

Determinação da dose ótima de *Trichoderma harzianum* no desenvolvimento morfofisiológico de *Pinus radiata* em viveiro

Erlisson Jhoan Cotrina-Urbina¹, Walter Manuel Hoyos-Alayo^{2*}, Jorge Luis Leiva-Piedra³, Emilio Ramirez-Juidias⁴

¹Engenheiro Ambiental, Universidad Privada del Norte, Perú.

²Doutor em Ciências Ambientais, Universidad Tecnológica del Perú, Perú. (*Autor correspondiente: c23712@utp.edu.pe)

³Mestre em Proteção de Cultivos, Universidad Tecnológica del Perú, Perú.

⁴Doutor em Engenharia, Universidad de Sevilla, España.

Histórico do Artigo: Submetido em: 20/01/2026 – Revisado em: 01/02/2026 – Aceito em: 08/02/2026

RESUMO

A produção de mudas de *Pinus radiata* requer alternativas que aumentem o vigor e reduzam o uso de insumos químicos. Este estudo determinou a dose de *Trichoderma harzianum* sobre o desempenho morfofisiológico. O estudo executou um delineamento em blocos completos ao acaso com 48 unidades experimentais, 4 blocos, 4 tratamentos e 3 repetições por tratamento em cada bloco, com avaliação semanal durante 20 semanas. A equipe aplicou 0,75, 1,00 e 1,25 g/L ao substrato por drench, 100 mL por muda a cada 15 dias, e incluiu um controle sem aplicação. As doses intermediárias aumentaram a altura, 1,00 g/L atingiu 19,2 cm e 0,75 g/L 18,9 cm, com incrementos de 3,7 cm e 3,5 cm em relação ao controle, equivalentes a 24% e 22%. A análise situou o efeito no limiar de significância e o teste de Tukey separou o controle em a de 0,75 e 1,00 g/L em b, enquanto 1,25 g/L permaneceu em ab. O diâmetro do colo não diferiu, $p = 0,230$, o peso fresco não alcançou significância, $p = 0,139$, e a biomassa não diferiu, $p = 0,2610$. O estudo recomenda 1,00 g/L por apresentar maior altura e resposta mais uniforme, e propõe validação no pós-transplante com sobrevivência e massa seca.

Palavras-Chaves: Bioinsumo microbiano, Inoculação no substrato, Qualidade de muda, Delineamento em blocos completos ao acaso, Viveiro florestal.

Determining the optimal dose of *Trichoderma harzianum* for the morphophysiological development of *Pinus radiata* seedlings in the nursery

ABSTRACT

Pinus radiata seedling production needs alternatives that enhance vigour and reduce chemical inputs. This study quantified the effect of *Trichoderma harzianum* dose on morphophysiological performance. We ran a randomised complete block design with 48 experimental units, four blocks, four treatments, and three replicates per treatment within each block, with weekly assessments for 20 weeks. We applied 0.75, 1.00, and 1.25 g L⁻¹ to the substrate as a drench, 100 mL per seedling every 15 days, and included an untreated control. Intermediate doses increased height. The 1.00 g L⁻¹ treatment reached 19.2 cm and 0.75 g L⁻¹ reached 18.9 cm, increases of 3.7 cm and 3.5 cm over the control, equivalent to 24% and 22%. The overall effect lay at the significance threshold and Tukey separated the control in group a from 0.75 and 1.00 g L⁻¹ in group b, while 1.25 g L⁻¹ fell in ab. Stem diameter did not differ, $p = 0.230$. Fresh weight did not reach significance, $p = 0.139$, and biomass did not differ, $p = 0.2610$. We recommend 1.00 g L⁻¹ due to greater height and a more uniform response, and we propose post-transplant validation using survival and dry weight.

Keywords: Microbial bioinoculant, Substrate inoculation, Seedling quality, Randomised complete block design, Forest nursery.

Cotrina-Urbina, E. J., Hoyos-Alayo, W. M., Leiva-Piedra, J. L., & Ramirez-Juidias, E. (2026). Determinação da dose ótima de *Trichoderma harzianum* no desenvolvimento morfofisiológico de *Pinus radiata* em viveiro. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 14(2), 102–126.



Determinación de la dosis óptima de *Trichoderma harzianum* en el desarrollo morfofisiológico de *Pinus radiata* en vivero

RESUMEN

La producción de plantines de *Pinus radiata* necesita alternativas que mejoren el vigor y reduzcan el uso de insumos químicos. Este estudio determinó la dosis de *Trichoderma harzianum* sobre el desempeño morfofisiológico. El estudio ejecutó un diseño de bloques completos al azar con 48 unidades, 4 bloques, 4 tratamientos y 3 repeticiones por tratamiento en cada bloque, con evaluación semanal durante 20 semanas. El equipo aplicó 0,75, 1,00 y 1,25 g/L al sustrato por drench, 100 mL por plantín cada 15 días, e incluyó un control sin aplicación. Las dosis intermedias elevaron la altura, 1,00 g/L alcanzó 19,2 cm y 0,75 g/L 18,9 cm, con incrementos de 3,7 cm y 3,5 cm frente al control, equivalentes a 24% y 22%. El análisis ubicó el efecto en el umbral de significancia y Tukey separó al control en a de 0,75 y 1,00 g/L en b, mientras 1,25 g/L quedó en ab. El grosor de tallo no difirió, $p = 0,230$, el peso fresco no alcanzó significancia, $p = 0,139$, y la biomasa no difirió, $p = 0,2610$. El estudio recomienda 1,00 g/L por mayor altura y respuesta más uniforme, y propone validar en postrasplante con supervivencia y peso seco.

Palabras clave: Bioinsumo microbiano, Calidad de plantín, Diseño de bloques completos al azar, Inoculación al sustrato, Vivero forestal.

1. Introdução

A sustentabilidade dos sistemas florestais contemporâneos está estreitamente associada à qualidade fisiológica, morfológica e fitossanitária do material vegetal utilizado nas fases iniciais de produção (FAO, 2020). Nesse sentido, o desenvolvimento bem-sucedido de mudas em viveiro constitui um elo estratégico para assegurar altas taxas de sobrevivência, vigor inicial e adaptabilidade em campo (Rodríguez-Castañeda et al., 2025).

Pinus radiata, espécie de elevado valor florestal, ocupa mais de 4 milhões de hectares de plantações em escala global, respondendo por 58% da área florestal nacional no Chile e apresentando produtividades de 20 a 40 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ sob manejo intensivo (Corvalán Vera, 2020). O Chile lidera a área plantada de *P. radiata*, com 1,84 milhão de hectares, seguido pela Nova Zelândia, com aproximadamente 1,63 milhão de hectares. Em conjunto, ambos concentram 86% da área global dessa espécie (Instituto Forestal [INFOR], 2024; Jang, 2024). Essa distribuição reflete condições edafoclimáticas favoráveis e a consolidação de tecnologias de propagação e de manejo florestal avançado em ambos os países. No Peru, há cerca de 10.000 hectares plantados, principalmente em Cajamarca, que concentra 96% do total nacional (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2019).

Estudos em ambientes controlados e em campo relatam mortalidade pós-transplante de até 32% em condições subótimas (Mason, 2001). Isso ocorre porque *P. radiata* é suscetível a diversos agentes patogênicos que comprometem seu desenvolvimento do viveiro à maturidade em campo. Entre os mais relevantes, destacam-se os oomicetos *Phytophthora pluvialis* e *P. pinifolia*, responsáveis por desfolha, necrose de acículas e morte regressiva, com incidências acima de 64% em amostras sintomáticas, sobretudo sob condições úmidas (Ahumada & Rotella, 2020; Tarallo et al., 2025). Fungos ascomicetos como *Dothistroma septosporum* e *D. pini* causam red band needle blight, com danos foliares de até 70% em plantações (Mullett et al., 2018; Wartalska et al., 2021). *Fusarium circinatum*, agente do pitch canker, provoca cancos resinosos e perda estrutural significativa, com mortalidade acima de 50% em viveiros (Hernandez-Escribano et al., 2024). Somam-se a esses patógenos *Cyclaneusma minus* e *Diplodia sapinea*, que induzem necrose de acículas, morte de brotações e redução do volume comercial, afetando até 63% do produto madeireiro (Aragonés et al., 2021; Ismael et al., 2020). Por fim, *Colletotrichum acutatum* f. sp. *pinia* causa deformação apical, terminal crook, com taxa de infecção de 80% e sintomas severos em 48% das mudas (Reglinski et al., 2017). A fase de viveiro também é afetada por deficiências de micronutrientes, Fe e Zn, quando seus teores ficam abaixo de 2,5 mg/kg. O problema se agrava com infecções radiculares severas, em que patógenos como *Fusarium circinatum* podem atacar até 65% das mudas não tratadas (Woodward et al., 2025).

O uso intensivo de fungicidas e fertilizantes de síntese química para mitigar esses desafios gera impactos técnicos, ecológicos e econômicos relevantes. Estimativas indicam que a indústria florestal consome mais de 1,5 milhão de toneladas de fertilizantes por ano, produzindo lixiviados de nitrato próximos de 80 mg/L, acima do limite de 10 mg/L para água potável (Bolaños-Alfaro et al., 2017; Du et al., 2022). Em plantios maduros na Nova Zelândia e na Austrália, aplicam-se 0,855 kg ha⁻¹ de óxido cuproso como fungicida aéreo contra *Phytophthora pluvialis* e *Dothistroma*, associado ao red needle cast, com redução expressiva da severidade da doença (Carnegie & Kathuria, 2022; Fraser et al., 2022).

Em viveiros, utilizam-se misturas convencionais como metalaxyl-M com mancozeb (1:1), em doses de 15 a 50 kg/ha, para controlar a podridão radicular causada por *Phytophthora*. Protocolos de manejo fitossanitário relatam redução da biomassa microbiana de até 40% e diminuição da diversidade de fungos benéficos acima de 50% (Reglinski et al., 2009; Rolando et al., 2017; Zhang et al., 2024). O uso de fosfito de potássio, ou ácido fosfônico, em tratamentos foliares mensais, com 4 a 7 aplicações de dezembro a maio, alcançou incidência de infecção $\leq 1\%$, reduzida para 0,1% com aplicações duas vezes por semana (Cerqueira et al., 2017). Embora esses produtos sejam eficazes contra patógenos críticos, como *P. pluvialis*, *P. pinifolia*, *Dothistroma* spp. e *F. circinatum*, seu uso pode levar ao acúmulo em solos e águas próximas, alterar a microbiota e elevar custos (Berbegal et al., 2015). O uso prolongado desses insumos também eleva a condutividade elétrica do substrato acima de 2,1 dS/m, o que reduz a absorção radicular (Shavrukov & Hirai, 2016). Do ponto de vista econômico, o gasto com insumos químicos pode chegar a USD 850 ha⁻¹ ano⁻¹, equivalente a 25% do orçamento operacional em viveiros intensivos (Hu et al., 2024; Muhammad et al., 2022).

Nesse cenário, bioinsumos microbianos se apresentam como alternativa sustentável, com reduções de 20 a 35% na necessidade de fertilizantes e ganhos de biomassa aérea e radicular (Kthiri et al., 2020; Mastouri et al., 2010). Sua ação contra patógenos fúngicos também é expressiva. Estudos em viveiros de *P. radiata* mostram que cepas como *Trichoderma hamatum* e *T. atroviride* reduzem a mortalidade de mudas em até 29% (Chávez et al., 2014), aumentam a biomassa radicular em 31% (Donoso et al., 2008) e promovem reduções na incidência de *Fusarium circinatum* comparáveis às de fungicidas químicos (Hohmann et al., 2011).

Entre esses bioinsumos, *Trichoderma harzianum* se destaca pela eficácia como agente de controle biológico, ao inibir fitopatógenos por mecanismos como micoparasitismo, competição por espaço e nutrientes, antibiose e indução de resistência sistêmica na planta (Hohmann et al., 2011). Sua ação fungicida foi evidenciada em viveiros de *Pinus radiata*, onde a aplicação reduziu a incidência de *Fusarium circinatum* em até 80%, com diminuição significativa da mortalidade de mudas por damping-off (Halleen et al., 2007). Estudos recentes indicam que seu uso reduz marcadores de estresse oxidativo, como o malondialdeído (MDA), em tecidos foliares, o que sugere menor peroxidação lipídica sob estresse abiótico (Hasanuzzaman et al., 2020). Além do efeito protetor, *T. harzianum* atua como bioestimulante do crescimento vegetal por colonizar rapidamente o substrato e atingir densidades superiores a 1×10^7 UFC/g. Esse processo melhora a estrutura da rizosfera e favorece o desenvolvimento radicular (Uddin et al., 2018; Yao et al., 2023). O fungo também sintetiza ácido indolacético (AIA) em concentrações entre 9,4 e 22,1 µg/mL, o que estimula a elongação celular e a absorção de nutrientes (Nusaibah et al., 2019). Em viveiros, a aplicação aumentou a biomassa aérea entre 30 e 50%, elevou os níveis de clorofila foliar, SPAD, entre 18 e 29% e triplicou o comprimento radicular aos 45 dias após a aplicação, sob condições controladas. Essas propriedades combinadas posicionam *T. harzianum* como ferramenta biotecnológica para uma produção florestal mais resiliente, eficiente e ambientalmente sustentável (Harman, 2006; Zin & Badaluddin, 2020).

No entanto, apesar dos múltiplos benefícios atribuídos a *T. harzianum*, sua eficácia é influenciada por diversos fatores, como a cepa específica, o tipo de substrato, as condições ambientais e, de forma crítica, a dose aplicada (Cerón et al., 2024). Embora numerosos estudos tenham documentado efeitos positivos em cultivos agrícolas, há baixa sistematização experimental sobre seu uso em espécies florestais, e poucos trabalhos avaliaram o impacto de diferentes concentrações em parâmetros de desenvolvimento morfofisiológico em *Pinus radiata* (López-López et al., 2016; Mellow et al., 2016).

Essa lacuna de evidências limita a formulação de protocolos eficientes para aplicação rotineira em viveiros, especialmente em regiões que promovem estratégias de reflorestamento sustentável e restauração de paisagens degradadas. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo determinar a dose ótima de *Trichoderma harzianum* no desenvolvimento morfofisiológico de *Pinus radiata* em viveiro.

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

A equipe realizou o ensaio na Agência Agrária de Cajabamba, localizada no distrito e na província de Cajabamba, departamento de Cajamarca, Peru, a 2654 m a.n.m., próxima às coordenadas 7,62° S e 78,05° O (Dirección Regional de Agricultura, 2026). A equipe conduziu o estudo sob cobertura de malha de sombreamento, com irrigação manual, garantindo distribuição uniforme de água no substrato e evitando encharcamento. O período experimental ocorreu de 13 de setembro de 2024 a 27 de janeiro de 2025. O fotoperíodo natural nessa latitude permaneceu entre 12,2 e 12,6 h nos meses centrais do ensaio (Castillo-Vera et al., 2023).

O viveiro operou sob malha de sombreamento para reduzir a carga radiativa e criar microclima adequado às mudas. A equipe manteve microclima ameno e úmido, com temperaturas diurnas entre 18 e 26 °C e noturnas entre 10 e 18 °C. A umidade relativa variou entre 60% e 85%. A equipe evitou episódios de calor com alta umidade, condição associada a maior risco sanitário em *P. radiata* (Castro et al., 2015).

2.2 Material vegetal

A equipe utilizou 48 mudas de *Pinus radiata* produzidas no viveiro da Agência Agrária de Cajabamba. Antes do início do ensaio, a equipe selecionou mudas com aparência uniforme e sem sinais visíveis de estresse ou doença, sem clorose, necrose foliar, deformações, danos mecânicos ou sinais de podridão radicular.

A equipe estabeleceu as mudas individualmente em sacos de polietileno de 0,4 L (4 × 7 cm) e as codificou com etiquetas permanentes, assegurando rastreabilidade por unidade experimental durante todas as medições. No início do experimento, a equipe registrou a altura e o diâmetro do colo de cada muda para documentar a homogeneidade basal do material vegetal.

2.3 Bioproducto e preparação dos tratamentos

A equipe utilizou uma formulado comercial de *Trichoderma harzianum* (min. 95%; 1 x 10 esporas por g de producto) para aplicação ao substrato por irrigação dirigida. O preparo ocorreu em água, com três soluções de trabalho a 0,75, 1,00 e 1,25 g/L. A equipe homogeneizou cada solução por agitação manual até completa dispersão e aplicou no mesmo dia do preparo. A primeira aplicação ocorreu no estabelecimento de cada muda no saco. Em seguida, a equipe realizou aplicações a cada 15 dias durante todo o período experimental, mantendo um tratamento controle.

A equipe aplicou o bioinsumo ao substrato via drench, direcionado à zona radicular. Em cada aplicação, a equipe administrou 100 mL de suspensão por muda, vertendo de forma lenta e uniforme ao redor do colo e sobre o volume de substrato com maior densidade de raízes finas. A equipe evitou escoamento superficial e padronizou a dose efetiva por unidade experimental. Para assegurar comparabilidade entre tratamentos, a equipe manteve constante o volume aplicado e executou as aplicações em ordem aleatorizada. Para prevenir contaminação cruzada, a equipe utilizou recipientes e regadores específicos por tratamento, ou realizou lavagem e enxágue completos entre aplicações.

2.4 Substrato e manejo no viveiro

A equipe preparou o substrato de cultivo com terra peneirada, areia lavada e matéria orgânica estabilizada, na proporção volumétrica 2:1:0,33 (terra:areia:matéria orgânica), equivalente a 60:30:10 (% v/v) (Oliva Valle et al., 2017; Vela Rodríguez, 2011). A equipe homogeneizou o substrato antes do enchimento dos recipientes para assegurar aeração e drenagem.

A fração de matéria orgânica correspondeu ao produto comercial, um adubo melhorador de solo 100% natural, produzido a partir da degradação controlada de resíduos sólidos de criação de aves, restos vegetais e outros componentes orgânicos. A Tabela 1 apresenta a composição declarada do produto.

Tabela 1 – Composição declarada do adubo orgânico comercial
Table 1 – Declared composition of the commercial organic fertiliser

Grupo	Componente	Símbolo ou forma	Conteúdo
Macronutrientes	Nitrogênio	N	1,2 a 2,5 %
	Fósforo	P ₂ O ₅	1,0 a 2,0 %
	Potássio	K ₂ O ₅	2,1 a 3,5 %
	Cálcio	CaO	3,0 a 3,5 %
	Magnésio	MgO	0,8 a 1,2 %
Micronutrientes	Manganês	Mn	500 a 650 ppm
	Boro	B	70 a 100 ppm
	Zinco	Zn	400 a 600 ppm
	Cobre	Cu	65 a 90 ppm
	Ferro	Fe	3,500 a 8,500 ppm
Extratos húmicos	Ácidos fúlvicos	-	2,0 a 10,0 %
	Ácidos húmicos	-	2,0 a 8,0 %

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

Antes do estabelecimento das mudas, a equipe caracterizou o substrato como linha de base, conforme detalhado na Tabela 2.

Tabela 2 – Métodos analíticos e equipamentos utilizados para a caracterização físico-química do substrato
Table 2 – Analytical methods and equipment used for the physicochemical characterisation of the substrate

Parameter	Unidade	Norma ou referência	Método analítico	Equipamento ou instrumento
pH	adimensional	EPA 9045D Rev. 4	Medição potenciométrica	Potenciômetro portátil WTW Inolab pH 7310
Condutividade elétrica	mS/m	ISO 11265	Medição condutimétrica	Condutímetro portátil WTW Inolab Cond 7310
Matéria orgânica	%	NOM-021-REC NAT-2000	Walkley e Black	Conforme o método indicado na norma
Nitrogênio total	mg/g	ISO 11261	Kjeldahl modificado	Conforme o método indicado na norma
Umidade	%	NOM-021-REC NAT-2000	Método gravimétrico por secagem	Estufa Faithful WGLL-230BE

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

A equipe registrou semanalmente a altura da muda e o diâmetro do colo durante todo o período de viveiro. A equipe mediu a altura do colo ao ápice com régua milimetrada. A equipe mediu o diâmetro do colo no ponto de transição caule-substrato com paquímetro, mantendo o mesmo critério de mensuração em cada avaliação. A equipe avaliou a clorose foliar por inspeção visual e registrou presença ou ausência para cada unidade experimental. Ao final do ensaio, a equipe retirou as mudas, removeu o substrato aderido por lavagem suave com água e mediu o comprimento da raiz principal do colo à extremidade distal como variável complementar.

2.5 Critério operacional de transplântio

A equipe definiu dias até o transplântio como o número de dias desde o estabelecimento da muda no saco até o primeiro registro em que a unidade experimental atingiu altura mínima de 20 cm. A equipe avaliou esse limiar para cada muda com base nas medições semanais de altura e o utilizou como critério operacional de saída do viveiro.

A equipe realizou as avaliações uma vez por semana durante todo o período experimental, totalizando 20 tempos de medição por unidade experimental, da semana 0 à semana 19. Para a análise, a equipe definiu previamente pontos de comparação nas semanas 1, 10 e 19, representando o estabelecimento, o desenvolvimento intermediário e o encerramento do ensaio.

2.6 Delineamento experimental

A equipe estruturou o estudo em Delineamento em Blocos Completos ao Acaso, DBCA, Tabela 3, com um fator experimental, a dose de *Trichoderma harzianum*, em quatro níveis: controle sem aplicação e três doses do bioinsumo, 0,75 g/L, 1,00 g/L e 1,25 g/L.

Tabela 3 – Esquema do Delineamento em Blocos Completos ao Acaso (DBCA) aplicado em viveiro
Table 3 – Schematic of the randomised complete block design (RCBD) applied in the nursery

Bloco	Repetição dentro do bloco	Unidade 1	Unidade 2	Unidade 3	Unidade 4
B1	R1	T0 (Controle)	T1 (0,75 g/L)	T2 (1,00 g/L)	T3 (1,25 g/L)
B1	R2	T2 (1,00 g/L)	T3 (1,25 g/L)	T0 (Controle)	T1 (0,75 g/L)
B1	R3	T1 (0,75 g/L)	T0 (Controle)	T3 (1,25 g/L)	T2 (1,00 g/L)
B2	R1	T3 (1,25 g/L)	T2 (1,00 g/L)	T1 (0,75 g/L)	T0 (Controle)
B2	R2	T0 (Controle)	T3 (1,25 g/L)	T2 (1,00 g/L)	T1 (0,75 g/L)
B2	R3	T2 (1,00 g/L)	T1 (0,75 g/L)	T0 (Controle)	T3 (1,25 g/L)
B3	R1	T1 (0,75 g/L)	T2 (1,00 g/L)	T3 (1,25 g/L)	T0 (Controle)
B3	R2	T3 (1,25 g/L)	T0 (Controle)	T1 (0,75 g/L)	T2 (1,00 g/L)
B3	R3	T0 (Controle)	T2 (1,00 g/L)	T1 (0,75 g/L)	T3 (1,25 g/L)
B4	R1	T2 (1,00 g/L)	T0 (Controle)	T3 (1,25 g/L)	T1 (0,75 g/L)
B4	R2	T1 (0,75 g/L)	T3 (1,25 g/L)	T0 (Controle)	T2 (1,00 g/L)
B4	R3	T3 (1,25 g/L)	T1 (0,75 g/L)	T2 (1,00 g/L)	T0 (Controle)

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

Cada bloco representou uma faixa ou fileira homogênea sob a malha, definida a partir da localização física dos sacos no viveiro, com o objetivo de controlar a variação espacial interna. A equipe trabalhou com 48 unidades experimentais distribuídas em 4 blocos. Em cada bloco, a equipe incluiu os 4 tratamentos e estabeleceu 3 repetições por tratamento, totalizando 12 unidades por bloco.

A equipe atribuiu os blocos de forma aleatória e, dentro de cada bloco, aleatorizou a disposição dos tratamentos em cada repetição para reduzir vieses de posição. A equipe manteve o manejo agrônomo igual em todos os tratamentos durante todo o ensaio.

2.7 Análise inferencial e comparação múltipla

Para cada variável avaliada em cada semana de análise, a equipe aplicou análise de variância para testar o efeito de *Trichoderma* spp. sobre os parâmetros de crescimento. Quando o resultado indicou significância estatística, $p < 0,05$, a equipe aplicou o teste de Tukey, $p < 0,05$, para comparar médias e identificar diferenças entre os tratamentos em estudo.

3. Resultados

3.1 Caracterização do substrato

Com base na Tabela 4, o substrato apresenta perfil compatível com o estabelecimento em viveiro, devido à reação levemente ácida e à baixa carga salina. Essas condições reduzem fontes de estresse abiótico associadas à salinidade e favorecem absorção hídrica e nutricional estáveis, o que fornece uma base consistente para interpretar a resposta das mudas aos tratamentos.

Tabela 4 – Caracterização físico-química inicial do substrato e manejo hídrico durante o ensaio
Table 4 – Initial physicochemical characterization of the substrate and irrigation management during the trial

Variável	Valor inicial	Unidade	Nota de manejo durante o ensaio
pH	6,1	adimensional	Manteve-se manejo uniforme entre tratamentos
Condutividade elétrica	9,1	mS/m	Irrigação manual com controle do estado hídrico
Matéria orgânica	3,3	%	Substrato úmido sem encharcamento
Nitrogênio total	2,5	mg/g	Irrigação manual e verificação periódica de umidade
Umidade	18,07	%	Manutenção de umidade estável sem saturação

Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

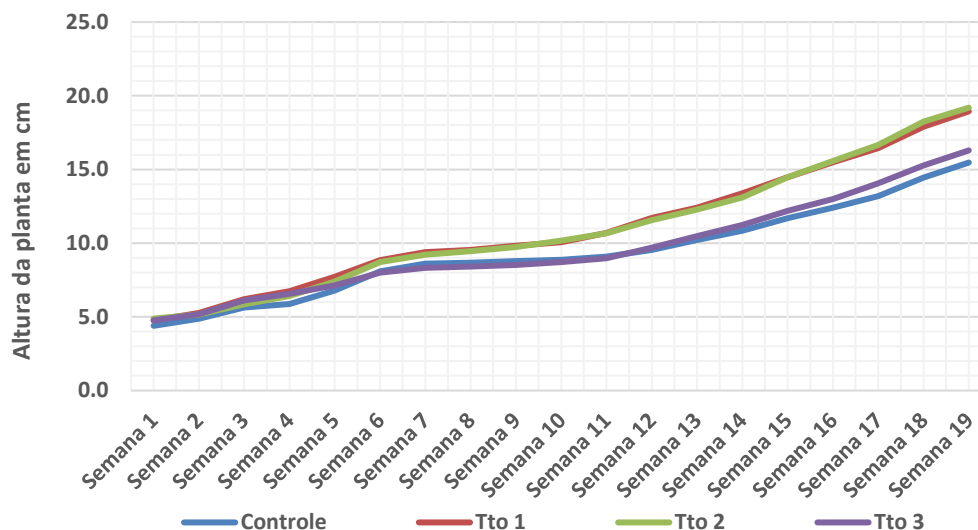
A Tabela 4 também indica uma base de fertilidade orgânica quantificável, com teor de matéria orgânica que contribui para a retenção de umidade e para a estabilidade estrutural do substrato em saco. Esse equilíbrio entre suporte físico e aporte nutricional sustenta um ambiente radicular funcional e permite associar variações posteriores em altura, diâmetro, biomassa e condição foliar ao nível de dose aplicado, sem confundi-las com diferenças por enriquecimento inicial do meio.

Por fim, o controle hídrico descrito reforça a comparabilidade experimental ao manter condições de umidade sem saturação e, portanto, com aeração adequada para as raízes. Esse controle operacional reduz a variação entre unidades por disponibilidade de água e fortalece a atribuição dos efeitos observados à inoculação e à dose, e não a diferenças não controladas do substrato ou do manejo.

3.2 Altura da planta

A Figura 1 mostra uma curva de crescimento sustentada para a altura da planta em todos os tratamentos ao longo das avaliações. Observa-se também um padrão de separação progressiva entre as curvas conforme avançam as semanas.

Figura 1 – Curva de crescimento (altura da planta em cm) em função da dose de *T. harzianum* em *P. radiata*
Figure 1 - Growth curve (plant height, cm) by *T. harzianum* dose in *P. radiata*

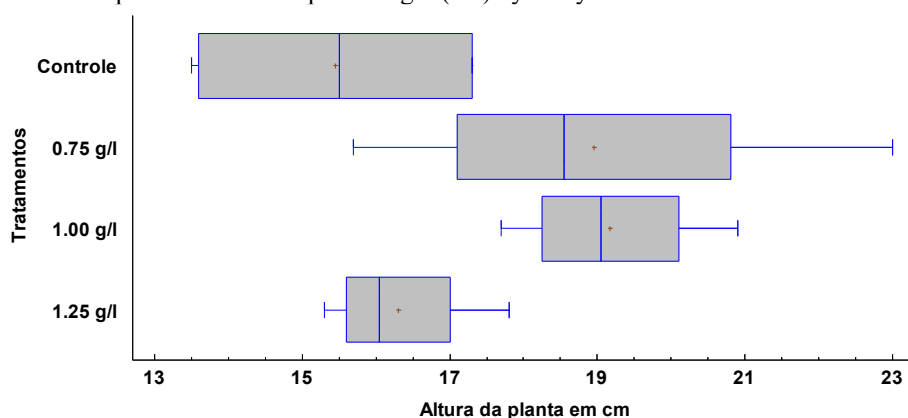


Fonte: Elaborado pelos autores
Source: Prepared by the authors

Os tratamentos com 0,75 g/L e 1,00 g/L apresentam a maior inclinação desde a fase inicial e mantêm a vantagem até o encerramento, o que indica efeito de bioestimulação consistente quando a dose se situa em faixa intermediária. No trecho final, 1,00 g/L atinge a maior altura média (19,2 cm), seguido de 0,75 g/L (18,9 cm), com incrementos claros em relação ao controle. Ao final, 1,00 g/L e 0,75 g/L superam o controle em cerca de 3,7 cm e 3,5 cm, equivalentes a aumentos próximos de 24% e 22%, respectivamente. Esse diferencial se acumula semana a semana, o que reforça a consistência do efeito. Em contraste, 1,25 g/L apresenta resposta distinta. A curva se alinha ao controle no período intermediário e fica abaixo entre as semanas 6 e 11, recupera vantagem no final, mas permanece distante do desempenho de 0,75 e 1,00 g/L.

A Figura 2 resume a resposta em altura por meio de distribuições por tratamento, permitindo comparar tendência central, variabilidade e valores extremos entre as doses.

Figura 2 – Gráfico de caixas e bigodes da altura da planta (cm) de *P. radiata*, de acordo com os tratamentos em estudo
Figure 2 - Box-and-whisker plot of *P. radiata* plant height (cm) by study treatment



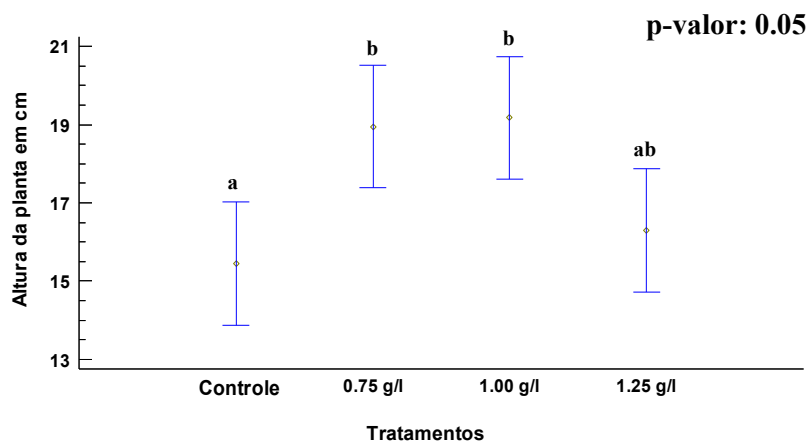
Fonte: Elaborado pelos autores
 Source: Prepared by the authors

O padrão geral mostra deslocamento para maiores alturas nas doses intermediárias, com separação clara em relação ao controle e à dose mais alta. Os tratamentos 0,75 g/L e 1,00 g/L concentram valores em faixas superiores às do controle. A dose de 1,00 g/L se destaca por combinar maior altura central com menor dispersão, o que sugere resposta mais uniforme entre unidades experimentais. Já 0,75 g/L mantém tendência elevada, mas com maior amplitude e extremo superior mais estendido, indicando maior heterogeneidade intratratamento. Por sua vez, 1,25 g/L agrupa valores mais baixos e com faixa mais estreita, com menor representação de alturas elevadas. Esse comportamento reforça uma resposta não linear ao aumento de dose, com melhor desempenho no intervalo intermediário e atenuação do efeito em doses superiores.

A Figura 3 indica que o fator dose de *Trichoderma harzianum* não apresentou efeito estatisticamente detectável sobre a altura final de *Pinus radiata* sob o critério adotado, pois o p-valor ficou próximo do limiar de significância (0,05).

Figura 3 – Análise de variância e teste de Tukey, para determinar o efeito da aplicação de doses de *T. harzianum* sobre a altura da planta de *P. radiata*

Figure 3 - Analysis of variance and Tukey's test to determine the effect of *T. harzianum* dose on *P. radiata* plant height

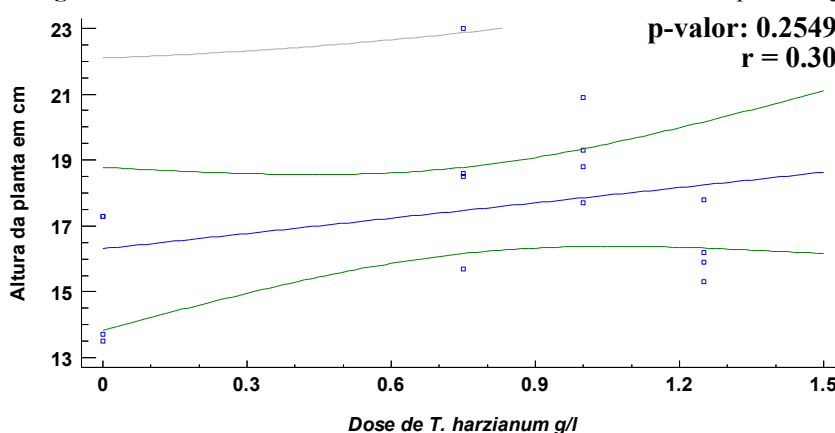


Fonte: Elaborado pelos autores
 Source: Prepared by the authors

Ainda assim, o teste de Tukey evidencia diferenciação consistente entre o controle e as doses intermediárias, o que sustenta influência do tratamento sobre a altura da planta e não apenas variação esperada entre unidades. O controle se posiciona no subconjunto “a”, enquanto 0,75 g/L e 1,00 g/L se agrupam em “b”, indicando maior altura nessas doses em relação ao controle. A dose de 1,25 g/L se classifica no subconjunto intermediário “ab”, refletindo sobreposição com ambos os extremos e ausência de separação conclusiva frente ao controle e às doses intermediárias. As barras de dispersão mostram que, apesar da variabilidade entre mudas, as doses intermediárias mantêm tendência central superior. Esse padrão orienta a seleção de dose para níveis que maximizem altura, sem pressupor que incrementos adicionais de concentração sustentem o ganho.

A Figura 4 avalia a relação entre as doses de *T. harzianum* e a altura da planta. O ajuste linear mostra inclinação positiva discreta, com associação baixa ($r = 0,30$) e sem evidência estatística de relação linear ($p = 0,2549$).

Figura 4 – Correlação das doses de *T. harzianum* com a altura da planta de *P. radiata*
Figure 4 - Correlation between *T. harzianum* dose and *P. radiata* plant height



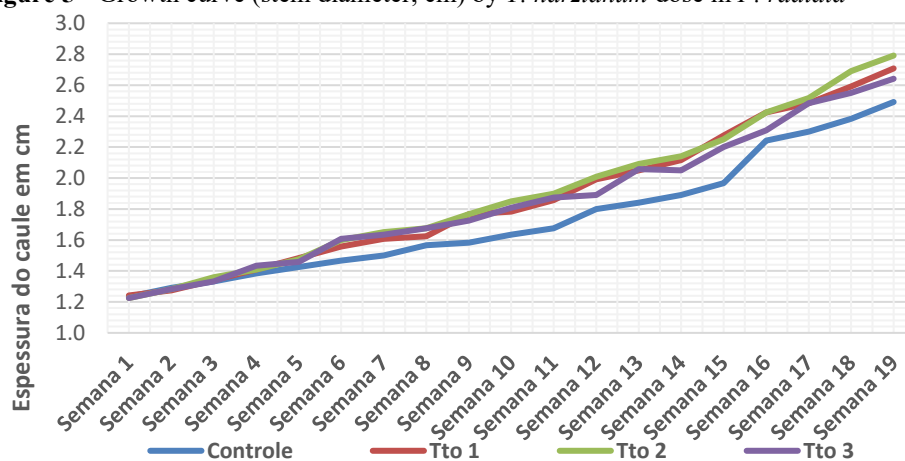
Fonte: Elaborado pelos autores
 Source: Prepared by the authors

Em termos de ajuste, o componente linear explica fração reduzida da variação observada em altura ($R^2 = 0,09$), indicando que a dispersão intradose domina sobre a mudança média esperada por incremento de dose. A distribuição de pontos por níveis discretos e a sobreposição entre faixas sugerem resposta não monotônica, na qual o desempenho não progride de forma proporcional à dose. Assim, a Figura 4 indica que a interpretação do efeito em altura deve se basear em contrastes entre tratamentos e em modelos que capturem curvatura ou limiares, coerentes com o melhor desempenho no intervalo intermediário observado nas figuras comparativas.

3.3 Diâmetro do colo

A Figura 5 evidencia ganho progressivo do diâmetro do colo em todos os tratamentos durante a fase de viveiro, confirmando processo contínuo de engrossamento ao longo do acompanhamento.

Figura 5 – Curva de crescimento (diâmetro do colo em cm) em função da dose de *T. harzianum* em *P. radiata*
Figure 5 - Growth curve (stem diameter, cm) by *T. harzianum* dose in *P. radiata*

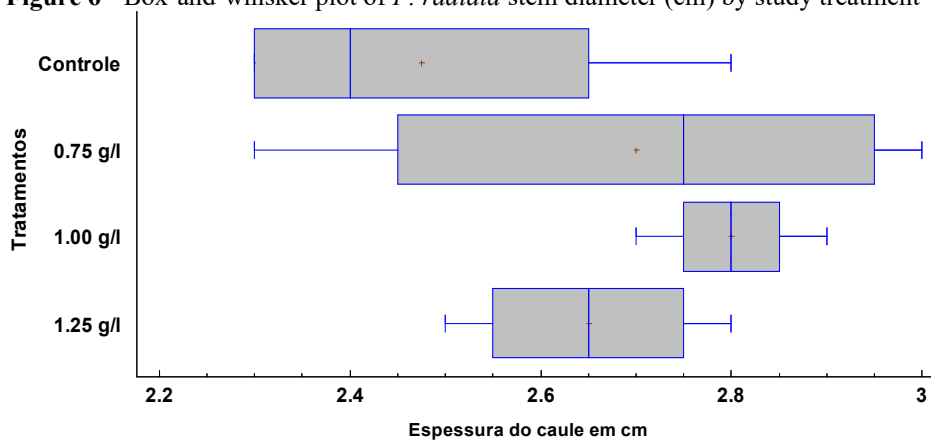


Fonte: Elaborado pelos autores
 Source: Prepared by the authors

No trecho inicial, as faixas permanecem próximas, o que sugere condições comparáveis de estabelecimento e permite interpretar divergências posteriores como efeito do nível de dose. Na fase intermediária e final, as doses de 0,75 g/L e 1,00 g/L mantêm valores superiores ao controle e preservam vantagem até o encerramento. Esse padrão indica incremento de vigor estrutural, com efeito acumulado no tempo e expressão como maior diâmetro médio, aspecto relevante para a qualidade da muda e o desempenho esperado no transplântio. A dose de 1,25 g/L não amplia o engrossamento na mesma magnitude e tende a permanecer em faixa intermediária ao final do período. A figura sustenta, assim, uma resposta não linear do diâmetro do colo à dose, com maior benefício no intervalo intermediário e sem ganho adicional ao elevar a concentração.

A Figura 6 compara a distribuição do diâmetro do colo entre tratamentos por gráfico de caixas e bigodes, permitindo avaliar tendência central, dispersão e valores extremos, elementos relevantes para discutir vigor estrutural e uniformidade da muda sob cada dose.

Figura 6 – Gráfico de caixas e bigodes do diâmetro do colo (cm) de *P. radiata*, de acordo com os tratamentos
Figure 6 - Box-and-whisker plot of *P. radiata* stem diameter (cm) by study treatment



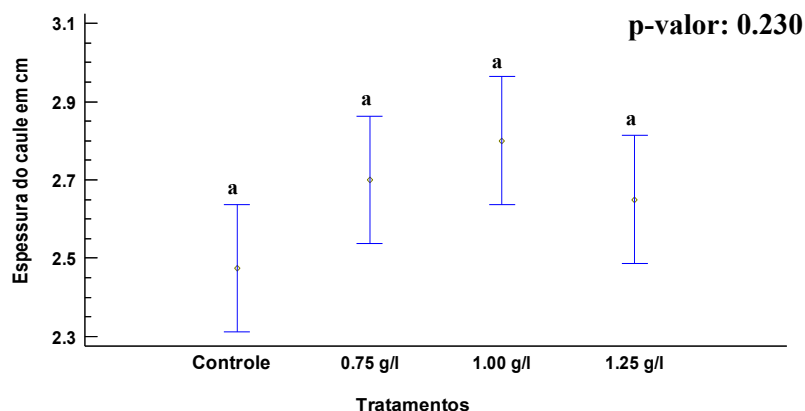
Fonte: Elaborado pelos autores
 Source: Prepared by the authors

As doses intermediárias deslocam o diâmetro para valores maiores em relação ao controle. O tratamento 1,00 g/L se destaca por combinar centro elevado com intervalo interquartil estreito, descrevendo resposta mais consistente entre unidades. O tratamento 0,75 g/L se posiciona em faixa superior, mas com maior amplitude, sugerindo heterogeneidade intratratamento e presença de mudas com diâmetro elevado junto de outras próximas ao valor médio. O tratamento 1,25 g/L agrupa valores abaixo das doses intermediárias e apresenta sobreposição com o controle. Esse comportamento indica separação limitada entre grupos para essa variável, apesar do deslocamento observado na tendência central, e reforça que a consistência de resposta diferencia com mais clareza a dose de 1,00 g/L.

A Figura 7 mostra que a dose de *T. harzianum* não altera de forma estatisticamente detectável o diâmetro do colo sob o critério adotado, com $p = 0,230$, o que indica que a variação entre tratamentos permanece dentro do esperado pela variabilidade entre unidades experimentais.

Figura 7 – Análise de variância e teste de Tukey, para determinar o efeito da aplicação de doses de *T. harzianum* sobre o diâmetro do colo de *P. radiata*

Figure 7 - Analysis of variance and Tukey's test to determine the effect of *T. harzianum* dose on *P. radiata* stem diameter

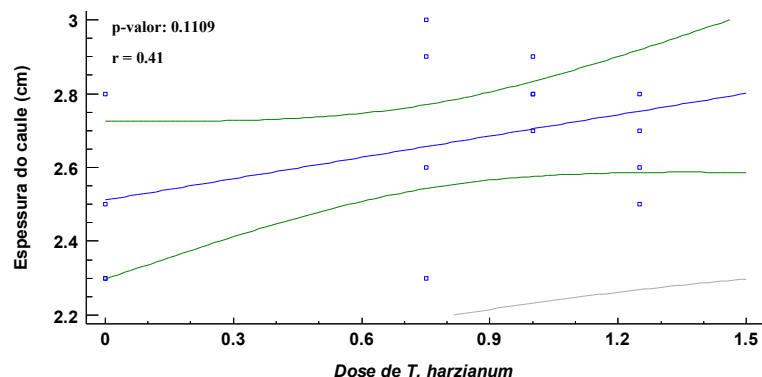


Fonte: Elaborado pelos autores
Source: Prepared by the authors

O teste de Tukey reforça esse comportamento. A Figura 7 indica todos os tratamentos no mesmo subconjunto “a” (Controle, 0,75 g/L, 1,00 g/L e 1,25 g/L), confirmando ausência de separação estatística entre médias, ainda que existam diferenças numéricas, nas quais 0,75 g/L e 1,00 g/L apresentaram os maiores valores médios. Em termos biológicos e operacionais, a Figura 7 sugere que o engrossamento do colo se manteve estável ao longo do gradiente de dose no período avaliado. Assim, essa variável tem capacidade limitada para discriminar a dose ótima e sua interpretação deve ser integrada aos padrões de distribuição e tendência observados nas figuras descritivas e às variáveis de saída que representem melhor o desempenho global da muda.

A Figura 8 analisa o diâmetro do colo como resposta contínua ao gradiente de dose de *T. harzianum*.

Figura 8 – Correlação das doses de *T. harzianum* com o diâmetro do colo de *P. radiata*
Figure 8 - Correlation between *T. harzianum* dose and *P. radiata* stem diameter



Fonte: Elaborado pelos autores
Source: Prepared by the authors

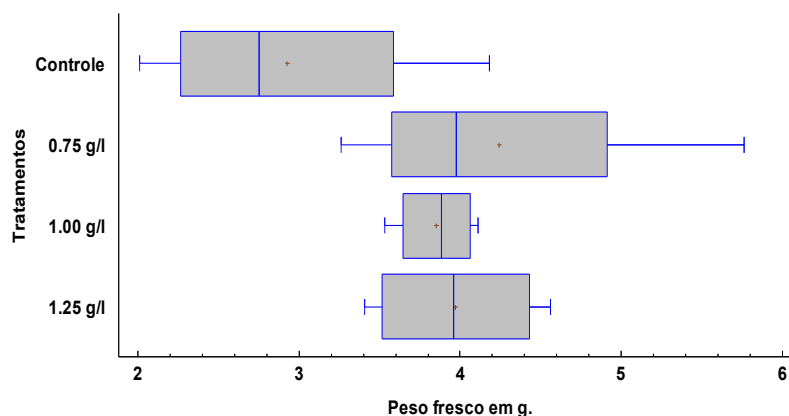
O ajuste linear indica associação positiva fraca, com $r = 0,23$ e $p = 0,1109$, sem significância estatística sob o critério adotado. Em termos explicativos, o componente linear representa fração reduzida da variação do diâmetro, com R^2 próximo de 0,05, indicando que a mudança média por incremento de dose é pequena frente à dispersão observada.

A distribuição de pontos mostra sobreposição entre níveis de dose e variação interna ampla, o que limita a detecção de gradiente proporcional. A figura sugere sinal incipiente de engrossamento associado ao aumento de dose, mais coerente com melhoria gradual do que com mudança marcada entre níveis. Portanto, a interpretação do diâmetro do colo deve se apoiar em contrastes por tratamento e na consistência de resposta, evitando extrapolar efeito linear sem sustentação estatística.

3.4 Massa fresca

A Figura 9 evidencia incremento da massa fresca nos tratamentos com *Trichoderma* em relação ao controle, com deslocamento consistente das distribuições para valores superiores.

Figura 9 – Gráfico de caixas e bigodes do peso fresco (g) de *P. radiata*, de acordo com os tratamentos em estudo
Figure 9 - Box-and-whisker plot of *P. radiata* fresh weight (g) by study treatment



Fonte: Elaborado pelos autores
Source: Prepared by the authors

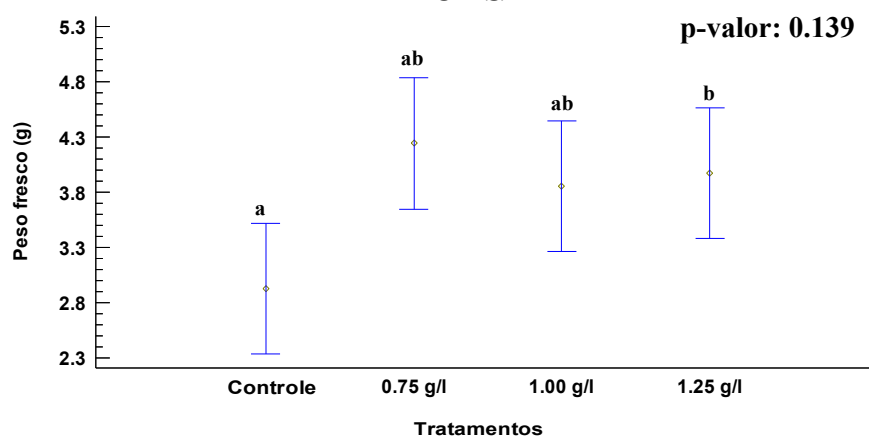
O controle se concentra na faixa inferior e apresenta dispersão apreciável, indicando menor acúmulo de massa fresca e maior variação entre unidades sem inoculação. A dose de 0,75 g/L apresenta o maior valor central e extremo superior mais estendido, com intervalo interquartil mais amplo, o que sugere maior potencial de ganho em massa fresca, porém com heterogeneidade intratratamento. A dose de 1,00 g/L exibe intervalo interquartil mais estreito, indicando resposta mais uniforme. A dose de 1,25 g/L mantém desempenho superior ao controle, com dispersão moderada e sobreposição parcial com as doses intermediárias.

Os resultados indicam que a inoculação com *T. harzianum* aumenta a massa fresca da muda e que a resposta não progride de forma proporcional com o aumento de dose. O padrão concentra o benefício no intervalo intermediário e sugere nível operacional favorável para maximizar massa fresca com maior consistência de resposta.

A Figura 10 indica que o efeito global da dose sobre a massa fresca não alcança significância estatística sob o critério adotado, com $p = 0,139$.

Figura 10 – Análise de variância e teste de Tukey, para determinar o efeito da aplicação de doses de *T. harzianum* sobre o peso fresco (g) de *P. radiata*

Figure 10 - Analysis of variance and Tukey's test to determine the effect of *T. harzianum* dose on *P. radiata* fresh weight (g)



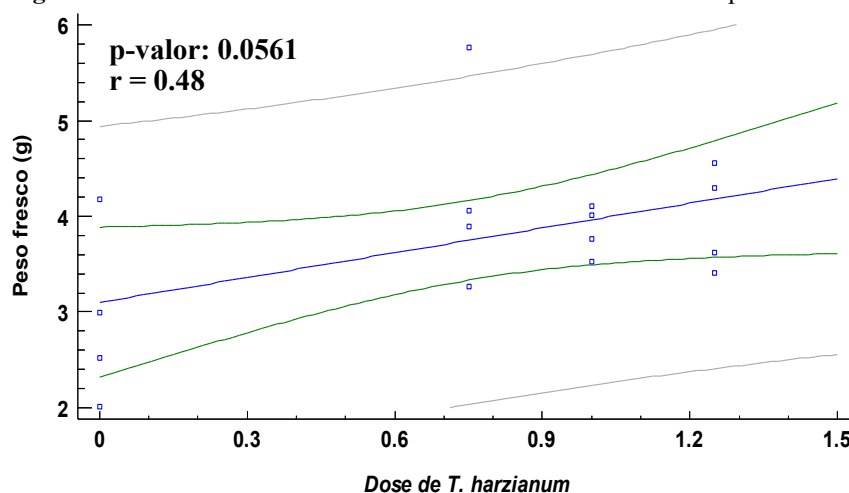
Fonte: Elaborado pelos autores

Source: Prepared by the authors

Na comparação múltipla, o controle se classifica no subconjunto “a”, enquanto 1,25 g/L se classifica em “b”. As doses 0,75 g/L e 1,00 g/L se posicionam em “ab”, evidenciando sobreposição com ambos os extremos e explicando a ausência de separação consistente entre todos os níveis. Esse padrão indica que as diferenças se concentram entre os tratamentos extremos, enquanto os níveis intermediários não se distinguem de forma conclusiva do controle nem do tratamento superior. O resultado é coerente com resposta direcional da massa fresca, na qual a tendência de aumento existe, mas a variabilidade entre unidades limita a capacidade de discriminar todos os contrastes. Esse achado complementa a Figura 9 ao sustentar que a resposta se expressa como deslocamento de distribuições e sobreposição entre grupos, e não como separação uniforme ao longo do gradiente de dose.

A Figura 11 avalia a massa fresca como resposta contínua ao gradiente de dose de *T. harzianum*. O ajuste linear mostra associação positiva de magnitude moderada, com $r = 0,48$ e $p = 0,0561$.

Figura 11 – Correlação das doses de *T. harzianum* com o peso fresco da planta de *P. radiata*
Figure 11 - Correlation between *T. harzianum* dose and *P. radiata* plant fresh weight



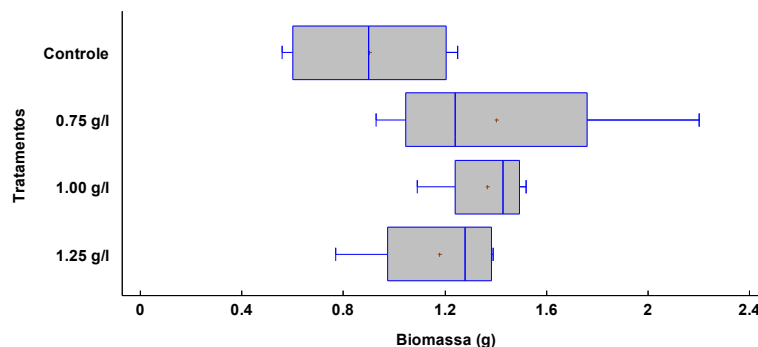
Fonte: Elaborado pelos autores
Source: Prepared by the authors

Em termos explicativos, essa relação linear representa $R^2 = 0,23$, indicando que a dose explica fração limitada da variabilidade observada, enquanto o restante se associa à variação entre unidades. A dispersão e a sobreposição entre níveis de dose indicam que o padrão não sustenta relação linear conclusiva no limiar adotado, ainda que a tendência se aproxime desse critério. Assim, a Figura 11 sustenta um sinal direcional de aumento da massa fresca com a dose, que deve ser interpretado em conjunto com as comparações por tratamento, nas quais a mudança aparece como deslocamento de distribuições e sobreposição entre grupos.

3.5 Biomassa

A Figura 12 mostra deslocamento da biomassa para valores maiores nos tratamentos com *T. harzianum* em relação ao controle. O controle concentra a distribuição na faixa inferior, descrevendo menor acúmulo de biomassa sem inoculação.

Figura 12 – Gráfico de caixas e bigodes da biomassa (g) de *P. radiata*, de acordo com os tratamentos em estudo
Figure 12 - Box-and-whisker plot of *P. radiata* biomass (g) by study treatment

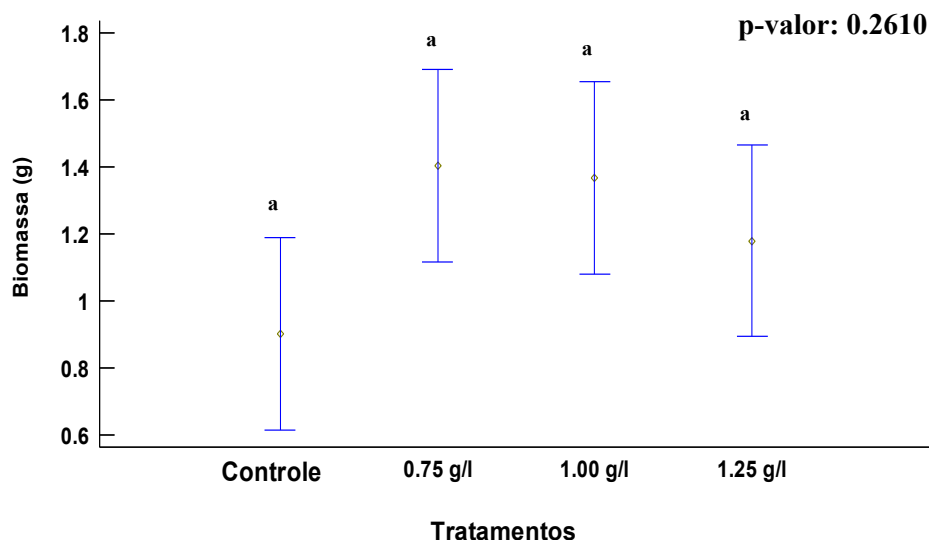


Fonte: Elaborado pelos autores
Source: Prepared by the authors

O tratamento 0,75 g/L apresenta o maior valor central e intervalo interquartil mais amplo, com extremo superior estendido, indicando maior biomassa em parte das unidades, associada a variação interna marcada. Em contraste, 1,00 g/L exibe intervalo interquartil mais estreito, sugerindo resposta mais uniforme. A dose de 1,25 g/L se posiciona em nível intermediário e mostra sobreposição com o controle e com 1,00 g/L. O padrão sugere que o maior deslocamento de biomassa ocorre no intervalo intermediário de doses, com diferença relevante entre tratamentos quanto à consistência de resposta.

A Figura 13 indica que a dose de *T. harzianum* não gerou diferenças estatisticamente detectáveis na biomassa de *P. radiata* sob o critério adotado, com $p = 0,2610$.

Figura 13 – Análise de variância e teste de Tukey, para determinar o efeito da aplicação de doses de *T. harzianum* sobre a biomassa (g) de *P. radiata*
Figure 13 - Analysis of variance and Tukey's test to determine the effect of *T. harzianum* dose on *P. radiata* biomass (g)

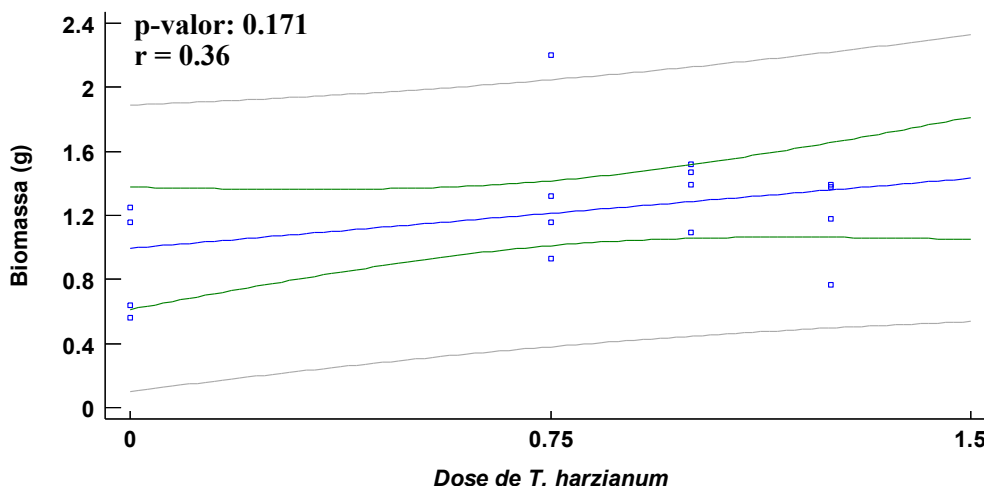


Fonte: Elaborado pelos autores
Source: Prepared by the authors

Esse resultado indica que a variação entre tratamentos permanece dentro do esperado pela dispersão entre unidades experimentais. O teste de Tukey reforça essa interpretação, com todos os tratamentos no mesmo subconjunto “a” para biomassa, confirmando ausência de diferença estatística entre tratamentos, embora 0,75 g/L e 1,00 g/L tenham apresentado os maiores valores numéricos. Na prática, a biomassa não discrimina com clareza o efeito da dose neste conjunto de dados, ainda que existam diferenças descritivas nas distribuições. A amplitude das barras de dispersão indica variabilidade relevante dentro de cada tratamento, com forte sobreposição entre intervalos. Esse padrão sugere resposta heterogênea da biomassa por unidade experimental, na qual mudanças entre doses não se expressam como deslocamento consistente da média, e sim como diferenças pontuais diluídas na variação interna dos grupos.

A Figura 14 avalia a biomassa como resposta contínua ao gradiente de dose de *T. harzianum*. O ajuste linear indica associação positiva moderada, com $r = 0,36$ e $p = 0,171$, sem evidência de relação linear estatisticamente detectável no limiar adotado.

Figura 14 – Correlação das doses de *T. harzianum* com a biomassa (g) da planta de *P. radiata*
Figure 14 - Correlation between *T. harzianum* dose and *P. radiata* plant biomass (g)



Fonte: Elaborado pelos autores
 Source: Prepared by the authors

Em capacidade explicativa, o componente linear representa $R^2 = 0,13$, indicando que a dose explica fração limitada da variação total de biomassa. A nuvem de pontos apresenta dispersão ampla e sobreposição entre níveis de dose, com valores altos e baixos presentes em mais de um nível. Esse padrão sugere que a resposta em biomassa não progride de forma proporcional com a dose e que a variabilidade entre unidades domina a mudança média esperada ao aumentar a concentração. Esse comportamento é consistente com a Figura 13, na qual todos os tratamentos se agrupam no subconjunto “a” e o teste não separa médias entre doses. Assim, a Figura 14 acrescenta uma leitura direcional do gradiente, mas a evidência não sustenta efeito linear robusto da dose sobre a biomassa.

4. Discussão

A interpretação do efeito de *Trichoderma harzianum* sobre os parâmetros avaliados em viveiro se expressa nos padrões temporais, que evidenciam o comportamento e a dinâmica de resposta; as curvas de altura da planta (Figura 1) e de diâmetro do colo (Figura 5) mostram separação progressiva entre tratamentos, com divergências mais nítidas após o estabelecimento (20 semanas de acompanhamento) (Kang et al., 2024). Essa sequência é compatível com colonização na rizosfera e ajuste fisiológico gradual, em que o sinal do bioinsumo se acumula ao longo do tempo, e não como mudança pontual (aplicações a cada 15 dias, 100 mL por muda) (Chávez et al., 2014). A perda de vantagem observada para a dose mais alta em parte do período, na Figura 1 (1,25 g/L abaixo entre as semanas 6 e 11), sugere resposta não monotônica, coerente com sistemas biológicos em que o aumento do inóculo não gera ganhos proporcionais e, em determinados intervalos, atenua o benefício (Cerón et al., 2024).

Para altura, a evidência converge para melhor desempenho em doses intermediárias. A separação das curvas na Figura 1 e o deslocamento das distribuições na Figura 2 sustentam melhoria consistente com 0,75 e 1,00 g/L em relação ao controle (1,00 g/L: 19,2 cm; 0,75 g/L: 18,9 cm; ganhos vs. controle: 3,7 cm e 3,5 cm, equivalentes a 24% e 22%) (Aday Kaya & Karaman, 2023). O contraste inferencial na Figura 3 posiciona o resultado próximo ao limiar de significância, com agrupamentos de Tukey que separam o controle do intervalo intermediário (controle em “a”; 0,75 e 1,00 g/L em “b”; 1,25 g/L em “ab”), sugerindo efeito real, com potência

limitada pela variabilidade intratratamento (Singh & Chittenden, 2021). A Figura 4 reforça leitura de resposta não linear ao mostrar baixa capacidade explicativa do ajuste linear ($r = 0,30$; $p = 0,2549$; $R^2 = 0,09$); assim, a seleção de dose se sustenta mais em comparações entre níveis do que em extrapolação ao longo do gradiente (Chávez et al., 2014). Do ponto de vista fisiológico, esse comportamento se alinha a mecanismos descritos para *Trichoderma* em viveiro, como estimulação hormonal e melhoria na aquisição de nutrientes por alterações na rizosfera, com uma faixa de dose em que a interação fungo, raiz e substrato atinge equilíbrio funcional; fora dessa faixa, o sistema tende à saturação ou a custos de competição microbiana, com menor retorno em crescimento (Donoso et al., 2008; Harbawi et al., 2021).

Para diâmetro do colo, existe tendência, mas a inferência não confirma separação robusta entre médias; a trajetória na Figura 5 e a comparação de dispersão na Figura 6 posicionam 1,00 g/L com maior uniformidade e 0,75 g/L com maior amplitude, aspecto relevante em viveiro, onde a homogeneidade do lote tem peso semelhante ao valor médio (Pashkeeva et al., 2021). Ainda assim, ANOVA e Tukey na Figura 7 não distinguem tratamentos ($p = 0,230$; médias no mesmo grupo “a”), o que sugere menor sensibilidade do engrossamento no período avaliado, ou um padrão de alocação de carbono que priorizou elongação antes do incremento estrutural (L. Wang et al., 2020). A Figura 8 indica associação linear fraca e não significativa ($r = 0,41$; $p = 0,1109$; $R^2 \approx 0,05$), reforçando que, para a variável diâmetro, outros fatores intervêm e interagem com a dose, modulando o comportamento observado (Singh & Chittenden, 2021). Em termos de qualidade de muda, a evidência indica que a altura concentra o principal sinal do tratamento neste ciclo, enquanto o diâmetro exige mais tempo, maior n , ou métricas derivadas, como relações morfológicas ou resistência mecânica, para captar diferenças com maior precisão (Salem et al., 2019).

As variáveis de massa fornecem sinais complementares, com papel central da variabilidade interna; para massa fresca, a Figura 9 mostra deslocamento para valores maiores nos tratamentos com inoculação, com diferenças de consistência entre 0,75 e 1,00 g/L (Arifin et al., 2019). O contraste inferencial na Figura 10 detecta separação entre extremos, com controle e 1,25 g/L em subconjuntos distintos ($p = 0,139$; controle em “a”; 1,25 g/L em “b”; 0,75 e 1,00 g/L em “ab”), e doses intermediárias com sobreposição, padrão típico de efeitos moderados sob dispersão elevada (L.-X. Wang et al., 2019). A Figura 11 apresenta tendência positiva próxima ao limiar ($r = 0,48$; $p = 0,0561$; $R^2 = 0,23$), indicando sinal direcional que não alcança confirmação estatística no critério aplicado (Wei et al., 2017). Em termos produtivos, isso sugere que o bioinsumo favoreceu acúmulo de massa fresca, mas o componente hídrico do tecido e a heterogeneidade entre mudas reduziram a capacidade de discriminar todos os contrastes (Terzi et al., 2016). Em estudos de viveiro, esse resultado tende a se fortalecer quando se incorpora massa seca e partição parte aérea, raiz, pois a massa fresca integra água e pode amplificar variação por pequenas diferenças de hidratação no momento da amostragem (Singh & Chittenden, 2021).

Para biomassa, a evidência repete o padrão de tendência sem separação estatística, com alta sobreposição entre tratamentos; a Figura 12 sugere maior biomassa no intervalo intermediário, com 1,00 g/L mais uniforme e 0,75 g/L mais disperso, coerente com os padrões observados para altura e diâmetro (Chen et al., 2025). ANOVA e Tukey na Figura 13 não diferenciam médias ($p = 0,2610$; médias no mesmo grupo “a”), indicando que a variação intratratamento dominou o contraste entre níveis. A leitura por gradiente na Figura 14 mostra associação moderada e não significativa ($r = 0,36$; $p = 0,171$; $R^2 = 0,13$), reforçando a não linearidade e a capacidade limitada do modelo linear em representar a resposta (Kang et al., 2024; Xue et al., 2025). Esse conjunto de resultados sugere dois pontos. Primeiro, o efeito do tratamento se expressa mais como mudanças de distribuição e consistência do que como deslocamentos líquidos de média. Segundo, o tamanho amostral e a heterogeneidade de crescimento entre unidades, mesmo sob DBCA, reduzem a potência para detectar diferenças em variáveis integrativas ao encerramento do ensaio (Afrouz et al., 2023).

Ao integrar a evidência, o intervalo intermediário emerge como o mais eficiente para melhorar o desempenho morfofisiológico sem efeito de sobredosagem. A leitura conjunta das Figuras 1 a 4 indica melhor resposta em altura com 0,75 e 1,00 g/L, enquanto as Figuras 5 a 8 e os boxplots da Figura 6 sustentam maior

uniformidade com 1,00 g/L para diâmetro (Sala et al., 2020; Subedi & Baysal-Gurel, 2025). Para massa, as Figuras 9 a 11 e as Figuras 12 a 14 sustentam sinal positivo com dispersão, em que 1,00 g/L tende a combinar desempenho com menor variabilidade. Em viveiro, essa consistência tem valor por reduzir descarte de mudas fora de padrão e facilitar o planejamento de saída (Enchill et al., 2026). Em paralelo, a não linearidade observada nas Figuras 4, 8, 11 e 14 sustenta recomendação baseada em níveis discretos, e não em incrementos contínuos de dose (Kumar et al., 2025).

Esses achados sustentam critério operacional de seleção de dose centrado em eficiência e controle de variabilidade, com prioridade para 1,00 g/L como ponto de melhor equilíbrio entre ganho e uniformidade, e 0,75 g/L como alternativa com alta resposta média, porém com maior dispersão, conforme as Figuras 2, 6, 9 e 12 (Afrouz et al., 2023; Singh & Chittenden, 2021). Para fortalecer a contribuição ao manejo florestal sustentável, o próximo passo consiste em validar se as melhorias morfológicas se traduzem em desempenho pós-transplântio, e em incorporar métricas radiculares e sanitárias que conectem o efeito bioestimulante à resiliência frente a patógenos e estresse, sob as mesmas condições de substrato descritas na Tabela 4 (Chávez et al., 2014).

5. Conclusão

Os resultados do ensaio em viveiro indicam melhoria do crescimento inicial de *Pinus radiata* com inoculação de *Trichoderma harzianum* em doses intermediárias. A dose de 1,00 g/L alcançou a maior altura (19,2 cm) e superou o controle em 3,7 cm, equivalente a 24%. A ANOVA posicionou o efeito no limiar de significância ($p = 0,05$) e o teste de Tukey separou o controle (a) das doses de 0,75 e 1,00 g/L (b). A dose de 1,25 g/L permaneceu em grupo intermediário (ab). Esse padrão descreve resposta não linear, sem ganho adicional com 1,25 g/L.

O diâmetro do colo não apresentou diferenças ($p = 0,230$, médias em a), sugerindo estabilidade do engrossamento no período avaliado. A massa fresca apresentou sinal de incremento ($p = 0,139$), com o controle em a e 1,25 g/L em b. Para biomassa total, não se observou separação ($p = 0,261$, médias em a). O ganho em altura se associa a um padrão de crescimento ao longo do tempo, e não a aumento consistente de massa.

Para decisão operacional, 1,00 g/L oferece o melhor equilíbrio entre resposta e consistência e se configura como dose recomendada em viveiro. O próximo passo exige validação no pós-transplântio, com massa seca, arquitetura radicular e colonização do substrato. Uma avaliação sanitária, com incidência de podridões e sobrevivência pós-transplântio, deve completar a evidência de desempenho.

Análise de custo por muda e ensaios sob gradientes de umidade e fertilização devem reforçar a reprodutibilidade e a transferência para escala comercial. O protocolo deve padronizar a viabilidade do inóculo, o método e a frequência de aplicação, com registro de temperatura e condutividade.

6. Referências

- Aday Kaya, A. G., & Karaman, A. (2023). Occurrence of fungi, with emphasis on *Diplodia pinea*, in pine seeds from forest nurseries of Turkey. **Kuwait Journal of Science**, 50(2), 1-4. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.02.001>
- Afrouz, M., Sayyed, R. Z., Fazeli-Nasab, B., Piri, R., Almalki, W. H., & Fitriatin, B. N. (2023). Seed bio-priming with beneficial *Trichoderma harzianum* alleviates cold stress in maize. **PeerJ**, 11. <https://doi.org/10.7717/peerj.15644>
- Ahumada, R., & Rotella, A. (2020). Disease Management in the Forest Plantations in Chile. En Forest Pest and Disease Management in Latin America: Modern Perspectives in Natural Forests and Exotic Plantations

(pp. 171-184). **Springer International Publishing**; Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35143-4_11

Aragónés, A., Manzanos, T., Stanosz, G., Munck, I. A., Raposo, R., Elvira-Recuenco, M., Berbegal, M., Mesanza, N., Smith, D. R., Simmons, M., Wyka, S., & Iturrirxa, E. (2021). Comparison of diplodia tip blight pathogens in spanish and north american pine ecosystems. **Microorganisms**, 9(12). Scopus. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9122565>

Arifin, S., Ilham, M., & Sutarman. (2019). The Biocontrol Ability Test of *Trichoderma harzianum* Toward Damping off Disease on Soybean Seedlings. **J. Phys. Conf. Ser.**, 1232(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1232/1/012045>

Berbegal, M., Landeras, E., Sánchez, D., Abad-Campos, P., Pérez-Sierra, A., & Armengol, J. (2015). Evaluation of *Pinus radiata* seed treatments to control *Fusarium circinatum*: Effects on seed emergence and disease incidence. **Forest Pathology**, 45(6), 525-533. Scopus. <https://doi.org/10.1111/efp.12204>

Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G., & Segura-Araya, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). **Revista Tecnología en Marcha**, 30(4), 15-27. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>

Carnegie, A. J., & Kathuria, A. (2022). Efficacy of cuprous oxide for control of dothistroma needle blight in *Pinus radiata* plantations in Australia. **Australian Forestry**, 85(4), 178-186. Scopus. <https://doi.org/10.1080/00049158.2022.2145044>

Castillo-Vera, H., Cochachin, E., & Albán-Castillo, J. (2023). Ethnobotany of Asteraceae family at the jalca of the Cajabamba province, Cajamarca, Peru. **Caldasia**, 45(2), 238-250. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v45n2.94989>

Castro, J. A., Westermeyer, J. C. B., Di Bartolo, C., & Castillo, C. D. (2015). Assessment of residual bovine leather from footwear manufacturing as sustainable strategy for industrial processing of *Pinus radiata* boards in Bio-Bio, Chile. **Interciencia**, 40(2), 138-144.

Cerón, M. A. O., Acosta, E. H., Díaz, S. E. G., & Morales, A. V. (2024). Biological control of *Fusarium circinatum* Nirenberg & O'Donnell 1998 with *Trichoderma harzianum* Rifai 1969 in *Pinus devoniana* Lindl. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**, 15(83), 107-130. Scopus. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i83.1446>

Cerqueira, A., Alves, A., Berenguer, H., Correia, B., Gómez-Cadenas, A., Diez, J. J., Monteiro, P., & Pinto, G. (2017). Phosphite shifts physiological and hormonal profile of Monterey pine and delays *Fusarium circinatum* progression. **Plant Physiology and Biochemistry**, 114, 88-99. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.02.020>

Chávez, D., Pereira, G., & Machuca, A. (2014). Stimulation of *Pinus radiata* seedling growth using ectomycorrhizal and saprophytic fungi as biofertilizers. **Bosque**, 35(1), 57-63. Scopus. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000100006>

Chen, J., Ma, A., Du, Y., Li, Z., He, X., Lu, X., & Hao, X. (2025). Evaluating the efficacy and molecular mechanisms of the effects of *Trichoderma harzianum* T15 against *Bursaphelenchus xylophilus*. **Pest**

Management Science. <https://doi.org/10.1002/ps.70399>

Corvalán Vera, P. (2020). Consideraciones silvícolas para la producción de postes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Chile. **Revista Cubana de Ciencias Forestales**, 8(2), 375-391.

Dirección Regional de Agricultura. (2026). **Agencia Agraria Cajabamba**. <http://portal.agriculturacajamarca.gob.pe/agencias-agrarias/cajabamba>

Donoso, E., Lobos, G. A., & Rojas, N. (2008). Effect of *Trichoderma harzianum* and compost in nursery *Pinus radiata* seedling. **Bosque**, 29(1), 52-57. Scopus.

Du, E., Xia, N., Guo, Y., Tian, Y., Li, B., Liu, X., & De Vries, W. (2022). Ecological effects of nitrogen deposition on urban forests: an overview. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, 9(3), 445-456. Scopus. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2021429>

Enchill, P., Afful, B. A., Osei, M., Twum, S. A., Atuah, L., Oufensou, S., Balmas, V., Migheli, Q., Garau, M., & Castaldi, P. (2026). Influence of vermichar and *Trichoderma harzianum* in controlling Phytophthora palmivora infection and promoting cocoa seedling growth in soil and cocopeat. **Pest Management Science**, 82(2), 2090-2098. <https://doi.org/10.1002/ps.70351>

FAO. (2020). **Global Forest Resources Assessment 2020**. FAO; <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca8753en>

Fraser, S., Baker, M., Pearse, G., Todoroki, C. L., Estarija, H. J., Hood, I. A., Bulman, L. S., Somchit, C., & Rolando, C. A. (2022). Efficacy and optimal timing of low-volume aerial applications of copper fungicides for the control of red needle cast of pine. **New Zealand Journal of Forestry Science**, 52. Scopus. <https://doi.org/10.33494/nzjfs522022x211x>

Halleen, F., Fourie, P. H., & Crous, P. W. (2007). Control of black foot disease in grapevine nurseries. **Plant Pathology**, 56(4), 637-645. Scopus. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01613.x>

Harbawi, M. A., Albadrani, W. A., & Ghazal, R. A. (2021). The Effect of Fertilisation using *Trichoderma harzianum* and Cow Manure on Releasing CO₂ in Two Soils with Different Textures in North of Iraq. **Asian Journal of Water, Environment and Pollution**, 18(3), 117-122. <https://doi.org/10.3233/AJW210036>

Harman, G. E. (2006). Overview of mechanisms and uses of *Trichoderma* spp. **Phytopathology**, 96(2), 190-194. Scopus. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0190>

Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Parvin, K., Bhuiyan, T. F., Anee, T. I., Nahar, K., Hossen, M. S., Zulfiqar, F., Alam, M. M., & Fujita, M. (2020). Regulation of ros metabolism in plants under environmental stress: A review of recent experimental evidence. **International Journal of Molecular Sciences**, 21(22), 1-44. Scopus. <https://doi.org/10.3390/ijms21228695>

Hernandez-Escribano, L., Morales Clemente, M. T., Fariña-Flores, D., & Raposo, R. (2024). A delayed response in phytohormone signaling and production contributes to pine susceptibility to *Fusarium circinatum*. **BMC Plant Biology**, 24(1). Scopus. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05342-8>

Hohmann, P., Jones, E. E., Hill, R. A., & Stewart, A. (2011). Understanding *Trichoderma* in the root system

of *Pinus radiata*: Associations between rhizosphere colonisation and growth promotion for commercially grown seedlings. **Fungal Biology**, 115(8), 759-767. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2011.05.010>

Hu, Z., Wei, S., Li, W., Wu, T., Ullah, S., & Yang, M. (2024). Effect of Inoculation with Rhizosphere Phosphate-Solubilizing Bacteria on the Growth and Physiological Characteristics of *Parashorea chinensis*. **Forests**, 15(11). Scopus. <https://doi.org/10.3390/f15111932>

Instituto Forestal [INFOR]. (2024). Anuario Forestal 2024—Chile. **Área de Información y Economía Forestal del Ministerio de Agricultura**. <https://wef.infor.cl/index.php/publicaciones/boletines-estadisticos/anuario-forestal>

Ismael, A., Suontama, M., Klápště, J., Kennedy, S., Graham, N., Telfer, E., & Dungey, H. (2020). Indication of Quantitative Multiple Disease Resistance to Foliar Pathogens in *Pinus radiata* D.Don in New Zealand. **Frontiers in Plant Science**, 11. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01044>

Jang, J. (2024). *Pinus radiata* as a dendro-remediation species against nitrate leaching in the New Zealand primary industrial areas: Current snapshot and prospects. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 370. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109047>

Kang, C., Wang, W., Zheng, X., Zeng, W., He, Y., Wang, J., Wang, F., & Yang, L. (2024). Characteristics of changes in turpentine and physicochemical properties during the fermentation of pine sawdust. Nongye Gongcheng Xuebao/**Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 40(14), 146-154. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.202405088>

Kthiri, Z., Jabeur, M. B., Machraoui, M., Gargouri, S., Hiba, K., & Hamada, W. (2020). Coating seeds with *Trichoderma* strains promotes plant growth and enhance the systemic resistance against *Fusarium* crown rot in durum wheat. **Egyptian Journal of Biological Pest Control**, 30(1). Scopus. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00338-6>

Kumar, A., Akhtar, J., Rao, D., Mishra, G. P., Sharma, P., Harish, M. N., Dunna, V., Sushma, M. K., Ramappa, S., & Prasad, N. (2025). Eco-Friendly Management of *Stemphylium vesicarium* Induced Blight in Onion through Bio-Priming with *Trichoderma harzianum*. **Russian Journal of Plant Physiology**, 72(6). <https://doi.org/10.1134/S102144372560268X>

López-López, N., Segarra, G., Vergara, O., López-Fabal, A., & Trillas, M. I. (2016). Compost from forest cleaning green waste and *Trichoderma asperellum* strain T34 reduced incidence of *Fusarium circinatum* in *Pinus radiata* seedlings. **Biological Control**, 95, 31-39. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.12.014>

Mason, E. G. (2001). A model of the juvenile growth and survival of *Pinus radiata* D. Don: Adding the effects of initial seedling diameter and plant handling. **New Forests**, 22(1-2), 133-158. Scopus. <https://doi.org/10.1023/A:1012393130118>

Mastouri, F., Björkman, T., & Harman, G. E. (2010). Seed treatment with *Trichoderma harzianum* alleviates biotic, abiotic, and physiological stresses in germinating seeds and seedlings. **Phytopathology**, 100(11), 1213-1221. Scopus. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-10-0091>

Mellow, K., Chettri, P., Kabir, S., McDougal, R. L., Cox, M. P., Stewart, A., Lange, C., Steyaert, J. M., &

- Bradshaw, R. E. (2016). Molecular markers for quantification of bioactive fungal strains associated with *Pinus radiata*. **New Zealand Plant Protection**, 69, 64-67. Scopus. <https://doi.org/10.30843/nzpp.2016.69.5916>
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2019). **Línea de base de especies forestales (*Pinus sp* y *Eucalyptus sp.*) con fines de bioseguridad**. https://bioseguridad.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2020/07/LB_Forestales.pdf
- Muhammad, A. M., Alhassan, Y. J., J, A., S., Y, S., A., A, C., & B, Y., A. (2022). Analysis of Costs and Returns from Tree Crops Planting in Tropical Environment. **South Asian Research Journal of Agriculture and Fisheries**, 4(5), 69-72. <https://doi.org/10.36346/sarjaf.2022.v04i05.001>
- Mullett, M. S., Adamson, K., Bragança, H., Bulgakov, T. S., Georgieva, M., Henriques, J., Jürisoo, L., Laas, M., & Drenkhan, R. (2018). New country and regional records of the pine needle blight pathogens *Lecanosticta acicola*, *Dothistroma septosporum* and *Dothistroma pini*. **Forest Pathology**, 48(5). Scopus. <https://doi.org/10.1111/efp.12440>
- Nusaibah, S. A., Musa, H., Nusaibah, S. A., & Musa, H. (2019). A Review Report on the Mechanism of *Trichoderma* spp. As Biological Control Agent of the Basal Stem Rot (BSR) Disease of *Elaeis guineensis*. En *Trichoderma—The Most Widely Used Fungicide*. **IntechOpen**. <https://doi.org/10.5772/intechopen.84469>
- Oliva Valle, M., Vacalla Ochoa, F., Pérez Chuquimez, D., & Tucto Chávez, A. (2017). **Vivero forestal para producción de plántones de especies forestales nativas: Experiencia en Molinopampa, Amazonas - Perú**. <https://hdl.handle.net/20.500.12921/348>
- Pashkeeva, O. E., Grodnitskaya, I. D., Antonov, G. I., Lomovsky, O. I., & Gaidasheva, I. I. (2021). The Effect of Treatment of Scots Pine Seeds by Microorganisms and Phytopreparations on the Seedling Safety and Soil Properties in a Forest Nursery. **Russian Journal of Forest Science**, 2021(2), 143-155. Scopus.
- Reglinski, T., Spiers, T. M., Dick, M. A., Taylor, J. T., & Gardner, J. (2009). Management of phytophthora root rot in radiata pine seedlings. **Plant Pathology**, 58(4), 723-730. Scopus. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02021.x>
- Reglinski, T., Taylor, J. T., Northcott, G. L., Ah Chee, A., Spiers, M., Wohlers, M., & Hill, R. A. (2017). Biochemical responses associated with induced resistance to *Colletotrichum acutatum* in *Pinus radiata* seedlings treated with methyl jasmonate and *Trichoderma* spp. **Forest Pathology**, 47(5). Scopus. <https://doi.org/10.1111/efp.12350>
- Rodríguez-Castañeda, D. L., Aldrete, A., López-Upton, J., Cetina-Alcalá, V. M., & García-Díaz, S. E. (2025). Prevention and control of *Fusarium oxysporum* Schltdl. using beneficial organisms in *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. **Agrociencia**, 59(4), 1-13. Scopus. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v59i4.3270>
- Rolando, C. A., Dick, M. A., Gardner, J., Bader, M. K.-F., & Williams, N. M. (2017). Chemical control of two Phytophthora species infecting the canopy of Monterey pine (*Pinus radiata*). **Forest Pathology**, 47(3). Scopus. <https://doi.org/10.1111/efp.12327>
- Sala, A., Artola, A., Sánchez, A., & Barrena, R. (2020). Rice husk as a source for fungal biopesticide production by solid-state fermentation using *B. bassiana* and *T. harzianum*. **Bioresource Technology**, 296. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122322>

- Salem, M. Z. M., Hamed, S. A. E.-K. M., & Mansour, M. M. A. (2019). Assessment of efficacy and effectiveness of some extracted bio-chemicals as bio-fungicides on wood. **Drvna Industrija**, 70(4), 337-350. <https://doi.org/10.5552/drvind.2019.1837>
- Shavrukov, Y., & Hirai, Y. (2016). Good and bad protons: Genetic aspects of acidity stress responses in plants. **Journal of Experimental Botany**, 67(1), 15-30. Scopus. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv437>
- Singh, T., & Chittenden, C. (2021). Synergistic ability of chitosan and *Trichoderma harzianum* to control the growth and discolouration of common sapstain fungi of *Pinus radiata*. **Forests**, 12(5). <https://doi.org/10.3390/f12050542>
- Subedi, P., & Baysal-Gurel, F. (2025). Evaluation of Fungicides, Biofungicides, and Plant-Based Extract for the Management of Stem Canker Caused by *Botryosphaeria dothidea* in Eastern Redbud (*Cercis canadensis*). **HortScience**, 60(11), 1994-2001. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI18841-25>
- Tarallo, M., Mesarich, C. H., McDougal, R. L., & Bradshaw, R. E. (2025). Foliar Pine Pathogens From Different Kingdoms Share Defence-Eliciting Effector Proteins. **Molecular Plant Pathology**, 26(3). Scopus. <https://doi.org/10.1111/mpp.70065>
- Terzi, E., Kartal, S. N., Yilgör, N., Rautkari, L., & Yoshimura, T. (2016). Role of various nano-particles in prevention of fungal decay, mold growth and termite attack in wood, and their effect on weathering properties and water repellency. **International Biodeterioration and Biodegradation**, 107, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.11.010>
- Uddin, M. N., Rahman, U. U., Khan, W., Uddin, N., & Muhammad, M. (2018). Effect of *Trichoderma harzianum* on tomato plant growth and its antagonistic activity against *Phythium ultimum* and *Phytophthora capsici*. **Egyptian Journal of Biological Pest Control**, 28(1), 1-6. Scopus. <https://doi.org/10.1186/s41938-018-0032-5>
- Vela Rodríguez, R. E. (2011). Efecto de diferentes sustratos en el desarrollo y estado fitosanitario del repique de *Pinus radiata* D. Don en la comunidad de Nueva Unión-Región La Libertad; <http://repositorio.unapikitos.edu.pe/handle/20.500.12737/3116>
- Wang, L., Li, C., Shi, J., Li, C., Li, J., Ren, L., Luo, Y., & Sullivan, B. (2020). Incidental Fungi in Host Trees Disrupt the Development of *Sirex noctilio* (Hymenoptera: Siricidae) Symbiotic Fungus and Larvae. **Journal of Economic Entomology**, 113(2), 832-838. <https://doi.org/10.1093/jee/toz314>
- Wang, L.-X., Ren, L.-L., Liu, X.-B., Shi, J., Wang, J.-Z., & Luo, Y.-Q. (2019). Effects of endophytic fungi in Mongolian pine on the selection behavior of woodwasp (*Sirex noctilio*) and the growth of its fungal symbiont. **Pest Management Science**, 75(2), 492-505. <https://doi.org/10.1002/ps.5146>
- Wartalska, P., Oszako, T., Bakier, S., Belbahri, L., Malewski, T., Hsiang, T., Popowska-Nowak, E., & Nowakowska, J. (2021). *Dothistroma septosporum* not detected in pinus sylvestris seed trees from investigated stands in southern poland. **Forests**, 12(10). Scopus. <https://doi.org/10.3390/f12101323>
- Wei, H.-X., Chen, X.-D., Wang, H., Xie, S.-D., Ji, N.-Q., & Fan, L. (2017). Isolation, Purification and Identification of *Trichoderma harzianum* and Preliminary Study on Activity of Fermentation Broth. **Chinese**

Journal of Pharmaceutical Biotechnology, 24(3), 206-210. <https://doi.org/10.19526/j.cnki.1005-8915.20170304>

Woodward, S., Amin, H., Martín-García, J., Solla, A., Diaz-Vazquez, R., Romeralo, C., Alves, A., Pinto, G., Herron, D., Fraser, S., Zas, R., Doğmuş-Lehtijärvi, H. T., Bonello, P., Wingfield, M. J., Witzell, J., & Diez, J. J. (2025). Host-Pathogen Interactions in the Pine-Fusarium circinatum Pathosystem and the Potential for Resistance Deployment in the Field. **Forest Pathology**, 55(2), e70020. <https://doi.org/10.1111/efp.70020>

Xue, W., Yang, S., Liu, X., Qian, M., Wang, H., Yang, H., Liu, X., Shen, Y., Li, J., & Sun, Z. (2025). Enhanced Sweet Sorghum Growth and Soil Quality in Coastal Saline-Alkali Soils Through Organic Acid-Containing Bio-Based Materials and Microbial Synergy. **Agronomy**, 15(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy15010056>

Yao, X., Guo, H., Zhang, K., Zhao, M., Ruan, J., & Chen, J. (2023). Trichoderma and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. **Frontiers in Microbiology**, 14. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551>

Zhang, L., Zuo, Q., Cai, H., Li, S., Shen, Z., & Song, T. (2024). Fungicides reduce soil microbial diversity, network stability and complexity in wheat fields with different disease resistance. **Applied Soil Ecology**, 201. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105513>

Zin, N. A., & Badaluddin, N. A. (2020). Biological functions of *Trichoderma* spp. For agriculture applications. **Annals of Agricultural Sciences**, 65(2), 168-178. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.aas.2020.09.003>