



COINTER PDVAgro 2020

V CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Edição 100% virtual | 02 a 05 de dezembro

ISSN:2526-7701 | PREFIXO DOI:10.31692/2526-7701

EFEITO DO SILÍCIO NA REDUÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE ELEMENTOS TÓXICOS NO SOLO: UMA REVISÃO

EFFECTO DEL SILICIO EN LA REDUCCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE ELEMENTOS TÓXICOS EN EL SUELO: UNA REVISIÓN

EFFECT OF SILICON ON REDUCTION THE AVAILABILITY OF TOXIC ELEMENTS IN THE SOIL: A REVIEW

Apresentação: Comunicação Oral

Ana Paula Rodrigues da Silva¹; Dirceu Maximino Fernandes²

DOI: <https://doi.org/10.31692/2526-7701.VCOINTERPDVAgro.0062>

RESUMO

A poluição dos solos é um grande problema ambiental e também inviabiliza a produção de alimentos, uma vez que 95% dos alimentos produzidos em todo o mundo tem origem no solo. Por isso, há uma grande preocupação em encontrar maneiras de remediar solos contaminados. São inúmeras práticas quando feitas de maneira inadequada podem causar a contaminação do solo, na agricultura o uso inadequado de fertilizantes e agroquímicos podem causar a contaminação do solo por elementos tóxicos, outra forma de contaminação ocorre de maneira natural, a partir do intemperismo de minerais que contém metais pesados em sua composição. O Silício já está presente no solo de maneira natural, mas nos últimos anos está sendo desenvolvida pesquisas utilizando resíduos a base de silício para o aumento da resistência a pragas e doenças em plantas, como corretivo de solo e para o aumento da produtividade, os resultados são satisfatórios. Muitos trabalhos publicados mostram os benefícios do silício na redução do estresse das plantas, mas ainda há poucas informações sobre o silício como remediador de elementos tóxicos no solo, por isso, o objetivo desse trabalho foi fazer uma busca de artigos já publicados, com esse tema. Foram encontrados 110 trabalhos publicados, desses, 99 estavam revisados por pares. Foi feita uma leitura dos títulos e após selecionou-se cerca de 11% dos trabalhos encontrados na busca, os quais estavam diretamente ligados com o uso do silício na mitigação de elementos tóxicos. Foram encontrados trabalhos usando diferentes fontes de silício e a aplicação ocorreu em solos contaminados principalmente com Zn, Cd, Cu e Pb. O silício mostrou-se eficiente na redução da disponibilidade de elementos tóxicos no solo, o que mostra que há um grande potencial de ser utilizado para remediação de solos contaminados, entretanto, ainda são poucos os estudos, sendo essencial realizar mais pesquisas a longo prazo e de campo, para comprovar a sua eficiência. Também é necessário entender o que causa essa diminuição da disponibilidade desses elementos, uma vez que alguns autores afirmam que a redução ocorre por causa da elevação do pH, enquanto outros defendem que é por causa da formação de complexos com os íons de silício.

Palavras-Chave: Silicato, metais pesados, poluição ambiental, remediação, solo

¹ Mestranda em Agronomia (agricultura), Universidade Estadual Paulista (UNESP), *Campus* Botucatu. Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA), ana.pr.silva@unesp.br

² Doutor, Universidade Estadual Paulista (UNESP), *Campus* Botucatu. Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA), dirceu.fernandes@unesp.br

RESUMEN

La contaminación del suelo es un problema ambiental importante y también hace imposible la producción de alimentos, ya que el 95% de los alimentos producidos en todo el mundo se originan en el suelo. Por lo tanto, hay una gran preocupación en la búsqueda de maneras de remediar los suelos contaminados. Existen numerosas prácticas cuando se hace incorrectamente puede causar contaminación del suelo, en la agricultura el uso indebido de fertilizantes y agroquímicos puede causar contaminación del suelo por elementos tóxicos, otra forma de contaminación se produce de una manera natural, a partir de la intemperie de la minería que contiene metales pesados en su composición. El silicio ya está presente en el suelo de una manera natural, pero en los últimos años se está investigando la investigación utilizando residuos a base de silicio para aumentar la resistencia a plagas y enfermedades en las plantas, como el suelo correctivo y para aumentar la productividad, los resultados son satisfactorios. Muchos estudios publicados muestran los beneficios del silicio en la reducción del estrés vegetal, pero todavía hay poca información sobre el silicio como remedidor de elementos tóxicos en el suelo, por lo que el objetivo de este trabajo era buscar artículos ya publicados, con este tema. Encontramos 110 artículos publicados, de los cuales 99 fueron revisados por pares. Se hizo una lectura de los títulos y después de seleccionar alrededor del 11% de los estudios encontrados en la búsqueda, que estaban directamente relacionados con el uso de silicio en la mitigación de elementos tóxicos. Se encontraron estudios utilizando diferentes fuentes de silicio y la aplicación se produjo en suelos contaminados principalmente con Zn, Cd, Cu y Pb. El silicio demostró ser eficiente en la reducción de la disponibilidad de elementos tóxicos en el suelo, lo que demuestra que hay un gran potencial para ser utilizado para la remediación de suelos contaminados, sin embargo, todavía hay pocos estudios, siendo esenciales para llevar a cabo más investigación a largo plazo y campo, para demostrar su eficiencia. También es necesario entender qué causa esta disminución en la disponibilidad de estos elementos, ya que algunos autores afirman que la reducción se produce debido al aumento del pH, mientras que otros argumentan que es debido a la formación de complejos con iones de silicio.

Palabras clave: Silicato, metales pesados, contaminación ambiental, remediación, suelo

ABSTRACT

Soil pollution is a major environmental problem and also makes food production impossible, since 95% of the food produced worldwide originates in the soil. Therefore, there is a great concern in finding ways to remedy contaminated soils. There are numerous practices when done improperly can cause soil contamination, in agriculture the improper use of fertilizers and agrochemicals can cause soil contamination by toxic elements, another form of contamination occurs in a natural way, from the weathering of mining that contains heavy metals in its composition. Silicon is already present in soil in a natural way, but in recent years research is being developed using silicon-based residues to increase resistance to pests and diseases in plants, such as soil corrective and to increase productivity, the results are satisfactory. Many published studies show the benefits of silicon in reducing plant stress, but there is still little information about silicon as a remediator of toxic elements in the soil, so the objective of this work was to search for articles already published, with this theme. We found 110 published papers, of which 99 were peer reviewed. It was made a reading of the titles and after selecting about 11% of the studies found in the search, which were directly linked with the use of silicon in the mitigation of toxic elements. Studies were found using different silicon sources and the application occurred in soils contaminated mainly with Zn, Cd, Cu and Pb. Silicon proved to be efficient in reducing the availability of toxic elements in the soil, which shows that there is a great potential to be used for remediation of contaminated soils, however, there are still few studies, being essential to conduct more long-term and field research, to prove its efficiency. It is also necessary to understand what causes this decrease in the availability of these elements, since some authors claim that the reduction occurs because of the increase in pH, while others argue that it is because of the formation of complexes with silicon ions.

Keywords: Silicate, heavy metals, environmental pollution, remediation, soil

INTRODUÇÃO

A contaminação do solo por elementos tóxicos é um problema mundial, e ela pode ocorrer de maneira natural, por meio do intemperismo de minerais ou de forma antrópica,

através do uso inadequado de agroquímicos, fertilizantes ou pelo descarte inadequado de resíduos industriais.

Elementos tóxicos são todos os metais da tabela periódica que podem causar danos aos seres vivos, que possuem alto potencial toxicológico e a capacidade de bioacumulação na natureza, esses elementos também são chamados de “metais pesados” (RIBEIRO, 2013).

Os solos possuem a capacidade de retenção de elementos tóxicos, mas quando é atingido o limite de retenção, esses elementos podem ser absorvidos pelas plantas ou lixiviados para os cursos hídricos podendo contaminar todas os seres vivos (SOUZA, 2012).

O solo desempenha inúmeras funções, uma delas é a sustentação das plantas e fornecimento de nutrientes, direto ou indiretamente, mais de 95% da produção mundial de alimentos tem origem no solo (FAO, 2018). E a contaminação do solo por meio de elementos tóxicos inviabiliza a produção de alimentos, uma vez que reduz a produção e dependendo da concentração acumulada nos alimentos causa danos à saúde dos seres vivos. Por isso, diversos pesquisadores no mundo inteiro vêm buscando alternativas de descontaminação do solo.

O Silício está presente naturalmente no solo, mas com a ação do intemperismo, esse silício vai sendo lixiviado, além disso, nem sempre o silício se encontra na sua forma disponível na solução do solo.

Vários autores realizaram trabalhos mostrando os benéficos do silício na redução do estresse das plantas (MA et al., 2001; TAMAI & MA, 2003; MA & YAMAJI, 2006; CHANDLER-EZELL et al., 2006; LIU et al. 2015). Mas ainda não há muitos trabalhos verificando o efeito do silício na redução da disponibilidade de elementos tóxicos no solo. Por isso, o objetivo desse trabalho foi analisar o potencial do silício como redutor da disponibilidade de elementos tóxicos no solo, por meio de trabalhos já publicados.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Elementos tóxicos

De modo geral, é considerado metal todo elemento que apresenta ligações fortes entre os seus átomos e ainda apresentam características físicas como, ser capaz de conduzir eletricidade, ser maleável, flexível, e possuir brilho (BACCAN, 2004; CASTRO, 2006). Ainda Baccan (2004), diz que a característica do metal pode variar de acordo com a temperatura.

Quando o metal possui alto potencial toxicológico e ainda grande poder de poluição no meio ambiente é utilizado o termo elementos tóxico ou “metais pesados”. De acordo com Malavolta (1994) pode ser utilizada a expressão “metal pesado” quando os elementos possuem densidade maior 5 g/cm^3 ou que têm número atômico superior a 20.

Uma classificação mais recente foi apresentada por Duffus (2002), que em seu trabalho relatou que pode ser considerado elemento tóxico todos os elementos que possuem massa específica entre 3,5 e 7,0 g/cm³, massa atômica e número atômico elevado.

As principais propriedades desses elementos classificados como elementos tóxicos são a sua elevada capacidade de bioacumulação e reatividade (RIBEIRO, 2013). Ao contrário do que se pensa nem todos esses elementos causam risco aos organismos vivos, alguns como o Cu, Mn, Mo, V, Sr e Zn desempenham funções importantes nos organismos vivos. Isso ocorre porque os organismos vivos possuem a capacidade de metabolizar pequenas concentrações de elementos tóxicos (RIBEIRO, 2013).

Outros elementos tóxicos como o Cd, Pb e Hg não possuem nenhuma função nos organismos vivos e a sua acumulação pode provocar riscos graves principalmente em mamíferos. Esses elementos na maioria das vezes são lançados no ambiente através de resíduos industriais, e são absorvidos pelas plantas e animais acarretando intoxicações ao longo da cadeia alimentar (PEREIRA; EBECKEN, 2009; RIBEIRO, 2013).

Elementos tóxicos no solo

O solo possui a capacidade de reter elementos tóxicos, entretanto, há um limite de retenção que quando ultrapassado permite a interação com os organismos vivos, e ainda pode ser lixiviado causando contaminação do lençol freático (SOUZA, 2012).

A origem desses elementos tóxicos no solo foi dividida por Allooway (1995) em litogênicos e antropogênicos, ou seja, podem se originar a partir de resíduos de rochas e pela ação do intemperismo ou ação humana através do uso inadequado de agroquímicos, fertilizantes e descarte impróprio de resíduos industriais, respectivamente.

Tendo em vista que o solo consegue reter pequenas concentrações de elementos tóxicos, a resolução Conama 420/2009 estabeleceu um limite de concentração máxima permitida de elementos tóxicos nos solos, os quais foram divididos em áreas agrícolas, industriais e urbanas (CONAMA, 2009).

No estado de São Paulo a Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo (CETESB), também estabeleceu um limite permitido para elementos tóxicos no solo (CETESB, 2005). E esses valores de referência variam em outros países, ainda não há um consenso da concentração permitida, alguns países permitem níveis maiores e outros menores, os valores de metais pesados em solos brasileiros, geralmente estão dentro dos intervalos dos solos europeus e americanos (TSUTIYA, 1999).

No solo esses elementos podem ocorrer na forma iônica ou complexados na solução do solo e diversos fatores influenciam na disponibilidade de elementos tóxicos no solo, um desses

fatores é o tipo de solo. Solos com maiores teores de argila tendem a acumular maiores quantidades, isso ocorre porque os argilominerais possuem sítios negativos que permite a adsorção dos elementos tóxicos por forças eletrostáticas (SOUZA, 2012).

Além do tipo, outras propriedades do solo podem influenciar a adsorção dos elementos tóxicos (McBRIDE, 1989) sendo as principais:

a) Potencial Hidrogeniônico (pH)

Em solos drenados o pH afeta diretamente a disponibilidade de elementos tóxicos. O aumento do pH reduz a disponibilidade desses elementos na solução do solo e ainda reduz a troca catiônica (SANTOS, 2005). Esse efeito está ligado a formação de precipitados na forma de carbonatos, fosfatos, sulfato e hidróxidos (ARAÚJO et al., 2002).

b) Capacidade de troca de cátions (CTC)

Essa propriedade que ocorrem no solo pode reduzir ou aumentar a disponibilidade de elementos tóxicos no solo. De acordo com alguns autores o aumento da CTC aumenta a adsorção desses elementos, uma vez que com a elevação da CTC há maior formação de cargas negativas dependentes do pH (CROOKE, 1981; POMBO et al. 1989).

c) Matéria orgânica (M.O.)

A matéria orgânica do solo é composta por ácidos húmicos e ácidos fulvicos e esses ácidos possuem a capacidade de formar complexos orgânicos com os elementos tóxicos. (SANTOS, 2005). Quando há formação de complexos com os ácidos húmicos ocorre redução da disponibilidade desses elementos na solução do solo.

Quando a formação de complexos é formada por ácidos fulvicos, ocorre o inverso, ou seja, há uma maior disponibilidade desses elementos na solução, (STEVEYSON; ANDAKANI, 1972), isso ocorre porque há uma menor adsorção e conseqüentemente há um aumento da sua mobilidade (COSTA; COSTA, 2015).

d) Conteúdo de óxidos e hidróxidos de ferro e manganês

Os óxidos e hidróxidos de ferro e manganês desempenham um papel importante na retenção de elementos tóxicos e em sua imobilização (FERNÁNDEZ, 2017). Elementos tóxicos ligados a óxidos e hidróxidos de ferro e manganês são biodisponíveis em áreas onde o solo está sujeito a condições redutoras (FERNÁNDEZ, 2017).

Silício no solo

O silício é o segundo elemento presente em maior quantidade na crosta terrestre, ficando atrás somente do oxigênio. Constitui os argilominerais, participando do processo de formação dos solos (MENEGALE et al., 2015). Entretanto esse elemento vai se perdendo no solo conforme o grau de intemperismo por ele sofrido, os solos brasileiros possuem em sua maioria

um elevado grau de intemperismo, devido a isso apresentam de 4% a 40% de silício em sua composição (Ma et al., 2001).

O Oxido de Silício (SiO_2) é classificado como mineral primário e constitui a base da estrutura de grande parte dos argilominerais existentes, entretanto esse mineral é encontrado quase sempre na forma de quartzo, opala ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) e em formas que não são disponíveis para a planta, isso porque a maioria dos solos de regiões tropicais já se encontram em elevado grau de intemperismo (BARBOSA FILHO et al., 2001).

Na solução do solo o silício está presente em sua maior parte de forma não dissociada como ácido silícico (H_4SiO_4), podendo ser rapidamente absorvido pelas plantas (CATEN, 2013). Há diversas fontes de ácido silícico presentes na solução do solo, podendo se tornar disponível na solução do solo através da decomposição de matérias vegetais, da dissociação do ácido silício polimétrico, liberação de silício (Si) dos hidróxidos e óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), da água de irrigação, da diluição de minerais cristalinos ou não cristalinos ou pela adição de fertilizantes silicatados (FERREIRA, 2008).

O pH dependente de reações sesquioxidas afeta diretamente na disponibilidade do silício na solução do solo, a solubilidade desse elemento ocorre nas faixas de pH de 4 a 9 (FERREIRA, 2008, CATEN, 2013). Outro fator que pode reduzir a disponibilidade de silício (Si) é a compactação dos solos, isso ocorre porque em solos compactados há um aumento do nível de ácidos polissilícicos, que conseqüentemente diminui o teor do silício disponível para a planta (H_4SiO_4) (MATYCHENKOV et al., 1995; MARONDI, 2011).

Na solução do solo, o comportamento do silício (Si) é como o de um ácido- fraco (CATEN, 2013), e a sua concentração é de 0,1 a 0,6 mmol. L^{-1} (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Entretanto os cultivos contínuos, reduzem a disponibilidade desse elemento no solo (KORNDÖRFER e DATNOFF, 1995) levando a necessidade de aplicação de fertilizantes silicatados para complementar a disponibilidade de silício plantas.

Silício e elementos tóxicos

Estudos em sistema hidropônico foram realizados com doses elevadas de alguns elementos classificados como elementos tóxicos e foi verificado redução do estresse nas plantas quando adicionado silício na solução.

Song et al. (2011) conduziram experimento em sistema hidropônico com duas cultivares de arroz submetidas a diferentes níveis de zinco com ou sem silício e concluíram que a redução da toxicidade do zinco pelo silício ocorre por transporte e reação antioxidantes.

Khaliqa et al. (2016) conduziram experimento de algodão em sistema hidropônico com duas concentrações de níquel (50 e 100 μM) sem a presença e com 1 mM de silício e observaram

que nas plantas que foram adicionadas o silício houve redução dos efeitos adversos causados pelo níquel.

Shi et al. (2018) também realizaram um ensaio em sistema hidropônico com a cultura do trigo avaliando o silício como mitigador dos efeitos do cádmio e observaram que o silício pode reduzir a toxicidade de cádmio nas mudas de trigo e ainda permitir que a planta aumente a sua capacidade antioxidante e redução da absorção de cádmio.

Freitas et al. (2017) conduziram experimento em solução nutritiva para verificar o efeito do silício na redução da toxicidade por alumínio em plantas de arroz de terras altas e observaram que o silício reduziu o efeito de toxidez por alumínio no arroz, foi notado também aumento no crescimento das plantas de arroz mesmo na presença de alumínio e os autores chegaram à conclusão que o silício se comporta como um atenuador de toxidez nas plantas de arroz de terra altas, em condições de experimento.

Esses trabalhos mostram que o silício atenua o efeito causado pelos metais pesados nas plantas, no entanto, são todos realizados em sistema hidropônico. O solo é um sistema heterogêneo, ou seja, está em constante modificação, o efeito do silício na atenuação dos elementos tóxicos pode ser influenciado, por exemplo, pelo material de origem do solo, como também pela fração biológica.

METODOLOGIA

Essa pesquisa de revisão bibliográfica foi realizada através da busca de artigos do portal de periódicos da CAPES, para essa busca foi utilizada as palavras-chaves “Silicon+heavy metals+soil” e foram encontrados 110 trabalhos publicados desde de 1990 até 2020, desses, 99 estavam revisados por pares. Foi feita uma leitura dos títulos e foi selecionado cerca de 11% dos trabalhos encontrados na busca, os quais estavam diretamente ligados com o uso do silício na mitigação de elementos tóxicos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Silício na redução de elementos tóxicos no solo

Paim et al. (2003) avaliaram o efeito do silício associado ao fósforo na redução de metais pesados no solo e esses autores observaram que houve uma redução da disponibilidade de elementos tóxicos, especificadamente nos teores de Cd e Zn, entretanto os níveis desses elementos ainda ficaram acima do permitido.

Dois experimentos foram realizados em vaso por Liang, Wong e Wei (2005) visando avaliar o efeito do silício (Si) em solo contaminado por cádmio (Cd), ambos os experimentos

receberam doses de 20 e 40 mg kg⁻¹ o que se diferenciou foi a concentração de silício aplicada, o primeiro recebeu 400 mg kg⁻¹ e o segundo 50 mg kg⁻¹ na forma de metassilicato de sódio. Esses autores notaram com esse experimento que houve redução da concentração de cádmio na solução do solo quando foi utilizado a dose de 400 mg kg⁻¹ independentemente do nível de contaminação por cádmio.

Quando foi avaliado o segundo experimento utilizando a concentração menor de silício (50 mg kg⁻¹) não houve diferença quando foi comparado com o tratamento que não recebeu a aplicação de silício. O mesmo ocorreu quando foi avaliado a solubilidade de cádmio em água. Foi concluído pelos autores que o silício pode reduzir a disponibilidade de cádmio no solo e essa redução pode estar ligada ao aumento do pH (LIANG; WONG; WEI, 2005).

Um experimento foi conduzido em ambiente controlado por Treder e Cieslinski (2005), foi utilizado dois tipos de solo (arenoso e argiloso) e estes foram contaminado com doses crescentes de cádmio (Cd), o silício foi aplicado na forma de silicato de potássio e esses autores não avaliaram a redução do cádmio no solo, mas foi observado menor absorção de cádmio pelas plantas de morango que foram cultivadas em solo arenoso com a aplicação de silício, o que mostra visivelmente que houve uma redução da disponibilidade de cádmio no solo, quando se compara com o tratamento que não houve aplicação de silício.

Accioly et al. (2009) conduziram experimento com o objetivo de verificar a redução de metais pesados com a utilização de silicato de cálcio, o solo apresentava três níveis de contaminação (moderada, intermediária e severa), foi notado redução dos níveis de zinco disponível independentemente do nível de contaminação, houve uma redução linear da transferência de zinco para as raízes conforme foi aumentando as doses de silício. Esses autores também observaram diferença no pH após a aplicação do silicato de cálcio e a redução de transferência de cádmio do solo para as raízes não foi significativa.

Faria (2010) em experimento de campo, instalado sobre um Latossolo Vermelho férreo avaliou duas fontes de silício a base de MgO e CaO em doses crescentes na mitigação de elementos tóxicos no solo e não foi observado diferença significativa na redução desses elementos e nem nos demais atributos do solo.

Gu et al. (2011) realizaram dois experimentos, o primeiro em casa de vegetação e segundo em campo, com solo já contaminado com cádmio, zinco, chumbo e cobre. No experimento realizado em casa de vegetação foi utilizado como fonte de silício duas concentrações de escórias de aço (resíduo da fundição de aço) e duas concentrações de cinzas volantes (resíduo da combustão do carvão mineral), respectivamente 20 e 40 g kg⁻¹ e 3 e 6 g kg⁻¹, do peso seco do solo e concluíram que ambos os subprodutos reduziram a disponibilidade de

zinco, cobre, cádmio e chumbo.

No experimento de campo foi utilizado cinzas volantes e escoria de aço nas concentrações 20 e 3 g kg⁻¹, respectivamente e também foi observado o mesmo efeito do experimento de vaso. Os autores concluíram que ambas as fontes de silício utilizada tem potencial de atenuar a disponibilidade desses metais pesados no solo e esse efeito pode estar relacionado ao potencial de silício de formar complexos com esses elementos, que consequentemente torna-os menos solúveis na solução do solo (GU et al. 2011).

Rizwan et al. (2012) avaliaram o efeito do silício amorfo na redução de metais pesados de um solo arenoso, o experimento foi conduzido em casa de vegetação, foi aplicado três doses diferentes equivalentes a 1, 10 e 15 t ha⁻¹ com e sem plantas de *Triticum turgidum* L. cv. Claudio W. e notaram que houve redução da disponibilidade de cádmio com e sem a planta quando aplicado 10 t ha⁻¹ de silício amorfo.

Outros autores também verificaram em cultivo de arroz em vaso, o silício no alívio de vários elementos tóxicos e concluíram que não houve redução do teor total de cádmio, cobre e zinco no solo, mas houve diferença nos estados químicos, quando aplicado silício, que consequentemente reduziu a disponibilidade desses elementos, esses autores relataram que esse efeito de redução da disponibilidade ocorreu porque houve alterações no pH do solo (NING et al., 2016).

Zama et al. (2018) conduziram um experimento em ambiente controlado, com o objetivo de o efeito do carvão vegetal convencional e modificado com silício na mitigação de solo contaminado com arsênio, foi aplicado doses a 1 e 5%. Esses autores notaram que até os dez dias de incubação houve um aumento da concentração de arsênio em todos os tratamentos e após os dez dias houve uma redução quando foi utilizado o carvão vegetal modificado com silício.

Huang et al. (2018) realizaram uma pesquisa com o objetivo de verificar a redução de elementos tóxicos na cultura do arroz em diferentes níveis de desenvolvimento e notaram um efeito reverso, houve um aumento da disponibilidade de Cd no solo, entretanto, houve redução da quantidade absorvida pelas plantas, possivelmente ocorreu uma mudança da forma do Cd no solo, ficando em uma forma não disponível para a planta.

Rehman et al. (2019) avaliaram a aplicação parcelada de silício na forma de silicato de potássio na mitigação do cádmio no solo e nas plantas de arroz, o parcelamento foi baseado nos estádios de desenvolvimento das plantas (transplante, perfilhamento, início da formação da panícula e depois da formação completa da panícula) e eles observaram que houve maior redução da disponibilidade de cádmio no solo quando foi aplicado o sílico no transplante,

perfilhamento e início da formação da panícula.

Mu et al. (2019) avaliaram o efeito de um resíduo a base de silício associada ao biochar na redução de elementos tóxicos em solo e no acúmulo na grama e eles observaram que o resíduo a base de silício com ou sem a associação do biochar contribuiu para a imobilização de Cd e Pb no solo e comentaram que esse efeito pode estar relacionado ao efeito do aumento do pH.

Foi comparado por Zhao et al. (2020) a influência do silício na redução da disponibilidade de cádmio em dois tipos de solo (ácido e alcalino), o silício foi aplicado em doses crescentes na forma de silicato de sódio e foi notado que houve redução da disponibilidade de cádmio nos tratamentos que receberam silício, independentemente do tipo de solo. Os autores ainda comentaram que não houve redução do teor total de cádmio na solução e um dos fatores que podem ter reduzido a disponibilidade foi a formação de complexos solúveis em água (ZHAO et al., 2020).

CONCLUSÕES

A contaminação de solos por elementos tóxicos é um problema ambiental mundial e a aplicação de silício para reduzir a disponibilidade desses elementos no solo pode ser uma alternativa de manejo desses solos. As pesquisas já publicadas mostram resultados positivos e apontam que o silício tem o potencial de reduzir a disponibilidade de elementos tóxicos como o zinco, cobre, arsênio cádmio e chumbo.

Ainda não foi possível chegar a uma conclusão do que causa esse efeito de redução na disponibilidade dos elementos tóxicos, alguns trabalhos mostram que o teor total do elemento tóxico não é reduzido, o que ocorre é uma mudança no seu estado, o que contribui para uma menor solubilidade na solução do solo.

A explicação para a mudança de estado pode estar relacionada ao aumento do pH ou a formação de complexos com os íons do silício. Mais estudos precisam ser realizados para investigar se o silício pode ser utilizado como remediador de solos contaminados por elementos tóxicos, uma vez que há ainda poucos estudos e em sua grande maioria foram realizados em casa de vegetação e com curta duração. É preciso investigar o uso na mitigação de outros elementos tóxicos e realizar experimentos em campo de longa duração para verificar se esse efeito de redução da disponibilidade é duradouro e ainda verificar qual a quantidade ideal para alcançar esse efeito, além de ser necessário avaliar se com o passar do tempo torna-se um problema.

REFERÊNCIAS

ACCIOLY, A.M. A. et al. Silicato de cálcio como amenizante da toxidez de metais pesados. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.44, n.2, p.180-188, 2009.

ALLOWAY, B. J. Cadmium. In: Heavy metals in soils. ALLOWAY, B. J. (ed). **New York**. 1995. p. 122-151.

ARAÚJO, W. S. et al. Relação entre adsorção de metais pesados e atributos químicos e físicos de classes de solo do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 26, p. 17-27, 2002.

BACCAN, N. **Metais Pesados: Significado e Uso da Terminologia**. In: ANAIS IX ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONTAMINANTES INORGÂNICOS, IPEN, São Paulo, 2004.

BARBOSA, C. N. Formas de aplicação de silicato de cálcio e magnésio na cultura do sorgo em neossolo quartzarênico de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v. 38, n. 4, p. 290-296, 2008.

CASTRO, V. S. **Efeitos de metais pesados presentes na água sobre a estrutura das comunidades bentônicas do Alto Rio das Velhas-MG**. 2006. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Universidade Federal de Minas Gerais- MG, 2006.

CHANDLER-EZELL, K. et al. Department Root and tuber phytoliths and starch grains document manioc (*Manihot esculenta*), arrowroot (*Maranta arundinacea*), and Ilerén (*Calathea* sp.) at the Real Alto site, Ecuador. **Economic Botany**, v. 60, p.103-120, 2006.

CATEN, A. (2013). **Efeito de silicato e tensões de água no solo no crescimento de maracujazeiro amarelo**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 105 f.

CETESB, SP. Decisão de Diretoria no 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005. **DOE**, Poder Executivo, SP, 3/12/2005, seção 1, v.115, n.227, p.22-23. Retificação no DOE, 13/12/2005, v.115, n.233, p.42.

CONAMA. Resolução no 420, de 28 de dezembro de 2009. **DOU n o 249**, 2009.

COSTA, A. F.; COSTA, A. N. **Valores orientadores de qualidade de solos no Espírito Santo**. Editores técnicos. - Vitória, ES : Incaper, 2015, 152 p.

CROOKE, W. M. Nickel uptake from a serpentine soil. **Soil Science**, n. 81, p. 269-273, 1981.

DUFFUS, J. H. "Heavy metals"—a meaningless term? **Pure Appl. Chem.**, v. 74, n.5, p. 793–807, 2002.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas: Princípios e perspectivas**. 3 ed. Londrina, Planta, 403p. 2006.

FARIA, M. V. **Metais pesados em solo e planta com aplicação de silicatos em cana-de-açúcar**. 2010, 57 f. Dissertação (mestrado em agronomia), universidade federal de Uberlândia,

Uberlândia-MG, 2010.

FAO. **A importância da conservação dos solos para a produção de alimentos no mundo.** 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1116677/>. Acesso em: Julho de 2020.

FERNÁNDEZ, Z, H. **Análise de metais pesados em solos de Pernambuco com diferentes atividades antrópicas.** 2017. 92 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2017.

FERREIRA, S.M. (2008). **O efeito do silício na cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.): aspectos bioquímicos, qualidade da fibra e produtividade.** Tese (Doutorado) – Piracicaba – SP, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 67p.

FREITAS, B. L. et al. Effects of silicon on aluminum toxicity in upland rice plants. **Plant Soil**, v. 420, p.263–275, 2017.

GU, H. et al. Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil. **Chemosphere**, v. 83, p. 1234–1240, 2011.

HUANG, F. et al. Silicon-Mediated Enhancement of Heavy Metal Tolerance in Rice at Different Growth Stages. **International journal of environmental research and public health**, v. 15, p. 2193, 2018.

KHALIQ, A. et al. Silicon alleviates nickel toxicity in cotton seedlings through enhancing growth, photosynthesis, and suppressing Ni uptake and oxidative stress. **Journal Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 62, 2016.

KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças de cana-de-açúcar e do arroz. **Info. Agronômicas**, n. 70, p 1-3, 1995.

LEI, M.; ZHANG, Y.; KHAN, S.; QUIN, P.; LIAO, B. Pollution, fractionation and mobility of Pb, Cd, Cu and Zn in garden and paddy soils from Pb/Zn mining area. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 168, p. 215-222. 2010.

LIANG, Y.; WONG, J.W.C; WEI, L. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. **Chemosphere**, v. 58, p. 475–483, 2005.

LIU, J. et al. Effects of nano-silicon on Pb uptake and translocation in rice plants. **Front. Environ. Sci. Eng.**, v. 9(5), p. 905–911, 2015..

MA J. F.; YAMAJI, N. Beneficial effects of silicon on plant growth in relation to biotic and abiotic stresses. **TRENDS in Plant Science**, vl.11, n.8, 2006.

Ma J. F. et al. Chapter 2 Silicon as a beneficial element for crop plants. **Studies in Plant Science**, v. 8, p. 17-39, 2001.

MA, J.F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants.

IN: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. editors. Silicon in agriculture, The Netherlands: **Elsevier Science**, p.17–39, 2001.

MATYCHENKOV, V.V.; PINSKLY, D.L.; BOCHARNIKOVA, Y.A. Influence of mechanical compaction of soils on the state and form of available silicon. **Eurasian Soil Science**, v. 27, n. 12, p.58-67, 1995.

MANEGALE, C. L. M. et al. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.4, n. especial, p.435-454, 2015.

Mu, J., Hu, Z. et al. Influência da emenda alcalina à base de silício e incorporada com biochar sobre o crescimento e translocação de metais pesados e acúmulo de grama vetiver (*Vetiveria zizanioides*) cultivada em solos multi-metals contaminados. **J Soils Sediments** v. 19, 2277-2289, 2019.

NING, D. et al. In situ stabilization of heavy metals in multiple-metal contaminated paddy soil using different steel slag-based silicon fertilizer. **Environ Sci Pollut Res**, v. 23, p.23638–23647, 2016.

PAIM, L. A. et al. Efeito do silício e do fósforo na disponibilidade de metais pesados do solo pelo extrator mehlich-1 **Ciênc. agrotec.** v. 27, n. 4, 2003.

POMBO, L. et al. Adsorção de níquel por dois solos: Terra Bruna Estruturada similar e Podzólico Vermelho-Amararelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n. 24, p. 593-598, 1989.

REHMAN, M.Z. et al. Split application of silicon in cadmium (Cd) spiked alkaline soil plays a vital role in decreasing Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grains . **Chemosphere**, v. 226 , p. 454-462, 2019.

RIZWAN, M. et al. Effect of silicon on reducing cadmium toxicity in durum wheat (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio W.) grown in a soil with aged contamination. *Journal of Hazardous Materials*, v.209–210, p.326–334, 2012.

RIBEIRO, C. A. C. **Contaminação do solo por metais pesados**. 2013. 92 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias - Lisboa, 2013.

SANTOS, G. C. G. Comportamento de B, Zn, Cu, Mn e Pb em solo contaminado sob cultivo de plantas e adição de fontes de matéria orgânica como amenizantes de efeito tóxicos. 2005. 105 f. Tese (doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2005.

SHI, A. Silicon alleviates cadmium toxicity in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) by reducing cadmium ion uptake and enhancing antioxidative capacity. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 7638–7646, 2018.

SONG, A. et al. The alleviation of zinc toxicity by silicon is related to zinc transport and antioxidative reactions in rice. **Plant and Soil**, V. 344, p 319–333, 2011.

SOUZA, R. N. **Um estudo da formação de disponibilidade de piromorfita ($Pb_5(PO_4)_3OH$) em solos contaminados com Pb e remediados com $NH_4H_2PO_4$** . 2012, 91 f. tese (doutorado) Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2012.

TREDER, W.; CIESLINSKI, G. Effect of Silicon Application on Cadmium Uptake and Distribution in Strawberry Plants Grown on Contaminated Soils. **Journal of Plant Nutrition**, v. 28:6, p. 917-929, 2005.

TSUTIYA, M. T. Metais pesados: o principal fator limitante para o uso agrícola de biossólidos das estações de tratamento de esgotos. **Anais..** Rio de Janeiro: ABES, 1999.

ZAMA, E. F. et al. Silicon (Si) biochar for the mitigation of arsenic (As) bioaccumulation in spinach (*Spinacia oleracea*) and improvement in the plant growth. **Journal of Cleaner Production**, v.189, p. 386-395, 2018.

ZHAO, Y. et al. Influence of silicon on cadmium availability and cadmium uptake by rice in acid and alkaline paddy soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, p. 2343–2353, 2020.