

PERSPECTIVAS FUTURAS SOBRE A CONTAMINAÇÃO EM SOLOS DE VINHEDOS, POMARES E TOXIDEZ EM PLANTAS

George Wellington Bastos de Melo⁽¹⁾,
Felipe Klein Ricachenevsky⁽²⁾,
Tadeu Luis Tiecher⁽³⁾,
Eduardo Giroto⁽⁴⁾,
Alcione Miotto⁽⁵⁾,
Médelin Marques da Silva⁽⁶⁾,
Edicarla Trentin⁽⁷⁾,
Gustavo Brunetto⁽⁸⁾

Resumo

A fruticultura é uma atividade agrícola de grande importância econômica e social no Brasil. As frutíferas, como a videira, quando cultivadas em solos que não possuem capacidade de disponibilizar a quantidade suficiente de nutrientes às plantas são submetidas a aplicações de fertilizantes. Porém, além de macronutrientes, os fertilizantes podem possuir na sua composição elementos como cobre (Cu), zinco (Zn) e entre outros. Estes elementos também podem ingressar em pomares e vinhedos através de aplicações foliares e via frutos de fungicidas, para o controle preventivo de doenças. Com isso, ao longo dos anos, se tem observado aumento dos teores de Cu e Zn em solos de pomares e vinhedos, até acima da capacidade de

⁽¹⁾Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciência do Solo, Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Uva e Vinho), Bento Gonçalves, RS, Brasil. E-mail: wellington.melo@embrapa.br

⁽²⁾Biólogo, Doutor em Biologia Celular e Molecular, Professor do Departamento de Botânica, Instituto de Bociências; Programa de Pós-Graduação em Biologia Celular e Molecular, Centro de Biotecnologia; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: felipecruzalta@gmail.com

⁽³⁾Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciência do Solo, Professor do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), campus Restinga, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: tadeu.t@hotmail.com

adsorção de solos, o que aumenta o potencial de toxidez às plantas de cobertura e videiras. Por isso, surge a necessidade da realização de pesquisas para o aprimoramento e desenvolvimento de práticas de manejo em áreas de pomares e vinhedos para a manutenção e ascensão do sistema produtivo. Assim, neste capítulo serão destacadas perspectivas de estudos futuros e demandas relacionadas à diminuição do aporte e disponibilidade de metais pesados no solo, bem como, o potencial de fitotoxidez nos cultivos. Além disso, abordaremos as possibilidades de entradas de metais pesados na cadeia alimentar animal e humana.

Palavras-chave: Fruticultura; Práticas de manejo; Metais pesados; Contaminação ambiental; Segurança alimentar.

1. Introdução

A Fruticultura é caracterizada majoritariamente por ser uma atividade agrícola intensiva e com grande importância econômica e social, porque emprega elevada quantidade de mão de obra, muitas vezes familiar, e tem a capacidade de gerar alta rentabilidade em pequenas áreas de cultivo. Para tanto, os produtores adotam modernas tecnologias no sistema de cultivo, visando a obtenção de elevadas produtividades, sempre que possível, aliado à qualidade adequada de frutos e seus derivados, exigência que tem aumentado nas últimas décadas pelo mercado consumidor.

As principais culturas frutícolas cultivadas no Brasil são perenes, o que confere elevado custo de implantação e a necessidade de ser pensado o sistema de produção do pomar/vinhedo a médio e longo prazo. Portanto, é necessário definirmos perspectivas para este setor tão importante para o Brasil, especialmente no sentido de possibilitar que essas áreas mantenham-se produtivas, sem prejuízos ambientais, em decorrência das práticas agrícolas adotadas, mas também para evitar ônus ao próprio sistema produtivo. Além disso, em uma sociedade onde cada vez mais se

⁽⁴⁾Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciência do Solo, Professor do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Bento Gonçalves, RS, Brasil. E-mail: eduardo.girotto@ifrs.edu.br.

⁽⁵⁾Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciência do Solo, Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), São Miguel do Oeste, SC, Brasil. E-mail: alcionemiotto@gmail.com

⁽⁶⁾Engenheira Agrônoma, Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Professora do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), campus Rolante, Rolante, RS, Brasil. E-mail: medelin.silva@rolante.ifrs.edu.br

⁽⁷⁾Engenheira Agrônoma, Pós-doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: edicarlatrentin@gmail.com

⁽⁸⁾Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciência do Solo, Professor do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil. Bolsista em Produtividade do CNPq. E-mail: brunetto.gustavo@gmail.com

discute a qualidade dos alimentos consumidos, é imperativo que o setor frutícola garanta a sanidade e a segurança dos produtos entregues aos consumidores.

Desta forma, neste capítulo apresentaremos algumas demandas futuras para diminuir o aporte e disponibilidade de metais pesados em pomares e vinhedos, bem como a toxidez em plantas causada pelos metais pesados. Além disso, serão apresentadas possibilidades e demandas de estudos para compreender a dinâmica desses elementos nas plantas e diminuir as concentrações de metais pesados em alimentos, com maior ênfase em frutas e seus derivados que serão ingeridos pelo ser humano ou animais.

2. Demandas futuras para diminuir o aporte e disponibilidade de metais pesados em solos

A fruticultura é uma atividade normalmente desenvolvida em pequenas áreas, onde muitas vezes, ocorrem aplicações de doses elevadas de fertilizantes ou outros agroquímicos, que podem aportar quantidades excessivas de nutrientes e metais pesados ao solo, ocasionando problemas ambientais. Desta forma, o planejamento e as recomendações devem ser específicos para cada realidade e não generalistas, para que os possíveis impactos negativos causados pela atividade vitivinícola no ambiente sejam minimizados. Nesse sentido, pesquisas são necessárias para reduzir ou mitigar, principalmente, as consequências do aporte excessivo de metais pesados nas áreas já implantadas e em novas áreas produtivas. Além disso, são necessários estudos focados em novas cultivares e práticas agrícolas que levem em consideração a complexidade de interações entre cultivar e o ambiente de cada sistema produtivo.

Em função da relação da prevenção de ocorrência de doenças (necessário nos vinhedos) pelo uso de fungicidas e do aporte de metais pesados em decorrência disso, as medidas e práticas de manejo recomendadas devem sempre considerar o impacto nas condições favoráveis às doenças. Desta forma, estudos e práticas de manejos devem ser direcionados para reduzir o número de intervenções e, conseqüentemente, o total aportado de metais pesados presentes em agroquímicos utilizados no controle de doenças nas frutíferas, como em vinhedos. No caso da utilização de produtos à base de cobre (Cu) em sistemas de produção orgânica, onde existe um limite máximo de Cu metálico que pode ser aplicado, os produtores dispõem basicamente de três opções para reduzir o aporte: i) reduzir o número de aplicações; ii) diminuir a concentração de Cu no fungicida; ou iii) complementar as aplicações com outros produtos, cujo ingrediente ativo não seja o Cu (Fioravanço et al., 2015).

Além de produtos alternativos à base de Cu (com menor percentual de Cu metálico), tem sido analisada a eficiência de outros produtos para o controle de doenças causadas por fungos nas videiras e em outras espécies frutíferas. Cavalcanti et al. (2020), verificaram que a utilização de um fertilizante organomineral classe “A” (FOA) com fosfito (composição indicada pelo fabricante: 14% C orgânico, 0,02% B e 3% de fosfito) possibilitou percentual de controle em folhas e cachos da cultivar Isabel (em nível de campo), igual a um produto fungicida químico (mancozebe+metalaxil-M) e da calda bordalesa (1%). Neste mesmo estudo, os autores verificaram que o extrato da planta *Reynoutria sachalinensis* (produto comercial já disponível), também possui potencial como alternativa de controle, porém com eficiência menor que o FOA.

Ainda relacionado com a aplicação de produtos para o controle de doenças, uma alternativa recomendada é melhorar a tecnologia de aplicação, como utilizar redutor do vento do atomizador, pontas de pulverização, pressão, e outras características, para contribuir na taxa de aplicação. Machado et al. (2020), comparam duas taxas de aplicação (120 L ha^{-1} e 424 L ha^{-1}) em um vinhedo da cultivar Isabel. Na taxa de 120 L ha^{-1} foi utilizada uma concentração (produto/L de calda) duas vezes maior do que na taxa de 424 L ha^{-1} . Esses autores observaram que mesmo utilizando uma calda mais concentrada na taxa de 120 L ha^{-1} houve redução de 42,4% no consumo de fungicidas por hectare. Combinado a essa possível redução no consumo total de fungicidas por hectare, também é possível fazer a rotação de princípios ativos utilizando aqueles que não possuem Cu e Zn na sua composição, o que precisa ser estudado com mais atenção por empresas e instituições de ciência e tecnologia.

O uso de cultivares resistentes a doenças fúngicas também apresenta potencial para redução na aplicação de fungicidas (Vezzulli et al., 2018). A primeira possibilidade de utilização de resistência é a escolha entre cultivares americanas ou viníferas. O desenvolvimento de cultivares com resistência a diferentes fitopatógenos e denominadas de ‘PIWI’ tem aumentado nos últimos anos, sendo que um dos principais focos dessas cultivares é a resistência ao míldio, podendo ser utilizada em sistemas convencionais e orgânicos. O uso mais frequente destas cultivares pode trazer benefícios importantes como a redução do número de tratamentos com fungicidas por ciclo, a redução de custos e a redução significativa no uso de fungicida à base de Cu e diminuição do acúmulo em solos de vinhedos (Pedneault & Provost, 2016). No Brasil estas cultivares já estão sendo avaliadas por instituições de ensino e pesquisa. De Bem et al. (2016), observaram que três cultivares ‘PIWI’ (‘Bronner’, ‘Regent’, ‘Cabernet Carbon’), em condições de campo,

tiveram menor incidência e severidade de míldio, além de apresentarem potencial para produção de vinhos de qualidade nas regiões de altitude do Sul do Brasil. Porém, a rede de estudos ainda precisa avançar para consolidar alternativas para as cultivares tradicionais e consagradas que o mercado consumidor está acostumado para produção sucos, vinhos e espumantes.

Entre as demandas é fundamental que a adubação em pomares e vinhedos seja realizada com o intuito de disponibilizar os nutrientes necessários às plantas de forma equilibrada. Para isso, o manejo da adubação sempre deve ser embasado em critérios técnicos, em modelos de previsão e pelo monitoramento da área através de análise de solo, análise de tecido foliar e expectativa de produtividade. Nesse sentido, o desafio será aumentar a eficiência de adubações, tanto de crescimento como de manutenção, pois tem-se observado aumento nos teores de nutrientes em solos cultivados com videiras (Melo & Zalameña, 2016). Assim, é de grande relevância que as informações básicas, normalmente disponíveis em análises de solo e planta, que são imprescindíveis para realizar uma adubação balanceada, manter produtividade de frutos adequadas e diminuir a possibilidade de contaminação ambiental, sejam as principais ferramentas para as tomadas de decisões de técnicos.

Como as recomendações ainda não levam em consideração a contaminação de metais e as possíveis interações na adubação da videira, é necessário que as práticas agrícolas que mitigam a fitotoxicidade do Cu nas plantas, principalmente jovens, sejam conhecidas e adotadas nos sistemas de produção (Melo et al., 2015).

Nas áreas que recebem adubação orgânica com frequência, a expectativa é de que os teores de fósforo (P) no solo fiquem muito altos com o tempo, especialmente na camada superficial, devido à aplicação superficial e do não revolvimento do solo. Isso pode não causar potenciais problemas às plantas. Porém, representa um potencial problema à contaminação ambiental. Portanto, as doses da adubação orgânica devem ser definidas a partir da análise do adubo e das necessidades da cultura. Aliado a isso, o uso da adubação orgânica associado à mineral parece ser a estratégia mais racional para tentar manter o equilíbrio na adição de nitrogênio (N), P e metais pesados em solos.

A intensificação da introdução e manutenção de plantas de cobertura nas entrelinhas das videiras é outra prática importante, com o intuito de aumentar a quantidade de raízes e a diversidade de tipos de sistemas radiculares capazes de absorver metais pesados disponíveis no solo e assim diminuir o impacto negativo nas plantas frutíferas. Isso também contribuirá para aumentar a atividade biológica

e o teor de matéria orgânica em solos, mesmo que em formas menos recalcitrantes, o que aumenta os sítios de adsorção de metais pesados presentes na solução do solo, diminuindo sua mobilidade e, por consequência, a absorção e potenciais efeitos indesejáveis sobre as frutíferas e seus produtos derivados. Os estudos em áreas de vinhedos que avaliem espécies, formas de manejo e interação com produção e qualidade de uvas ainda são escassos em áreas contaminadas ou de replantio.

3. Demandas futuras para diminuir o potencial de toxidez de metais pesados em cultivos

Uma alternativa para aumentar a tolerância aos metais pesados como Cu e Zn em sistemas de cultivos é a identificação e utilização de genótipos tolerantes. Genótipos com maior tolerância/resistência podem ser utilizados em substituição aos mais sensíveis, caso não apresentem produtividade e resistência fitossanitária reduzida; ou podem ser fontes de genes e alelos a serem transferidos para cultivares produtivas e comumente utilizadas por meio de cruzamentos controlados e/ou engenharia genética. Especificamente, no caso de frutíferas, como a videira, a identificação de porta-enxertos mais tolerantes que não prejudiquem o desenvolvimento adequado das copas e produtividade é promissor.

A literatura já apresenta alguns resultados, onde destacamos um estudo em que dois genótipos de porta-enxertos de videiras, Fercal e 196.17, foram avaliados em solos alcalino e ácido, quanto a tolerância ao excesso de Cu, com (consórcio) e sem presença de plantas de cobertura, no caso, aveia (Marastoni et al., 2019a). Em geral, o genótipo 196.17 apresentou melhor crescimento em solo com excesso de Cu, quando cultivado isoladamente. Plantas de ambos genótipos, quando cultivados sem consórcio, apresentaram maior acúmulo de Cu nas raízes em comparação com as folhas, e ambas tiveram redução no crescimento quando expostas a concentrações tóxicas de Cu. No entanto, o porta-enxerto Fercal pareceu ser mais beneficiado pela presença das plantas de aveia. O genótipo 196.17 apresentou maior secreção de compostos fenólicos, flavonóides e flavonóis em comparação com Fercal, quando cultivados sem o consórcio com plantas de aveia. Quando em consórcio, Fercal aumentou a secreção destes compostos, o que ao menos parcialmente concorda com o padrão de expressão de transportadores que possivelmente fazem a secreção de compostos fenólicos, e pode estar relacionado com o melhor crescimento de plantas deste genótipo na presença de aveia. Além disso, foi observado que concentrações elevadas de Cu causaram aumento das concentrações não apenas de Cu, mas também de Fe no simplasto das raízes, em ambos os genótipos e independentemente de serem cultivadas em conjunto com plantas de aveia. Plantas

de aveia também foram afetadas pelo excesso de Cu, tendo redução de sua biomassa. Como conclusão, os autores sugerem que o uso de consórcio, embora gere competição entre as plantas, pode ser uma alternativa para diminuir a toxidez por Cu em videiras, ainda que sua aplicação deva ser feita para genótipos específicos (Marastoni et al., 2019a). Esse resultados estão de acordo com aqueles obtidos por De Conti et al. (2018) e colaboradores, que observaram que plantas do porta-enxerto de videira *Vitis vinifera* L. 'Paulsen 1103', cultivadas em solo com 40 mg kg⁻¹ de Cu, cresceram de forma mais adequada, quando cultivadas em solo com presença de gramíneas nativas do Bioma Pampa, especialmente, *Paspalum plicatulum* Michx..

Em um segundo trabalho realizado por Marastoni et al. (2019b) utilizando os mesmos genótipos de videira, foi observado novamente que o porta-enxerto 196.17 é mais tolerante ao excesso de Cu quando cultivado em associação com aveia. Como esperado, o excesso de Cu promoveu a redução no crescimento de raízes e de parte aérea, independente do genótipo e da presença de aveia. Avaliação da morfologia do sistema radicular confirmaram que foi observado anteriormente: Fercal, embora mais sensível ao excesso de Cu, parece se beneficiar mais do co-cultivo com aveia, apresentando modificações nas raízes que permitem explorar maior área de solo em busca de nutrientes e diminuir efeitos da toxidez por Cu. Além disso, análises de expressão de transportadores das famílias CTr, NRAMP e ZIP foram conduzidas, na tentativa de compreender quais alterações transcricionais podem explicar as diferenças entre os genótipos. Os dados indicaram que plantas do genótipo 196.17 apresentam deficiência de Mn associada ao excesso de Cu, e respondem regulando genes da família NRAMP, relacionados ao aumento da absorção de Mn em *Arabidopsis thaliana* (Caillate et al., 2010). Já plantas do genótipo Fercal não parecem responder da mesma forma, sugerindo uma possível maneira de compreender as respostas distintas. Além disso, foi observado que ambos genótipos reduzem a expressão de VvIRT1, o provável transportador de alta afinidade de Fe em plantas de videira, o que está relacionado ao aumento da concentração de Fe em plantas expostas ao excesso de Cu (Marastoni et al., 2019a; 2019b). Estes genótipos são excelentes pontos de partida para elucidar mecanismos de tolerância a excesso de Cu em plantas de videira.

Os genótipos utilizados nos trabalhos citados acima são oriundos de um mesmo cruzamento, portanto são geneticamente próximos. No entanto, porta-enxertos utilizados no cultivo de videira também incluem diferentes genótipos de videira, como *Vitis vinifera* ssp *sylvestris* (Cambrollé et al., 2013, 2015), e até mesmo outras espécies do gênero *Vitis*, como *V. labrusca* (Nunes et al., 2016) e outras, como *V. rotundifolia*, *V. rupestris*, *V. riparia*, *V. berlandieri* e *V. amurensis* (Arnold & Schnitzler, 2020; Daldoul et al., 2020).

Além disso, destacamos o estudo realizado por Trentin (2020) e colaboradores, que avaliaram os porta-enxertos de videira mais tolerantes ao excesso de Cu. Os autores avaliaram os porta-enxertos Paulsen 1103, SO4, IAC 572 e Isabel (utilizada como pé franco), cultivados em solução nutritiva controle ($0,3 \mu\text{M Cu}$) e com alta concentração de Cu ($80 \mu\text{M Cu}$). Todos os porta-enxertos avaliados apresentaram maior concentração de Cu no sistema radicular em relação a parte aérea e aumento na síntese de enzimas antioxidantes. O porta-enxerto Paulsen 1103 apresentou maior tolerância ao excesso de Cu, com efeitos menos pronunciados nas variáveis de crescimento e fisiológicas. Enquanto que, o porta-enxerto Isabel foi o mais sensível ao excesso de Cu em solução, com o amarelecimento e murchamento das folhas (Figura 1).

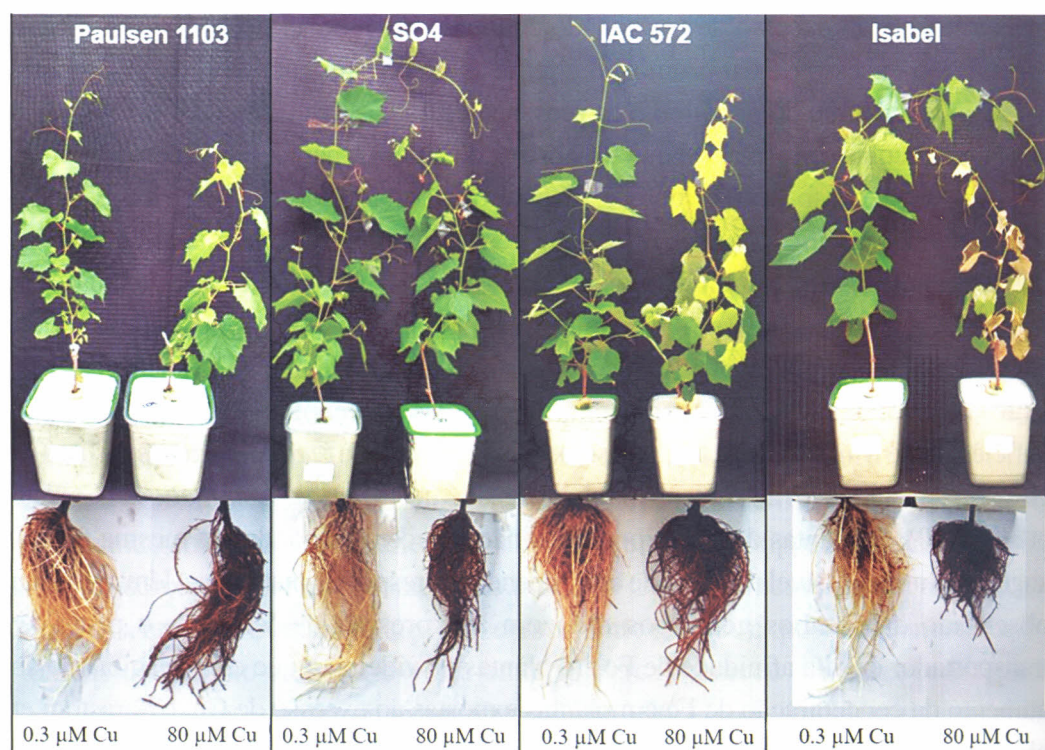


Figura 1. Imagem dos porta-enxertos (PE) de videira (Paulsen 1103, SO4, IAC 572 e Isabel), após 15 dias de cultivo em solução nutritiva controle ($0,3 \mu\text{M Cu}$) e com alta concentração de Cu ($80 \mu\text{M Cu}$). Fonte: Trentin, E. (2020).

Assim, podemos observar que estudos já foram realizados, mas outros precisam ainda ser executados, especialmente, porque o número, por exemplo, de porta-enxertos e cultivares usados na fruticultura nacional ou mesmo internacional é muito grande. A busca por mecanismos de tolerância/resistência a metais pesados na diversidade biológica é uma grande promessa para o melhoramento desta e de

outras características de videira ou mesmo outras frutíferas, como inclusive já acontece para a tolerância à patógenos, área onde há avanços mais substanciais (Wang et al., 2018; Smith et al., 2018). No futuro, tanto a obtenção de plantas tolerantes via cruzamentos assistidos por marcadores, quando por engenharia genética, poderão mitigar os efeitos da toxidez por Cu.

Além do uso de genótipos tolerantes, a inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA), como já destacado no capítulo 13, pode ser uma estratégia a mais a ser usada para diminuir a toxidez de metais pesados em plantas, como nas frutíferas, entre elas, a videira. Estudos reportam, como o de Ambrosini et al. (2015), que a inoculação de FMA, como *Dentiscutata heterogama*, *Gigaspora gigantea*, *Acaulospora morrowiae*, *A. colombiana*, *Rhizophagus clarus*, *R. irregularis*, em mudas de videiras pode diminuir o potencial de toxidez de Cu e favorecer o estabelecimento das mudas em áreas contaminadas. Os autores observaram que as mudas de videiras inoculadas com os FMA, especialmente *Rhizophagus clarus* e *R. irregularis*, apresentaram maior absorção de P e crescimento do sistema radicular em solo contaminado com alta concentração de Cu. As mudas de videira apresentaram maior absorção de Cu, porém, a maior parte do Cu foi armazenado no sistema radicular, reduzindo os efeitos de toxidez na parte aérea das plantas. Em outro estudo realizado por Rosa et al., (2016), os autores avaliaram o efeito da inoculação dos FMAs, *Dentiscutata heterogama*, *Acaulospora morrowiae* e *Rhizophagus clarus*, sobre parâmetros fisiológicos em videiras cultivadas em solo contaminado com Cu. Os autores observaram que a inoculação de FMAs contribuiu para diminuir a toxidez por Cu nas plantas de videira. As plantas inoculadas com *Rhizophagus clarus* apresentaram maior crescimento e menor concentração de Cu no tecido. A inoculação dos FMAs além de favorecer o crescimento das plantas devido ao aumento da superfície de absorção do sistema radicular das plantas, favorecendo a absorção de água e nutrientes, especialmente de P, também reduz os efeitos de toxidez por excesso de Cu disponível (Soares & Siqueira, 2008; Brunetto et al., 2016). O FMAs podem absorver e armazenar o excesso de metal em suas estruturas fúngicas, como esporos e vesículas, além de exsudar substâncias orgânicas como a glomalina, a qual pode formar complexos com o Cu, reduzindo sua disponibilidade para absorção pelas plantas (Bedini et al., 2010; Ambrosini et al., 2015).

Mas nem sempre os resultados positivos da inoculação de FMAs em mudas jovens, observados em condições controladas, tem sido também constatados a campo, por exemplo, em vinhedos instalados em solos com excesso de Cu ou mesmo Zn. Isso acontece em parte, porque estirpes de FMAs inoculadas nas mudas em viveiro não conseguem elevadas porcentagens de colonização em plantas em crescimento no campo, provavelmente, por causa de adversidades relacionadas a

fatores edafoclimáticos que dificultam adaptação, e competição pela colonização das raízes com fungos nativos do local de cultivo já adaptados às condições ambientais e de excesso de metal. Assim, pode ser que FMAs nativos pré-existent no solo, em determinada região, sejam mais efetivos na colonização, o que indicaria a necessidade de inicialmente selecionar as estirpes nativas, desenvolver protocolos de multiplicação, seguido de protocolos de inoculação, além de avaliações em porta-enxertos e cultivares, não somente em condições controladas, mas sim, a campo. Este tipo de informação ainda é escassa, por exemplo, em videiras cultivadas a campo em solos com excesso de Cu e Zn. Já existem estudos e inoculantes comerciais de FMAs, porém estudos e o desenvolvimento de produtos para inoculação em áreas de cultivos agrícolas tendem a aumentar, considerando o benefício destes organismos ao ambiente e sistema produtivo.

4. Demandas futuras para diminuir o ingresso de metais pesados na cadeia alimentar animal e humana

4.1. Potencial de aumento das concentrações de cobre e zinco em frutos

Conforme apresentado no Capítulo 4, o Cu é acumulado predominantemente nas raízes das plantas, sem que ocorra translocação proporcional para a parte aérea, como ilustrado na Figura 2, num exemplo com plantas de videira. Isto ocorre devido à baixa mobilidade do Cu em plantas e a sua retenção, especialmente, no apoplasto das raízes, sem que ocorra a sua entrada no interior da célula. Devido a isso, a

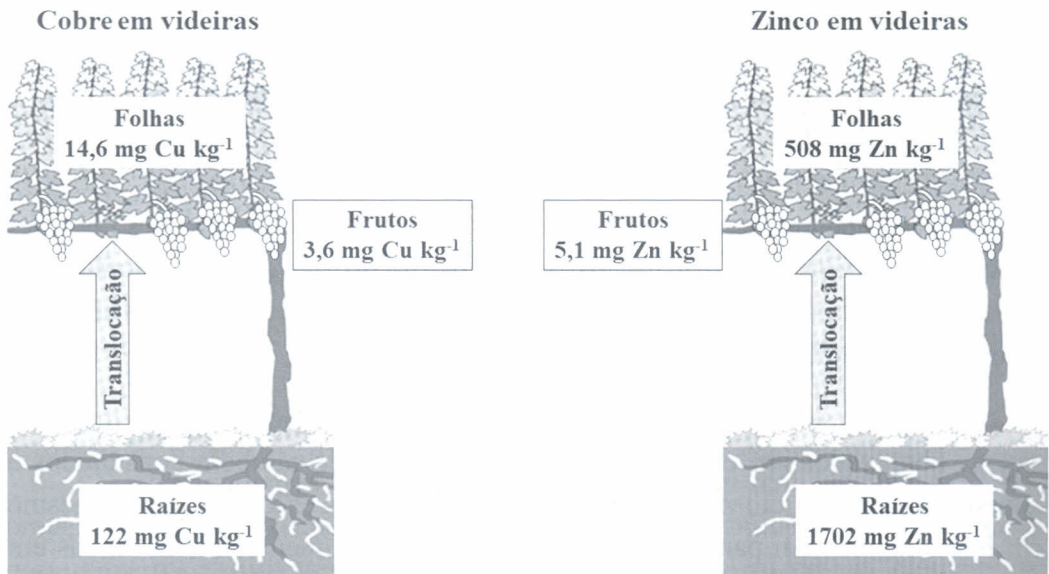


Figura 2. Concentrações de Cu e Zn em raízes e folhas de videiras de acordo com Tiecher et al. (2017) e em cachos de uva, de acordo com Pessanha (2007).

concentração deste elemento na parte aérea das plantas é bem menor do que a observada nas raízes, numa proporção raízes:parte aérea de, aproximadamente 8:1, de acordo com Tiecher et al., (2017). O Cu encontrado nos frutos geralmente é translocado a partir das folhas que já possuem baixos teores do elemento. Desta forma, a concentração deste elemento nos frutos é ainda menor (3,6 mg Cu kg⁻¹) (Pessanha, 2007). Isso pode estar relacionado ao fluxo transpiratório que transporta o Cu das raízes pela seiva no xilema em direção às folhas. Como a transpiração em frutos é baixa, uma pequena quantidade de Cu pode ser transportada até esse órgão através desse mecanismo.

Por outro lado, o Zn é translocado em maiores quantidades para a parte aérea de plantas de videira. Conforme Tiecher et al., (2017) isso ocorre numa proporção de aproximadamente 3:1 entre raízes e parte aérea, notavelmente maior que para Cu. Contudo, quando se observa os teores deste elemento em frutos, as concentrações são bem menores que nas folhas, em média 5,1 mg Zn kg⁻¹ (Pessanha, 2007). As características químicas destes dois metais se manifestam no solo, na rizosfera e também na planta, devido à maior afinidade do Cu por grupos funcionais orgânicos, em comparação ao Zn, por exemplo. Aliado a isso, a translocação exige mecanismos ativos para retirar estes elementos das folhas e transportá-los para os frutos.

Cabe ressaltar que uma importante fonte de aporte dos metais Cu e Zn aos frutos é exógena, principalmente advinda de agrotóxicos como os fungicidas aplicados para o controle de doenças e que contém esses metais em sua composição. Porém, os estudos realizados até o momento indicam que o Cu e Zn presentes nos solos contaminados apresentam baixa translocação até os frutos e, portanto, pouco contribuem para incrementar os teores desses elementos neste órgão.

Até o momento diversos estudos já foram realizados para compreender os processos bioquímicos e fisiológicos nas plantas frutíferas jovens e que coabitam os pomares com excesso de metais pesados, principalmente, em condições controladas em casa de vegetação. Porém, ainda existe a necessidade da realização de estudos a campo com as plantas de cobertura e com plantas adultas de frutíferas, para a melhor compreensão desses fenômenos e o real impacto ocasionado nessas plantas. Além disso, são necessários estudos para a avaliação do ciclo completo da cultura, para melhorar a compreensão da dinâmica dos metais no interior das plantas, bem como o potencial incremento desses elementos nos frutos consumidos *in natura* e nos produtos elaborados a partir desses frutos. A partir desses conhecimentos pode-se garantir a segurança alimentar aos consumidores desses produtos e a sustentabilidade econômica e ambiental dos sistemas de produção.

4.2. Potencial de absorção de cobre e zinco pelo organismo humano

Micronutrientes como o Cu e Zn possuem diversas funcionalidades e, por isso, quantidades adequadas deles são necessárias para o funcionamento do corpo humano. Convém destacar que ambos podem ser obtidos por meio de uma alimentação balanceada e saudável, composta de alimentos provenientes de diversas fontes vegetais e animais.

O Cu e Zn fazem parte de proteínas e enzimas do metabolismo humano. O Zn desempenha funções importantes na respiração celular, no sequestro de radicais livres, na proteção contra peroxidação lipídica, na percepção de sabor e odor, na cicatrização de feridas, na produção de esperma, no desenvolvimento fetal, no crescimento e maturação sexual e na resposta imunológica. Já o Cu exerce importância na resposta imunológica, reparação de tecidos danificados e neutralização de radicais livres (Gharibzahedi & Jafari, 2017; Sloup et al., 2017).

Concentrações elevadas de Zn podem ser verificadas em carnes (exemplos: bovina, ovina, suína, aves e peixes) e vegetais (exemplos: grãos inteiros fermentados, gérmen de trigo, espinafre, sementes de abóbora, castanha de caju, grão-de-bico, cogumelos e cacau). A ingestão diária recomendada desse mineral para adultos é de 7 mg (Anvisa, 2005). Apesar de o Zn ser encontrado em diversas fontes alimentícias, cerca de 30% da população mundial apresenta deficiência desse mineral, o que pode resultar na incidência de diversos distúrbios e doenças. Essa deficiência pode estar relacionada à dificuldade de acesso a alimentos com alta concentração de Zn e/ou da sua absorção parcial. Cabe ressaltar que o teor total do mineral no alimento não reflete a quantidade absorvida pelo organismo humano, pois apenas uma fração do mineral é biodisponível (Jafari & McClements, 2017). A fração biodisponível é a porção liberada pela matriz alimentícia no trato gastrointestinal que atinge a circulação sistêmica e assim pode ser absorvida e utilizada para as funções fisiológicas usuais do organismo humano (Carbonell-Capella et al., 2014).

A biodisponibilidade do Zn é fortemente afetada por fatores anti-nutricionais, como fitatos e polifenóis. Esses potentes inibidores, quando presentes nos tecidos vegetais ingeridos, formam complexos e quelatos com o Zn, impedindo a absorção (Gharibzahedi & Jafari, 2017; Gibson et al., 2018). Isso acontece tanto para alimentos com teores baixos ou normais de Zn, quanto para aqueles com teores mais altos, como os provenientes de áreas de solo contaminado por esse metal. Como ocorre para a interpretação dos teores totais de metais pesados no solo, o teor total no alimento ingerido não é um bom indicativo de sua disponibilidade,

pois muitas vezes a fração disponível, que é aquela absorvida pelo organismo, é baixa.

O Cu pode ser encontrado em fontes vegetais (exemplos, feijões, grão-de-bico, castanha de caju, gergelim, grãos inteiros, couve, cogumelos, frutas secas - ameixa, abacate) e animais (exemplos, frutos do mar e queijo de cabra). Ademais, o Cu também é detectado na água utilizada para consumo e preparo dos alimentos (Gharibzahedi & Jafari, 2017). Algumas dessas fontes alimentícias podem acumular níveis tóxicos de Cu, gerando problemas à saúde humana (Shabbir et al., 2020). Embora o aporte seja essencial para as atividades do organismo humano, uma sobrecarga desse mineral pode resultar em dano oxidativo e morte celular. Contudo, os mecanismos homeostáticos do corpo humano controlam a absorção e excreção do Cu (Turnlund et al., 2005). Nesse contexto, é preconizada uma ingestão diária de 0,9 mg de Cu, o que minimiza tanto sua deficiência, quanto a toxicidade (Anvisa, 2005). É importante destacar que comumente ocorre ingestão diária de 2 à 5 mg de Cu, excedendo a quantidade segura sugerida (Angelova et al., 2011).

A taxa de absorção e biodisponibilidade do Cu no intestino humano pode ser influenciada por diferentes fatores, como a idade e o sexo. Idosos e mulheres podem apresentar concentrações mais elevadas de Cu no plasma sanguíneo, devido à diferenças na homeostase. Outro fator importante é a composição dos alimentos ingeridos, em que a presença de cátions divalentes (Zn, Fe, estanho e molibdênio) proporcionam um efeito antagonista à absorção intestinal de Cu (Wapnir, 1998).

Ressaltamos que algumas estratégias vêm sendo elaboradas para elevar a ingestão de Zn pela população em locais onde a ingestão desse elemento é reduzida, sendo que uma delas é a biofortificação dos cultivos, área do conhecimento que possui elevada demanda de estudos, inclusive em nível mundial. Por outro lado, existe uma linha tênue entre a deficiência e a toxicidade do Cu. Em um estudo recente, por exemplo, não foram observados riscos à saúde dos seres humanos em função do consumo de hortaliças como o tubérculo de beterraba e das folhas da cabeça de repolho cultivadas em solução nutritiva com elevadas concentrações de Cu (até 1.02 mg Cu L⁻¹) (Schmitt et al., 2020).

Porém, ainda carecemos de estudos que façam a avaliação das concentrações de metais nos frutos de frutíferas cultivadas em ambientes contaminados com metais pesados. A partir disso e conhecendo-se as doses máximas de ingestão diária de determinado metal, será possível aumentar a assertividade quanto à segurança do consumo de alimentos oriundos desses ambientes. Aliado a isso, a avaliação dos produtos elaborados a partir dos frutos também é importante, pois podem ocorrer

alterações na disponibilidade desses elementos nos processos de elaboração. Embora tenhamos fortes indícios da pequena inserção de metais pesados na cadeia alimentar humana, a execução de estudos que avaliem de forma abrangente a presença de metais em frutos contribuiria para aumentar a confiabilidade dos consumidores na cadeia produtiva da fruticultura.

5. Considerações finais

O conhecimento básico sobre a regulação da absorção e transporte de metais em plantas é incipiente, bem como sua integração com a dinâmica no solo, absorção em produtos alimentícios e efeito do processamento pré-consumo. Variações em cada etapa, desde escolha de solo, genótipos, espécies, manejo, métodos de processamento e armazenamento potencialmente impactam na concentração de metais, podendo afetar a química e biologia do solo, a fisiologia da planta, até ter efeitos na saúde animal e humana. Portanto, estudos que avaliem estes efeitos e que efetivamente integrem-nos ao sistema produtivo será crucial para evitarmos efeitos deletérios dos metais, e ainda permitir o seu uso racional.

6. Referências bibliográficas

- Ambrosini, V.G.; Voges, J.G.; Canton, L.; Couto, R.R.; Ferreira, P.A.A.; Comin, J.J.; Melo, G.W.B.; Brunetto, G.; Soares, C.R.F.S., 2015. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on young vines in copper-contaminated soil. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 46, n. 4, p. 1045–1052.
- Angelova, M.; Asenova, S.; Nedkova, V.; Koleva-Kolarova, R., 2011. Copper in the human organism. **Trakia Journal of Sciences**, 9, 88-98.
- ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da diretoria colegiada da Agência Nacional de Vigilância Sanitária RDC nº 269, de 22 de setembro de 2005. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/legislacao-1/biblioteca-de-normas-vinhos-e-bebidas/resolucao-rdc-no-269-de-22-de-setembro-de-2005.pdf/view>>. Acesso em: 27 jan. 2021.
- Arnold, C. & Schnitzler, A., 2020. Ecology and genetics of natural populations of North American *Vitis* species used as rootstocks in European grapevine breeding programs. **Frontiers in Plant Science**, 11:866.
- Bedini, S.; Turrini, A.; Rigo, C.; Argese, E.; Giovannetti, M., 2010. Molecular characterization and glomalin production of arbuscular mycorrhizal fungi colonizing a heavy metal polluted ash disposal island, downtown Venice. **Soil Biology and Biochemistry**, 42:758-765.
- Brunetto, G.; Melo, G.W.B.; Terzano, R.; Del Buono, D.; Astolfi, S.; Tomasi, N.; PII, Y.; Mimmo, T.; Cesco, S., 2016. Copper accumulation in vineyard soils: Rhizosphere processes and agronomic practices to limit its toxicity. **Chemosphere**, v. 162, p. 293 – 307.
- Cailliatte, R.; Schikora, A.; Briat, J. F.; Mari, S.; Curie, C., 2010. High- affinity manganese uptake

by the metal transporter NRAMP1 is essential for Arabidopsis growth in low manganese conditions. **Plant Cell**, 22, 904–917.

Cambrollé, J.; García, J.L.; Figueroa, M.E.; Cantos, M., 2015. Evaluating wild grapevine tolerance to copper toxicity. **Chemosphere**, 120: 171-8.

Cambrollé, J.; García, J.L.; Ocete, R.; Figueroa, M.E.; Cantos, M., 2013. Growth and photosynthetic responses to copper in wild grapevine. **Chemosphere**, 93: 294-301.

Carbonell-Capella, J. M.; Buniowska, M.; Barba, F.J.; Esteve, M. J.; Frígola, A., 2014. Analytical methods for determining bioavailability and bioaccessibility of bioactive compounds from fruits and vegetables: A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 13, 155–172.

Cavalcanti, F.R.; Cassuba, K.F.; Fioravanço, J.C., 2020. **Avaliação de produtos biológicos e um indutor de resistência no controle do míldio da videira**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 24p. (Embrapa Uva e Vinho. Circular Técnica, 149).

Daldoul, S.; Boubakri, H.; Gargouri, M.; Mliki, A., 2020. Recent advances in biotechnological studies on wild grapevines as valuable resistance sources for smart viticulture. **Molecular Biology Reports**, 47: 3141-3153.

De Bem, B.; Brighenti, E.; Bonin, B.F.; Allebrandt, R.; Araújo, L.; Brighenti, A.F.; Bogo, A., 2016. Downy mildew intensity in tolerant grapes varieties in highlands of southern Brazil. **BIO Web of Conferences**, 7.

De Conti, L.; Melo, G.W.B.; Ceretta, C.A.; Tarouco, C.; Marques, A.; Nicoloso, F.; Tassinari, A.; Tiecher, T.; Cesco, S.; Mimmo, T.; Brunetto, G., 2018. Photosynthesis and growth of young grapevines intercropped with native grasses in soils contaminated with copper. **Acta Horticulturae**. p. 179-184.

Fioravanço, J.C.; Hunoff, T.S.; Zílio, R.; Cavalcanti, F.R., 2015. **Alternativas para redução de cobre em caldas usadas no controle do míldio da videira**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 8p. (Embrapa Uva e Vinho. Circular Técnica, 119).

Gharibzahedi, S.M.T.; Jafari, S.M., 2017. The importance of minerals in human nutrition: Bioavailability, food fortification, processing effects and nanoencapsulation. **Trends in Food Science & Technology**, 62, 119-132. doi: 10.1016/j.tifs.2017.02.017.

Gibson, R. S.; Raboy, V.; King, J. C., 2018. Implications of phytate in plant-based foods for iron and zinc bioavailability, setting dietary requirements, and formulating programs and policies. **Nutrition Reviews**, 76, 793-804.

Jafari, S. M.; McClements, D. J., 2017. Nanotechnology approaches for increasing nutrient bioavailability, in: Toldra, F. (Eds.), **Advances in Food and Nutrition Research**. Academic Press, Elsevier, London, UK, pp. 1-30.

Machado, O.D.C.; Almança, M.A.K.; Fontana, G.H.; Costella, B.R.; Azevedo, L.; Aimi, R. 2020. Qualidade da pulverização de um vinhedo cultivar Isabel com redução de vento e de taxa de aplicação. **Revista Brasileira de Viticultura e Enologia**, 12, 48-56.

Marastoni, L.; Sandri, M.; Pii, Y.; Valentinuzzi, F.; Brunetto, G.; Cesco, S.; Mimmo, T., 2019a.

- Synergism and antagonisms between nutrients induced by copper toxicity in grapevine rootstocks: Monocropping vs. intercropping. **Chemosphere**, 214: 563-578.
- Marastoni, L.; Sandri, M.; Pii, Y.; Valentinuzzi, F.; Cesco, S.; Mimmo, T., 2019. Morphological root responses and molecular regulation of cation transporters are differently affected by copper toxicity and cropping system depending on the grapevine rootstock genotype. **Frontiers in Plant Science**, 10: 946.
- Melo, G.W.; Zalameña, J. 2016. **Retrato da Fertilidade de Solos Cultivados com Videira nas Regiões da Serra e Campanha Gaúcha**. Comunicado Técnico 181 - Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves-RS, Brasil, v. 181, p. 1-9.
- Melo, G.W.; Zalameña, J.; Albarello, J.B.; Rodighero, K.; Ceretta, C.A.; Da Silva, L.S.; Soares, C.R.; Ambrosini, V.; Brunetto, G. **Alternativa de Práticas para o Cultivo de Videiras em Solos com Alto Teor de Cobre**. Comunicado Técnico, Bento Gonçalves, RS, Brasil, v. 171, p. 6, 2015.
- Nunes, N.A.S.; Leite, A.V.; Castro, C.C., 2016. Phenology, reproductive biology and growing degree days of the grapevine 'Isabel' (*Vitis labrusca*, Vitaceae) cultivated in northeastern **Brazilian Journal of Biology**, 76, 975-982.
- Pedneault, K.; Provost, C., 2016. Fungus resistant grape varieties as a suitable alternative for organic wine production: Benefits, limits, and challenges. **Scientia Horticulturae**, 208, 57- 77.
- Rosa, D.J.; Ambrosini, V.G.; Brunetto, G.; Soares, C.R.F.S.; Borghezán, M.; Pescador, R., 2016. Physiological parameters in vines 'Paulsen 1103' (*Vitis berlandieri* x *Vitis rupestris*) inoculated with mycorrhizal fungi in soil contaminated with copper. **Ciência e Técnica Vitivinícola**, 31(1) 14-23.
- Schmitt, O.J.; Brunetto, G.; Chassot, T.; Tiecher, T.L.; Marchezan, C.; Tarouco, C.P.; De Conti, L.; Lourenzi, C.R.; Nicoloso, F.T.; Kreutz, M.A.; Andriolo, J.L., 2020. Impact of Cu concentrations in nutrient solution on growth and physiological and biochemical parameters of beet and cabbage and human health risk assessment. **Scientia Horticulturae**, 272, 109558.
- Shabbir, Z.; Sardar, A.; Shabbir, A.; Abbas, G.; Shamshad, S.; Khalid, S.; Natasha, N.; Murtaza, G.; Dumat, C.; Shahid, M., 2020. Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. **Chemosphere**, 1-129.
- Sloup, V.; Jankovská, I.; Nechybová, S.; Perinková, P.; Langrová, I., 2017. Zinc in the Animal Organism: A review. **Scientia Agriculturae Bohemica**, 48, 13-21.
- Smith, H.M.; Clarke, C.W.; Smith, B.P.; Carmody, B.M.; Thomas, M.R.; Clingeffer, P.R.; Powell, K.S., 2018. Genetic identification of SNP markers linked to a new grape phylloxera resistant locus in *Vitis cinerea* for marker-assisted selection. **BMC Plant Biology**, 18: 360.
- Soares, C. R. F. S.; Siqueira, J. O., 2008. Mycorrhiza and phosphate protection of tropical grass species against heavy metal toxicity in multi-contaminated soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 44, p. 833-841.
- Trentin, E., 2020. Seleção de porta-enxertos de videiras e amenizantes como estratégias para reduzir a fitotoxidez por cobre. (Tese de Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

Turnlund, J.R.; Keyes, W. R.; Kim, S, K.; Domek, J. M., 2005. Long-term high copper intake: effects on copper absorption, retention, and homeostasis in men. **The American Journal of Clinical nutrition**, 81, 822-8.

Vezzulli, S.; Vecchione, A.; Stefanini, M.; Zulini, L., 2018. Downy mildew resistance evaluation in 28 grapevine hybrids promising for breeding programs in Trentino region (Italy). **European Journal of Plant Pathology**, 150(2), 485-495.

Wang, C.; Wu, J.; Zhang, Y.; Lu, J., 2018. *Muscadinia rotundifolia* 'Noble' defense response to *Plasmopara viticola* inoculation by inducing phytohormone-mediated stilbene accumulation. **Protoplasma**, 255: 95-107.

Wapnir, R. A., 1998. Copper absorption and bioavailability. **The American Journal of Clinical Nutrition**, 67, 1054S-1060S.