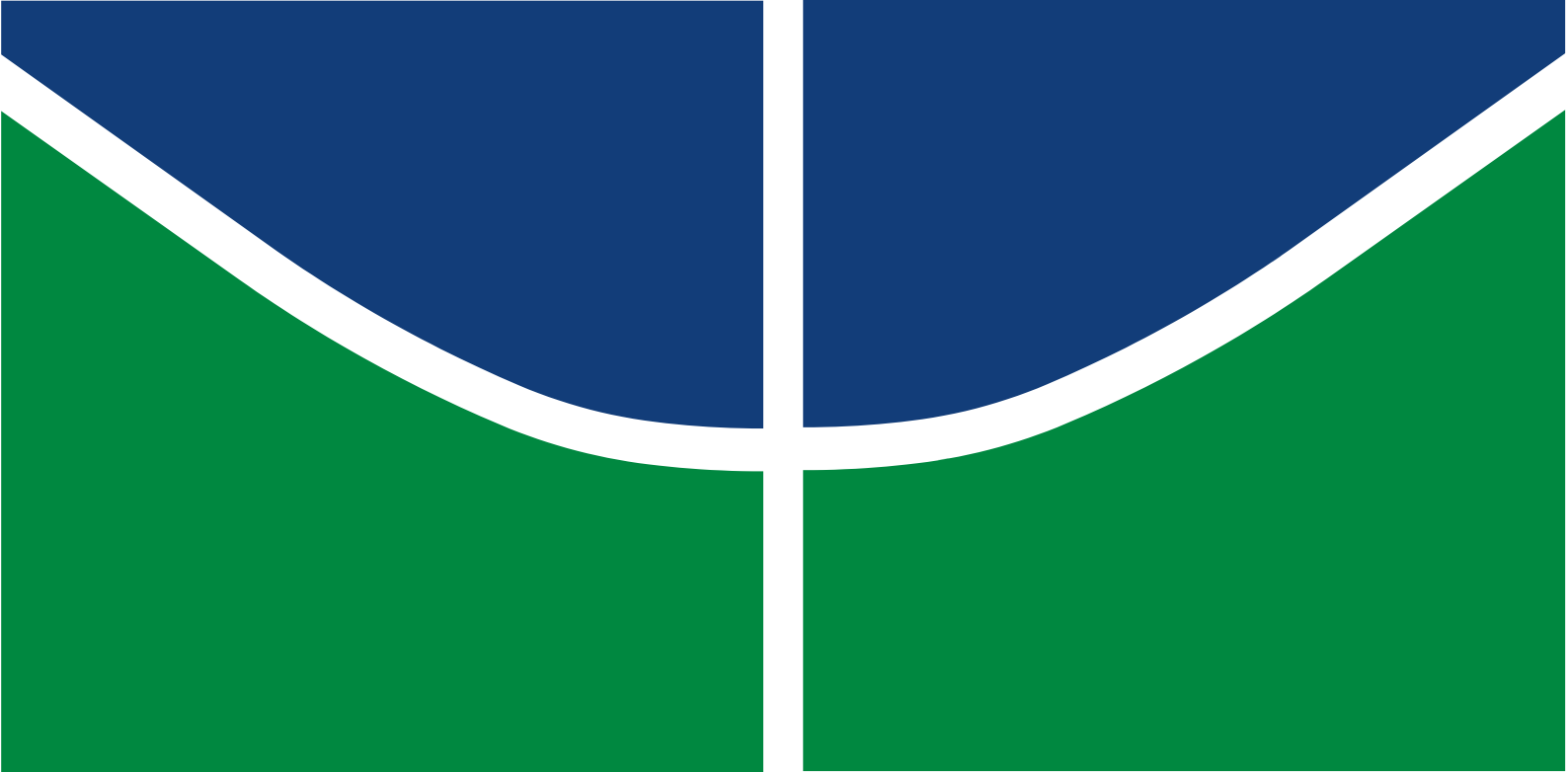




TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**MICRORGANISMOS POTENCIAIS NO CRESCIMENTO DE MUDAS
FLORESTAIS**

Natália Cássia de Faria Ferreira

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Natália Cássia de Faria Ferreira

**MICRORGANISMOS POTENCIAIS NO CRESCIMENTO DE
MUDAS FLORESTAIS**

**CAPÍTULO 1: USE OF *Trichoderma* IN THE PRODUCTION OF
FOREST SEEDLINGS**

**CAPÍTULO 2: *Trichoderma* spp. NO CRESCIMENTO DE MUDAS
DE MOGNO-AFRICANO (*Khaya senegalensis* (Desr) A. Jus.)**

**CAPÍTULO 3: COINOCULAÇÃO (*Trichoderma harzianum* +
Bradyrhizobium elkanni + *B. diazoefficiens*) NO CRESCIMENTO
DE MUDAS DE GUAPURUVU (*Schizolobium parahyba* var.
parahyba (Vell.) Blake)**

Orientador: Prof. Dr. Alcides Gatto

Coorientador: Daniel Diego Costa Carvalho

Brasília, 27 de janeiro de 2025

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**MICROORGANISMOS POTENCIAIS NO CRESCIMENTO DE
MUDAS FLORESTAIS**

**CAPÍTULO 1: USE OF *Trichoderma* IN THE PRODUCTION OF
FOREST SEEDLINGS**

**CAPÍTULO 2: *Trichoderma* spp. NO CRESCIMENTO DE MUDAS
DE MOGNO-AFRICANO (*Khaya senegalensis* (Desr) A. Jus.)**

**CAPÍTULO 3: COINOCULAÇÃO (*Trichoderma harzianum* +
Bradyrhizobium elkanni + *B. diazoefficiens*) NO CRESCIMENTO
DE MUDAS DE GUAPURUVU (*Schizolobium parahyba* var.
parahyba (Vell.) Blake)**

NATÁLIA CÁSSIA DE FARIA FERREIRA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA FLORESTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UNB) COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTORA.

APROVADA POR:

Prof. Dr. ALCIDES GATTO, (Departamento de Engenharia Florestal EFL/UnB)
(ORIENTADOR)

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Prof. Dr. DANIEL DIEGO COSTA CARVALHO, (Universidade Estadual de Goiás/UEG) (COORIENTADOR)

Prof.^a. Dr.^a. MARIA LUCRECIA GEROSA RAMOS, (Departamento de Agronomia e Medicina Veterinária FAV/UnB) (EXAMINADORA INTERNA)

Prof.^a. Dr.^a. FABIANA PIONTEKOWSKI RIBEIRO, (Pesquisadora Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais UnB) (EXAMINADORA EXTERNA)

Prof. Dr. FABRICIO RODRIGUES, (Universidade Estadual de Goiás/UEG) (EXAMINADOR EXTERNO)

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Fm Faria Ferreira, Natália Cássia de
MICROORGANISMOS POTENCIAIS NO CRESCIMENTO DE MUDAS
FLORESTAIS / Natália Cássia de Faria Ferreira; orientador
Alcides Gatto; co-orientador Daniel Diego Costa Carvalho. --
Brasília, 2025.
134 p.

Tese(Doutorado em Ciências Florestais) -- Universidade de
Brasília, 2025.

1. Produção de mudas. 2. Microrganismos simbiotes. 3.
Sinergismo. 4. Promoção de crescimento . 5. Bioestímulo. I.
Gatto, Alcides, orient. II. Diego Costa Carvalho, Daniel,
co-orient. III. Título.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Natália Cássia de Faria Ferreira

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO:

GRAU/ANO: Doutora/2025

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir a tese de doutorado e em casos de empréstimos e/ou venda somente para propósitos acadêmicos e científicos.

A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

Natália Cássia de Faria Ferreira
natcassiadefaria@gmail.com
Brasília-DF/Brasil

Dedico à minha família,
Em especial ao meu filho, Murilo de Faria Ferreira Carvalho.
Obrigada por me motivar (mesmo sem compreender).

AGRADECIMENTOS

Há anos sonho com esse momento tão especial. A entrega da Tese de Doutorado é um sentimento único, guiado pela capacitação oriunda do amor de Deus, pela determinação e ao incessante amor pelo universo acadêmico (pesquisas, experiências com a docência, a arte da troca de conhecimentos). Acredito que, a vida é uma constante construção, onde Deus nos abençoa com pessoas especiais, que contribuem com a moldagem de nossa trajetória, e assim têm sido.

O amor e a fé em Deus foram o meu combustível, desde sempre. Me sinto abençoada por Deus e acolhida pela Mãe Rainha, constantemente guiada a cada escolha realizada, a cada luta enfrentada e a cada superação obtida. A maior bênção há quase dois anos: a maternidade. O meu filho, Murilo de Faria Ferreira Carvalho, concebido durante a reta final de doutorado, se tornou a minha maior motivação, obrigada por tanto – até mesmo sem compreender – me abastece com amor e força para persistir e crescer, em todos os aspectos.

Ao meu núcleo familiar, local onde há amor, acolhimento e motivação, pois eu nada seria sem os “meus”. Agradeço por todo o amor, companheirismo, confiança e motivação destinados a mim, além de todo o suporte prestado durante os momentos mais desafiadores. Em especial à minha mãe, Alzira Faria, pelo amor e orações, e ao meu esposo Igor Carvalho, responsável por apoiar os meus sonhos, com tanta dedicação.

Aos meus “ajudantes”: Igor Carvalho, Robson Júnior e Sthefany Queiroz, os quais foram fundamentais para a implantação e a realização das avaliações do projeto de pesquisa, ocorrentes durante a minha gestação. Que Deus retribua em forma de bênçãos, contem comigo.

À Universidade de Brasília (UnB) pela possibilidade em realizar a Pós-Graduação em Ciências Florestais, em um ambiente altamente qualificado (corpo docente), além de recursos financeiros essenciais à execução da pesquisa. Assim como

AGRADECIMENTOS

a Universidade Estadual de Goiás (UEG), em especial ao coorientador prof. Dr. Daniel Diego Costa Carvalho, pela parceria prestada à execução do projeto de pesquisa.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPG-CFL-UnB), por todo o aprendizado disponibilizado e pela contribuição quanto ao meu enriquecimento profissional. Foi um prazer ter feito parte dessa unidade.

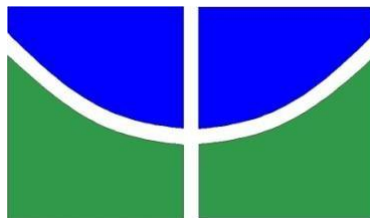
Ao profissional exemplar e humano, que tive a honra em ter sido orientada e tenho admiração e respeito, professor Dr. Alcides Gatto. É referência na área de solos no setor florestal, capaz de transpassar aos alunos conhecimento de qualidade. Obrigada pelos ensinamentos e dicas valiosas compartilhados, que Jesus o abençoe.

À prof.^a Dr.^a. Maria Lucrecia Gerosa Ramos pela imensa paciência e confiança, tenha certeza de que as suas palavras e ações me motivaram a sempre buscar por “mais”. É referência na atuação de pesquisas com microrganismos no setor de ciências agrárias, a sua trajetória profissional é inspiradora.

Aos meus amigos, que de forma direta ou indireta compartilharam momentos inesquecíveis durante o período de Pós-Graduação, desde os desabafos, até as ações de incentivo e reforço, afinal, como dizem: o doutorado é como uma montanha russa, cheia de altos e baixos. Mas ao final, tudo dá certo, assim espero e confio (rsrs).

Assim como dito, fui e continuo sendo abençoada por Deus através de pessoas colocadas ao meu percurso, agradeço por tudo e por tanto. A minha história acadêmica não acaba aqui, apenas se “encerra” um dos capítulos, afinal, a busca continua!

Com carinho.



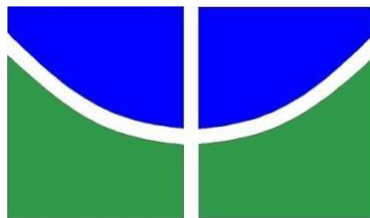
SUMÁRIO GERAL

CAPÍTULO 1

Artigo publicado na revista “Microorganisms”

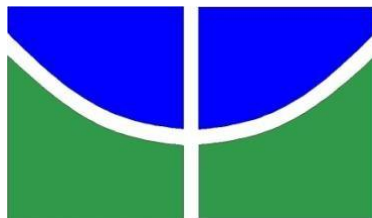
CAPÍTULO 2

1 INTRODUÇÃO	19
2 OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo geral.....	22
2.2 Objetivos específicos	22
3 REFERENCIAL TEÓRICO	23
3.1 Microrganismos potenciais: Habilidades do fungo <i>Trichoderma</i>	23
3.2 Solos tropicais (Latosolos): Características, funções e produção de mudas	25
3.3 Tripé da produção: Solo-planta-microrganismos.....	28
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
5 RESULTADOS	32
5.1 Desenvolvimento de mudas de <i>Khaya senegalensis</i>	32
5.2 Caracterização química do solo: Efeitos de <i>Trichoderma</i> spp. em <i>Khaya senegalensis</i>	38
6 DISCUSSÃO	40
6.1 Desenvolvimento de mudas de <i>Khaya senegalensis</i>	40
6.2 Caracterização química do solo: Efeitos de <i>Trichoderma</i> spp. em <i>Khaya senegalensis</i>	45
7 CONCLUSÃO	47
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS	48
9 REFERÊNCIAS.....	49



CAPÍTULO 3

1 INTRODUÇÃO	66
2 OBJETIVOS	69
2.1 Objetivo geral	69
2.2 Objetivos específicos	69
3 REFERENCIAL TEÓRICO	70
3.1 Guapuruvu: Características morfofisiológicas e potenciais da leguminosa	70
3.2 Biofertilizantes: Sinergismo entre microrganismo-planta	72
3.3 Coinoculação de microrganismos em espécies florestais: Efeitos e benefícios ...	74
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	78
4.1 Descrição do local experimental.....	78
4.2 Características do solo: Correção e fertilização.....	78
4.3 Sementes de <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>parahyba</i> : Quebra da dormência.....	79
4.4 Tratamento do solo com microrganismos bioestimulantes.....	79
4.5 Condução e análises experimentais	79
5 RESULTADOS	81
5.1 Desenvolvimento de mudas de guapuruvu (<i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>parahyba</i>)	81
5.2 Caracterização química do solo: Efeitos de <i>Trichoderma</i> spp. em <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>parahyba</i>	86
6 DISCUSSÃO	88
6.1 Desenvolvimento de mudas de guapuruvu (<i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>parahyba</i>)	88
6.2 Caracterização química do solo: Efeitos de <i>Trichoderma</i> spp. em <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>parahyba</i>	96
7 CONCLUSÃO	100
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS.....	101
9 REFERÊNCIAS.....	102



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Natália Cássia de Faria Ferreira

CAPÍTULO 1

USE OF *Trichoderma* IN THE PRODUCTION OF FOREST SEEDLINGS

Orientador: Prof. Dr. Alcides Gatto

Brasília, 27 de janeiro de 2025



Review

Use of *Trichoderma* in the Production of Forest Seedlings

Natália Cássia de Faria Ferreira ¹, Maria Lucrecia Gerosa Ramos ² and Alcides Gatto ^{1,*}



Citation: Ferreira, N.C.d.F.; Ramos, M.L.G.; Gatto, A. Use of *Trichoderma* in the Production of Forest Seedlings. *Microorganisms* **2024**, *12*, 237. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12020237>

Academic Editor: James F. White

Received: 28 July 2023

Revised: 17 August 2023

Accepted: 19 August 2023

Published: 23 January 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

¹ Department of Forestry Engineering, Faculty of Technology, University of Brasília, Brasília 70910-900, DF, Brazil; natcassiadefaria@gmail.com

² Faculty of Agronomy and Veterinary Medicine, University of Brasília, Brasília 70910-900, DF, Brazil; lucreciaunb@gmail.com

• Correspondence: alcidesgatto@unb.br

Abstract: Forest production has great relevance in the Brazilian economy, characterized by several production sectors, including the production of seedlings. With the focus on maximizing the capacity of survival, development, and adaptation of seedlings, *Trichoderma* is highlighted as a potentially useful genus of microorganisms for promoting growth and higher product quality. In this sense, this review aims to describe the main mechanisms of fungi action in forest seedlings' production. The different species of the genus *Trichoderma* have specific mechanisms of action, and the current scenario points to more advances in the number of species. The interaction process mediated by different mechanisms of action begins in the communication with plants, from the colonization process. After the interaction, chemical dialogues allow the plant to develop better because, from colonization, the forest seedlings can maximize height and increase shoot and root development. Fungi promote solubilization and availability of nutrients to seedlings, which show numerous benefits to the development. The use of beneficial microorganisms, such as fungi of the genus *Trichoderma*, has become a sustainable strategy to enhance seedling development, reducing the use of agrochemicals and industrial fertilizers.

Keywords: plant–microorganism interaction; synergism; growth promotion

1. Introduction

Forest production has great relevance in the Brazilian GDP, characterized by several production sectors, including seedlings. Despite the global scenario of the COVID-19 pandemic (SARS-CoV-2), the forest production chain showed resilience in the Brazilian market, with a growth of 7.5% in 2021, higher than the evolution of the national GDP [1]. This sector has great economic importance, intended for commercial plantations and recovery plans of degraded areas, which denotes the need to expand the capacity of seedling production and obtain higher production rates [2].

Despite the relevance of the forestry sector, in Brazil, there is still a great dependence on the import of inputs, with emphasis on synthetic fertilizers, which requires measures correlated with the reduction in the use of fertilizers and adequate practices to obtain success in the production of seedlings [3]. The production of woody plants promotes environmental and economic benefits by reducing the use of chemicals, including having less soil and water contamination, having sustainable production, spending less time on the formation of seedlings, and having higher-quality parameters [4].

To obtain high-quality seedlings, it is necessary to achieve high growth parameters arising from morphological and physiological attributes that reflect the development capacity and survival in the field. The morphological attributes are used to evaluate the ability of plant development, measured by height, the diameter of the neck, and root development. In contrast, the physiological attributes are obtained through the capacity of absorption of water and nutrients by the plant to provide important information on the performance of the species and efficiency in the production of seedlings, because

vigorous seedlings with high field performance are defined in the initial phase of seedling establishment and development [5,6].

However, there are gaps in adopting technologies that increase biomass production with lower costs and production time. There are technologies aimed at improving the germination potential of seeds. To maximize the survival, development, and adaptation capacity of seedlings, the inoculation of microorganisms can improve growth and higher production quality [7,8].

When inoculated in seedlings and after the colonization of the root system by *Trichoderma*, changes occur in plant metabolism and increase root development, growth, and nutrition of plants [9]. The main mechanism of interaction between *Trichoderma* and seedlings occurs via chemical signaling, resulting from the production of compounds responsible for modifications in the transcriptome, proteome, and plant metabolome [10].

From there, the beneficial action of fungi begins via the modulation of molecular centers and prolonged systemic responses that stimulate plant development [11,12]. As there are broad benefits promoted by fungi of the genus *Trichoderma* in plant development, the objective of this review was to discuss the main mechanisms of action of fungi in the production of forest seedlings.

2. Fungi of the Genus *Trichoderma*: Beneficial Microorganisms

The genus *Trichoderma* is the imperfect phase of *Hypocrea*, belonging to the Kingdom Fungi, Phylum Ascomycota, Class Sordariomycetes, Order Hypocreales, and Family Hypocreaceae [13]. It comprises many species of free-living filamentous fungi in multiple ecosystems, from tropical to temperate regions, characterized by accelerated growth. They are considered highly active species in the soil, associated with the rhizosphere and the decomposition process of plant residues and wood, and are rarely associated with plant diseases [14].

The fungi *Trichoderma* spp. have bright green conidia and a repeatedly branched conidiophore, are opportunistic and avirulent plant symbionts, and have asexual reproduction by the production of conidia and chlamydospores and in wild habitats by ascospores [9]. In recent years, there has been an exponential increase in the number of species identified in the genus, and the current scenario points to further advances in the number of species [15].

3. Interaction Process: *Trichoderma* spp. and Forest Species

During the production process, the seedlings are generally subjected to several abiotic factors (climate, temperature, water availability) and/or biotic stress (phytopathogenic agents). These stresses may lead to considerable restrictions to obtain vigorous seedlings with high-quality indexes. The inoculation of *Trichoderma* fungi enhances acclimatization, resistance/tolerance through plant response mechanisms under adverse conditions and, above all, induces greater growth of seedlings [16–18].

The colonization of roots results in physical or biochemical responses, initiating chemical transmission, in which plants produce secondary metabolites (SM), constituting limiting factors for the invasion of the fungus in the cortical cell layers in the roots [19]. According to the barriers imposed by plants, *Trichoderma* fungi can produce strategies to “dribble” plant responses; this occurs via hormone production to establish a prolonged mutualistic association

without the occurrence of obstacles that can make the root establishment and the symbiotic process unfeasible [10].

The interaction process between *Trichoderma* and plants is mediated by different mechanisms of action that begin in the communication with plants from the root colonization process. Figure 1 illustrates the stages of the interaction process between *Trichoderma* spp. and the host plant, starting via the release of root exudates, recognized by the fungus and responsible for chemotaxis (release of secondary metabolites). Subsequently, the fungus adheres to the root surface via protein action (hydrophobins) and produces enzymes responsible for cell degradation (cellulolytic, proteolytic, pectinolytic, and xylanolytic) and colonization of the root epidermis and cortex.

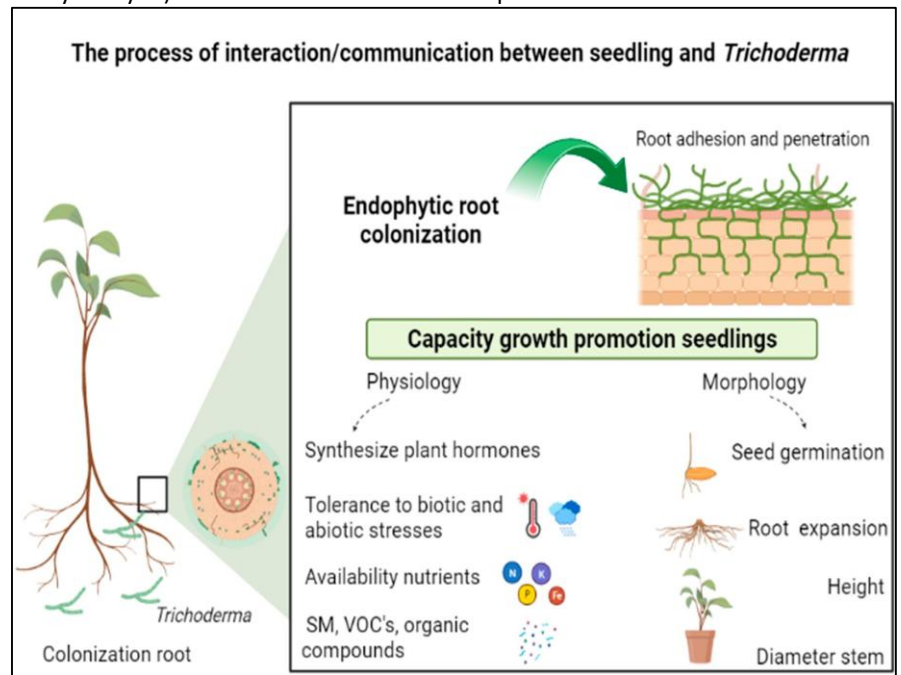


Figure 1. Interaction processes between *Trichoderma* spp. and forest seedlings. Created in Biorender.

4. Potential Mechanisms of Interaction

Trichoderma fungi cause physiological changes and plant metabolism when colonizing the root system. From a practical point of view, the interaction is promising since it allows high-quality indexes of seedlings to be achieved, according to the release of compounds, which the root system will assimilate, solubilizing and absorbing nutrients by plants [9].

The ability to synthesize plant hormones is commonly observed in *Trichoderma* species [20,21]. Auxins, abscisic acid, cytokinin, ethylene, and gibberellins stimulate plant growth, especially in adverse conditions [22]. The biosynthesis of indole-3-acetic acid (IAA) performed by the fungus increases root development and production of secondary roots and root hairs [23].

The expansion of the root system occurs through endophytic colonization and the production of phytohormones in the induction of water and nutrient efficiency by plants, in addition to greater tolerance to biotic and abiotic stresses [24]. In the dynamic plant– microorganism communication process, the interaction with roots and other parts of the plant can be influenced by different factors, such as soil type, the potential of strains, and plant species [25].

4.1. Solubilization and Availability of Mineral Nutrients

Despite the high nutritional requirement of forest seedlings, Brazilian soils generally have low natural fertility and a high degree of weathering, which limit obtaining greater production potential since the low availability of nutrients in the soil reduces the efficiency of absorption and use of macro and micronutrients by plants [26]. Considering that the soil composition is a fundamental part of the forest production system, it is important to adopt management practices to maintain its physical–chemical–biological quality and obtain vigorous, productive, and profitable woody plants [27].

In general, the mineral nutrients available to plants cannot meet the appropriate demands in the production of vigorous seedlings; this factor is associated with the existence of and functions performed by microorganisms in the soil [28]. In this sense, a strategy to reduce the nutritional restriction to the production of seedlings becomes necessary to potentiate the production. Therefore, the adequate absorption of nutrients is important during the initial phase of seedling formation, with emphasis on phosphorus (P) because the insufficient nutrition restricts the production and quality of plants [29].

The macronutrient phosphorus (P) in soils occurs in two forms: organic (plant decomposition) and inorganic (salts such as calcium (Ca), iron (Fe), and aluminum (Al)). However, most of it is in the inorganic and insoluble form, making its availability to plants unfeasible [30]. Phosphate rock is the world's main P source; however, seedlings' production depends on the continuous supply of phosphate fertilizers [31]. In this scenario, aiming at less dependence, there is a growing need to seek and adopt sustainable strategies capable of improving P availability [32].

Fungi release substances such as volatile organic compounds (VOCs) and SM to form complexes with Fe (III) or reduce such element [33]. Fe is solubilized by siderophores and changes root morphology via induction of root hairs, which enables the absorption of this micronutrient, and this process is involved in several metabolic processes [34,35]. These mechanisms are the most common among *Trichoderma* fungi; however, the responses can be variable according to the capacity of each strain [36].

The nutritional flow system is mediated by complex interactions influenced by chemical reactions between the root system and *Trichoderma* fungi. The strains of the genus *Trichoderma* have different mechanisms of action on soil nutrients; however, the ability to solubilize and mineralize P is emphasized, transforming it into soluble forms for plant absorption [37,38]. Figure 2 illustrates the interaction process that is coordinated by multiple actions of microorganisms in the solubilization of P from biochemical mineralization (enzymatic release) and secretion of chemical complexes responsible for mineral solubilization (siderophores, protons, hydroxyl ions, organic acids), increasing P absorption by seedlings [39–42].

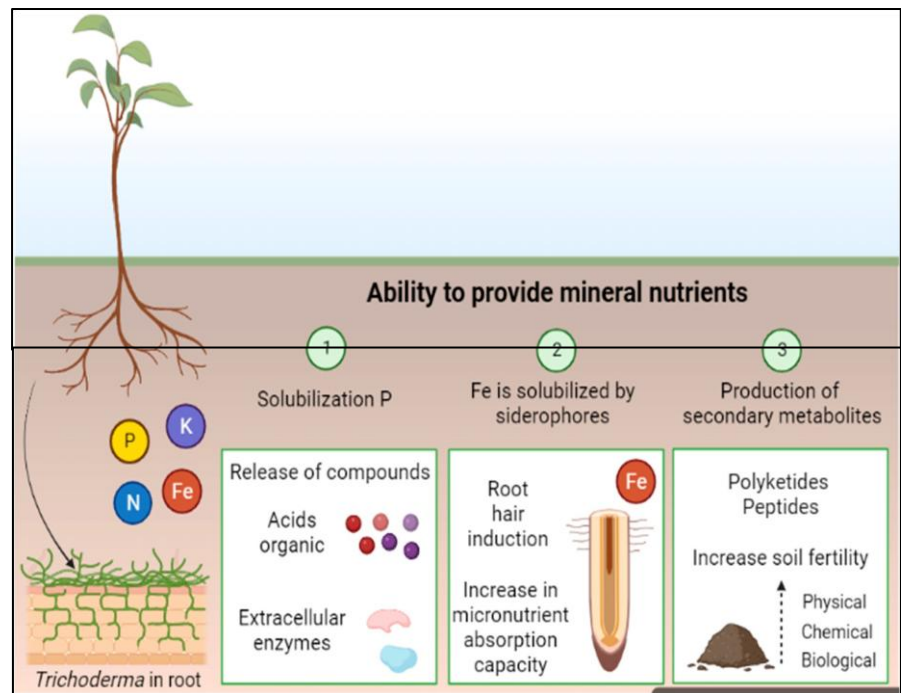


Figure 2. The mechanisms by fungi of the genus *Trichoderma* in association with woody plant species. Created in Biorender.

In addition to organic compounds, the nutritional availability reaction can occur by producing secondary metabolites (SM), such as polyketides and peptides, which increase soil fertility [42]. It is worth mentioning that the greater the ability to obtain resources from the root system, the greater the development and survival of seedlings in the field [43]. Plants more efficient at absorbing water and nutrients can increase photosynthetic potential, achieving higher root systems [44].

4.2. Production of Organic Compounds, Secondary Metabolites, and Plant Hormones

The chemical signals released from the interaction between plant and *Trichoderma* produce complex association responses [45]. However, the effects obtained depend on the ability of *Trichoderma* strains to act on the production of chemical compounds, which promote biochemical changes in plants (Table 1).

Table 1. Relationship between the production of chemical compounds by species of *Trichoderma* spp. and functions that promote growth.

Species	Chemical Production	Activity	References
<i>T. asperellum</i> ; <i>T. harzianum</i> ; <i>T. viride</i> ; <i>T. koningii</i>	Siderophores	Fe chelating agents, in this process, Fe^{3+} siderophores are recognized and absorbed by plants, adopting a key role in the availability of the micronutrient	[46–48]
<i>T. harzianum</i>	Terpenes	Provides signals to plants that trigger changes in growth	[49–51]
<i>T. harzianum</i>	Metabolites of isocyanate	Positive impact on the symbiosis process	[50]
<i>T. harzianum</i> ; <i>T. koningii</i> ; <i>T. viride</i>	Pyrones	6-pentyl-2H-Piran-2-one (6-PP): chemical signaling via induction of auxin and ethylene formation, which modulates root architecture (formation)	[52–54]

of root hairs) Promotes seed germination and seedling development

<i>T. asperellum</i> ; <i>T. harzianum</i> ; <i>T. koningii</i> ; <i>T. viride</i>	Synthesis of phytohormones	High rhizosphere competence. Performs the biosynthesis of indole-3-acetic acid (IAA), capable of modifying the root architecture and increasing root mass and rate of absorption of nutrients by the plant	[23,55]
---	----------------------------	--	---------

Furthermore, the production of chemical compounds is influenced by environmental conditions, and temperature, humidity, and soil pH are determining factors, considering that each species of *Trichoderma* produces different types of compounds and positively affects plant growth [49]. The VOCs belong to several chemical classes: mono and sesquiterpenes, alcohols, ketones, lactones, esters, phenols, thioesters, and cyclohexenes [56]. Fungi can produce different types of VOCs used to promote plant growth [57]. This process occurs from producing bioactive compounds and modulation of plant hormones, with benefits to increase root volume, plant biomass, and productivity [58,59].

5. Promoting the Growth of Forest Species

The development of seedlings depends on the adequate management of essential resources to plant functioning, and the phase of establishing of the seedlings has greater vulnerability to restrictive and adverse conditions (biotic and abiotic stresses) [60]. The use of potential microorganisms such as *Trichoderma* fungi can solve this problem and benefit the development of forest seedlings with mechanisms of action that improve plant growth, especially under adverse conditions. Under abiotic stress, *Trichoderma* benefits plant development by producing secondary metabolites, hydrolytic enzymes, phytohormones, and siderophores. Under biotic stress, *Trichoderma* promotes biocontrol actions (parasitism, competition, and antagonism). In addition, members of this genus of fungi increase nutritional acquisition (production of secondary metabolites, phosphate solubilization, decomposition of organic matter) to promote greater availability of nutrients to plants.

Figure 3 demonstrates that root colonization begins from the interaction of chemical signals between plant and fungus, composed of fixation, penetration, and root colonization, intermediated by the production of metabolites [46]. For the fungus to be able to colonize the roots, protein secretion must occur to loosen the plant cell wall and then facilitate root penetration and intercellular growth, limited to the epidermal layer and the external cortex [61]. The hydrophobic proteins, rich in cysteine, are involved in the initial bond with the root surface [62]; subsequently, the action of the expansive enzymes allows the loosening of plant cell walls through non-covalent interactions to maintain their integrity [63].

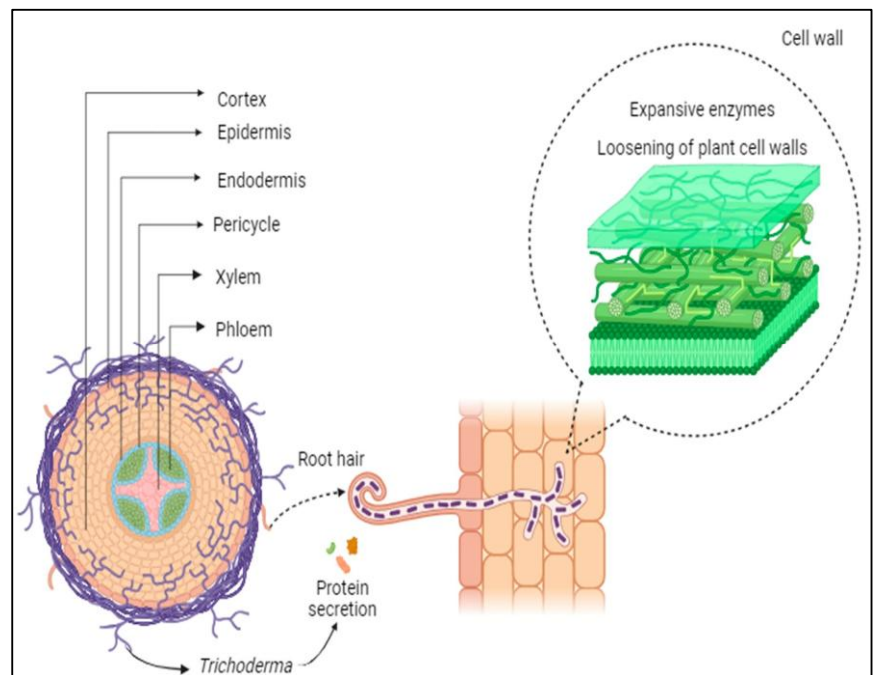


Figure 3. *Trichoderma* in fixation, penetration, and root colonization. Created in Biorender.

As a mechanism of interaction, the plants provide sucrose to the fungi *Trichoderma* to optimize their development and consequent root colonization. From this stage, after the mediation by hydrophobic proteins occurs, the installation and adhesion of *Trichoderma* on the plant root surface of host plants begins. These steps are important to the functioning of cell communication processes, fungal morphogenesis, and adherence of hyphae to hydrophobic surfaces [54,64].

Communication between forest seedlings and *Trichoderma* is complex and dynamic, based on the exchange and perception of chemical signals [65]. The extensive dialogue in the early stages of interaction releases the exudation of important compounds such as volatile organic compounds, secondary metabolites, and plant hormones [66]. Such substances greatly influence the seedling formation process, emphasizing the benefits from the seed germination process to the emergence of seedlings and seedling formation with high quality [7].

From there, the endophytic colonization begins, where the microorganism assists the development and growth of seedlings through the emission of chemical signals that allow the best plant development due to the symbiosis process. Consequently, shoot and root biomass are improved; seedlings also have greater resistance and responses to stress conditions [67,68].

Studies with the inoculation of *Trichoderma* in species of forest seedlings have shown positive effects on its development. In seedlings of *Acacia auriculiformis*, inoculation with strains of *Trichoderma* sp. increased plant total dry biomass compared to those not inoculated with the fungus [69]. In the production of argan seedlings (*Agrania spinosa*), after root colonization by *Trichoderma*, benefits were observed in the growth parameters through greater seed germination potential, root development, and plant height [70].

VOCs regulate the hormonal concentration of seedlings, which reflects in higher biomass production and yield through increased root volume [71],

through the ability to induce better redistribution of auxins in the roots, and growth of seedlings [72]. The potential of SM infers significant gains in forest seedlings through increased seedling production [73]. In *Acacia mangium*, the inoculation of *T. viride* improved seedling dry matter, which can be explained by the higher absorption capacity of Fe by plants through the production of siderophores, VOCs, and secretion of hydrolytic enzymes [74,75].

Phytohormones (IAA, cytokinins, gibberellins) associated with SM synthesized by *Trichoderma* allow the increase of plant height and root development, as observed in *Camellia sinensis* [76]. In *Bougainvillea spectabilis*, soil treated with *T. longibrachiatum* stimulated root production in cuttings through the production of indole-3-butyric acid (IBA) and α -naphthalene acetic acid (NAA); such auxin regulators contribute to the development of morphological characteristics of seedlings, with emphasis on root development [77]. *T. virens* in oil palm seedlings (*Elaeis guineensis*) contributed to the increase in the production of growth factors and phytohormones by both isolates and consequent effective growth [78].

Trichoderma strains exude SM in olive seedlings (*Olea europaea*), which increases height, leaf area, stem diameter, and seedling clearance in nursery conditions [79,80]. One of the most promising functions performed by secondary metabolites refers to the multiplication of plant cells, in which the action performed by *Trichoderma* strains correlated with higher rates of germination speed and germination percentages and factors for obtaining seedlings with high morphological and physiological parameters [81].

The greater root development is one of the main effects provided by *Trichoderma* sp. because the growth of seedlings is optimized through the greater capacity of root exploration, which influences the wide capacity of absorption of macro and micronutrients of the soil [82]. The development of seedlings is optimized by the proper use of macro and micronutrients, with emphasis on nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), and iron (Fe), required in the seedling formation stage, through changes in the anchoring of the root system or exudation of metabolites [83].

The root is the organ most susceptible to environmental variations, constituting a barrier to the survival of seedlings [84]. Some species of the genus *Trichoderma* are capable of excreting metabolites, auxin analogs, and other protein compounds around the root system, promoting the increase of primary and secondary roots, as well as stimulating the production of root hairs, which increase absorption of nutrients [85].

The fungi sequester the phosphate in the unavailable form in the soil through their mycelium and then release it to the seedlings in the readily available form [86]. This mechanism was observed in *Hevea brasiliensis*, where *Trichoderma* promoted the solubilization of insoluble phosphate into available phosphate due to the release of organic acid (citric acid), which promoted the development of rubber tree seedlings in the nursery [87,88].

Stimulating the development of the root system, height, and stem diameter contributes to the production of forest seedlings, with stem diameter in the seedling production phase being one of the desirable factors for reducing seedling time in nurseries [89]. In *Euterpe oleracea* seedlings inoculated with *Trichoderma*, there was interaction and consequent increases in stem diameter, which explains a greater capacity for survival of seedlings in the field [90].

Macro and micronutrients are involved in photosynthesis because such activity requires a series of chemical and physiological steps related to the adequate supply of nutrients [91]. As the interaction between *Trichoderma* and plant promotion occurs, seedling photosynthesis and total water content of

Quercus robur L. avoid the reduction of energy during water transpiration [92]. In addition, reports are showing that photosynthetic capacity is high due to gene regulation developed by *Trichoderma* sp. to make the seedlings more resistant to adverse conditions and achieve higher-quality indexes [93].

During the initial stage of development of forest seedlings, they require adequate energy for greater efficiency in producing photoassimilates. During the growth of seedlings, the energy requirement is increased [94]. Plants synthesize carbohydrates through photosynthesis and obtain the energy content necessary for the breathing process, which is fundamental to the conduction of physiological activities for maintenance and growth of seedlings [95]. These strategies corroborate the success in the silvicultural sector destined to produce seedlings, providing favorable conditions to obtain more productive seedlings, a decisive stage for the good development of forest stands.

Practical Examples of Trichoderma in the Formation of Forest Seedlings

The use of *Trichoderma* spp. in soil treatment is revealed as an alternative of great technological innovation, constituting a mechanism that promotes distinct gains in forest seedlings' development, quality, and growth. The effectiveness in promoting plant growth comes from species capable of establishing lasting interactions with the plant, considering that the association is highly variable, whether in the function of the fungus species, development conditions, inoculum rate, or type of formulation [96]. Table 2 reports the symbiotic association between different species of *Trichoderma* and woody species capable of maximizing growth promotion.

Table 2. Relationship of growth promotion from the association between *Trichoderma* sp. and seedlings of forest species.

<i>Trichoderma</i> sp.	Forest Species	Effects	References
<i>T. harzianum</i>	<i>Abroma augusta</i>	Height and stem diameter	[97]
<i>T. harzianum</i> ; <i>T. lignorum</i> ; <i>T. koningii</i>	<i>Acacia mangium</i>	Height, stem diameter; biomass and root volume	[98]
<i>T. asperelloides</i> ; <i>T. harzianum</i>	<i>Bauhinia forficata</i>	Height, stem diameter, and chlorophyll content	[99]
<i>T. asperelloides</i>	<i>Cabralea canjerana</i>	Height, biomass, and root system	[100]
<i>T. harzianum</i>	<i>Cedrela fissilis</i>	Height, biomass, and root system	[101]
<i>T. strigosellum</i>	<i>E. urophylla</i>	Height, number of leaves, and biomass	[102]
<i>T. asperellum</i>	<i>Enterolobium schomburgkii</i>	Height and stem diameter	[103]
<i>T. harzianum</i>	<i>Malus hupehensis</i>	Biomass and root system	[104]
<i>T. asperellum</i>	<i>Theobroma cacao</i>	Height and root system	[105]

The increase in dry mass is associated with the highest percentage of survival of seedlings at the time of transplanting, making seedlings tolerant to water restrictions, mediated by the ability to change the environment and promote prolonged mutualistic association [10,106]. The morphology of the seedlings directly affects their production potential since both the growth in the shoot and the root architecture depend upon the availability of nutrients in the soil [107]. The close relationship with plants ensures that *Trichoderma* fungi, when colonizing the root system, promote changes in plant metabolism, affecting plant growth and nutrition, the development of the root system, and the biocontrol of pathogens [9].

The action of microorganisms allows obtaining seedlings with a root system and well-developed shoot, which are determining factors for survival and desirable development in the seedling production process [108]. Furthermore, the increase up to 200% in the total plant biomass in inoculated plants indicates that the inoculation of *Trichoderma* is a promising method to produce seedlings at the commercial level [109]. The advantages of the use of potential microorganisms are due to the benefits at the physiological level, such as the increase in the photosynthetic potential, greater efficiency, and absorption of water and nutrients, which influence the arrangement of the morphological attributes of the seedlings [100,110].

Currently, the need to reduce the use of agrochemicals is increasing in sustainable agriculture. This plant–microorganism interaction is viable because, in addition to promoting the productivity of forest seedlings, growth promoters allow adding value to the product, making it more competitive and lower cost to the producer [55]. Remarkably, plant growth-promoting substances ensure improvements in the seed germination process and the development and quality of seedlings [8].

According to the morpho and physiological characteristics of the main forest species cultivated in Brazil, synergism via interactions with beneficial microorganisms becomes a useful tool for new microbial quality of the soil and forest production [111]. Since plant responses to fungi actions are broad, it is necessary to evaluate different conditions conducive to plant–microorganism interactions to improve silvicultural techniques for promoting seedling growth [112].

Promoting the growth of forest species through association with *Trichoderma* is shown to be a viable alternative for the sustainable production of seedlings in Brazil, which is capable of reducing the cost of production via less dependence on mineral fertilizers, has lower risks of environmental contamination, as well as speeds up the process of permanence in forest nurseries and possibly makes the seedlings more capable of being established in the field, according to improvements in the root system.

6. Potential Microorganisms: Co-Inoculation Capacity

During the nursery phase (production of forest seedlings), several factors can influence positively or negatively the production capacity of plants, so it is essential to insert viable technologies to increase plant production (Figure 4). The system of “consortium” (combination of two or more microorganisms) segmented through the co-inoculation of microorganisms is a valuable alternative in the seedling development stage [113].

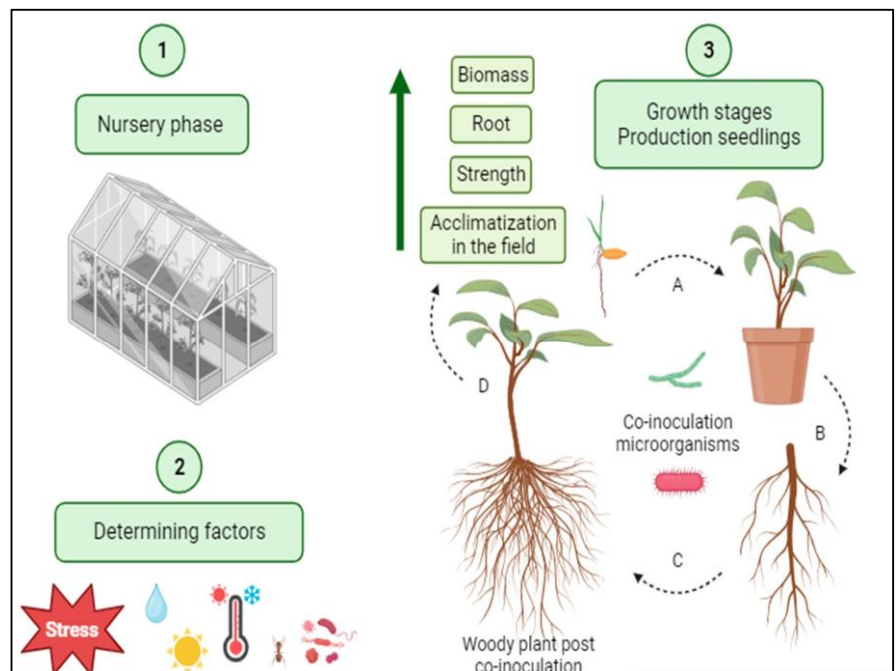


Figure 4. Capacity of microorganisms' co-inoculation in the production process of forest seedlings. Stages: (1) Nursery phase mediated for (2) determining factors (biotic and abiotic stress), (3) growth stages in production seedlings co-inoculation ((A) better germination, (B) growth seedling, (C) root development, (D) fortified root, appearance of secondary roots and root hairs), as a result, obtaining seedlings with greater biomass, root system, strength and acclimatization in the field. Created in Biorender.

Despite the positive effects on the production and growth parameters of arboreal plants, biopromotion via double inoculation is variable, depending on the compatibility between such microorganisms and the amount of inoculum applied to avoid competition. Furthermore, the co-inoculation with fungi and bacteria can promote an antagonistic effect, which is undesirable in the silvicultural system production and sustainable development [114,115].

The interaction process between plant and microorganism is complex, which reinforces the need to evaluate the different effects of microbial consortium on plant development and forest seedling production. In contrast, each species presents specific characteristics and responses to interaction promoting additive/synergistic or antagonistic effects [77,116]. The beneficial effects of co-inoculation are observed in improvements of germination, vigor, root morphogenesis, photosynthetic capacity, and high biomass indexes, as well as enabling soil maintenance and ecological balance [117,118].

The success of communication and interaction between plants and microorganisms is observed in several species; in this sense, the evaluation of the potential of the process of co-inoculation between fungi and bacteria is a promising tool for the development of forest seedlings, as observed in the interaction between *Ambispora leptoticha*; *Azotobacter chroococcum* and *T. harzianum* under large-scale nursery conditions increasing teak biomass (*Tectona grandis*) [110]. In addition, in [119], some authors also obtained success for producing teak seedlings under co-inoculation with mycorrhizal fungi and rhizobacteria. In palm seedlings (*Elaeis guineensis*), the co-inoculation of *Bacillus cereus* and *T. asperellum* increased root growth and promoted greater plant development through phosphate solubilization [120].

Among the limiting factors to silvicultural development, the initial stages of seedling formation are highlighted to avoid a low increase in biomass and restrictions in the root system. Such factors have a direct association with the low nutrient content in the substrate used for the growth of seedlings; considering such a restriction, studies revealed that the co-inoculation of *Rhizoglyphus fasciculatus* (arbuscular mycorrhizal fungus), *Mortierella* sp. (phosphate solubilizing fungus), and *Azospirillum brasilense* (plant growth promoter bacteria) promoted greater potential in the development and higher quality of seedlings [121].

Positive results were obtained through the consortium between microorganisms (*R. fasciculatus*, *A. chroococcum*, *B. coagulans*, and *T. harzianum*) in the production of seedlings of *Dalbergia sissoo*, where plants associated with microorganisms obtained high rates in all growth parameters, with good establishment and vigorous seedlings in the field [122]. Through the multifaceted action of microorganisms, co-inoculation is characterized as a promising method for the growth and development of seedlings [119].

The co-inoculation of mycorrhizal fungi (*R. irregulares*; *Funnelliformis mosseae* and *Claroideoglomus etunicatum*) and *T. harzianum* increased shoot and root systems of apple trees, which led to a reduction in the need for nursery replanting, which are improvements resulting from the action of microorganisms in soil quality [123]. The mechanisms involved in promoting plant development are broad and have different facets under the conditions of cultivation, cultivated species, and action of the microorganism (synthesis of nutrients, phytohormones, mobilization of soil compounds), which influence and ensure that seedlings can develop in good conditions [124].

There are several microorganisms used as inoculum in tree seedlings, such as mycorrhizal arbuscular [125], growth-promoting bacteria [126], rhizobia [127], and *Trichoderma* [82]. These microorganisms improve root and shoot development and nutrient content in plants. The advantage of inoculating *Trichoderma* is that this genus is associated with plant growth, bioremediation, and the production of secondary metabolites.

7. Considerations and Future Perspectives

The inoculation of *Trichoderma* for seedling production in forest species promotes several benefits to plant development; in addition to the low production cost, it is a simple and effective practice, which stimulates root development, promotes greater nutritional absorption capacity, and increases plant biomass, which are determinant for obtaining more vigorous seedlings and greater economic yield.

Adopting beneficial microorganisms, such as fungi of the genus *Trichoderma*, is demonstrated not only as a viable strategy to produce seedlings of forest species but also as a sustainable alternative and recovery plan for degraded environments, from the considerable reduction in the use of agrochemicals and industrial fertilizers.

Another major advantage associated with the promotion of forest species through interaction with potential microorganisms is that most plant-microorganism interactions are observed in annual species, with few studies in the forest sector. There is a gap of understanding the different mechanisms of action of the symbiotic process, such as metabolic activity and mechanism of interaction with plants and other microorganisms, to increase the use of potential microorganisms in the silvicultural sector.

Although the great relevance and capacity to promote growth, there are still questions to be elucidated, such as the mechanisms involved in the

solubilization of nutrients in potential native forest species, which would possibly enable its large-scale production.

Information correlated with the action of microorganisms in the silvicultural sector is still scarce, which requires greater attention.

Author Contributions: Conceptualization, N.C.d.F.F. and M.L.G.R.; methodology, N.C.d.F.F.; software, N.C.d.F.F.; validation, N.C.d.F.F. and M.L.G.R.; formal analysis, M.L.G.R.; investigation, N.C.d.F.F., M.L.G.R. and A.G.; resources, N.C.d.F.F.; data curation, N.C.d.F.F., M.L.G.R. and A.G.; writing—original draft preparation, N.C.d.F.F., M.L.G.R. and A.G.; writing—review and editing, N.C.d.F.F. and M.L.G.R.; visualization, N.C.d.F.F. and M.L.G.R.; supervision, M.L.G.R.; project administration, N.C.d.F.F., M.L.G.R. and A.G.; funding acquisition, A.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors acknowledge the financial support of the Federal District Research Support Foundation. Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal—FAPDF (Notice 03/2023—FAPDF/Process nº 00193-00002115/2023-87).

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: To Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for the PhD fellowship granted to the first author.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. IBÁ. *Brazilian Tree Industry: Annual Report 2022*; Indústria Brasileira de Árvores-IBÁ: Brasília, Brazil, 2022; 96p.
2. Maximo, Y.I.; Hasegawa, M.; Verkerk, P.J.; Missio, A.L. Forest bioeconomy in Brazil: Potential innovative products from the forest sector. *Land* **2022**, *11*, 1297. [[CrossRef](#)]
3. Yang, H.; Liu, Y.; Liu, J.; Meng, J.; Hu, X.; Tao, S. Improving the imbalanced global supply chain of phosphorus fertilizers. *Earth's Future* **2019**, *7*, 638–651. [[CrossRef](#)]
4. Grossnickle, S.C.; Macdonald, J.E. Seedling quality: History, application, and plant attributes. *Forests* **2018**, *9*, 283. [[CrossRef](#)]
5. Lopes, P.R.M.; Barretto, V.C.M.; Montagnolli, R.N.; Ferreira, P.H.F. Production of eucalyptus seedlings using alternative substrates. *Rev. Eng. Agric. REVENG* **2021**, *29*, 236–244. [[CrossRef](#)]
6. Peccatti, A.; Rovedder, A.P.M.; Steffen, G.P.K.; Maldaner, J.; Missio, E.L.; Witt, C.S.; Dalcul, L.P. Effect of *Trichoderma* spp. on the propagation of *Maytenus ilicifolia* Mart. ex Reissek. *J. Agric. Sci.* **2019**, *11*, 435–442. [[CrossRef](#)]
7. Riikonen, J.; Luoranen, J. Seedling production and the field performance of seedlings. *Forests* **2018**, *9*, 740. [[CrossRef](#)]
8. Vinale, F.; Sivasithamparan, K.; Ghisalberti, E.L.; Marra, R.; Woo, S.L.; Lorito, M. *Trichoderma*-plant-pathogen interactions. *Soil Biol. Bioch.* **2008**, *40*, 1–10. [[CrossRef](#)]
9. Khan, M.R.; Mohiddin, F.A. *Trichoderma*: Its multifarious utility in crop improvement. In *Crop Improvement through Microbial Biotechnology*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018; Volume 13, pp. 263–291. [[CrossRef](#)]
10. Kashyap, P.L.; Rai, P.; Srivastava, A.K.; Kumar, S. *Trichoderma* for climate resilient agriculture. *World J. Microbiol. Biotechnol.* **2017**, *33*, 155. [[CrossRef](#)]
11. Alfiky, A.; Weisskopf, L. Deciphering *Trichoderma*-plant-pathogen interactions for better development of biocontrol applications. *J. Fungi* **2021**, *7*, 61. [[CrossRef](#)]
12. Morán-Diez, M.E.; Alba, Á.E.M.; Rubio, M.B.; Hermosa, R.; Monte, E. *Trichoderma* and the plant heritable priming responses. *J. Fungi* **2021**, *7*, 318. [[CrossRef](#)]
13. Waghunde, R.R.; Shelake, R.M.; Sabalpara, A.N. *Trichoderma*: A significant fungus for agriculture and environment. *Afr. J. Agric. Res.* **2016**, *11*, 1952–1965. [[CrossRef](#)]
14. Banerjee, S.; Heijden, M.G.A. Soil microbiomes and one health. *Nat. Rev. Microbiol.* **2022**, *21*, 6–20. [[CrossRef](#)]
15. Cai, F.; Druzhinina, I.S. In honor of John Bissett: Authoritative guidelines on molecular identification of *Trichoderma*. *Fungal Divers.* **2021**, *107*, 1–69. [[CrossRef](#)]
16. Osakabe, Y.; Kawaoka, A.; Nishikubo, N.; Osakabe, K. Responses to environmental stresses in woody plants: Key to survive and longevity. *J. Plant Res.* **2012**, *125*, 1–10. [[CrossRef](#)]
17. Puglielli, G.; Laanisto, L.; Gori, A.; Cardoso, A.A. Woody plant adaptations to multiple abiotic stressors: Where are we? *Flora* **2023**, *299*, 152221. [[CrossRef](#)]
18. Qin, X.; Xu, J.; An, X.; Yang, J.; Wang, Y.; Dou, M.; Wang, M.; Huang, F.; Fu, Y. Insight of endophytic fungi promoting the growth and development of woody plants. *Crit. Rev. Biotechnol.* **2023**, *1*, 1–22. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

19. Prudencio, O.G.R.; Castro, M.D.; Rivera, M.E.; López, M.C.G.; Moreno, S.J.; Flores, S.C. *Trichoderma* in the rhizosphere. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*; Singh, H.B., Vaishnav, A., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; Volume 1, pp. 3–38. [\[CrossRef\]](#)
20. Guzmán, P.G.; Troncoso, M.D.P.; Monfil, V.O.; Estrella, A.H. *Trichoderma* species: Versatile plant symbionts. *Phytopathology* **2018**, *109*, 6–16. [\[CrossRef\]](#)
21. Singh, A.; Shukla, N.; Kabadwal, B.C.; Tewari, A.K.; Kumar, J. Review on Plant-*Trichoderma*-Pathogen Interaction. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* **2018**, *7*, 2382–2397. [\[CrossRef\]](#)
22. Devi, R.; Kaur, T.; Kour, D.; Rana, K.L.; Yadav, A.; Yadav, A.N. Beneficial fungal communities from different habitats and their roles in plant growth promotion and soil health. *Microb. Biosyst.* **2020**, *5*, 21–47. [\[CrossRef\]](#)
23. Soldan, A.; Watzlawick, L.F.; Botelho, R.V.; Faria, C.M.D.R.; Maia, A.J. Development of forestry species inoculated with *Trichoderma* spp. fertilized with rock phosphate. *Floresta e Ambiente* **2018**, *25*, e20160643. [\[CrossRef\]](#)
24. Vassileva, M.; Mendes, G.D.O.; Deriu, M.A.; Benedetto, G.D.; Peregrin, E.F.; Mocali, S.; Martos, V.; Vassilev, N. Fungi, Psolubilization, and plant nutrition. *Microorganisms* **2022**, *10*, 1716. [\[CrossRef\]](#)
25. Carvalho Filho, M.R.; Martins, I.; Peixoto, G.H.S.; Muniz, P.H.P.C.; Carvalho, D.D.C.; Mello, S.C.M. Biological control of leaf spot and growth promotion of eucalyptus plants by *Trichoderma* spp. *J. Agric. Sci.* **2018**, *10*, 459–467. [\[CrossRef\]](#)
26. Reis, D.N.; Silva, F.G.; Santana, R.C.; Oliveira, T.C.; Freiberger, M.B.; Silva, F.B.; Müller, C. Growth, physiology and nutrient use efficiency in *Eugenia dysenterica* DC under varying rates of nitrogen and phosphorus. *Plants* **2020**, *9*, 722. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
27. Kumar, M.; Poonam, A.; Ahmad, S.; Singh, R.P. Plant growth promoting microbes: Diverse roles for sustainable and ecofriendly agriculture. *Energy Nexus* **2022**, *7*, 100133. [\[CrossRef\]](#)
28. Zhao, M.; Zhao, J.; Yuan, J.; Hale, L.; Wen, T.; Huang, Q.; Shen, Q. Root exudate drive soil microbe nutrient feedbacks in response to plant growth. *Plant Cell Environ.* **2020**, *44*, 613–628. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
29. Pan, Y.; Song, Y.; Zhao, L.; Chen, P.; Bu, C.; Liu, P.; Zhang, D. The genetic basis of phosphorus utilization efficiency in plants provide new insight into woody perennial plants improvement. *Int. J. Mol. Sci.* **2022**, *23*, 2353. [\[CrossRef\]](#)
30. Divjot, K.O.U.R.; Rana, K.L.; Tanvir, K.A.U.R.; Yadav, N.; Yadav, A.N.; Kumar, M.; Saxena, A.K. Biodiversity, current developments and potential biotechnological applications of phosphorus-solubilizing and-mobilizing microbes: A review. *Pedosphere* **2021**, *31*, 43–75. [\[CrossRef\]](#)
31. Morales, M.; Medina, S.E.L.; Morán, J.N.; Quevedo, A.; Ratti, M.F. Nematophagous fungi: A review of their phosphorus solubilization potential. *Microorganisms* **2023**, *11*, 137. [\[CrossRef\]](#)
32. Prabhu, N.; Borkar, S.; Garg, S. Phosphate solubilization by microorganisms: Overview, mechanisms, applications and advances. In *Advances in Biological Science Research*; Meena, S.N., Naik, M.M., Eds.; Springer: Dona Paula, Goa, India, 2019; Volume 1, pp. 161–176. [\[CrossRef\]](#)
33. López, G.N.; Lawry, R.; Aquino, J.F.E.; Mendoza-Mendoza, A. Chemical communication between *Trichoderma* and plants. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*; Singh, H.B., Vaishnav, A., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; Volume 1, pp. 109–139. [\[CrossRef\]](#)
34. Chen, M.; Liu, Q.; Gao, S.S.; Young, A.E.; Jacobsen, S.E.; Tang, Y. Genome mining and biosynthesis of a polyketide from a biofertilizer fungus that can facilitate reductive iron assimilation in plant. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2019**, *116*, 5499–5504. [\[CrossRef\]](#)
35. Aishwarya, S.; Viswanath, H.S.; Singh, A.; Singh, R. Biosolubilization of different nutrients by *Trichoderma* spp. and their mechanisms involved: A Review. *Int. J. Adv. Sci. Technol.* **2020**, *7*, 34–39.
36. Núñez, J.A.D.; Lobo, M.B. Application of microorganisms in forest plant. In *Biofertilizers*; Inamuddin, A.M.I., Boddula, R., Rezakazemi, M., Eds.; Wiley: Cambridge, MA, USA, 2021; pp. 265–287. [\[CrossRef\]](#)
37. Prasad, A.; Dixit, M.; Meena, S.K.; Kumar, A. Qualitative and quantitative estimation for phosphate solubilizing ability of *Trichoderma* isolates: A natural soil health enhancer. *Mater. Today Proc.* **2021**, *81*, 360–366. [\[CrossRef\]](#)
38. Yu, Z.; Wang, Z.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Liu, Z. Biocontrol and growth-promoting effect of *Trichoderma asperellum* TaspHu1 isolate from *Juglans mandshurica* rhizosphere soil. *Microbiol. Res.* **2021**, *242*, 126596. [\[CrossRef\]](#)
39. Mäkelä, P.S.; Wasonga, D.O.; Hernandez, A.S.; Santanen, A. Seedling growth and phosphorus uptake in response to different phosphorus sources. *Agronomy* **2020**, *10*, 1089. [\[CrossRef\]](#)
40. Ali, S.; Khan, M.J.; Anjum, M.M.; Khan, G.R.; Ali, N. *Trichoderma harzianum* modulates phosphate and micronutrient solubilization in the rhizosphere. *Gesunde Pflanz.* **2022**, *74*, 853–862. [\[CrossRef\]](#)
41. Silva, L.I.D.; Pereira, M.C.; Carvalho, A.M.X.D.; Buttrós, V.H.; Pasqual, M.; Dória, J. Phosphorus-solubilizing microorganisms: A key to sustainable agriculture. *Agriculture* **2023**, *13*, 462. [\[CrossRef\]](#)
42. Yu, C.; Luo, X. *Trichoderma koningiopsis* controls *Fusarium oxysporum* causing damping-off in *Pinus massoniana* seedlings by regulating active oxygen metabolism, osmotic potential, and the rhizosphere microbiome. *Biol. Control* **2020**, *150*, 104352. [\[CrossRef\]](#)

43. Cabal, C.; Martínez-García, R.; Castro Aguilar, A.; Valladares, F.; Pacala, S.W. The exploitative segregation of plant roots. *Science* **2020**, *370*, 1197–1199. [\[CrossRef\]](#)
44. Kulmann, M.S.S.; Arruda, W.S.; Vitto, B.B.; Souza, R.O.S.; Berghetti, Á.L.P.; Tarouco, C.P.; Brunetto, G. Morphological and physiological parameters influence the use efficiency of nitrogen and phosphorus by *Eucalyptus* seedlings. *New For.* **2022**, *53*, 431–448. [\[CrossRef\]](#)
45. Wang, N.Q.; Kong, C.H.; Wang, P.; Meiners, S.J. Root exudate signals in plant—Plant interactions. *Plant Cell Environ.* **2021**, *44*, 1044–1058. [\[CrossRef\]](#)
46. Vinale, F.; Sivasithamparam, K.; Ghisalberti, E.L.; Ruocco, M.; Woo, S.; Lorito, M. *Trichoderma* secondary metabolites that affect plant metabolism. *Nat. Prod. Commun.* **2012**, *7*, 1934578X1200701133. [\[CrossRef\]](#)
47. Lehner, S.M.; Atanasova, L.; Neumann, N.K.; Krska, R.; Lemmens, M.; Druzhinina, I.S.; Schuhmacher, R. Isotope-assisted screening for iron-containing metabolites reveals a high degree of diversity among known and unknown siderophores produced by *Trichoderma* spp. *Appl. Environ. Microbiol.* **2013**, *79*, 18–31. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
48. Trivedi, P.; Leach, J.E.; Tringe, S.G.; Sa, T.; Singh, B.K. Plant—microbiome interactions: From community assembly to plant health. *Nat. Rev. Microbiol.* **2020**, *18*, 607–621. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
49. Lee, S.; Yap, M.; Behringer, G.; Hung, R.; Bennett, J.W. Volatile organic compounds emitted by *Trichoderma* species mediate plant growth. *Fungal Biol. Biotechnol.* **2016**, *3*, 7. [\[CrossRef\]](#)
50. Zeilinger, S.; Gruber, S.; Bansal, R.; Mukherjee, P.K. Secondary metabolism in *Trichoderma*—Chemistry meets genomics. *Fungal Biol. Rev.* **2016**, *30*, 74–90. [\[CrossRef\]](#)
51. Salwan, R.; Rialch, N.; Sharma, V. Bioactive volatile metabolites of *Trichoderma*: An overview. In *Secondary Metabolites of Plant Growth Promoting Rhizomicroorganisms*; Singh, H.B., Keswani, C., Reddy, M.S., Eds.; Springer: Singapore, 2019; Volume 1, pp. 87–111. [\[CrossRef\]](#)
52. Valdespino, C.A.R.; Flores, S.C.; Monfil, V.O. *Trichoderma* as a model to study effector-like molecules. *Front. Microbiol.* **2019**, *10*, 1030. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
53. Kolli, S.C.; Adusumilli, N. *Trichoderma*-its paramount role in agriculture. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*; Singh, H.B., Vaishnav, A., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; Volume 1, pp. 69–83. [\[CrossRef\]](#)
54. Tys'kiewicz, R.; Nowak, A.; Ozimek, E.; Jaroszek-Scisiel, J. *Trichoderma*: The current status of its application in agriculture for the biocontrol of fungal phytopathogens and stimulation of plant growth. *Int. J. Mol. Sci.* **2022**, *23*, 2329. [\[CrossRef\]](#)
55. Chagas, L.F.B.; Chagas Júnior, A.F.; Castro, H.G. Phosphate solubilization capacity and indole acetic acid production. *Braz. J. Agric. V* **2017**, *92*, 176–185. [\[CrossRef\]](#)
56. Nieto-Jacobo, M.F.; Steyaert, J.M.; Salazar-Badillo, F.B.; Nguyen, D.V.; Rostás, M.; Braithwaite, M.; Mendoza-Mendoza, A. Environmental growth conditions of *Trichoderma* spp. affects indole acetic acid derivatives, volatile organic compounds, and plant growth promotion. *Front. Plant Sci.* **2017**, *8*, 102. [\[CrossRef\]](#)
57. Sharifi, R.; Ryu, C.M. Revisiting bacterial volatile-mediated plant growth promotion: Lessons from the past and objectives for the future. *Ann. Bot.* **2018**, *122*, 349–358. [\[CrossRef\]](#)
58. Minardi, D.; Maggini, V.; Fani, R. Volatile organic compounds: From figurants to leading actors in fungal symbiosis. *FEMS Microbiol. Ecol.* **2021**, *97*, fiab067. [\[CrossRef\]](#)
59. Vinale, F.; Nigro, M.; Sivasithamparam, K.; Flematti, G.; Ghisalberti, E.L.; Ruocco, M.; Lorito, M. Harzianic acid: A novel siderophore from *Trichoderma harzianum*. *FEMS Microbiol. Lett.* **2013**, *347*, 123–129. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
60. Boonman, C.C.; Van Langevelde, F.; Oliveras, I.; Couédon, J.; Luijken, N.; Martini, D.; Veenendaal, E.M. On the importance of root traits in seedlings of tropical tree species. *New Phytol.* **2020**, *227*, 156–167. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
61. Mukherjee, M.; Mukherjee, P.K.; Horwitz, B.A.; Zachow, C.; Berg, G.; Zeilinger, S. *Trichoderma*—plant—pathogen interactions: Advances in genetics of biological control. *Indian J. Microbiol.* **2012**, *52*, 522–529. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
62. Brotman, Y.; Landau, U.; Inostroza, Á.C.; Takayuki, T.; Fernie, A.R.; Chet, I.; Willmitzer, L. *Trichoderma*-plant root colonization: Escaping early plant defense responses and activation of the antioxidant machinery for saline stress tolerance. *PLoS Pathog.* **2013**, *9*, e1003221. [\[CrossRef\]](#)
63. Brotman, Y.; Briff, E.; Viterbo, A.; Chet, I. Role of swollenin, an expansin-like protein from *Trichoderma*, in plant root colonization. *Plant Physiol.* **2008**, *147*, 779–789. [\[CrossRef\]](#)
64. Mendoza-Mendoza, A.; Zaid, R.; Lawry, R.; Hermosa, R.; Monte, E.; Horwitz, B.A.; Mukherjee, P.K. Molecular dialogues between *Trichoderma* and roots: Role of the fungal secretome. *Fungal Biol. Rev.* **2018**, *32*, 62–85. [\[CrossRef\]](#)
65. Cornejo, H.A.; Macías-Rodríguez, L.; Del-Val, E.K.; Larsen, J. Ecological functions of *Trichoderma* spp. and their secondary metabolites in the rhizosphere: Interactions with plants. *FEMS Microbiol. Ecol.* **2016**, *92*, fiw036. [\[CrossRef\]](#)
66. Santoyo, G.; Guzmán-Guzmán, P.; Parra-Cota, F.I.; Santos-Villalobos, S.D.L.; Orozco-Mosqueda, M.; Glick, B.R. Plant growth stimulation by microbial consortia. *Agronomy* **2021**, *11*, 219. [\[CrossRef\]](#)

67. Poveda, J.; Eugui, D.; Abril-Urias, P. Could *Trichoderma* be a plant pathogen? Successful root colonization. In *Trichoderma*; Sharma, A., Sharma, P., Eds.; Springer: Singapore, 2020; Volume 1, pp. 35–59. [\[CrossRef\]](#)
68. Afzal, I.; Sabir, A.; Sikandar, S. *Trichoderma*: Biodiversity, abundances, and biotechnological applications. In *Recent Trends in Mycological Research*; Yadav, A.N., Ed.; Springer: Cham, Switzerland, 2021; Volume 1, pp. 293–315. [\[CrossRef\]](#)
69. Raghu, H.B.; Ashwin, R.; Ravi, J.E.; Bagyaraj, D.J. Enhancing plant quality and outplanting growth of *Acacia auriculiformis* in dry wasteland plantations by inoculating a selected microbial consortium in the nursery. *Can. J. For. Res.* **2020**, *50*, 736–741. [\[CrossRef\]](#)
70. Sellal, Z.; Touhami, A.O.; Chliyah, M.; Mouden, N.; Selmaoui, K.; Dahmani, J.; Douira, A. Effect of seeds treatment with *Trichoderma harzianum* on argan plants growth. *Plant Cell Biotechnol. Mol. Biol.* **2020**, *21*, 69–77.
71. Poveda, J. Beneficial effects of microbial volatile organic compounds (MVOCs) in plants. *Appl. Soil Ecol.* **2021**, *168*, 104118. [\[CrossRef\]](#)
72. González Pérez, E.; Ortega Amaro, M.A.; Salazar Badillo, F.B.; Bautista, E.; Douterlungne, D.; Bremont, J.F.J. The *Arabidopsis*/*Trichoderma* interaction reveals that the fungal growth medium is an important factor in plant growth induction. *Sci. Rep.* **2018**, *8*, 16427. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
73. Simamora, M.; Basyuni, M.; Lisnawita, L. Potency of secondary metabolites of *Trichoderma asperellum* and *Pseudomonas fluorescens* in the growth of cocoa plants affected by vascular streak dieback. *Biodiversitas J. Biol. Divers.* **2021**, *22*, 1–6. [\[CrossRef\]](#)
74. Suryantini, R.; Wulandari, R.S. Effectiveness of *Trichoderma viride* (T2) to the growth of *Acacia mangium* seedlings. *J. Adv. Agric. Technol.* **2017**, *4*, 1–4. [\[CrossRef\]](#)
75. López, A.C.; Alvarenga, A.E.; Zapata, P.D.; Luna, M.F.; Villalba, L.L. *Trichoderma* spp. from Misiones, Argentina: Effective fungi to promote plant growth of the regional crop *Ilex paraguariensis* St. Hil. *Mycology* **2019**, *10*, 210–221. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
76. Shang, J.; Liu, B.; Xu, Z. Efficacy of *Trichoderma asperellum* TC01 against anthracnose and growth promotion of *Camellia sinensis* seedlings. *Biol. Control* **2020**, *143*, 104205. [\[CrossRef\]](#)
77. Adebayo, A.G.; Kareem, K.T.; Olatunji, M.T.; Shokalu, A.O.; Akintoye, H.A.; James, I.E. Effects of *Trichoderma longibrachiatum* (NGJ167) and compost on early growth of *Bougainvillea spectabilis*. *Ornam. Hortic.* **2020**, *26*, 614–620. [\[CrossRef\]](#)
78. Paudzai, F.A.M.; Sundram, S.; Yusof, M.T.; Angel, L.; Hashim, A.M.; Abdullah, S.N.A. Induced systemic resistance and promotion of plant growth in oil palm seedlings by endophytic *Trichoderma virens*. *J. Oil Palm Res.* **2019**, *31*, 572–581. [\[CrossRef\]](#)
79. Dini, I.; Pascale, M.; Staropoli, A.; Marra, R.; Vinale, F. Effect of selected *Trichoderma* strains and metabolites on olive drupes. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 8710. [\[CrossRef\]](#)
80. Vaio, C.; Testa, A.; Cirillo, A.; Conti, S. Slow-release fertilization and *Trichoderma harzianum*-based biostimulant for the nursery production of young olive trees (*Olea europaea* L.). *Agron. Res.* **2021**, *19*, 1–15. [\[CrossRef\]](#)
81. Santos, M.F.; Santos, L.E.; Costa, D.L.; Vieira, T.A.; Lustosa, D.C. *Trichoderma* spp. on treatment of *Handroanthus serratifolius* seeds: Effect on seedling germination and development. *Heliyon* **2020**, *6*, E04044. [\[CrossRef\]](#)
82. Zin, N.A.; Badaluddin, N.A. Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Ann. Agric. Sci.* **2020**, *65*, 168–178. [\[CrossRef\]](#)
83. Gorai, P.S.; Barman, S.; Gond, S.K.; Mandal, N.C. *Trichoderma*. In *Beneficial Microbes in Agro-Ecology*; Amaresan, N., Annapurna, K., Sankaranarayanan, A., Kumar, M.S., Kumar, K., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2020; Volume 1, pp. 571–591. [\[CrossRef\]](#)
84. Guignabert, A.; Augusto, L.; Gonzalez, M.; Chipeaux, C.; Delerue, F. Complex biotic interactions mediated by shrubs: Revisiting the stress gradient hypothesis and consequences for tree seedling survival. *J. Appl. Ecol.* **2020**, *57*, 1341–1350. [\[CrossRef\]](#)
85. Singh, B.N.; Dwivedi, P.; Sarma, B.K.; Singh, G.S.; Singh, H.B. A novel function of N-signaling in plants with special reference to *Trichoderma* interaction influencing plant growth, nitrogen use efficiency, and cross talk with plant hormones. *3 Biotech* **2019**, *9*, 109. [\[CrossRef\]](#)
86. Kapri, A.; Tewari, L. Phosphate solubilization potential and phosphatase activity of rhizospheric *Trichoderma* spp. *Braz. J. Microbiol.* **2010**, *41*, 787–795. [\[CrossRef\]](#)
87. Promwee, A.; Issarakraisila, M.; Intana, W.; Chamswarng, C.; Yenjit, P. Phosphate solubilization and growth promotion of rubber tree (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) by *Trichoderma* strains. *J. Agric. Sci.* **2014**, *6*, 8. [\[CrossRef\]](#)
88. Halifu, S.; Deng, X.; Song, X.; Song, R. Effects of two *Trichoderma* strains on plant growth, rhizosphere soil nutrients, and fungal community of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* annual seedlings. *Forests* **2019**, *10*, 758. [\[CrossRef\]](#)
89. Santos, J.M.R.D.; Taniguchi, C.A.K.; Silva, C.D.F.B.D.; Natale, W.; Artur, A.G. *Trichoderma* in the promotion of growth and nutrition of dwarf cashew rootstock. *Revista Ciência Agronômica* **2021**, *52*, 1–9. [\[CrossRef\]](#)

90. Campos, B.F.; Araújo, A.J.C.; Felsemburgh, C.A.; Vieira, T.A.; Lustosa, D.C. *Trichoderma* contributes to the germination and seedling development of açaí palm. *Agriculture* **2020**, *10*, 456. [\[CrossRef\]](#)
91. Mo, Q.; Li, Z.A.; Sayer, E.J.; Lambers, H.; Li, Y.; Zou, B.L.; Wang, F. Foliar phosphorus fractions reveal how tropical plants maintain photosynthetic rates despite low soil phosphorus availability. *Funct. Ecol.* **2019**, *33*, 503–513. [\[CrossRef\]](#)
92. Oszako, T.; Voitka, D.; Stocki, M.; Stocka, N.; Nowakowska, J.A.; Linkiewicz, A.; Malewski, T. *Trichoderma asperellum* efficiently protects *Quercus robur* leaves against *Erysiphe alphitoides*. *Eur. J. Plant Pathol.* **2021**, *159*, 295–308. [\[CrossRef\]](#)
93. Harman, G.E.; Doni, F.; Khadka, R.B.; Uphoff, N. Endophytic strains of *Trichoderma* increase plants' photosynthetic capability. *J. Appl. Microbiol.* **2021**, *130*, 529–546. [\[CrossRef\]](#)
94. West, P.W. Do increasing respiratory costs explain the decline with age of forest growth rate? *J. For. Res.* **2020**, *31*, 693–712. [\[CrossRef\]](#)
95. Akaji, Y.; Inoue, T.; Tomimatsu, H.; Kawanishi, A. Photosynthesis, respiration, and growth patterns of *Rhizophora stylosa* seedlings in relation to growth temperature. *Trees* **2019**, *33*, 1041–1049. [\[CrossRef\]](#)
96. Woo, S.L.; Hermosa, R.; Lorito, M.; Monte, E. *Trichoderma*: A multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. *Nat. Rev. Microbiol.* **2022**, *1*, 312–326. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
97. Parkash, V.; Gaur, A.; Agnihotri, R.; Aggarwal, A. *Trichoderma harzianum* Rifai: A beneficial fungus for growth and development of *Abroma augusta* L. seedlings with other microbial bioinoculants. In *Trichoderma-The Most Widely Used Fungicide*; Shah, M.M., Sharif, U., Buhari, T.R., Eds.; IntechOpen: London, UK, 2019; Volume 1, p. 91. [\[CrossRef\]](#)
98. Stewart, A.; Hill, R. Applications of *Trichoderma* in plant growth promotion. In *Biotechnology and Biology of Trichoderma*; Gupta, V.G., Schmoll, M., Estrella, A.H., Upadhyay, R.S., Druzhinina, I., Tuohy, M., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014; Volume 1, pp. 415–428. [\[CrossRef\]](#)
99. Peccatti, A.; Rovedder, A.P.M.; Steffen, G.P.K.; Maldaner, J.; Camargo, B.; Dalcul, L.P.; Neeuenschwander, F. Biological inputs in promoting the growth of *Bauhinia forficata* Link. seedlings. *Ciência Florest.* **2020**, *30*, 367–379. [\[CrossRef\]](#)
100. Griebeler, A.M.; Araujo, M.M.; Tabaldi, L.A.; Steffen, G.P.; Turchetto, F.; Rorato, D.G.; Barbosa, F.M.; Berghetti, A.L.P.; Nhantumbo, L.S.; Lima, M.S. Type of container and *Trichoderma* spp. inoculation enhance the performance of tree species in enrichment planting. *Ecol. Eng.* **2021**, *169*, 106317. [\[CrossRef\]](#)
101. Díaz, T.S.; González, L.C. Efecto bioestimulante de *Trichoderma harzianum* Rifai en posturas de Leucaena, Cedro y Samán. *Colomb. For.* **2018**, *21*, 81–90. [\[CrossRef\]](#)
102. Batista, K.O.M.; Silva, D.V.; Nascimento, V.L.; Souza, D.J. Effects of *Trichoderma strigosellum* in *Eucalyptus urophylla* development and leaf-cutting ant behavior. *J. Fungi* **2022**, *8*, 15. [\[CrossRef\]](#)
103. Santos, M.F.; Costa, D.L.; Vieira, T.A.; Lustosa, D.C. Effect of *Trichoderma* spp. fungus for production of seedlings in *Enterolobium schomburgkii* (Benth.) Benth. *Aust. J. Crop Sci.* **2019**, *13*, 1706–1711. [\[CrossRef\]](#)
104. Zhang, R.; Yan, Z.; Wang, Y.; Chen, X.; Yin, C.; Mao, Z. Effects of *Trichoderma harzianum* fertilizer on the soil environment of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under replant conditions. *HortScience* **2021**, *56*, 1073–1079. [\[CrossRef\]](#)
105. Sousa, W.N.; Brito, N.F.; Felsemburgh, C.A.; Vieira, T.A.; Lustosa, D.C. Evaluation of *Trichoderma* spp. isolates in cocoa seed treatment and seedling production. *Plants* **2021**, *10*, 1964. [\[CrossRef\]](#)
106. Grossnickle, S.C. Why seedlings survive: Influence of plant attributes. *New For.* **2012**, *43*, 711–738. [\[CrossRef\]](#)
107. Toca, A.; Moler, E.; Nelson, A.; Jacobs, D.F. Environmental conditions in the nursery regulate root system development and architecture of forest tree seedlings: A systematic review. *New For.* **2022**, *53*, 1113–1143. [\[CrossRef\]](#)
108. Ferreira, N.C.F.; Rocha, E.C.; Rodrigues, F.; Santos, S.X.; Oliveira, T.A.S.; Duarte, E.A.A.; Carvalho, D.D.C. *Trichoderma* spp. in growth promotion of *Jacaranda mimosifolia* D. Don. *J. Agric. Stud.* **2021**, *9*, 335–346. [\[CrossRef\]](#)
109. Raghu, H.B.; Ashwin, R.; Ravi, J.E.; Bagyaraj, D.J. Microbial consortium improved growth and performance of teak (*Tectona grandis* Lf.) in nursery and field trials. *Biol. Sci.* **2020**, *90*, 903–909. [\[CrossRef\]](#)
110. Oliveira, H.B.; Rocha, E.; Teles, T.; Florentino, L.A. Microbial activity in the agricultural and forestry system. *Res. Soc. Dev.* **2022**, *11*, e56211226184. [\[CrossRef\]](#)
111. Chagas Júnior, A.F.; Dias, P.C.; Santos, G.R.; Ribeiro, A.S.N.; Sousa, K.Â.O.; Chagas, L.F.B. *Trichoderma* as a growth promoter in *Astronium urundeuva* (M. Allemão) Engl. *Sci. Plena* **2022**, *18*, 1–10. [\[CrossRef\]](#)
112. Liu, W.Y.Y.; Poobathry, R. Biofertilizer utilization in forestry. In *Biofertilizers*; Inamuddin, A.M.I., Boddula, R., Rezakazemi, M., Eds.; Wiley: Cambridge, MA, USA, 2021; Volume 1, pp. 1–37. [\[CrossRef\]](#)
113. Avila, G.M.A.; Gabardo, G.; Clock, D.C.; Lima Júnior, O.S. Use of efficient microorganisms in agriculture. *Res. Soc. Dev.* **2021**, *10*, e40610817515. [\[CrossRef\]](#)
114. Poveda, J.; Eugui, D. Combined use of *Trichoderma* and beneficial bacteria (mainly *Bacillus* and *Pseudomonas*): Development of microbial synergistic bio-inoculants in sustainable agriculture. *Biol. Control* **2022**, *176*, 105100. [\[CrossRef\]](#)
115. Hakim, S.; Naqqash, T.; Nawaz, M.S.; Laraib, I.; Siddique, M.J.; Zia, R.; Mirza, M.S.; Imran, A. Rhizosphere engineering with plant growth-promoting microorganisms for agriculture and ecological sustainability. *Front. Sustain. Food Syst.* **2021**, *5*, 617157. [\[CrossRef\]](#)

116. Dabrowska, G.B.; Garstecka, Z.; Trejgell, A.; Dabrowski, H.P.; Konieczna, W.; Szyp-Borowska, I. The impact of forest fungi on promoting growth and development of *Brassica napus* L. *Agronomy* **2021**, *11*, 2475. [[CrossRef](#)]
117. Antoszewski, M.; Mierek-Adamska, A.; Dabrowska, G.B. The importance of microorganisms for sustainable agriculture—A review. *Metabolites* **2022**, *12*, 1100. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
118. Chaiya, L.; Gavinlertvatana, P.; Teaumroong, N.; Pathom-Aree, W.; Chaiyasen, A.; Sungthong, R.; Lumyong, S. Enhancing teak (*Tectona grandis*) seedling growth by rhizosphere microbes: A sustainable way to optimize agroforestry. *Microorganisms* **2021**, *9*, 990. [[CrossRef](#)]
119. Syafiq, T.H.T.M.; Nusaibah, S.A.; Rafii, M.Y. Effectiveness of bioinoculants *Bacillus cereus* and *Trichoderma asperellum* as oil palm seedlings growth promoters. *Pertanika J. Trop. Agric. Sci.* **2021**, *44*, 157–170. [[CrossRef](#)]
120. Aguirre, M.I.H.; Vega, W.O.; Peláez, J.L.D. Co-inoculation with beneficial soil microorganisms promoted growth and quality of *Tabebuia rosea* seedlings. *For. Sci.* **2022**, *68*, 95–103. [[CrossRef](#)]
121. Bettgowda, R.H.; Nanjundappa, A.; Revanna, A.; Manchegowda, H.K.; Ravi, J.E.; Bagyaraj, D.J. Selected microbial consortia promotes *Dalbergia sissoo* growth in the large-scale nursery and wastelands in a semi-arid region in India. *J. For. Res.* **2021**, *26*, 448–454. [[CrossRef](#)]
122. Zydlik, Z.; Zydlik, P.; Wieczorek, R. The effects of bioinoculants based on mycorrhizal and *Trichoderma* spp. fungi in an apple tree nursery under replantation conditions. *Agronomy* **2021**, *11*, 2355. [[CrossRef](#)]
123. Macías Rodríguez, L.; Contreras Cornejo, H.A.; Adame Garnica, S.G.; Del Val, E.; Larsen, J. The interactions of *Trichoderma* at multiple trophic levels: Inter-kingdom communication. *Microbiol. Res.* **2020**, *240*, 126552. [[CrossRef](#)]
124. Chaudhary, P.; Xu, M.; Ahamad, L.; Chaudhary, A.; Kumar, G.; Adeleke, B.S.; Verma, K.K.; Hu, D.-M.; Širić, I.; Kumar, P.; et al. Application of synthetic consortia for improvement of soil fertility, pollution remediation, and agricultural productivity: A Review. *Agronomy* **2023**, *13*, 643. [[CrossRef](#)]
125. Zhang, Z.; Mallik, A.; Zhang, J.; Huang, Y.; Zhou, L. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on inoculated seedling growth and rhizosphere soil aggregates. *Soil Tillage Res.* **2019**, *194*, 104340. [[CrossRef](#)]
126. Zhang, P.; Dumroese, R.K.; Pinto, J.R. Organic or inorganic nitrogen and rhizobia inoculation provide synergistic growth response of a leguminous forb and tree. *Front. Plant Sci.* **2019**, *10*, 1308. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
127. Chaín, J.M.; Tubert, E.; Graciano, C.; Castagno, L.N.; Recchi, M.; Pieckenstain, F.L.; Estrella, M.J.; Gudesblat, G.; Amodeo, G.; Baroli, I. Growth promotion and protection from drought in *Eucalyptus grandis* seedlings inoculated with beneficial bacteria embedded in a superabsorbent polymer. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 18221. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Natália Cássia de Faria Ferreira

CAPÍTULO 2

***Trichoderma* spp. NO CRESCIMENTO DE MUDAS DE MOGNO-
AFRICANO (*Khaya senegalensis* (Desr) A. Jus.)**

Orientador: Prof. Dr. Alcides Gatto

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Diego Costa Carvalho

Brasília, 27 de janeiro de 2025

RESUMO

FERREIRA, N. C. F. *Trichoderma* spp. no crescimento de mudas de mogno-africano (*Khaya senegalensis* (Desr) A. Jus.). Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Uma das premissas da silvicultura moderna é atingir elevados índices de qualidade de mudas atrelada à qualidade e a viabilidade dos solos, a fim de alavancar os parâmetros de crescimento, minimizar os custos de produção e garantir a sustentabilidade no sistema de produção. Mediante à esfera de redução na entrada de fertilizantes químicos durante o desenvolvimento de mudas, uma alternativa viável se refere ao uso de microrganismos bioestimuladores de crescimento. Considerando o cultivo de espécies madeireiras nobres, consolidadas no mercado mundial, O objetivo do trabalho foi avaliar o desenvolvimento de mudas de *Khaya senegalensis* (Desr) A. Juss (Mogno-africano) sob tratamento do solo com cepas de *Trichoderma* spp., e analisar uma breve caracterização das características químicas do solo, inerentes às condições de fertilidade. Em condições de viveiro, o solo dos vasos foi tratado com cepas (*T. harzianum* ESALQ 1306; *T. harzianum* SIMBI T5; *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis* e *T. harzianum* IBLF 006 WP). Em seguida, houve o semeio de *K. senegalensis* e as avaliações foram realizadas aos 120 DAS (dias após a semeadura). As variáveis analisadas foram: altura da parte aérea, diâmetro do caule, comprimento radicular, biomassa fresca e seca total e índice de qualidade de Dickson. A cepa conjunta de *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis* sobressaiu-se em relação aos parâmetros de crescimento. Houve relação entre a parte aérea e o sistema radicular. Sob atividade simbiote, o bom desenvolvimento das raízes e a robustez do caule em altura e espessura, expõe o fascinante papel bioestimulante induzido por diferentes cepas de *Trichoderma*, com custo-efetividade viáveis. Os efeitos nos atributos químicos do solo (teor de fósforo (P), potássio (K) e matéria orgânica do solo (MOS)) foram potencializados mediante a interação com os fungos simbiotes, assim como a redução nos níveis de acidez potencial (H+Al), a fim de triangular a relação entre planta-microrganismo-solo. Os múltiplos efeitos fortalecem as mudas, no quesito de otimizar as condições de crescimento, bem como no fator econômico (redução no custo de produção, menor dependência externa por fertilizantes) e na conservação do solo, além de abrir espaço para pesquisas correlacionadas ao monitoramento à médio e longo prazo, correlacionados ao desenvolvimento das plantas em campo.

Palavras-chave: Planta-endófito-solo, sinergismo, produção de mudas, bioestimuladores.

ABSTRACT

The premise of modern forestry is to achieve high levels of seedling quality linked to the quality and viability of soils, leverage growth parameters, minimize production costs, and ensure sustainability in the production system. In terms of reducing the intake of chemical fertilizers during the development of seedlings, a viable alternative refers to the use of growth-stimulating microorganisms. Considering the cultivation of noble wood species consolidated on the world market, the objective of the work was to evaluate the development of *Khaya senegalensis* (Desr) A. Juss (African mahogany) seedlings under soil treatment with strains of *Trichoderma* spp. and to analyze a brief characterization of the chemical characteristics of the soil, inherent to fertility conditions. Under nursery conditions, the soil in the pots was treated with strains (*T. harzianum* ESALQ 1306; *T. harzianum* SIMBI T5; *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis* and *T. harzianum* IBLF 006 WP). Then, the sowing of *K. senegalensis*. The variables analyzed at 120 DAS (days after sowing) were shoot height, stem diameter, root length, total fresh and dry biomass, and Dickson quality index. The combined strain of *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis* stood out in growth parameters. There was a relationship between the aerial part and the root system. Under symbiotic activity, the better development of the roots and the robustness of the stem diameter in height and thickness expose the fascinating biostimulant role induced by different strains of *Trichoderma*, with viable cost-effectiveness. The effects on the chemical attributes of the soil (phosphorus (P), potassium (K), and soil organic matter (SOM)) were powerful through interaction with symbiotic fungi, as well as the reduction in potential acidity levels (H+Al) to triangulate the relationship between plant-microorganism-soil. The multiple effects strengthen the seedlings in terms of optimizing growth conditions, as well as the economic factor (reduction in production costs, less external dependence on fertilizers) and soil conservation, in addition to opening space for research correlated to medium and long-term monitoring, agree to the development of plants in the field.

Keywords: Plant-endophyte-soil, synergism, seedling production, biostimulants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Serviços ecossistêmicos prestados pelo solo: Suporte, regulação, culturais e provisão.	25
Figura 2. Etapas do processo de condução experimental.	30
Figura 3. Variáveis canônicas referente a produção de mudas de <i>Khaya senegalensis</i> sob tratamento do solo com suspensão de cepas de <i>Trichoderma</i> spp.....	34
Figura 4. Variáveis de crescimento de qualidade de mudas de <i>Khaya senegalensis</i>	36
Figura 5. Mudas de <i>Khaya senegalensis</i> sob interação com fungos do gênero <i>Trichoderma</i> , em ambiente protegido.	37
Figura 6. Efeito nas características químicas do solo, oriundo da ação de cepas de <i>Trichoderma</i> spp. via interação com mudas de <i>Khaya senegalensis</i>	39
Figura 7. Benefícios oriundos do sistema de produção de mudas: solo-planta-microrganismo.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características químicas e físicas do Latossolo Vermelho-Amarelo.	29
Tabela 2. Parâmetros de crescimento de <i>K. senegalensis</i> em casa de vegetação, com solo de vasos tratados com a suspensão de <i>Trichoderma</i> spp.....	33

HIGHLIGHTS

Khaya senegalensis + Trichoderma sp.

silvicultura
mudas
manejo
técnica
sustentável
simbiose
interação
microorganismo
fertilidade
solos
qualidade

SILVICULTURA
SUSTENTÁVEL

A interação que funciona



1 INTRODUÇÃO

O solo é a base da vida em todos os ecossistemas terrestres, conforme as suas multifuncionalidades a nível ambiental, econômico e social. No entanto, desde os primórdios das civilizações, o solo tem sido negligenciado através de intensivas práticas de degradação, o que têm promovido a perda de suas funções gerais e qualidade física-química-biológica (KOPITTKKE et al., 2023). A insustentabilidade tem chamado atenção nos últimos anos, uma vez que, as crescentes e constantes oscilações climáticas revelam os efeitos nos processos de degradação oriundos de atividades antrópicas de alto impacto, enfatizando a preocupação em torno da temática “saúde dos solos”, voltada a conservar a capacidade em regular e viabilizar toda e qualquer forma de vida (DAVIS; HUGGINS; REGANOLD, 2023).

De acordo com as pressões inerentes à mitigação das alterações climáticas, a produção agrícola (alimentos, fibras, madeira e energia) e conservação ambiental, mais do que nunca, a busca pela implementação de estratégias sustentáveis de uso. A gestão e longevidade do solo têm sido almejadas, com ênfase no bioma Cerrado, com alta biodiversidade, caracterizado por amplas formações florísticas e geológicas, com espécies endêmicas, tornando-o altamente resiliente (SIMON et al., 2022; SELLAMI; LAVINI, 2023). Apesar da maleabilidade existente no Cerrado, os solos são recursos finitos, propícios aos processos de erosão, lixiviação, acidificação e desertificação, fatores que inferem na improdutividade e inativação (SCHWAMBACK et al., 2024).

A produção florestal se enquadra no quesito de suprir a demanda gradual por produtos madeireiros e energia, e acima de tudo, a prestação de serviços ecossistêmicos vitais à regulação do clima, fixação de carbono e sustentabilidade (LAMHAMED; KHASA; PEPIN, 2024). No setor silvicultural brasileiro, o gênero *Khaya* exótico da África Ocidental, possui elevado potencial econômico em função de sua qualidade madeireira (nobre), o que explica a expansão de plantios comerciais (FARIA et al., 2024).

A espécie *Khaya senegalensis* (Desr) A. Jus., conhecida como mogno-africano, pertence à família Meliaceae, possui grande porte (até 35 m de altura), sistema radicular bem desenvolvido, boa performance em campo, destinada comercialmente aos usos mais nobres, como os setores moveleiro e naval, construção, painéis e laminados (REIS et al., 2021). A multifuncionalidade da espécie transpõe o caráter econômico e abrange elevado potencial ecossistêmico, desde o maior estoque e produção de biomassa, até o armazenamento de carbono

(C) e nitrogênio (N) em relação as florestas nativas brasileiras, útil na mitigação dos efeitos do aquecimento global (GOMES et al., 2024).

Com base nas características desejáveis quanto ao potencial madeireiro, a espécie torna-se recomendada para produção em larga escala, destinada aos plantios de florestamento (SALAMI et al., 2023). A madeira compõe o principal produto do mogno-africano e, por se tratar de uma espécie nobre, há grande variabilidade na precificação do metro cúbico (m^3) da espécie, conforme o diâmetro, tipo de venda (em pé, tora, serrada e seca) e quais tratamentos envolvidos durante o processamento (IBÁ, 2024). No mercado internacional o valor da madeira em lâmina obteve um salto de 30% em quatro meses (1.575 euros em janeiro para 2.052 euros em abril de 2024), para tanto, o Brasil tem investido fortemente em tecnologia em busca de maior eficiência e redução dos custos na produção florestal (ITTO, 2024).

O elevado potencial econômico em torno da produção da espécie, torna o processo de produção de mudas cada vez mais exigente, através do requerimento por mudas eretas, sadias e robustas (reflexo de um sistema radicular bem desenvolvido – ausência de enovelamentos), pois mudas altamente qualificadas possuem alto valor comercial, com variações de acordo com o local de produção (MARIOTTI et al., 2023). Outro ponto forte do cultivo de mogno africano se refere à baixa disponibilidade de plantios comerciais de mogno brasileiro (altamente requerido no mercado silvicultor), o que aumenta a procura pela espécie exótica, com alta popularidade nos EUA (FRANÇA et al., 2024).

Em território brasileiro, as condições climáticas de temperatura e disponibilidade hídrica desejáveis são propícias ao cultivo de mogno-africano, com ênfase à espécie *K. senegalensis* (SANTOS NETO et al., 2023). Apesar das vantagens, um ponto limitante atribui-se ao status nutricional das plantas, principalmente em solos do Cerrado com baixa fertilidade, tornando-se um problema à produção de mudas (SMIDERLE et al., 2020; LAMBERS, 2022). Um dos principais nutrientes limitados pelas condições naturais dos solos intemperizados se refere ao fósforo (P), conforme a perspicaz capacidade de sorção e retenção, de modo a exigir alternativas sustentáveis à liberação do macronutriente ligado aos óxidos de ferro (Fe), alumínio (Al) e em menor magnitude ao monoéster-P (RODRIGUES et al., 2023).

Os níveis de P retidos nos solos são preocupantes, principalmente em solos destinados à produção de alimentos, fibras, madeira e energia, estima-se a média global de P inorgânico lábil de 187 kg P ha^{-1} para terras agrícolas e 91 kg P ha^{-1} para pastagens (ALEWELL et al., 2020; RINGEVAL et al., 2024). Mediante aos fatos, a reversão do status nutricional poderá ser factível conforme a adoção do manejo adequado, aliado ao desenvolvimento de novas tecnologias, capazes de viabilizar o sistema produtivo e promover segurança em torno das

reservas disponíveis de P (BARŁÓG, 2023; GALLEGO et al., 2024; MCDOWELL; PLETNYAKOV; HAYGARTH, 2024).

Os demais macronutrientes e micronutrientes essenciais às plantas apresentam a mesma realidade, sob condições de uso demasiado fertilizantes (HUANG et al., 2024). A silvicultura moderna busca atingir máximos índices de qualidade de mudas atrelada à qualidade e viabilidade dos solos, a fim de otimizar a fertilidade, minimizar os custos de produção e garantir a sustentabilidade, voltadas à esfera de redução na entrada de fertilizantes (ROS et al., 2020). As tecnologias destinadas ao incremento no potencial de germinação das sementes e desenvolvimento de plântulas apresentam o objetivo de disponibilizar condições vitais à produção de mudas mais vigorosas, uniformes e com elevado padrão comercial em curto período (RIIKONEN; LUORANEN, 2018).

A obtenção de mudas robustas é intrinsecamente correlacionada aos parâmetros de crescimento, advindos de atributos morfológicos (altura, diâmetro do coleto e sistema radicular) e fisiológicos (absorção de água e nutrientes pela planta) (LOPES et al., 2021). Para maximizar a capacidade de sobrevivência, o desenvolvimento e a adaptação de mudas, o uso de bioestimuladores ao crescimento vêm sendo explorada, principalmente no contexto de espécies lenhosas, as quais possuem grande potencial econômico e carência de tecnologias viáveis à produção.

Os fungos *Trichoderma* são conhecidos pela capacidade em otimizar a síntese de compostos bioativos que desencadeiam o crescimento vegetal, assim como em espécies lenhosas. A versatilidade funcional dos fungos simbiotes refere-se a uma alternativa viável a lacuna em questão, uma vez que, a interação entre planta-microrganismo promove benefícios ambientais, sociais e econômicos, pois minimiza a utilização de produtos químicos e a degradação de solo, além de corroborar com a redução no tempo de formação de mudas através do estímulo ao processo de germinação e ao incremento na qualidade da produção (ASGHAR et al., 2024).

O bioestímulo induzido percorre a promoção do crescimento de forma direta, tanto pelo incremento na capacidade de germinação, nos parâmetros de crescimento e na disponibilização de nutrientes minerais essenciais na solução do solo (ciclagem ou solubilização); e indireta, através da adaptação as condições de estresse biótico e/ou abiótico e a conservação da qualidade dos solos (PALANISAMY et al., 2025; PRASANNATH et al., 2025). Os benefícios são oriundos da regulação de metabólitos, compostos orgânicos e/ou inorgânicos, efeitos hormonais, dentre outros (KAMAL; SARAHAN, 2025; MUNNYSHA et al., 2025).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a interação entre planta-microrganismo simbiote, através da produção de mudas de mogno-africano (*Khaya senegalensis* (Desr) A. Jus.) sob tratamento do solo com cepas de *Trichoderma* spp., em ambiente protegido.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar os parâmetros morfológicos de *Khaya senegalensis*, via tratamento com cepas de *Trichoderma* spp.
- Caracterizar os atributos químicos do solo específicos com o crescimento das mudas de *Khaya senegalensis*.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Microrganismos potenciais: Habilidades do fungo *Trichoderma*

O gênero *Trichoderma* é a fase imperfeita de *Hypocrea*, pertencente ao Reino Fungi, Filo Ascomycota, Classe Sordariomycetes, Ordem Hypocreales e Família Hypocreaceae (WAGHUNDE et al., 2016). Compreende muitas espécies de fungos filamentosos de vida livre em múltiplos ecossistemas, desde regiões tropicais a temperadas, possui crescimento acelerado, são altamente ativos no solo, associados à rizosfera e ao processo de decomposição de resíduos orgânicos, e raramente se correlaciona às doenças de plantas (BANERJEE; HEIJDEN, 2022).

Os fungos *Trichoderma* spp. têm conídios verdes brilhantes e um conidióforo repetidamente ramificado, são simbioses de plantas oportunistas e avirulentos e têm reprodução assexuada pela produção de conídios e clamidósporos e em habitats selvagens por ascósporos (KHAN; MOHIDDIN, 2018). Nos últimos anos, houve um aumento exponencial no número de espécies identificadas no gênero (CAI; DRUZHININA, 2021). Embora vários estudos tenham sido realizados para avaliar a capacidade deste gênero como biofertilizante e sua interação com diferentes plantas hospedeiras, a compreensão completa de como eles funcionam e se comunicam ainda não foi descoberta (ABDULLAH et al., 2024).

Com base na complexa miríade funcional de *Trichoderma*, um dos mecanismos endofíticos se trata da promoção do crescimento de diversas espécies vegetais, iniciando-se através da comunicação e posterior colonização do sistema radicular, via indução de alterações fisiológicas no metabolismo vegetal (ALIZADEH et al., 2024). A interação inicia-se na rizosfera após a liberação de exsudatos (açúcares, aminoácidos, vitaminas, hormônios), mucilagem e células descamadas pelas raízes, pois abrange o envio e o recebimento de sinais moleculares, altamente estratégicos quanto ao estabelecimento em plantas hospedeiras (CHRISTIAN; PERLIN, 2024).

Os endófitos são amplamente favorecidos pela sinalização enviada pela planta, contudo, a interação ultrapassa a rizosfera, estendendo-se até o tecido vegetal, sustentada pela indução de mecanismos bioestimuladores vegetais (RANI et al., 2023; KU et al., 2024). Sob o ponto de vista prático, a interação é promissora, pois permite atingir elevados índices de crescimento de plantas, de acordo com a liberação de substâncias, as quais serão assimiladas pelo sistema radicular vegetal, além de solubilizar nutrientes e disponibilizá-los às plantas (THEPBANDIT; ATHINUWAT, 2024). Ao avaliar-se os benefícios oriundos de tal interação, além da promoção de crescimento, a simbiose pode corroborar com a indução de defesa das plantas diante as

condições adversas, como os estresses bióticos (incidência de pragas e doenças) e abióticos (déficit hídrico, salinidade, toxidez) (EMAN et al., 2023).

Os mecanismos responsáveis por estimular o crescimento vegetal e corroborar com a saúde do solo são amplos, com destaque aos metabólitos secundários, (compostos orgânicos voláteis (VOCs) envolvidos na modulação e arquitetura radicular, bem como garante maior resistência das plantas às condições estressantes, porém, o efeito de cada estirpe de *Trichoderma* é intrínseca, conforme a espécie vegetal em simbiose, bem como as condições edafoclimáticas (JIMÉNEZ-BREMONT et al., 2024). A secreção de sinais hormonais (dicetopiperazinas (DKPs), dissulfeto de dimetila (DMDS), dimetil-hexadecilamina (DMHDA), indóis e efetores do sistema de secreção tipo III (T3SEs) e hormônios (auxina (AIA), citocinina (CK) e ácido jasmônico (JA), promove o acréscimo no volume, comprimento de raízes laterais e pêlos radiculares, com efeito direto na regulação do crescimento (LI et al., 2024).

De forma isolada ou associada, *Trichoderma* abrange uma série de funcionalidades, como a ação no controle de fitopatógenos (antagonismo, parasitismo ou competição), sem provocar danos às comunidades microbiológicas as quais co-interage positivamente (CONTRERAS et al., 2024b). A comercialização do fungo apresenta expansão considerável nos últimos anos, através de bioformulações de uma espécie ou mais. De forma análoga a quantidade de espécies existentes, as oportunidades e aplicações de *Trichoderma* estendem-se à capacidade em produzir terpenoides, úteis desde as agroindústrias até o tratamento de baixo custo para águas residuais, contaminadas com metais pesados, o que leva à necessidade em obter-se maior conhecimento em torno da capacidade de cada estirpe, a fim de alavancar as perspectivas e aplicabilidades do fungo no mercado global (BAI et al., 2023; KUMAR et al., 2023).

3.2 Solos tropicais (Latosolos): Características, funções e produção de mudas

O sistema solo evidencia a sua complexidade e envolve os conceitos de atmosfera, biosfera, hidrosfera e litosfera, pode ser compreendido como um sistema organizado e estruturado, base ao crescimento de microrganismos e plantas, com funções ecossistêmicas correlacionadas aos serviços de provisão (produção de energia, alimentos, combustíveis, água, medicamentos, fibras e madeira), suporte (formação dos solos, ciclagem de nutrientes, base para a construção), regulação (condições edafoclimáticas) e cultural (bem-estar, lazer, beleza cênica) (Figura 1) (YUDINA; KUZYAKOV, 2023). As atividades intensificadas de manejo e uso do solo devem atentar-se quanto a sua qualidade, no entanto, nas últimas décadas não temos observado tal fato, o que torna alarmante a interface planta-solo-microrganismo-atmosfera, sendo a saúde dos solos primordial à manutenção ecossistêmica (LU et al., 2024).



Figura 1. Serviços ecossistêmicos prestados pelo solo: Suporte, regulação, culturais e provisão.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) relata 13 classes de solos, com elevada variabilidade quanto suas características químicas, físicas e morfológicas, com predominância aos Latossolos, Argissolos, altamente intemperizados, ácidos e com baixa

fertilidade natural, de forma conjunta, abrangem cerca de 58% do território nacional. Enquanto, são considerados como solos de média a alta fertilidade, devido ao menor grau de intemperismo, os Cambissolos, Luvisolos, Neossolos, Nitossolos e Planossolos, ainda são designados os Espodossolos, Gleissolos, Organossolos, Plintossolos e Vertissolos (SANTOS, 2018).

Os Latossolos, em geral, são profundos de textura argilosa, com primazia em matéria mineral (solos minerais) representam grande dominância e distribuição no Planalto Central Brasileiro, principalmente no bioma Cerrado, o qual não obteve influência de geleiras ou invasões marinhas, caracterizado por seu aplainamento e processos erosivos. Por se tratar de uma região altamente intemperizada, grande parte do seu heterogêneo mosaico vegetal foi exposto as condições geológicas e geomorfológicas, como as oscilações climáticas quaternárias, desde climas semiáridos durante os períodos glaciais, até climas úmidos durante os interglaciais (LIRA-MARTINS et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2023).

O alto grau de acidez natural dos Latossolos ($H+Al > 7,9 \text{ cmol}_c/\text{dm}^{-3}$) constitui uma restrição à obtenção de maior potencial de produção, uma vez que, a baixa disponibilidade dos nutrientes no solo infere na redução da eficiência de absorção e uso de macro e micronutrientes pelas plantas (REIS et al., 2020). Tendo em vista que, o componente solo é parte fundamental no sistema de produção florestal, observa-se a necessidade em adotar-se práticas de manejo voltadas a manter sua qualidade física-química-biológica, além de propiciar a obtenção de plantas lenhosas vigorosas, produtivas e rentáveis (KUMAR et al., 2022).

Os solos possuem características intrínsecas e com elevada variabilidade em seus constituintes mineralógicos, a partir daí, a busca pela fertilidade dos solos é uma premissa para todo e qualquer sistema de produção (SANTOS et al., 2024). Para que um solo seja fértil existem duas possibilidades: ocorrência natural (fator não atribuído aos Latossolos) ou via manejo (fertilizantes biológicos, orgânicos e/ou minerais), por isso, a gestão eficaz dos nutrientes do solo transforma a capacidade de autorregulação, bem como garante a base ao desenvolvimento da vida (JAVED et al., 2022).

No solo, grande parte dos nutrientes minerais essenciais estão indisponíveis às plantas, o que interfere no suprimento adequado durante a produção de mudas (ZHAO et al., 2020). Uma estratégia para reduzir a restrição nutricional à produção de mudas, torna-se necessária potencializar a produção, pois os nutrientes são importantes durante a fase inicial de formação de plântulas, com ênfase ao P, pois o fornecimento inadequado (desequilibrado ou excessivo), restringe a formação e a qualidade de plantas (AOYAGI et al., 2024).

O macronutriente fósforo (P) existente nos solos ocorre em duas formas, orgânica (decomposição vegetal) e inorgânica (saís, como cálcio (Ca), ferro (Fe) e alumínio (Al)),

contudo, a maior parte está na forma inorgânica e insolúvel, indisponível às plantas (DIVJOT et al., 2021). O processo de formação de mudas é dependente do fornecimento contínuo de fertilizantes fosfatados, sendo a rocha fosfática a principal fonte mundial (MORALES et al., 2023). A elevada dependência por fertilizantes minerais representa um risco alarmante, capaz de provocar o desequilíbrio nutricional, contaminação do solo e dos recursos hídricos (eutrofização e danos aos sistemas aquáticos), aliado ainda ao alto custo de produção e insustentabilidade à médio e longo prazo, considerando a ineficiência em torno das reservas de já existentes no solo, mas indisponíveis (DEMAY et al., 2023).

No Brasil, os Latossolos são altamente intemperizados. Em sua composição, os maiores teores de argila contribuem com a fixação do P no solo, e em solos ácidos, acentuam-se a adsorção do macronutriente (ROY et al., 2016; ALOVISI et al., 2020). O uso contínuo de fertilizantes fosfatados é inversamente proporcional às taxas de recuperação do nutriente pelas plantas, por exemplo, na camada superficial do solo normalmente contém P (50 a 3.000 mg kg), mas a disponibilidade às plantas restringe-se à 0,1% (BEHL; JAISWAL; PABBI, 2024; IFTIKHAR et al., 2024). Para tanto, os bioinsumos ocupam papel importante no contexto de biodisponibilização nutricional, através da redução no uso de fertilizantes minerais e consequentemente menores índices de exploração das fontes fosfatadas.

3.3 Tripé da produção: Solo-planta-microrganismos

O desenvolvimento de mudas é dependente da gestão adequada de recursos essenciais ao funcionamento vegetal, sendo o estabelecimento a fase de maior vulnerabilidade a condições restritivas e adversas (estresses bióticos e abióticos) (BOONMAN et al., 2020). Os microrganismos do solo viabilizam o desenvolvimento de mudas, com mecanismos de ação correlacionados às respostas sob condições adversas, como estresses abióticos, via produção química (metabólitos secundários, enzimas hidrolíticas, fitormônios e sideróforos); estresses bióticos, mediante ações de biocontrole (parasitismo, competição e antagonismo); e aquisição nutricional (produção de metabólitos secundários, solubilização de fosfato, decomposição da matéria orgânica) a fim de promover maior disponibilização de nutrientes às plantas (KUBIAK et al., 2023; CONTRERAS-CORNEJO et al., 2024).

A comunicação planta-endófito envolve de forma direta e indireta a promoção do crescimento, à exemplo dos mecanismos de defesa à microrganismos antagônicos através da secreção de sinais químicos capazes de promover o alongamento de pêlos radiculares e favorecer o estabelecimento de *Trichoderma* sp., o qual atua como “defensor” via atuação hidrolítica no sistema radicular (KHAN et al., 2023). Indiretamente, de forma análoga ao controle de agentes fitopatogênicos, um dos mecanismos capazes de alavancar o crescimento de plantas ocorre através da nutrição vegetal adequada, pois as populações microbianas do solo são componentes-chave (PROCÓPIO; BARRETO, 2021). O solo compõe o sistema planta-endófito, o qual será otimizado através de melhorias na disponibilidade de nutrientes pela ação dinâmica desempenhada via interação solo-planta-bioestimulador (IBRAHIM et al., 2022).

Estima-se que aproximadamente dois terços (2/3) das terras agrícolas globais são deficientes em nutrientes, principalmente os níveis de P (ISLAM et al., 2024). O que se aplica as condições comumente observadas em território brasileiro, onde grande parte dos solos destinados ao cultivo de mudas possuem baixo teor nutricional. Ao se adotar uma estratégia sustentável útil na viabilidade de nutrientes, como o uso de fungos endófitos, ocorre a colonização rizosférica e inicia-se a atuação como fonte-sumidouro de nutrientes às plantas, principalmente pelos processos de solubilização e mineralização, por isso estudos em regiões tropicais, como o Cerrado são importantes, conforme os benefícios possivelmente obtidos e a escassez de estudos científicos (ATTAR et al., 2022; AOYAGI; KITAYAMA; TURNER, 2022).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Estadual de Goiás (UEG), Câmpus Ipameri (17°42'59.60" S, 48°08'39.52" W, 797 m), durante o período de julho 2022 a novembro de 2022. O solo utilizado para a produção de mudas de mogno-africano é classificado como Latossolo-Vermelho-Amarelo. Inicialmente, realizou-se a coleta do solo em campo, situado no município de Ipameri-GO, houve a composição de amostra composta, através da mistura de seis pontos amostrais, os quais foram destinados à análise laboratorial a fim de verificar as características físico-químicas do solo (Tabela 1).

Tabela 1. Características químicas e físicas do Latossolo Vermelho-Amarelo.

S	P Mehlich	K	Ca	Mg	Al	H+Al	MOS
	mg dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³			g kg ⁻¹
2,0	0,50	15,00	0,20	0,10	0,00	2,40	8,00
Na	Zn	Cu	Fe	Mn	Argila	Areia	Silte
		mg dm ³				Textura (g kg ⁻¹)	
3,8	0,5	0,6	23,40	8,10	370,00	540,00	90,00
CTC	V	Ca/CTC	Mg/CTC	K/CTC	H+Al/CTC	Carbono orgânico	pH
			%			g kg ⁻¹	CaCl ₂
2,76	12,91	2,00	3,62	1,45	86,96	4,64	5,10

Extratores: P e K Mehlich⁻¹; Ca - KCl 1 mol/L; H+Al – Acetato de cálcio 0,5 mol/L em pH 7. MOS – Matéria orgânica do solo.

A figura 2 ilustra as etapas de condução experimental. Com base nas limitações de fertilidade química existentes no solo amostrado, realizou-se a correção com calcário (6,26g vaso⁻¹), gesso (8,10g vaso⁻¹) e a adubação química (2,77g vaso⁻¹), com o formulado 04-28-08 (NPK). Para a condução do experimento, aos 30 dias após a correção do solo e a realização de adubação mineral, realizou-se o tratamento do solo, através do uso de bioestimuladores.

O desenho experimental foi em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com seis repetições (vasos). Para efeito comparativo, inclui-se um tratamento sem inoculação como controle. As cepas comerciais foram utilizadas na dose de 6 mL de suspensão (4,0 x 10⁸ conídios por vaso), ajustada conforme a concentração de cada bioinsumo (cepa comercial). A dose de cada suspensão foi diretamente distribuída na superfície do solo de cada vaso, constituídos por *Trichoderma harzianum* IBLF 006 WP, *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis*, *Trichoderma harzianum* ESALQ 1306, *Trichoderma harzianum* SIMBI T5.

Em seguida, houve a semeadura manual das sementes de *K. senegalensis* (três sementes por vaso, realizando o desbaste quando as plantas obtiveram 4-5 cm de altura, de modo a manter a planta mais vigorosa). A irrigação das mudas foi realizada diariamente, prioritariamente pela manhã, com o auxílio de regador manual, a fim de disponibilizar condições igualitárias de disponibilidade hídrica total as plantas.



Figura 2. Etapas do processo de condução experimental.

1) Coleta/amostragem de solo em campo; 2) Composição de amostragem composta do solo, através da mistura de distintos pontos de coleta, seguido de realização de análise laboratorial, a fim de verificar as características físico-químicas do solo; 3) Realização de adubação e correção da acidez

do solo, após os resultados da análise química; 4) Tratamento do solo com cepas comerciais de *Trichoderma* sp. e semeadura de mogno-africano (*Khaya senegalensis*).

Aos 120 dias após o semeio (DAS), realizou-se a coleta das plantas emergentes em cada vaso. Foi realizada a coleta das plantas formadas emergentes em cada vaso, e com o auxílio de fita métrica e paquímetro digital foram avaliados os parâmetros de altura da parte aérea (ALT), comprimento da raiz (CR), diâmetro do coleto (DC), massa fresca e seca da parte aérea (MFPA e MSPA, respectivamente) e massa fresca e seca radicular (MFRA e MSR respectivamente). As plantas foram divididas em parte aérea e raízes, destacadas e submetidas separadamente à estufa com circulação de ar forçada, com a temperatura aproximada de 65°C, pelo período de 48 horas, até a obtenção de peso de massa seca constante, em gramas.

Posteriormente, em balança digital foram quantificadas a massa fresca total (MFT) e a biomassa seca total (BIO) e calculado o índice de qualidade de Dickson (IQD), determinado em função da altura da parte aérea (ALT), do diâmetro do coleto (DC), da massa seca da parte aérea (MSPA) e da massa seca da raiz (MSR), por meio da fórmula (DICKSON; LEAF; HOSNER, 1960):

$$IQD = \frac{BIO}{ALT (cm) / DC(mm) MSPA (g) / MSR (g)}$$

Os dados referentes aos experimentos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Após verificados os pressupostos de normalidade e de homogeneidade de variâncias residuais dos dados, foram submetidos à análise de variáveis canônicas. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R (R CORE TEAM, 2024) e o pacote candisc.

5 RESULTADOS

5.1 Desenvolvimento de mudas de *Khaya senegalensis*

O desenvolvimento da altura das mudas de mogno-africano apresentou índices superiores, via tratamento de solo com *T. harzianum* ESALQ1306 e *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis*, em relação a cepa de *T. harzianum* IBLF 006WP, com variação (decréscimo em torno de 23%). Em discrepância, as mudas desenvolvidas em solo não inoculado com *Trichoderma* sp. obtiveram o menor desempenho observado, com decréscimo aproximado de 46% em relação aos maiores índices de altura obtidos (Tabela 2). Em continuidade, o diâmetro do coleto (DC) aponta similaridade à nível estatístico em ambas as cepas de *Trichoderma* sp. avaliadas, exceto as mudas não inoculadas com o microrganismo, com o menor incremento obtido (-60%) em DC (Tabela 2).

Um sistema radicular bem desenvolvido é a premissa do suprimento adequado de água e nutrientes às plantas. O comprimento radicular (CR) das mudas de *K. senegalensis*, constata padrão semelhante à altura de plantas. As cepas *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis* foram responsáveis pelo aumento da emissão de raízes em até 82% e 18%, comparado ao controle e demais cepas avaliadas, respectivamente. Os bioinsumos à base de *T. harzianum* ESALQ1306 e *T. harzianum* IBLF006 WP não diferiram entre si, à nível estatístico, sendo o controle a menor média de extensão em raiz obtida (Tabela 2).

Seguindo o padrão, quanto ao incremento em biomassa fresca, a cepa conjunta de *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis* manteve constância quanto ao potencial de indução de incrementos, tanto para a parte aérea (MFPA); o sistema radicular (MFRA), assim como as demais cepas, sob ausência de diferenças estatísticas (exceto *T. harzianum* IBFL 006WP) e massa fresca total (MFT), em similaridade ao equilíbrio promovido pela cepa *T. harzianum* ESALQ1306 (Tabela 2). As mudas de *K. senegalensis* não inoculadas apresentaram decréscimos aproximados de 62% (MFPA), 66% (MFRA) e 64% (MFT), em relação aos resultados promissores constatados (Tabela 2).

Em concordância com os resultados anteriores, a biomassa seca (BIO), manteve-se superior para as cepas *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis* e *T. harzianum* ESALQ1306, em contraste as mudas ausentes de inoculação correspondem a redução de biomassa em 79%. Em contrapartida, a cepa *T. harzianum* SIMBI T5 obteve o incremento em biomassa de 72%, seguido de *T. harzianum* IBLF006 WP (57%), comparadas ao tratamento controle (Tabela 2). Tais dados indicam que a comunicação entre muda-microrganismo é promissora, através de incrementos entre 57 e 79% em biomassa acumulada.

Tabela 2. Parâmetros de crescimento de *K. senegalensis* em casa de vegetação, com solo de vasos tratados com a suspensão de *Trichoderma* spp. Altura da parte aérea (ALT), comprimento da raiz (CR), diâmetro do coleto (DC), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFRA), massa fresca total (MFT), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), biomassa seca total (BIO) e o índice de qualidade de Dickson (IQD).

Tratamento ⁽¹⁾	ALT	CR	DC	MFPA	MFRA	MFT	MSPA	MSR	BIO	IQD
	cm		mm				g			
<i>T. harzianum</i> ESALQ 1306	18,70 a	59,16 a	6,29 a	6,44 b	8,38 a	14,81 a	2,93 a	4,51 a	7,44 a	2,08 a
<i>T. harzianum</i> SIMBI T5	16,94 b	50,10 b	5,83 a	5,41 b	6,70 a	12,11 b	2,53 a	3,02 a	5,55 b	1,47 b
<i>T. harzianum</i> + <i>T. asperellum</i> + <i>T. koningiopsis</i>	18,56 a	59,18 a	6,66 a	7,87 a	9,06 a	16,93 a	3,58 a	3,92 a	7,50 a	2,03 a
<i>T. harzianum</i> IBLF 006 WP	15,20 c	49,10 b	5,99 a	4,20 c	5,75 b	9,95 c	1,63 b	2,00 b	3,63 c	1,07 c
Controle	12,82 d	32,54 c	4,01 b	3,01 c	3,04 c	6,05 d	0,88 b	0,69 c	1,56 d	0,34 d
CV (%)	5,37	11,23	12,82	18,83	23,84	14,60	27,98	32,57	20,55	30,37

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Scott Knott ($P \leq 0,05$).

Conforme a análise de variáveis canônicas (Figura 3), a variação dos dados é validada via relação positiva entre as variáveis avaliadas (93,70% e 4,50%). Tal informação apoia a hipótese de pesquisa, quanto à viabilidade na promoção do crescimento de mudas de *K. senegalensis* na fase de viveiro, inoculadas com microrganismos benéficos. As cepas de *T. harzianum* ESALQ 1306 e *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis* destacaram-se para todas as variáveis analisadas (IQD, ALT, DC, CR, BFT e BIO). De fato, evidencia a eficácia propiciada ao bom desenvolvimento das mudas de *K. senegalensis*. A menor relação entre os parâmetros morfométricos analisados foi obtida com o tratamento controle, seguido da cepa de *T. harzianum* IBLF 006 WP.

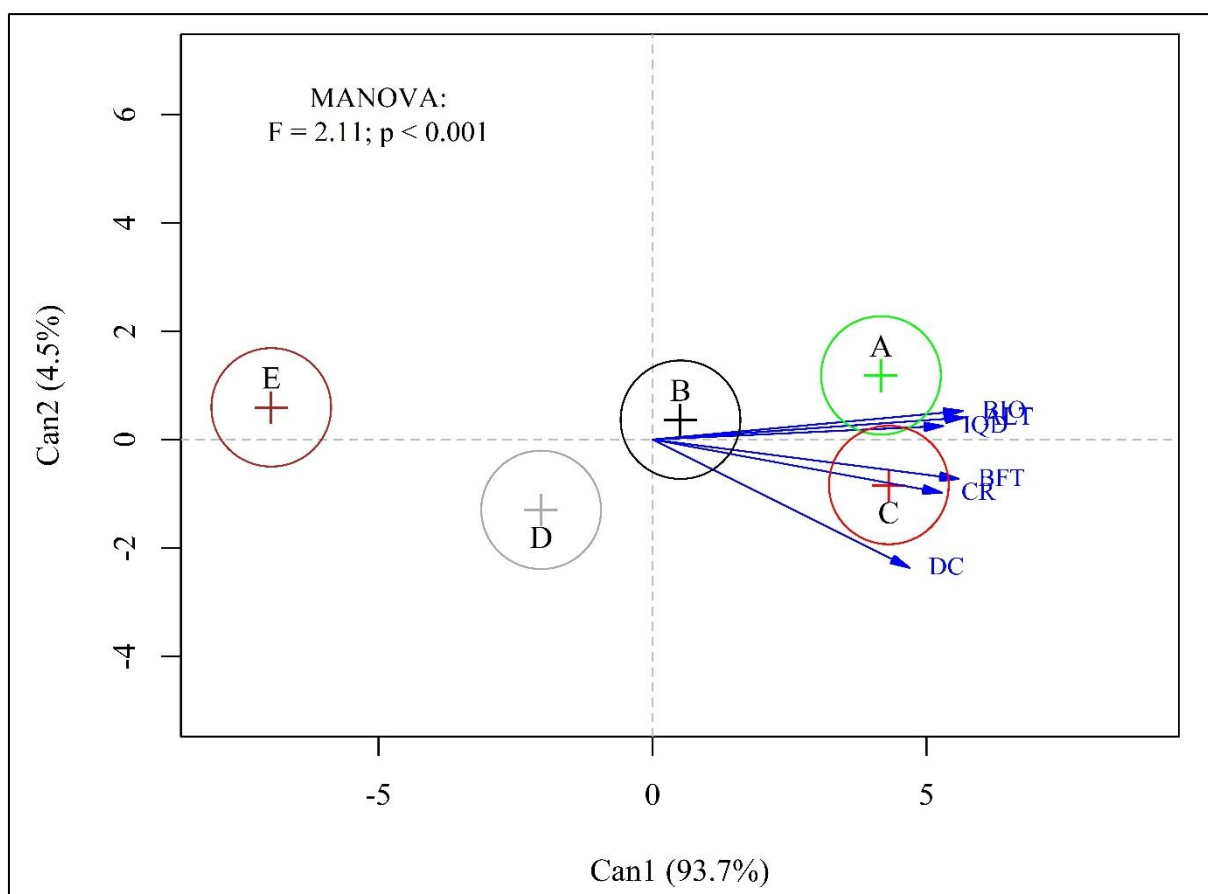


Figura 3. Variáveis canônicas referente a produção de mudas de *Khaya senegalensis* sob tratamento do solo com suspensão de cepas de *Trichoderma* spp.
(DC: Diâmetro do coleto; ALT: Altura; BFT: Biomassa fresca total; CR: Comprimento da raiz; BIO: Biomassa seca total; IQD: Índice de Qualidade de Dickson). (A: *T. harzianum* ESALQ 1306; B: *T. harzianum* SIMBI T5; C: *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis*; D: *T. harzianum* IBLF 006 WP; E: Controle).

O IQD é um importante mensurador na qualidade das mudas. Os resultados obtidos no complexo: *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis* e a cepa *T. harzianum* ESALQ1306, demonstraram maior influência das cepas na produção de mudas de *K. senegalensis* sob as condições de cultivo avaliadas. Em similaridade as demais variáveis morfométricas avaliadas, a inferioridade obtida sob ausência de inoculação com *Trichoderma* sp., com oscilações entre 68% e 84% (Figura 4).

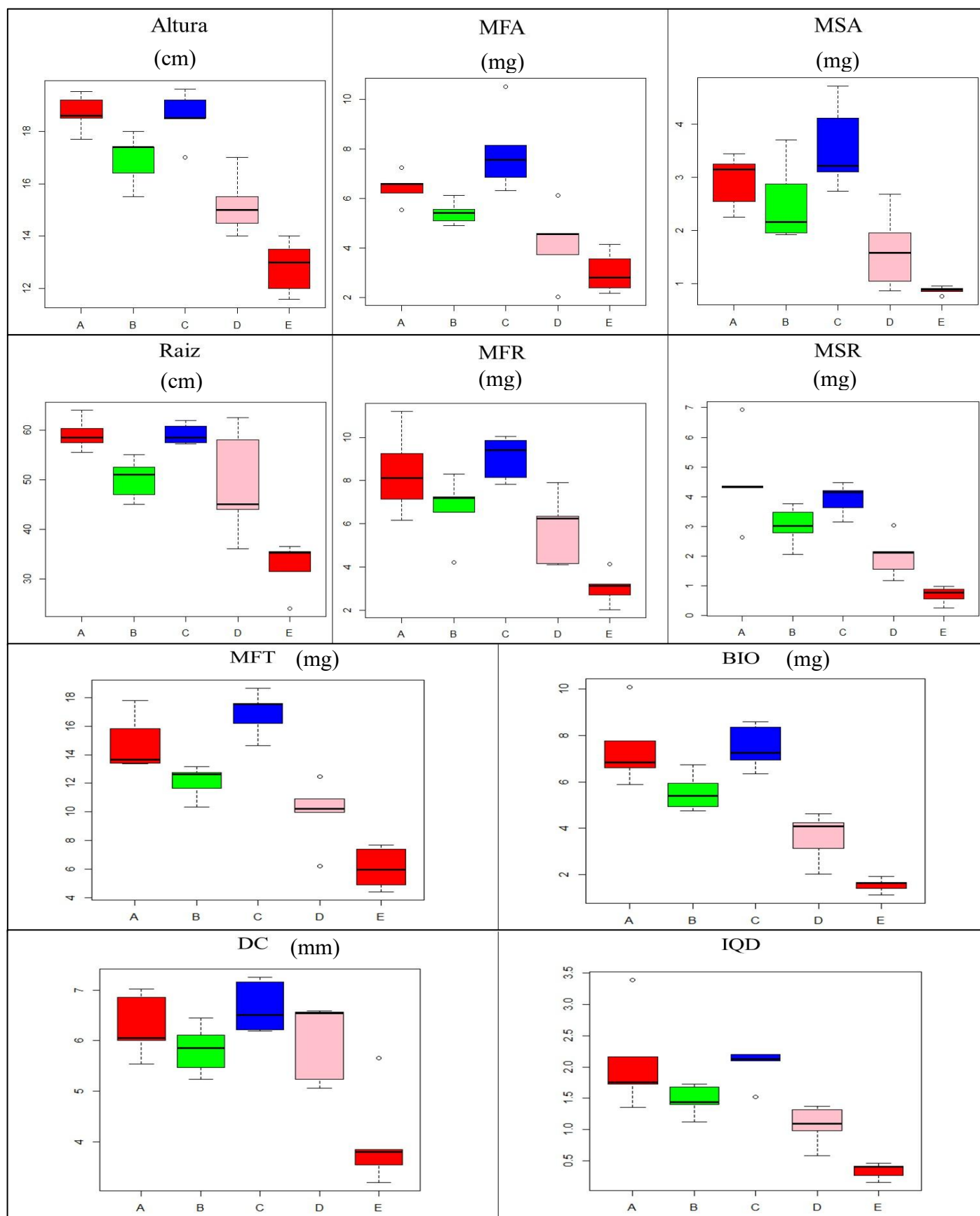


Figura 4. Variáveis de crescimento de qualidade de mudas de *Khaya senegalensis*.

Altura, raiz, diâmetro do coleto (DC), massa fresca da parte aérea (MFA), massa fresca da raiz (MFR), massa fresca total (MFT), massa seca da parte aérea (MSA), massa seca da raiz (MSR), biomassa seca total (BIO) e índice de qualidade de Dickson (IQD).

Os resultados obtidos revelam uma das abordagens mais eficazes e promissoras na promoção do crescimento de mogno-africano. O emprego dos bioestimuladores desencadearam nítidas alterações fenotípicas (visuais) e vias de sinalização (fisiológicas), que possibilitaram à integração de sinais entre diferentes os órgãos vegetais. A Figura 5 mostra a relação entre a parte aérea e o sistema radicular, o que valida as informações anteriormente citadas, pois sob atividade simbiote, observa-se um sistema radicular bem desenvolvido e a parte aérea com maior robustez, quando comparadas com as plantas sem inoculação. Essa constatação expõe a importância da bioestimulação induzida por diferentes cepas de *Trichoderma*, de forma simples com custo-efetividade viáveis.

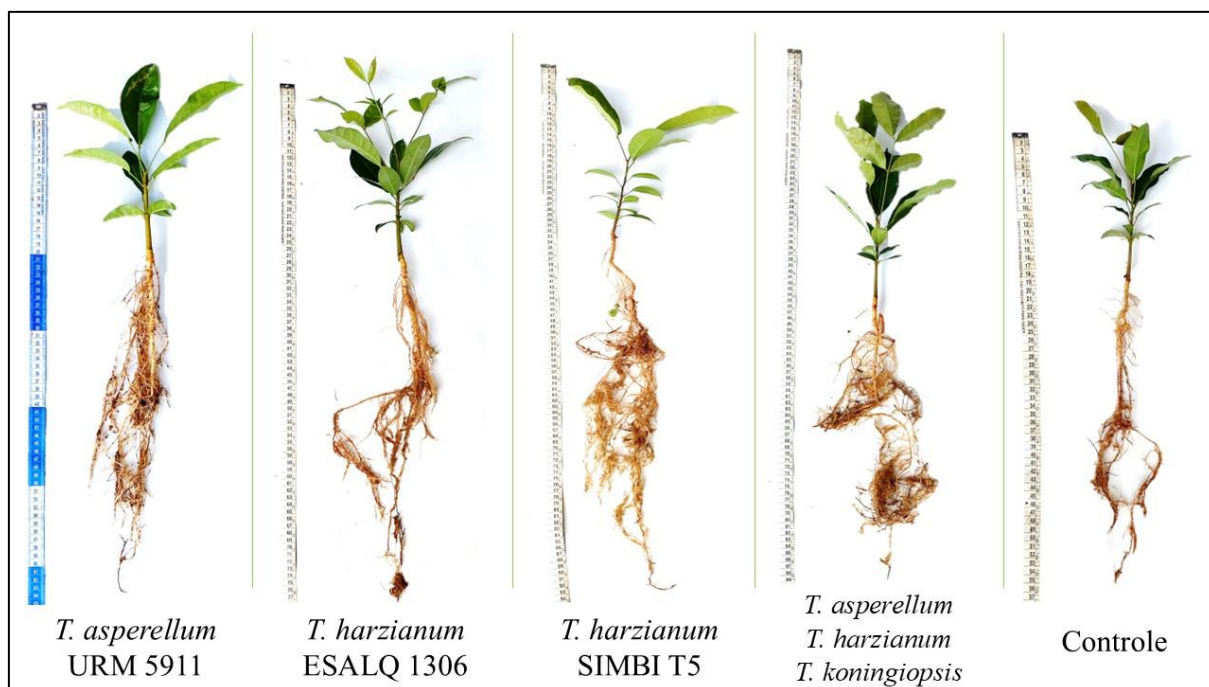


Figura 5. Mudas de *Khaya senegalensis* sob interação com fungos do gênero *Trichoderma*, em ambiente protegido.

5.2 Caracterização química do solo: Efeitos de *Trichoderma* spp. em *Khaya senegalensis*

Foram observados efeitos positivos na melhoria da qualidade química do solo, oriundos da ação dos fungos *Trichoderma* sp. no solo. De acordo com a análise química, houve incremento no conteúdo de matéria orgânica (MO), com ênfase para *T. harzianum* + *asperellum* + *koningiopsis*, quando comparado ao tratamento controle, solo ausente de inoculação (Figura 6). Ao avaliar a acidez do solo, os níveis de Al^{3+} , observa-se a mesma tendência anterior, o solo ausente em inoculação apresentou maior acidez, enquanto, as cepas de *Trichoderma* spp. reduziram a acidez do solo (Figura 6).

Em similaridade, o teor de fósforo (P) disponível obteve maior disponibilidade sob tratamento com *T. harzianum* ESALQ 1306, comparado ao tratamento controle (sem microrganismo) (Figura 6). O incremento nos níveis de potássio (K) no solo sobressaiu-se para *T. harzianum* IBLF 006WP e *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis*, enquanto, em solo não inoculado houve redução de 63,30% nos níveis potássicos, em comparação aos resultados obtidos via bioestimuladores (Figura 6).

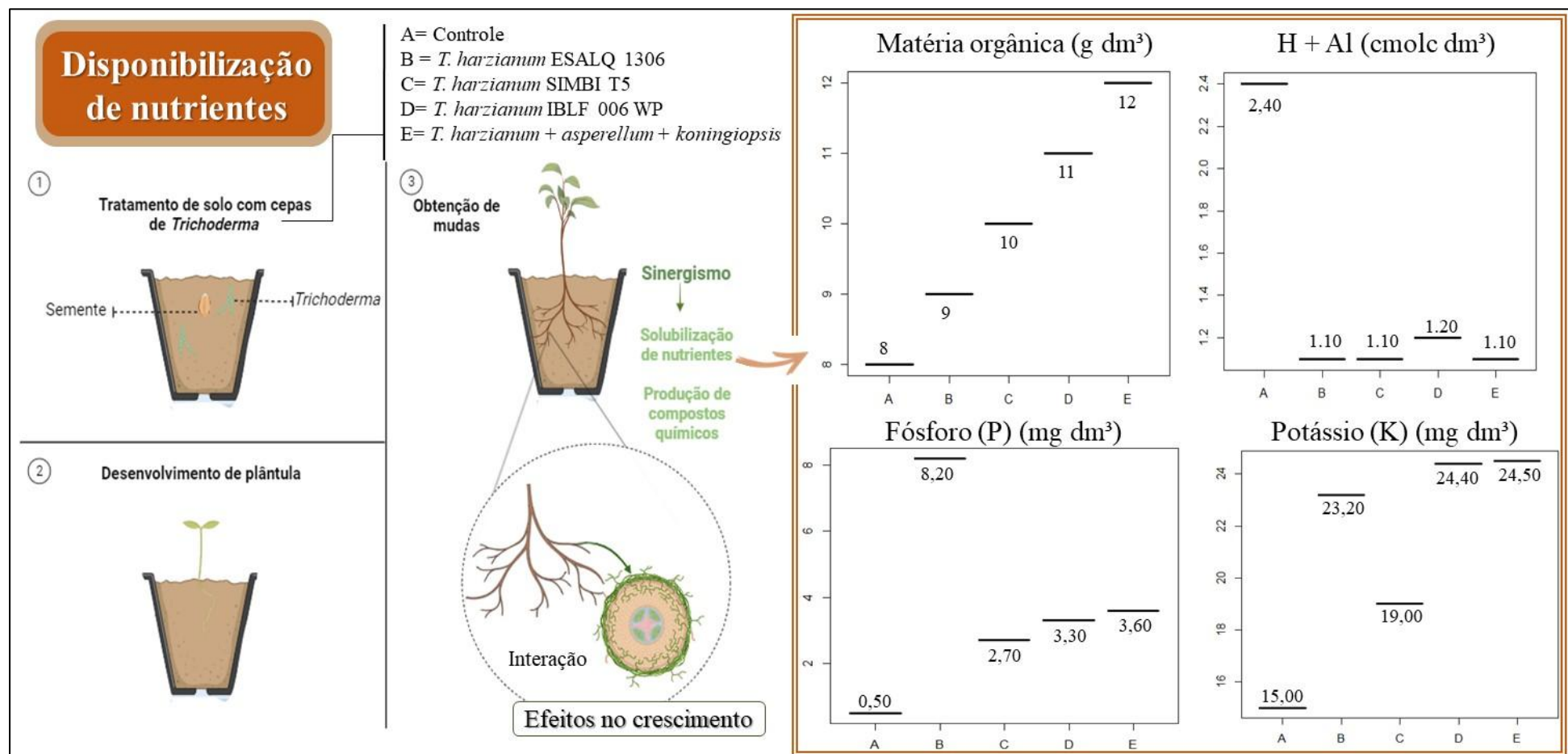


Figura 6. Efeito nas características químicas do solo, oriundo da ação de cepas de *Trichoderma* spp. via interação com mudas de *Khaya senegalensis*.

6 DISCUSSÃO

6.1 Desenvolvimento de mudas de *Khaya senegalensis*

Os resultados observados indicam o sucesso da adoção de fungos simbiontes na produção de mudas de uma espécie lenhosa, com valor alto agregado. No entanto, vale considerarmos que, as vias de ação de indução do crescimento são amplas, principalmente durante a fase de formação de mudas, guiada pela intensa atividade fisiológica e geração de energia necessária ao crescimento vegetal. Há grande complexidade envolvida no diálogo entre planta e endófito, desde a fase de germinação até a etapa final de formação de mudas, à exemplo da secreção de compostos químicos: hormônios vegetais, compostos orgânicos voláteis (COVs) e metabólitos secundários (MS), como: os compostos fenólicos (flavonoides, cumarinas, ácidos), alcaloides (derivados de aminoácidos) e terpenoides, cujas vias de biossíntese são dinâmicas e envolvem inúmeros genes (HONG et al., 2024; WEI et al., 2024).

Apesar da interação alcançada, as possibilidades de sucesso ou insucesso durante a cooperação entre muda-bioestimulador são equânimes, de acordo com as inúmeras rotas de promoção do crescimento, o que esclarece a compreensão do desempenho de cada estirpe avaliada. Um prognóstico é orientado pela informação de que, nem todos os MS são sintetizados nos órgãos onde são acumulados (LV et al., 2024). O que explica a complexidade e a variabilidade envolvidas nas respostas fisiológicas vegetais. As intrínsecas respostas reforçam a especificidade envolvida no processo de interação, a fim de regular o dinamismo do crescimento em termos da desenvoltura das mudas em condições de viveiro.

Os parâmetros morfométricos devem ser avaliados de forma conjunta, tanto para parte aérea, sistema radicular e diâmetro do coleto, pois em sintonia propiciam melhor estabelecimento em campo. Geralmente, a dessintonia entre tais parâmetros leva às situações indesejáveis em campo, à exemplo do tombamento de mudas, todavia, a desproporção entre a altura (ALT) e o diâmetro do coleto (DC) impossibilitam a sustentação mecânica das mudas e o sistema radicular pouco desenvolvido, responsável por negligenciar o desenvolvimento.

Os efeitos de *Trichoderma* se aplicam à variável DC, parâmetro importante ao equilíbrio dinâmico entre altura e raiz, o que permite elucidar a conexão entre os resultados possivelmente se atribui à produção de auxina, a partir da conexão simbiótica com o sistema radicular (CHAVEZ-JALK et al., 2022). A avaliação da parte aérea, consiste em uma ferramenta de grande auxílio à avaliação da qualidade de mudas florestais, considerando que, o DC constitui um indicador confiável da sobrevivência em campo, enquanto a ALT das mudas refere-se

apenas ao crescimento inicial em campo, deste modo, são parâmetros dependentes, pois quando avaliados em conjunto, permitem ampla avaliação da qualidade das mudas.

O equilíbrio entre a altura e o diâmetro do caule na fase de produção de mudas permite a redução de tempo em viveiros. Em similaridade aos resultados obtidos, em mudas de *Euterpe oleracea* cuja interação resultou em acréscimo considerável no diâmetro do colo (33,9%), o que implica na posterior capacidade de sobrevivência de mudas no campo (CAMPOS et al., 2020). Durante o período em viveiro, as mudas estão sob condições favoráveis, desde a constante disponibilidade hídrica e o conforto térmico, porém, quando destinadas à campo, as condições nem sempre serão favoráveis, o que requer parâmetros morfométricos (parte aérea e arquitetura radicular) robustos, capazes de suportar as condições de campo.

Quando as mudas são levadas à campo, passam pelo processo de aclimação, o qual será reforçado pelo sistema radicular bem desenvolvido. A demanda nutricional aumenta nessa fase inicial, contudo, o uso excessivo de adubos pode perturbar o solo, na promoção de salinização ou acidificação, por exemplo. A presença de microrganismos benéficos na rizosfera, como os fungos *Trichoderma* poderá corroborar com a maior aeração e permeabilidade do solo à água, conforme a ação desempenhada pelas hifas fúngicas, na secreção de compostos cimentantes (ALI et al., 2024). Desse modo, em associação com maior estímulo ao desenvolvimento radicular, promove melhorias no estabelecimento de plantas e na maior capacidade em explorar água e nutrientes.

Os maiores índices de desenvolvimento radicular revelam a efetividade da interação biológica. A raiz é o órgão mais suscetível às variações ambientais do solo, constituindo uma barreira à sobrevivência das mudas. Possivelmente, *T. harzianum* ESALQ 1306, possivelmente, induziu a maior secreção de metabólitos, análogos de auxinas, promotores do aumento das raízes primárias, secundárias e pêlos radiculares, o que infere na maior exploração radicular e aproveitamento, observado no incremento em altura (45,86%), quando comparado as mudas desenvolvidas em solo ausente de inoculação.

A eficácia encontrada nas cepas de *T. harzianum* ESALQ1306 e *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis* evidenciam a interconexão entre MFT e BIO, obtendo-se resultados superiores em ambas. O incremento em massa seca se associa ao maior percentual de sobrevivência das mudas no momento do transplântio, tornando as mudas tolerantes às restrições de água, mediada pela capacidade em alterar o ambiente e promover a associação mutualística prolongada (ALFIKY; WEISSKOPF, 2021).

O índice de qualidade de Dickson (IQD) considera a vitalidade das mudas e o equilíbrio da distribuição da biomassa, nossos resultados apoiam os resultados anteriores, o que expõe a

qualidade superior de mudas como um fator dependente das condições de qualidade, vigor, robustez e equilíbrio da distribuição da biomassa na muda. A viabilização de um sistema de produção de mudas ocorre de forma conjunta, com foco na obtenção de plantas vigorosas, a composição populacional uniforme, e a saúde dos solos (componente essencial à vida). A sustentabilidade será atingida quando houver a máxima eficiência na capacidade de produção, mas como seria possível? Vale refletirmos que, ao utilizar-se o mínimo possível de produtos químicos, os quais possam promover danos ao ecossistema. Mas qual seria a incógnita envolvida nessa questão? Simples, reduzir o uso de fertilizantes e priorizar os bioinsumos, responsáveis por alavancar o rendimento das mudas, restaurar e conservar a qualidade físico-química dos solos.

O êxito obtido na pesquisa pode ser interpretado pelo mecanismo de associação simbiótica. Para que ocorra a interação entre ambas as partes, as plantas possuem papel fundamental, iniciado pela comunicação advinda da liberação de compostos (aminoácidos, carboidratos e lipídios) por pêlos radiculares, que permitem atrair e fomentar os microrganismos (THAKUR et al., 2024). Como retribuição, os simbiontes podem secretar metabólitos, análogos de auxinas e outros compostos proteicos que estimulam o aumento no tamanho das raízes primárias e secundárias, bem como acréscimos na produção de pêlos radiculares (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2019). A comunicação cruzada interfere no incremento da altura das plantas, úteis ao crescimento, assim como constatado em mudas de mogno-africano.

Por se tratar de uma espécie exigente em termos nutricionais, *K. senegalensis* requer a fertilização suplementar em seu manejo. Sob essa perspectiva, surge uma questão: Mediante a adubação complementar as mudas são capazes de atingir parâmetros de crescimento favoráveis? Nossos resultados obtidos são capazes de responder tal incógnita, visto que, apesar do uso de fertilizantes químicos, as mudas não-inoculadas não expressaram seu máximo potencial. Entretanto, após o uso de bioestimulantes houve acréscimo na altura, raiz, diâmetro do coleto, biomassa e consequentemente a obtenção de mudas mais vigorosas, indicadas pelo IQD.

O uso de *Trichoderma* spp. no tratamento de solo revela-se como uma alternativa de grande inovação tecnológica, constituindo um mecanismo que promove distintos ganhos no desenvolvimento, qualidade e crescimento de mudas florestais. A eficácia na promoção de crescimento de plantas é advinda de espécies capazes de estabelecer interações duradouras com a planta, considerando que a associação é altamente variável, seja em função da espécie do

fungo, condições de desenvolvimento, taxa de inóculo e tipo de formulação (FRASCELLA et al., 2023; BI et al., 2024).

Um dos fatores que pode explicar a menor desenvoltura de algumas cepas do fungo, se trata da possível competição rizosférica, onde há disputa por recursos em comum, sendo o “adversário” mais fraco lesado, ou até mesmo se atribui as condições ambientais. A partir dos resultados obtidos, fica claro que a ação das cepas em estudo no crescimento de *K. senegalensis* é dependente de diversos fatores, pois, os mecanismos que promovem o crescimento das plantas induzidas por microrganismos são complexos.

À medida que ocorre a interação entre *Trichoderma* e planta, maior conteúdo nutricional é disponibilizado, como verificado em mudas de *Quercus robur* L., pela maior produção de assimilados e eficiência fotossintética (OSZAKO et al., 2021). Há relatos de que a fotossíntese é elevada devido à regulação gênica desenvolvida por fungos *Trichoderma* sp., de modo a tornar as mudas mais resistentes às condições adversas e aptas a atingir maiores índices de qualidade (HARMAN et al., 2021). Presumivelmente, a promoção de crescimento de *K. senegalensis* tenha sido orientada por mecanismos fisiológicos reforçados pelo bioestímulo.

O incremento da biomassa total, em relação as plantas não inoculadas, indica que a inoculação de *Trichoderma* é um método promissor na produção de mudas à nível comercial. As vantagens no uso do microrganismo potencial se dão em função dos benefícios à nível fisiológico, como o incremento no potencial fotossintético, maior eficiência e absorção de água e nutrientes, os quais influem no arranjo dos atributos morfológicos das mudas. Os resultados evidenciam que, as mudas de mogno-africano foram capazes de manter o balanço adequado da produção energética, associado a menor dependência por adubos minerais.

O mercado industrial do cultivo de árvores brasileiras possui participação no comércio internacional em torno de US\$ 12,7 bilhões (IBÁ, 2024). No entanto, para que a silvicultura nacional mantenha expressividade e seja capaz de atender as crescentes demandas por produtos florestais, a adoção de tecnologias sustentáveis é um ponto-chave. Essa informação só reforça a relevância do uso de biopromotores de crescimento de espécies florestais, capazes de potencializar o setor e garantir a maior participação econômica aliada à sustentabilidade e ao cuidado com o uso e a conservação dos solos tropicais.

Os bioinsumos permitem agregar valor ao produto (muda), tornando-o mais competitivo e de menor custo de produção, ferramenta útil às análises futuras, cujo intuito em estimular e maximizar a qualidade microbiana do solo e a produção florestal, considerando as amplas respostas das plantas durante a interação com os microrganismos. A tríplice envolvida na formação de mudas compreende um processo simbiótico mutualístico. As principais “moedas

de troca” são os benefícios nas propriedades dos solos, o desenvolvimento de plantas e o estabelecimento de microrganismos (Figura 7). Os pilares se conectam, no quesito de conservação e manutenção dos solos, cujo objetivo em valorizar suas características físicas-químicas-biológicas, o que reflete na saúde à curto, médio e longo prazo.

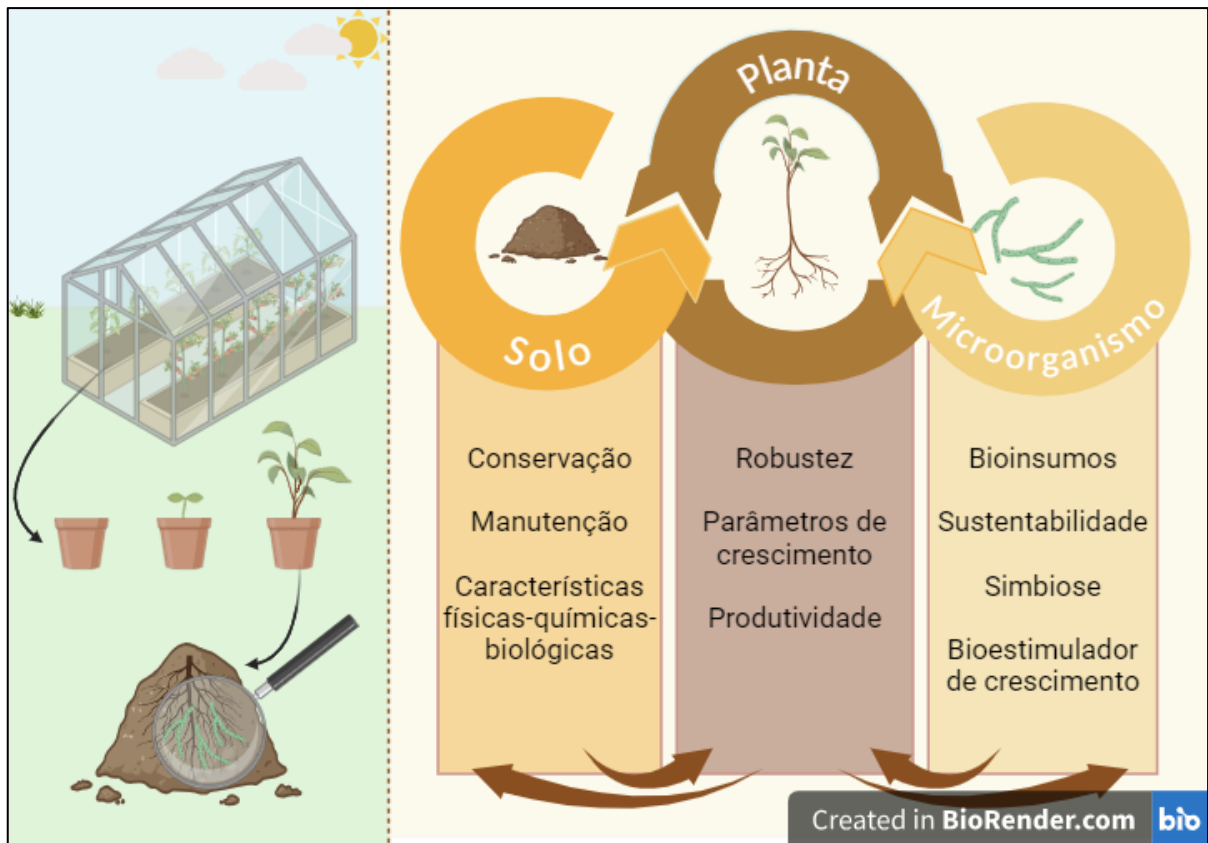


Figura 7. Benefícios oriundos do sistema de produção de mudas: solo-planta-microorganismo.

6.2 Caracterização química do solo: Efeitos de *Trichoderma* spp. em *Khaya senegalensis*

Constantemente as oscilações climáticas são problemáticas nos sistemas silviculturais, o que têm promovido maior relevância em torno da saúde dos solos, por se tratar de um organismo vivo, dinâmico, finito e com funções vitais ao processo de reabastecimento de nutrientes via ciclagem, manutenção e conservação da vida. Os efeitos na qualidade do solo são amplos, em termos de curto, médio e longo prazo, sendo assim, os dados obtidos correspondem ao êxito obtido através do uso de microrganismos estimulantes ao crescimento, redução nas exigências quanto ao suprimento nutricional químico e redução no tempo de produção de mudas.

A acidificação dos solos abrange cerca de 30% do território global, fator que restringe o desenvolvimento vegetal através do baixo ou nulo acesso aos nutrientes minerais (JING et al., 2024). A versatilidade do gênero *Trichoderma* abrange ainda alterações nos níveis de pH da solução do solo, responsáveis por adaptar a concentração do pH a partir da secreção de ácidos orgânicos, a fim de propiciar um bom aproveitamento nutricional pelas plantas e induzir o desenvolvimento adequado (BARROW; HARTEMINK, 2023). Geralmente, o microrganismo ameniza a condição de estresse oxidativo causado pela acidez do solo mediante o aumento da atividade de enzimas antioxidantes (BOENI et al., 2024).

Assim como os resultados observados na caracterização do solo, o bioestímulo promovido por *Trichoderma* em espécies arbóreas tem sido relatado pela ação na condutividade hidráulica radicular e liberação de ácido orgânico, em mudas de seringueira (*Hevea brasiliensis*), em viveiro (PROMWEE et al., 2014). Provavelmente, à medida em que ocorre a secreção de compostos, o ambiente rizosférico das mudas de mogno-africano tenha sido favorável à exploração e absorção nutricional das mudas, sob condições não-estressantes ao desenvolvimento da planta. A produção de ácidos orgânicos e inorgânicos é característica-chave na solubilização de nutrientes minerais e com efeitos diretos na saúde dos solos, responsáveis por mediar a ligação de íons metálicos e liberação de P, via formação de metal-fosfato solúvel e solubilizar nutrientes, como o K e Zn (OLANIYAN et al., 2022; ALEGRÍA et al., 2024).

Para que o conteúdo de nutrientes minerais essenciais necessário ao desenvolvimento de mudas esteja disponível, deve-se seguir a premissa de neutralização da acidez, o que não se demonstra como um entrave ao fungo bioestimulador. Há relatos da capacidade emitida pelo gênero *Trichoderma* em modificar suas características fisiológicas e morfológicas para sobreviver sob valores extremos de pH, mediante a secreção de metabólitos extracelulares, úteis para a troca benéfica de prótons responsáveis pela modificação de valências químicas e

consequente disponibilidade nutricional (MIRAMONTES et al., 2022; PHILIPPOT et al., 2023; CUESTA et al., 2024).

A associação entre o mogno-africano e *Trichoderma* indica vantagens em múltiplos segmentos, dentre eles, o fator sustentável, correlacionado diretamente à conservação e saúde dos solos. Um dos pontos fortes advindos de bioinsumos é observado no incremento nos atuais preços de fertilizantes, o que eleva os custos de produção e colocam em risco os reservatórios de nutrientes (mundiais), com ênfase ao P, tendo em vista a previsão de esgotamento nos próximos 100 (cem) anos (SCHOLZ et al., 2025). No entanto, ao realizar a tomada de decisão assertiva pelo uso do bioinsumo, foram obtidos resultados promissores em relação a sustentabilidade no sistema produtivo de *K. senegalensis*.

Os múltiplos efeitos estão interligados pelo fortalecimento das mudas no quesito de promover melhores condições de crescimento, bem como no fator econômico (redução no custo de produção, menor dependência externa por fertilizantes) e na conservação do solo, pois, os níveis de P adicionados ao solo sob desequilíbrio, promovem desequilíbrio químico, sendo assim, é possível assegurar o uso eficiente dos recursos fosfatados no solo através da interação: planta-microrganismo-solo.

A caracterização de quesitos químicos do solo se associa possivelmente à capacidade de solubilização nutricional, guiada por formas múltiplas, desde a secreção de enzimas fosfatase (responsáveis por catalisar compostos orgânicos de P do solo e disponibilizá-los); produção de sideróforos (quelação de íons de ferro (Fe) e consequentemente maior disponibilidade de P); acidificação da rizosfera (ação da fosfatase ácida que garante a mineralização de nutrientes); associações micorrízicas (maximiza o acesso das raízes as fontes nutricionais); liberação de prótons (facilita a liberação de fosfato), até a produção de ácidos orgânicos e inorgânicos (AJAYI; DIANDA, 2023; KHAN et al., 2024).

A produção de sideróforos desempenha grande representatividade na promoção do crescimento, uma vez que, o micronutriente ferro (Fe) é indispensável à produção de clorofila nas plantas, bem como participa do transporte de elétrons durante o processo de fotossíntese (geração de energia) e ativação enzimática (HATHURUSINGHE; AZIZOGLU; SHIN, 2024). É nítido que a energia é o que nos move, e não seria diferente no reino vegetal. As mudas demandam elevados índices energéticos destinados à sua sobrevivência e desenvolvimento, fortalecidos pelo bioestímulo orientado por *Trichoderma*.

7 CONCLUSÃO

A associação entre mogno-africano (*Khaya senegalensis*) e cepas de *Trichoderma* sp. foi promissora em ambos os aspectos morfológicos das mudas. A cepa *T. harzianum* ESALQ 1306 e a combinação entre *T. harzianum*, *T. asperellum* e *T. koningiopsis* promoveram incrementos desejáveis e necessários à formação de mudas altamente vigorosas. Quanto à breve caracterização química dos solos, em ambos os solos tratados com as cepas de *Trichoderma*, foram constatados caracteres positivos.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

Diante ao importante papel desempenhado pelo componente arbóreo nas funções ambientais, tais como o sequestro de carbono e uso paisagístico, ressalta a necessidade em pesquisas científicas correlacionadas à interação entre planta-microrganismo em espécies florestais, com o intuito de avaliar os benefícios oriundos a partir dessa associação, uma vez que, os estudos na área ainda são recentes e escassos, com ênfase no bioma Cerrado.

O efeito promissor constatado pelas cepas *T. harzianum* + *T. asperellum* + *T. koningiopsis* revela os benefícios na promoção do crescimento de mudas de *Khaya senegalensis*, bem como o incremento na qualidade das características químicas do solo. O tratamento de solo para a formação de plantas com a adoção de microrganismos potenciais demonstra-se como uma alternativa viável e eficaz, com ênfase à espécie exótica de madeira nobre (*K. senegalensis*), comum em plantios situados no Cerrado.

O desenvolvimento de pesquisas com o objetivo de propor estratégias quanto ao uso sustentável do solo na produção de mudas florestais, corroboram com o incremento na atividade de microrganismos do solo, aumento produtivo e menor custo de produção. Ainda existem lacunas quanto a maiores informações sobre a capacidade de solubilização de nutrientes pelas cepas de *Trichoderma* em solos do Cerrado, os quais podem demonstrar alta eficácia na produtividade de solos altamente intemperizados, a partir da melhoria efetiva nas propriedades física-química-biológica do solo e consequente incremento na fertilidade, desempenhando papel-chave no desenvolvimento de mudas florestais, a fim de maximizar a eficiência no uso dos recursos produtivos e elevado índice de qualidade de mudas.

As respostas à curto prazo via efeitos de promoção de crescimento vegetal e disponibilidade de nutrientes às mudas evidenciam a próspera associação simbiótica entre planta-microrganismo, bem como os efeitos na qualidade do solo, todavia, abre portas para pesquisas correlacionadas ao monitoramento à médio e longo prazo, a fim de verificar o desenvolvimento das plantas em campo.

9 REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, N. S.; DONI, F.; AWAL, M. A.; MISPA, M. S.; ... SUHAIMI, N. S. M. Multi-omics tools for understanding *Trichoderma*-plant symbiosis: biotechnological developments and future directions. **Symbiosis**, v. 1, n. 1, p. 1-14, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13199-024-00996-2>.
- AJAYI, O. O.; DIANDA, M. (2023). **Plants and Their Microbes**. In *Symbiosis in Nature*. IntechOpen., Eds.; IntechOpen: London, UK, 2019; v. 1, p. 266. <https://doi.org/10.5772/intechopen.105293>.
- ALEGRÍA, C. O. Z.; RODRÍGUEZ, L. A. Y.; JIMÉNEZ, J. C.; GUTIÉRREZ, P. E. A.; CIMERMAN, N. G.; GARCÍA, R. A. B. Fungi beyond limits: The agricultural promise of extremophiles. **Microbial Biotechnology**, v. 17, n. 3, p. 1-124, 2024. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14439>.
- ALEWELL, C.; RINGEVAL, B.; BALLABIO, C.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P.; BORRELLI, P. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. **Nature communications**, v. 11, n. 1, p. 1-12, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18326-7>.
- ALFIKY, A.; WEISSKOPF, L. Deciphering *Trichoderma*-plant-pathogen interactions for better development of biocontrol applications. **Journal Fungi**, v. 7, n. 1, p. 61, 2021. <https://doi.org/10.3390/jof7010061>.
- ALI, S.; KHAN, M. J.; ANJUM, M. M.; KHAN, G. R.; ALI, N. *Trichoderma harzianum* modulates phosphate and micronutrient solubilization in the rhizosphere. **Gesunde Pflanz**, v. 74, n. 1, p. 853-862, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00643-0>.
- ALI, I.; QAISER, H.; ABDULLAH, R.; KALEEM, A.; IQTEDAR, M., IQBAL, I., & CHEN, X. Prospective Roles of Extremophilic Fungi in Climate Change Mitigation Strategies. **Journal of Fungi**, 10(6), 385, 2024. <https://doi.org/10.3390/jof10060385>
- ALIZADEH, M.; QADERI, S.; ROSHANROO, M.; KARIMZADEH, S.; FAZLI, M.; SAEEDI, M.; ... HEIDARZADEH, A. Contouring multifaceted biological activities and applications of *Trichoderma* spp. for managing plant health. **Journal of Crop Health**, v. 76, n. 1, p. 1-37, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10343-024-00976-y>.
- ALOVISI, A. M. T.; CASSOL, C. J.; NASCIMENTO, J. S.; SOARES, N. B.; SILVA JÚNIOR, I. R.; SILVA, R. S.; SILVA, J. A. M. Soil factors affecting phosphorus adsorption in soils of the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 22, n. 1, p. 1-7, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00298>.
- AOYAGI, R.; IMAI, N.; TURNER, B. L.; KITAYAMA, K. Plant adaptation and phosphorus limitation in tropical forests: A theoretical and empirical assessment. **Ecosystems**, v. 27, n. 1, p. 1-19, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10021-023-00894-6>.

AOYAGI, R.; KITAYAMA, K.; TURNER, B. L. How do tropical tree species maintain high growth rates on low-phosphorus soils?. **Plant and Soil**, v. 480, n. 1, p. 31-56, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05602-2>.

ASGHAR, W.; CRAVEN, K. D.; KATAOKA, R.; MAHMOOD, A.; ASGHAR, N.; RAZA, T.; IFTIKHAR, F. The application of *Trichoderma* spp., an old but new useful fungus, in sustainable soil health intensification: a comprehensive strategy for addressing challenges. **Plant Stress**, v. 12, n. 1, p. 1-13, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100455>.

ATTAR, I.; HNINI, M.; TAHA, K.; AURAG, J. Phosphorus availability and its sustainable use. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 4, p. 5036-5048, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00980-z>.

BAI, B.; LIU, C.; ZHANG, C.; HE, X.; WANG, H.; PENG, W.; ZHENG, C. *Trichoderma* species from plant and soil: An excellent resource for biosynthesis of terpenoids with versatile bioactivities. **Journal of Advanced Research**, v. 49, n. 1, p. 81-102, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.09.010>.

BANERJEE, S.; HEIJDEN, M. G. A. Soil microbiomes and one health. **Nature Reviews Microbiology**, v. 21, n. 1, p. 06–20, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00779-w>.

BARŁÓG, P. Improving fertilizer use efficiency—Methods and strategies for the future. **Plants**, v. 12, n. 20, p. 3658, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12203658>.

BATISTA, K. O. M.; SILVA, D. V.; NASCIMENTO, V. L.; SOUZA, D. J. Effects of *Trichoderma strigosellum* in *Eucalyptus urophylla* development and leaf-cutting ant behavior. **Journal Fungi**, v. 8, n. 1, p. 1-14, 2022. <https://doi.org/10.3390/jof8010015>.

BEHL, K.; JAISWAL, P.; PABBI, S. Recent advances in microbial and nano-formulations for effective delivery and agriculture sustainability. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 58, n. 1, p. 1-19, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103180>.

BI, B.; LI, G.; GOLL, D. S.; LIN, L.; CHEN, H.; XU, T.; ... LAMBERS, H. Enhanced rock weathering increased soil phosphorus availability and altered root phosphorus-acquisition strategies. **Global Change Biology**, v. 30, n. 5, p. 1-15, 2024. <https://doi.org/10.1111/gcb.17310>.

BOENI, M.; STEFFEN, G. P. K.; MALDANER, J.; TABALDI, L. A.; CONTERATO, I. F.; SALDANHA, C. W.; ... VIEIRA, F. C. B. Growth-promoting microorganisms as a sustainable alternative to optimize the productive potential of olive plants. **Scientia Horticulturae**, v. 332, n. 1, p. 1-9, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113167>.

BOONMAN, C. C.; VAN LANGEVELDE, F.; OLIVERAS, I.; COUÉDON, J.; LUIJKEN, N.; MARTINI, D.; VEENENDAAL, E. M. On the importance of root traits in seedlings of tropical tree species. **New Phytologist**, v. 227, n. 1, p. 156–167, 2020. <https://doi.org/10.1111/nph.16370>.

BROTMAN, Y.; BRIFF, E.; VITERBO, A.; CHET, I. Role of swollenin, an expansin-like protein from *Trichoderma*, in plant root colonization. **Plant Physiology**, v. 147, n. 2, p. 779–789, 2008. <https://doi.org/10.1104/pp.108.116293>.

- BROTMAN, Y.; LANDAU, U.; INOSTROZA, Á. C.; TAKAYUKI, T.; FERNIE, A. R.; CHET, I.; WILLMITZER, L. *Trichoderma*-plant root colonization: Escaping early plant defense responses and activation of the antioxidant machinery for saline stress tolerance. **PLoS Pathogens**, v. 9, n. 3, p. 1-15, 2013. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1003221>.
- CABAL, C.; MARTÍNEZ-GARCÍA, R.; CASTRO AGUILAR, A.; VALLADARES, F.; PACALA, S.W. The exploitative segregation of plant roots. **Science**, v. 370, n. 6521, p. 1197–1199, 2020. <https://doi.org/10.1126/science.aba9877>.
- CAI, F.; DRUZHININA, I. S. In honor of John Bissett: Authoritative guidelines on molecular identification of *Trichoderma*. **Fungal Diversity**, v. 107, n. 1, p. 1–69, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13225-020-00464-4>.
- CAMPOS, B. F.; ARAÚJO, A. J. C.; FELSEMBURGH, C. A.; VIEIRA, T. A.; LUSTOSA, D. C. *Trichoderma* contributes to the germination and seedling development of açai palm. **Agriculture**, v. 10, n. 10, p. 1-16, 2020. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100456>.
- CARVALHO FILHO, M. R.; MARTINS, I.; PEIXOTO, G. H. S.; MUNIZ, P. H. P. C.; CARVALHO, D. D. C.; MELLO, S. C. M. Biological control of leaf spot and growth promotion of eucalyptus plants by *Trichoderma* spp. **Journal Agriculture. Science**, v. 10, n. 1, p. 459–467, 2018. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n9p459>.
- CHAVEZ-JALK, A.; LEIVA, S.; BOBADILLA, L. G.; VIGO, C. N.; ARCE, M.; OLIVACRUZ, M. Effect of endophytic *Trichoderma* sp. strains on the agronomic characteristics of ecotypes of *Theobroma cacao* L. under nursery conditions in Peru. **International Journal of Agronomy**, v. 2022, n. 1, p. 1-8, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5297706>.
- CHEN, M.; LIU, Q.; GAO, S. S.; YOUNG, A. E.; JACOBSEN, S. E.; TANG, Y. Genome mining and biosynthesis of a polyketide from a biofertilizer fungus that can facilitate reductive iron assimilation in plant. **Biochemistry**, v. 116, n. 12, p. 5499–5504, 2019. <https://doi.org/10.1073/pnas.1819998116>.
- CHRISTIAN, N.; PERLIN, M. H. Plant-endophyte communication: Scaling from molecular mechanisms to ecological outcomes. **Mycologia**, v. 116, n. 2, p. 1-24, 2024. <https://doi.org/10.1080/00275514.2023.2299658>.
- CONTRERAS, C. J. C.; MENCHACA, T. M.; LÓPEZ, O. G.; VÁSQUEZ, E. C.; RODRÍGUEZ, J. R. Molecular insights into plant–microbe interactions: A comprehensive review of key mechanisms. **Frontiers in Bioscience-Elite**, v. 16, n. 1, p. 1-24, 2024. <https://doi.org/10.31083/j.fbe1601009>.
- CONTRERAS-CORNEJO, H. A.; SCHMOLL, M.; ESQUIVEL-AYALA, B. A.; GONZÁLEZ-ESQUIVEL, C. E.; ROCHA-RAMÍREZ, V.; LARSEN, J. Mechanisms for plant growth promotion activated by *Trichoderma* in natural and managed terrestrial ecosystem. **Microbiological Research**, v. 281, n. 1, p. 1-16, 2024b. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127621>.
- CUESTA, R. L. C.; MATTIELLO, E. M.; CASTRO, G. F.; MATIAS, P. C.; MONTEIRO, T. S. A.; FREITAS, L. G. Efficiency of phosphate fertilizers containing growth promoters in plant fertilization. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 56, n. 1, p. 1-10, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103019>.

DAVIS, A. G.; HUGGINS, D. R.; REGANOLD, J. P. Linking soil health and ecological resilience to achieve agricultural sustainability. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 21, n. 3, p. 131-139, 2023. <https://doi.org/10.1002/fee.2594>.

DEMAY, J.; RINGEVAL, B.; PELLERIN, S.; NESME, T. Half of global agricultural soil phosphorus fertility derived from anthropogenic sources. **Nature Geoscience**, v. 16, n. 1, p. 69-74, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01092-0>.

DEVI, R.; KAUR, T.; KOUR, D.; RANA, K. L.; YADAV, A.; YADAV, A. N. Beneficial fungal communities from different habitats and their roles in plant growth promotion and soil health. **Microbial Biosystems**, v. 5, n. 1, p. 21-47, 2020. <https://doi.org/10.21608/MB.2020.32802.1016>.

DÍAZ, T. S.; GONZÁLEZ, L. C. Efecto bioestimulante de *Trichoderma harzianum* Rifai en posturas de Leucaena, Cedro y Samán. **Colombia Forestal**, v. 21, n. 1, p. 81-90, 2018. <https://doi.org/10.14483/2256201X.11744>.

DIVJOT, K. O. U. R.; RANA, K. L.; TANVIR, K. A. U. R.; YADAV, N.; YADAV, A. N.; KUMAR, M.; SAXENA, A. K. Biodiversity, current developments and potential biotechnological applications of phosphorus-solubilizing and-mobilizing microbes: A review. **Pedosphere**, v. 31, n. 1, p. 43-75, 2021. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60057-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60057-1).

EMAN, A. A. F.; MOHAMED, I. A.; ALLAH, S. F.; SHAMS, A. H.; ELSOKKARY, I. H. *Trichoderma* species: An overview of current status and potential applications for sustainable agriculture. **Indian Journal of Agricultural Research**, v. 57, n. 3, p. 273-282. <https://doi.org/10.18805/IJARe.AF-751>.

FARIA, J. C. T.; KONZEN, E. R.; CALDEIRA, M. V. W.; OLIVEIRA GODINHO, T.; MALUF, L. P.; MOREIRA, S. O.; ... SOARES, T. C. B. Genetic resources of African mahogany in Brazil: genomic diversity and structure of forest plantations. **BMC Plant Biology**, v. 24, n. 1, p. 1-14, 2024. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05565-9>

FRANÇA, T. S.; FRANÇA, F. J.; ARANGO, R. A.; COSTA, A.; OGURUNKU, M. Properties of african mahogany wood commercially available in the United States. **Forest Products Journal**, v. 73, n. 4, p. 339-349, 2024. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-23-00055>.

FRASCELLA, A.; SARROCCO, S.; LASINIO, G. J.; POLLICE, A.; EMILIANI, G.; DANTI, R.; ... DELLA ROCCA, G. Characterization of *Trichoderma* species from forest ecosystems by high-throughput phenotypic microarray. **Fungal Biology**, v. 127, n. 10, p. 1376-1383, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2023.09.004>.

GALLEGO, T. G.; CASTRO, I. S.; MOLINA, L.; CEPEDA, C. T.; IZQUIERDO, C. G.; RAMOS, J. L.; SEGURA, A. Phosphorus acquisition by plants: challenges and promising strategies for sustainable agriculture in the XXI century. **Pedosphere**, v. 1, n. 1, p. 1-31, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2024.05.002>.

GOMES, G. S. L.; CALDEIRA, M. V. W.; GOMES, R.; DUARTE, V. B. R.; MOMOLLI, D. R.; OLIVEIRA GODINHO, T.; ... SCHUMACHER, M. V. Assessing the of carbon and nitrogen storage potential in *Khaya* spp. stands in Southeastern Brazil. **New Forests**, v. 55, n. 6, p. 1913-1937, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11056-024-10065-7>

GONZÁLEZ PÉREZ, E.; ORTEGA AMARO, M. A.; SALAZAR BADILLO, F. B.; BAUTISTA, E.; DOUTERLUNGNE, D.; BREMONT, J. F. J. The *Arabidopsis-Trichoderma* interaction reveals that the fungal growth medium is an important factor in plant growth induction. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1-14, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34500-w>.

GORAI, P. S.; BARMAN, S.; GOND, S. K.; MANDAL, N. C. *Trichoderma*. In: Beneficial Microbes in Agro-Ecology. AMARESAN, N.; ANNAPURNA, K.; SANKARANARAYANAN, A.; KUMAR, M. S.; KUMAR, K. Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2020; v. 1, pp. 571–591. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823414-3.00028-9>.

GRIEBELER, A. M.; ARAUJO, M. M.; TABALDI, L.A.; STEFFEN, G. P.; TURCHETTO, F.; RORATO, D. G.; BARBOSA, F. M.; BERGHETTI, A.L.P.; NHANTUMBO, L.S.; LIMA, M.S. Type of container and *Trichoderma* spp. inoculation enhance the performance of tree species in enrichment planting. **Ecological Engineering**, v. 169., n. 1, p. 1-12, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106317>.

GUIGNABERT, A.; AUGUSTO, L.; GONZALEZ, M.; CHIPEAUX, C.; DELERUE, F. Complex biotic interactions mediated by shrubs: Revisiting the stress gradient hypothesis and consequences for tree seedling survival. **Journal of Applied Ecology**, v. 57, n. 7, p. 1341-1350, 2020. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13641>.

GUZMÁN-GUZMÁN, P.; TRONCOSO, M. D. P.; MONFIL, V. O.; ESTRELLA, A. H. *Trichoderma* species: Versatile plant symbionts. **Phytopathology**, v. 109, n. 1, p. 6-16, 2019. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-18-0218-RVW>.

HARMAN, G. E.; DONI, F.; KHADKA, R. B.; UPHOFF, N. Endophytic strains of *Trichoderma* increase plants' photosynthetic capability. **Journal of Applied Microbiology**, v. 130, n. 2, p. 529-546, 2021. <https://doi.org/10.1111/jam.14368>.

HARTEMINK, A. E.; BARROW, N. J. Soil pH-nutrient relationships: The diagram. **Plant and Soil**, v. 486, n. 1, p. 209-215, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>.

HATHURUSINGHE, S. H. K.; AZIZOGLU, U.; SHIN, J. H. Holistic approaches to plant stress alleviation: A comprehensive review of the role of organic compounds and beneficial bacteria in promoting growth and health. **Plants**, v. 13, n. 5, p. 695, 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13050695>.

HUANG, C. L.; SONG, K.; HUANG, Y.; XU, S.; LI, Z. A systematic view of phosphorus loss and its retention: Pathways, mechanisms, and measures. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 206, n. 1, p. 1-15, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107620>.

HONG, L.; WANG, Q.; ZHANG, J.; CHEN, X.; LIU, Y.; ASIEGBU, F. O.; ... WANG, K. Advances in the beneficial endophytic fungi for the growth and health of woody plants. **Forestry Research**, v. 4, n. 1, p. 1-11. <https://doi.org/10.48130/forres-0024-0025>

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores-IBÁ. **O plantio de florestas de Mogno Africano apresenta alto retorno financeiro devido ao preço do metro cúbico**. Entenda os valores

atuais. Disponível em: <https://www.ibflorestas.org.br/conteudo/preco-do-mogno-africano>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores-IBÁ. **Relatório Anual**: Brasília, Brasil, 2024b; 99p.

IBRAHIM, M.; IQBAL, M.; TANG, Y. T.; KHAN, S.; GUAN, D. X.; LI, G. Phosphorus mobilization in plant–soil environments and inspired strategies for managing phosphorus: A review. **Agronomy**, v. 12, n. 10, p. 1-17, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102539>.

IFTIKHAR, A.; FAROOQ, R.; AKHTAR, M.; KHALID, H.; HUSSAIN, N.; ALI, Q.; ... ALI, D. Ecological and sustainable implications of phosphorous-solubilizing microorganisms in soil. **Discover Applied Sciences**, v. 6, n. 2, p. 1-18, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05683-x>.

ISLAM, M.; SIDDIQUE, K. H.; PADHYE, L. P.; PANG, J.; SOLAIMAN, Z. M.; HOU, D.; ... BOLAN, N. A critical review of soil phosphorus dynamics and biogeochemical processes for unlocking soil phosphorus reserves. **Advances in Agronomy**, v. 185, n. 1, p. 153-249, 2024. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.02.004>.

ITTO. International Tropical Timber Organization. Organização Internacional de Madeira Tropical. v. 28, n. 13, 2024.

JAVED, A.; ALI, E.; AFZAL, K. B.; OSMAN, A.; RIAZ, S. Soil fertility: factors affecting soil fertility, and biodiversity responsible for soil fertility. **International Journal of Plant, Animal And Environmental Sciences**, v. 12, n. 1, p. 21-33, 2022. <https://doi.org/10.26502/IJPAES.202129>

JIMÉNEZ-BREMONT, J. F.; PÉREZ, E. G.; AMARO, M. A. O.; ORTIZ, S. M.; ORTIZ, A. D.; MENDOZA-MENDOZA, A. Volatile organic compounds emitted by *Trichoderma*: Small molecules with biotechnological potential. **Scientia Horticulturae**, v. 325, n. 1, p. 1-10, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112656r>.

JING, T.; LI, J.; HE, Y.; SHANKAR, A.; SAXENA, A.; TIWARI, A.; ... AWASTHI, M. K. Role of calcium nutrition in plant physiology: Advances in research and insights into acidic soil conditions-a comprehensive review. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 210, n. 1, p. 1-15, 2024. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2024.108602>.

KAMAL, N.; SAHARAN, B. S. Microbial dynamics in soil: Impacts on fertility, nutrient cycling, and soil properties for sustainable geosciences—people, planet, and prosperity. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 18, n. 2, p. 34, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12517-024-12175-0>

KHAN, M. R., MOHIDDIN, F. A. 2018. **Trichoderma: Its multifarious utility in crop improvement**. In: Crop Improvement Through Microbial Biotechnology. Elsevier. pp. 263–291. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63987-5.00013-X>.

KHAN, N.; SIDDIQUI, M. H.; AHMAD, S.; AHMAD, M. M.; SIDDIQUI, S. New insights in enhancing the phosphorus use efficiency using phosphate-solubilizing microorganisms and their role in cropping system. **Geomicrobiology Journal**, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2024. <https://doi.org/ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1080/01490451.2024.2331111>.

- KHAN, R. A. A.; NAJEEB, S.; CHEN, J.; WANG, R.; ZHANG, J.; HOU, J.; LIU, T. Insights into the molecular mechanism of *Trichoderma* stimulating plant growth and immunity against phytopathogens. **Physiologia Plantarum**, v. 175, n. 6, p. 1-18, 2023. <https://doi.org/10.1111/ppl.14133>.
- KOLLI, S. C.; ADUSUMILLI, N. **Trichoderma-Its paramount role in agriculture**. In: New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering; SINGH, H. B.; VAISHNAV, A., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; Volume 1, pp. 69–83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821007-9.00007-3>.
- KOPITTKKE, P. M.; MINASNY, B.; PENDALL, E.; RUMPEL, C.; MCKENNA, B. A. Healthy soil for healthy humans and a healthy planet. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 54, n. 3, p. 210-221, 2024. <https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2228651>.
- KU, Y. S.; LIAO, Y. J.; CHIOU, S. P.; LAM, H. M.; CHAN, C. From trade-off to synergy: microbial insights into enhancing plant growth and immunity. **Plant Biotechnology Journal**, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2024. <https://doi.org/10.1111/pbi.14360>.
- KUBIAK, A.; WOLNA-MARUWKA, A.; PILARSKA, A. A.; NIEWIADOMSKA, A.; PIOTROWSKA-CYPLIK, A. Fungi of the *Trichoderma* genus: future perspectives of benefits in sustainable agriculture. **Applied Sciences**, v. 13, n. 11, p. 1-32, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13116434>.
- KULMANN, M. S. S.; ARRUDA, W. S.; VITTO, B. B.; SOUZA, R. O. S.; BERGHETTI, Á. L. P.; TAROUÇO, C. P.; BRUNETTO, G. Morphological and physiological parameters influence the use efficiency of nitrogen and phosphorus by *Eucalyptus* seedlings. **New Forests**, v. 53, n. 1, p. 431–448, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09864-z>.
- KUMAR, M.; POONAM, A.; AHMAD, S.; SINGH, R. P. Plant growth promoting microbes: Diverse roles for sustainable and ecofriendly agriculture. **Energy Nexus**, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100133>.
- KUMAR, V.; KOUL, B.; TAAK, P.; YADAV, D.; SONG, M. Journey of *Trichoderma* from pilot scale to mass production: A review. **Agriculture**, v. 13, n. 10, p. 1-37, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13102022>.
- LAMBERS, H. Phosphorus acquisition and utilization in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 73, n. 1, p. 17-42, 2022. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720-125738>.
- LAMHAMEDI, M. S.; KHASA, D. P.; PEPIN, S. **Production in Forest Nurseries and Field Performance of Seedlings**. 2023. 252p. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-8769-1>.
- LEE, S.; YAP, M.; BEHRINGER, G.; HUNG, R.; BENNETT, J. W. Volatile organic compounds emitted by *Trichoderma* species mediate plant growth. **Fungal Biology and Biotechnology**, v. 3, n. 1, p. 1-14, 2016. <https://doi.org/10.1186/s40694-016-0025-7>.
- LEHNER, S. M.; ATANASOVA, L.; NEUMANN, N. K.; KRŠKA, R.; LEMMENS, M.; DRUZHININA, I. S.; SCHUHMACHER, R. Isotope-assisted screening for iron-containing metabolites reveals a high degree of diversity among known and unknown siderophores produced by *Trichoderma* spp. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 79, n. 1, p. 18-31, 2013. <https://doi.org/10.1128/AEM.02339-12>.

LI, Y.; CHEN, Y.; FU, Y.; SHAO, J.; LIU, Y.; XUAN, W.; ... ZHANG, R. Signal communication during microbial modulation of root system architecture. **Journal of Experimental Botany**, v. 75, n. 2, p. 526-537, 2024. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad263>.

LIRA-MARTINS, D.; NASCIMENTO, D. L.; ABRAHÃO, A.; BRITTO COSTA, P.; D'ANGIOLI, A. M.; VALÉZIO, E.; ... OLIVEIRA, R. S. Soil properties and geomorphic processes influence vegetation composition, structure, and function in the Cerrado Domain. **Plant and Soil**, v. 476, n. 1, p. 549-588, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05517-y>.

LOPES, P. R. M.; BARRETTO, V. C. M.; MONTAGNOLLI, R. N.; FERREIRA, P. H. F. Production of eucalyptus seedlings using alternative substrates. **Revista de Engenharia na Agricultura** **REVENG**, v. 29, n. 1, p. 236-244, 2021. <https://doi.org/10.13083/reveng.v29i1.11236>.

LÓPEZ, A. C.; ALVARENGA, A. E.; ZAPATA, P. D.; LUNA, M. F.; VILLALBA, L. L. *Trichoderma* spp. from Misiones, Argentina: Effective fungi to promote plant growth of the regional crop *Ilex paraguariensis* St. Hil. **Mycology**, v. 10, n. 4, p. 210-221, 2019. <https://doi.org/10.1080/21501203.2019.1606860>.

LÓPEZ, G. N.; LAWRY, R.; AQUINO, J. F. E.; MENDOZA-MENDOZA, A. **Chemical communication between *Trichoderma* and plants**. In New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering; SINGH, H. B., VAISHNAV, A., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; v. 1, pp. 109-139. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819453-9.00005-2>.

LV, J.; YANG, S.; ZHOU, W.; LIU, Z.; TAN, J.; WEI, M. Microbial regulation of plant secondary metabolites: Impact, mechanisms and prospects. **Microbiological Research**, v. 283, n. 1, p. 1-14, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127688>

MAÇIK, M.; GRYTA, A.; SAS-PASZT, L.; FRĄC, M. New insight into the soil bacterial and fungal microbiome after phosphorus biofertilizer application as an important driver of regenerative agriculture including biodiversity loss reversal and soil health restoration. **Applied Soil Ecology**, v. 189, n. 1, p. 1-19, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104941>.

MÄKELÄ, P. S.; WASONGA, D. O.; HERNANDEZ, A. S.; SANTANEN, A. Seedling growth and phosphorus uptake in response to different phosphorus sources. **Agronomy**, v. 10, n. 8, p. 1-11, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081089>.

MARIOTTI, B.; OLIET, J. A.; ANDIVIA, E.; TSAKALDIMI, M.; VILLAR-SALVADOR, P.; IVETIĆ, V.; ... COCOZZA, C. A global review on innovative, sustainable, and effective materials composing growing media for forest seedling production. **Current Forestry Reports**, v. 9, n. 6, p. 413-428, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40725-023-00204-2>

MCDOWELL, R. W.; PLETNYAKOV, P.; HAYGARTH, P. M. Phosphorus applications adjusted to optimal crop yields can help sustain global phosphorus reserves. **Nature Food**, v. 5, n. 1, p. 1-8, 2024. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00952-9>.

MENDOZA-MENDOZA, A.; ZAID, R.; LAWRY, R.; HERMOSA, R.; MONTE, E.; HORWITZ, B. A.; MUKHERJEE, P. K. Molecular dialogues between *Trichoderma* and roots:

Role of the fungal secretome. **Fungal Biology Reviews**, v. 32, n. 2, p. 62-85, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2017.12.001>.

MIRAMONTES, J. P. C.; MONFIL, V. O.; BANDA, M. L.; ROMO, E. R. Z.; CARVAJAL, E. T. A. Promotion of plant growth in arid zones by selected *Trichoderma* spp. strains with adaptation plasticity to alkaline pH. **Biology**, v. 11, n. 8, p. 1-15, 2022. <https://doi.org/10.3390/biology11081206>.

MORALES, M.; MEDINA, S. E. L.; MORÁN, J. N.; QUEVEDO, A.; RATTI, M. F. Nematophagous fungi: A review of their phosphorus solubilization potential. **Microorganisms**, v. 11, n. 1, p. 1-14, 2023. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010137>.

MUKHERJEE, M.; MUKHERJEE, P. K.; HORWITZ, B. A.; ZACHOW, C.; BERG, G.; ZEILINGER, S. *Trichoderma*–plant–pathogen interactions: Advances in genetics of biological control. **Indian Journal of Microbiology**, v. 52, n. 1, p. 522-529, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12088-012-0308-5>.

MUNNYSHA, S.; BUNKER, R. N.; ABHI, R.; SHREE, D.; MONDAL, K.; AKODIYA, S.; ... BENIWAL, M. *Trichoderma*: A multifaceted ally in plant growth promotion and disease resistance. **Plant Archives**, v. 25, n. 1, p. 1472-1478, 2025. <https://doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2025.v25.supplement-1.202>

NÚÑEZ, J. A. D.; LOBO, M. B. **Application of microorganisms in forest plant**. In *Biofertilizers*; INAMUDDIN, A. M. I., BODDULA, R., REZAKAZEMI, M., Eds.; Wiley: Cambridge, USA, 2021; pp. 265–287. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821667-5.00026-9>.

OLANIYAN, F. T.; ALORI, E. T.; ADEKIYA, A. O.; AYORINDE, B. B.; DARAMOLA, F. Y.; OSEMWEGIE, O. O.; BABALOLA, O. O. The use of soil microbial potassium solubilizers in potassium nutrient availability in soil and its dynamics. **Annals of Microbiology**, v. 72, n. 45, p. 1-12, 2022. <https://doi.org/10.1186/s13213-022-01701-8>.

OLIVEIRA, V. A.; SANTOS, G. G.; KER, J. C.; COUTO, E. G.; JACOMINE, P. K.; CORRÊA, G. R.; ... SCHAEFER, C. E. (2023). **Soils of Cerrados, the Brazilian Savannas**. In: *The Soils of Brazil* (pp. 129-173). Cham: Springer International Publishing.

OSAKABE, Y.; KAWAOKA, A.; NISHIKUBO, N.; OSAKABE, K. Responses to environmental stresses in woody plants: Key to survive and longevity. **Journal of Plant Research**, v. 125, n. 1, p. 1-10, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10265-011-0446-6>.

OSZAKO, T.; VOITKA, D.; STOCKI, M.; STOCKA, N.; NOWAKOWSKA, J. A.; LINKIEWICZ, A.; MALEWSKI, T. *Trichoderma asperellum* efficiently protects *Quercus robur* leaves against *Erysiphe alphitoides*. **European Journal of Plant Pathology**, v. 159, n. 1, p. 295-308, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-02162-y>.

PALANISAMY, Y.; ARIYAN, M.; DANANJEYAN, B.; SUBBURAMU, K.; DESIKAN, R.; SURESH, M.; RATHINASAMY, P. Microbial inoculants—A boon to overcome the challenges of soil problems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 1, n. 1, p. 1-19, 2025. <https://doi.org/10.1080/00103624.2025.2452174>

PAN, Y.; SONG, Y.; ZHAO, L.; CHEN, P.; BU, C.; LIU, P.; ZHANG, D. The genetic basis of phosphorus utilization efficiency in plants provide new insight into woody perennial plants

improvement. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 4, p. 1-20, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijms23042353>.

PARKASH, V.; GAUR, A.; AGNIHOTRI, R.; AGGARWAL, A. ***Trichoderma harzianum* Rifai: A beneficial fungus for growth and development of *Abroma augusta* L. seedlings with other microbial bioinoculants.** In *Trichoderma-The Most Widely Used Fungicide*; SHAH, M. M., SHARIF, U., BUHARI, T. R., Eds.; IntechOpen: London, UK, 2019; v. 1, p. 91. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83533>.

PAUDZAI, F. A. M.; SUNDRAM, S.; YUSOF, M. T.; ANGEL, L.; HASHIM, A.M.; ABDULLAH, S. N. A. Induced systemic resistance and promotion of plant growth in oil palm seedlings by endophytic *Trichoderma virens*. **J Oil Palm Res**, v. 31, n. 1, p. 572-81, 2019. <https://doi.org/10.21894/jopr.2019.0031>.

PHILIPPOT, L.; CHENU, C.; KAPPLER, A.; RILLIG, M. C.; FIERER, N. The interplay between microbial communities and soil properties. **Nature Reviews Microbiology**, v. 1, n. 1, p. 1-14, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00980-5>.

POVEDA, J. Beneficial effects of microbial volatile organic compounds (MVOCs) in plants. **Applied Soil Ecology**, v. 168, n. 1, p. 1-14, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104118>.

PRASAD, A.; DIXIT, M.; MEENA, S. K.; KUMAR, A. Qualitative and quantitative estimation for phosphate solubilizing ability of *Trichoderma* isolates: A natural soil health enhancer. **Materials Today: Proceedings**, v. 81, n. 2, p. 360-366, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.305>.

PRASANNATH, K.; PETER, S. A.; SHAKTHIVEL, K.; RAKULAN, T.; CHANDRANATH S. K. Revisiting the ecological significance, composition, and functions of plant microbiome: a review. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 1, n. 1, p. 1-33, 2025. <https://doi.org/10.1080/01140671.2025.2458811>

PROCÓPIO, L.; BARRETO, C. The soil microbiomes of the Brazilian Cerrado. **Journal of Soils and Sediments**, v. 21, n. 1, p. 2327-2342, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02936-9>.

PROMWEE, A.; ISSARAKRAISILA, M.; INTANA, W.; CHAMSWARNG, C.; YENJIT, P. Phosphate solubilization and growth promotion of rubber tree (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) by *Trichoderma* strains. **Journal of Agricultural Science**, v. 6, n. 9, p. 1-13, 2014. <https://doi.org/10.5539/jas.v6n9p8>.

PUGLIELLI, G.; LAANISTO, L.; GORI, A.; CARDOSO, A. A. Woody plant adaptations to multiple abiotic stressors: Where are we? **Flora**, v. 299, n. 1, p. 1-10, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152221>.

QIN, X.; XU, J.; AN, X.; YANG, J.; WANG, Y.; DOU, M.; WANG, M.; HUANG, F.; FU, Y. Insight of endophytic fungi promoting the growth and development of woody plants. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 1, n. 1, p. 1-22, 2023. <https://doi.org/10.1080/07388551.2022.2129579>.

- RANI, K.; KUMAR, K.; NAVPUTE, G.; PANWAR, A.; KAUR, A.; KAUSHIK, P. Microbiome interactions affect plant physiology and immunity to environmental stresses. **Preprints**, v. 1, n. 1, p. 1-120, 2023. <https://doi.org/10.20944/preprints202308.0054.v1>.
- REIS, D. N.; SILVA, F. G.; SANTANA, R. C.; OLIVEIRA, T. C.; FREIBERGER, M. B.; SILVA, F. B.; MÜLLER, C. Growth, physiology and nutrient use efficiency in *Eugenia dysenterica* DC under varying rates of nitrogen and phosphorus. **Plants**, v. 9, n. 6, p. 1-19, 2020. <https://doi.org/10.3390/plants9060722>.
- REIS, L. H. V.; ROCHA, L. F.; SANTOS, J. A.; SOUZA, C. R.; TRAZZI, P. A.; BARBOSA, L. O.; CARVALHO, D. Morphometric characterization of *Khaya senegalensis* in southern Minas Gerais State, Brazil. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 131, p. 1-13, 2021. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n131.16>.
- RIIKONEN, J.; LUORANEN, J. Seedling production and the field performance of seedlings. **Forests**, v. 9, n. 12, p. 1-4, 2018. <https://doi.org/10.3390/f9120740>.
- RINGEVAL, B.; DEMAY, J.; GOLL, D. S.; HE, X.; WANG, Y. P.; HOU, E.; ... PELLERIN, S. A global dataset on phosphorus in agricultural soils. **Scientific Data**, v. 11, n. 17, p. 1-34, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02751-6>.
- RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S.; WITHERS, P. J. A.; TELES, A. P. B.; HERRERA, W. F. B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the Total Environment**, v. 542, n. 1, p. 1050-1061, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.118>.
- RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; ABDALA, D. B.; EBUELE, V. O.; THOSS, V.; WITHERS, P. J. A.; PAVINATO, P. S. Long-term land use and tillage influence on phosphorus species in Brazilian Oxisols: A multi-technique assessment by chemical P fractionation, ³¹P NMR and P K-edge XANES spectroscopies. **Soil and Tillage Research**, v. 229, n. 1, p. 1-10, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105683>.
- ROS, M. B.; KOOPMANS, G. F.; VAN GROENIGEN, K. J.; ABALOS, D.; OENEMA, O.; VOS, H. M.; VAN GROENIGEN, J. W. Towards optimal use of phosphorus fertiliser. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-8, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74736-z>.
- ROY, E. D.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; COLETTA, L. D.; LINS, S. R. M.; VAZQUEZ, F. F.; ... PORDER, S. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, v. 2, n. 5, p. 1-6, 2016. <https://doi.org/10.1038/NPLANTS.2016.43>.
- SALAMI, A. O.; GBADEBO, J. O.; SHITTU, E. A. Germination and early growth of *Terminalia ivorensis* A. Chev. AND *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. **Renewable**, v. 3, n. 1, p. 55-62, 2023.
- SALWAN, R.; RIALCH, N.; SHARMA, V. **Bioactive volatile metabolites of *Trichoderma*: An overview**. In Secondary metabolites of plant growth promoting rhizomicroorganisms; SINGH, H. B.; KESWANI, C.; REDDY, M. S., Eds.; Springer: Singapore, 2019; Volume 1, pp. 87–111. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-5862-35>.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. Á.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA,

T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5ª ed.; Embrapa: Brasília, Brasil, 2018; p. 356.

SANTOS, M. F.; COSTA, D. L.; VIEIRA, T. A.; LUSTOSA, D. C. Effect of *Trichoderma* spp. fungus for production of seedlings in *Enterolobium schomburgkii* (Benth.) Benth. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 10, p. 1706-1711, 2019. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.10.p2023>.

SANTOS, S. R.; COSTA, L. M.; SOUZA, C. M. M.; LEAL, G. P.; MELLO, D. C.; SILVA, W. T. L.; ... SCHAEFER, C. E. G. R. Thermodegradation of organic matter in soils of different mineral composition in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 37, n. 1, p. 1-10, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00798>.

SANTOS NETO, A. P.; AMARAL, G. C.; PEZZOPANE, J. E. M.; NÓIA JÚNIOR, R. S.; XAVIER, T. M. T.; FONSECA, M. D. S.; MACHUCA, M. A. H. Responses of African mahogany seedlings to temperature, vapor pressure deficit and water availability. **Scientia Forestalis**, v. 51, n. 3961, p. 1-12, 2023. <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.20>.

SCHOLZ, R. W.; WELLMER, F. W.; MEW, M.; STEINER, G. The dynamics of increasing mineral resources and improving resource efficiency: Prospects for mid-and long-term security of phosphorus supply. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 213, n. 1, p. 1-13, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107993>

SCHWAMBACK, D.; AMORIM BRANDÃO, A. R.; BERTOTTO, L. E.; BERNDTSSON, R.; ZHANG, L.; WENDLAND, E.; PERSSON, M. Quantifying soil loss in the brazilian savanna ecosystem: Current rates and anticipated impact of climate changes. **Land Degradation & Development**, v. 35, n. 1, p. 1-18, 2024. <https://doi.org/10.1002/ldr.5331>

SELLAL, Z.; TOUHAMI, A.O.; CHLIYEH, M.; MOUDEN, N.; SELMAOUI, K.; DAHMANI, J.; DOUIRA, A. Effect of seeds treatment with *Trichoderma harzianum* on argan plants growth. **Plant Cell BioTechnology Mol Biol**, v. 21, n. 11, p. 69-77, 2020.

SELLAMI, M. H.; LAVINI, A. Advancements in Soil and Sustainable Agriculture. **Soil Systems**, v. 7, n. 4, p. 1-4, 2023. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040098>.

SHANG, J.; LIU, B.; XU, Z. Efficacy of *Trichoderma asperellum* TC01 against anthracnose and growth promotion of *Camellia sinensis* seedlings. **Biological Control**, v. 143, n. 1, p. 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104205>.

SHARIFI, R.; RYU, C. M. Revisiting bacterial volatile-mediated plant growth promotion: Lessons from the past and objectives for the future. **Annals of Botany**, v. 122, n. 3, p. 349-358, 2018. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy108>.

SILVA, L. I. D.; PEREIRA, M. C.; CARVALHO, A. M. X. D.; BUTTRÓS, V. H.; PASQUAL, M.; DÓRIA, J. Phosphorus-solubilizing microorganisms: A key to sustainable agriculture. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 1-30, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020462>.

SIMAMORA, M.; BASYUNI, M.; LISNAWITA, L. Potency of secondary metabolites of *Trichoderma asperellum* and *Pseudomonas fluorescens* in the growth of cocoa plants affected by vascular streak dieback. **Biodiversitas**, v. 22, n. 5, p. 1-6, 2021. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220511>.

SIMON, C. D. P.; GOMES, T. F.; PESSOA, T. N.; SOLTANGHEISI, A.; BIELUCZYK, W.; CAMARGO, P. B. D.; ... CHERUBIN, M. R. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, n. 1, p. 1-21, 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbs20210103>.

SMIDERLE, O. J.; SOUZA, A. D. G.; CHAGAS, E. A.; ALVES, M. S.; FAGUNDES, P. R. D. O. Nutritional status and biomass of african mahogany seedlings grown with nutrient solution in the Northern Amazon. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 4, p. 958-970, 2020. <https://doi.org/10.5902/1980509819904>.

SOUSA, W. N.; BRITO, N. F.; FELSEMBURGH, C. A.; VIEIRA, T. A.; LUSTOSA, D. C. Evaluation of *Trichoderma* spp. isolates in cocoa seed treatment and seedling production. **Plants**, v. 10, n. 9, p. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10091964>.

STEWART, A.; HILL, R. **Applications of *Trichoderma* in plant growth promotion**. In Biotechnology and Biology of *Trichoderma*; GUPTA, V. G., SCHMOLL, M., ESTRELLA, A. H., UPADHYAY, R. S., DRUZHININA, I., TUOHY, M., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014; Volume 1, pp. 415-428. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59576-8.00031-X>.

SURYANTINI, R.; WULANDARI, R. S. Effectiveness of *Trichoderma viride* (T2) to the growth of *Acacia mangium* seedlings. **Journal of Advanced Agricultural Technologies**, v. 4, n. 4, p. 1-4, 2017. <https://doi.org/10.18178/joaat.4.4.364-367>.

THAKUR, M.; KHUSHBOO, S. S.; KUMARI, P.; KUMAR, M.; VIBHUTI, R. K.; ... KUMAR, D. Unlocking the secrets of rhizosphere microbes: A new dimension for agriculture. **Symbiosis**, v. 92, n. 3, p. 305-322, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13199-024-00980-w>.

THEPBANDIT, W.; ATHINUWAT, D. Rhizosphere microorganisms supply availability of soil nutrients and induce plant defense. **Microorganisms**, v. 12, n. 3, p. 1-23, 2024. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12030558>

TRIVEDI, P.; LEACH, J. E.; TRINGE, S. G.; SA, T.; SINGH, B. K. Plant–microbiome interactions: From community assembly to plant health. **Nature Reviews Microbiology**, v. 18, n. 11, p. 607-621, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>.

TYŚKIEWICZ, R.; NOWAK, A.; OZIMEK, E.; JAROSZUK-ŚCISEŁ, J. *Trichoderma*: The current status of its application in agriculture for the biocontrol of fungal phytopathogens and stimulation of plant growth. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 4, p. 1-28, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijms23042329>.

VAIO, C.; TESTA, A.; CIRILLO, A.; CONTI, S. Slow-release fertilization and *Trichoderma harzianum*-based biostimulant for the nursery production of young olive trees (*Olea europaea* L.). **Agronomy Research**, v. 19, n. 3, p. 1396–1405, 2019. <https://doi.org/10.1515/ar.21.143>.

VALDESPINO, C.A.R.; FLORES, S.C.; MONFIL, V.O. *Trichoderma* as a model to study effector-like molecules. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, n. 1, p. 1-14, 2019. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01030>.

- VASSILEVA, M.; MENDES, G. D. O.; DERIU, M. A.; BENEDETTO, G. D.; PEREGRIN, E. F.; MOCALI, S.; MARTOS, V.; VASSILEV, N. Fungi, P-solubilization, and plant nutrition. **Microorganisms**, v. 10, n. 9, p. 1-14, 2022. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091716>.
- VINALE, F.; NIGRO, M.; SIVASITHAMPARAM, K.; FLEMATTI, G.; GHISALBERTI, E. L.; RUOCCO, M.; LORITO, M. Harzianic acid: A novel siderophore from *Trichoderma harzianum*. **FEMS Microbiology Letters**, v. 347, n. 2, p. 123-129, 2013. <https://doi.org/10.1111/1574-6968.12231>.
- VINALE, F.; SIVASITHAMPARAM, K.; GHISALBERTI, E. L.; RUOCCO, M.; WOO, S.; LORITO, M. *Trichoderma* secondary metabolites that affect plant metabolism. **Natural Product Communications**, v. 7, n. 11, p. 1545-1550, 2012. <https://doi.org/10.1177/1934578X1200701133>.
- WAGHUNDE, R. R.; SHELAK, R. M.; SABALPARA, A. N. *Trichoderma*: A significant fungus for agriculture and environment. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 22, p. 1952-1965, 2016. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.10584>.
- WANG, L.; LU, P.; FENG, S.; HAMEL, C.; SUN, D.; SIDDIQUE, K. H.; GAN, G. Y. Strategies to improve soil health by optimizing the plant–soil–microbe–anthropogenic activity nexus. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 359, n. 1, p. 1-16, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108750>.
- WANG, N. Q.; KONG, C. H.; WANG, P.; MEINERS, S. J. Root exudate signals in plant - Plant interactions. **Plant, Cell & Environment**, v. 44, n. 4, p. 1044-1058, 2021. <https://doi.org/10.1111/pce.13892>.
- WEI, X.; XIE, B.; WAN, C.; SONG, R.; ZHONG, W.; XIN, S.; SONG, K. Enhancing soil health and plant growth through microbial fertilizers: mechanisms, benefits, and sustainable agricultural practices. **Agronomy**, v. 14, n. 3, p. 1-16, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030609>.
- WEST, P. W. Do increasing respiratory costs explain the decline with age of forest growth rate? **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 1, p. 693-712, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01020-w>.
- WITHERS, P. J.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R.; BENITES, V. D. M.; ... PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z>.
- YANG, H.; LIU, Y.; LIU, J.; MENG, J.; HU, X.; TAO, S. Improving the imbalanced global supply chain of phosphorus fertilizers. **Earth's Future**, v. 7, n. 1, p. 638–651, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018EF001005>.
- YU, C.; LUO, X. *Trichoderma koningiopsis* controls *Fusarium oxysporum* causing damping-off in *Pinus massoniana* seedlings by regulating active oxygen metabolism, osmotic potential, and the rhizosphere microbiome. **Biological Control**, v. 150, n. 1, p. 1-12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104352>.

- YU, Z.; WANG, Z.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; LIU, Z. Biocontrol and growth-promoting effect of *Trichoderma asperellum* TaspHu1 isolate from *Juglans mandshurica* rhizosphere soil. **Microbiological Research**, v. 242, n. 1, p. 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126596>.
- YUDINA, A.; KUZYAKOV, Y. Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores. **Geoderma**, v. 434, n. 1, p. 1-11, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116478>.
- ZEILINGER, S.; GRUBER, S.; BANSAL, R.; MUKHERJEE, P. K. Secondary metabolism in *Trichoderma*—Chemistry meets genomics. **Fungal Biology Review**, v. 30, n. 1, 74–90, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2016.05.001>.
- ZHANG, P.; DUMROESE, R. K.; PINTO, J. R. Organic or inorganic nitrogen and rhizobia inoculation provide synergistic growth response of a leguminous forb and tree. **Plant Science**, v. 10, n. 1, p. 1-13, 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01308>.
- ZHANG, R.; YAN, Z.; WANG, Y.; CHEN, X.; YIN, C.; MAO, Z. Effects of *Trichoderma harzianum* fertilizer on the soil environment of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under replant conditions. **HortScience**, v. 56, n. 1, p. 1073-1079, 2021. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15970-21>.
- ZHANG, Z.; MALLIK, A.; ZHANG, J.; HUANG, Y.; ZHOU, L. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on inoculated seedling growth and rhizosphere soil aggregates. **Soil Tillage Research**, v. 194, n. 1, p. 1-7, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104340>.
- ZHAO, M.; ZHAO, J.; YUAN, J.; HALE, L.; WEN, T.; HUANG, Q.; SHEN, Q. Root exsudate drive soil microbe nutrient feedback in response to plant growth. **Plant Cell Environ**, v. 44, n. 1, p. 613-628, 2020. <https://doi.org/10.1111/pce.13928>.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Natália Cássia de Faria Ferreira

CAPÍTULO 3

**COINOCULAÇÃO (*Trichoderma harzianum* + *Bradyrhizobium elkanni* +
B. diazoefficiens) NO CRESCIMENTO DE MUDAS DE GUAPURUVU
(*Schizolobium parahyba* var. *parahyba* (Vell.) Blake)**

Orientador: Prof. Dr. Alcides Gatto

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Diego Costa Carvalho

Brasília, 27 de janeiro de 2025

RESUMO

FERREIRA, N. C. F. **Coinoculação (*Trichoderma harzianum* + *Bradyrhizobium elkanni* + *B. diazoefficiens*) no crescimento de mudas de guapuruvu (*Schizolobium parahyba* var. *parahyba* (Vell.) Blake).** Universidade de Brasília, Brasília, DF.

A produção de mudas florestais enfrenta a baixa fertilidade natural dos solos tropicais, um dos fatores limitantes ao processo de desenvolvimento das plantas. Neste contexto, torna-se essencial a inserção de tecnologias viáveis para aumentar a produção, como o valioso sistema de “consórcio” segmentado pela coinoculação de microrganismos sinérgicos. Objetivou-se avaliar em casa de vegetação o efeito da coinoculação entre *Trichoderma harzianum*, *Bradyrhizobium diazoefficiens* e *B. elkanni* no crescimento de mudas de *Schizolobium parahyba* var. *parahyba* (Vell.) Blake. As avaliações consistiram em: *T. harzianum* ESALQ 1306; *B. elkanni* (SEMIA 5080) + *B. diazoefficiens* (SEMIA 587); *T. harzianum* + *B. elkanni* + *B. diazoefficiens*, mais um tratamento controle, para efeito de comparação. Em casa de vegetação, as sementes foram semeadas e as avaliações foram realizadas 120 dias após a semeadura. As variáveis analisadas foram altura da parte aérea (PA), diâmetro do caule (DC), comprimento da raiz (CR), biomassa fresca (BMF), biomassa seca (BIO) e índice de qualidade de Dickson (IQD). Os microrganismos avaliados mostraram-se eficazes na produção de mudas de *S. parahyba* var. *parahyba*, com destaque para o consórcio entre *T. harzianum* + *B. elkanni* + *B. diazoefficiens*, em relação ao incremento nos parâmetros morfométricos avaliados. Os resultados indicam que a coinoculação é um método promissor na produção de mudas, capaz de melhorar a qualidade das mudas e contribuir para a saúde do solo. A interação planta-microrganismo tange inicialmente a fase de germinação, sustentada diretamente pelo vigor das sementes e aos mecanismos de ação favoráveis à obtenção de plântulas saudáveis, as quais relacionam-se estreitamente aos resultados obtidos: mudas com alta desenvoltura. A caracterização dos atributos químicos dos solos indica o sinergismo obtido através do bioestímulo mediado pelos microrganismos, fatores altamente desejáveis durante a etapa em viveiro. Os bioinsumos ultrapassam a promoção do crescimento vegetal e perpassam pela saúde e qualidade dos solos, sendo a fertilidade peça-chave a manutenção da vida. O adequado suprimento nutricional é um atributo fundamental ao desenvolvimento de mudas, com base na produção e acúmulo de reservas necessário a posterior performance em campo. A coinoculação se enquadra na perspectiva sustentável (um pilar ao sistema produtivo), representa a redução considerável na utilização de fertilizantes industriais, bem como minimiza a exploração de fontes limitadas de nutrientes minerais.

Palavras-chave: Microrganismos potenciais; interação; promoção do crescimento; produção florestal.

ABSTRACT

The production of forest seedlings faces the low natural fertility of tropical soils, one of the limiting factors in the plant development process. In this context, the insertion of viable technologies to increase production becomes essential, such as the valuable “consortium” system segmented by the co-inoculation of synergistic microorganisms. The objective was to evaluate in a greenhouse the effect of co-inoculation between *Trichoderma harzianum*, *Bradyrhizobium diazoefficiens* + *B. elkanni* on the growth of *Schizolobium parahyba* var. *parahyba* (Vell.) Blake. Assessments consisted of: *T. harzianum* ESALQ 1306; *B. elkanni* (SEMIA 5080) + *B. diazoefficiens* (SEMIA 587); *T. harzianum* + *B. elkanni* + *B. diazoefficiens*, plus a control treatment, for comparison purposes. A greenhouse, the seeds were sown, and evaluations were carried out 120 days after sowing. The variables analyzed were shoot height (SH), stem diameter (SD), root length (RL), fresh biomass (TFM), dry biomass (BIO) and Dickson quality index (DQI). The microorganisms evaluated effectively produced seedlings of *S. parahyba* var. *parahyba*, emphasizing the consortium between *T. harzianum* + *B. elkanni* + *B. diazoefficiens* to the increase in the morphometric parameters evaluated. The results denote that co-inoculation is a promising method in seedling production, can improve seedling quality, and contributes to soil health. The plant-microorganism interaction initially concerns the germination phase, directly supported by the vigor of the seeds and the mechanisms of action favorable to obtaining healthy seedlings, which are closely related to the results obtained: seedlings with high development. The characterization of the chemical attributes of the soil indicates the synergism obtained through biostimulation mediated by microorganisms and requirement factors in the nursery stage. Bioinputs go beyond promoting plant growth and go beyond the health and quality of soils, with fertility being a key element in maintaining life. Adequate nutritional supply is a fundamental attribute for growth seedlings, based on the production and accumulation of reserves necessary for subsequent performance in the field. Co-inoculation is a sustainable perspective (a pillar of the production system), and the reduction of industrial fertilizers and exploitation of limited sources of mineral nutrients.

Keywords: Potential microorganisms; interaction; promotion of growth; forestry production.

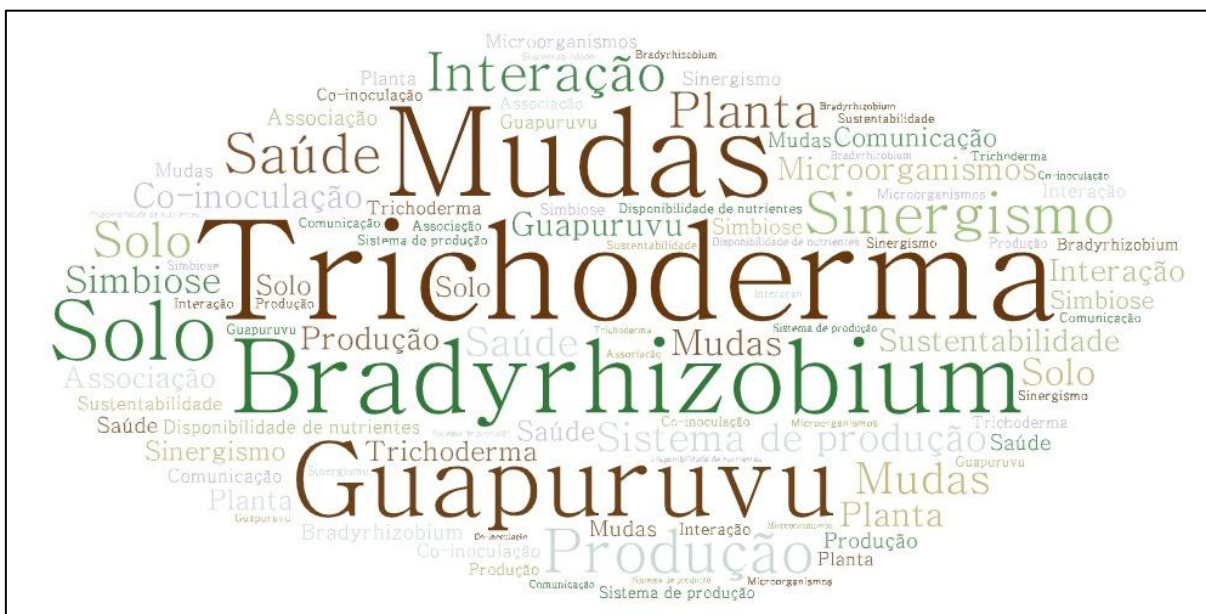
LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas do processo de produção de mudas sob interação com microrganismos potenciais, co-inoculados.	77
Figura 2. Variáveis canônicas, referente às mudas de <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>parahyba</i> em casa de vegetação, sob tratamento de solo com a suspensão de microrganismos potenciais e coinoculação (<i>Trichoderma harzianum</i> e <i>Bradyrhizobium diazoefficiens</i> + <i>B. elkanii</i>).	84
Figura 3. Mudas de <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>parahyba</i> sob efeito de diferentes tratamentos com microrganismos e tratamento controle, para fins comparativos.	85
Figura 4. Caracterização química do solo destinado à produção de mudas de <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>parahyba</i> , sob os efeitos de microrganismos bioestimuladores (<i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Bradyrhizobium diazoefficiens</i> e <i>B. elkanii</i>).	87
Figura 5. Efeitos na formação de plantas co-inoculadas (<i>Bradyrhizobium</i> e <i>Trichoderma</i>) e não-inoculadas.	92
Figura 6. Benefícios correlacionados a adoção de bioinsumos na produção de mudas florestais.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características químicas do Latossolo Vermelho-Amarelo.	78
Tabela 2. Altura da parte aérea (ALT), comprimento da raiz (CR), diâmetro do coleto (DC), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFRA), massa fresca total (MFT), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), biomassa seca total (BIO) e o índice de qualidade de Dickson (IQD) de <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>parahyba</i> em casa de vegetação, com solo de vasos tratados com a suspensão de <i>Trichoderma harzianum</i> e <i>B. diazoefficiens</i> + <i>B. elkanii</i>	83

HIGHLIGHTS



Nuvem de palavras, correlacionadas a produção de mudas de guapuruvu (*Schizolobium parahyba* var. *parahyba*) sob efeitos de agentes bioestimuladores de crescimento.

*Palavras com grande relevância quanto as avaliações realizadas.

1 INTRODUÇÃO

A silvicultura é um segmento consolidado em diversas regiões globais, principalmente no quesito madeireiro, via abastecimento de mudas cultivadas em viveiros. No Brasil, as espécies nativas se enquadram à demanda crescente pela produção em larga escala. Contudo, grande parte dos solos brasileiros são caracterizados pelo elevado grau de intemperismo, acidez (altas concentrações de alumínio (Al), devido à redução do pH) e baixo conteúdo de nutrientes minerais disponíveis, fator limitante à produção de espécies lenhosas (CASTILHO SILVA et al., 2024; LUO et al., 2024). Mediante as restrições dos solos tropicais, o sinergismo entre planta e microrganismos benéficos contribui com melhorias na estrutura do solo, de modo a favorecer o desenvolvimento vegetal (NIU et al., 2024).

O componente arbóreo desempenha funções ecossistêmicas primordiais, dentre elas, os efeitos na mitigação das alterações climáticas, por se tratar de sumidouros responsáveis por cerca de 46% do fluxo global de carbono terrestre (CAMPOS et al., 2023). O setor florestal brasileiro impulsiona a economia nacional, todavia, o sucesso no estabelecimento de mudas florestais depende de múltiplos fatores, como a qualidade do solo e a capacidade de desenvolvimento e estabelecimento (TORMES et al., 2022). Geralmente, um dos principais entraves ao estabelecimento de mudas florestais em condições de viveiro e estabelecimento campo correlaciona-se com a ausência de microrganismos sinérgicos no solo, o que ressalta a grande relevância da simbiose na produção de arbóreas (ABREU et al., 2022).

Dentre as espécies nativas de produção florestal, recebe destaque *Schizolobium parahyba* var. *parahyba* (Vell.) Blake (guapuruvu), promissora e pioneira, de grande porte (40 m de altura e 120 cm de DAP). É nativa do bioma Mata Atlântica, possui rápido crescimento (EPIFANIO et al., 2022). A leguminosa apresenta potencial na restauração ecológica e produção madeireira, como os setores de produção de navios, chapas, móveis, portas, forros, mesas e brinquedos (CORRÊA; DIAS, 2021). De forma análoga ao mogno-africano, o guapuruvu requer solos saudáveis, com condições propícias ao bom desenvolvimento de mudas, mediante melhorias na qualidade do solo e maior disponibilização nutricional, via uso de microrganismos potenciais (DUIN et al., 2019).

O pleno desenvolvimento vegetal apresenta complexa co-dependência quanto ao suprimento de nutrientes em níveis adequados, evidenciada pelo atual cenário dos Latossolos brasileiros (em termos de fertilidade natural), sendo o déficit por macro e micronutrientes uma

realidade contrastante (SUZUKI; CASALINHO; MILANI, 2024). As situações de instabilidade em termos nutricionais estimulam a plasticidade fenotípica das plantas, via alterações fisiológicas e morfológicas, voltadas à maior aquisição por recursos limitantes (água e nutrientes) (PRESCOTT, 2024). A sincronia entre o crescimento vegetal e a capacidade de produção (bens e serviços florestais) inclui o fornecimento de nutrientes conforme as exigências em cada etapa de desenvolvimento e a saúde dos solos, sendo a deficiência ou excesso nocivos ao bom funcionamento metabólico, conforme os papéis específicos à nível celular (KAUR et al., 2023; SZMYT; DERING, 2024).

A produção de mudas requer melhorias voltadas a redução de fertilização química e, uma vez que se trata de uma etapa crucial no ciclo da planta, dependente de condições propícias e nutrientes disponíveis às plantas, fatores que quando ausentes limitam o estabelecimento da muda, e em grande escala a regeneração de uma população de plantas (REYES et al., 2022). Durante o processo de rustificação e aclimação, grande parte das mudas aparentemente saudáveis não são capazes de sobreviver em campo, isso ocorre de acordo com as condições de estresse biótico (pragas e doenças) e abiótico (condições climáticas, níveis nutricionais, tipos de solos) existentes (JOSHI et al., 2023).

A biofertilização com simbioses, à exemplo de *Trichoderma* sp. e *Bradyrhizobium* sp., pode viabilizar a produção de mudas sob condições limitantes (KOMOLAFE et al., 2021; PRASAD et al., 2021; ALI et al., 2022). A ação estimuladora ao crescimento vegetal é complexa, realizada via interações com os fatores bioquímicos, a produção de diversas enzimas e compostos benéficos às plantas. A obtenção de êxito no estabelecimento de florestas comerciais é guiada pela alta qualidade das mudas, no entanto, as condições de restrição nutricional nos substratos do solo comumente existentes na produção de mudas, promovem decréscimos na qualidade final.

O gênero *Bradyrhizobium* é amplamente conhecido por suas aplicações em espécies leguminosas anuais, correlacionados primordialmente à fixação biológica de nitrogênio (FBN) (GÓMEZ-GODÍNEZ et al., 2023). No entanto, a capacidade das bactérias bioestimuladoras transpõe os estímulos indutores de desenvolvimento, o que potencializa a escolha das bactérias potenciais na produção de espécies arbóreas leguminosas, não à fins de nodulação, mas correlacionadas à promoção de crescimento via estímulos amplificadores, sob uma perspectiva inovadora e sustentável (FAHDE et al., 2023).

O uso de microrganismos (fungos e bactérias benéficos) surge como uma alternativa viável, capaz de auxiliar na regulação do crescimento, qualidade e vigor das mudas (SIREGAR et al., 2022). O estreito relacionamento com as plantas, garante que fungos e bactérias ao

colonizar o sistema radicular promovam alterações no metabolismo vegetal, com efeito no crescimento em parte aérea, diâmetro do caule e sistema radicular, assim como o consequente incremento na capacidade de absorção e aproveitamento nutricional (BATISTELLO et al., 2022).

A coinoculação de plantas pode apresentar três vertentes: benéfica, antagônica ou nula, através da alta variabilidade existente durante a associação microbiana (FERNANDEZ-GNECCO et al., 2024). Conforme os amplos efeitos na bioestimulação do crescimento de plantas, nos últimos anos a crescente oferta global por bioinsumos toma cada vez mais força, com aplicações às diversas espécies de microrganismos benéficos, responsáveis por resultados consistentes, rápidos, satisfatórios e alternativos ao uso demasiado de fertilizantes (DWIBEDI et al., 2022; ANDREATA et al., 2024).

As etapas que envolvem a interação entre bactérias e os fungos bioestimuladores contemplam distintos modos, desde a conexão física (via contato direto) e química (via troca de sinais/compostos), de modo a impactar a ação mutualística (NAPITUPULU, 2025). Sob uma perspectiva sustentável, os microrganismos endofíticos tendem a suprir a demanda por maiores índices produtivos silviculturais, aliado ainda à premissa de reduzir os impactos ambientais causados pelo uso desenfreado de fertilizantes, com ênfase a possibilidade de combinação entre microrganismos sinérgicos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a capacidade de coinoculação entre fungos e bactérias, através da cepa fúngica de *Trichoderma harzianum* e o complexo de cepas bacterianas de *Bradyrhizobium diazoefficiens* e *B. elkanii*, na promoção do crescimento durante a produção de mudas de guapuruvu (*Schizolobium parahyba* var. *parahyba* (Vell.) Blake).

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar os caracteres morfológicos referentes à parte aérea e sistema radicular de mudas de *Schizolobium parahyba* var. *parahyba*.
- Caracterizar os atributos químicos do solo específicos, correlacionados à produção de mudas de *Schizolobium parahyba* var. *parahyba*.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Guapuruvu: Características morfofisiológicas e potenciais da leguminosa

A posição taxonômica do guapuruvu segue à hierarquia:

Reino: Plantae

Divisão: Magnoliophyta (Angiosperma)

Classe: Magnoliopsida (Dicotiledônea)

Ordem: Fabales

Família: Fabaceae (Leguminosa Caesalpinioideae)

Gênero: *Schizolobium*

Espécie: *Schizolobium parahyba* var. *parahyba* (Vellozo) S. F. Blake

A espécie tropical heliófita e semidecídua, tem origem na Mata Atlântica e expande sua distribuição desde o Nordeste (Bahia) até o sul do Brasil (Rio Grande do Sul), popularmente conhecida como guapuruvu, possui fuste cilíndrico com até 30 m de altura e 120 cm de DAP (diâmetro à altura do peito), quanto aos parâmetros madeireiros, produz altos volumes de madeira, com a produtividade acerca de 10 anos aproximadamente de 45 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, possui baixa densidade (d=0,32gcm³), fator qual permite sua aplicação à diversos segmentos, como a fabricação de móveis (após o tratamento químico da madeira); painéis e portas; indústria farmacêutica (casca); flora apícola e sobretudo, por se tratar de uma leguminosa com rápido crescimento é amplamente designada para a recuperação de ambientes degradados (LORENZI, 1992; OLMEDO; FONTANA; OLIVEIRA, 2022).

O gênero *Schizolobium* é reconhecido por suas espécies arbóreas leguminosas, algumas fenotipicamente semelhantes, à exemplo entre guapuruvu (*S. parahyba* var. *parahyba*) e paricá (*S. parahyba* var. *amazonicum* (Huber x Ducke) Barneby). No entanto, há diferenciação entre tais à nível morfológico, pela presença de pétalas orbiculares, pilosas e sementes com maior dimensão (2-3 cm de comprimento e 1-2 cm de largura) para guapuruvu (CARVALHO, 2005). Quanto ao incremento madeireiro, ocorre decréscimo no desenvolvimento cambial em função a atividade caducifólia no período de estiagem, sendo reestimulada na estação chuvosa, com a presença de folhas expandidas, fisiologicamente ativas (MARCATI; MILANEZ; MACHADO, 2008).

O comportamento fitossociológico da espécie abrange o rápido crescimento, que permite a ocorrência tanto em vegetação primária, como em florestas secundárias e capoeiras altas, comumente encontrada em densos agrupamentos em clareiras, especificamente não muito longeva, sua boa performance permite a formação de elos simbióticos com microrganismos do

solo, principalmente com bactérias diazotróficas (fixadoras de nitrogênio), mecanismo relevante para a transferência de N atmosférico para o solo (BIGHI et al., 2021).

Quanto aos caracteres morfológicos, estendem-se à copa umbeliforme, ramificações cimosas; folhas compostas, alternadas, bipinadas (até 22 pares) e o pecíolo pode atingir 15 cm; as flores são vistosas de coloração amarelada, dispostas em racemos terminais (até 30 cm de comprimento); o fruto é obovado-oblongo, séssil, achatado, glabro, coriáceo ou sublenhoso, de coloração bege amarronzada; comumente há uma ou duas sementes, com o formato irregular (2 a 3 cm de comprimento), brilhante, oblonga-achatado, com tegumento duro, envolvida pelo endocarpo, possui valvas lenhosas, com a dispersão por anemocoria (PIETROBOM; OLIVEIRA, 2004).

O fuste é demarcado pela casca característica, com marcações transversais ovaladas (devido a abscisão foliar), coloração esverdeada (fase juvenil) e acinzentada (fase adulta); a madeira caracteriza-se por suas condições organolépticas à nível macroscópico pela indistinção entre cerne e alburno, com tonalidades claras, levemente brilhantes, superfície lisa, sedosa, com a textura média, grã irregular-reversa, possui anéis de crescimento bem delimitados pela espessura fibrosa e finas linhas parenquimáticas, com a ausência de odor e gosto (CARVALHO, 2005; HANZEN; DRANSKI, 2020).

Uma característica intrínseca de *S. parahyba* var. *parahyba* se estende à produção de fluido pegajoso nos órgãos aéreos em desenvolvimento, fator atrelado ao mecanismo de proteção das mudas, úteis durante o processo de aclimação em campo, tanto pela imobilização física pelos exsudatos, quanto pelos efeitos tóxicos sob condições de estresses bióticos (ocorrência de insetos-praga), a fim de garantir o melhor estabelecimento das mudas (PAIVA et al., 2022). Dentre as estratégias de estabelecimento, as mudas da leguminosa são parcialmente tolerantes ao déficit hídrico e apresentam como estratégia o retardo da desidratação. As plantas reduzem o crescimento e a taxa de transpiração, apresentando redução do número de folhas, altura e diâmetro do caule (DUARTE et al., 2020).

Os serviços ecossistêmicos prestados pelo componente arbóreo, assim como o gênero *Schizolobium* são amplos e contemplam captura do dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e armazenado e fixação de carbono (C) no solo, restauração da qualidade do solo, interações simbióticas com microrganismos, retorno econômico e bem-estar social, considerando ainda a escassez por madeiras nobres no mercado florestal, tornando-se então uma alternativa madeireira, com base em sua elevada capacidade de crescimento e produtividade (CERULLO et al., 2024; YADAV; RAKHOLIA; YOSEF, 2024).

A boa desenvoltura da leguminosa abrange ainda a tolerância mediante condições de restrição luminosa, capaz de suportar as condições de sombreamento, de modo a não induzir danos quanto a capacidade de acúmulo de matéria seca (CARON et al., 2010; MARTINEZ; CONCEPCION, 2023). Apesar dos pontos-fortes inerentes à *S. parahyba* var. *parahyba*, existem desafios em torno de sua produção, dentre eles, as condições de estresse nutricional, agravantes ao seu desenvolvimento, pois os máximos índices produtivos são obtidos pelo fornecimento adequado de macro e micronutrientes (RAMOS et al., 2022).

3.2 Biofertilizantes: Sinergismo entre microrganismo-planta

Os nutrientes minerais, à exemplo do fósforo (P) são oriundos de rochas ígneas (apatita) ocorrentes no Brasil, África do Sul, Canadá, Finlândia e Rússia; e rochas sedimentares (fosforita) encontradas ao norte da África, China, Estados Unidos e Oriente Médio (RYSZKO; RUSEK; KOŁODYŃSKA, 2023; WALTON et al., 2023). O Oriente Médio detém a maior concentração de P, como consequência, elevação no custo de importação dos fertilizantes. Além de se tratar de um recurso finito, intensificado pelo ônus em torno da extração e o fornecimento das fontes minerais em níveis elevados, encontrados hodiernamente em restritos reservatórios superficiais e profundos, o que evidencia a crise em torno do esgotamento nas próximas décadas (CHENG et al., 2023; PENUELAS; COELLO; SARDANS, 2023).

A obtenção de equilíbrio durante a formação de mudas se baseia nos níveis de disponibilidade contínua de nutrientes na solução do solo, capacidade de absorção, entrada e assimilação interna (GROSSNICKLE; MACDONALD, 2018). Diante as intensas oscilações climáticas e necessidade em desenvolver a atividade silvicultora sustentável, o intuito em minimizar a dependência pelos constantes regimes de fertilização é uma premissa a ser adotada. Os principais tipos de adubos comercializados são encontrados na forma inorgânica (fertilizante químico), processados industrialmente, compostos por um ou mais elementos minerais essenciais ao crescimento de plantas (VEJAN et al., 2021).

A grande insustentabilidade em torno do uso de fertilizantes nos sistemas de produção de plantas traz consigo lacunas, dependentes de alternativas eficazes voltadas à redução do uso desenfreado de fontes nutricionais comercializadas, capazes de enfatizar maior precaução em torno das condições de poluição ambiental (toxicidade, eutrofização), correlacionada a minimizar o impacto econômico (custos de produção) e refletir de forma direta e indireta nas características inerentes à qualidade dos solos (FRANCIS et al., 2023).

A bioestimulação se enquadra na busca por métodos eficazes, viáveis e com efeitos de curto a longo prazo, quando comparados ao alarmante uso de fertilizantes comercializáveis e

ao esgotamento de fontes minerais. Os biofertilizantes são formulações de microrganismos vivos ou latentes, que desempenham funções vinculadas ao crescimento vegetal de forma direta ou indireta, à exemplo de indução de crescimento radicular, solubilização de nutrientes, indução de fitohormônios, acréscimo na capacidade fotossintética, acúmulo de matéria seca vegetal, proteção de plantas via indução de defesa, melhorias nos quesitos físico-químicos do solo, dentre outros efeitos multifuncionais (BENITES et al., 2023; SAMANTARAY et al., 2024).

Desde 1896 nos EUA já se comercializava culturas puras de rizóbios, atualmente, os insumos biológicos podem ser encontrados no mercado em distintas formulações no formato líquido (emulsões, soluções concentradas, suspensão concentrada e concentrado emulsionável); formulações no formato sólido (granulados, grânulos dispersíveis em água, pó molhável e pó solúvel) (HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ et al., 2023). Os efeitos da inoculação com os bioinsumos podem ser observados a curto, médio e longo prazo, intrinsicamente duradouros e eficazes, concatenados ao crescimento de plantas, saúde dos solos e estímulo econômico.

A busca incessante pela implementação tecnológica auxilia na oferta de serviços e soluções voltados a problemática dos solos do bioma Cerrado, com benefícios nos segmentos de fortalecimento de pesquisas científicas que evidenciem novos bioestimulantes ou validem a eficácia dos já existentes no setor florestal, responsáveis pelo estímulo de maiores índices de produtividade em campo e retorno econômico. Apesar na multifuncionalidade, a constatação de resultados simbióticos não é comumente fácil, considerando o elevado nível de especificidade envolvida entre as estirpes de microrganismos que interagem com distintas espécies de plantas, com efeitos benéficos, antagônicos ou nulos (PASSAGLIA, 2017; CARNEIRO et al., 2023; BASSO; NEVES; GROSSI-DE-SA, 2024;).

No último triênio, diversos produtos biológicos registrados no Brasil apresentam a sua composição com consórcios microbianos, aproximadamente 83 formulados, no entanto, há grande complexidade envolvida na associação simbiótica, pois fatores ambientais podem categorizar o surgimento de competição com microrganismos nativos e instabilizar a sua eficácia a longo prazo (NUNES et al., 2024).

Dentre os microrganismos destaque por suas ações bioestimuladores, encontram-se as rizobactérias gram-negativas de lento crescimento: *Bradyrhizobium* sp., incumbidas de transformar o nitrogênio atmosférico (N₂) em formas prontamente disponíveis para uso por outros organismos, a interação com as espécies vegetais é mutualística, onde em troca do N fixado endofiticamente nos nódulos radiculares de espécies leguminosas, exige o fornecimento de carboidratos (SINGH et al., 2021). A polivalência de *Bradyrhizobium* permite o

estabelecimento bem-sucedido não apenas em leguminosas, mas também em hospedeiros cognatos, com funções multivariadas de reforço ao crescimento (PATRA; MANDAL, 2022).

Partindo para o filo dos fungos, um dos principais agentes biopromotores de crescimento são o gênero *Trichoderma*, filamentosos, de vida livre, simbiontes endofíticos de plantas, agentes bioprotetores no controle de doenças, além de apresentar ampla atuação no tratamento de sementes por meio da promoção do crescimento e produtividade das plantas (MASTOURI et al., 2010; AKBAR et al., 2022). O papel desempenhado pela espécie induz a produção de hormônios que maximizam o crescimento radicular e consequentemente favorecem a absorção de nutrientes pelo vegetal, o que enfatiza seu grande potencial, além dos efeitos na solubilização de nutrientes no solo (SOUZA et al., 2018; SINGH et al., 2019; MACÍAS-RODRÍGUEZ et al., 2020; SANTOS et al., 2020).

A versatilidade de *Trichoderma* spp. estende-se à sua adaptabilidade a distintos ambientes e a sua associação com diversas espécies vegetais (SINGH et al., 2018). Suas contribuições que vêm sendo cada vez mais averiguado em diversos trabalhos, viabilizando a sua comercialização como ingredientes ativos de biofertilizantes, promotores de crescimento e estimulantes da resistência natural (VINALE; SIVASITHAMPARAM, 2020). Tais microrganismos podem ser incorporados em várias formulações como esporos puros ou suspensões de conídios, integrados com componentes inertes e então armazenados por um longo período sem que ocorra a perda de sua eficácia (WOO et al., 2014).

3.3 Coinoculação de microrganismos em espécies florestais: Efeitos e benefícios

O desenvolvimento de pesquisas correlacionadas ao sinergismo entre planta-fungos potenciais torna-se imprescindível, uma vez que, muitas cepas de *Trichoderma* spp. têm sido testadas em culturas como, cambará, jacarandá-caroba eucalipto, cedro-rosa, freijó e paricá, com a atuação do fungo na produção de metabólitos que promovem a expansão celular vegetal e maior eficiência na absorção nutricional pelas plantas (AMARAL et al., 2017; GRIEBELER et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022). Contudo, ainda existem lacunas quanto ao mecanismo de indução e solubilização de nutrientes minerais, mediante ao uso de cepas fúngicas e bacterianas na produção de mudas florestais.

Durante a fase de viveiro (produção de mudas florestais), diversos fatores podem influenciar positivamente ou negativamente a capacidade de produção das plantas, por isso, torna-se fundamental a inserção de tecnologias viáveis ao aumento da produção. O sistema de “consórcio” segmentado através da coinoculação de microrganismos se trata de uma alternativa valiosa na etapa de desenvolvimento de mudas (LIU; POOBATHY, 2021).

Apesar dos efeitos positivos nos parâmetros de produção e crescimento de plantas arbóreas, a biopromoção via dupla inoculação são variáveis, dependentes da compatibilidade entre tais microrganismos (microrganismos adotados) e quantidade de inóculo aplicada (população de microrganismos), a fim de evitar a competição entre tais, pois há condições em que a coinoculação entre fungos e bactérias podem promover efeito antagônico, fator indesejável no sistema silvicultural de produção e desenvolvimento sustentável (AVILA et al., 2021; POVEDA; EUGUI, 2022).

De acordo com tais informações, é possível identificar a complexidade envolvida no processo de interação planta-microrganismos, o que reforça a necessidade em avaliar os distintos efeitos do consórcio microbiano no desenvolvimento vegetal, assim como na produção de mudas florestais, considerando que, cada espécie apresenta características e respostas específicas à interação, determinantes à obtenção de efeitos aditivos/sinérgicos ou antagônicos (HAKIM et al., 2021). Os efeitos benéficos são observados em melhorias na germinação, vigor, morfogênese da raiz, capacidade fotossintética e elevados índices de biomassa, assim como possibilita a manutenção e o equilíbrio ecológico do solo (DABROWSKA et al., 2021; ANTOSZEWSKI et al., 2022).

O sucesso entre a comunicação e a interação entre plantas e microrganismos é intrínseco. A avaliação do potencial do processo de coinoculação entre fungos e bactérias constitui uma ferramenta promissora ao desenvolvimento de mudas florestais, assim como observado na interação entre fungos micorrízicos e rizobactérias, sob condições de viveiro em larga escala a partir da verificação de êxito no incremento em biomassa de teca (*Tectona grandis*) (RAGHU et al., 2020). Em mudas de dendê (*Elaeis guineensis*), a coinoculação de *Bacillus cereus* e *T. asperellum* foi capaz de aumentar o crescimento das raízes e promover o maior crescimento, através da solubilização de fosfato (SYAFIQ et al., 2021).

Dentre os fatores limitantes ao desenvolvimento silvicultural, recebe destaque as etapas iniciais de formação de mudas, via formação de plântulas com qualidade inferior observadas no baixo incremento em biomassa e restrições no sistema radicular. Tais fatores têm associação direta com a baixa disponibilidade nutricional do solo (substrato) utilizado para o crescimento de mudas, tendo em vista tal restrição, estudos revelam que as co-inoculações entre *Rhizoglosum fasciculatum* (fungo micorrízico arbuscular), *Mortierella* sp. (fungo solubilizante de minerais) e *Azospirillum brasilense* (bactéria promotora de crescimento vegetal) promoveram maior potencial no desenvolvimento de mudas, eficazes à obtenção de maior qualidade de mudas (AGUIRRE et al., 2022).

Resultados positivos foram obtidos através do consórcio entre microrganismos (*R. fasciculatus*, *A. chroococcum*, *B. coagulans* e *T. harzianum*) na produção de mudas de *Dalbergia sissoo*. As plantas associadas aos microrganismos obtiveram elevados índices em todos os parâmetros de crescimento, o que revela o bom estabelecimento das mudas saudáveis e vigorosas em campo (BETTEGOWDA et al., 2021). Mediante a ação multifacetada de microrganismos, a coinoculação se caracteriza como um método promissor ao crescimento e desenvolvimento de mudas (CHAIYA et al., 2021).

A combinação entre fungos micorrízicos (*R. irregulares*; *Funneliformis mosseae* e *Claroideoglomus etunicatum*) e *T. harzianum* demonstrou grande influência no incremento da parte aérea e sistema radicular de macieiras, os quais levaram a redução na necessidade de replantio em viveiro, conforme melhorias oriundas pela ação de microrganismos na qualidade do solo (ZYDLIK et al., 2021). Os mecanismos envolvidos na promoção de desenvolvimento de plantas são amplos e apresentam distintas facetas, sob as condições de cultivo, espécies cultivadas e ação do microrganismo (síntese de nutrientes, fitohormônios, mobilização de compostos do solo), os quais influenciam e asseguram que as mudas possam se desenvolver em boas condições (MACÍAS RODRÍGUEZ et al., 2020; CHAUDHARY et al., 2023).

Em condições viveiristas, a fertilização é um ponto-chave à manutenção do vigor das mudas, atrelada à dependência por doses elevadas (DRANSKI; SONDA; DEMARCHI JÚNIOR, 2019). A qualidade das mudas de espécies florestais está ligada às características químicas presentes no substrato utilizado na sua produção, o que deve permitir a nutrição adequada das mudas e melhorar a formação vigorosa do sistema radicular, permitindo maior sobrevivência das mudas no campo (AGUIAR et al., 2023).

Uma nova possibilidade em reduzir a dependência por elevado conteúdo de fertilizantes se renova pela ação de microrganismos potenciais, o que valida ainda a redução no custo de produção de mudas. As etapas do processo de produção de mudas são: 1) Inicialmente, na fase de viveiro as mudas são inoculadas com bioinsumos; 2) Após o período de formação, são destinadas à campo, as quais enfrentam fatores determinantes ao seu estabelecimento, como água, luz, temperatura, insetos-praga e doenças; 3) Finalmente, os efeitos resultantes da coinoculação, como o sistema radicular bem desenvolvido, incremento em biomassa e altura, permitem que as mudas apresentem boa aclimação em campo, vinculado ao menor prazo de formação e custos (Figura 1).

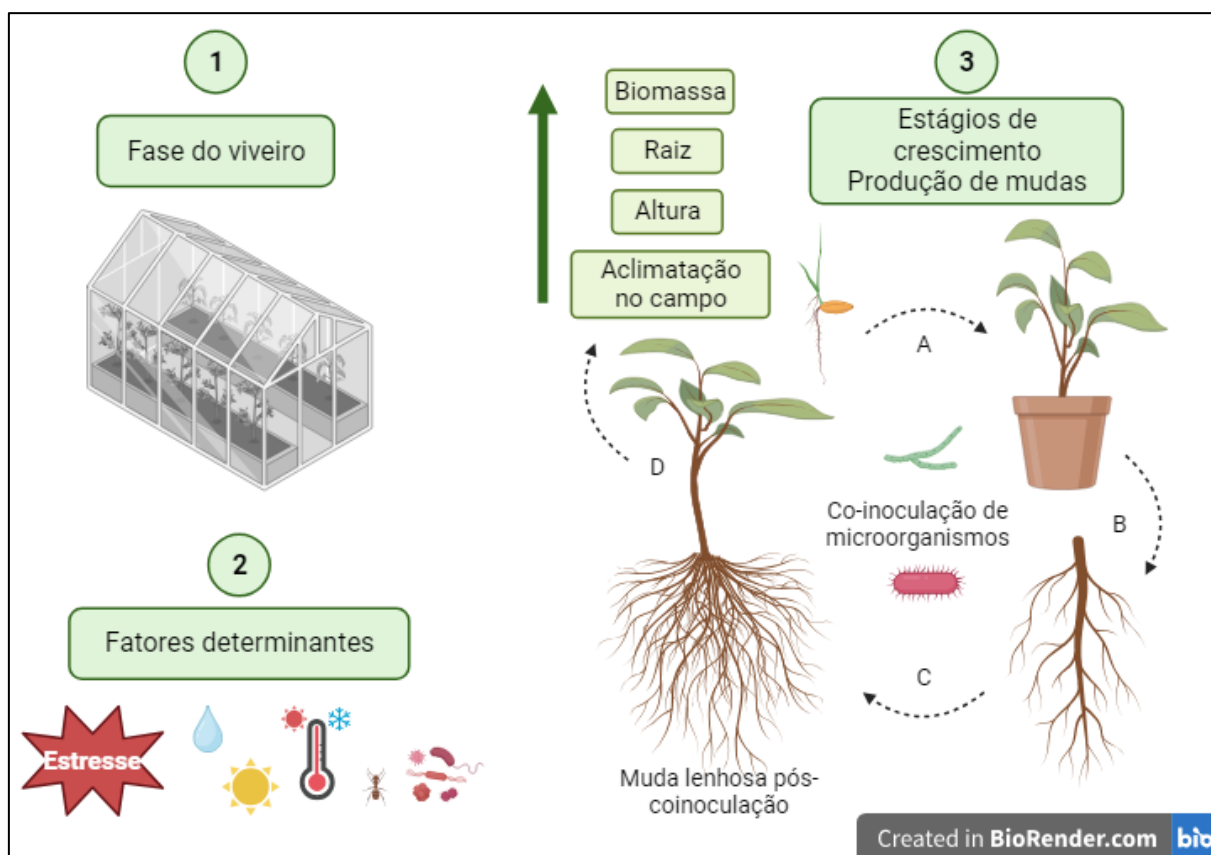


Figura 1. Etapas do processo de produção de mudas sob interação com microrganismos potenciais, co-inoculados.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição do local experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação situada na Universidade Estadual de Goiás (UEG), cidade de Ipameri, Goiás, Brasil (17°42'59.60" S, 48°08'39.52" W, 797 m), durante o período de agosto/2022 a novembro/2022. O experimento foi disposto no delineamento inteiramente casualizado (DIC), com seis repetições (vasos) para cada tratamento (cepas), para efeito comparativo, inclui-se um tratamento como controle (isento da influência das cepas analisadas).

4.2 Características do solo: Correção e fertilização

O solo destinado ao cultivo de mudas de guapuruvu é classificado como Latossolo Distrófico-Vermelho-Amarelo, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). A fim de avaliar as condições de fertilidade do solo, realizou-se o sistema de amostragem da camada superficial (0–20 cm), foram coletadas em área vegetação nativa do bioma Cerrado, situado no município de Ipameri, Goiás, Brasil. A amostra composta foi obtida através da mistura de seis pontos amostrais, destinados à análise laboratorial para a verificação das características químico do solo, apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Características químicas do Latossolo Vermelho-Amarelo.

S	P Mehlich mg dm ⁻³	K	Ca	Mg cmol _c dm ⁻³	Al	H+Al	MOS g kg ⁻¹
2,0	0,50	15,00	0,20	0,10	0,00	2,40	8,00
Na	Zn	Cu mg dm ³	Fe	Mn	Argila	Areia	Silte
3,8	0,5	0,6	23,40	8,10	370,00	540,00	90,00
CTC	V	Ca/CTC	Mg/CTC	K/CTC	H+Al/CTC	Carbono orgânico g kg ⁻¹	pH
2,76	12,91	2,00	3,62	1,45	86,96	4,64	5,10

Extratores: P e K Mehlich⁻¹; Ca - KCl 1 mol/L; H+Al – Acetato de cálcio 0,5 mol/L em pH 7. MOS – Matéria orgânica do solo.

Com base nas limitações de fertilidade existentes no solo, optou-se pela tomada de decisão quanto a correção do solo a aplicação de calcário (6,26g vaso⁻¹), gesso (8,10g vaso⁻¹) e adubação química (2,77g vaso⁻¹), com o formulado 04-28-08 (NPK). Após a correção e adubação, os vasos plásticos com capacidade de 10,0 L foram preenchidos com o solo.

4.3 Sementes de *Schizolobium. parahyba* var. *parahyba*: Quebra da dormência

O lote de sementes apresentou bons índices de germinação, acima de 70%, o que confere condições aptas ao seu desenvolvimento. As sementes de guapuruvu apresentam dormência, classificada como tipo tegumentar, ou seja, há existência de uma camada externa espessa, que têm por finalidade proteger a semente as condições estressantes (biótico ou abiótico). Para a quebra de dormência da leguminosa, realizou-se a escarificação mecânica do lado oposto ao hilo, com o auxílio de lixa nº 80. Após a abrasão/raspagem do tegumento, as sementes foram dispostas em recipiente higienizado e esterilizado, composto por dois litros de água destilada (fria), pelo período de 24 horas, a fim de favorecer a penetração de água nas sementes e possibilitar o processo de embebição.

4.4 Tratamento do solo com microrganismos bioestimulantes

As cepas comerciais constituintes do presente estudo foram: *Trichoderma harzianum* ESALQ 1306; SEMIA 5080: *Bradyrhizobium diazoefficiens* + SEMIA 587: *B. elkanii*. Aproximadamente 30 dias após a correção do solo e a adubação mineral, em vasos plásticos com a capacidade de 10,0 L, realizou-se a distribuição superficial da dose de 6 mL de suspensão ($4,0 \times 10^8$ UFC (Unidades Formadoras de Colônias), em cada vaso, no período matutino, com base na condição climática favorável aos microrganismos, como a menor incidência solar. A suspensão proposta foi calculada para cada cepa comercial avaliada, sendo, a dose de cada bioinsumo de *T. harzianum* ($2,0 \times 10^9$ conídios mL⁻¹) e *Bradyrhizobium* sp. ($7,5 \times 10^9$ UFC mL⁻¹), ajustadas para totalizar $4,0 \times 10^8$ UFC vaso⁻¹, ou seja, caracterizadas mediante equivalência de concentração.

4.5 Condução e análises experimentais

Em seguida ao processo de distribuição das suspensões das cepas em cada vaso (tratamento), realizou-se a semeadura manual de *S. parahyba* var. *parahyba*, mantendo-se três sementes por vaso, cujo desbaste foi realizado quando as plantas atingiram 4-5 cm de altura, a fim de manter a planta mais vigorosa. A irrigação das mudas foi realizada diariamente, prioritariamente pela manhã, com o auxílio de regador manual, a fim de disponibilizar condições igualitárias de disponibilidade hídrica total as plantas.

Após 120 dias ao semeio (DAS), foi realizada a coleta das plantas formadas e emergentes em cada vaso. Com o auxílio de fita métrica e paquímetro digital, foram avaliados os seguintes parâmetros: altura da parte aérea (ALT), comprimento da raiz (CR), diâmetro do

colete (DC), massa fresca e seca da parte aérea (MFPA e MSPA, respectivamente) e massa fresca e seca das raízes (MFRA e MSRA respectivamente). Para a obtenção da biomassa seca, as raízes e as partes aéreas foram destacadas e secadas, separadamente, em estufa a 72°C, por 48 horas, até atingir massa seca constante, em gramas.

Posteriormente, em balança digital foram quantificadas a massa fresca total (MFT) e a biomassa seca total (BIO) e calculado o índice de qualidade de Dickson (IQD), o qual foi determinado em função da altura da parte aérea (ALT), do diâmetro do coleto (DC), da massa seca da parte aérea (MSPA) e da massa seca da raiz (MSR), por meio da fórmula (DICKSON; LEAF; HOSNER, 1960):

$$IQD = \frac{BIO}{ALT (cm) / DC(mm) MSPA (g) / MSR (g)}$$

Os dados referentes aos experimentos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Após verificados os pressupostos de normalidade e de homogeneidade de variâncias residuais, os dados foram submetidos à análise de variáveis canônicas. As análises estatísticas foram realizadas via utilização do software R (R CORE TEAM, 2024).

5 RESULTADOS

5.1 Desenvolvimento de mudas de guapuruvu (*Schizolobium parahyba* var. *parahyba*)

As mudas com os maiores índices de altura (ALT) foram obtidas mediante o tratamento com as cepas coinoculadas (*T. harzianum* + *B. diazoefficiens* + *B. elkanii*) e a cepa isolada de *T. harzianum* 1306, enquanto o tratamento isolado de cepas bacterianas (*B. diazoefficiens* + *B. elkanii*) não repercutiu em acréscimos quanto à parte aérea, igualando-se ao tratamento controle, em termos estatísticos, sob a ausência de inoculação com microrganismos potenciais na indução de crescimento de mudas (Tabela 2).

Ao seguir a tendência anterior, o diâmetro do coleto (DC) obteve correlação direta à parte aérea das mudas, com similaridade ao êxito obtido para os tratamentos sob coinoculação e inoculação com *T. harzianum* 1306, em oposição, os tratamentos com menor influência referiram-se ao controle, com o decréscimo aproximado de 37% e a cepa *B. diazoefficiens* + *B. elkanii*, com a redução aproximada à 17%, em relação aos resultados promissores constatados (Tabela 2). Quanto ao comprimento radicular (CR) das mudas, houve padrão semelhante. As cepas coinoculadas e a cepa isolada de *T. harzianum* 1306 se sobressaíram, correspondentes ao ganho em torno de 84% e 74%, respectivamente, comparados aos resultados verificados para o tratamento controle (Tabela 2).

Ao avaliar a massa fresca, observa-se concordância em relação aos resultados. Em relação à MFPA, a coinoculação recebe destaque para o acúmulo, com incremento em torno de 19% referente as demais cepas (estatisticamente iguais entre si), enquanto, para o tratamento controle, obteve um decréscimo de 58%, em contraposição ao sinergismo das cepas conjuntas. Já para a MFRA, o consórcio e a cepa *T. harzianum* 1306 evidenciaram-se promissores, em contraste, houve redução no acúmulo para as cepas bacterianas (-45%) e ao controle (-77%).

Com base nos resultados de MFT, a coinoculação manteve elevado padrão de eficiência na produção de mudas, ao atingir um incremento relativo médio três vezes superior em relação ao tratamento controle. Em contrapartida, as demais cepas demonstraram congeneridade no incremento, não diferindo entre si, à nível estatístico, sendo o tratamento controle a menor eficiência no acúmulo de massa fresca obtida (Tabela 2).

O acúmulo de massa seca para a parte aérea e a raiz (MSPA e MSRA) foi influenciado significativamente pelo sistema de interação entre fungo e bactéria, comparado ao tratamento controle, com a inferioridade comprovada no acúmulo de biomassa em torno de 83%, para ambas as variáveis. Quanto a BIO, vale ressaltar que o maior acúmulo de biomassa se referiu as mudas desenvolvidas em solo co-inoculado, com a amplificação de 25% em relação a cepa

T. harzianum 1306, enquanto, as mudas sob ausência de inoculação (controle) não foram capazes de alcançar a eficiência desejada, cuja obtenção de decréscimo (-82%), com base no êxito constatado pelo sinergismo entre os microrganismos (Tabela 2).

A partir das variáveis morfológicas, o índice de qualidade de Dickson (IQD) aponta a robustez e potencial das mudas, assim como esperado, o tratamento mediado pela coinoculação destacou-se entre os demais, evidenciado pela compatibilidade entre cepas fúngicas e bacterianas e efeitos diretos na produção de mudas de guapuruvu, com superioridade aproximada à 35%, em relação as demais cepas, em contrapartida, o tratamento controle foi representado pelo baixo potencial de mudas, via decréscimo de 84%, em relação ao consórcio microbiano (Tabela 2).

Tabela 2. Altura da parte aérea (ALT), comprimento da raiz (CR), diâmetro do coleto (DC), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFRA), massa fresca total (MFT), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSRA), biomassa seca total (BIO) e o índice de qualidade de Dickson (IQD) de *S. parahyba* var. *parahyba* em casa de vegetação, com solo de vasos tratados com a suspensão de *T. harzianum* e *B. diazoefficiens* + *B. elkanii*.

Tratamento ⁽¹⁾	ALT	CR	DC	MFPA	MFRA	MFT	MSPA	MSRA	BIO	IQD
	cm		mm							
<i>T. harzianum</i> ESALQ 1306	20,18 a	43,1 a	5,34 a	6,18 b	4,53 a	10,71 b	2,98 b	2,00 b	4,99 b	0,93 b
<i>B. diazoefficiens</i> + <i>B. elkanii</i>	16,10 b	31,8 b	4,56 b	5,80 b	3,20 b	9,00 b	2,04 c	1,54 b	3,58 c	0,74 b
<i>T. harzianum</i> + <i>B. diazoefficiens</i> + <i>B. elkanii</i>	19,10 a	45,4 a	5,28 a	7,18 a	5,83 a	13,04 a	3,51 a	2,71 a	6,22 a	1,24 a
Controle	15,50 b	24,6 c	3,88 b	3,01 c	1,35 c	4,36 c	0,61 d	0,45 c	1,06 d	0,20 c
CV (%)	14,06	25,91	10,11	9,71	33,60	13,47	16,31	34,61	19,27	24,25

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Scott Knott ($P \leq 0,05$).

Os resultados obtidos reforçam a nossa hipótese de pesquisa, quanto à possibilidade de incremento de promoção do crescimento de mudas de *S. parahyba* var. *parahyba* na fase de viveiro via inoculação com microrganismos benéficos. A maior relação verificada para as variáveis analisadas (ALT, CR, MFT, BIO e IQD) durante a produção de mudas foi atribuída à cepa de *T. harzianum*, bem como à coinoculação entre *T. harzianum* + *B. diazoefficiens* + *B. elkanii* (Figura 2). Contudo, a menor relação foi evidenciada sob ausência de inoculação (tratamento controle), seguido da cepa *B. diazoefficiens* + *B. elkanii* (Figura 2). As variáveis canônicas de mudas relacionaram-se positivamente com as variáveis analisadas, de modo elucidar 99,1% da variação dos dados analisados (93,3% e 5,8%) (Figura 2).

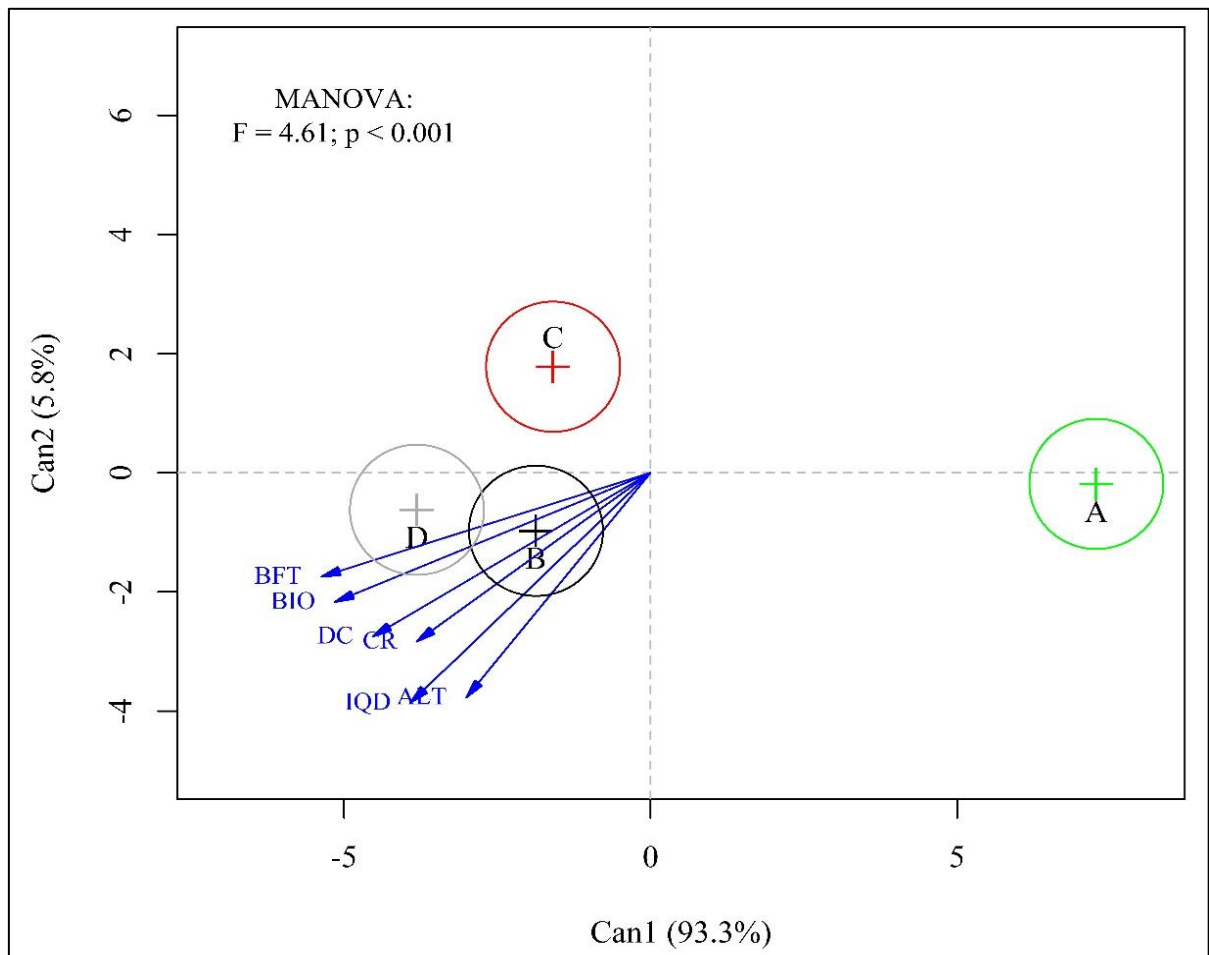


Figura 2. Variáveis canônicas, referente às mudas de *Schizolobium parahyba* var. *parahyba* em casa de vegetação, sob tratamento de solo com a suspensão de microrganismos potenciais e coinoculação (*Trichoderma harzianum* e *Bradyrhizobium diazoefficiens* + *B. elkanii*).

(DC: Diâmetro do coleto; ALT: Altura; BFT: Biomassa fresca total; CR: Comprimento da raiz; BIO: Biomassa seca total; IQD: Índice de Qualidade de Dickson). (A: Controle; B: *T. harzianum* ESALQ 1306; C: *B. diazoefficiens* + *B. elkanii*; D: *T. harzianum* + *B. diazoefficiens* + *B. elkanii*).

À nível visual, é possível identificar o êxito obtido entre as interações mudas-bioestimuladores, com correlações diretas entre os compartimentos de parte aérea (altura) e raiz, com base na alocação da biomassa dependente do adequado suprimento de água e nutrientes (essenciais às atividades fisiológicas) (Figura 3). Tanto a inoculação com *T. harzianum*, quanto a coinoculação, correlatam o equilíbrio entre as variáveis de crescimento das mudas. Um atributo morfológico de grande importância na avaliação na produção de mudas é o diâmetro do caule, pois confronta o equilíbrio entre a raiz e biomassa, que responderá com o crescimento da planta. Um sistema radicular bem desenvolvido atua com a maior capacidade de absorção e transporte de água e nutrientes para os demais órgãos vegetais, o que influenciará na capacidade fotossintética e produção de energia vital ao desenvolvimento da planta.

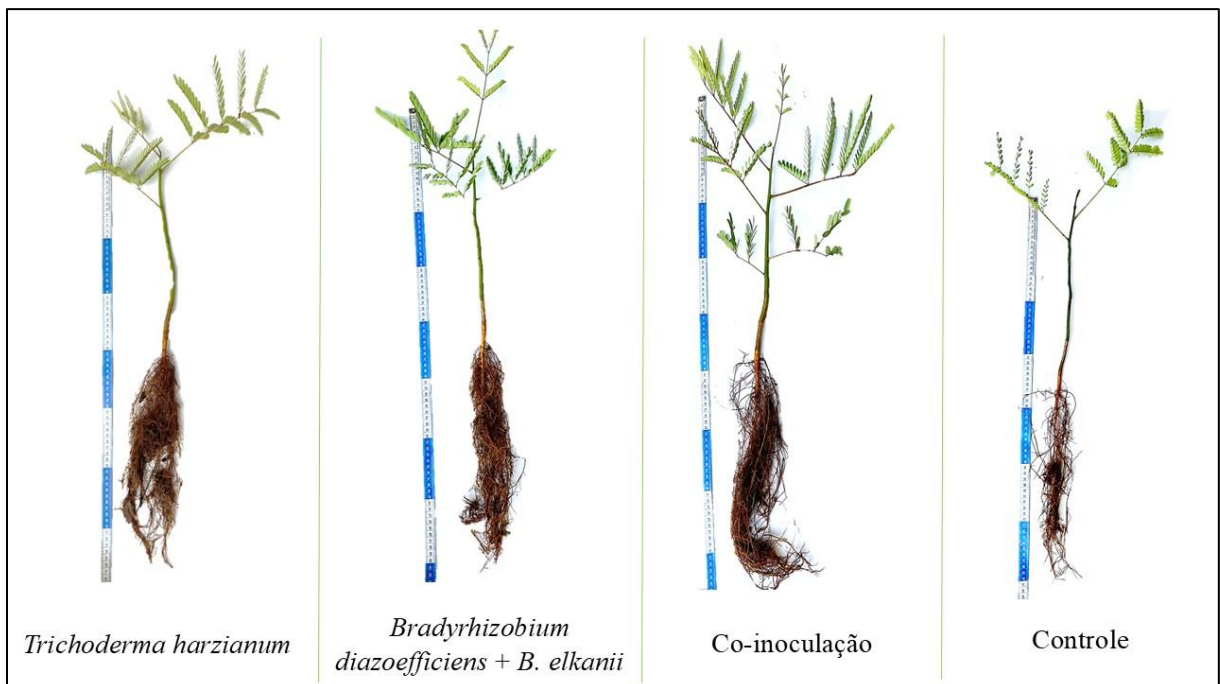


Figura 3. Mudas de *Schizolobium parahyba* var. *parahyba* sob efeito de diferentes tratamentos com microrganismos e tratamento controle, para fins comparativos.

5.2 Caracterização química do solo: Efeitos de *Trichoderma* spp. em *Schizolobium parahyba* var. *parahyba*

Em anuência, os bioinoculantes viabilizaram as características química do latossolo deficitário em termos nutricionais, como acréscimo nas taxas de P, K, MOS e redução da acidez, concomitantemente à produção de mudas em condições de viveiro. O seguimento no parâmetro químico dos solos foi satisfatório através da associação entre os bioestimulantes (fungo + bactéria). A caracterização química do solo, evidencia o aumento no índice de matéria orgânica (MOS) para a coinoculação, em contraste o solo não-inoculado (Figura 4).

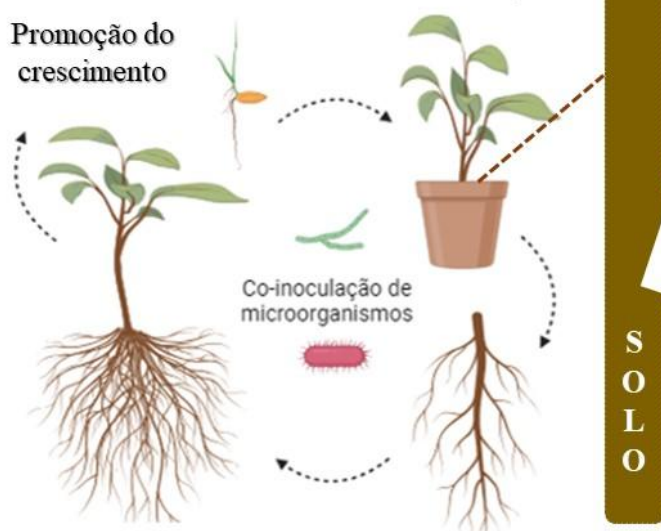
A acidez do solo é um dos principais parâmetros determinantes a CTC, nitidamente a interação positiva entre *Trichoderma* e *Bradyrhizobium* proporcionou níveis de alumínio (Al) trocável inferiores, quando comparado ao solo não inoculado. Em conformidade, o resultado obtido pela cepa de *T. harzianum* promoveu efeito redutor quanto a acidez, bem como a ação de *B. diazoefficiens* + *B. elkanii* (Figura 4).

Em concordância ao segmento anterior, categoricamente a coinoculação indica a capacidade em disponibilizar maiores taxas de P, comparado ao tratamento controle (Figura 4). Quanto aos níveis potássicos (K), observa-se resultado distinto, no qual sobressaiu-se o efeito isolado de *B. diazoefficiens* + *B. elkanii*, seguido de *T. harzianum*, e coinoculação, respectivamente, sendo o solo não inoculado o menor índice de K obtido, referente à redução aproximada de 75% em comparação ao resultado mais promissor (Figura 4).

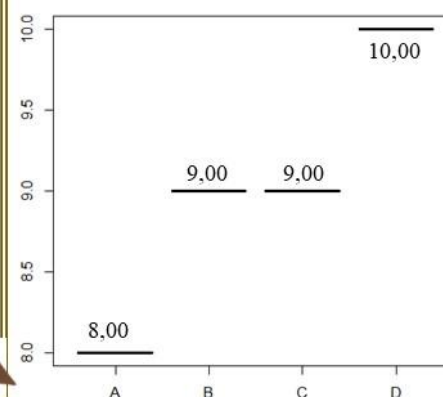
Efeitos no solo da co-inoculação

A= Controle
B = *Bradyrhizobium*
C= *T. harzianum* ESALQ 1306
D= *Trichoderma* + *Bradyrhizobium*

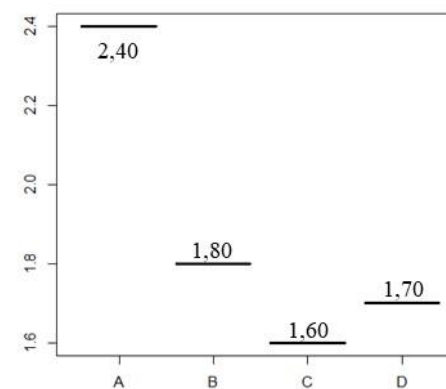
Promoção do crescimento



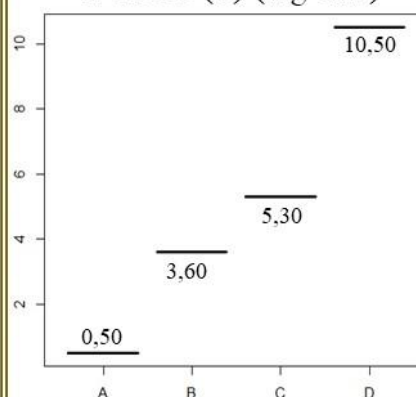
Matéria orgânica (g dm³)



H + Al (cmolc dm³)



Fósforo (P) (mg dm³)



Potássio (K) (mg dm³)

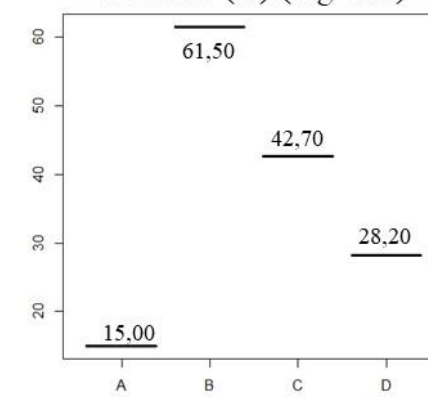


Figura 4. Caracterização química do solo destinado à produção de mudas de *Schizolobium parahyba* var. *parahyba*, sob os efeitos de microrganismos bioestimuladores (*Trichoderma harzianum*, *Bradyrhizobium diazoefficiens* e *B. elkanii*).

6 DISCUSSÃO

6.1 Desenvolvimento de mudas de guapuruvu (*Schizolobium parahyba* var. *parahyba*)

O mecanismo que possivelmente esclarece a interação profícua envolve a liberação contínua de exsudatos radiculares na rizosfera, estimulantes ao desenvolvimento das cepas biopromotores. A partir da conexão, estabeleceu-se comunicação com o sistema radicular vegetal, responsável por efeitos sinérgicos a promoção do crescimento, mediante condições de compatibilidade das cepas (POVEDA; EUGUI, 2022; YU et al., 2023). Os aparatos congêneres ao crescimento radicular e consequente incremento em altura e biomassa, contemplam a secreção de metabólitos primários (ácidos orgânicos, aminoácidos, carboidratos, vitaminas) e secundários (alcaloides, fenólicos, flavonoides, terpenoides), responsáveis pelo intercâmbio de moléculas sinalizadoras, responsáveis pela associação bem-sucedida, em troca, as plantas fornecem fontes de energia, como os carboidratos/açúcares (ADEDAYO; BABALOLA, 2023; RATU; AMELIA; OKAZAKI, 2023).

Embora existam diversos estudos referentes à coinoculação com leguminosas anuais, a simbiose com espécies arbóreas leguminosas é exígua, considerando que, as comunicações hormonais e os mensageiros químicos secretados pela raiz determinam a dinâmica da interação. Provavelmente, um dos principais fatores que elucidam os resultados observados na figura 3 se refere aos efeitos na ciclagem de material orgânico, via decomposição, mineralização ou imobilização microbiana ou através das reações químicas no sistema solo-planta, à exemplo de alterações no pH rizosférico e sorção/dessorção; além da capacidade em sintetizar hormônios.

As rizobactérias são organismos altamente evoluídos, habilitados à produção de enzimas reguladoras do crescimento, além de estimular a produção de fitohormônios, à exemplo do estímulo no crescimento de raízes secundárias e pêlos radiculares, e consequente aumento na absorção de água e nutrientes (WAHAB et al., 2024). Os hormônios exercem o papel de “mensageiros químicos” reguladores de processos fisiológicos, como as auxinas, responsáveis pela divisão e diferenciação celular; citocininas, com atuação na proliferação celular; giberelinas, conhecidas como o hormônio do crescimento, via atuação direta no alongamento do caule, raiz e acúmulo de biomassa, além de outros reguladores de crescimento vegetal, como o ácido abscísico (ABA), óxido nítrico e poliaminas (ALI et al., 2024; HASAN et al., 2024).

Presumivelmente, dentre as múltiplas vantagens associadas aos consórcios microbianos, um dos mecanismos indiretos possivelmente correlacionados aos efeitos na promoção do crescimento da leguminosa arbórea, atrelam-se ao aparato de proteção as condições de estresses bióticos. Os efeitos atribuídos aos microrganismos sinérgicos contemplam o dinamismo em torno da antibiose, competição ou parasitismo de agentes fitopatogênicos, capazes de delinear

um ambiente rizosférico favorável ao crescimento radicular e isento de condições adversas (NEGI et al., 2024; WAQAR; BHAT; KHAN, 2024).

Notoriamente, o consórcio é uma inovação no setor silvicultural, reforços para tal afirmativa são evidenciados pela ação positiva entre rizobactérias na promoção do crescimento de *Swietenia macrophylla*, via fortalecimento fisiológico do sistema radicular (TRUJILLO-ELISEA et al., 2022). Em mudas de *Tectona grandis*, co-inoculadas (*Rhizophagus clarus* + *Bacillus subtilis*), houve melhorias na absorção nutricional e aperfeiçoamento em até 11,04% na taxa de crescimento em campo (ALEXANDRE et al., 2021). As avaliações científicas lidimadas em eucalipto (*Corymbia citriodora* Hill & Johnson), fortalecem o efeito da coinoculação entre *Trichoderma* sp. e *B. subtilis* (RIBEIRO et al., 2023).

A inoculação combinada (fungos micorrízicos arbusculares (FMA) + *Azospirillum* + *Azotobacter*) obteve resultados biométricos satisfatórios na leguminosa *Santalum album*, cujo incremento em altura da planta 52,50 cm (180 dias), indicador fenotípico direto de desenvolvimento; o parâmetro diâmetro do coleto foi promissor sob efeitos dos microrganismos (4,27 mm aos 180 dias), conjuntamente, o comprimento radicular atingiu até 26,00 cm (180 dias) (KUMAR et al., 2023).

Durante a fase de viveiro, foram constatados amplos fatores com influência positiva na capacidade de produção das plantas, à exemplo dos efeitos correlacionados à promoção do crescimento em altura e sistema radicular, sendo a inserção tecnológica (bioinsumos) viável à obtenção de mudas nativas com elevado nível de qualidade, através do “consórcio” segmentado pela coinoculação de microrganismos. Tais informações são reforçadas por avaliações de Chaiya et al. (2021), através da obtenção de êxito na produção de mudas de teca, sob coinoculação entre fungos micorrízicos e rizobactérias.

As etapas de desenvolvimento (germinação, plântula e muda) constituem as fases de maior vulnerabilidade das espécies arbóreas, pois engloba um dos períodos de maior exigência nutricional. Nesse sentido, ao introduzir os bioinsumos combinados (fungo e bactérias) foi possível observar efeitos benéficos no vigor de plântulas, crescimento radicular, consequente maior capacidade fotossintética (devido a formação de energia oriunda do fornecimento de nutrientes) e obtenção de elevados índices de biomassa, assim como possibilita a manutenção e equilíbrio ecológico do solo, pois, os efeitos foram triplos: 1) mudas vigorosas; 2) fertilidade dos solos; 3) microrganismos de baixo custo e multifuncionais.

As mudas de guapuruvu, conforme o indicador de qualidade (IQD) apontam a eficácia dos efeitos multi-dependentes atrelados à vasta diversidade e complexidade das interações consorciadas. O desempenho varia conforme as vias metabólicas, que desencadeiam distintos

mecanismos de ação na promoção do crescimento vegetal, à exemplo de maior indução de atividades fotossintéticas, responsáveis pela maior produção de fotoassimilados e consequente maior crescimento vegetal; maior disponibilização de nutrientes essenciais as funções fisiológicas vegetais, dentre outros fatores (SOUSA et al., 2021).

As bactérias *B. diazoefficiens* + *B. elkanii* variaram quanto aos efeitos isoladas e em consórcio, o que é sustentado pela variabilidade existente em relação a fatores diversos. A troca e a percepção de sinais químicos (extenso e complexo diálogo), permite ou restringe a indução de compostos responsáveis pelo êxito na promoção de crescimento, como os compostos orgânicos voláteis (COVs), metabólitos secundários (MS) e hormônios vegetais (IAA) (PALMA et al., 2022; SARMAH; SARMA, 2022). Sendo assim, as pesquisas científicas intrínsecas às espécies são importantes, a fim de aprimorar o uso técnicas silviculturais.

Na literatura, estudos reforçam as evidências no presente estudo. Os microrganismos envolvidos no sistema de produção são capazes de suprir as exigências durante a fase de formação vegetal, voltadas à produção de elevado conteúdo energético via produção de fotoassimilados (capacidade fotossintética), destinados ao crescimento das plantas (GORAI et al., 2020; GUZMÁN-GUZMÁN; VALÊNCIA-CANTERO; SANTOYO, 2024). Os resultados obtidos revelam o sucesso no processo de interação, no entanto, nem sempre haverá efeitos positivos nos parâmetros de produção arbórea, pois a biopromoção via dupla inoculação pode ser variável, conforme o nível de compatibilidade entre os microrganismos e quantidade de inóculo aplicada (população de microrganismos), levando à efeitos antagônicos, indesejáveis a produção e desenvolvimento sustentável.

Tais respostas elucidam a importância das práticas sustentáveis de manejo, a fim de viabilizar o equilíbrio das condições físico-químicas do solo e o fornecimento contínuo de nutrientes essenciais, através da ação biológica (bioinsumos). A proficuidade oriunda da coinoculação foi evidenciada como um efeito tríplice, que transpõe os parâmetros de crescimento das mudas de guapuruvu; perpassa a economia na redução de fertilizantes fosfatados e solidifica a sustentabilidade no quesito de manutenção e conservação da qualidade do solo, sendo os resultados obtidos pela pesquisa um ponto-forte, evidenciado pela possibilidade de interação entre silvicultura-microrganismos e os efeitos nos solos.

Durante a fase inicial de crescimento, as espécies vegetais, à exemplo de *S. parahyba* var. *parahyba* requerem o fornecimento adequado de K, responsável por processos fisiológicos vitais (fotossíntese, respiração, regulação estomática). Assim como o P, o K é disponibilizado na rizosfera através da interação entre planta e microrganismos, o que explica o resultado promissor desenvolvido por *B. diazoefficiens* + *B. elkanii*. Os microrganismos exercem a

liberação de ácidos orgânicos (ácido tartárico, ácido cítrico e ácido oxálico), que estimulam a redução do pH e auxiliam na dissolução de minerais portadores de K, tornando-o disponível, o que reflete na qualidade das mudas (AQEEL et al., 2023; BASAK et al., 2022; SOUMARE; DJIBRIL; DIÉDHIOU, 2023).

O sistema radicular possui elevada plasticidade (GROSSNICKLE; IVETIĆ, 2022). A partir daí surgem questionamentos: Qual seria o meio mais promissor às alterações das raízes? Sob um olhar sustentável e altamente eficaz, a resposta se correlaciona as buscas biológicas, com ênfase aos bioinsumos, capazes de aumentar as chances do estabelecimento bem-sucedido no campo. A partir do momento em que houve a expansão do sistema radicular, as mudas de guapuruvu tornaram-se capazes de explorar os colóides do solo e absorver os nutrientes solubilizados pelos microrganismos, com maior facilidade. A maior elucidação à nível de espécie, à exemplo da leguminosa arbórea nativa em estudo (guapuruvu) e cepas combinadas (fungo e bactéria) comprovam o êxito simbiótico da “fitoestimulação” em casa de vegetação, bem como os ganhos no quesito da fertilidade dos solos.

Após a fase de viveiro, o estágio de aclimação das mudas é regulado pelo estado nutricional, dependente da existência de equilíbrio e balanço energético destinado às fases de sobrevivência, competição e estabelecimento, além de auxiliar na formação florestal, ainda abraça a redução no uso de fertilizantes (alto custo de aquisição). O balanço geral é reflexo do fornecimento adequado de nutrientes responsáveis por atividades fisiológicas vitais, como a respiração e fotossíntese (ABOU JAOUDE et al., 2024).

Em resposta as questões envolvidas no estudo, é possível aferir que ocorre aumento produtivo e menor custo de produção no sistema silvicultural associado à coinoculação com microrganismos potenciais, à exemplo de cepas fúngicas (*Trichoderma* sp.) e cepas bacterianas (*Bradyrhizobium* sp.). Com nitidez, foram constatadas melhorias no desenvolvimento de plantas e consequente saúde do solo (Figura 5), uma vez que, os benefícios podem ser observados à curto, médio e longo prazo, fator primordial ao segmento de produção de espécies lenhosas. Espera-se que o elo simbiote promova benefícios na formação de mudas, contudo, não se torna uma regra a constatação de êxito entre a associação planta-microrganismo.

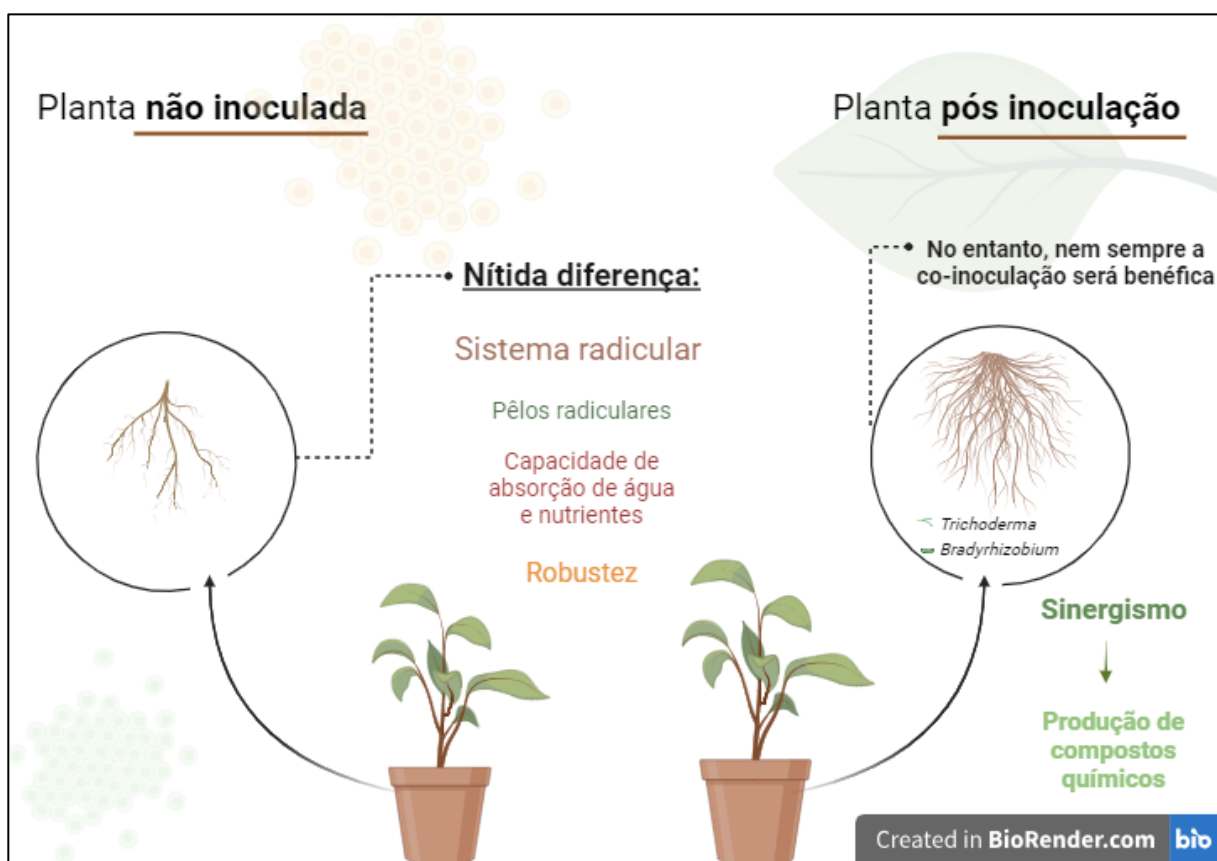


Figura 5. Efeitos na formação de plantas co-inoculadas (*Bradyrhizobium* e *Trichoderma*) e não-inoculadas.

Em ambiente rizosférico, a interação planta-microrganismo tange inicialmente a fase de germinação, sustentada diretamente pelo vigor das sementes e aos meios externos favoráveis a obtenção de plântulas saudáveis, as quais relacionam-se estreitamente aos resultados obtidos, via mudas com alta desenvoltura. Apesar do favorecimento constatado na atual pesquisa, a coinoculação pode apresentar resultados inversamente desejáveis, conforme a compatibilidade por meio da competição entre si, tanto por espaço radicular, como pela aquisição de recursos vitais ao seu estabelecimento, o que caracteriza a anulação de simbiose e efeitos na saúde do solo e planta.

Com base no IQD, a coinoculação obteve superioridade equivalente à cinco vezes o valor obtido na produção de mudas de guapuruvu sem efeito dos bioinsumos. Em reforço, estudos similares comprovam a efetividade da associação entre planta-microrganismo, a produtividade pode atingir níveis exponenciais, atuando como um “time” destinado a aquisição de nutrientes às plantas e viabilizar às funções ecossistêmicas desempenhadas pelo solo e árvores (DEVI et al., 2022; VAN DER HEIJDEN et al., 2016).

A ação de *T. harzianum* evidenciou sob efeito isolado e coinoculado com as bactérias resultados promissores na produção de mudas de guapuruvu com alta qualidade. Os principais incrementos no diâmetro do colo e na altura total de mudas contribuem com elevados níveis de rendimento, além de se tratar de uma alternativa relativamente de baixo custo, alto potencial no desenvolvimento de mudas de espécies florestais e mitigação nos níveis de desmatamento em florestas nativas.

O trabalho em equipe dos bioestimuladores permitiu a amplificação dos efeitos de crescimento, o que leva ao êxito nos índices morfométricos das plantas em crescimento, respostas observadas fenotipicamente, como a altura de plantas e diâmetro do caule, além da magnitude das raízes primárias, secundárias e pêlos radiculares. O crescente e alarmante declínio qualidade e vitalidade dos solos em escala global, reforça a busca por produtos oriundos de florestas plantadas e a mitigação dos processos exploratórios em ecossistemas naturais.

A fertilidade biológica do solo é um fator chave para aumentar a resiliência e robustez de plântulas/mudas, resistentes às tensões externas. A formação de florestas plantadas enceta na produção de mudas vigorosas, suplementado por bioestimulantes co-inoculados no solo, com efeitos diretos no desenvolvimento de plantas, melhorias nos aspectos físicos-químicos-biológicos do solo, redução no uso de insumos químicos, a fim de garantir a obtenção de um sistema silvicultor (produção ou reflorestamento) de baixo custo, sob menor prazo de produção, robustez e elevado nível de qualidade, boa aclimação em campo e a formação de florestas homogêneas, altamente produtivas (Figura 6).



Figura 6. Benefícios correlacionados a adoção de bioinsumos na produção de mudas florestais.

Os parâmetros morfológicos e fisiológicos são os preceptores na produção de mudas, conforme a procedência genética das sementes, condições de cultivo e métodos de manejo adotados. A grande escassez de pesquisas científicas em torno de espécies florestais nativas compromete avanços consideráveis nos sistemas de produção, sendo a coinoculação uma inovação à produção em larga escala e curto prazo, com desfecho ao mercado silvicultor e aos projetos de reflorestação, aptas ao ambiente adverso, competitivas em termos de espaço (plantas daninhas e outras), busca por recursos vitais (luz, água e nutrientes) e oscilações climáticas.

Um dos maiores confrontos atuais envolve a complexa projeção na compatibilidade do consórcio entre os microrganismos, em situações harmônicas, são obtidos efeitos econômicos, voltados à obtenção de retorno financeiro (produção de mudas robustas) e ambientais, pela regulação dos ciclos de carbono e nutrientes. Até então, são restritos os estudos científicos concisos que avaliem o comportamento criterioso dos microrganismos em relação a capacidade em reduzir a dependência de fertilização química vegetal. Os dados obtidos sugerem o aprimoramento, à nível dos mecanismos químicos dos bioestimuladores, associados as singularidades da condição de cultivo, ordenada pelas condições de disponibilidade de água (irrigação ou chuva), índices de luminosidade (duração do dia, local e intensidade) e demais fatores que possam afetar o desempenho dos microrganismos estimuladores de crescimento.

A fase de formação em viveiros é uma etapa crítica nos processos de recuperação ambiental e/ou produção (madeira, fibra, energia e outros), onde são produzidos diversos indivíduos, destinados futuramente ao transplântio. Outra grande vantagem associada à promoção de espécies florestais via interação com microrganismos potenciais é que a maioria das interações são observadas em espécies anuais, com exiguidade no setor florestal, principalmente em regiões tropicais, dispostas às constantes oscilações no clima. A lacuna em questão difunde a ideia em avaliar os distintos mecanismos de ação do processo simbiótico, à exemplo da atividade metabólica, meios envolvidos na interação com plantas e outros microrganismos, sendo capazes de impulsionar o setor silvicultural.

6.2 Caracterização química do solo: Efeitos de *Trichoderma* spp. em *Schizolobium parahyba* var. *parahyba*

Os efeitos em similitude aos parâmetros de crescimento (altura, raiz, diâmetro do caule) se atribui à solubilização facilitada pela coinoculação e inoculação (*T. harzianum*). Quanto ao resultado promissor no incremento em biomassa e IQD, a coinoculação denota a confluência entre as cepas (fungo+bactérias). Em situações similares, a solubilização de nutrientes foi otimizada pela ação conjunta, com base na síntese de enzimas (ACC-desaminase, quitinase e glucanase) e ácidos orgânicos, capazes de liberar K por meio de ações de acidólise (acidificação do solo), quelação e/ou reações de troca. Sobretudo, os benefícios vão além e abrangem a síntese de moléculas de baixo peso (sideróforos), altamente habituadas a transportar Fe^{3+} à nível celular (CHAUHAN et al., 2023).

A maior disponibilidade de nutrientes no solo observados na figura 4, atribui-se possivelmente a estimulação de hormônios vegetal, à exemplo da auxina, as quais induzem estímulos protonados, voltados ao aumento da acidez no ambiente extracelular e ativação de enzimas responsáveis pelo crescimento, além do aumento na taxa de respiração radicular metabólica, a fim de acelerar a absorção de minerais essenciais, íons e água do solo; e a citocinina, com efeitos no crescimento das mudas, através da divisão e expansão celular (MULANI et al., 2021; RADHI et al., 2023).

A coinoculação contribuiu com ganhos no índice de qualidade de mudas de guapuruvu, parâmetro indicativo de existência de equilíbrio entre os atributos morfológicos e qualidade das mudas, fator correlacionado aos amplos mecanismos de solubilização de P. É possível que, a associação entre os microrganismos avaliados possa ter sido guiada por enzimas (fitase) aptas a liberar o P indisponível, em forma de fitato (BILLAH et al., 2019). O meio externo (abiótico e biótico) está intimamente envolvido na regulação dos efeitos solubilizadores, sob as condições da pesquisa, não foram constatadas influências negativas ao crescimento das mudas. O que reforça os resultados obtidos, atribui-se a atuação mutualística entre os microrganismos, capazes de induzir maior formação de raízes secundárias e pêlos radiculares, hábeis na maior interceptação e absorção de nutrientes, estes prontamente disponíveis graças aos efeitos manipulados pela coinoculação (TERHONEN et al., 2019; BARTA et al., 2022).

A capacidade de sobrevivência e desenvolvimento de mudas em campo é dependente de condições favoráveis, como a nutrição adequada e boa qualidade nas condições físico-química

e biológica do solo, fatores incomuns nos solos brasileiros (intemperizados), com ênfase ao Cerrado. Com base nas principais lacunas observadas, a interação entre planta-microrganismos constitui um processo dinâmico, com a promoção de benefícios ambientais, sociais e econômicos, pois minimiza a contaminação de solo e água, além de corroborar com a redução no tempo de formação de mudas através do estímulo ao processo de germinação e incremento na qualidade da produção.

Ao avaliar os componentes regulatórios à produção de mudas, o solo se sobressai no quesito: físico, químico e biológico, pois ambos se entrelaçam e juntos, possibilitam a boa formação das mudas de guapuruvu. Há décadas o parâmetro biológico dos solos tem sido menosprezado, porém, nos últimos anos surgiu maior preocupação com a qualidade dos solos, mediante intensa deterioração. Um dos objetivos da presente pesquisa atribui a junção dos itens, de modo a viabilizar ganhos mútuos: tanto no contexto do solo, como as condições de conservação, qualidade, fertilidade; no quesito de produção, desenvolvimento e rendimento de plantas; e a sustentabilidade no uso de microrganismos eficazes e de baixo custo.

No contexto solo, o pH é peça fundamental na solubilidade, concentração, forma iônica e mobilidade dos nutrientes. No Cerrado a acidez dos solos é comum, caracterizada pela presença de metais e fixação de nutrientes (BALDRIAN; LÓPEZ-MONDÉJAR; KOHOUT, 2023; HARTEMINK; BARROW, 2023). Possivelmente, a partir da ação dos bioestimulantes consorciados, houve redução na acidez dos solos, fator altamente desejável tanto para a produção de mudas, quanto para a conservação e manutenção dos solos, responsáveis pelo fornecimento de bens e/ou produtos (alimentos, fibras, madeira e energia) sob uma perspectiva sustentável. O preço pago pelo uso contínuo e desregulado dos fertilizantes é alto e inclui não apenas a fixação de nutrientes na solução do solo, mas a médio e longo prazo, constitui um entrave correlacionado a desregulação em torno de seu potencial produtivo.

O ciclo do P no solo é dinâmico, tipicamente pela ausência atmosférica de fosfato, o que inviabiliza que ocorra ressuspensão, basicamente, o elemento é oriundo de rochas minerais (escassas), para tanto, a reciclagem de P é primordial (PAN; CAI, 2023). As limitações inerentes a disponibilidade do fosfato nos Latossolos não param por aí, atribuem-se ainda a “perda” do macronutriente, como os mecanismos de fixação, retenção, adsorção e precipitação, sendo os compostos de P insolúveis são os oxifosfatos e hidroxifosfatos de Fe^{3+} , Fe^{2+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Mn^{2+} .

Em solos cultiváveis não há presença de P em sua forma pura, por se tratar de um elemento altamente reativo, a interação com o oxigênio permite a formação de fosfato (PO_4^{3-}), no entanto, o P requerido pelas plantas se encontra no formato do íon H_2PO_4^- , dependente das

MOS, pH e CTC, com efeitos regulatórios quanto a capacidade de adsorção, pois o aumento do pH provoca o contrabalanço do potencial eletrostático de adsorção (reduz H_2PO_4^- e aumenta HPO_4^{2-} (preferencialmente adsorvido)) (MABAGALA, 2022; SANDIM et al., 2023). Tais informações reforçam a discussão em torno da ação da coinoculação e seus efeitos nos solos, exequíveis na produção de mudas de guapuruvu, capazes de mitigar a ineficiência dos nutrientes, especificamente N-P-K, otimizada pela redução nos níveis de acidez dos solos, úteis ao setor silvicultor.

Um ponto-chave atribui-se a possibilidade em reduzir o uso exacerbado de adubos, com base na intensa demanda por P em mudas florestais. O elo existente entre o crescimento das mudas e o fornecimento de P têm início na absorção pelas células epidérmicas e/ou corticais da raiz, seguido pelo transporte do nutriente aos tecidos vasculares centrais (reservatório de P), translocação e distribuição para os distintos tecidos e organelas vegetais, de acordo com as necessidades dos tecidos e processos metabólicos, o qual será revertido em energia destinada à formação de matéria seca (PAN et al., 2022; YANG et al., 2024).

Apesar de transparecer simplicidade, a realidade para a aquisição de nutrientes em solos brasileiros é delicada, caracterizada pela baixa fertilidade, elevado índice de perda nutricional e consequente instabilidade na formação de mudas saudáveis. Sob a ausência da coinoculação, logo após a distribuição dos grânulos do fertilizante, associa-se a menor desenvoltura das mudas ao aumento na concentração de P na solução do solo, o que provoca maior participação nos processos de adsorção e precipitação, assim como os demais nutrientes minerais, os quais possivelmente mantiveram-se indisponíveis à absorção das plantas.

Como efeito da labilidade de P, devido a saturação de íons ao longo do tempo, o elemento se torna menos solúvel (baixa mobilidade), limitado apenas ao local de aplicação, evidenciados em solos ácidos, assim como no Cerrado, conforme a maior retenção de P aos óxidos de Al, Fe e Mn, tornando-o indisponível às plantas (MARDAMOOTO; DU PREEZ; BARNARD, 2021; BASTIDA et al., 2023; MEYER et al., 2023).

Com base em relatos científicos, os mecanismos utilizados pela combinação de cepas é profusa e envolve a secreção de prótons, enzimas (catalase, fosfatase e urease), sideróforos, polissacarídeos e principalmente a bioacidificação (ácidos inorgânicos e orgânicos), estes com função redutora do pH do solo (quelação), capaz de criar um ambiente de competição com o fosfato pelos ambientes adsorvidos, a fim de propiciar a sua liberação via formação de complexos solúveis (forma monovalente) com cátions metálicos (Ca^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+}), voltados à liberação de íons fosfato (LI et al., 2023; LIU et al., 2023; XU; LV; YU, 2023).

As bactérias dominam no assunto de solubilização de fosfato, representam até 50% do total de microrganismos, enquanto, os fungos abrangem apenas 0,5%, quando associados, a eficiência pode ser otimizada até mesmo de acordo com a estrutura química dos ácidos orgânicos secretados, sendo os ácidos orgânicos aromáticos são menos ativos, comparados aos alifáticos (TIMOFEEVA et al., 2023). Essa informação ressalta a existência de inúmeros fatores que orientam as respostas a serem obtidas, pois se a inoculação já se trata de um processo complexo, dependente das condições ambientais, a coinoculação envolve ainda mais mecanismos internos (compatibilidade, competição, trabalho em equipe) e externos (solos, fatores climáticos e bióticos).

Os bioinsumos ultrapassam a promoção do crescimento vegetal e perpassam pela saúde e qualidade dos solos, sendo a fertilidade peça-chave a manutenção da vida. O adequado suprimento nutricional é um atributo fundamental ao desenvolvimento de mudas, com base no acúmulo de reservas requeridos a posterior performance em campo. Além de efeitos imediatos, através da disponibilidade de nutrientes úteis a formação de plantas, acredita-se que, em campo, tais plantas possam se sobressair sob condições adversas, à exemplo de intempéries climáticas e condições naturais de baixa fertilidade do solo, comuns em território brasileiro.

7 CONCLUSÃO

O crescimento de mudas de *Schizolobium parahyba* var. *parahyba* demonstrou-se intimamente síncrono a interação entre microrganismos, bem como os efeitos na fertilidade dos solos. A coinoculação entre o fungo *Trichoderma harzianum* e as bactérias *Bradyrhizobium diazoefficiens* e *Bradyrhizobium elkanii*, possibilitaram a obtenção de mudas altamente vigorosas, além de benefícios no quesito de qualidade química dos solos.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

O vínculo entre: guapuruvu-solo-microrganismos foi uma conexão fascinante, cujo efeitos observados no aumento na fertilidade do solo, observado na caracterização do solo, fator que demonstra estreita relação com o suprimento nutricional das mudas. Em função ao acréscimo de matéria orgânica (MOS – importante indicador dos níveis de nitrogênio (N)), fósforo (P), potássio (K) e redução da acidez do solo, fatores que corroboraram com o incremento em biomassa das mudas.

Além do baixo custo de produção envolvido, a simplicidade envolvida no manuseio e eficácia pós aplicação, através de estímulos ao desenvolvimento radicular, maior capacidade de absorção nutricional (antes no formato indisponível às plantas) e o incremento em biomassa, precedentes determinantes à obtenção de mudas altamente vigorosas. O índice de qualidade retrata a boa desenvoltura das mudas em campo e abre espaço para futuras pesquisas, a fim de avaliar o desenvolvimento e estabelecimento das plantas em meio externo.

Os fungos endofíticos associados as bactérias diazotróficas rizosféricas são “fortes”, principalmente no contexto estratégico, viáveis à produção de mudas de espécies florestais, com segmentos rentáveis (ganhos econômicos) aos viveiros comerciais destinados tanto ao mercado silvicultor, quanto aos projetos destinados à recuperação de ambientes degradados. A coinoculação se enquadra na perspectiva sustentável (um dos pilares aos sistemas produtivos), nesse contexto, representa a redução considerável na utilização de fertilizantes industriais, bem como minimiza a exploração de fontes limitadas de nutrientes minerais, principalmente as reservas de fósforo (P).

Um “simples passo” pode abrir portas, voltadas à expansão da ideia do uso de microrganismos benéficos na produção florestal. Mediante a grande relevância e capacidade de promover o crescimento, ainda existem questões a serem elucidadas quanto aos mecanismos envolvidos na promoção do crescimento de espécies lenhosas nativas potenciais, a fim de viabilizar a sua produção em larga escala, uma vez que, as informações correlacionadas à ação de microrganismos no setor silvicultural ainda são escassas, o que requer maior atenção.

9 REFERÊNCIAS

- ABOU JAOUDE, R.; LUZIATELLI, F.; FICCA, A. G.; RUZZI, M. A plant's perception of growth-promoting bacteria and their metabolites. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, n. 1, p. 1-31, 2024. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1332864>
- ABREU, G. M.; PAIVA, H. N.; MEGUMI KASUYA, M. C.; PAULA, S. D.; GUIRARDI, B. D.; ARAÚJO, G. M. Soil of the parent plant and AMF mix improve Cerrado seedlings growth in forest nurseries. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 15, n. 3, p. 197-205, 2022. <https://doi.org/10.3832/ifor3833-015>
- ADEDAYO, A. A.; BABALOLA, O. O. Fungi that promote plant growth in the rhizosphere boost crop growth. **Journal of Fungi**, v. 9, n. 2, p. 1-27, 2023. <https://doi.org/10.3390/jof9020239>
- AGUIAR, B. A. C.; SILVA, R. C.; SILVA, M. V. C.; MUROI, E. D. A. R.; ALVES, H. J. R.; LAIA NASCIMENTO, V.; ... SOUZA, P. B. Humic substances in the morphophysiology and production of *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake var. *parahyba* seedlings. **Observatório De La Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 9, p. 11448-11465, 2023. <https://doi.org/10.55905/oelv21n9-051>
- AGUIRRE, M. I. H.; VEGA, W. O.; PELÁEZ, J. L. D. Co-inoculation with beneficial soil microorganisms promoted growth and quality of *Tabebuia rosea* seedlings. **Forest Science**, v. 68, n. 1, p. 95-103, 2022. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxab050>
- AKBAR, T. H.; PROBORINI, M. W.; DEFIANI, M. R. Application of endomycorrhizal spores, compost, and *Trichoderma* spp. increased growth of cacao seedlings (*Theobroma cacao* L.). **Journal of Biological Sciences**, v. 9, n. 1, p. 49-59, 2022. <https://doi.org/10.24843/metamorfosa.2022.v09.i01.p05>
- ALEXANDRE, F. S.; DELLA FLORA, L. V.; HENRIQUE, I. G.; SILVA, D. C.; MERCEDES, A. P.; CARDOSO SILVA, A.; ... CELY, M. V. Arbuscular mycorrhizal fungi (*Rhizophagus clarus*) and rhizobacteria (*Bacillus subtilis*) can improve the clonal propagation and development of teak for commercial plantings. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, n. 1, p. 1-12, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.628769>
- ALI, S.; KHAN, M. J.; ANJUM, M. M.; KHAN, G. R.; ALI, N. *Trichoderma harzianum* modulates phosphate and micronutrient solubilization in the rhizosphere. **Gesunde Pflanzen**, v. 1, n. 1, p. 1-10, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00643-0>
- ALI, J.; MUKARRAM, M.; OJO, J.; DAWAM, N.; RIYAZUDDIN, R.; GHARAMH, H. A.; ... BAYRAM, A. Harnessing phytohormones: Advancing plant growth and defense strategies for sustainable agriculture. **Physiologia Plantarum**, v. 176, n. 3, p. 1-27, 2024. <https://doi.org/10.1111/ppl.14307>
- ANDREATA, M. F. L.; AFONSO, L.; NIEKAWA, E. T. G.; SALOMÃO, J. M.; BASSO, K. R.; ...; ANDRADE, G. Microbial fertilizers: A study on the current scenario of brazilian inoculants

and future perspectives. **Preprints**, v. 1, n. 1, p. 1-19, 2024, <https://doi.org/10.20944/preprints202406.1306.v1>

AQEEL, M.; RAN, J.; HU, W.; IRSHAD, M. K.; DONG, L.; AKRAM, M. A.; ... DENG, J. Plant-soil-microbe interactions in maintaining ecosystem stability and coordinated turnover under changing environmental conditions. **Chemosphere**, v. 318, n. 1, p. 1-14, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137924>

AVILA, G. M. A.; GABARDO, G.; CLOCK, D. C.; LIMA JÚNIOR, O. S. Use of efficient microorganisms in agriculture. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, p. 1-13, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17515>. 2.

BALDRIAN, P.; LÓPEZ-MONDEJAR, R.; KOHOUT, P. Forest microbiome and global change. **Nature Reviews Microbiology**, v. 21, n. 1, p. 487-501, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00876-4>

BARROW, N. J.; HARTEMINK, A. E. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. **Plant and Soil**, v. 487, n. 1, p. 1-17, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>

BARTA, M.; PASTIRČÁKOVÁ, K.; OSTROVSKÝ, R.; KOBZA, M.; KÁDASI HORÁKOVÁ, M. Culturable endophytic fungi in *Fraxinus excelsior* and their interactions with *Hymenoscyphus fraxineus*. **Forests**, v. 13, n. 7, p. 1-23, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13071098>

BASAK, B. B.; MAITY, A.; RAY, P.; BISWAS, D. R.; ROY, S. Potassium supply in agriculture through biological potassium fertilizer: A promising and sustainable option for developing countries. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 101-114, 2022. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1821191>

BASSO, M. F.; NEVES, M. F.; GROSSI-DE-SA, M. F. Agriculture evolution, sustainability and trends, focusing on Brazilian agribusiness: a review. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, n. 1, p. 1-19, 2024. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1296337>

BASTIDA, F.; SILES, J. A.; GARCÍA, C.; GARCÍA-DÍAZ, C.; MORENO, J. L. Shifting the paradigm for phosphorus fertilization in the advent of the fertilizer crisis. **Journal of Sustainable Agriculture and Environment**, v. 2, n. 2, p. 153-156, 2023. <https://doi.org/10.1002/sae2.12040>

BATISTELLO, M. N.; BRITO, N. F.; SOUSA, W. N.; FELSEMBURGH, C. A.; VIEIRA, T. A.; LUSTOSA, D. C. Beneficial soil fungi and jabuticaba growth promotion. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 367-372, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020367>

BENITES, V. M.; SCHAEFER, C. E.; MACHADO, P. L. O.; POLIDORO, J. C.; SILVA TEIXEIRA, R. **Insights into Brazilian Soils and Sustainable Agriculture Scenarios**. In The Soils of Brazil; Schaefer, C. E. G. R., Ed.; World Soils Book Series; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2023; pp. 471–486. ISBN 978-3-031-19949-3

BETTEGOWDA, R. H.; NANJUNDAPPA, A.; REVANNA, A.; MANCHEGOWDA, H. K.; RAVI, J. E.; BAGYARAJ, D. J. Selected microbial consortia promotes *Dalbergia sissoo* growth

in the large-scale nursery and wastelands in a semi-arid region in India. **J. For. Res.**, v. 26, n. 1, p. 448-454, 2021. <https://doi.org/10.1080/13416979.2021.1955439>

BIGHI, K. N.; PAULA, R. R.; CALDEIRA, M. V. W.; BURAK, D. L.; MENDONÇA, E. D. S.; SOUZA, P. H.; ... BALIEIRO, F. D. C. Nitrogen pools in tropical plantations of N₂-fixing and non-N₂-fixing legume trees under different tree stand densities. **Nitrogen**, v. 2, n. 1, p. 86-98, 2021. <https://doi.org/10.3390/nitrogen2010006>

BILLAH, M.; KHAN, M.; BANO, A.; HASSAN, T. U.; MUNIR, A.; GURMANI, A. R. Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: Keys for sustainable agriculture. **Geomicrobiology Journal**, v. 36, n. 10, p. 904-916, 2019. <https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1654043>

CAMPOS, E. V.; PEREIRA, A.; ALEKSIEIENKO, I.; CARMO, G. C.; GOHARI, G.; SANTAELLA, C.; ... OLIVEIRA, H. C. Encapsulated plant growth regulators and associative microorganisms: Nature-based solutions to mitigate the effects of climate change on plants. **Plant Science**, v. 331, n. 1, p. 111688, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111688>

CARNEIRO, B.; CARDOSO, P.; FIGUEIRA, E.; LOPES, I.; VENÂNCIO, C. Forward-looking on new microbial consortia: Combination of rot fungi and rhizobacteria on plant growth-promoting abilities. **Applied Soil Ecology**, v. 182, n. 1, p. 1-14, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104689>

CARON, B. O.; SOUZA, V. Q.; BISOGNIN CANTARELLI, E.; MANFRON, P. A.; BEHLING, A.; ELOY, E. Crescimento em viveiro de mudas de *Schizolobium parahyba* (Vell.) SF Blake. submetidas a níveis de sombreamento. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 683-689, 2010. <https://doi.org/10.5902/198050982427>

CARVALHO, P. E. R. **Guapuruvu**. 2005. ISSN 1517-5278. Circular Técnica Embrapa, v. 104, n. 1, 10p.

CASTILHO SILVA, A. W.; PONTARA, V.; BUENO, M. L.; VILLA, P. M.; WALTER, B. M. T.; MEIRA-NETO, J. A. A. The bulk of a plant hotspot: composition, species richness and conservation status of the Cerrado herbaceous-subshrub flora. **Folia Geobotanica**, v. 59, n. 1, p. 39-49, 2024. [10.1007/s12224-024-09451-y](https://doi.org/10.1007/s12224-024-09451-y)

CERULLO, G.; WORTHINGTON, T.; BRANCALION, P.; BRANDÃO, J.; D'ALBERTAS, F.; EYRES, A.; ... BALMFORD, A. Conflicts and opportunities for commercial tree plantation expansion and biodiversity restoration across Brazil. **Global Change Biology**, v. 30, n. 3, e17208, 2024. <https://doi.org/10.1111/gcb.17208>

CHAIYA, L.; GAVINLERTVATANA, P.; TEAUMROONG, N.; PATHOM-AREE, W.; CHAIYASEN, A.; SUNGTHONG, R.; LUMYONG, S. Enhancing teak (*Tectona grandis*) seedling growth by rhizosphere microbes: A sustainable way to optimize agroforestry. **Microorganisms**, v. 9, n. 9, p. 1-16, 2021. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091990>

CHAUDHARY, P.; XU, M.; AHAMAD, L.; CHAUDHARY, A.; KUMAR, G.; ADELEKE, B.S.; VERMA, K.K.; HU, D.-M.; ŠIRIĆ, I.; KUMAR, P. Application of synthetic consortia for improvement of soil fertility, pollution remediation, and agricultural productivity: A Review. **Agronomy**, v. 13, n. 1., p.643, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030643>

CHAUHAN, P.; SHARMA, N.; TAPWAL, A.; KUMAR, A.; VERMA, G. S.; MEENA, M.; ... SWAPNIL, P. Soil microbiome: Diversity, benefits and interactions with plants. **Sustainability**, v. 15, n. 19, p. 14643, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151914643>

CHENG, M.; SHI, C.; HAO, L. T.; WANG, X. Y.; GUO, X. Y.; LIU, R. B.; HAO, X. D. Sustainable development of phosphorus recovery: From a product perspective. **Sustainable Production and Consumption**, v. 41, n. 1, p. 275-290, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.08.015>

CORRÊA, T. R.; DIAS, D. P. Emergência e crescimento inicial de plântulas de guapuruvu (*Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake) a partir de diferentes recipientes e tamanhos de sementes. **Global Science and Technology**, v. 14, n. 2, p. 1-7, 2021.

DEVI, R.; KAUR, T.; KOUR, D.; YADAV, A. N. Microbial consortium of mineral solubilizing and nitrogen fixing bacteria for plant growth promotion of amaranth (*Amaranthus hypochondrius* L.). **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 43, n. 1, p. 1-10, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102404>

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forestry Chronicle**, v. 36, n.1, p.10-13, 1960. <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>

DRANSKI, J. A. L.; SONDA, E. T.; DEMARCHI JÚNIOR, J. C. Tamanho de sementes e fertilizante de liberação controlada na produção de mudas de *Schizolobium parahyba* [(Vell.) SF Blake)]. **Biotemas**, v. 32, n. 2, p. 23-31, 2019.

DUARTE, D. M.; ROCHA, G. T.; RESENDE, C. L. P.; SILVA, B. M.; RODRIGUES, F. Response of *Schizolobium parahyba* seedlings to water stress. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 40, n. 1, p. 1-12, 2020. <http://doi.org/10.4336/2020.pfb.40e201801644>

DUIN, V. F. F.; LIUTI, G.; PRADO, N. V.; CELY, M. V. T.; LIMA ANDREATA, M. F.; SANTOS, I. M. O.; ... ANDRADE, G. Effect of the fertilization and growth promoting microorganisms on *Schizolobium parahyba*. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 5, p. 1747-1760, 2019. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n5p1747>

DWIBEDI, V.; RATH, S. K.; JOSHI, M.; KAUR, R.; KAUR, G.; SINGH, D.; ... KAUR, S. Microbial endophytes: application towards sustainable agriculture and food security. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 106, n. 17, p. 5359-5384. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12078-8>

EPIFANIO, M. L. F. G.; ALMEIDA SOUSA, H. G. D.; AGUIAR, B. A. C.; SILVA, R. C.; DIAS, C. F.; XAVIER, M. O.; ... SOUZA, P. B. Morphophysiological comparison of *Schizolobium parahyba* varieties seedlings cultivated under different shading levels. **Australian Journal of Crop Science**, v. 16, n. 3, p. 408-414, 2022. <https://10.21475/ajcs.22.16.03.p3556>

FAHDE, S.; BOUGHRIBIL, S.; SIJILMASSI, B.; AMRI, A. *Rhizobia*: A promising source of plant growth-promoting molecules and their non-legume interactions: Examining applications

and mechanisms. **Agriculture**, v. 13, n. 7, p. 1279, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071279>

FERNANDEZ-GNECCO, G.; GÉGU, L.; COVACEVICH, F.; CONSOLO, V. F.; BOUFFAUD, M. L.; BUSCOT, F.; ... BABIN, D. Alone as effective as together: AMF and *Trichoderma* inoculation boost maize performance but differentially shape soil and rhizosphere microbiota. **Journal of Sustainable Agriculture and Environment**, v. 3, n. 1, p. e12091, 2024. <https://doi.org/10.1002/sae2.12091>

FRANCIS, B.; ARAVINDAKUMAR, C. T.; BREWER, P. B.; SIMON, S. Plant nutrient stress adaptation: A prospect for fertilizer limited agriculture. **Environmental and Experimental Botany**, v. 213, n. 1, p. 1-19, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105431>

GÓMEZ-GODÍNEZ, L. J.; AGUIRRE-NOYOLA, J. L.; MARTÍNEZ-ROMERO, E.; ARTEAGA-GARIBAY, R. I.; IRETA-MORENO, J.; RUVALCABA-GÓMEZ, J. M. A look at plant-growth-promoting bacteria. **Plants**, v. 12, n. 8, p. 1668, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12081668>

GRIEBELER, A. M.; ARAUJO, M. M.; TABALDI, L. A.; STEFFEN, G. P.; TURCHETTO, F.; RORATO, D. G.; ... LIMA, M. S. Type of container and *Trichoderma* spp. inoculation enhance the performance of tree species in enrichment planting. **Ecological Engineering**, v. 169, n. 1, p. 1-12, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106317>

GROSSNICKLE, S. C.; IVETIĆ, V. Root system development and field establishment: Effect of seedling quality. **New Forests**, v. 53, n. 6, p. 1021-1067, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09916-y>

GUZMÁN-GUZMÁN, P.; VALENCIA-CANTERO, E.; SANTOYO, G. Plant growth-promoting bacteria potentiate antifungal and plant-beneficial responses of *Trichoderma atroviride* by upregulating its effector functions. **Plos One**, v. 19, n. 3, p. e0301139, 2024. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301139>

HAKIM, S.; NAQQASH, T.; NAWAZ, M. S.; LARAIB, I.; SIDDIQUE, M. J.; ZIA, R.; MIRZA, M. S.; IMRAN, A. Rhizosphere engineering with plant growth-promoting microorganisms for agriculture and ecological sustainability. **Front. Sustain. Food Syst.** 2021, 5, 617157. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.617157>

HARTEMINK, A. E.; BARROW, N. J. Soil pH-nutrient relationships: the diagram. **Plant and Soil**, v. 486, n. 1-2, p. 209-215, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>

HASAN, A.; TABASSUM, B.; HASHIM, M.; KHAN, N. Role of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as a plant growth enhancer for sustainable agriculture: A review. **Bacteria**, v. 3, n. 2, p. 59-75, 2024. <https://doi.org/10.3390/bacteria3020005>

HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ, C.; PEIMBERT, M.; RODRÍGUEZ-MARTIN, P.; TREJO-AGUILAR, D.; ALCARAZ, L. D. A study of microbial diversity in a biofertilizer consortium. **Plos One**, v. 18, n. 8, p. 1-20, 2023. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286285>

HUNT, G. A. Effect of styroblock design and cooper treatment on morphology of conifer seedlings. In: Rose, R. et al. (Ed.). **Proceedings...** Fort Collins: U.S. Department of Agriculture,

Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1990. p. 218-222. (Roseburg, OR. General Technical Report RM-200).

JOSHI, S.; GANGOLA, S.; JAGGI, V.; SAHGAL, M. Functional characterization and molecular fingerprinting of potential phosphate solubilizing bacterial candidates from Shisham rhizosphere. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 1-12, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33217-9>

KAUR, H.; KAUR, H.; KAUR, H.; SRIVASTAVA, S. The beneficial roles of trace and ultratrace elements in plants. **Plant Growth Regulation**, v. 100, n. 2, p. 219-236, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00837-6>

KOMOLAFE, A. F.; KAYODE, C. O.; EZEKIEL-ADEWOYIN, D. T.; AYANFEOLUWA, O. E.; OGUNLETI, D. O.; MAKINDE, A. I. Soil properties and performance of celosia (*Celosia argentea*) as affected by compost made with *Trichoderma asperellum*. **Eurasian Journal of Soil Science**, v. 10, n. 3, p. 199-206, 2021. <https://doi.org/10.18393/ejss.880541>

KUMAR, A. M.; SANDHYA, G. M.; KARTHIKEYAN, A. Evaluation of bio-fertiliser (bio-inoculant) consortia and their effect on plant growth performance of sandalwood (*Santalum album*) seedlings. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 35, n. 3, p. 311-321, 2023. <https://doi.org/10.26525/jtfs2023.35.3.311>

LI, H. P.; HAN, Q. Q.; LIU, Q. M.; GAN, Y. N.; RENSING, C.; RIVERA, W. L.; ... ZHANG, J. L. Roles of phosphate-solubilizing bacteria in mediating soil legacy phosphorus availability. **Microbiological Research**, v. 272, n. 1, p. 1-11, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127375>

LIU, W. Y. Y.; POOBATHY, R. Biofertilizer utilization in forestry. In: **Biofertilizers**; INAMUDDIN, A. M. I.; BODDULA, R.; REZAKAZEMI, M. Eds.; Wiley: Cambridge, USA, 2021; Volume 1, pp. 1-37. <https://doi.org/10.1002/9781119724995>.

LIU, F.; QIAN, J.; ZHU, Y.; WANG, P.; HU, J.; LU, B.; ... LI, F. Phosphate solubilizing microorganisms increase soil phosphorus availability: A Review. **Geomicrobiology Journal**, v. 1, n. 1, p. 1-16, 2023. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2272620>

LORENZI, H. 1992. **Árvores brasileiras: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Editorial Plantarum. Nova Odessa, Brasil.

LUO, Y.; MA, L.; FENG, Q.; LUO, H.; CHEN, C.; WANG, S.; ... LI, N. Influence and role of fungi, bacteria, and mixed microbial populations on phosphorus acquisition in plants. **Agriculture**, v. 14, n. 3, p. 1-24, 2024. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030358>

MACÍAS-RODRÍGUEZ, L.; CONTRERAS-CORNEJO, H. A.; ADAME-GARNICA, S. G.; DEL-VAL, E.; LARSEN, J. The interactions of *Trichoderma* at multiple trophic levels: inter-kingdom communication. **Microbiological Research**, v. 240, n. 1, p. 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126552>

MABAGALA, F. S. On the tropical soils; The influence of organic matter (OM) on phosphate bioavailability. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, n. 5, p. 3635-3641, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.056>

MARCATI, C. R.; MILANEZ, C. R. D.; MACHADO, S. R. Seasonal development of secondary xylem and phloem in *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake (Leguminosae: Caesalpinioideae). **Trees**, v. 22, n. 1, p. 03-12, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0173-8>

MARDAMOOTOO, T.; DU PREEZ, C. C.; BARNARD, J. H. Phosphorus management issues for crop production: A review. **African Journal of Agricultural Research**, v. 17, n. 7, p. 939-952, 2021. <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15205>

MARTINEZ, J. F. G.; CONCEPCION, M. R. Molecular mechanisms of shade tolerance in plants. **New Phytologist**, v. 239, n. 4, p. 1190-1202, 2023. <https://doi.org/10.1111/nph.19047>

MASTOURI, F.; BJÖRKMAN, T.; HARMAN, G. E. Seed treatment with *Trichoderma harzianum* alleviates biotic, abiotic, and physiological stresses in germinating seeds and seedlings. **Phytopathology**, v. 100, n. 11, p. 1213-1221, 2010. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-10-0091>

MEYER, G.; BELL, M. J.; KOPITTKE, P. M.; LOMBI, E.; DOOLETTE, C. L.; BRUNETTI, G.; ... JANKE, C. K. Mobility and lability of phosphorus from highly concentrated fertiliser bands. **Geoderma**, v. 429, n. 1, p. 1-12, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116248>

MULANI, R.; MEHTA, K.; SARAF, M.; GOSWAMI, D. Decoding the mojo of plant-growth-promoting microbiomes. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 115, n. 1, p. 1-14, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101687>

NAPITUPULU, T. P. Agricultural relevance of fungal mycelial growth-promoting bacteria: Mutual interaction and application. **Microbiological Research**, v. 290, n. 1, p. 127978, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127978>

NEGI, R.; SHARMA, B.; PARASTESH, F.; KAUR, S.; KHAN, S. S.; KOUR, D.; ... YADAV, A. N. Microbial consortia mediated regulation of plant defense: A promising tool for sustaining crops protection. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 134, n. 1, p. 1-20, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102393>

NIU, K.; LI, M.; LENZEN, M.; WIEDMANN, T.; HAN, X.; JIN, S.; ... GU, B. Impacts of global trade on cropland soil-phosphorus depletion and food security. **Nature Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 1-13, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01385-9>

NUNES, P. S.; JUNIOR, G. V. L.; MASCARIN, G. M.; GUIMARÃES, R. A.; MEDEIROS, F. H.; ARTHURS, S.; BETTIOL, W. Microbial consortium of biological products: do they have a future? **Biological Control**, v. 188, n. 1, p. 1-17, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105439>

OLIVEIRA, L. A. B.; RIBEIRO ILARIA, F.; RESENDE, C. L. P.; CARVALHO, D. D. C.; RODRIGUES, F. Growth of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* seedlings by strains of *Trichoderma* spp. under boron rates. **Bioscience Journal**, v. 38, n. 1, p. 1-8, 2022. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-53876>

- OLMEDO, G. M.; FONTANA, C.; OLIVEIRA, J. M. Primary and secondary growth phenology of *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake at different time scales. **Dendrochronologia**, v. 72, n. 1, p. 1-10, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125921>
- PAIVA, E. A. S.; OLIVEIRA, D. M. T.; CANAVEZE, Y.; MACHADO, S. R. Adhesive secretion in *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake (Leguminosae: Caesalpinioideae): histochemical and morpho-functional characterization of this unusual feature in woody plants. **Arthropod-Plant Interactions**, v. 16, n. 2, p. 249-261, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11829-022-09888-y>
- PALMA, M.; SCOTTI, R.; D'AGOSTINO, N.; ZACCARDELLI, M.; TUCCI, M. Phyto-Friendly soil bacteria and fungi provide beneficial outcomes in the host plant by differently modulating its responses through (in) direct mechanisms. **Plants**, v. 11, n. 20, p. 1-20, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11202672>
- PAN, L.; CAI, B. Phosphate-solubilizing bacteria: Advances in their physiology, molecular mechanisms and microbial community effects. **Microorganisms**, v. 11, n. 12, p. 1-22, 2023. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11122904>
- PAN, Y.; SONG, Y.; ZHAO, L.; CHEN, P.; BU, C.; LIU, P.; ZHANG, D. The genetic basis of phosphorus utilization efficiency in plants provide new insight into woody perennial plants improvement. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 4, p. 2353, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijms23042353>
- PASSAGLIA, L. M. P. *Bradyrhizobium elkanii* nod regulon: insights through genomic analysis. **Genetics and Molecular Biology**, v. 40, p. 703-716, 2017. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-GMB-2016-0228>
- PATRA, D.; MANDAL, S. Nod-factors are dispensable for nodulation: A twist in *Bradyrhizobia*-legume symbiosis. **Symbiosis**, v. 86, n. 1, p. 1-15, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13199-021-00826-9>
- PENUELAS, J.; COELLO, F.; SARDANS, J. A better use of fertilizers is needed for global food security and environmental sustainability. **Agriculture & Food Security**, v. 12, n. 1, p. 1-9, 2023. <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00409-5>
- PIETROBOM, R. C. V.; OLIVEIRA, D. M. T. Morfoanatomia e ontogênese do pericarpo de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake (Fabaceae, Caesalpinioideae). **Brazilian Journal of Botany**, v. 27, p. 767-779, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042004000400015>
- POVEDA, J.; EUGUI, D. Combined use of *Trichoderma* and beneficial bacteria (mainly *Bacillus* and *Pseudomonas*): Development of microbial synergistic bio-inoculants in sustainable agriculture. **Biological Control**, v. 176, n. 1, p. 1-19, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105100>
- PRASAD, A.; DIXIT, M.; MEENA, S. K.; KUMAR, A. Qualitative and quantitative estimation for phosphate solubilizing ability of *Trichoderma* isolates: A natural soil health enhancer. **Materials Today: Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 1-7, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.305>

PRESCOTT, C. E. Perspectives: Regenerative forestry—Managing forests for soil life. **Forest Ecology and Management**, v. 554, n. 1, p. 1-6, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121674>

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2011.

RADHI, O. A.; IDREESS, H. G.; ALQASEER, K.; ALJANABI, A. S. Uses *Bacillus subtilis*, *Rhizobium* bacteria, and arbuscular mycorrhizal fungi to enhance some physical and chemical characteristics growth on apricot sapling (*Prunus armeniaca* L.). **Ann. For. Res**, v. 66, n. 1, p. 2212-2229, 2023.

RAGHU, H. B.; ASHWIN, R.; RAVI, J. E.; BAGYARAJ, D. J. Microbial consortium improved growth and performance of teak (*Tectona grandis* LF) in nursery and field trials. **Biological Sciences**, v. 90, n. 4, p. 903-909, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40011-019-01163-0>

RAMOS, S. J.; TEIXEIRA, R. A.; GUEDES, R. S.; GASTAUER, M.; NUNES, S. D. S.; CALDEIRA, C. F.; ... SOUZA-FILHO, P. W. M. Nutrient requirements of paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*): optimizing seedling quality for reforestation programs. **Acta Amazónica**, v. 52, n. 2, p. 96-103, 2022. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202101251>

RATU, S. T. N.; AMELIA, L.; OKAZAKI, S. Type III effector provides a novel symbiotic pathway in legume–rhizobia symbiosis. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, v. 87, n. 1, p. 28-37, 2023. <https://doi.org/10.1093/bbb/zbac178>

REYES, F. C.; QUIROZ, D. C.; CEJA, J. E. S.; SÁNCHEZ, A. R.; REYES, J. S. Efectos del pretratamiento con *Trichoderma* y *Bacillus* en la germinación de semillas de *Agave victoriae-reginae* T. Moore. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**, v. 13, n. 69, p. 56-72, 2022. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i69.844>

RIBEIRO, A. S. N.; JUNIOR, A. F. C.; CHAGAS, L. F. B.; MARTINS, A. L. L.; ALMEIDA, L. B.; NOBREGA, G. S., ... ALVES, M. V. G. Efficiency of *Trichoderma* and *Bacillus subtilis* as growth promoters in eucalyptus *Corymbia citriodora*. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 11, p. 20380-20397, 2023. <https://doi.org/10.55905/oelv21n11-097>

RYSZKO, U.; RUSEK, P.; KOŁODYŃSKA, D. Quality of phosphate rocks from various deposits used in wet phosphoric acid and P-fertilizer production. **Materials**, v. 16, n. 2, p. 1-15, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16020793>

SAMANTARAY, A.; CHATTARAJ, S.; MITRA, D.; GANGULY, A.; KUMAR, R.; GAUR, A.; ... THATOI, H. Advances in microbial based bio-inoculum for amelioration of soil health and sustainable crop production. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 7, n. 1, p. 1-19, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100251>

SANDIM, A. S.; SILVA, L. J. R.; DEUS, A. C. F.; PENN, C.; BÜLL, L. T. Phosphorous fractions in weathered tropical soils after application of conventional and alternative P fertilizers. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 4, p. 5621-5631. [10.1007/s42729-023-01426-w](https://doi.org/10.1007/s42729-023-01426-w)

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. Á.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5ª ed.; Embrapa: Brasília, Brasil, 2018; p. 356.

SANTOS, M. F.; SANTOS, L. E.; COSTA, D. L.; VIEIRA, T. A.; LUSTOSA, D. C. *Trichoderma* spp. on treatment of *Handroanthus serratifolius* seeds: effect on seedling germination and development. **Heliyon**, v. 6, n. 6, p. 1-8, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04044>

SARMAH, R.; SARMA, A. K. Phosphate solubilizing microorganisms: A review. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 1, n. 1, p. 1-10, 2022. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2142238>

SINGH, A.; SHUKLA, N.; KABADWAL, B. C.; TEWARI, A. K.; KUMAR, J. Review on Plant-*Trichoderma*-Pathogen Interaction. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 7, n. 1, p. 2382-2397, 2018. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.702.291>

SINGH, B. N.; DWIVEDI, P.; SARMA, B. K.; SINGH, G. S.; SINGH, H. B. A novel function of N-signaling in plants with special reference to *Trichoderma* interaction influencing plant growth, nitrogen use efficiency, and cross talk with plant hormones. **3 Biotech**, v. 9, n. 3, p. 1-13, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1638-3>

SINGH, B. K.; CHAUBEY, D.; PRAKASH, V.; CHOUDHURY, S. R.; SOHANE, R. K. **Plant growth promoting rhizobacteria enhances the sustainable production of bitter melon**. In: *Pluralistic Approaches in Sustainable Agriculture: Past, Present and Future*, New Delhi Publishers (New Delhi): 2021. p. 191-200, ISBN: 978-93-91012-17-5

SIREGAR, B. A.; LIANTIOMAH, D.; GAFUR, A.; TJAHJONO, B. Screening of endophytic *Trichoderma* isolates to improve the growth and health of *Eucalyptus pellita* seedlings. **IOP Publishing**, v. 974, n. 1, p. 1-9, 2022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/974/1/012084>

SOUMARE, A.; DJIBRIL, S. A. R. R.; DIÉDHIOU, A. G. Potassium sources, microorganisms and plant nutrition: Challenges and future research directions. **Pedosphere**, v. 33, n. 1, p. 105-115, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.025>

SOUSA, W. N.; BRITO, N. F.; FELSEMBURGH, C. A.; VIEIRA, T. A.; LUSTOSA, D. C. Evaluation of *Trichoderma* spp. isolates in cocoa seed treatment and seedling production. **Plants**, v. 10, n. 9, p. 1-14, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10091964>

SUZUKI, L. E. A. S.; CASALINHO, H. D.; MILANI, I. C. B. Strategies and public policies for soil and water conservation and food production in Brazil. **Soil Systems**, v. 8, n. 2, p. 1-22, 2024. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8020045>

SYAFIQ, T. H. T. M.; NUSAIBAH, S. A.; RAFII, M. Y. Effectiveness of bioinoculants *Bacillus cereus* and *Trichoderma asperellum* as oil palm seedlings growth promoters. **Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science**, v. 44, n. 1, p. 157-170, 2021. <https://doi.org/10.47836/pjtas.44.1.09>

SZMYT, J.; DERING, M. Adaptive silviculture and climate change – A forced marriage of the 21st Century?. **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 1-31, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16072703>

TERHONEN, E.; BLUMENSTEIN, K.; KOVALCHUK, A.; ASIEGBU, F. O. Forest tree microbiomes and associated fungal endophytes: Functional roles and impact on forest health. **Forests**, v. 10, n. 1, p. 1-32, 2019. <https://doi.org/10.3390/f10010042>

TIMOFEEVA, A. M.; GALYAMOVA, M. R.; SEDYKH, S. E. Plant growth-promoting soil bacteria: Nitrogen fixation, phosphate solubilization, siderophore production, and other biological activities. **Plants**, v. 12, n. 24, p. 4074, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12244074>.

TORMES, E. C.; BARBOSA, B. S.; BERLE, H.; URIARTE, J. F.; POLLNOW, H. E.; PASA, M. Legal aspects of the production of seeds and seedlings of forest species. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, p. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.25903>.

TRUJILLO-ELISEA, F. I.; LABRÍN-SOTOMAYOR, N. Y.; BECERRA-LUCIO, P. A.; BECERRA-LUCIO, A. A.; MARTÍNEZ-HEREDIA, J. E.; CHÁVEZ-BÁRCENAS, A. T.; PEÑA-RAMÍREZ, Y. J. Plant growth and microbiota structural effects of Rhizobacteria inoculation on mahogany (*Swietenia macrophylla* King [Meliaceae]) under nursery conditions. **Forests**, v. 13, n. 10, p. 1742, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13101742>.

VAN DER HEIJDEN, M. G.; BRUIN, S. D.; LUCKERHOFF, L.; VAN LOGTESTIJN, R. S.; SCHLAEPI, K. A widespread plant-fungal-bacterial symbiosis promotes plant biodiversity, plant nutrition and seedling recruitment. **The ISME Journal**, v. 10, n. 2, p. 389-399, 2016. <https://doi.org/10.1038/ismej.2015.120>.

VEJAN, P.; KHADIRAN, T.; ABDULLAH, R.; AHMAD, N. Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture. **Journal of Controlled Release**, v. 339, n. 1, p. 321-334, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.10.003>.

VINALE, F.; SIVASITHAMPARAM, K. Beneficial effects of *Trichoderma* secondary metabolites on crops. **Phytotherapy Research**, v. 34, n. 11, p. 2835-2842, 2020. <https://doi.org/10.1002/ptr.672>

WAHAB, A.; BIBI, H.; BATOOL, F.; MUHAMMAD, M.; ULLAH, S.; ZAMAN, W.; ABDI, G. Plant growth-promoting rhizobacteria biochemical pathways and their environmental impact: A review of sustainable farming practices. **Plant Growth Regulation**, v. 104, n. 1, p. 1-26, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10725-024-01218-x>

WALTON, C. R.; EWENS, S.; COATES, J. D.; BLAKE, R. E.; PLANAVSKY, N. J.; REINHARD, C.; ... PASEK, M. A. Phosphorus availability on the early Earth and the impacts of life. **Nature Geoscience**, v. 16, n. 5, p. 399-409, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01167-6>

WOO, S. L.; RUOCCO, M.; VINALE, F.; NIGRO, M.; MARRA, R.; LOMBARDI, N.; ... LORITO, M. *Trichoderma*-based products and their widespread use in agriculture. **The Open Mycology Journal**, v. 8, n. 1, p. 71-123, 2014. <https://doi.org/10.2174/1874437001408010071>

XU, H.; LV, J.; YU, C. Combined phosphate-solubilizing microorganisms jointly promote *Pinus massoniana* growth by modulating rhizosphere environment and key biological pathways in seedlings. **Industrial Crops and Products**, v. 191, n. 1, p. 1-15, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116005>

YADAV, N.; RAKHOLIA, S.; YOSEF, R. Decision support systems in forestry and tree-planting practices and the prioritization of ecosystem services: A Review. **Land**, v. 13, n. 2, p. 1-12, 2024.

YANG, S. Y.; LIN, W. Y.; HSIAO, Y. M.; CHIOU, T. J. Milestones in understanding transport, sensing, and signaling of the plant nutrient phosphorus. **The Plant Cell**, v. 36, n. 5, p. 1504-1523, 2024. <https://doi.org/10.1093/plcell/koad326>