

Bento Gonçalves, RS / Dezembro, 2025

Resposta de videiras jovens ao cobre do solo associada a plantas de cobertura

George Wellington Bastos de Melo⁽¹⁾ e Bruna Trevizan Paese⁽²⁾

⁽¹⁾ Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves, RS. ⁽²⁾ Estudante de doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

Resumo – Avaliou-se o potencial de espécies vegetais no manejo sustentável de solos vitícolas contaminados com cobre, visando aumentar a eficiência nutricional de videiras jovens. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em solo tratado artificialmente com cobre em doses de 0 e 200 mg/kg. Foram testadas as coberturas vegetais azevém, ervilhaca, consórcio das duas espécies e um controle sem cobertura. A ervilhaca promoveu o maior crescimento e melhor eficiência nutricional das videiras em solo não contaminado. Em solo contaminado, o azevém e o consórcio mostraram maior eficiência na mitigação da toxicidade por cobre, mantendo o desenvolvimento das plantas. As plantas de cobertura favoreceram a complexação do cobre no solo, melhorando suas características físicas, químicas e biológicas. Esses resultados destacam o uso das coberturas vegetais como estratégia prática e econômica na recuperação de solos contaminados e no desenvolvimento sustentável de vinhedos.

Termos para indexação: *Vitis vinifera*, metais pesados, fitotoxicidade, remediação, manejo do solo.

Nutritional efficiency of young grapevines in copper-contaminated soils: impact of cover crops

Abstract – The potential of plant species for the sustainable management of copper-contaminated vineyard soils to improve the nutritional efficiency of young grapevines was evaluated. The experiment was conducted in a greenhouse using artificially contaminated soil with copper at doses of 0 and 200 mg/kg. The cover crops tested included ryegrass, vetch, a consortium of both species, and a control without coverage. Vetch promoted the highest growth and improved the nutritional efficiency of grapevines in the uncontaminated soil. In contaminated soil, ryegrass and the consortium exhibited greater efficiency in mitigating Cu toxicity and maintaining plant development. Cover crops favor Cu complexation in the soil, enhancing its physical, chemical, and biological properties. These results highlight that cover crops are a practical and cost-effective strategy for soil remediation and sustainable vineyard development.

Index terms: *Vitis vinifera*, heavy metals, phytotoxicity, remediation, soil management.

Embrapa Uva e Vinho

Rua Livramento, nº 515
Caixa Postal 130
95701-008 Bento Gonçalves, RS
www.embrapa.br/uva-e-vinho
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente
Henrique Pessoa dos Santos
Secretária-executiva
Renata Gava

Membros

Fernando José Hawerth,
Mauro Celso Zanus, Joelson
José Lazzarotto, Jorge Tonietto,
Thor Vinicius Martins Fajardo,
Alessandra Russi, Edgardo
Aquilaes Prado Perez, Fábio
Ribeiro dos Santos, Luciana
Elena Mendonça Prado, Michele
Belas Coutinho Pereira
e Rochelle Martins Alvorcem

Revisão de texto
Renata Gava

Normalização bibliográfica
Rochelle Martins Alvorcem
(CRB-10/1810)

Projeto gráfico
Leandro Sousa Fazio
Diagramação
Renata Gava

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados à Embrapa.

Introdução

A intensificação do uso de fungicidas à base de cobre (Cu) em sistemas vitícolas tem resultado, ao longo das últimas décadas, em um acúmulo persistente deste metal nos solos agrícolas, especialmente em regiões com alta densidade de vinhedos e significativa pluviosidade. Este fenômeno tem despertado crescente atenção na literatura científica, uma vez que a contaminação por cobre compromete diretamente a saúde edáfica e afeta os processos fisiológicos das videiras, sobretudo durante o período crítico de estabelecimento das plantas jovens.

A toxicidade do cobre em solos cultivados é uma problemática amplamente reconhecida, sendo associada à redução da atividade microbiana, à degradação da estrutura física do solo e à limitação na absorção de nutrientes essenciais, como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (Fernandez-Calvino et al., 2012; Mir; Pichtel; Hayat, 2021). Esses efeitos se manifestam de forma mais aguda nas fases iniciais de desenvolvimento das videiras, quando o sistema radicular ainda está em formação e a planta apresenta menor resiliência aos estresses ambientais.

Estudos clássicos e contemporâneos vêm explorando a dinâmica do cobre no solo e os mecanismos de sua toxicidade para os vegetais (Komárek et al., 2008). No entanto, embora estratégias convencionais de mitigação, como a adição de matéria orgânica e o uso de práticas conservacionistas, já tenham sido amplamente discutidas, novas abordagens têm emergido no contexto da agricultura sustentável, destacando-se o uso de plantas de cobertura como ferramenta agroecológica de remediação.

A introdução de plantas de cobertura em áreas vitícolas contaminadas por cobre tem se mostrado promissora, não apenas pela sua capacidade de reduzir a biodisponibilidade do metal, mas também por promover melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Espécies de leguminosas e gramíneas, quando manejadas adequadamente, contribuem para a imobilização do cobre, favorecendo sua complexação com matéria orgânica e minimizando sua absorção pelas videiras (Melo et al., 2021; Mackie et al., 2014).

Além de seus efeitos diretos sobre a dinâmica do cobre no solo, as plantas de cobertura atuam como promotoras da saúde do solo ao estimular a atividade de microrganismos benéficos e melhorar a estrutura do solo, ampliando a porosidade e a retenção hídrica. Esses fatores, em conjunto, criam um ambiente mais propício ao desenvolvimento radicular das videiras e favorecem a eficiência de

absorção de nutrientes, especialmente em vinhedos recém-implantados, onde a sensibilidade à fitotoxicidade por cobre é mais elevada.

Apesar do reconhecimento crescente dessas práticas, ainda existem lacunas importantes no que diz respeito à seleção das espécies mais eficazes para diferentes contextos edafoclimáticos, bem como à compreensão dos mecanismos específicos de interação entre raízes, microrganismos e metais pesados. Esses aspectos demandam investigações mais aprofundadas, capazes de subsidiar recomendações técnicas regionalizadas e cientificamente embasadas.

A relevância dessa temática transcende a esfera produtiva, alcançando dimensões ambientais e socioeconômicas. A degradação do solo causada pelo excesso de cobre compromete não apenas a sustentabilidade dos sistemas vitícolas, mas também a segurança alimentar, a qualidade ambiental e a resiliência das comunidades agrícolas (Cesco et al. 2021; Perria et al., 2022). Portanto, ações mitigadoras eficazes são fundamentais para assegurar a longevidade produtiva dos vinhedos e a sustentabilidade da viticultura como um todo.

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial de diferentes espécies de plantas de cobertura na redução da disponibilidade de cobre em solos vitícolas e na melhoria do desempenho nutricional das videiras jovens. A expectativa era que os resultados obtidos contribuíssem para o avanço do conhecimento técnico-científico na área e servissem de base para a formulação de práticas sustentáveis e adaptadas às condições locais, promovendo a sustentabilidade da viticultura em regiões com histórico de contaminação por cobre.

Material e métodos

O experimento foi conduzido em ambiente protegido (casa de vegetação) na Embrapa Uva e Vinho, localizada em Bento Gonçalves, RS, com duração de 213 dias, de julho de 2022 a fevereiro de 2023. Utilizou-se um solo classificado como Cambissolo Húmico Álico, típico da viticultura regional, previamente caracterizado quanto aos atributos físicos e químicos (Tabela 1). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 4, sendo dois níveis de contaminação por cobre (0 e 200 mg de cobre por quilograma de solo) e quatro tratamentos com plantas de cobertura: 100% azevém, 100% ervilhaca, consórcio 50/50 das duas espécies, e controle sem cobertura vegetal. Cada

Tabela 1. Atributos químicos do solo antes e após a adubação de correção e calagem.

Atributo	Antes da correção	Após a correção
pH	4,4	6,1
Fósforo (P) (mg/dm ³)	1,8	9,7
Potássio (K) (mg/dm ³)	58,0	118
Alumínio (Al) (mmolc/dm ³)	69,0	0,0
Cálcio (Ca) (mmolc/dm ³)	9,7	11,0
Magnésio (Mg) (mmolc/dm ³)	3,8	3,9
Cobre (Cu) (mg/dm ³)	4,5	4,4
Matéria orgânica (g/kg ⁻¹)	18,0	18,0

combinação foi repetida quatro vezes, totalizando 32 unidades experimentais.

A contaminação por cobre foi realizada por meio da adição de sulfato de cobre (CuSO₄·5H₂O) (valores observados após a adição encontram-se na Tabela 2), incorporado ao solo homogeneamente após a calagem e adubação de base conforme recomendações da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS) (2016). As plantas de cobertura foram semeadas em vasos contendo 7 kg de solo, sendo mantidas até o estágio de emissão da folha-bandeira no azevém. Nesse ponto, foram roçadas e seus resíduos mantidos sobre o solo como cobertura morta. O porta-enxerto utilizado foi o 'Paulsen 1103', propagado via cultura de tecidos, plantado após a colheita (corte) das coberturas, simulando o manejo da renovação de vinhedos.

Durante o experimento, foram realizadas irrigações e manejos fitossanitários padronizados. Após 213 dias, as plantas de videira foram colhidas, separando-se raízes e parte aérea. As amostras foram lavadas, secas em estufa a 60 °C por 48 horas, moídas, pesadas e analisadas quanto às concentrações de N, P, K, Ca e Mg, conforme metodologia de Tedesco et al. (1995).

Foram calculados três índices de eficiência nutricional para cada nutriente:

- Eficiência de absorção (EA) — Miligrama de nutriente acumulado por grama de massa seca de raiz.
- Eficiência de translocação (ET) — Miligrama de nutrientes na parte aérea por miligrama de nutriente na planta.
- Eficiência de utilização (EU) — Relação entre o quadrado da biomassa total (g) e o conteúdo do nutriente na planta (mg).

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância, utilizando software para análise estatística.

Resultados e discussão

Massa seca da parte aérea das plantas de cobertura

Os resultados apresentados na Tabela 3 demonstram que a aplicação de cobre na dose de 200 miligramas por quilo de solo exerceu efeito fitotóxico

Tabela 2. Concentração de cobre no solo após adubação de correção, calagem e aplicação das doses de cobre.

Tratamento	Cobre (mg/dm ⁻³)
Azevém	71
Ervilhaca	70
Azevém + Ervilhaca	74
Testemunha	72

Tabela 3. Massa seca da parte aérea das plantas de cobertura submetida à aplicação de duas doses de cobre.

Planta de cobertura	Dose de cobre por quilograma de solo			
	0 (mg)		200 (mg)	
Azevém (g)	108,2	a A	49,85	a B
Ervilhaca (g)	73,83	b A	28,25	b B
Azevém + Ervilhaca (g)	100,83	a A	49,50	a B

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade ($\alpha = 0,05$).

significativo sobre a produção de massa seca da parte aérea de todas as plantas de cobertura avaliadas. A análise estatística pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) revelou reduções expressivas na biomassa aérea, com decréscimos de 54% para o azevém, 62% para a ervilhaca e 51% para a mistura azevém + ervilhaca quando comparadas ao tratamento controle (0 miligrama de cobre por quilograma). Estes resultados evidenciam a sensibilidade das espécies estudadas ao excesso de cobre no solo, que pode caracterizar um quadro de estresse oxidativo que compromete o desenvolvimento vegetal e a acumulação de fitomassa.

A análise comparativa entre as plantas de cobertura revelou diferenças significativas no desempenho sob condições de ausência de contaminação por cobre, onde o azevém e a mistura azevém + ervilhaca apresentaram superioridade estatística em relação à ervilhaca cultivada isoladamente. Contudo, sob condições de estresse por cobre, observou-se a eliminação das diferenças significativas entre os tratamentos, sugerindo que o metal pesado exerceu efeito uniformizador sobre o desempenho das espécies, possivelmente devido à saturação dos mecanismos de tolerância e detoxificação. A ervilhaca demonstrou maior suscetibilidade ao cobre, evidenciada pela maior redução percentual na produção de biomassa, indicando limitações em seus sistemas antioxidantes e de homeostase mineral quando submetida a condições de toxicidade por cobre.

Massa seca da parte aérea, raízes e total do porta-enxerto

A Tabela 4 apresenta dados relativos à massa seca (em gramas) da parte aérea, das raízes e total do porta-enxerto de videira em função do cultivo prévio de diferentes plantas de cobertura, como azevém, ervilhaca, consórcio azevém + ervilhaca, além de um tratamento testemunha (sem plantas de

cobertura), e da aplicação de cobre em dois níveis (0 e 200 mg de cobre por quilograma de solo).

No que diz respeito à massa seca da parte aérea do porta-enxerto, observa-se que, na ausência de aplicação de cobre (0 mg), a ervilhaca proporcionou os maiores valores (8,53 g), diferindo significativamente dos demais tratamentos. O tratamento testemunha apresentou valores intermediários (5,16 g), enquanto o azevém isolado resultou no menor acúmulo de biomassa aérea (1,51 g). Quando houve aplicação de cobre (200 mg), a ervilhaca continuou apresentando os maiores valores (4,10 g), embora não tenha diferido estatisticamente do azevém (3,31 g) e do consórcio (2,62 g). O tratamento testemunha, por sua vez, apresentou o menor valor (0,83 g), evidenciando o efeito tóxico do cobre quando não há plantas de cobertura previamente cultivadas.

Comparando os níveis de cobre dentro de cada cobertura, verifica-se que apenas a ervilhaca e a testemunha apresentaram redução significativa na massa seca da parte aérea quando submetidas à alta dose de cobre, indicando que estas coberturas não foram tão eficientes em mitigar os efeitos tóxicos do metal no desenvolvimento da parte aérea do porta-enxerto. Por outro lado, o azevém e o consórcio não apresentaram diferenças significativas entre os níveis de cobre, sugerindo maior eficiência destas coberturas na mitigação da toxicidade do cobre.

Em relação à massa seca da raiz do porta-enxerto, na ausência de cobre, a ervilhaca também proporcionou os maiores valores (7,85 g), diferindo significativamente do azevém (3,87 g) e do consórcio (4,06 g), mas não da testemunha (5,67 g). Na presença de alta dose de cobre, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos com plantas de cobertura, embora todos tenham apresentado valores numericamente superiores à testemunha. Comparando os níveis de cobre, apenas a ervilhaca e a testemunha apresentaram redução significativa na massa seca de raízes quando

Tabela 4. Massa seca da parte aérea, das raízes e total do porta-enxerto (em gramas), em função do cultivo prévio de diferentes plantas de cobertura – azevém, ervilhaca, azevém + ervilhaca e da aplicação de cobre.

Planta de cobertura	Dose de cobre por quilograma de solo	
	0 (mg)	200 (mg)
Azevém	1,51 A c	3,31 A a b
Ervilhaca	8,53 A a	4,10 B a
Azevém + ervilhaca	2,84 A b c	2,62 A a b
Testemunha	5,16 A b	0,83 B b
Massa seca da raiz do porta-enxerto (g)		
Azevém	3,87 A b	3,15 A a
Ervilhaca	7,85 A a	3,21 B a
Azevém + ervilhaca	4,06 A b	2,27 A a
Testemunha	5,67 A a b	0,95 B a
Massa seca total do porta-enxerto (g)		
Azevém	5,38 A c	6,47 A a b
Ervilhaca	16,39 A a	7,30 B a
Azevém + ervilhaca	6,90 A b c	4,88 A a b
Testemunha	10,83 A b	1,78 B b

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($\alpha = 0,05$).

submetidas à alta dose de cobre, corroborando o observado para a parte aérea.

Quanto à massa seca total do porta-enxerto, na ausência de cobre, a ervilhaca proporcionou o maior valor (16,39 g), diferindo significativamente dos demais tratamentos, enquanto o azevém apresentou o menor valor (5,38 g). Na presença de alta dose de cobre, a ervilhaca continuou apresentando o maior valor (7,30 g), embora sem diferir estatisticamente do azevém (6,47 g) e do consórcio (4,88 g). O tratamento testemunha apresentou o menor valor (1,78 g). Comparando os níveis de cobre, novamente apenas a ervilhaca e a testemunha apresentaram redução significativa na massa seca total quando submetidas à alta dose de cobre.

Estes resultados evidenciam que o cultivo prévio de plantas de cobertura, especialmente ervilhaca, favorece o desenvolvimento do porta-enxerto de videira, mesmo em solos não contaminados com cobre. Em solos com alta concentração de cobre, o cultivo prévio de plantas de cobertura, particularmente

azevém e o consórcio azevém + ervilhaca, atenua os efeitos tóxicos do metal, promovendo maior desenvolvimento do porta-enxerto em comparação à ausência de plantas de cobertura. Isso pode ser atribuído à capacidade destas plantas em complexar o cobre no solo, reduzindo sua disponibilidade e, conseqüentemente, sua toxicidade para o porta-enxerto. Além disso, a matéria orgânica adicionada ao solo pelas plantas de cobertura pode contribuir para a imobilização do cobre, reduzindo sua biodisponibilidade. Tais resultados são de grande relevância para o manejo de áreas vitícolas com histórico de aplicação de fungicidas cúpricos e conseqüente acúmulo de cobre no solo.

Eficiência de absorção, utilização e translocação de nutrientes

Nitrogênio

Com relação à eficiência de absorção de nitrogênio (Figura 1A), observa-se que na ausência de

cobre (0 mg), a ervilhaca promoveu a maior eficiência (26,11 mg/g), não diferindo estatisticamente da combinação azevém + ervilhaca (20,55 mg/g) e da testemunha (18,96 mg/g), mas superior ao azevém isolado (12,7 mg/g). Na presença de alta dose de cobre (200 mg), o consórcio azevém + ervilhaca destacou-se com a maior eficiência de absorção (30,75 mg/g), não diferindo estatisticamente da ervilhaca (26,47 mg/g) e do azevém (25,45 mg/g), mas superior à testemunha (23,39 mg/g). Comparando os níveis de cobre, observa-se que em todos os tratamentos houve um aumento na eficiência de absorção de nitrogênio na presença de alta dose de cobre, embora estas diferenças não tenham sido estatisticamente significativas.

Quanto à eficiência de translocação de nitrogênio (Figura 1B), na ausência de cobre, a ervilhaca apresentou o maior valor (0,61 mg/mg), diferindo significativamente dos demais tratamentos. Na presença de alta dose de cobre, o consórcio azevém + ervilhaca apresentou a maior eficiência (0,59 mg/mg), não diferindo estatisticamente da ervilhaca (0,46 mg/mg) e do azevém (0,56 mg/mg), porém superior à testemunha (0,23 mg/mg). É importante notar que a eficiência de translocação de nitrogênio na testemunha foi significativamente reduzida pela alta dose de cobre, enquanto nos tratamentos com plantas de cobertura este efeito negativo não foi observado ou foi menos pronunciado.

Em relação à eficiência de uso de nitrogênio (Figura 1C), na ausência de cobre, a ervilhaca apresentou o maior valor (1,22 g²/mg), seguida pela testemunha (0,71 g²/mg), azevém (0,50 g²/mg) e consórcio (0,49 g²/mg). Na presença de alta dose de cobre, todos os tratamentos apresentaram redução na eficiência de uso, sendo que a ervilhaca manteve o maior valor (0,44 g²/mg), não diferindo estatisticamente do azevém (0,39 g²/mg) e do consórcio (0,25 g²/mg), mas superior à testemunha (0,06 g²/mg). A redução na eficiência de uso de nitrogênio na presença de alta dose de cobre foi mais pronunciada na testemunha, evidenciando o efeito protetor das plantas de cobertura contra a toxicidade do cobre.

Fósforo

Para a eficiência de absorção de fósforo (Figura 2A), na ausência de cobre, a ervilhaca apresentou o maior valor (2,15 mg/g), diferindo significativamente do azevém (1,59 mg/g) e da testemunha (1,57 mg/g), mas não do consórcio (2,00 mg/g). Na presença de alta dose de cobre, o consórcio azevém + ervilhaca destacou-se com a maior eficiência (2,37 mg/g), diferindo significativamente apenas da testemunha (1,51 mg/g). Comparando os níveis de

cobre, observa-se que apenas a testemunha apresentou redução significativa na eficiência de absorção de fósforo na presença de alta dose de cobre, enquanto nos tratamentos com plantas de cobertura, especialmente no consórcio, houve tendência de aumento.

Quanto à eficiência de translocação de fósforo (Figura 2B), na ausência de cobre, a ervilhaca apresentou o maior valor (0,52 mg/mg), não diferindo significativamente do consórcio (0,45 mg/mg), mas superior ao azevém (0,33 mg/mg) e à testemunha (0,29 mg/mg). Na presença de alta dose de cobre, o consórcio apresentou a maior eficiência (0,54 mg/mg), não diferindo estatisticamente do azevém (0,50 mg/mg) e da ervilhaca (0,43 mg/mg), mas superior à testemunha (0,22 mg/mg). É importante ressaltar que a eficiência de translocação de fósforo na testemunha foi significativamente reduzida pela alta dose de cobre, enquanto nos tratamentos com plantas de cobertura este efeito não foi observado ou, no caso do azevém, houve aumento significativo.

Em relação à eficiência de uso de fósforo (Figura 2C), na ausência de cobre, a ervilhaca apresentou o maior valor (14,45 g²/mg), diferindo significativamente dos demais tratamentos. Na presença de alta dose de cobre, a ervilhaca manteve a maior eficiência (6,39 g²/mg), não diferindo estatisticamente do azevém (5,61 g²/mg), mas superior ao consórcio (3,26 g²/mg) e à testemunha (0,94 g²/mg). Comparando os níveis de cobre, todos os tratamentos apresentaram redução significativa na eficiência de uso de fósforo na presença de alta dose de cobre, sendo esta redução mais pronunciada na ervilhaca e na testemunha.

Potássio

Para a eficiência de absorção de potássio (Figura 3A), na ausência de cobre, a ervilhaca apresentou o maior valor (27,23 mg/g), diferindo significativamente dos demais tratamentos. Na presença de alta dose de cobre, o consórcio azevém + ervilhaca apresentou a maior eficiência (21,27 mg/g), não diferindo estatisticamente da ervilhaca (19,83 mg/g) e do azevém (19,30 mg/g), mas superior à testemunha (6,80 mg/g). Comparando os níveis de cobre, observa-se que apenas a ervilhaca e a testemunha apresentaram redução significativa na eficiência de absorção de potássio na presença de alta dose de cobre.

Quanto à eficiência de translocação de potássio (Figura 3B), na ausência de cobre, a ervilhaca apresentou o maior valor (0,50 mg/mg), diferindo significativamente dos demais tratamentos. Na

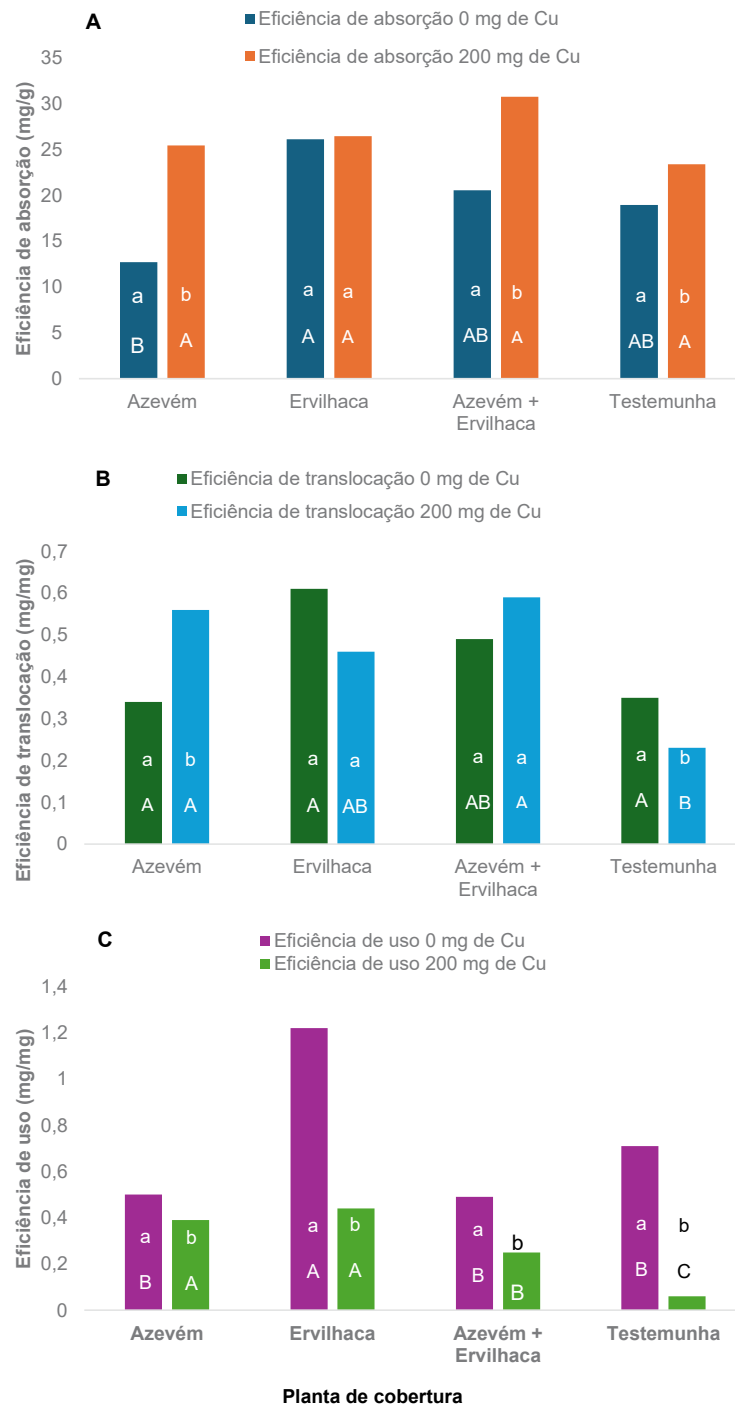


Figura 1. Eficiência de absorção (A), utilização (B) e translocação (C) de nitrogênio em diferentes tratamentos e doses de cobre (Cu). As médias das variáveis com letras idênticas minúsculas (dose de cobre) ou maiúsculas (plantas de cobertura), não tem diferenças significativas segundo o teste de Tukey (Alfa = 0,05).

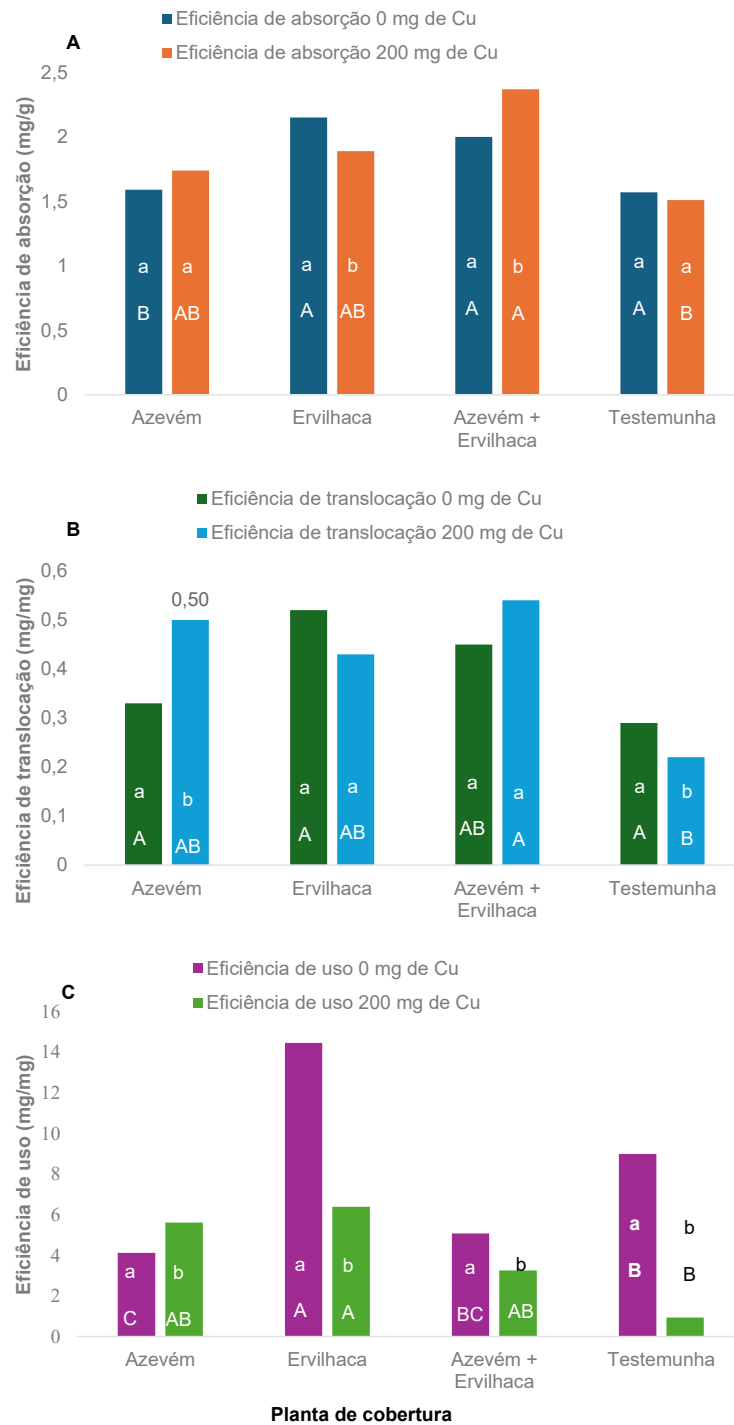


Figura 2. Eficiência de absorção (A), utilização (B) e translocação (C) de fósforo em diferentes tratamentos e doses de cobre (Cu). As médias das variáveis com letras idênticas, minúsculas (dose de cobre) ou maiúsculas (plantas de cobertura), não tem diferenças significativas seguindo o teste de Tukey (Alfa = 0,05).

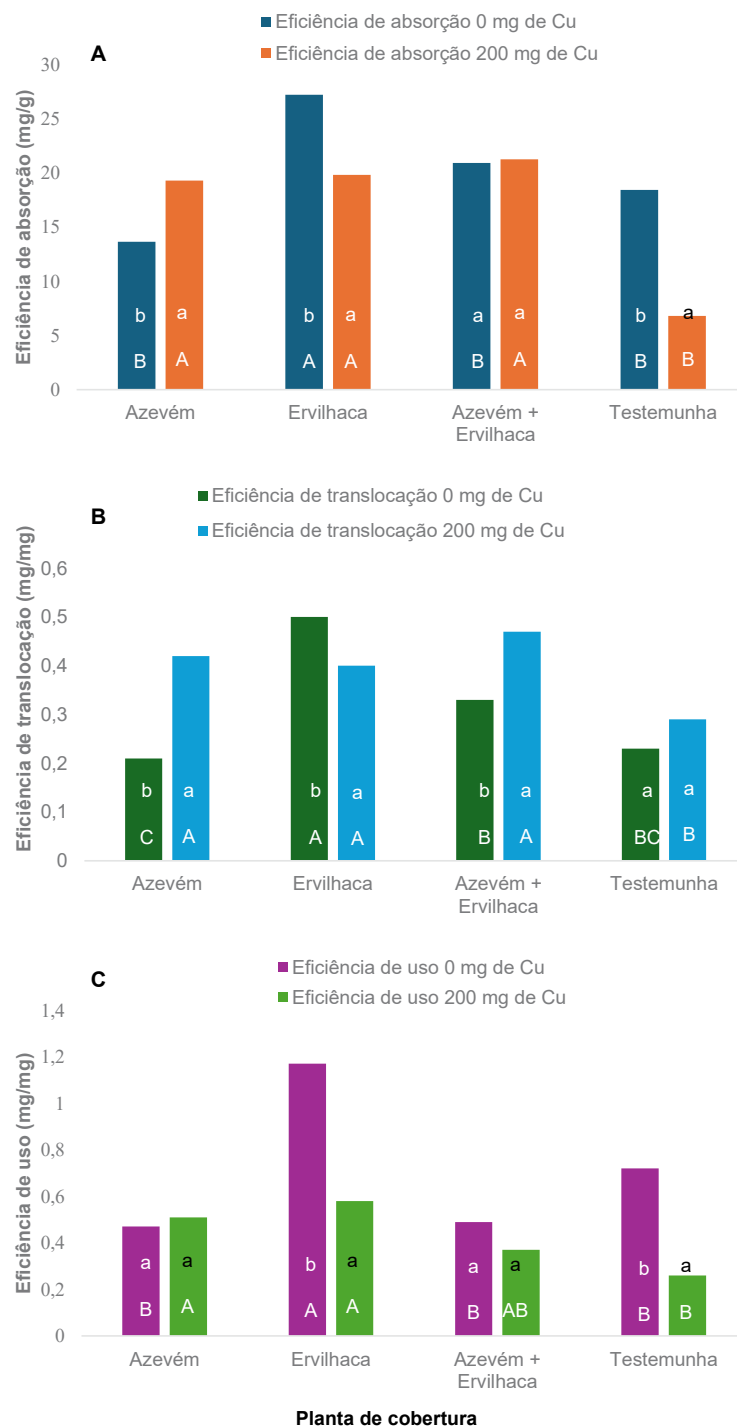


Figura 3. Eficiência de absorção (A), utilização (B) e translocação (C) de potássio em diferentes tratamentos e doses de cobre (Cu). As médias das variáveis com letras idênticas, minúsculas (dose de cobre) ou maiúsculas (plantas de cobertura), não tem diferenças significativas seguindo o teste de Tukey (Alfa = 0,05).

presença de alta dose de cobre, o consórcio azevém + ervilhaca apresentou a maior eficiência (0,47 mg/mg), não diferindo estatisticamente do azevém (0,42 mg/mg) e da ervilhaca (0,40 mg/mg), mas superior à testemunha (0,29 mg/mg). É importante observar que a eficiência de translocação de potássio na ervilhaca foi significativamente reduzida pela alta dose de cobre, enquanto no azevém, no consórcio e na testemunha houve aumento significativo.

Em relação à eficiência de uso de potássio (Figura 3C), na ausência de cobre, a ervilhaca apresentou o maior valor (1,17 g²/mg), diferindo significativamente dos demais tratamentos. Na presença de alta dose de cobre, a ervilhaca manteve a maior eficiência (0,58 g²/mg), não diferindo estatisticamente do azevém (0,51 g²/mg) e da testemunha (0,26 g²/mg), mas superior ao consórcio (0,37 g²/mg). Comparando os níveis de cobre, a ervilhaca, o consórcio e a testemunha apresentaram redução significativa na eficiência de uso de potássio na presença de alta dose de cobre, enquanto no azevém houve aumento não significativo.

Cálcio

Para a eficiência de absorção de cálcio (Figura 4A), na ausência de cobre, a ervilhaca apresentou o maior valor (17,47 mg/g), diferindo significativamente dos demais tratamentos. Na presença de alta dose de cobre, o consórcio azevém + ervilhaca apresentou a maior eficiência (17,13 mg/g), diferindo significativamente apenas da testemunha (11,08 mg/g). Comparando os níveis de cobre, apenas a ervilhaca apresentou redução significativa na eficiência de absorção de cálcio na presença de alta dose de cobre, enquanto nos demais tratamentos não houve diferença significativa.

Quanto à eficiência de translocação de cálcio (Figura 4B), na ausência de cobre, a ervilhaca apresentou o maior valor (0,46 mg/mg), não diferindo significativamente do consórcio (0,41 mg/mg) e da testemunha (0,35 mg/mg), mas superior ao azevém (0,24 mg/mg). Na presença de alta dose de cobre, o consórcio apresentou a maior eficiência (0,50 mg/mg), não diferindo estatisticamente do azevém (0,46 mg/mg) e da ervilhaca (0,37 mg/mg), mas superior à testemunha (0,25 mg/mg). Comparando os níveis de cobre, observa-se que o azevém apresentou aumento significativo na eficiência de translocação de cálcio na presença de alta dose de cobre, enquanto nos demais tratamentos não houve diferença significativa.

Em relação à eficiência de uso de cálcio (Figura 4C), na ausência de cobre, a ervilhaca

apresentou o maior valor (1,77 g²/mg), diferindo significativamente dos demais tratamentos. Na presença de alta dose de cobre, a ervilhaca manteve a maior eficiência (0,90 g²/mg), não diferindo estatisticamente do azevém (0,69 g²/mg), mas superior ao consórcio (0,46 g²/mg) e à testemunha (0,15 g²/mg). Comparando os níveis de cobre, todos os tratamentos apresentaram redução significativa na eficiência de uso de cálcio na presença de alta dose de cobre, sendo esta redução mais pronunciada na ervilhaca e na testemunha.

Magnésio

Para a eficiência de absorção de magnésio (Figura 5A), na ausência de cobre, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, embora a ervilhaca tenha apresentado o maior valor numericamente (4,52 mg/g). Na presença de alta dose de cobre, o consórcio azevém + ervilhaca apresentou a maior eficiência (5,06 mg/g), não diferindo estatisticamente do azevém (4,59 mg/g) e da ervilhaca (4,13 mg/g), mas superior à testemunha (2,46 mg/g). Comparando os níveis de cobre, apenas a testemunha apresentou redução significativa na eficiência de absorção de magnésio na presença de alta dose de cobre.

Quanto à eficiência de translocação de magnésio (Figura 5B), na ausência de cobre, também não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, embora a ervilhaca tenha apresentado o maior valor numericamente (0,53 mg/mg). Na presença de alta dose de cobre, o consórcio apresentou a maior eficiência (0,56 mg/mg), não diferindo estatisticamente do azevém (0,52 mg/mg), mas superior à ervilhaca (0,46 mg/mg) e à testemunha (0,35 mg/mg). Comparando os níveis de cobre, observa-se que o azevém e o consórcio apresentaram aumento significativo na eficiência de translocação de magnésio na presença de alta dose de cobre, enquanto a ervilhaca apresentou redução significativa e a testemunha não mostrou diferença significativa.

Em relação à eficiência de uso de magnésio (Figura 5C), na ausência de cobre, a ervilhaca apresentou o maior valor (6,86 g²/mg), diferindo significativamente dos demais tratamentos. Na presença de alta dose de cobre, a ervilhaca manteve a maior eficiência (2,80 g²/mg), não diferindo estatisticamente do azevém (2,17 g²/mg), mas superior ao consórcio (1,57 g²/mg) e à testemunha (0,76 g²/mg). Comparando os níveis de cobre, todos os tratamentos apresentaram redução significativa na eficiência de uso de magnésio na presença de alta dose de cobre, com exceção do azevém.

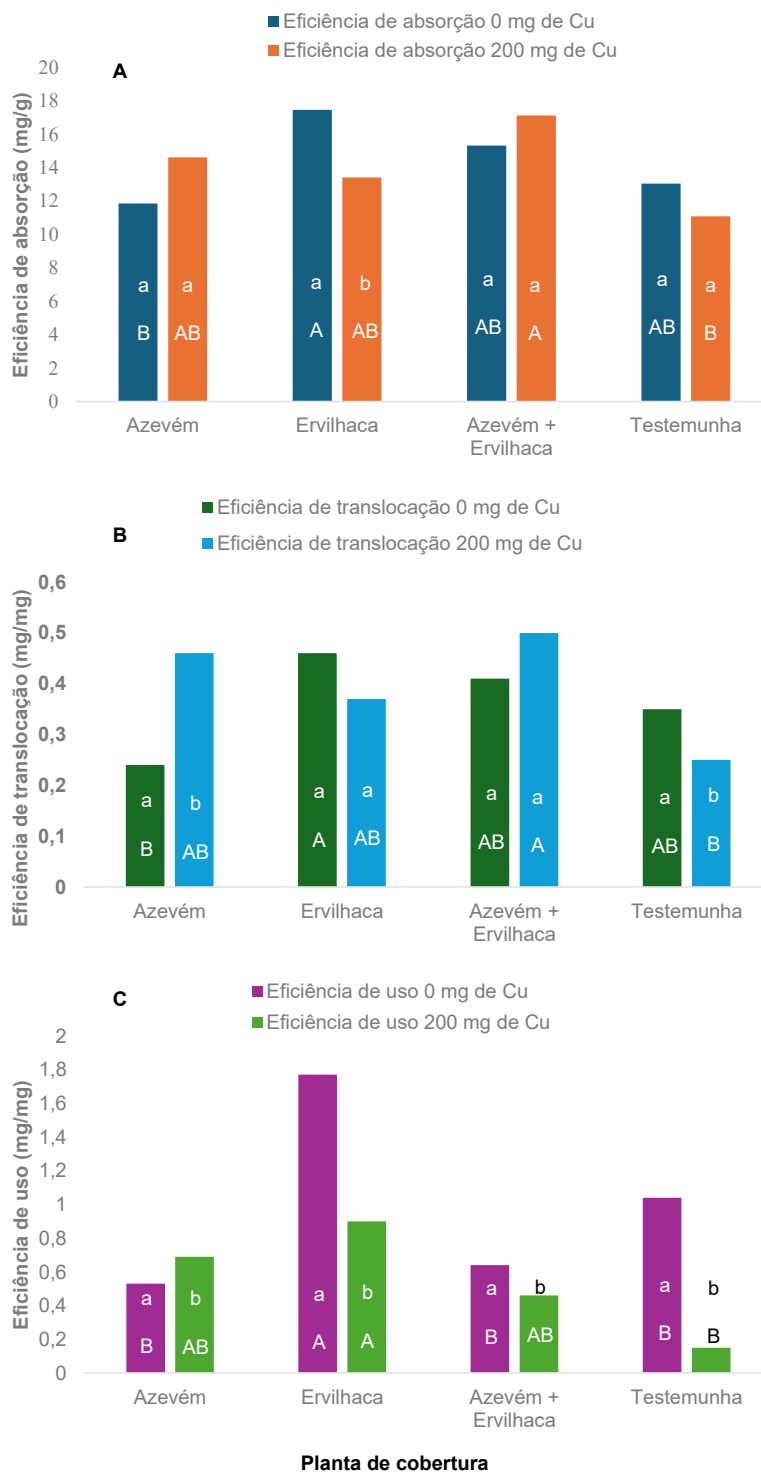


Figura 4. Eficiência de absorção (A), utilização (B) e translocação (C) de cálcio em diferentes tratamentos e doses de cobre (Cu). As médias das variáveis com letras idênticas, minúsculas (dose de cobre) ou maiúsculas (plantas de cobertura), não tem diferenças significativas seguindo o teste de Tukey (Alfa = 0,05).

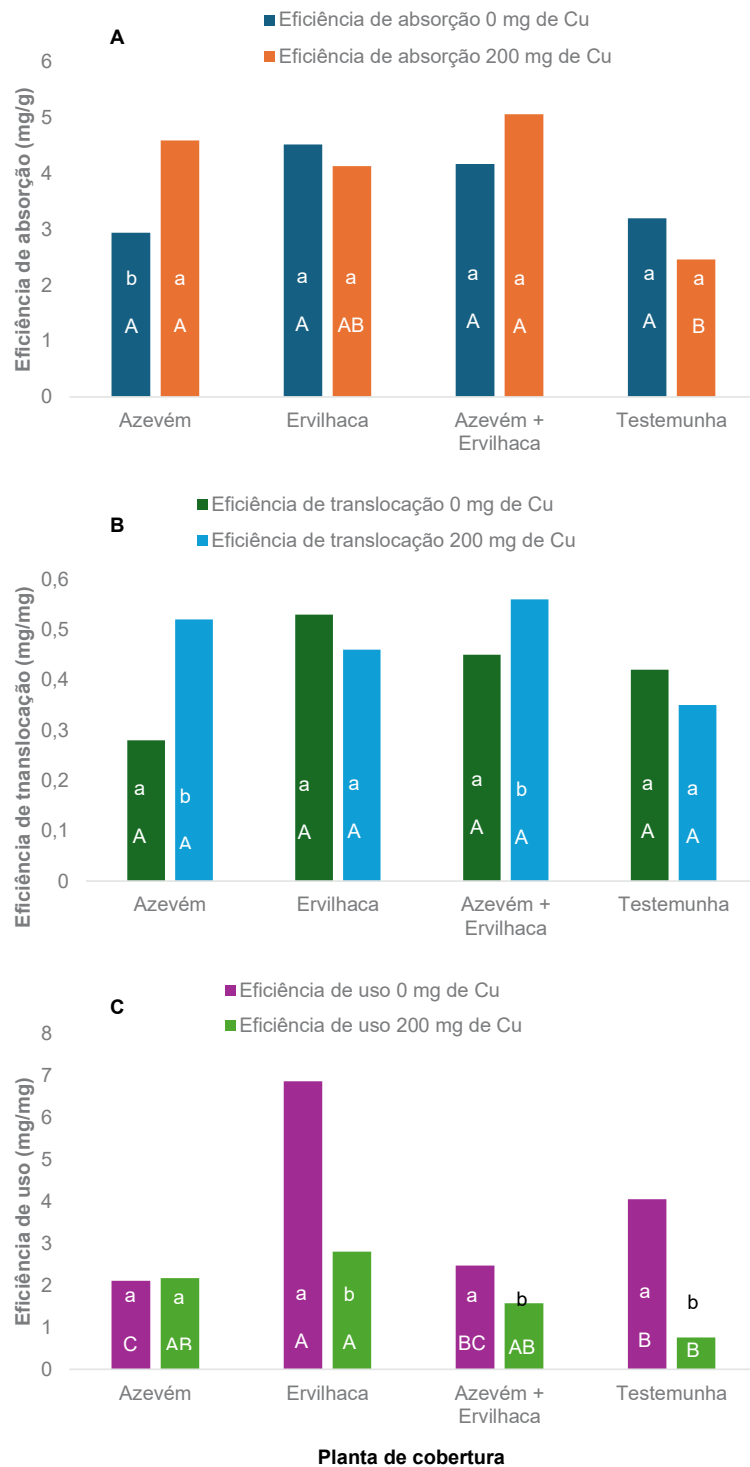


Figura 5. Eficiência de absorção (A), utilização (B) e translocação (C) de magnésio em diferentes tratamentos e doses de cobre (Cu). As médias das variáveis com letras idênticas, minúsculas (dose de cobre) ou maiúsculas (plantas de cobertura), não tem diferenças significativas seguindo o teste de Tukey (alfa = 0,05).

Conclusões

- 1) Os resultados obtidos neste estudo demonstram claramente o potencial das plantas de cobertura como estratégia eficaz para mitigar os efeitos tóxicos do cobre em solos vitícolas e melhorar a eficiência nutricional de porta-enxertos de videira. A análise dos parâmetros de crescimento e dos índices de eficiência nutricional evidencia que o cultivo prévio de plantas de cobertura, especialmente ervilhaca e o consórcio azevém + ervilhaca, promove melhorias significativas no desempenho das videiras jovens, tanto em solos não contaminados quanto em solos com alta concentração de cobre. No ambiente sem contaminação, a ervilhaca destacou-se consistentemente por proporcionar maior biomassa e elevada eficiência nutricional para todos os macronutrientes avaliados. Já em condições de contaminação por cobre, observou-se que o azevém e o consórcio azevém + ervilhaca apresentaram maior capacidade de atenuar os efeitos tóxicos do metal, mantendo níveis satisfatórios de crescimento e eficiência nutricional do porta-enxerto. Esta proteção pode ser atribuída a múltiplos mecanismos, incluindo a complexação do cobre pela matéria orgânica adicionada ao solo, alterações nas propriedades físico-químicas do ambiente rizosférico e possíveis interações com a microbiota benéfica.
- 2) Particularmente notável foi a capacidade das plantas de cobertura em manter ou até mesmo aumentar a eficiência de absorção e translocação de nutrientes sob alta concentração de cobre, enquanto no tratamento testemunha observou-se drástica redução destes parâmetros. Este efeito protetor foi mais pronunciado para nitrogênio e fósforo, nutrientes fundamentais nas fases iniciais de desenvolvimento das videiras. Embora a eficiência de utilização dos nutrientes tenha sido reduzida em todos os tratamentos na presença de alta dose de cobre, esta redução foi significativamente menor nos tratamentos com plantas de cobertura quando comparada à testemunha, evidenciando o papel crucial destas plantas na manutenção do equilíbrio nutricional em ambientes contaminados.
- 3) Os resultados ressaltam também o potencial do uso de consórcios entre gramíneas e leguminosas como estratégia otimizada para manejo de áreas vitícolas contaminadas. O consórcio azevém + ervilhaca combinou as vantagens de ambas as espécies, demonstrando particular eficiência na absorção e translocação de nutrientes em ambiente contaminado por cobre.

Esta complementaridade funcional sugere que sistemas diversificados podem apresentar maior resiliência e eficácia na remediação de solos contaminados e na promoção do desenvolvimento das culturas subsequentes. Estudos futuros poderiam explorar outras combinações de espécies e proporções de consórcio para maximizar estes benefícios em diferentes contextos edafoclimáticos

- 4) Do ponto de vista prático, estes resultados oferecem subsídios técnico-científicos valiosos para o manejo sustentável de áreas vitícolas com histórico de aplicação de fungicidas cúpricos, especialmente durante a fase crítica de renovação de vinhedos ou implantação de novos parreirais. A incorporação de plantas de cobertura nos sistemas vitícolas representa uma estratégia de baixo custo e elevado benefício ambiental, contribuindo não apenas para a mitigação da toxicidade do cobre, mas também para a conservação do solo, ciclagem de nutrientes e promoção da biodiversidade edáfica. Recomenda-se, portanto, a adoção destas práticas como componente essencial de sistemas vitícolas sustentáveis, especialmente em regiões com solos naturalmente ácidos e suscetíveis à toxicidade por metais pesados.

Referências

- CESCO, S.; SIGNORINI, M.; MAZZETTO, F.; PII, Y.; VIGANI, G.; BORRUSO, L.; LUGLI, P.; ORZES, G.; GENOVA, G.; TERZANO, R.; MIMMO, T.; BRUNETTO, G. A Smart and Sustainable Future for Viticulture Is Rooted in Soil: How to Face Cu Toxicity. **Applied Sciences**, v. 11, n. 3, article 907, Jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11030907>.
- FERNANDEZ-CALVINO, D.; ARIAS-ESTEVEZ, M.; DIAZ-RAVINA, M.; BAATH, E. Assessing the effects of Cu and pH on microorganisms in highly acidic vineyard soils. **European Journal of Soil Science**, v. 63, n. 5, p. 571-578, Oct. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01489.x>
- KOMÁREK, M.; SZÁKOVÁ, J.; ROHOSKOVÁ, M.; JAVORSÁ, H.; CHRASTNÝ, V.; BALÍK, J. Copper contamination of vineyard soils from small wine producers: a case study from the Czech Republic. **Geoderma**, v. 147, n. 1-2, p. 16-22, Sept. 2008. DOI : [10.1016/j.geoderma.2008.07.001](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.07.001).
- MACKIE, K. A.; SCHMIDT H. P.; MÜLLER, T.; KANDEELER, E. Cover crops influence soil microorganisms and phytoextraction of copper from a moderately contaminated vineyard. **Science of the Total Environment**, v. 500-501, p. 34-43, Dec. 2014. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2014.08.091](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.091).

MELO, G. W. B. de; FURINI, G.; BRUNETTO, G.; COMIN, J. J.; SIMÃO, D. G.; MARQUES, A. C. R.; MARCHEZAN, C.; SILVA, I. C. B.; SOUZA, M.; SOARES, C. R.; ZALAMENA, J. Identification and phytoremediation potential of spontaneous species in vineyard soils contaminated with copper. **International Journal of Phytoremediation**, v. 24, n. 4, p. 342-349, Jul. 2021. DOI : <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1940835>.

MIR, A. R.; PICHTEL, J.; HAYAT, S. Copper: Uptake, toxicity, and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil. **Biometals**, v. 34, n. 4, p. 737-759, April 2021. DOI: [10.1007/s10534-021-00306-z](https://doi.org/10.1007/s10534-021-00306-z).

PERRIA, R.; CIOFINI, A.; PETRUCCI, W. A.; D'ARCANGELO, M. E. M.; VALENTINI, P.; STORCHI, P.; CARELLA, G.; PACETTI, A.; MUGNAI, L.. A Study

on the Efficiency of Sustainable Wine Grape Vineyard Management Strategies. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 392, Feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020392>.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. Santa Maria, RS: Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC, 2016.

TEDESCO, M.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.