorreram em 2021 na linha, no T3 (SAF Citros 780) com 95,75 Mg C ha<sup>-1</sup>, seguido do tratamento T2 (SAF Citros 713) com 91,97 Mg C ha<sup>-1</sup>. Os menores valores ocorreram no T1 (Citros 446) com 67,26 Mg C ha<sup>-1</sup>, em 2019, seguido do T4 (SAF Citros 1.040) com 74,58 Mg C ha<sup>-1</sup>, em 2021, ambos na entrelinha. Shi *et al.* (2018), em uma meta-análise de 427 pares de dados de estoque de carbono do solo agrupados em quatro sistemas principais (cultivo em aléias, quebra-ventos, silvopastoris e quintais) encontraram estoques médios de carbono do solo de 126 Mg C ha<sup>-1</sup> em Sistemas Agroflorestais na profundidade de 1,0 m. Barreto *et al.* (2011) verificaram que o teor de carbono orgânico do solo nos 0,50 m superiores do solo foi de aproximadamente 100 Mg C ha<sup>-1</sup> em um SAF com cacau + Erythrina no sul da Bahia. Gama-Rodrigues *et al.* (2010) observaram valores de estoque superiores a 300 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de solo 0,00-1,00 m em um SAF de cacau (Erythrina + Cacau + Cabruca).

Comparando o estoque de carbono do solo dos diferentes tratamentos nos anos de 2019, 2020 e 2021, o maior incremento médio de carbono anual (IMCA) ocorreu entre 2020 e 2021 na linha, no T2 (SAF Citros 713) na camada de 0,00-0,10 m com 7,51 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e na camada de 0,10-0,20 m o valor de 5,34 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, seguido do tratamento T3 (SAF Citros 780) na camada de 0,00-0,10 m com 6,76 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Os tratamentos T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040) apresentaram os menores valores de IMCA com 1,62 e 2,05 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente, no mesmo período, na camada de 0,00-0,10 m na linha. Steenbock e Vezzani (2013) observaram resultado semelhante aos T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780) avaliando a dinâmica de carbono em Sistemas Agroflorestais de 4 a 15 anos, manejados por agricultores familiares na Mata Atlântica no Estado de São Paulo, onde foi

identificado um incremento médio anual de 6,6 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Conforme Marti *et al.* (2012), alguns Sistemas Agroflorestais cultivados em regiões tropicais capturaram cerca de 1,5 a 3,5 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de carbono.

Os maiores estoques nas camadas superficiais estão de acordo com os resultados encontrados por Kim *et al.* (2016), que observaram maiores estoques de C e N nas camadas superficiais do solo (até 0,20 m) sob SAF, em comparação à agricultura convencional. Os autores explicam este incremento devido a maior assimilação de carbono por plantas perenes lenhosas presentes nos SAF e pelo acúmulo de biomassa como cobertura do solo. Monroe *et al.* (2016), observaram poucas mudanças no estoque de carbono em profundidades superiores a 0,40 m nos solos sob SAF de cacau e em pastagem, sendo que os SAF de cacau e seringueira de 4 anos foram os mais eficientes para acumular carbono nos 0,20 m superiores do solo.

O potencial das agroflorestas em sequestrar carbono é muito variável pois depende do tipo de sistema, da composição e idade das espécies, localização geográfica, fatores ambientais (clima e solo) e práticas de manejo. As estimativas de acúmulo de carbono no Sistema Agroflorestal variaram de 0,29 a 15,2 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> acima do solo e de 30 a 300 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> com profundidade de até 1,0 m (NAIR *et al.*, 2009; LORENZ; LAL, 2014; SHI *et al.*, 2018; YASIN *et al.*, 2021).

## 11. CONCLUSÕES

Os Sistemas Agroflorestais com densidade arbórea entre 713 e 780 plantas ha<sup>-1</sup>, estocaram mais carbono no solo, na camada 0,10-0,20 m, no terceiro ano da pesquisa, quando comparados aos tratamentos T1 (Citros 446 plantas ha<sup>-1</sup>) e T4 (SAF citros 1.040 plantas ha<sup>-1</sup>), apresentando uma tendência de melhoria da qualidade do solo.

O sombreamento moderado, gerado pelo adensamento das plantas, e a biomassa das espécies arbóreas nos tratamentos T2 (SAF 713 plantas ha<sup>-1</sup>) e T3 (SAF 780 plantas ha<sup>-1</sup>), contribuíram para o aumento das raízes no solo, maior decomposição da matéria orgânica e consequentemente maior acúmulo de carbono nas camadas superficiais.

O incremento médio anual de carbono orgânico na camada 0,00-0,10 m, no T2 (SAF Citros 713) foi de 7,51 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e no T3 (SAF Citros 780) de 6,76 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> confirmando o resultado de estudos com estoque de carbono em Sistemas Agroflorestais em outras regiões.

O Sistema Agroflorestal T2 (SAF citros 713), apresentou maior porosidade total na camada 0,00-0,10 m, na linha de plantio, no terceiro ano da pesquisa, quando comparado ao tratamento T1 (Citros 446).

Na média, nas linhas de plantio obtiveram menor densidade do solo e resistência do solo à penetração e maior macroporosidade, porosidade total, teor de água no solo, teor de carbono orgânico, estoque de carbono, MO, P, Mg, CTC e Zn em relação a entrelinha, demonstrando o efeito da cobertura do solo e menor impacto da mecanização.

A abordagem multivariada utilizada para analisar os atributos do solo foi capaz de caracterizar e discriminar os tratamentos, sendo que os atributos Mg, MO, CTC, P, Zn, PT, C, MaP, MiP, Ds e RP, permitiram a maior diferenciação entre os tratamentos, demonstrando que estes atributos são importantes em estudos da qualidade do solo.

### **CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO, PRODUTIVIDADE E MORTALIDADE DE CITROS EM SISTEMA AGROFLORESTAL ORGÂNICO SOB DIFERENTES DENSIDADES ARBÓREAS**

#### **Resumo**

A citricultura brasileira possui grande relevância para a economia do país, no entanto, seu modelo de produção, baseado em monocultivo e uso intensivo de agrotóxicos, causa vários impactos ambientais e sociais. Os sistemas agroflorestais, fundamentados na biodiversidade, consorciação e estratificação de cultivos, se apresentam como um caminho para uma agricultura mais sustentável. Neste sentido, a pesquisa teve como objetivo avaliar o desenvolvimento, a produtividade e a mortalidade, causada por Greening, de oito variedades de citros em Sistema Agroflorestal orgânico sob diferentes densidades arbóreas. O estudo foi conduzido em condições de campo em Itirapina, São Paulo, Brasil. O experimento foi baseado no delineamento de blocos casualizados, com quatro tratamentos e três repetições, somando 12 parcelas com área útil de 4.960 m<sup>2</sup> cada e 59.520 m<sup>2</sup> no total. Os tratamentos avaliados foram: T1- Citros com densidade de 446 plantas ha<sup>-1</sup>; T2- SAF citros com densidade de 713 plantas ha<sup>-1</sup>; T3- SAF citros com densidade de 780 plantas ha<sup>-1</sup> e T4- SAF citros com densidade de 1.040 plantas ha<sup>-1</sup>. As diferentes densidades dos sistemas agroflorestais foram realizadas por meio de consórcio dos citros com espécies arbóreas madeiráveis: Jequitibá, Ipê-felpudo, Peroba e Louro-pardo e espécies de serviço: Ingá, Eritrina, Farinha Seca, Eucalipto e Gliricídia. As variedades cítricas estudadas foram: Laranja Valência Americana e Rubi, Tangerina Cravo e Murcote, Mexerica do Rio, Limão Cravo, Siciliano e caviar. Os resultados da pesquisa demonstraram que as variedades cítricas estudadas não apresentaram diferença significativa para o índice de vigor vegetativo (IVV) entre os tratamentos, com exceção do limão caviar, onde o T3 (SAF Citros 780) foi maior que o T1 (Citros 446). Na média das variedades cítricas, houve maior crescimento das plantas no tratamento T3 (SAF Citros 780). A produtividade média por planta e por hectare das variedades estudadas não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. Não houve diferença significativa da mortalidade por Greening das variedades cítricas entre os tratamentos, com exceção da laranja rubi que apresentou diferença entre os tratamentos T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040), sendo este último menor. O tratamento T1 (Citros 446) apresentou a maior mortalidade média de Greening e T4 (SAF Citros 1.040) a menor, demonstrando uma tendência de maior resistência ao Greening sob sombreamento, no entanto, essa diferença não foi significativa.

**Palavras-chave:** Radiação solar fotossinteticamente ativa, índice de vigor vegetativo, Greening ou HLB e espécies nativas.

### CHAPTER 3: DEVELOPMENT, PRODUCTIVITY AND MORTALITY OF CITRUS IN ORGANIC AGROFORESTRY SYSTEM UNDER DIFFERENT TREE DENSITIES

#### Abstract

The Brazilian citrus industry has great relevance for the country's economy, however, its production model, based on monoculture and intensive use of pesticides, causes several environmental and social impacts. Agroforestry systems, based on biodiversity, intercropping and stratification of crops, are presented as a path to more sustainable agriculture. In this sense, the research aimed to evaluate the development, productivity and mortality, caused by Greening, of eight citrus varieties in an organic Agroforestry System under different tree densities. The study was conducted under field conditions, on the premises of Fazenda da Toca, located in the municipality of Itirapina, state of São Paulo, Brazil. The experiment was based on a randomized block design, with four treatments and three replications, totaling 12 plots with a useful area of 4,960 m<sup>2</sup> each and 59,520 m<sup>2</sup> in total. The treatments evaluated were: T1 - Citrus with a density of 446 plants ha<sup>-1</sup> (Citrus 446); T2 - SAF citrus with a density of 713 plants ha<sup>-1</sup> (SAF Citrus 713); T3 - SAF citrus with a density of 780 plants ha<sup>-1</sup> (SAF Citrus 780) and T4 - SAF citrus with a density of 1.040 plants ha<sup>-1</sup> (SAF Citrus 1.040). The different densities of the agroforestry systems were carried out by intercropping citrus with woody tree species: Jequitibá, Ipê-felpudo, Peroba and Louro-pardo and service species: Ingá, Eritrina, Farinha Seca, Eucalyptus and Gliricidia. The citrus varieties studied were: Orange Valencia American and Ruby, Tangerina Rangpur and Murcote, Rio Mexerica, Lemon Cravo, Siciliano and Caviar. The research results showed that the citrus varieties studied did not show a significant difference for the vegetative vigor index (VVI) between treatments, with the exception of caviar lemon, where T3 (SAF Citrus 780) was higher than T1 (Citrus 446). In the average of citrus varieties, there was greater plant growth in treatment T3 (SAF Citrus 780). The average productivity per plant and per hectare of the studied varieties showed no significant difference between treatments. There was no significant difference in mortality by Greening of citrus varieties between treatments, with the exception of ruby orange, which showed a difference between treatments T1 (Citrus 446) and T4 (SAF Citrus 1.040), the latter being lower. Treatment T1 (Citrus 446) had the highest average mortality of Greening and T4 (SAF Citrus 1.040) the lowest, demonstrating a trend of greater resistance to Greening under shading, however, this difference was not significant.

**Keywords:** Photosynthetically active solar radiation, vegetative vigor index, Greening or HLB and native species.

## 12. INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, 146.866.263 toneladas de citros são produzidas por ano, sendo a China o maior produtor de citros do mundo e o Brasil ocupa o segundo lugar (FAO, 2021). O Brasil lidera o ranking mundial de produção de laranjas, sendo também o maior exportador do seu suco, detendo 75% das exportações mundiais. Na safra 2020/21, o país foi responsável por 32,8% da produção mundial da fruta e por 62% do volume global de suco de laranja. A atividade é concentrada no Estado de São Paulo que detém 63,1% da área cultivada com laranja no país (USDA, 2021).

Conforme apontado por Pignati *et al.* (2017), em uma pesquisa sobre a distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil, a soja foi a cultura que mais utilizou agrotóxicos, representando 63% do total, seguido do milho (13%) e cana-de-açúcar (5%). O fumo foi o cultivo que apresentou a maior quantidade média de litros de agrotóxicos por hectare, com 60 L ha<sup>-1</sup>, o algodão foi o segundo, consumindo 28 L ha<sup>-1</sup>, seguido dos citros com 23 L ha<sup>-1</sup>, ou seja, os citros foram a terceira cultura com a maior quantidade média de litros de agrotóxicos por hectare.

Considerando o uso insustentável de insumos químicos pela citricultura no Brasil e no mundo e seus impactos negativos no meio ambiente e na saúde humana, tanto dos trabalhadores rurais como dos consumidores destes produtos, verifica-se a necessidade de pesquisas que apoiem o desenvolvimento de uma citricultura mais ecológica, que gere produtividade, mas ao mesmo tempo não degrade os recursos naturais e não coloque em risco a vida humana (FELICIANO, 2016). A produção de citros em Sistemas Agroflorestais é um caminho para uma agricultura mais sustentável (YASIN *et al.*, 2021).

Para Coelho (2017), as principais categorias produtivas que apresentam experiências bem estabelecidas e com grande potencial para a conversão bem-sucedida do cultivo convencional em Sistemas Agroflorestais no Sul do Brasil são os sistemas silvipastoris, pomares de citros e plantações de banana, principalmente devido à grande extensão dessas atividades no Brasil. Em ambas as atividades, as vantagens ecológicas e econômicas são convergentes e reconhecidas também no nível acadêmico. A conversão de citros e banana para Sistemas Agroflorestais também apresenta grande potencial de absorção de carbono, além de reduzir doenças fúngicas e bacterianas (MARÇAL *et al.*, 2022).

Diferentes espécies de citros podem ser cultivadas sob o dossel de árvores de sombreamento. As espécies arbóreas do estrato superior podem proporcionar benefícios para o cultivo de várias maneiras: fixação biológica de nitrogênio, ciclagem de nutrientes e proteção

contra estresses climáticos (GAMFELDT *et al.*, 2013). O sombreamento aumenta a longevidade dos citros, que mantém alta produtividade por um longo período (JIFON; SYVERTSEN, 2003). Plantas cítricas em pomares sombreados do Estado do Rio Grande do Sul proporcionam altos rendimentos mesmo após 25 anos. Apesar da forte evidência de benefícios econômicos e ecológicos da agrossilvicultura em relação aos pomares convencionais, essa forma de cultivo ainda é uma exceção (COELHO, 2017).

Segundo Lado *et al.* (2015), nas frutas cítricas a luz afeta positivamente o desenvolvimento da cor e consequentemente o conteúdo e a composição do carotenoide. No entanto, em um estudo realizado na Espanha por esses autores, em toranja vermelha sombreada e exposta à luz, em condições de sombreamento pelo ensacamento dos frutos, a maturação foi acelerada e a cor externa da fruta foi ampliada e os níveis de licopeno na casca dos frutos à sombra foram 49 vezes maiores do que nos frutos expostos à luz.

Em estudo de dois anos realizado na Florida, por Jifon e Syvertsen (2001), para entender o potencial de aplicação de sombra moderada em diferentes estágios fisiológicos do desenvolvimento de frutos cítricos, Toranja 'Ruby Red' com dez anos de idade (*Citrus paradisi* L.) e laranja 'Hamlin' de oito anos de idade (*Citrus sinensis* L.) foram sombreadas com telas de 50%, desde a floração até a colheita (sombra contínua), de abril a julho (sombra inicial) e de agosto até a colheita (sombra tardia). Em toranja, o sombreamento tardio aumentou a produção de frutos em 35% em 1999. A sombra contínua reduziu a produção de frutos em ambas as variedades. O teor de suco de toranja foi aumentado pelos tratamentos de sombreamento tardios e contínuos em relação aos controles.

A doença Huanglongbing (HLB) ou Greening é uma ameaça para a maioria das áreas produtoras de citros (BOWMAN *et al.*, 2016; KILLINY *et al.*, 2018; MARTINI *et al.*, 2020), sendo que a doença é transmitida pelo vetor asiático *Psyllid citrus* (CHEN *et al.*, 2017; CORALLO *et al.*, 2021). Estufas com telas antipsilóide podem potencialmente reduzir e eliminar o desenvolvimento de HLB em plantações jovens de citros, excluindo o inseto vetor (FERRAREZI *et al.*, 2019). Um estudo realizado na Florida por Ferrarezi *et al.* (2017), demonstrou que a tela antipsilóide excluiu o vetor de HLB das estufas e as condições ambientais dentro destas indicaram uma redução na radiação solar cumulativa e na rajada de vento quando comparadas com as parcelas a céu aberto. Essas observações demonstraram que o cultivo de árvores cítricas jovens dentro dessas estufas teladas pode representar um ambiente de melhor crescimento em comparação com as plantações convencionais a céu aberto.

A literatura nacional e internacional possui poucos trabalhos com sombreamento natural de citros, seja em SAF ou outros sistemas de produção. Os poucos trabalhos existentes na área são realizados com sombreamento artificial em citros que implicam também em maiores investimentos na produção. Além disto, percebe-se uma concentração de trabalhos na região da Flórida (EUA), que possui clima temperado, sendo necessárias quantificações dos efeitos do sombreamento em áreas tropicais, como é o caso do Brasil.

Os citros são comumente plantados em pleno sol, fundamentado no fato de que sua produtividade decai sob sombreamento. Considerando que os citros são plantas do estrato médio, ou seja, que no seu local de origem ocupam este estrato do dossel, é provável que estas plantas produzam bem sob algum nível de sombreamento. O sombreamento pode influenciar o crescimento das plantas, a produtividade, resistência a doenças e insetos. No entanto, há poucas pesquisas que comprovam o efeito do sombreamento sobre a produção de citros e o nível ideal de sombreamento para esta cultura. Portanto, esta pesquisa teve o objetivo de avaliar o desenvolvimento, produtividade e a mortalidade pela doença Greening ou HLB de variedades cítricas em um Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, de forma a conferir distintos níveis de sombreamento.

### **13. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **13.1 Local de estudo**

O estudo foi realizado em condições de campo na Fazenda da Toca, situada nas coordenadas geográficas de 22°13'36.63" de latitude sul e 47°44'56.02" de longitude oeste, com altitude aproximada de 800 m, localizada no município de Itirapina, São Paulo, Brasil. O clima da região é considerado tropical de altitude, com chuvas no verão e seca no inverno (Cwa) segundo a classificação de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013). O solo da área experimental foi classificado como NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018) ou como ENTISOLS QUARTZIPSAMMENTS segundo o Soil Taxonomy System (SOIL SURVEY STAFF, 2014). A caracterização do solo da área experimental foi realizada em junho de 2017, onde foram determinados os atributos físicos do solo (Tabela 23).

Esta área foi ocupada anteriormente, no período de 2012 a 2015, por um pomar de citros manejado no sistema orgânico de produção, com insumos de base ecológica, porém, em monocultivo. A erradicação deste pomar ocorreu em 2016 com corte raso das plantas, destocagem das raízes e preparo do solo com grade aradora e grade niveladora. Em seguida, no verão 2016/2017, foi realizado plantio do feijão guandu (*Cajanus cajan*) em consórcio com o

capim Mombaça (*Megathyrsus maximus*), para descompactação do solo e produção de biomassa. Posteriormente, foi realizada a roçada da área com roçadeira “sega pasto” (marca Casale) e realizado o desenleiramento desta biomassa, no período de 2017/2018, com o desenleirador “Speedrake” (marca Kuhn), maquinário que afasta a biomassa permitindo o preparo do solo para plantio em leiras.

**Tabela 23.** Caracterização física do solo antes da instalação na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Profundidade     | MaP                                       | MiP                                  | PT   | DS                | RP   | TAS                 | DMP  | AG                            | AF  | AT  | ARG | SIL |
|------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|------|-------------------|------|---------------------|------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                  | .....m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ..... | m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ..... |      | Mg m <sup>3</sup> | MPa  | kg kg <sup>-1</sup> | mm   | .....g kg <sup>-1</sup> ..... |     |     |     |     |
| <b>0,00-0,10</b> | 0,14                                      | 0,30                                 | 0,44 | 1,35              | 0,83 | 0,05                | 2,56 | 622                           | 281 | 903 | 76  | 21  |
| <b>0,10-0,20</b> | 0,14                                      | 0,28                                 | 0,42 | 1,44              | 2,45 | 0,06                | 2,43 | 607                           | 292 | 899 | 81  | 20  |
| <b>0,20-0,40</b> | 0,11                                      | 0,28                                 | 0,39 | 1,51              | 3,95 | 0,05                | 1,88 | 598                           | 298 | 896 | 88  | 16  |
| <b>0,40-0,60</b> | 0,12                                      | 0,26                                 | 0,38 | 1,49              | 3,88 | 0,05                | 1,18 | 575                           | 309 | 884 | 97  | 19  |

MaP = macroporosidade; MiP = microporosidade; PT = porosidade total; DS = densidade do solo; RP = resistência do solo à penetração; TAS = teor de água no solo; DMP = diâmetro médio ponderado; AG = areia grossa; AF = areia fina; AT = areia total; ARG = argila; SIL = silte.

O preparo das linhas de plantio foi feito com equipamento “Penta” (marca Mafes). Este equipamento realizou três operações em uma: capina com enxadas rotativas, subsolagem a 0,40 m de profundidade e aplicação de calcário (1,5 Mg ha<sup>-1</sup>) misturado com fosfato natural reativo (500 kg ha<sup>-1</sup>). Após o preparo da linha foram aplicados pó de rocha basáltica produzido pelo grupo Siqueira (2,0 Mg ha<sup>-1</sup>), esterco bovino (5,0 Mg ha<sup>-1</sup>) e *Azospirillum* (gênero bacteriano fixador de nitrogênio, da família Rhodospirillaceae, que promove o crescimento das plantas). O plantio das espécies arbóreas nativas e exóticas ocorreu em janeiro de 2018, com mudas em tubete do viveiro Camará, localizado em Ibaté, São Paulo. O plantio das variedades de citros ocorreu em abril de 2018, devido a atraso na entrega das mudas. Os berços de plantio das mudas foram abertos manualmente, em linha, seguindo o espaçamento descrito na Tabela 24. Nas entrelinhas foi mantido o capim Mombaça.

**Tabela 24.** Espaçamento (Esp) e número de plantas (NP), por parcela, nos tratamentos do experimento, em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Espécies    | T1        |     | T2          |     | T3         |     | T4         |     |
|-------------|-----------|-----|-------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Esp       | NP  | Esp         | NP  | Esp        | NP  | Esp        | NP  |
| Citros      | 5,6x4,0 m | 200 | 5,6x4,0 m   | 200 | 5,6x4,0 m  | 200 | 5,6x4,0 m  | 200 |
| Serviços    | -         | -   | 11,2x5,0 m  | 56  | 11,2x4,0 m | 120 | 11,2x3,0 m | 240 |
| Madeiráveis | -         | -   | 11,2x10,0 m | 48  | 11,2x8,0 m | 60  | 11,2x6,0 m | 72  |
| Total       | -         | 200 | -           | 304 | -          | 380 | -          | 512 |

T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

Foi realizada adubação de cobertura das plantas, em maio de 2018, com esterco bovino ( $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e composto ( $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e duas aplicações anuais de micronutrientes com ácido bórico ( $4,0 \text{ kg ha}^{-1}$ ), sulfato de zinco ( $2,0 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e sulfato de manganês ( $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Ainda no primeiro ano de cultivo foram realizadas uma aplicação de torta de mamona ( $630 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e duas aplicações de cama de frango ( $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

As roçadas do capim Mombaça, nas entrelinhas, ocorreram de três a quatro vezes no verão e uma vez no inverno, com posterior enleiramento do capim na linha de plantio. O aporte médio anual de matéria seca na área experimental foi em torno de  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Foram realizadas pulverizações preventivas quinzenais alternadas para controle de Greening ou Huanglongbing (HLB) e psíldeo (*Diaphorina citri*) com: Challenger (*Isaria fumosorosea*) ( $100 \text{ ml ha}^{-1}$ ) + óleo de Neem (*Azadirachta indica*) ( $150 \text{ ml ha}^{-1}$ ) e Boveril (*Beauveria Bassiana*) ( $100 \text{ ml ha}^{-1}$ ) + óleo de Neem (*Azadirachta indica*) ( $150 \text{ ml ha}^{-1}$ ).

### 13.2 Tratamentos

O experimento possui delineamento de blocos casualizados, com quatro tratamentos e três repetições, totalizando 12 parcelas com dimensões de  $62 \times 80 \text{ m}$  e área útil de  $4.960 \text{ m}^2$  cada, somando  $59.520 \text{ m}^2$ . A área experimental possui ainda uma bordadura de  $25.580 \text{ m}^2$ , totalizando  $85.100 \text{ m}^2$  (Figura 28). Os tratamentos estudados foram: T1 - Citros com densidade de  $446 \text{ plantas ha}^{-1}$  (Citros 446); T2 - SAF citros com densidade de  $713 \text{ plantas ha}^{-1}$  (SAF Citros 713); T3 - SAF citros com densidade de  $780 \text{ plantas ha}^{-1}$  (SAF Citros 780) e T4 - SAF citros com densidade de  $1.040 \text{ plantas ha}^{-1}$  (SAF Citros 1.040).

As oito variedades de citros estudadas foram: Laranja Valência Americana e Rubi (*Citrus sinensis* L. Osbeck), Tangerina Cravo (*Citrus tangerina* Hort. ex Tanaka), Tangerina Murcote (*Citrus reticulata* Blanco x *Citrus sinensis* Osbeck), Mexerica do Rio (*Citrus deliciosa* Tenore), Limão Cravo (*Citrus limonia* Osbeck), Limão Siciliano (*Citrus limon*) e Limão caviar (*Citrus australasica*). A bordadura do experimento é composta por Limão Taiti (*Citrus aurantifolia*), mas por sofrer efeito de borda não foi estudado nesta pesquisa. O detalhamento do número de plantas cítricas por parcela, tratamento e total do experimento encontra-se na Tabela 25.

**Figura 28.** Imagem da área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil, representando os 4 tratamentos, 3 repetições e 12 parcelas.



T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040. Fonte: Imagem Google Earth, 2018.

A escolha das variedades de citros buscou uma representação da citricultura brasileira, com as variedades mais cultivadas de limão, tangerina e laranja. O limão caviar foi escolhido por ser um produto diferenciado, com alto valor comercial e que no seu centro de origem (Austrália) é cultivado sob floresta.

**Tabela 25.** Número de plantas por parcela, tratamento e total do experimento realizado na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Variedade              | Plantas por parcela | Plantas por tratamento | Total de plantas |
|------------------------|---------------------|------------------------|------------------|
| Laranja valência       | 18                  | 54                     | 216              |
| Laranja rubi           | 18                  | 54                     | 216              |
| Tangerina cravo        | 18                  | 54                     | 216              |
| Tangerina murcote      | 18                  | 54                     | 216              |
| Mexerica do rio        | 18                  | 54                     | 216              |
| Limão cravo            | 18                  | 54                     | 216              |
| Limão siciliano        | 18                  | 54                     | 216              |
| Limão caviar           | 18                  | 54                     | 216              |
| <b>Total</b>           | <b>144</b>          | <b>432</b>             | <b>1.728</b>     |
| Bordadura limão tahiti | 56                  | 168                    | 672              |
| <b>Total geral</b>     | <b>200</b>          | <b>600</b>             | <b>2.400</b>     |

Os citros foram consorciados com as seguintes espécies arbóreas:

- Madeiráveis: Jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*), Ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), Louro-pardo (*Cordia trichotoma*) e Peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron*).
- Serviços: Farinha Seca (*Albizia niopoides*), Inga (*Inga edulis*), Eritrina (*Erythrina speciosa*), Eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) e Gliricídia (*Gliricídia sepium*).

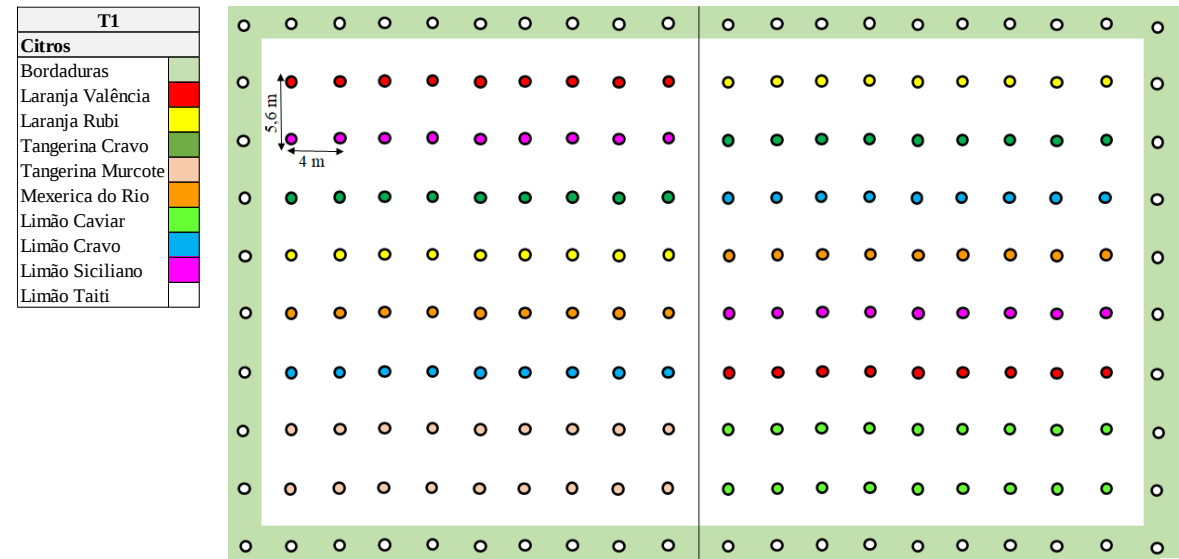
As espécies madeiráveis foram selecionadas com base nos critérios: crescimento vegetativo, estrato da planta, comportamento das folhas e valor de mercado. Estas plantas apresentam bom desempenho no crescimento, são do estrato alto ou emergente, evitando a competição com os citros de estrato médio, são decíduas ou semidecíduas, favorecendo a entrada de luz no sistema no inverno e possuem bom valor de mercado.

As espécies de serviço foram selecionadas com base nos critérios: crescimento vegetativo, estrato da planta, comportamento das folhas, fixação de nitrogênio e resposta a podas. A maioria das plantas são leguminosas, possibilitando a fixação de nitrogênio do ar, decíduas, do estrato alto ou emergente, possuem rápido crescimento e toleram podas.

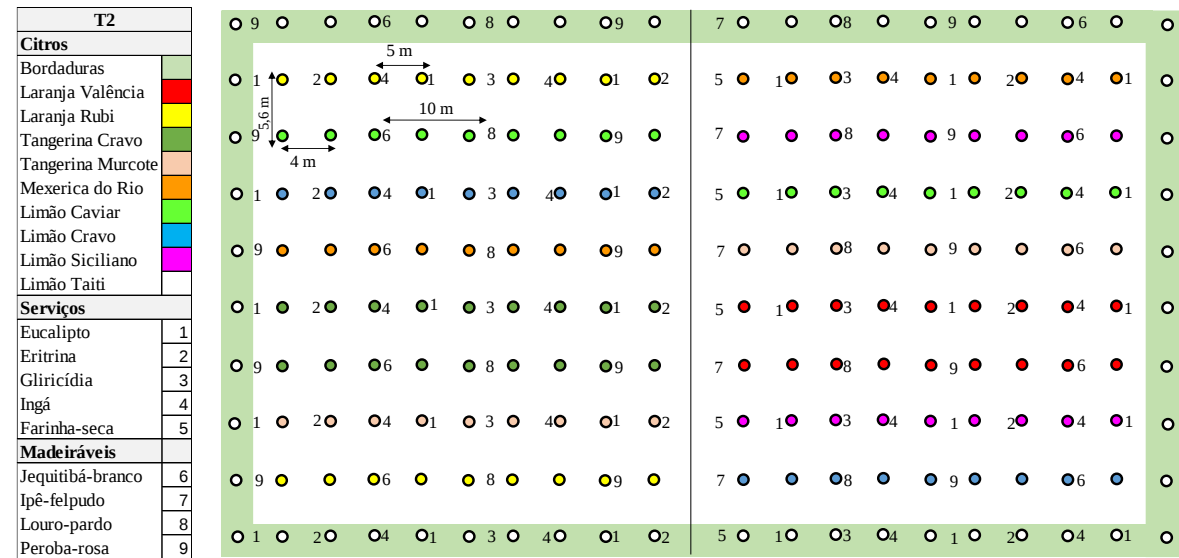
As distintas densidades arbóreas dos tratamentos tiveram o intuito de promover diferentes níveis de sombreamento natural dos citros, aumentar a produção de biomassa, propiciar o controle biológico, aumento da biodiversidade e melhoria da qualidade do solo, de forma a garantir o pleno desenvolvimento e produtividade dos citros e a diminuição do Greening ou HLB.

As Figuras 29, 30, 31 e 32 apresentam os croquis dos quatro tratamentos da pesquisa, os espaçamentos entre plantas e as variedades de citros, espécies arbóreas nativas e exóticas utilizadas nos tratamentos.

**Figura 29.** Croqui do tratamento T1 (Citros 446), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



**Figura 30.** Croqui do tratamento T2 (SAF Citros 713), na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.





### 13.3 Desenvolvimento vegetativo das plantas

Para avaliar o desenvolvimento vegetativo das variedades de citros e das espécies florestais de sombreamento foram adotadas três variáveis, altura da planta, diâmetro do caule e diâmetro da copa. A altura foi medida em distância vertical do solo até o ponto mais alto da planta. O diâmetro da copa foi medido no sentido paralelo e perpendicular à linha de plantio e estimada a média, sendo que essas medidas foram realizadas com régua graduada, em centímetro. O diâmetro do caule foi medido com paquímetro, em milímetro, na base das plantas, a 0,3 m acima do solo. Quando as plantas atingiram mais de 2,0 m de altura passaram a ser medidas com clinômetro digital Haglof.

Adicionalmente, foi calculado o índice de vigor vegetativo (IVV) das plantas, conforme Bordignon *et al.* (2003), segundo a fórmula:

$$IVV = [altura + diâmetro da copa + 10(diâmetro do caule)]/100 \quad (4)$$

Foram realizadas medições trimestrais nas plantas de citros (oito variedades), com amostragem de duas plantas por variedade em cada parcela, somando 16 plantas por parcela e 192 plantas no total. Nas plantas de sombreamento (nove espécies) foram realizadas medições semestrais, com amostragem de duas plantas por espécie em cada parcela, somando 18 plantas por parcela e 162 plantas no total.

As plantas cítricas foram avaliadas em 24/05/2019, 29/08/2019, 05/12/2019, 05/03/2020, 15/07/2020 e 23/06/2021. As plantas de sombreamento foram avaliadas em 06/06/2019, 14/02/2020, 02/09/2020 e 16/04/2021.

### 13.4 Radiação fotossinteticamente ativa (RFA)

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foi medida nas linhas de citros, em todas as parcelas, com o auxílio do sensor QSO-S RFA que mede o Fluxo de Fótons Fotossintéticos (FFF) em  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de um campo de visão de 180 graus. Foram realizadas quatro medições por planta, no sentido norte-sul e leste-oeste, em duas plantas por variedade em cada parcela, somando 16 plantas por parcela e 192 plantas no total. A medição foi realizada em dezembro de 2021.

### 13.5 Produtividade dos citros

As laranjas valência e rubi, as tangerinas cravo e murcote e a mexerica rio não tiveram uma produção significativa neste período, sendo necessário realizar derriça em frutos verdes para estimar a produção. A derriça ocorreu em dezembro de 2021, para isso, foi realizada uma amostragem de três plantas, de cada uma das cinco variedades de citros, por parcela, somando 15 plantas por parcela, em um total de 180 plantas colhidas. A derriça foi realizada manualmente, contando os frutos separadamente por variedade e tratamento. O número de frutos por planta foi multiplicado pelo peso médio do fruto de cada variedade, para obter o peso médio de frutos por planta, posteriormente esse valor foi multiplicado pelo número de plantas produtivas em cada tratamento e então estimada a produtividade em toneladas de frutos por hectare.

O limão caviar não apresentou produção no período de estudo. A produtividade dos limões siciliano e cravo não foi registrada por não apresentar produção no momento da derriça dos frutos. A produção do limão tahiti não foi contabilizada por se tratar de bordadura do experimento.

### 13.6 Incidência de Greening ou Huanglongbing (HLB)

Foram realizadas inspeções, em área total do experimento, para avaliar a mortalidade das plantas cítricas por Greening em 02/06/2020, 24/03/21 e 24/09/2021. Todas as plantas erradicadas foram identificadas no croqui do experimento e posteriormente registradas em planilhas.

### 13.7 Análises estatísticas

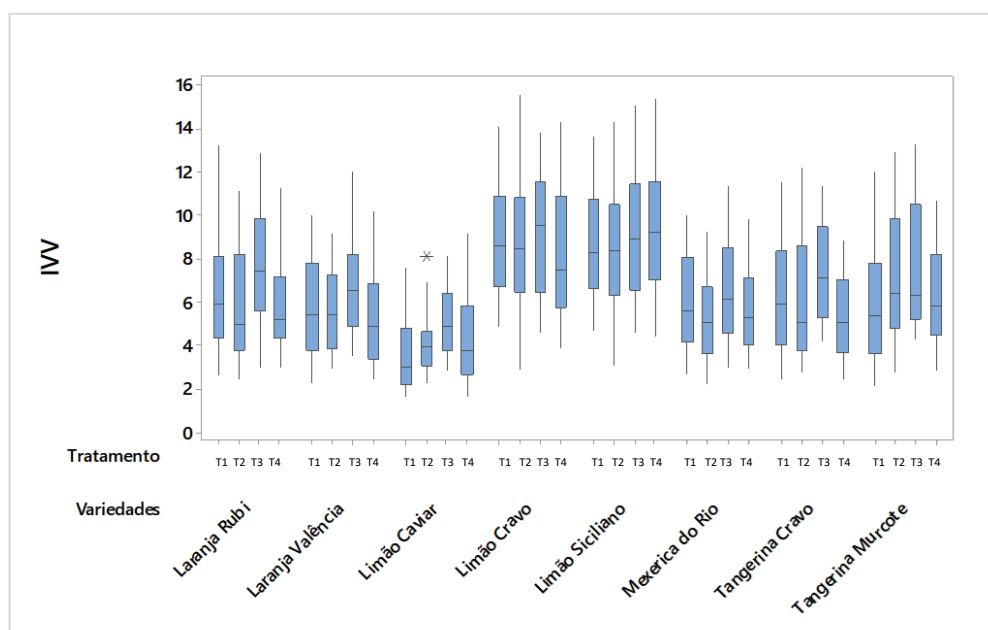
Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) para comparar os efeitos dos tratamentos. Quando o teste F foi significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Dentro da sessão da ANOVA, foi realizada a análise das médias de dois fatores para  $\alpha = 0,05$  (ANOM) e teste de Tukey simultâneo para um intervalo de confiança de 95%. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SAS 3.8, versão livre e software Minitab, versão 18.1.

## 14. RESULTADOS

### 14.1 Desenvolvimento vegetativo dos citros

A média do índice de vigor vegetativo (IVV) das variedades cítricas estudadas foi maior nos limões siciliano e cravo, com 10,64 e 10,09, respectivamente, intermediário para as tangerinas e laranjas, entre 7,90 e 6,81 e menor para o limão caviar, 5,20 (Tabela 26 e Figura 33).

**Figura 33.** Índice de vigor vegetativo das variedades cítricas sob Sistema Agroflorestal com diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

As variedades cítricas estudadas não apresentaram diferença significativa no índice de vigor vegetativo (IVV) entre os tratamentos, com exceção do limão caviar onde o T3 (SAF Citros 780) foi maior que o T1 (Citros 446), demonstrando que essa variedade pode apresentar melhor crescimento sob sombreamento (Tabela 26).

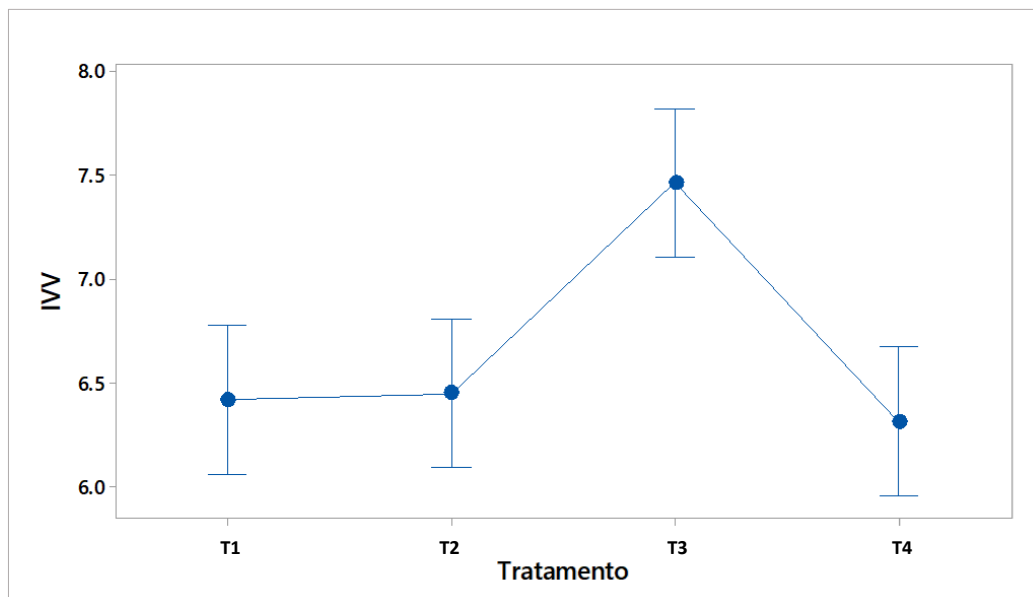
Quando os dados de IVV foram analisados separadamente, para cada variedade cítrica, o T3 (SAF Citros 780) apresentou maiores valores para quase todas as variedades, porém, sem diferença significativa (Tabela 26). Analisando os dados médios de IVV das variedades juntas, houve um maior crescimento das plantas no tratamento T3 (SAF Citros 780) (Figura 34). Para determinar se a diferença apresentada possui significância estatística, aplicou-se o teste de Tukey, sendo que o tratamento T3 (SAF Citros 780) diferiu dos demais (Figura 35).

**Tabela 26.** Índice de vigor vegetativo (IVV) das variedades cítricas sob Sistema Agroflorestal com diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| <b>Variedades Citros</b> | <b>Tratamento</b> | <b>Média IVV</b> |    |
|--------------------------|-------------------|------------------|----|
| Limão Siciliano          | T1                | 10,29            | A  |
|                          | T2                | 10,06            | A  |
|                          | T3                | 11,07            | A  |
|                          | T4                | 11,14            | A  |
| <b>Média</b>             |                   | <b>10,64</b>     |    |
| Limão Cravo              | T1                | 10,23            | A  |
|                          | T2                | 10,18            | A  |
|                          | T3                | 10,30            | A  |
|                          | T4                | 9,65             | A  |
| <b>Média</b>             |                   | <b>10,09</b>     |    |
| Tangerina Murcote        | T1                | 7,20             | A  |
|                          | T2                | 8,18             | A  |
|                          | T3                | 8,69             | A  |
|                          | T4                | 7,53             | A  |
| <b>Média</b>             |                   | <b>7,90</b>      |    |
| Laranja Rubi             | T1                | 7,63             | A  |
|                          | T2                | 6,98             | A  |
|                          | T3                | 8,76             | A  |
|                          | T4                | 6,86             | A  |
| <b>Média</b>             |                   | <b>7,55</b>      |    |
| Tangerina Cravo          | T1                | 7,37             | A  |
|                          | T2                | 7,07             | A  |
|                          | T3                | 8,63             | A  |
|                          | T4                | 6,61             | A  |
| <b>Média</b>             |                   | <b>7,42</b>      |    |
| Laranja Valência         | T1                | 6,82             | A  |
|                          | T2                | 6,71             | A  |
|                          | T3                | 7,50             | A  |
|                          | T4                | 6,22             | A  |
| <b>Média</b>             |                   | <b>6,81</b>      |    |
| Limão Caviar             | T1                | 4,26             | B  |
|                          | T2                | 5,13             | AB |
|                          | T3                | 6,12             | A  |
|                          | T4                | 5,30             | AB |
| <b>Média</b>             |                   | <b>5,20</b>      |    |

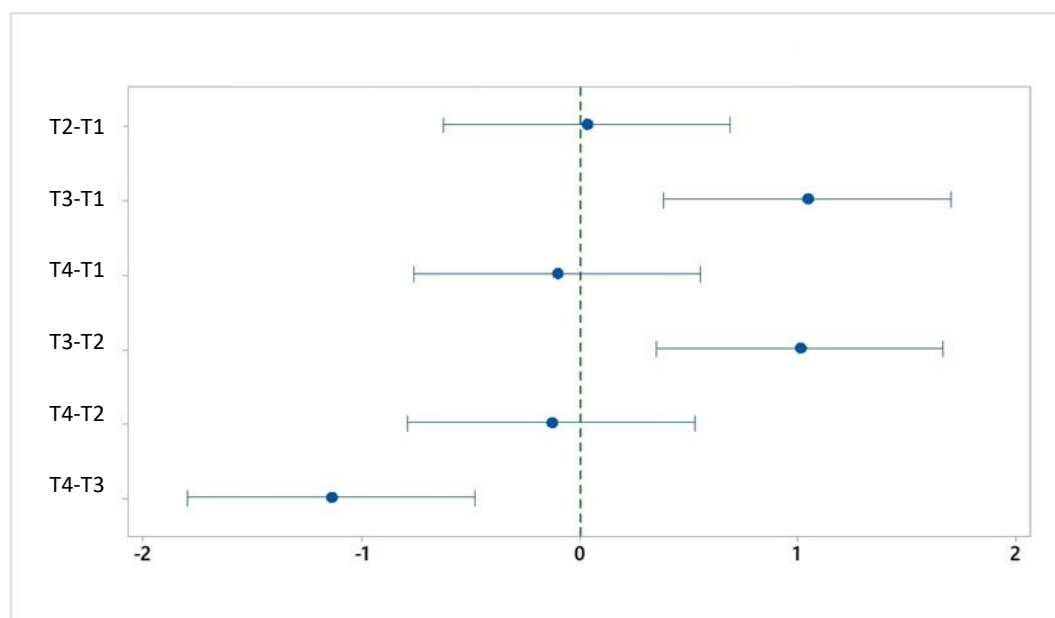
Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes. T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

**Figura 34.** Gráfico de intervalos para índice de vigor vegetativo (IVV) de variedades cítricas sob Sistema Agroflorestal com diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

**Figura 35.** Teste de Tukey para índice de vigor vegetativo (IVV) de variedades cítricas sob Sistema Agroflorestal com diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

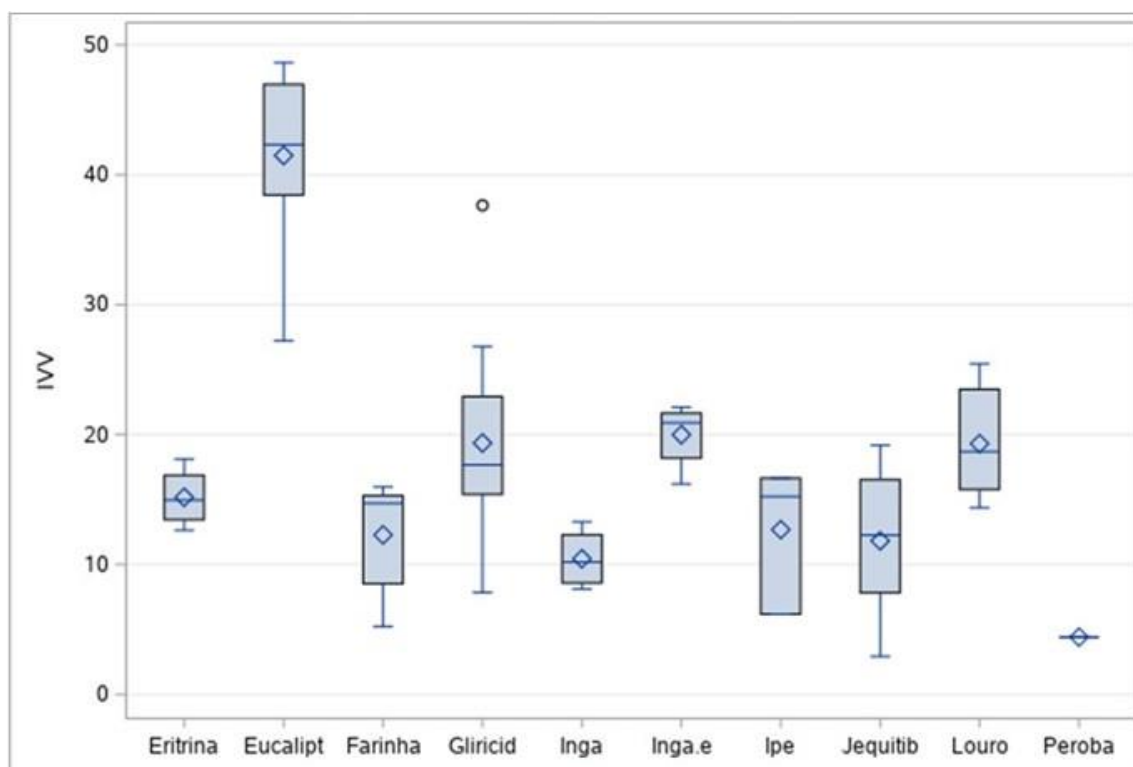


Se um intervalo não contém zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes. T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

## 14.2 Desenvolvimento vegetativo das plantas de sombreamento

A espécie arbórea de sombreamento que apresentou a maior média de índice de vigor vegetativo (IVV) foi o Eucalipto, com 26,23, seguido da Gliricídia com 18,07, Inga edulis 17,50 e Louro-pardo com 16,74. O menor IVV foi verificado na Peroba com valor de 3,02 (Tabela 27 e Figura 36).

**Figura 36.** Distribuição do índice de vigor vegetativo das espécies arbóreas de sombreamento em Sistema Agroflorestal, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



A maior parte das espécies arbóreas de sombreamento não apresentou diferença significativa de IVV entre os tratamentos, com exceção da Farinha-seca que obteve maior IVV no T3 (SAF Citros 780), a Gliricídia em T4 (SAF Citros 1.040) e a Peroba em T3 (SAF Citros 780) (Tabela 27).

**Tabela 27.** Índice de vigor vegetativo (IVV) das espécies arbóreas de sombreamento em Sistema Agroflorestal, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Espécies     | Tratamento | Média de IVV |    |
|--------------|------------|--------------|----|
| Eucalipto    | T4         | 27,71        | A  |
|              | T3         | 27,07        | A  |
|              | T2         | 23,90        | A  |
| <b>Média</b> |            | <b>26,23</b> |    |
| Gliricídia   | T4         | 20,85        | A  |
|              | T3         | 17,13        | B  |
|              | T2         | 16,22        | B  |
| <b>Média</b> |            | <b>18,07</b> |    |
| Inga edulis  | T4         | 18,27        | A  |
|              | T3         | 18,62        | A  |
|              | T2         | 15,61        | A  |
| <b>Média</b> |            | <b>17,50</b> |    |
| Louro pardo  | T4         | 15,83        | A  |
|              | T2         | 17,56        | A  |
|              | T3         | 16,82        | A  |
| <b>Média</b> |            | <b>16,74</b> |    |
| Eritrina     | T4         | 13,57        | A  |
|              | T3         | 13,91        | A  |
|              | T2         | 12,28        | A  |
| <b>Média</b> |            | <b>13,25</b> |    |
| Jequitibá    | T4         | 11,15        | A  |
|              | T3         | 10,13        | A  |
|              | T2         | 9,56         | A  |
| <b>Média</b> |            | <b>10,28</b> |    |
| Inga vera    | T4         | 7,80         | A  |
|              | T3         | 10,12        | A  |
|              | T2         | 7,97         | A  |
| <b>Média</b> |            | <b>8,63</b>  |    |
| Farinha-seca | T4         | 6,80         | B  |
|              | T3         | 10,23        | A  |
|              | T2         | 7,20         | AB |
| <b>Média</b> |            | <b>8,08</b>  |    |
| Ipê-felpudo  | T4         | 5,72         | A  |
|              | T3         | 8,98         | A  |
| <b>Média</b> |            | <b>7,35</b>  |    |
| Peroba       | T4         | 1,64         | B  |
|              | T3         | 4,40         | A  |
| <b>Média</b> |            | <b>3,02</b>  |    |

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes. T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

### 14.3 Radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA)

O tratamento T1 (Citros 446) apresentou diferença significativa comparado aos tratamentos T2 (SAF Citros 713), T3 (SAF Citros 780) e T4 (SAF Citros 1.040) com a maior radiação solar fotossinteticamente ativa,  $1944,7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Os tratamentos T2 (SAF Citros 713) e T3 (SAF Citros 780) não diferiram entre si, assim como T3 (SAF Citros 780) e T4 (SAF Citros 1.040). O tratamento T4 (SAF Citros 1.040) apresentou a menor RFA,  $860,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Tabela 28).

**Tabela 28.** Teste de Tukey para radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA) em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Tratamento | Média da radiação solar fotossinteticamente ativa |    |
|------------|---------------------------------------------------|----|
| T1         | 1944,7                                            | A  |
| T2         | 1176,4                                            | B  |
| T3         | 1080,2                                            | BC |
| T4         | 860,3                                             | C  |

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes. T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

Considerando que a radiação do tratamento T1 (Citros 446) representa 100% de luz, os tratamentos T2 (SAF Citros 713), T3 (SAF Citros 780) e T4 (SAF Citros 1.040) apresentaram, 61, 56 e 44% de luz, respectivamente. Assim, no momento da medição da radiação, T1 (Citros 446), T2 (SAF Citros 713), T3 (SAF Citros 780) e T4 (SAF Citros 1.040) apresentaram 0, 39, 44 e 66% de sombra, respectivamente (Tabela 29).

**Tabela 29.** Sombreamento em Sistemas Agroflorestais sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Tratamento | Sombreamento |
|------------|--------------|
| T1         | 0%           |
| T2         | 39%          |
| T3         | 44%          |
| T4         | 56%          |

T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

### 14.4 Produtividade dos citros

A produtividade média por planta foi maior para mexerica rio (68,96 kg), seguido da tangerina murcote (54,68 kg), laranja rubi (27,22 kg), laranja valência (23,53 kg) e tangerina

cravo (22,93 kg). A produtividade por planta e por hectare destas variedades cítricas entre os tratamentos não apresentou diferença significativa (Tabela 30).

Considerando a média de produtividade por planta e por hectare, nos tratamentos, o T1 (Citros 446) apresentou produtividade de 48,26 kg e 21,53 Mg, respectivamente, o T4 (SAF Citros 1.040) 37,28 kg e 16,63 Mg, respectivamente, T3 (SAF Citros 780) 36,73 kg e 16,38 Mg, respectivamente e T2 (SAF Citros 713) 35,58 kg e 15,87 Mg, respectivamente (Tabela 31). No entanto, a diferença de produtividade entre os tratamentos não foi significativa (Figura 37).

**Tabela 30.** Teste de Tukey para produtividade de variedades cítricas em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Variedades        | Tratamento | Produção/planta (kg) | Produção/ha (Mg) |
|-------------------|------------|----------------------|------------------|
| Mexerica Rio      | T1         | 86,57 A              | 38,61 A          |
|                   | T2         | 55,02 A              | 24,54 A          |
|                   | T3         | 57,71 A              | 25,74 A          |
|                   | T4         | 76,53 A              | 34,13 A          |
| <b>Total</b>      | -          | <b>68,96</b>         | <b>30,75</b>     |
| Tangerina Murcote | T1         | 70,92 A              | 31,63 A          |
|                   | T2         | 60,32 A              | 26,90 A          |
|                   | T3         | 33,10 A              | 14,76 A          |
|                   | T4         | 54,37 A              | 24,25 A          |
| <b>Total</b>      | -          | <b>54,68</b>         | <b>24,39</b>     |
| Laranja Rubi      | T1         | 30,69 A              | 13,69 A          |
|                   | T2         | 20,81 A              | 9,28 A           |
|                   | T3         | 35,18 A              | 15,69 A          |
|                   | T4         | 22,19 A              | 9,90 A           |
| <b>Total</b>      | -          | <b>27,22</b>         | <b>12,14</b>     |
| Laranja Valência  | T1         | 29,93 A              | 13,35 A          |
|                   | T2         | 17,45 A              | 7,78 A           |
|                   | T3         | 29,60 A              | 13,20 A          |
|                   | T4         | 17,13 A              | 7,64 A           |
| <b>Total</b>      | -          | <b>23,53</b>         | <b>10,49</b>     |
| Tangerina Cravo   | T1         | 23,21 A              | 10,35 A          |
|                   | T2         | 24,29 A              | 10,83 A          |
|                   | T3         | 28,05 A              | 12,51 A          |
|                   | T4         | 16,17 A              | 7,21 A           |
| <b>Total</b>      | -          | <b>22,93</b>         | <b>10,23</b>     |

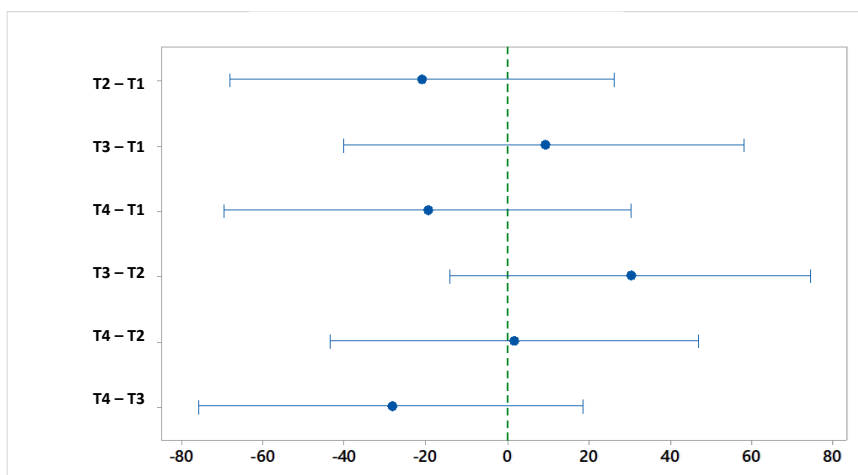
Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes. T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

**Tabela 31.** Produtividade de variedades cítricas em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| Tratamento   | Variedade         | Produção/planta (kg) | Produção/ha (Mg ha <sup>-1</sup> ) |
|--------------|-------------------|----------------------|------------------------------------|
| T1           | Mexerica Rio      | 86,57                | 38,61                              |
|              | Tangerina Murcote | 70,92                | 31,63                              |
|              | Laranja Rubi      | 30,69                | 13,69                              |
|              | Tangerina Cravo   | 23,21                | 10,35                              |
|              | Laranja Valência  | 29,93                | 13,35                              |
| <b>Total</b> | -                 | <b>48,26</b>         | <b>21,53</b>                       |
| T2           | Mexerica Rio      | 55,02                | 24,54                              |
|              | Tangerina Murcote | 60,32                | 26,90                              |
|              | Laranja Rubi      | 20,81                | 9,28                               |
|              | Tangerina Cravo   | 24,29                | 10,83                              |
|              | Laranja Valência  | 17,45                | 7,78                               |
| <b>Total</b> | -                 | <b>35,58</b>         | <b>15,87</b>                       |
| T3           | Mexerica Rio      | 57,71                | 25,74                              |
|              | Tangerina Murcote | 33,10                | 14,76                              |
|              | Laranja Rubi      | 35,18                | 15,69                              |
|              | Tangerina Cravo   | 28,05                | 12,51                              |
|              | Laranja Valência  | 29,60                | 13,20                              |
| <b>Total</b> | -                 | <b>36,73</b>         | <b>16,38</b>                       |
| T4           | Mexerica Rio      | 76,53                | 34,13                              |
|              | Tangerina Murcote | 54,37                | 24,25                              |
|              | Laranja Rubi      | 22,19                | 9,90                               |
|              | Tangerina Cravo   | 16,17                | 7,21                               |
|              | Laranja Valência  | 17,13                | 7,64                               |
| <b>Total</b> | -                 | <b>37,28</b>         | <b>16,63</b>                       |

T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

**Figura 37.** Teste de Tukey para produtividade (kg/planta) de variedades cítricas em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

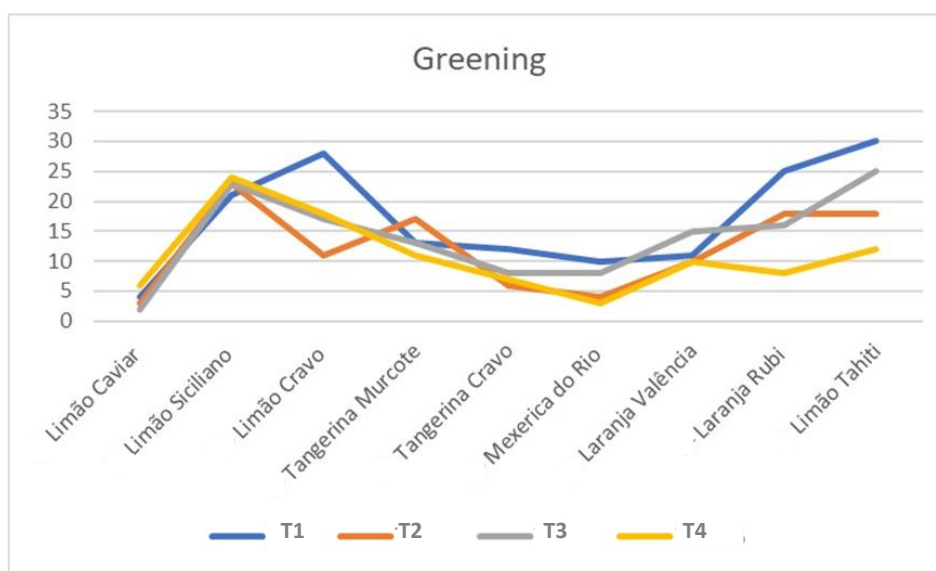


Se um intervalo não contém zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes. T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

### 14.5 Incidência de Greening ou Huanglongbing (HLB)

Entre as variedades cítricas estudadas, a mortalidade em decorrência do Greening foi maior no limão siciliano (18,6%), seguido do limão tahiti (17,3%), limão cravo (15,1%), laranja rubi (13,7%), tangerina murcote (11,0%), laranja valência (9,4%), tangerina cravo (6,7%), mexerica do rio (5,1%) e limão caviar (3,1%), demonstrando a maior suscetibilidade ao Greening dos limões, com exceção do limão caviar que apresentou a menor mortalidade (Tabela 32 e Figura 38).

**Figura 38.** Mortalidade das variedades cítricas por incidência de Greening em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

Não houve diferença significativa da mortalidade por Greening das variedades cítricas entre os tratamentos, com exceção da laranja rubi que apresentou diferença entre os tratamentos T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040), sendo este último menor (Tabela 32).

O grupo amostral para estudo da mortalidade por Greening correspondeu a 2.208 plantas, sendo que destas, 490 foram erradicadas no período de junho de 2020 a setembro de 2021, refletindo uma mortalidade total de 22,19% (Tabela 25).

O tratamento T1 (Citros 446) apresentou mortalidade média de Greening de 31,4%, seguido do T2 (SAF Citros 713) com 25,9%, T3 (SAF Citros 780) com 22,4% e T4 (SAF Citros 1.040) com 20,2% (Tabela 33), demonstrando uma tendência de maior resistência ao Greening sob sombreamento. No entanto, essa diferença não foi significativa (Figura 39).

**Tabela 32.** Mortalidade por incidência de Greening das variedades cítricas em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

| <b>Variedades Citros</b> | <b>Tratamentos</b> | <b>Mortalidade Greening</b> |
|--------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Limão Siciliano          | T1                 | 21 A                        |
|                          | T2                 | 23 A                        |
|                          | T3                 | 23 A                        |
|                          | T4                 | 24 A                        |
| <b>Total</b>             |                    | <b>91 (18,6%)</b>           |
| Limão Tahiti             | T1                 | 30 A                        |
|                          | T2                 | 18 A                        |
|                          | T3                 | 25 A                        |
|                          | T4                 | 12 A                        |
| <b>Total</b>             |                    | <b>85 (17,3%)</b>           |
| Limão Cravo              | T1                 | 28 A                        |
|                          | T2                 | 11 A                        |
|                          | T3                 | 17 A                        |
|                          | T4                 | 18 A                        |
| <b>Total</b>             |                    | <b>74 (15,1%)</b>           |
| Laranja Rubi             | T1                 | 25 A                        |
|                          | T2                 | 18 AB                       |
|                          | T3                 | 16 AB                       |
|                          | T4                 | 8 B                         |
| <b>Total</b>             |                    | <b>67 (13,7%)</b>           |
| Tangerina Murcote        | T1                 | 13 A                        |
|                          | T2                 | 17 A                        |
|                          | T3                 | 13 A                        |
|                          | T4                 | 11 A                        |
| <b>Total</b>             |                    | <b>54 (11,0%)</b>           |
| Laranja Valência         | T1                 | 11 A                        |
|                          | T2                 | 10 A                        |
|                          | T3                 | 15 A                        |
|                          | T4                 | 10 A                        |
| <b>Total</b>             |                    | <b>46 (9,4%)</b>            |
| Tangerina Cravo          | T1                 | 12 A                        |
|                          | T2                 | 6 A                         |
|                          | T3                 | 8 A                         |
|                          | T4                 | 7 A                         |
| <b>Total</b>             |                    | <b>33 (6,7%)</b>            |
| Mexerica Rio             | T1                 | 10 A                        |
|                          | T2                 | 4 A                         |
|                          | T3                 | 8 A                         |
|                          | T4                 | 3 A                         |
| <b>Total</b>             |                    | <b>25 (5,1%)</b>            |
| Limão Caviar             | T1                 | 4 A                         |
|                          | T2                 | 3 A                         |

|                    |    |                   |
|--------------------|----|-------------------|
|                    | T3 | 2 A               |
|                    | T4 | 6 A               |
| <b>Total</b>       |    | <b>15 (3,1%)</b>  |
| <b>Total Geral</b> |    | <b>490 (100%)</b> |

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes. T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

**Tabela 33.** Mortalidade por incidência de Greening das variedades cítricas em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.

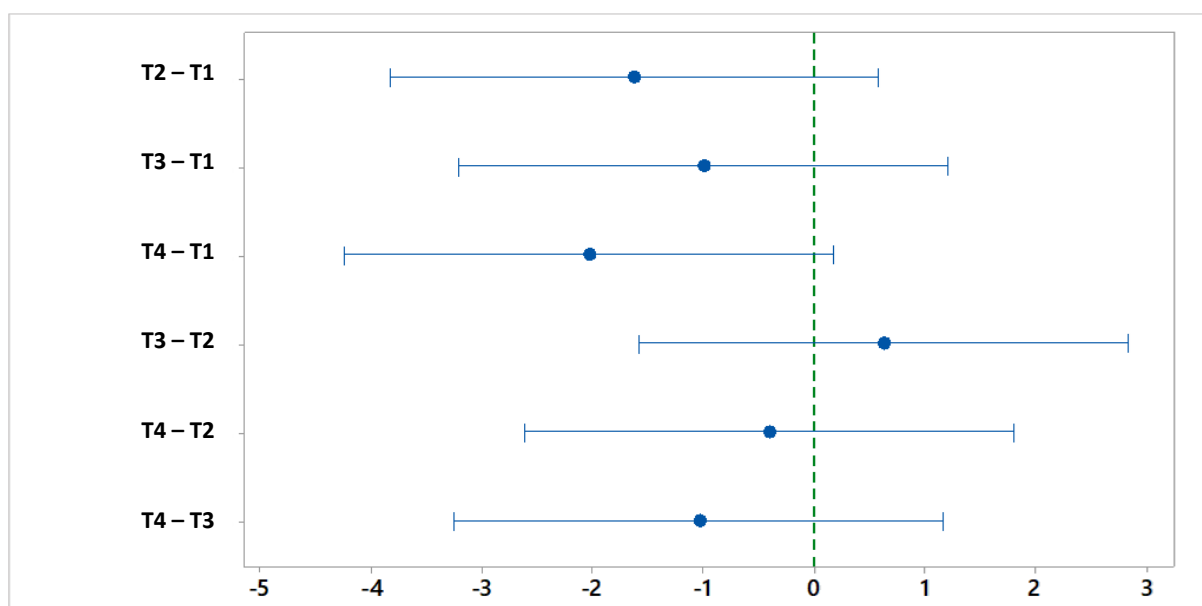
| <b>Tratamento</b> | <b>Variedade Citros</b> | <b>Mortalidade Greening</b> |
|-------------------|-------------------------|-----------------------------|
| T1                | Limão Caviar            | 4                           |
|                   | Limão Cravo             | 28                          |
|                   | Laranja Rubi            | 25                          |
|                   | Limão Siciliano         | 21                          |
|                   | Limão Tahiti            | 30                          |
|                   | Laranja Valência        | 11                          |
|                   | Mexerica Rio            | 10                          |
|                   | Tangerina Cravo         | 12                          |
|                   | Tangerina Murcote       | 13                          |
|                   | <b>Total</b>            | <b>154 (31,4%)</b>          |
| T2                | Limão Caviar            | 3                           |
|                   | Limão Cravo             | 11                          |
|                   | Laranja Rubi            | 18                          |
|                   | Limão Siciliano         | 23                          |
|                   | Limão Tahiti            | 18                          |
|                   | Laranja Valência        | 10                          |
|                   | Mexerica Rio            | 4                           |
|                   | Tangerina Cravo         | 6                           |
|                   | Tangerina Murcote       | 17                          |
|                   | <b>Total</b>            | <b>127 (25,9%)</b>          |
| T3                | Limão Caviar            | 2                           |
|                   | Limão Cravo             | 17                          |
|                   | Laranja Rubi            | 16                          |
|                   | Limão Siciliano         | 23                          |
|                   | Limão Tahiti            | 25                          |
|                   | Laranja Valência        | 15                          |
|                   | Mexerica Rio            | 8                           |
|                   | Tangerina Cravo         | 8                           |
|                   | Tangerina Murcote       | 13                          |
|                   | <b>Total</b>            | <b>110 (22,4%)</b>          |
| T4                | Limão Caviar            | 6                           |
|                   | Limão Cravo             | 18                          |
|                   | Laranja Rubi            | 8                           |
|                   | Limão Siciliano         | 24                          |
|                   | Limão Tahiti            | 12                          |
|                   | Laranja Valência        | 10                          |

|                   |    |
|-------------------|----|
| Mexerica Rio      | 3  |
| Tangerina Cravo   | 7  |
| Tangerina Murcote | 11 |

**Total** 99 (20,2%)  
**Total Geral** 490 (100%)

T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

**Figura 39.** Teste de Tukey para mortalidade das variedades cítricas por incidência de Greening em Sistema Agroflorestal sob diferentes densidades arbóreas, na área experimental em Itirapina, São Paulo, Brasil.



Se um intervalo não contém zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes. T1 = Citros 446; T2 = SAF Citros 713; T3 = SAF Citros 780; T4 = SAF Citros 1.040.

## 15. DISCUSSÃO

O índice de vigor vegetativo da média das variedades cítricas apresentou diferença significativa entre os tratamentos, sendo que T3 (SAF Citros 780) exibiu maiores valores comparado aos demais. Segundo Gimeno *et al.* (2015), o efeito do sombreamento com tela artificial, que reduz em cerca de 50% a radiação fotossinteticamente ativa incidente, sobre parâmetros de crescimento dos limões 'Fino 49', demonstrou que o sombreamento aumentou a altura das árvores e o perímetro do dossel, produzindo árvores com volume de copa cerca de 60% maior do que as árvores de controle cultivadas a pleno sol. Martins *et al.* (2015), estudando os efeitos de diferentes níveis de sombreamento com tela (0, 30, 50 e 80%) no crescimento das mudas da laranjeira variedade 'Folha Murcha', verificaram que as maiores médias do diâmetro do enxerto e porta-enxerto foram adquiridas na ausência de sombreamento, a maior média da

área foliar ocorreu em sombreamento de 50% e a altura das mudas e número de folhas apresentam-se com valores médios iguais quando comparados entre os sombreamentos testados.

Quando os dados de IVV foram analisados separadamente, para cada variedade cítrica, o T3 (SAF Citros 780) apresentou maiores valores para quase todas as variedades, porém, sem diferença significativa. Raveh *et al.* (2003), estudando os efeitos da redução da carga de calor de radiação por sombreamento no crescimento e desenvolvimento de árvores cítricas cultivadas sob túneis de sombra de 30% ou 60%, ou sombra plana de 60% (fornecendo apenas sombra ao meio-dia), onde árvores não sombreadas serviram de controle, concluíram que o sombreamento aumentou a condutância média das folhas em 44% e a fotossíntese em 29% e a altura final da árvore no tratamento túnel 30%, superou o controle em 35%. Vaccaro *et al.* (2022), estudando os efeitos de diferentes tratamentos de luz em dois SAF temperados na Suíça Central, onde a cevada de verão foi cultivada em sub-bosque sob malhas de 90%, 40% e 0% de sombreamento, concluíram que a altura média das plantas foi de 0,60 m para tratamentos de controle e aumentou ligeiramente com o aumento da sombra (0,62 m em tratamentos de 40% de sombra e 0,63 m em tratamentos de 90% de sombra).

As variedades cítricas estudadas não apresentaram diferença significativa no IVV entre os tratamentos, com exceção do limão caviar onde o T3 (SAF Citros 780) foi maior que o T1 (Citros 446), demonstrando que essa variedade pode apresentar melhor crescimento sob sombreamento. Budiarto *et al.* (2019) estudando as características agrônômicas e fisiológicas de mudas de lima Kaffir (*citrus hystrix* DC) sob sombreamento artificial e poda, verificaram melhor desempenho de crescimento sob condição de sombreamento, sendo demonstrado no crescimento de plantas em 84%, número de folhas em 37%, diâmetro do caule em 17%, volume da raiz em 72%, levando a uma melhor produção de folhas em 59% do que as plantas sem sombra. O estudo indicou que o sombreamento suave com 24% de redução de luz é altamente recomendado em relação ao sombreamento moderado com 43% de redução de luz, sendo mais eficiente para aumentar a produção de folhas de lima kaffir.

Na área experimental a espécie Farinha-seca obteve maior IVV no T3 (SAF Citros 780), a Gliricídia em T4 (SAF Citros 1.040) e a Peroba em T3 (SAF Citros 780). Baliza *et al.* (2012), avaliando o efeito de diferentes níveis artificiais de sombreamento sobre as características fisiológicas do cafeeiro, obtiveram maior desempenho fotossintético sob os níveis 35, 50 e 65% no período chuvoso e maior assimilação de CO<sub>2</sub> a 50% de sombra no período seco, concluindo que o melhor crescimento foi obtido até 65% de sombreamento.

A radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA) foi maior no tratamento T1 (Citros 446),  $1.944,7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , diferindo de T2 (SAF Citros 713), T3 (SAF Citros 780) e T4 (SAF Citros 1.040). Os tratamentos T2 (SAF Citros 713) com  $1.176,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e T3 (SAF Citros 780) com  $1.080,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  não diferiram entre si, assim como T3 (SAF Citros 780) e T4 (SAF Citros 1.040). O tratamento T4 (SAF Citros 1.040) apresentou a menor RFA de  $860,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Martins *et al.* (2015), estudando os efeitos de diferentes níveis de sombreamento com tela (0, 30, 50 e 80%) no crescimento das mudas da laranjeira variedade ‘Folha Murcha’, no mês de dezembro, verificaram os seguintes valores de RFA 913,8 (0%), 639,7 (30%), 456,9 (50%) e  $182,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (80%). Segundo Dupraz *et al.* (2018), embora a competição por luz possa ser forte na presença de árvores, o uso da luz no SAF pode ser otimizado por meio de uma combinação adequada de árvores e culturas.

A produtividade média por planta e por hectare da mexerica rio, tangerina murcote, laranja rubi, laranja valência e tangerina cravo não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. Conforme Coelho (2017), o sombreamento aumenta a longevidade dos citros, que mantém alta produtividade por um longo período. Stanhill e Cohen (2001), em uma revisão sobre experimentos de sombreamento avaliaram que a maioria das espécies de plantas estudadas, incluindo gramíneas, plantas anuais, arbustos perenes e culturas arbóreas, foram tolerantes à sombra, uma vez que a máxima produtividade foi obtida até 50% de sombra em comparação com a exposição à luz solar plena.

Considerando a média de produtividade por planta e por hectare, de todas as variedades cítricas estudadas, o T1 (Citros 446) apresentou a maior produtividade, seguido do T4 (SAF Citros 1.040), T3 (SAF Citros 780) e T2 (SAF Citros 713), no entanto, essa diferença não foi significativa. A tela de sombra com 50% Aluminet num pomar de limão “fino-49” criou um microclima para reduzir a temperatura do ar e a radiação solar, o que aumentou o crescimento vegetativo dos limoeiros, mas diminuiu a produção de frutos sem afetar a qualidade interna dos frutos (GARCÍA-SÁNCHEZ *et al.*, 2015). Sendo assim, os autores concluíram que a instalação de uma cortina de sombra durante todo o ano não é uma boa estratégia para aumentar a produção de frutos em limoeiros sob clima árido ou semiárido, mas pode ser benéfico em viveiro onde seu uso aumentaria a taxa de crescimento das mudas de citros, reduzindo o tempo necessário para obter plantas grandes o suficiente para o plantio no campo.

A produção de cafeeiro medianamente sombreado por araucária não diferiu da produção do cafeeiro a pleno sol, evidenciando o benefício agroecológico desse sistema de manejo (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Porém, existem alguns resultados opostos, por exemplo, no

Canadá, árvores híbridas de álamo reduziram significativamente a radiação fotossintética, teor de água no solo, crescimento e rendimento de milho e soja em dois anos de estudo subsequentes em sistemas agroflorestais (REYNOLDS *et al.*, 2007). Pardon *et al.* (2017) avaliaram os rendimentos de milho (silagem), batata, trigo de inverno e cevada de inverno durante três anos consecutivos (2015 a 2017) em 16 campos agroflorestais na Bélgica, concluindo que os rendimentos de milho e batata foram substancialmente reduzidos, enquanto os rendimentos de trigo e cevada de inverno foram pouco afetados, o que pode indicar a importância da limitação de luz dependente da espécie.

O maior crescimento das plantas cítricas ocorreu no tratamento T3 (SAF Citros 780), na média das variedades estudadas, indicando que este tratamento pode apresentar maior produtividade nas safras futuras. Em um experimento realizado na Bahia com Tangor ‘Piemonte’, cruzamento de tangerina com laranja, França *et al.* (2018), avaliaram o crescimento e a produção desta variedade com diferentes porta-enxertos e constaram que as plantas que apresentaram maior crescimento vegetativo, relacionado à altura, diâmetro da copa e diâmetro do caule, apresentaram também a maior produção. O potencial de máxima produtividade e qualidade dos frutos cítricos é revelado entre 6 e 8 anos após o plantio (TEÓFILO SOBRINHO, 1991). Considerando que a produtividade das plantas cítricas deste experimento se refere ao primeiro ano de produção, é indicado novas análises nos próximos anos.

A média do índice de vigor vegetativo (IVV) das variedades cítricas estudadas foi maior nos limões siciliano e cravo com valores de 10,64 e 10,09, respectivamente, e o menor valor para o limão caviar com 5,20. Entre as variedades cítricas estudadas, a mortalidade em decorrência do Greening foi maior no limão siciliano (18,6%), seguido do limão tahiti (17,3%), limão cravo (15,1%), demonstrando assim, a maior suscetibilidade ao Greening dos limões, com exceção do limão caviar que apresentou a menor mortalidade. Conforme Killiny *et al.* (2018), o limão caviar é tolerante ao Greening dos citros. A bactéria causadora do Greening se movimenta na planta cítrica seguindo o fluxo da seiva do floema e se move preferencialmente em direção às novas brotações (FUNDECITRUS, 2021). Devido ao fato dos limões siciliano e cravo apresentarem alto crescimento, e com isso a necessidade de podas, ocorreram várias brotações novas, motivo pelo qual provavelmente essas plantas foram mais atacadas por Greening.

A mortalidade total da área experimental em dezembro de 2021 foi de 22,19%. De acordo com o levantamento do HLB de 2021, realizado pelo Fundecitrus, 43,4 milhões de árvores, ou 22,37%, das árvores da área comercial do Estado de São Paulo e do oeste de Minas

Gerais foram afetadas pelo HLB. O alto número de árvores infectadas com mais de cinco anos tem dificultado o controle da doença em campos jovens, pois o vetor da doença se multiplica nas árvores infectadas e dissemina a bactéria, que causa a doença nas áreas de campos jovens vizinhos (USDA, 2021). Em relação ao ano de 2020, a incidência cresceu 7,2%, sendo o quarto salto consecutivo da doença (2018 = 18,15%, 2019 = 19,02% e 2020 = 20,87%) (FUNDECITRUS, 2021). Nos últimos 20 anos, a produção de laranja nos Estados Unidos caiu 30% e a área 40% em decorrência do HLB (USDA, 2021).

O tratamento T1 (Citros 446) apresentou mortalidade média de Greening de 31,4%, seguido de T2 (SAF Citros 713) de 25,9%, T3 (SAF Citros 780) de 22,4% e T4 (SAF Citros 1.040) de 20,2%, demonstrando uma tendência de maior resistência ao Greening sob sombreamento. Suh *et al.* (2021) utilizando uma abordagem metabólica e fisiológica combinada para elucidar se a sombra alivia os efeitos deletérios do HLB em árvores cítricas cultivadas em campo, descobriram que a sombra melhora os sintomas da doença, resultando em maior crescimento e rendimento e que tratamentos de sombra suave podem ser uma ferramenta valiosa no enfrentamento desta doença. Vincent *et al.* (2021), realizando um levantamento de uma área de ecossistema natural, com abundantes árvores cítricas selvagens no sub-bosque, para entender como as condições naturais do sub-bosque afetam a distribuição da bactéria causal do HLB, concluíram que o ambiente de sub-bosque naturalmente sombreado inibe muito o HLB ao impedir a chegada do vetor e melhora significativamente o desempenho do fotossistema-II dos citros, tornando o ambiente sombreado vantajoso para a população de citros selvagens.

O experimento se encontra na região de Brotas, no Estado de São Paulo, sendo que as regiões com maiores incidências de HLB nos pomares no Estado são: Limeira (61,75%), Brotas (50,40%), Porto Ferreira (37,84%), Avaré (29,41%) e Duartina (26,15%). As regiões com menores incidências são: São José do Rio Preto (5,32%), Itapetininga (4,25%), Triângulo Mineiro (0,14%) e Votuporanga (0,05%) (FUNDECITRUS, 2021). Devido a localização do experimento a área está mais suscetível a incidência do Greening. Baseado na incidência atual do Greening e da sua tendência, as regiões do cinturão citrícola foram classificadas quanto ao risco. Com risco baixo estão as regiões do Triângulo Mineiro e Votuporanga; com risco médio, as regiões de São José do Rio Preto, Itapetininga e Matão; com risco médio a alto, as regiões de Altinópolis e Bebedouro; com risco alto, as regiões de Duartina e Avaré; e com risco muito alto, as regiões de Porto Ferreira, Brotas e Limeira (FUNDECITRUS, 2021).

As plantas do experimento se encontram com quatro anos de idade, em relação às faixas de idade, a maior incidência de Greening continua sendo observada nos pomares acima

de 10 anos (30,57%), seguida pelos pomares de 6 a 10 anos (20,52%), de 3 a 5 anos (16,32%) e de 0 a 2 anos (4,30%). Nos pomares mais novos a situação está alarmante, porque na faixa de 3 a 5 anos a incidência aumentou pelo segundo ano seguido (6,50% em 2019, 11,36% em 2020, e 16,52% em 2021). Na região de Brotas são 56,8% de árvores afetadas com mais de 5 anos e 27,9% das árvores com até 5 anos (FUNDECITRUS, 2021). Os resultados apresentados por Gaire *et al.* (2022) sugerem que o uso de capas de proteção (sacos feitos de rede de malha fina) é uma ferramenta de exclusão de vetores e pode fazer parte de uma estratégia de manejo sustentável no gerenciamento do HLB, especialmente para novos plantios de citros em áreas endêmicas de HLB.

## 16. CONCLUSÕES

As variedades cítricas estudadas não apresentaram diferença significativa no índice de vigor vegetativo (IVV) entre os tratamentos, com exceção do limão caviar onde o T3 (SAF Citros 780) foi maior que o T1 (Citros 446), demonstrando que essa variedade pode apresentar melhor crescimento sob sombreamento.

Considerando os dados médios de índice de vigor vegetativos das variedades cítricas estudadas, houve um maior crescimento das plantas no tratamento T3 (SAF Citros 780), comparado aos demais tratamentos, demonstrando que, no geral, as plantas cítricas apresentam maior crescimento sob densidade de 780 plantas ha<sup>-1</sup>.

A produtividade média por planta e por hectare das variedades mexerica rio, tangerina murcote, laranja rubi, laranja valência e tangerina cravo não apresentou diferença significativa entre os tratamentos.

Não houve diferença significativa da mortalidade por Greening das variedades cítricas entre os tratamentos, com exceção da laranja rubi que apresentou diferença entre os tratamentos T1 (Citros 446) e T4 (SAF Citros 1.040), sendo este último menor.

O tratamento T1 (Citros 446) apresentou mortalidade média de Greening de 31,4%, seguido de T2 (SAF Citros 713) de 25,9%, T3 (SAF Citros 780) de 22,4% e T4 (SAF Citros 1.040) de 20,2%, demonstrando uma tendência de maior resistência ao Greening sob sombreamento. No entanto, em termos estatísticos, essa diferença não foi significativa.

## 17. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do experimento não demonstraram diferença estatística de produtividade entre os tratamentos, mas, por se tratar do primeiro de produção, a produtividade pode mudar ao longo do tempo nas diferentes densidades arbóreas. Considerando que, no geral, as plantas cítricas se desenvolveram melhor no T3 (SAF citros 780) e o crescimento das plantas está relacionado com a produtividade da cultura, no futuro, os citros podem apresentar melhor produtividade sob densidade de 780 plantas ha<sup>-1</sup>, sendo necessário novos estudos para comprovar o efeito da densidade arbórea e sombreamento sobre a produtividade de variedades cítricas.

Levando em conta que, o sombreamento não diminuiu a produtividade das variedades cítricas estudadas, mas teve uma tendência de maior crescimento das plantas na densidade de 780 plantas ha<sup>-1</sup>, especialmente no limão caviar e menor incidência de Greening, especialmente na laranja rubi, e obteve melhores resultados na qualidade do solo, especialmente para estoque de carbono, nos tratamentos T2 (SAF citros 713) e T3 (SAF Citros 780), recomenda-se o cultivo de citros em sistema agroflorestal orgânico com densidade arbórea entre 713 e 780 plantas ha<sup>-1</sup>, porém, outras pesquisas devem ser realizadas para comprovar essa tendência de melhores resultados para citros sombreado.

As espécies florestais dos sistemas agroflorestais que apresentaram o maior índice de vigor vegetativo (IVV) foram: Eucalipto (*Eucalyptus urograndis*), Gliricídia (*Gliricídia sepium*), Ingá (*Inga edulis*) e Louro-pardo (*Cordia trichotoma*), sendo recomendado o consórcio dessas espécies com citros. A Peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron*) apresentou a maior mortalidade entre as espécies florestais e o menor IVV, provavelmente devido ao seu estágio sucessional, que necessita de sombra no desenvolvimento inicial, não sendo indicada seu plantio antes do sombreamento da área.

As variedades cítricas que apresentaram menor mortalidade em decorrência do Greening ou HLB foram: tangerina murcote (11,0%), laranja valência (9,4%), tangerina cravo (6,7%), mexerica do rio (5,1%) e limão caviar (3,1%), sendo indicado essas variedades para cultivo em sistema agroflorestal orgânico nas regiões com alta incidência da doença.

A mecanização intensa da área experimental para realização de adubação, roçada da entrelinha e, principalmente, controle de insetos e doenças provocou a compactação do solo, sobretudo nas entrelinhas, onde ocorre o tráfego das máquinas, sendo recomendado o uso de maquinário mais leve ou drones para manejo de sistemas agroflorestais em larga escala.

## 18. REFERÊNCIAS

- ABOUATALLAH, A.; SALGHI, R.; FADL, A.; HAMMOUTI, B.; ZARROUK, A.; ATRAOU, A.; GHNIZAR, Y. Shading nets usefulness for water saving on citrus orchards under different irrigation doses. **Current World Environment**, v.7, n.1, p.13-22, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA – ANVISA. Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos – PARA. Relatório das análises de amostras monitoradas no período de 2017 a 2018. Brasília, 10 de dezembro de 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/agrotoxicos/programa-de-analise-de-residuos-em-alimentos/arquivos/3770json-file-1>. Acesso em: 20 ago. 2022.
- AGRITEMPO – Sistema de Monitoramento Agrometeorológico. **Dados estação meteorológica Iaras – TRMM. 12753 / AGRITEMPO: 01/07/2018 – 23/06/2022**. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/Estatisticas/pesquisaAvancada.jsp?siglaUF=SP>>. Acesso em 26 de junho de 2022.
- ALTIERI, M. **Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável**. 3.ed.rev.ampl. São Paulo: Expressão Popular; Rio de Janeiro: AS-PTA, 2012. 400 p.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, 711-728, 2013.
- ALVARES, S. M. R. **Limites e potencialidades da transição agroecológica com sistemas agroflorestais no Vale do Ribeira**. 2018. 266 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2018.
- ALVAREZ, S.; ROHRIG, E.; SOLÍS, D.; THOMAS, M. H. Citrus Greening disease (Huanglongbing) in Florida: Economic impact, management and the potential for biological control. **Agricultural Research**, v.5, n.2, p109-118, 2016.
- ALZUBAIR, M. A. H. A.; ELWAHAB, M. H. A.; NURI, A. A. F. Advances of desertification research: status, gap and future challenges (Sudan study case). **International Journal of Current Research**, v.12, n.7, p.12431-12442, 2020.
- AMORIM, J. L.; SIMAS, D. L. R.; PINHEIRO, M. M. G.; MORENO, D. S. A.; ALVIANO, C. S.; SILVA, A. J. R.; FERNANDES, P. D. Anti-Inflammatory properties and chemical characterization of the essential oils of four citrus species. **Plos One**, v.11, n.4, e0153643, 2016.
- ANDERSON, S. H.; UDAWATTA, R. P.; SEOBI, T.; GARRETT, H. E. Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. **Agroforestry Systems**, v.75, n.1, p.5-16, 2009.

- ANDRADE, D. J.; RIBEIRO, E. B.; MORAIS, M. R.; ZANARDI, O. Z. Bioactivity of an oxymatrine-based commercial formulation Against *Brevipalpus yothersi* Baker and its effects on predatory mites in citrus groves. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.176, p.339-345, 2019.
- ARÉVALO-GARDINI, M. C.; CANTO, M.; ALEGRE, J.; LOLI, O.; JULCA, A.; BALIGAR, V. Changes in soil physical and chemical properties in long term improved natural and traditional agroforestry management systems of cacao genotypes in Peruvian Amazon. **Plos One**, v.10, n.8, e0136784, 2015.
- ATANGANA, A.; KHASA, D.; CHANG, S.; DEGRANDE, A. **Tropical Agroforestry**. Ecological interactions and productivity in agroforestry systems. Springer: Dordrecht, p.151-172, 2014.
- BALBINO, L. C.; KICHEL, A. N.; BUNGENSTAB, D. J.; GIOLO DE ALMEIDA, R. **Sistemas de integração: conceitos, considerações, contribuições e desafios**. In: BUNGENSTAB, D. J.; GIOLO DE ALMEIDA, R.; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (Eds.). ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília, DF: Embrapa, p.31-48, 2019.
- BALIZA, D. P.; CUNHA, R. L.; GUIMARÃES, R. J.; BARBOSA, J. P. R. A. D.; ÁVILA, F. W.; PASSOS, A. M. A. Physiological characteristics and development of coffee plants under different shading levels. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.7, n.1, p.37-43, 2012.
- BARGUÉS TOBELLA, A.; REESE, H.; ALMAW, A.; BAYALA, J.; MALMER, A.; LAUDON, H.; ILSTEDT, U. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso. **Water Resources Research**, v.50, n.4, p.2108-2123, 2014.
- BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; FONTES, A. G.; POLIDORO, J. C.; MOÇO, M. K. S.; MACHADO, R. C. R.; BALIGAR, V.C. Distribution of oxidizable organic C fractions in soils under cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. **Agroforestry Systems**, v.81, p.213-220, 2011.
- BASSANEZI, R. B.; MONTESINO, L. H.; STUCHI, E. S. Effects of huanglongbing on fruit quality of sweet orange cultivars in Brazil. **European Journal of Plant Pathology**, v.125, p.565-572, 2009.

- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C., MARTIN NETO, L.; FERNANDES, S. A. Organic matter storage in a sandy loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.54, n.1-2, p.101-109, 2000.
- BAYER, C., MIELNICZUK, J. **Dinâmica e função da matéria orgânica**. In: SANTOS, G. A., SILVA, L. S., CANELLAS, L. P., CAMARGO, F. A. O. (Eds.). Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2 Ed. Porto Alegre: Metrópole, p.7-18, 2008.
- BEILEN, N. V. Effects of conventional and organic agricultural techniques on soil ecology. **Center for Development and Strategy**, n.1, 2016.
- BELASQUE JUNIOR, J.; BERGAMIN FILHO, A.; BASSANEZI, R. B.; BARBOSA, J. C.; FERNANDES, N. G.; YAMAMOTO, P. T.; LOPES, S. A.; MACHADO, M. A.; LEITE JUNIOR, R. P.; AYRES, A. J.; MASSARI, C. A. Base científica para a erradicação de plantas sintomáticas e assintomáticas de Huanglongbing (HLB, Greening) visando o controle efetivo da doença. **Tropical Plant Pathology**, v.34, n.3, p.137-145, 2009.
- BENE, J. G.; BEALL, H. W.; CÔTÉ, A. Trees, food, and people: land management in the tropics. **International Development Research Centre**. 52 p., 1977.
- BEZERRA, L. P. **Implantação de Sistemas Agroflorestais na agricultura familiar: Um caminho para a transição agroecológica**. 2018. 105 p. Dissertação (Mestrado em Agroecologia e Desenvolvimento Rural) - Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2018.
- BEZERRA, L. P.; FRANCO, F. S.; SOUZA-ESQUERDO, V. F.; BORSATTO, R. Participatory construction in agroforestry systems in family farming: ways for the agroecological transition in Brazil. **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v.43, n.2, p.180-200, 2019.
- BOMBARDI, L. M. **Geografia do uso de agrotóxicos no Brasil e conexões com a União Europeia**. Laboratório de Geografia Agrária FFLCH - USP, São Paulo, 2017. 296 p.
- BORDIGNON, R.; MEDINA FILHO, H. P.; SIQUEIRA, W. J.; PIO, R. M. Características da laranjeira Valência sobre clones e híbridos de porta-enxertos tolerantes à tristeza. **Bragantia**, v.62, n.3, p.381-395, 2003.
- BOVÉ, J. M. Huanglongbing: a destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus. **Journal of Plant Pathology** v.88, n.1, p.7-37, 2006.
- BOWMAN, K. D., MCCOLLUM, G., ALBRECHT, U. Performance of 'Valencia' orange (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck) on 17 rootstocks in a trial severely affected by huanglongbing. **Scientia Horticulturae**, v.201, p.355-361, 2016.

- BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.4, p.605-614, 2006.
- BUDIARTO, R.; POERWANTO, R.; SANTOSA, E.; EFENDI, D.; AGUSTA, A. Agronomical and physiological characters of kaffir lime (*Citrus hystrix* DC) seedling under artificial shading and pruning. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v.31, n.3, p.222-230, 2019.
- BUENO, P. A. A.; OLIVEIRA, V. M. T.; GUALDI, B. L.; SILVEIRA, P. H. N.; PEREIRA, R. G.; FREITAS, C. E. S.; BUENO, R. O.; SEQUINE, E. S.; SCHWARCZ, K. D. Indicadores microbiológicos de qualidade do solo em recuperação de um sistema agroflorestal. **Acta Brasiliensis**, v.2, n.2, p.40-44, 2018.
- BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v.120, p.105-125, 2018.
- CAMPANHA, M. M.; SANTOS, R. H. S.; FREITAS, G. B.; MARTINEZ, H. E. P.; JARAMILLO-BOTERO, C.; GARCIA, S. L. Análise comparativa das características da serrapilheira e do solo em cafezais (*Coffea arabica* L.) cultivados em sistema agroflorestal e em monocultura na Zona da Mata-MG. **Revista Árvore**, v.31, n.5, p.805-812, 2007.
- CANARACHE, A. PENETR - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil and Tillage Research**, v.16, n.1, p.51-70, 1990.
- CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia: alguns conceitos e princípios**. 2. Ed. Brasília: MDA/SAF/DATER, p.24, 2004.
- CARDINAE, R.; CHEVALLIER, T.; CAMBOUAD, A.; BÉRAL, C.; BARTHÈS, B. G.; DUPRAZ, C.; DURAND, C.; KOUAKOUA, E.; CHENU, C. Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.236, p.243-255, 2017.
- CARLISLE, L.; WIT, M. M.; DELONGE, M. S.; ILES, A.; CALO, A.; GETZ, C.; ORY, J.; MUNDEN-DIXON, K.; GALT, R.; MELONE, B.; KNOX, R.; PRESS, D. Transitioning to sustainable agriculture requires growing and sustaining an ecologically skilled workforce. **Frontiers Sustainable Food Systems**, v.3, p.1-8, 2019.

CASTRO, M. E. A.; BEZERRA, A. R.; LEITE, W. A.; NOGUEIRA, N. D. Situação e ações do estado de Minas Gerais frente ao Huanglongbing. **Citrus Research & Technology**, v.31, n.2, p.163-168, 2010.

CERQUEIRA, A. **Mortalidade de abelhas *Apis mellifera* em apiários e utilização de agrotóxicos em *Citrus*: Estudo de caso na microrregião de Araraquara (SP)**. 2018. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

CHARBONNIER, F.; ROUPSARD, O.; MAIRE, G.; GUILLEMOT, J.; CASANOVES, F.; LACOINTE, A.; VAAST, P.; ALLINNE, C.; AUDEBERT, L.; CAMBOU, A.; CLÉMENT-VIDAL, A.; DEFRENET, E.; DUURSMA, R.A.; JARRI, L.; JOURDAN, C.; KHAC, E.; LEANDRO, P.; MEDLYN, B.E.; SAINT-ANDRÉ, L.; THALER, P.; VAN DEN MEERSCHKE, K.; AGUILAR, A. B.; LEHNER, P.; DREYER, E. Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. **Plant, Cell & Environment**, v.40, n.8, p.1592-1608, 2017.

CHEN, X. D., GILL, T. A., PELZ-STELINSKI, K. S., STELINSKI, L. L. Risk assessment of various insecticides used for management of Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* in Florida citrus, against honey bee, *Apis mellifera*. **Ecotoxicology**, v.26, n.3, p.351-359, 2017.

CHERUBIN, M. R.; CHAVARRO-BERMEJO, J. P.; SILVA-OLAYA, A. M. Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. **Agroforestry Systems**, v.93, p.1741-1753, 2019.

CHOQUETTE, A. F. **Pesticides and nitrate in groundwater underlying citrus croplands**. Florida: Lake Wales Ridge, 1999-2005: U.S. Geological Survey Open-File Report 2013-1271, 28 p. 2014.

CITRUSBR. Associação Brasileira dos Exportadores de Citros, 2021. Disponível em: <https://citrusbr.com/en/news/citriculture-generates-10000-jobs-in-the-first-three-months-of-the-2020-2021-crop-year/>. Acesso em 03.jun.2022.

COELHO, M. R.; SANTOS, H. G.; SILVA, E. F.; AGLIO, M. L. D. O. **Recurso Natural do Solo**. In: MANZATTO, C. V. (Org.). Uso Agrícola dos Solos Brasileiros. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p.1-12.

COELHO, G. C. Ecosystem services in Brazilian's southern agroforestry systems. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v.20, n.3, p.475-492, 2017.

- COLETTA-FILHO, H. D.; TARGON, M. L. P. N.; TAKITA, M. A.; NEGRI, J. D.; POMPEU JUNIOR, J.; MACHADO, M. A. First report of the causal agent of Huanglongbing ('Candidatus Liberibacter asiaticus') in Brazil. **Plant Disease**, v.88, n.12, p.1382, 2004.
- CORALLO, A. B.; PECHI, E.; BETTUCCI, L.; TISCORNIA, S. Biological control of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) by Entomopathogenic fungi and their side effects on natural enemies. **Egyptian Journal of Biological Pest Control**, v.31, n.15, p.1-9, 2021.
- CORDEIRO, L. W. **Marcadores da função tireoidiana em uma população rural exposta a agrotóxicos**. 2016. 99 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas à Saúde) - Universidade Federal de Sergipe, Lagarto, 2016.
- CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.2, p.289-298, 1999.
- COSTABEBER, J. A. **Acción colectiva y procesos de transición agroecológica en Rio Grande do Sul, Brasil**. Córdoba, 1998. 422 p. (Tese de Doutorado). Programa de Doctorado en Agroecología, Campesinado e Historia, ISEC-ETSIAN, Universidad de Córdoba, España, 1998.
- COURT, C. D.; HODGES, A. W.; RAHMANI, R.; SPREEN, T. H. **Economic contributions of the Florida citrus industry in 2015-16**. FE1021. UF/IFAS Extension, Gainesville, FL, 2017.
- DALA-PAULA, B. M.; PLOTTO, A.; BAI, J.; MANTHEY, J. A.; BALDWIN, E. A.; FERRAREZI, R. S.; GLORIA, M. B. A. Effect of Huanglongbing or Greening disease on orange juice quality, a review. **Frontiers Sustainable Food Systems**, v.9, 1976, 2019.
- DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. **Revista Árvore**, v.29, n.3, p.383-390, 2005.
- DI PRIMA, S.; RODRIGO-COMINO, J.; NOVARA, A.; IOVINO, M.; PIRASTRU, M.; KEESSTRA, S.; CERDÀ, A. Soil physical quality of citrus orchards under tillage, herbicide, and organic managements. **Pedosphere**, v.28, n.3, p.463-477, 2018.
- DOLLINGER, J.; JOSÉ, S. Agroforestry for soil health. **Agroforestry Systems**, v.92, p.213-219, 2018.
- DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.;

- ALBUQUERQUE, M. R., MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1003-1020, 2016.
- DUPRAZ, C.; BLITZ-FRAYRET, C.; LECOMTE, I.; MOLTO, Q.; REYES, F.; GOSME, M. Influence of latitude on the light availability for intercrops in an agroforestry alley-cropping system. **Agroforestry Systems**, v.92, p.1019-1033, 2018.
- EDDY, W. C; YANG, W. H. Improvements in soil health and soil carbon sequestration by an agroforestry for food production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.333, 107945, 2022.
- ERICKSON, A. E. Tillage effects on soil aeration. In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes, 1982. Madison: **Proceedings...** America Society of Agronomy, 1982. p.91-104.
- FAO. **CITRUS FRUIT FRESH AND PROCESSED Statistical bulletin 2020**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cb6492en/cb6492en.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2022.
- FAO; ITPS. **Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report**. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, 2015.
- FARRELL, J. G.; ALTIERI, M. A. **Sistemas agroflorestais**. In: ALTIERI, M. A. (Ed.). *Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável*. Guaíba: Editora Agropecuária, 2002, 592 p.
- FELICIANO, D. M. S. **Environmental impacts of fruit production in Brazil**. In: IORIS, A. (Ed.). *Cham: Agriculture, Environment and Development*. Palgrave Macmillan, p.149-179, 2016.
- FERNANDES, C. A. F.; MATSUMOTO, S. N.; FERNANDES, V. S. Carbon stock in the development of different designs of biodiverse agroforestry systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.10, p.720-725, 2018.
- FERRAREZI, R. S.; WRIGHT, A. L.; BOMAN, B. J.; SCHUMANN, A. W.; GMITTER, F. G.; GROSSER, J. W. Protected fresh grapefruit cultivation systems: Antipsyllid screen effects on environmental variables inside enclosures. **HortTechnology**, v.27, n.5, p.675-681, 2017.

- FERRAREZI, R. S.; QURESHI, J. A.; WRIGHT, A. L.; RITENOUR, M. A.; MACAN, N. P. F. Citrus production under screen as a strategy to protect grapefruit trees from Huanglongbing disease. **Frontiers Sustainable Food Systems**, v.10, p.1-15, 2019.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Qualidade física do solo em pomar de laranjeira no noroeste do Paraná com manejo da cobertura permanente na entrelinha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.3, p.423-433, 2007.
- FRANÇA, N. O.; GIRARDI, E. A.; AMORIM, M. S.; GESTEIRA, A.S.; PASSOS, O. S.; SOARES FILHO, W. S. Plant growth, yield and fruit quality of ‘Piemonte’ tangor grafted onto 14 rootstocks on the northern coast of the state of Bahia, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.40, n.4, e-784, 2018.
- FRAZÃO, L. A.; PÍCCOLO, M. C.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado mato-grossense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n.5, p.641-648, 2008.
- FUNDECITRUS. **Relatório de atividades junho/2020-maio/2021**. 86 p, 2021. Disponível em: <https://www.fundecitrus.com.br/pdf/relatorios/2021.pdf>. Acesso em: 10.jun.2022.
- GAIRE, S.; ALBRECHT, U.; BATUMAN, O.; QURESHI, J.; ZEKRI, M.; ALFEREZ, F. Individual protective covers (IPCs) to prevent Asian citrus psyllid and *Candidatus Liberibacter asiaticus* from establishing in newly planted citrus trees. **Crop Protection**, v.152, p.1-11, 2022.
- GAMA-RODRIGUES, E. F.; NAIR, P. K. R.; NAIR, V. D.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BALIGAR, V. C.; MACHADO, R. C. R. Carbon storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. **Environmental Management**, v.45, p.274-283, 2010.
- GAMFELDT, L.; SNÄLL, T.; BAGCHI, R.; JONSSON, M.; GUSTAFSSON, L.; KJELLANDER, P.; RUIZ-JAEN, M. C.; FRÖBERG, M.; STENDAHL, J.; PHILIPSON, C. D.; MIKUSÍŃSKI, G.; ANDERSSON, E.; WESTERLUND, B.; ANDRÉN, H.; MOBERG, F.; MOEN, J.; BENGTSSON, J. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. **Nature Communications**, v.4, 1340, 2013.
- GARCÍA-SÁNCHEZ, F.; SIMÓN, I.; LIDÓN, V.; MANERA, F. J.; SIMÓN-GRAO, S.; PÉREZ-PÉREZ, J. G.; GIMENO, V. Shade screen increases the vegetative growth but not the production in ‘Fino 49’ lemon trees grafted on *Citrus macrophylla* and *Citrus aurantium* L. **Scientia Horticulturae**, v.194, p.175-180, 2015.

- GARRITY, D. Agroforestry and the future of global land use. In: NAIR, P. K. R.; GARRITY, D. (Eds.). **Agroforestry - The future of global land use**. Advances in Agroforestry, v.9, p.21-27, Springer: Dordrecht, 2012.
- GELAW, A.; SINGH, B.; LAL, R. Soil quality indices for evaluating smallholder agricultural land uses in northern Ethiopia. **Sustainability**, v.7, p.2322-2337, 2015.
- GILLESPIE, A. R.; JOSE, S.; MENGEL, D. B.; HOOVER, W. L.; POPE, P. E.; SEIFERT, J. R.; BIEHLE, D. J.; STALL, T. E.; BENJAMIN, T. J. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA 1. Production physiology. **Agroforestry Systems**, v.48, p.25-40, 2000.
- GIMENO, V.; SIMÓN, I.; MARTÍNEZ, V.; LIDÓN, V.; SHAHID, M. A.; GARCIA-SANCHEZ, F. Effect of shade screen on production, fruit quality and growth parameters of 'fino 49' lemon trees grafted on citrus macrophylla and sour orange. **Acta Horticulturae**, 1065, p.1845-1852, 2015.
- GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: Processos ecológicos em Agricultura Sustentável**. 4ª Edição. Porto Alegre: Editora da UFGRS, p. 654, 2009.
- GMACH, M. R.; CHERUBIN, M. R.; KAISER, K.; CERRI, C. E. P. Processes that influence dissolved organic matter in the soil: a review. **Scientia Agricola**, v.77, n.3, e20180164, 2020.
- GOMES, L.; SIMÕES, S. J. C.; NORA, E. L. D.; SOUSA-NETO, E. R.; FORTI, M. C.; OMETTO, J. P. H. B. Agricultural expansion in the Brazilian Cerrado: Increased soil and nutrient losses and decreased agricultural productivity. **Land**, v.8, n.1, p.1-26, 2019.
- GONÇALVES, C. B. Q.; SCHLINDWEIN, M. M.; MARTINELLI, G. C. Agroforestry systems: A systematic review focusing on traditional indigenous practices, food and nutrition security, economic viability, and the role of women. **Sustainability**, v.13, 11397, 2021.
- GONZATTO, M. P. **Desenvolvimento e produção de citros em sistema agroflorestal**. 2009. 105 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.
- GOTSCH, E. **Natural Succession of Species in Agroforestry and in Soil Recovery**. Pirai do Norte-BA, 1992. 15 p.
- GRAHAM, K. K.; MILBRATH, M. O.; ZHANG, Y.; BAERT, N.; MCART, S.; ISAACS, R. Pesticide risk to managed bees during blueberry pollination is primarily driven by off-farm exposures. **Scientific Reports**, v.12, 7189, 2022.

- GUPTA, N.; KUKAL, S. S.; BAWA, S. S.; DHALIWAL, G. S. Soil organic carbon and aggregation under poplar based agroforestry system in relation to tree age and soil type. **Agroforestry Systems**, v.76, n.1, p.27-35, 2009.
- GURMESSA, B.; ASHWORTH, A. J.; YANG, Y.; ADHIKARI, K.; SAVIN, M.; OWENS, P.; SAUER, T.; PEDRETTI, E. F.; COCCO, S.; CORTI, G. Soil bacterial diversity based on management and topography in a silvopastoral system. **Applied Soil Ecology**, v.163, 103198, 2021.
- GUZMÁN, G. C.; GONZÁLEZ, M. M.; SEVILLA, E. G. **Introducción a la agroecología como desarrollo rural sostenible**. Ediciones Mundi-Prensa, 2000, 535 p.
- HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2005, 593 p.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v.82, n.2, p.121-145, 2005.
- HEILMAN, P. Root penetration of douglas-fir seedlings into compacted soil. **Forest Science**, v.27, n.4, p.660-666, 1981.
- HOFFMANN, M. R. M. **Sistemas agroflorestais para agricultura familiar: Análise econômica**. 2013. 133 p. (Dissertação de Mestrado) - Universidade de Brasília - UNB, Brasília. 2013.
- HOMMA, S. K.; TOKESHI, H.; MENDES, L. W.; TSAI, S. M. Long-term application of biomass and reduced use of chemicals alleviate soil compaction and improve soil quality. **Soil and Tillage Research**, v.120, p.147-153, 2012.
- HUANG, R.; LAN, M.; LIU, J.; GAO, M. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning. **Environmental Science and Pollution Research**, v.24, n.36, p.27942-27952, 2017.
- HUANG, J.; HARTEMINK, A. E. **Soil and environmental issues in sandy soils**. Earth-Science Reviews, v.208, 22 p., 2020.
- HURT, R. D. **The green revolution in the global south: Science, politics, and unintended consequences**. University Alabama Press, 2020, 280 p.
- IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Painéis de informações de agrotóxicos**, 2022. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/agrotoxicos/paineis-de-informacoes-de-agrotoxicos>. Acesso em: 02.jun.2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/pimpfbr/brasil>>. Acesso em: 10 de jun. 2022.

IEA – INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Mercado de Fertilizantes: aumento das importações preocupa**. 2017 Disponível em: <http://www.iaea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=14447>. Acesso em: 27.nov.2018.

ISLAM, M.; DEY, A.; RAHMAN, M. Effect of tree diversity on soil organic carbon content in the homegarden agroforestry system of North-Eastern Bangladesh. **Small-Scale Forestry**, v.14, p.91-101, 2015.

IWATA, B. F.; LEITE, L. F. C.; ARAÚJO, A. S. F; NUNES, L. A. P. L; GEHRING, C.; CAMPOS, L.P. Sistemas agroflorestais e seus efeitos sobre os atributos químicos em Argissolo Vermelho-Amarelo do cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.7, p.730-738, 2012.

JACOBI, J.; MUKHOVI, S.; LLANQUE, A.; GIGER, M.; BESSA, A.; GOLAY, C.; SPERANZA, C.; MWANGI, V.; AUGSTBURGER, H.; BUERGI-BONANOMI, E.; HALLER, T.; KITEME, B. P.; BURGOA, J. M. F. D.; TRIBALDOS, T.; RIST, S. A new understanding and evaluation of food sustainability in six different food systems in Kenya and Bolivia. **Scientific Reports**, v.10, 19145, 2020.

JANDL, R.; RODEGHIERO, M.; MARTINEZ, C.; COTRUFO, M. F.; BAMPÀ, F.; WESEMAEL, B.; HARRISON, R. B.; GUERRINI, I. A.; RICHTER, D. B.; RUSTAD, L.; LORENZ, K.; CHABBI, A.; MIGLIETTA, F. Current status, uncertainty and future needs in soil organic carbon monitoring. **Science of the Total Environment**, v.468-469, p.376-383, 2014.

JESUS, G. L.; SILVA, I. R.; ALMEIDA, L. J. F.; DOS SANTOS, M. A.; LEITE, F. P.; NEVES, J. C. L. Produtividade do eucalipto, atributos físicos do solo e frações da matéria orgânica influenciadas pela intensidade de tráfego e resíduos de colheita. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.1190-1203, 2015.

JIFON, J. L.; SYVERTSEN, J. P. Effects of moderate shade on citrus leaf gas exchange, fruit yield, and quality. **Florida State Horticultural Society**, v.114, p.177-181, 2001.

JIFON, J. L.; SYVERTSEN, J. P. Moderate shade can increase net gas exchange and reduce photoinhibition in citrus leaves. **Tree Physiology**, v.23, n.2, p.119-127, 2003.

- JOHNSON, D. E. **Applied multivariate methods for data analysts**. VII: Categorical and multivariate methods. New York: Springer Press, 1998. 730 p.
- JOHNSON, E. G.; WU, J.; BRIGHT, D. B.; GRAHAM, J. H. Association of *Candidatus Liberibacter asiaticus* root infection, but not phloem plugging with root loss on huanglongbing affected trees prior to appearance of foliar symptoms. **Plant Pathology**, v.63, n.2, p.290-298, 2014.
- JOSE, S.; GILLESPIE, A. R.; SEIFERT, J. R.; BIEHLE, D. J. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 2. Competition for water. **Agroforestry Systems**, v.48, n.1, p.41-59, 2000.
- JOSE, S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. **Agroforestry Systems**, v.76, p.1-10, 2009.
- JUNQUEIRA, A. C.; SCHLINDWEIN, M. N.; CANUTO, J. C.; NOBRE, H. G.; SOUZA, T. J. M. Sistemas agroflorestais e mudanças na qualidade do solo em assentamento de reforma agrária. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v.8, n.1, p.102-115, 2013.
- KAISER, H. F. The application of electronic computers to factor analysis. **Educational and Psychological Measurement**, v.20, p.141-151, 1958.
- KARLEN, D. L.; EASH, N. S.; UNGER, P. W. Soil and crop management effects on soil quality indicators. **American Journal of Alternative Agriculture**, v.7, n.1, p.48-55, 1992.
- KILLINY, N.; JONES, S. E.; NEHELA, Y.; HIJAZ, F.; DUTT, M.; GMITTER, F. G.; GROSSER, J. W. All roads lead to Rome: Towards understanding different avenues of tolerance to huanglongbing in citrus cultivars. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.129, p.1-10, 2018.
- KIM, D. G.; KIRSCHBAUM, M. U. F.; BEEDY, T. L. Carbon sequestration and net emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O under agroforestry: Synthesizing available data and suggestions for future studies. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.226, p.65-78, 2016.
- KOPITTKE, P. M.; MENZIES, N. W.; WANG, P.; MCKENNA, B. A.; LOMBI, E. Soil and the intensification of agriculture for global food security. **Environment International**, v.132, 105078, 2019.
- KUMAR, V. Multifunctional agroforestry systems in tropics region. **Nature Environment and Pollution Technology**, v.15, n.2, p.365-376, 2016.

- LADO, J.; CRONJE, P. J. R; RODRIGO, M. J.; ZACARÍAS, L. Fruit shading enhances red color and carotenoid accumulation in 'Star Ruby' grapefruit. **Acta Horticulturae**, 1065, p.1521-1527, 2015.
- LAL, R.; PIERCE, F. J. **The vanishing resource**. In: LAL, R.; PIERCE, F. J. (Eds.). Soil management for sustainability. Ankeny: Soil Water Conservation Society, 1991. p.1-5.
- LEE, T. C; ZHONG, P. J; CHANG, P. T. The effects of preharvest shading and postharvest storage temperatures on the quality of 'Ponkan' (*Citrus reticulata* Blanco) mandarin fruits. **Scientia Horticulturae**, v.188, n.4, p.57-65, 2015a.
- LEE, J. A.; HALBERT, S. E.; DAWSON, W. O.; ROBERTSON, C. J.; KEESLING, J. E.; SINGER, B. H. Asymptomatic spread of Huanglongbing and implications for disease control. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.112, n.24, p.7605-7610, 2015b.
- LI, X.; RUAN, H.; ZHOU, C.; MENG, X.; CHEN, W. Controlling citrus huanglongbing: Green sustainable development route is the future. **Frontiers in Plant Science**, v.12, 760481, 2021.
- LI, Z.; ZHANG, Y.; ZHAO, Q.; CUI, Y.; HE, Y.; LI, J.; YANG, Q.; LIN, Z.; WANG, C.; LIANG, G.; JIAO, B. Determination, distribution and potential health risk assessment of insecticides and acaricides in citrus fruits of China. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.111, 104645, 2022.
- LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFFH, S.; LIMA, V.; LEÃO, T. P. Heterogeneidade da compactação de um latossolo vermelho-amarelo sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.3, p.409-414, 2004.
- LIMA, C. L. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Ciência Rural**, v.37, n.4, p.1166-1169, 2007.
- LIMA, S. S.; LEITE, L. F. C.; OLIVEIRA, F. C.; COSTA, D. B. Atributos químicos e estoques de carbono e nitrogênio em Argissolo Vermelho-Amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no norte do Piauí. **Revista Árvore**, v.35, n.1, p.51-60, 2011.
- LIMA, V. P.; LIMA, R. A. F.; JONER, F.; SIDDIQUE, I.; RAES, N.; STEEGE, H. T. Climate change threatens native potential agroforestry plant species in Brazil. **Scientific Reports**, v.12, 2267, 2022.

- LIN, K. H. Yellow shoot of citrus. Symptomatology. Investigations in the cause of huanglongbing. Natural transmission and spread. General conclusions. **Acta Phytopathologica Sinica**, v.2, p.1-42, 1956.
- LINDSAY, W. L.; NORWELL, W. A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. **Soil Science Society of America Journal**, v.42, n.3, p.421-428, 1978.
- LORENZ, K.; LAL, R. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.34, p.443-454, 2014.
- LORENZ, K.; LA, R. Carbon sequestration in agricultural ecosystems. In: LORENZ, K.; LA, R (Org.). **Agroforestry Systems**. Cham: Springer, 2018. p.235-255.
- MACHADO, M. A.; LOCALI-FABRIS, E. C.; COLETTA-FILHO, H. D. *Candidatus Liberibacter* spp., agentes do huanglongbing dos citros. **Citrus Research & Technology**, v.31, n.1, p.25-35, 2010.
- MARÇAL, M. F. M; SOUZA, Z. M.; TAVARES, R. L. M; FARHATE, C. V. V.; OLIVEIRA, S. R. M; GALINDO, F. S. Predictive models to estimate carbon stocks in Agroforestry Systems. **Forests**, v.12, 1240, 2021.
- MARÇAL, M. F.M.; SOUZA, Z. M.; TAVARES, R. L. M.; FARHATE, C. V. V.; MONTEIRO JÚNIOR, R. E.; LIMA, E. S.; LOVERA, L. H. Potential use of Quartzipsamment under agroforestry and silvopastoral system for large-scale production in Brazil. **Agronomy**, v.12, p.1-15, 2022.
- MARIANO, D. A.; SANTOS, C. A. C.; WARDLOW, B. D.; ANDERSON, M. C.; SCHILTMAYER, A. V.; TADESSE, T.; SVOBODA, M. D. Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human-induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v.213, p.129-143, 2018.
- MARIN, A. M. P.; MENEZES, R. S. C.; SILVA, E. D.; SAMPAIO, E. V. S. B. Efeito da *Gliricidia sepium* sobre nutrientes do solo, microclima e produtividade do milho em sistema agroflorestal no Agreste Paraibano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.3, p.555-564, 2006.
- MARQUES, D. M.; SILVA, A. B.; SILVA, L. M.; MOREIRA, E. A.; PINTO, G. S. Macrofauna edáfica em diferentes coberturas vegetais. **Bioscience Journal**, v.30, n.5, p.1588-1597, 2014.

- MARSDEN, C.; MARTIN-CHAVE, A.; CORTET, J.; HEDDE, M.; CAPOWIEZ, Y. How agroforestry systems influence soil fauna and their functions - a review. **Plant and Soil**, v.453, p.29-44, 2020.
- MARTI, B. V.; ESTORNELL, J.; CORTÉS, I. L.; MARTÍ-GAVILÁ, J. Calculation of biomass volume of citrus trees from an adapted dendrometry. **Biosystems Engineering**, v.112, p.285-292, 2012.
- MARTINI, X.; HOYTE, A.; MAFRA-NETO, A.; AKSENOV, A. A.; DAVIS, C. E.; STELINSKI, L.L. Progress toward an attract-and-kill device for Asian Citrus Psyllid (Hemiptera: Liviidae) using volatile signatures of citrus infected with Huanglongbing as the attractant. **Journal of Insect Science**, v.20, n.6, p.1-10, 2020.
- MARTINS, M. Q.; MARÇAL, T. S.; SOUZA, M. F.; COELHO, R. I. Influência da densidade no crescimento de mudas de laranjeira ‘Folha Murcha’. **Revista de Ciências Agrárias**, v.38, n.3, p.407-413, 2015.
- MATOS, P. S.; FONTE, S. J.; LIMA, S. S.; PEREIRA, M. G.; KELLY, C.; DAMIAN, J. M.; FONTES, M. A.; CHAER, G. M.; BRASIL, F. C.; ZONTA, E. Linkages among soil properties and litter quality in agroforestry systems of Southeastern Brazil. **Sustainability**, v.12, 9752, 2020.
- MELLONI, R.; COSTA, N. R.; MELLONI, E. G. P.; LEMES, M. C. S.; ALVARENGA, M. I. N.; NETO, J. N. Sistemas agroflorestais cafeeiro-araucária e seu efeito na microbiota do solo e seus processos. **Ciência Florestal**, v.28, n.2, p.784-795, 2018.
- MENEGUIM, L.; BUASSI, M.; VILAS-BOAS, L. A.; MARQUES-MARÇAL, V. V.; PACCOLA-MEIRELLES, L. D.; LEITE JUNIOR, R. P. Ocorrência de ‘Candidatus Liberibacter asiaticus’ agente causal do Huanglongbing no estado do Paraná. **Tropical Plant Pathology**, v.33, n.100, 2008.
- MICCOLIS, A.; PENEIREIRO, F. M.; MARQUES, H. R.; VIEIRA, D. L. M.; ARCO-VERDE, M. F.; HOFFMANN, M. R.; REHDER, T.; PEREIRA, A. V. B. **Restauração ecológica com sistemas agroflorestais: como conciliar conservação com produção. Opções para Cerrado e Caatinga**. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza – ISPN/Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal – ICRAF, 2016. 266 p.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa Nº 5, de 8 de setembro de 2009. **Dispõe sobre os procedimentos metodológicos para restauração e recuperação das Áreas**

**de Preservação Permanentes e da Reserva Legal instituídas pela Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965.**

MONROE, P. E. M.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; MARQUES, J. R. B. Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.221, p.99-108, 2016.

MONTAGNINI, F.; NAIR, P. K. R. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v.61-62, n.1-3, p.281-295, 2004.

MONTAGNINI, F.; IBRAHIM, I.; MURGUEITIO, E. Silvopastoral systems and climate change mitigation in Latin America. **Bois et Forêts des Tropiques**, v.67, n.2, p.3-16, 2013.

MORAIS, M. R.; ZANARDI, O. Z.; RUGNO, G. R.; YAMAMOTO, P. T. Impact of five insecticides used to control citrus pests on the parasitoid *Ageniaspis citricola* Longvinovskaya (Hymenoptera: Encyrtidae). **Ecotoxicology**, v.25, p.1011-1020, 2016.

MORGAN, K. T.; ROUSE, R. E.; EBEL, R. C. Foliar applications of essential nutrients on growth and yield of 'Valencia' sweet orange infected with huanglongbing. **HortScience**, v.51, n.12, p.1482-1493, 2016.

MÜLLER, J.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; SEQUINATTO, L.; MAZURANA, M.; STÜRMER S. L. K.; PIETRZACKA, R. Atributos físicos e químicos de um Argissolo Vermelho, em pomar orgânico de citros com manejo da vegetação nas entrelinhas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.33, n.4, p.1127-1134, 2011.

NAEEM, A.; AFZAL, M. B. S; FREED, S.; HAFEEZ, F.; ZAKA, S. M.; ALI, Q.; ANWAR, H. Z.; IFTIKHAR, A.; NAWAZ, M. First report of thiamethoxam resistance selection, cross resistance to various insecticides and realized heritability in Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* from Pakistan. **Crop Protection**, v.121, p.11-17, 2019.

NAIR, P. K. R. Tropical agroforestry systems and practices. In: FURTADO, J. I.; RUDDLE, K. (Eds.) **Tropical resource ecology and development**. John Willey Ed. Chichester-Inglaterra. 39 p, 1984.

NAIR, P. K. R.; NAIR, V. D.; KUMAR, B. M.; HAILE, S. G. Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. **Environmental Science & Policy**, v.12, p.1099-1111, 2009.

NAIR, P. K. R. Agroforestry systems and environmental quality: Introduction. **Journal Environmental Quality**, v.40, n.3, p.784-790, 2011.

- NAIR, P. K. R. Carbon sequestration studies in agroforestry systems: a reality-check. **Agroforestry Systems**, v.86, n.2, p.243-253, 2012.
- NEVES, M. F. TROMBIN, V. G.; MILAN, P.; LOPES, F. F.; CRESSONI, F.; KALAKI, R. **O retrato da citricultura Brasileira**. In: NEVES, M. F. (Coord.). 1. Ed. Ribeirão Preto: Markestrat, 2010. 138 p.
- NOTARO, K. A.; MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; SILVA, A. O.; MOURA, P. M. Agroforestry systems, nutrients in litter and microbial activity in soils cultivated with coffee at high altitude. **Scientia Agricola**, v.71, n.2, p.87-95, 2014.
- NUNES, F. C.; ALVES, L. J.; CARVALHO, C. C. N.; GROSS, E.; SOARES, T. M.; PRASAD, M. N. V. Climate Change and soil interactions. Chapter 9 - **Soil as a complex ecological system for meeting food and nutritional security**. Elsevier, p.229-269, 2020.
- NYAGA, J.; MUTHURI, C. W.; BARRIOS, E.; ÖBORN, I.; SINCLAIR, F. L. Enhancing maize productivity in agroforestry systems through managing competition: lessons from smallholders' farms, Rift valley, Kenya. **Agroforestry Systems**, v.93, n.2, p.1-16, 2017.
- OLIVEIRA G.C.; SEVERIANO, E.C.; MELLO, C.R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da Microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p.265-270, 2007.
- OLIVEIRA, C. C.; ALVARENGA, M. I. N.; MELLONI, R.; PINTO NETO, J. N.; PINHEIRO, L. B. A.; MELLONI, E. G. P.; MADEIRA, C. L. Densidade de café (*Coffea arabica* L.) por araucária (*Araucaria angustifolia* L.) e seus efeitos na macrofauna e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.9, n.6, p.1668-1676, 2016.
- PAGE-DUMROESE, D. S.; BUSSE, M. D.; JURGENSEN, M. F.; JOKELA, E. J. Soils and landscape restoration. Chapter 3 - **Sustaining forest soil quality and productivity**. Elsevier, p.63-93, 2021.
- PARDON, P.; REUBENS, B.; REHEUL, D.; MERTENS, J.; FRENNE, P.; COUSSEMENT, T.; JANSSENS, P.; VERHEYEN, K. Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.247, p.98-111, 2017.
- PENEIREIRO, F. M. **Sistemas agroflorestais dirigidos pela sucessão natural: um estudo de caso**. 1999. 138 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1999.

- PEZARICO, C. R.; VITORINO, A. C. T.; MERCANTE, F. M.; DANIEL, O. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista Ciências Agrárias**, v.56, n.1, p.40-47, 2013.
- PIGNATI, W. A.; LIMA, F. A. N. S.; LARA, S. S.; CORREA, M. L. M.; BARBOSA, J. R.; LEÃO, L. H. C.; PIGNATTI, M, G. Distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil: uma ferramenta para a vigilância em saúde. **Ciência & Saúde Coletiva**, v.22, n.10, p.3281-3293, 2017.
- PITINO, M.; STURGEON, K.; DORADO, C.; CANO, L. M.; MANTHEY, J. A; SHATTERS, R. G.; ROSSI, L. Quercus leaf extracts display curative effects against *Candidatus Liberibacter asiaticus* that restore leaf physiological parameters in HLB-affected citrus trees. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.148, n.1, p.70-79, 2020.
- QASIM, M.; XIAO, H.; HE, K.; OMAR, M.A.A.; HUSSAIN, D.; NOMAN, A.; RIZWAN, M.; KHAN, K.A.; AL-ZOUBI, O.M.; ALHARBI, S.A.; WANG, L.; LI, F. Host-pathogen interaction between Asian citrus psyllid and entomopathogenic fungus (*Cordyceps fumosorosea*) is regulated by modulations in gene expression, enzymatic activity and HLB-bacterial population of the host. **Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology**, v.248, 109112, 2021.
- RAIJ, B. Van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.
- RAVEH, E; COHEN, S.; RAZ, T; YAKIR, D.; GRAVA, A.; GOLDSCHMIDT, E.E. Increased growth of young citrus trees under reduced radiation load in a semi-arid climate. **Journal of Experimental Botany**, v.54, p.365-373, 2003.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v.27, n.1, p.29-48, 2003.
- REICHERT, J. M.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. F.; SUZUKI, L. E. A. S. Land use effects on subtropical, sandy soil under sandization/desertification processes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.233, p.370-380, 2016.
- REIS, B. P.; OLIVEIRA NETO, S. N.; SARCINELLI, T. S.; MARTINS, S. V. Farmer's perception about agroforestry systems for legal reserves in the region of São Mateus, Espírito Santo, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v.27, n.1, e20170313, 2020.

- REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v.110, n.1-2, p.131-146, 2002.
- REYNOLDS, P. E.; SIMPSON, J. A.; THEVATHASAN, N. V.; GORDON, A. M. Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada. **Ecological Engineering**, v.29, n.4, p.362-371, 2007.
- RIBEIRO, R. V.; MACHADO, E. C.; ESPINOZA-NÚÑEZ, E.; RAMOS, R. A.; MACHADO, D. F. S. P. Moderate warm temperature improves shoot growth, affects carbohydrate status and stimulates photosynthesis of sweet orange plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.24, n.1, p.37-46, 2012.
- RIBEIRO, A. P.; KNISS, C. T.; ALBUQUERQUE, C. R.; FIGUEIREDO, A. M. G. Avaliação da qualidade de solos adjacentes às Marginais Tietê e Pinheiros com base nos valores orientadores da CETESB. Em: III Simpósio Internacional de Gestão de Projetos (III SINGEP) e II Simpósio Internacional de Inovação e Sustentabilidade (II S2IS), **Anais...** v.1, p.1-15, 2014.
- RICKSON, R. J.; DEEKS, L. K.; GRAVES, A.; HARRIS, J. A. H.; KIBBLEWHITE, M. G.; SAKRABANI, R. Input constraints to food production: the impact of soil degradation. **Food Security**, v.7, p.351-364, 2015.
- ROSA, S. F.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; FLEIG, F. D.; RODRIGUES, M. F.; GELAIN, N. S. Propriedades físicas e químicas de um argissolo sob cultivo de *Eucalyptus dunnii* Maiden no pampa gaúcho. **Ciência Florestal**, v.28, n.2, p.580-590, 2018.
- ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; SCHIAVO, J. A.; PICCOLO, M. C.; PINTO, L. A. S. R.; ZIVIANI, M. M.; PEREIRA, M. G. Organic matter and isotopic composition of soils under different management systems in western Paraná State, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v.81, n.136, p.1-10, 2022.
- SACHET, E.; MERTZ, O.; LE COQ, J. F.; CRUZ-GARCIA, G. S. C. Agroecological transitions: a systematic review of research approaches and prospects for participatory action methods. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v.5, p.1-13, 2021.
- SAE - SECRETARIA ESPECIAL DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS. **Produção Nacional de Fertilizantes- Estudo Estratégico, 2020**. Disponível em: [https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae\\_publicacao\\_fertilizantes\\_v10.pdf](https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf) Acesso em: 20.ago.2022.

- SALES, L. E. O.; CARNEIRO, M. A. C.; SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, M. M. Qualidade física de Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, n.3, p.667-674, 2010.
- SANDOVAL-MOJICA, A. F.; HUNTER, W. B.; AISHWARYA, V.; BONILLA, S.; PELZ-STELINSKI, K. S. Antibacterial FANA oligonucleotides as a novel approach for managing the Huanglongbing pathosystem. **Scientific Reports**, v.11, 2760, 2021.
- SANTIAGO, W. R.; VASCONCELOS, S. S.; KATO, O. R.; BISPO, C. J. C.; RANGEL VASCONCELOS, L. G. T.; CASTELLANI, D. C. Nitrogênio mineral e microbiano do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia oriental. **Acta Amazonica**, v.43, n.4, p.395-406, 2013.
- SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M.; SILVEIRA, P. M.; BECQUER, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1339-1348, 2011.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 Ed. Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2018.
- SARKAR, S.; DAS, D. Tree biomass and carbon stock assessment in different agroforestry system trees. **International Journal of Chemical Studies**, v.8, n.4, p.3858-386, 2020.
- SARTO, M. V. M.; BORGES, W. L. B.; BASSEGIO, D.; NUNES, M. R.; RICE, C. W.; ROSOLEM, C. A. Deep soil water content and forage production in a tropical agroforestry system. **Agriculture**, v.12, n.3, p.1-13, 2022.
- SCHMIDT, M.; CORRE, M. D.; KIM, B.; MORLEY, J.; GÖBEL, L.; SHARMA, A. S. I.; SETRIUC, S.; VELDKAMP, E. Nutrient saturation of crop monocultures and agroforestry indicated by nutrient response efficiency. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.119, p.69-82, 2021.
- SCHREEFEL, L.; SCHULTE, R. P. O.; BOER, I. J. M.; SCHRIJVER, A. P.; VAN ZANTEN, H. H. E. Regenerative agriculture – the soil is the base. **Global Food Security**, v.26, 100404, 2020.
- SCHROTH, G. A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options. **Agroforestry Systems**, v.43, n.1, p.5-34, 1999.

- SHAHEB, M. R.; VENKATESH, R.; SCOTT A. SHEARER, S. A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. **Journal of Biosystems Engineering**, v.46, p.417-439, 2021.
- SHI, L.; FENG, W.; XU, J.; KUZUYAKOV, Y. Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. **Land Degradation and Development**, v.29, n.11, p.3886-3897, 2018.
- SILVA, A. H.; FAVARETTO, N.; CAVALIERI, K. M. V.; DIECKOW, J.; VEZZANI, F. M.; PARRON, L. M.; CHEROBIM, V. F.; MARIOTI, J.; FERRARI NETO, H. **Atributos físicos do solo e escoamento superficial como indicadores de serviços ambientais**. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (Eds.). *Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica*, Brasília: Embrapa, 2015. 370 p.
- SILVA JUNIOR, C. H. L.; PESSÔA, A. C. M.; CARVALHO, N. S.; REIS, J. B. C.; ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C. The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade. **Nature Ecology and Evolution**, v.5, p.144-145, 2021.
- SILVEIRA, A. O. **Avaliação de metodologias para o monitoramento da qualidade do solo**. 2011. 101 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- SIMON, C. P.; GOMES, T. F.; PESSOA, T. N.; SOLTANGHEISI, A.; BIELUCZYK, W.; CAMARGO, O. B.; MARTINELLI, L. A.; CHERUBIN, M. R. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.46, e0210103, 2022.
- SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; K PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, v.32, n.14, p.2099-2103, 2000.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12 Ed. Washington: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 2014. 372 p.
- SOLLEN-NORRLIN, M.; GHALEY, B. B.; RINTOUL, N. L. J. Agroforestry benefits and challenges for adoption in Europe and Beyond. **Sustainability**, v.12, 7001, 2020.
- SPERA, S. T.; REATTO, A.; MARTINS, E. S.; CORREIA, J. R.; CUNHA, T. J. F. **Solos areno-quartzosos do Cerrado: características, problemas e limitações ao uso**. Planaltina: Embrapa - CPAC, 1999. 48 p.

SPINELLI, R.; NATI, C.; MAGAGNOTTI, N. Harvesting and transport of root biomass from fast-growing poplar plantations. **Silva Fennica**, v. 39, n.4, p.539-548, 2005.

SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N.; CAVALLO, E.; CAPELLO, G.; BIDDOCCU, M. Reducing soil compaction after thinning work in agroforestry plantations. **Agroforestry Systems**, v.93, p.1765-1779, 2019.

STANHILL, G.; COHEN, S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.107, p.255-278, 2001.

STEENBOCK, W.; VEZZANI, F. M. **Agrofloresta: aprendendo a produzir com a natureza**. Curitiba: FABIANE MACHADO VEZZANI, 2013. 148 p.

STEPNIEWSKI, W.; HORN, R.; MARTYNIUK, S. Managing soil biophysical properties for environmental protection. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v.88, n.2, p.175-181, 2002.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.2, p.395-401, 2001.

SUH, J. H.; GUHA, A.; WANG, Z.; LI, S. Y.; KILLINY, N.; VICENT, C.; WANG, Y. Metabolomics analysis elucidates how shade conditions ameliorate the deleterious effects of Greening (Huanglongbing) disease in citrus. **The Plant Journal**, v.108, n.6, p.1798-1814, 2021.

SULZBACH, M.; OLIVEIRA, R. P.; GIRARDI, E. A.; SCHWARZ, S. F.; BERTOLINI, E.; SCHENEIDER, L. A.; GONZATTO, M. P. (Ed.). **Huanglongbing (HLB) dos citros e estratégias de manejo visando prevenção e controle**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2017. 36 p. (Embrapa Clima Temperado - Documentos, 450).

TATE, K. R.; ROSS, D. J.; O'BRIEN, B. J.; KELLIHER, F. M. Carbon storage and turnover, and respiratory activity, in the litter and soil of an old-growth southern beech (*Nothofagus*) forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v.25, n.11, p.1601-1612, 1993.

TAVARES, P. D.; SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; FREO, V. A.; BIELUCZYK, W.; SILVA, E. M. R. Qualidade do solo sob sistemas agroflorestais e agricultura tradicional no bioma floresta atlântica. **Revista Caatinga**, v.31, n.4, p.954-962, 2018.

TEIXEIRA, D. C.; AYRES, A. J.; KITAJIMA, E. W.; TANAKA, F. A. O.; JAGOUEIX-EVEILLARD, S.; SAILLARD, S.; BOVÉ, J. M. First report of a huanglongbing-like disease

of citrus in São Paulo State, Brazil, and association of a new liberibacter species, *Candidatus Liberibacter americanus*, with the disease. **Plant Disease**, v.89, n.1, p.107, 2005.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3ª Edição Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

TEÓFILO SOBRINHO, J. Propagação dos Citros. In: RODRIGUES, O.; VIÉGAS, F.; POMPEU JÚNIOR, J. (Eds.). **Citricultura brasileira**. Campinas: Fundação Cargill, v.1, p.281-301, 1991.

TIAN, F.; WANG, Z.; LI, C.; LIU, J.; ZENG, X. UDP-glycosyltransferases are involved in imidacloprid resistance in the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). **Pesticide Biochemistry Physiology**, v.154, p.23-31, 2019.

TIRADO-CORBALÁ, R.; RIVERA-OCASIO, D.; SEGARRA-CARMONA, A.; ROMÁN-PAOLI, E.; GONZÁLEZ, A. Performance of two citrus species grafted to different rootstocks in the presence of Huanglongbing Disease in Puerto Rico. **Horticulturae**, v.4, p.1-9, 2018.

TITTONELL, P. Assessing resilience and adaptability in agroecological transitions. **Agricultural Systems**, v.184, 102862, 2020.

TORRALBA, M.; FAGERHOLM, N.; BURGESS, P. J.; MORENO, G.; PLIENINGER, T. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.230, p.150-161, 2016.

TU, A.; XIE, S.; ZHENG, H.; LI, H.; LI, Y.; MO, M. Long-term effects of living grass mulching on soil and water conservation and fruit yield of citrus orchard in south China. **Agricultural Water Management**, v.252, 106897, 2021.

USDA (United States Department of Agriculture). **1996 through 2006, Agricultural Chemical Usage - Fruit Summary**. Published biennially: National Agricultural Statistics Service, Chemical Usage Program. 2004.

USDA (United States Department of Agriculture). **Foreign Agricultural Service**. Reports and data: Citrus. 2021.

VACCARO, C.; SIX, J.; SCHÖB, C. Moderate shading did not affect barley yield in temperate silvoarable agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v.96, p.799-810, 2022.

VANLAUWE, B.; NWOKE, O. C.; SANGINGA, N.; MERCKX, R. Impact of the residue quality on the carbon and nitrogen mineralization of leaf and root residues of three agroforestry species. **Plant and Soil**, v.183, p.221-231, 1996.

- VAZ, C. M. P.; MANIERI, J. M.; DE MARIA, I. C.; TULLER, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v.166, n.1, p.92-101, 2011.
- VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 p. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4, p.743-755, 2009.
- VIÉGAS, L. B.; SILVA, J. M. S.; PALA, M. C.; PIÑA-RODRIGUES, F. C. M. Restoring ecological functions using Agroforestry Systems in riparian forests. **Floresta e Ambiente**, v.26, n.4, e20170830, 2019.
- VILPOUX, O. F.; GONZAGA, J. F.; PEREIRA, M. W. G. Agrarian reform in the Brazilian Midwest: Difficulties of modernization via conventional or organic production systems. **Land Use Policy**, v.103, 105327, 2021.
- VINCENT, C.; GUHA, A.; KILLINY, N.; DIEPENBROCK, L. Understory environment promotes photosynthetic efficiency and mitigates severity and function of an introduced, vectored pathosystem: a study of a feral citrus population in central Florida. **Trees**, v.35, p.1711-1725, 2021.
- YASIN, G.; RAHMAN, S. U.; NAWAZ, M. F.; QADIR, I.; ZUBAIR, M.; GUL, S. Estimating carbon stocks and biomass accumulation in three different agroforestry patterns in the semi-arid region of Pakistan. **Carbon Management**, v.12, n.6, p.593-602, 2021.
- YLAGAN, S.; AMORIM, H. C. S.; ASHWORTH, A. J.; SAUER, T.; WIENHOLD, B. J.; OWENS, P. R.; ZINN, Y. L.; BRYE, K. R. Soil quality assessment of an agroforestry system following long-term management in the Ozark Highlands. **Agrosystems, Geosciences and Environment**, v.4, n.3, e20194, 2021.
- YOST, J. L.; HARTEMINK, A. E. Soil organic carbon in sandy soils: A review. **Advances in Agronomy**, v.158, p.217-310, 2019.
- ZHOU, Y.; TANG, Y.; HU, C.; ZHAN, T.; ZHANG, S.; CAI, M.; ZHAO, X. Soil applied Ca, Mg and B altered phyllosphere and rhizosphere bacterial microbiome and reduced Huanglongbing incidence in Gannan Navel Orange. **Science of the Total Environment**, v.721, 148046, 2021.

ZULIAN, A.; DÖRR, A. C.; ALMEIDA, S. C. Citricultura e agronegócio cooperativo no Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.11, n.11, p.2290-2306, 2013.