

Artigo

Fitorremediação de Solos Contaminados com Metais: Panorama Atual e Perspectivas de uso de Espécies Florestais

Silva, T. J.; Hansted, F.; Tonello, P. S.; Goveia, D.*

Rev. Virtual Quim., 2019, 11 (1), 18-34. Data de publicação na Web: 4 de fevereiro de 2019

<http://rvq.sbq.org.br>

Phytoremediation of Soils Contaminated with Metals: Current Outlook and Prospects of use of Forest Species

Abstract: Phytoremediation is a technique that uses plants to recover contaminated soils. This method has advantages because of its permanent nature, combined with low maintenance costs, protection against wind and water erosion and greater soil structure. Currently, most of the researches related to species capable of phytoremediation of soil contaminated with metals work with annual cycle plant species. However, due to limitations found in these species, the possibility of using forest species in phytoremediation programs is increasingly projected. Be suitable for revegetation of contaminated areas and also provide economic return. The purpose of this review was to present the main techniques of phytoremediation used and to analyze the perspectives of the use of forest species in phytoremediation programs. The reports in the literature point out several of these species with real capacity of use, in addition they have been pointed as tolerant to soils in stages of great contamination, and their capacity of fixation of contaminant in their structures for a longer time in relation to vegetal species of annual cycle. The limiting factor in the full use of these species is still the small number of researches, which consequently causes many effective species to no longer be identified for phytoremediation.

Keywords: Phytoremediation; forest species; metal contaminants.

Resumo

A fitorremediação é uma técnica que utiliza plantas para recuperação de solos contaminados. Esse método apresenta vantagens devido à sua natureza permanente, combinada com baixos custos de manutenção, proteção contra a erosão eólica e hídrica e maior estruturação dos solos. Atualmente a maior parte das pesquisas relacionadas a espécies capazes de fitorremediar solos contaminados com metais trabalham com espécies vegetais de ciclo anual, entretanto devido a limitações encontradas nessas espécies projeta-se cada vez mais a possibilidade de uso de espécies florestais em programas de fitorremediação, por serem apropriadas para a revegetação de áreas contaminadas e propiciar ainda retorno econômico. Esta revisão teve como objetivo apresentar as principais técnicas de fitorremediação utilizadas e analisar as perspectivas de utilização de espécies florestais em programas de fitorremediação. Os relatos na literatura apontam diversas dessas espécies com capacidades reais de uso, além disso, têm sido apontadas como tolerantes a solos em estágios de grande contaminação, e sua capacidade de fixação de contaminante em suas estruturas por maior tempo em relação a espécies vegetais de ciclo anual. O fator limitante no pleno uso dessas espécies ainda é o reduzido número de pesquisas, que por consequência faz com que muitas espécies eficazes deixem de ser identificadas para fitorremediação.

Palavras-chave: Fitorremediação; espécies florestais; contaminantes metálicos.

* Universidade Estadual Paulista, Campus de Itapeva. Rua Geraldo Alckmin 519, Vila N. Sr^a. de Fátima. CEP:18409-010, Itapeva-SP, Brasil.

✉ danielle.goveia@unesp.br

DOI: [10.21577/1984-6835.20190003](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20190003)

Fitorremediação de Solos Contaminados com Metais: Panorama Atual e Perspectivas de uso de Espécies Florestais

Tiago J. da Silva,^a Felipe A. S. Hansted,^a Paulo S. Tonello,^b Danielle Goveia^{a,*}

^a Universidade Estadual Paulista, Campus de Itapeva. Rua Geraldo Alckmin 519, Vila N. Sr^a. de Fátima. CEP:18409-010, Itapeva-SP, Brasil.

^b Universidade Estadual Paulista, Campus de Itapeva. Av. Três de Março 511, Alto da Boa Vista. CEP: 18087-180, Sorocaba-SP, Brasil

* danielle.goveia@unesp.br

Recebido em 10 de novembro de 2017. Aceito para publicação em 16 de dezembro de 2018

1. Introdução

2. Os Metais e a Contaminação dos Solos

2.1. Fitorremediação e sua aplicação atual

2.2. Fitorremediação com espécies florestais e perspectivas

3. Conclusão

1. Introdução

Atualmente um enorme volume de compostos orgânicos e inorgânicos é produzido, industrializado, transportado e consumido, constituindo um grupo de grande incidência na contaminação ambiental, causando diversos problemas, dentre os quais se destaca a existência de riscos à saúde pública, aos ecossistemas e restrições ao desenvolvimento urbano e imobiliário.¹ Dentre esses compostos os metais são considerados um grupo de grande relevância ambiental, devido a sua capacidade de bioacumulação nos níveis tróficos e sua permanência no solo, constituindo fator de contaminação.²

O aumento de áreas contaminadas com resíduos orgânicos e inorgânicos e o descarte indiscriminado no solo, causando sua contaminação, tem gerado grande preocupação com o meio ambiente e os impactos negativos provocados. A recuperação dessas áreas impactadas vem sendo uma prioridade para a sociedade como um todo, havendo assim uma grande demanda comercial e ambiental por técnicas que possam minimizar ou recuperar essas áreas.³ O método de revegetação dessas áreas apresenta vantagens devido a sua natureza permanente, combinada aos baixos custos de manutenção, a proteção contra a erosão eólica e hídrica, maior estruturação dos solos, aumento da fertilidade e melhoria da estética de áreas degradadas através da melhoria da qualidade visual da paisagem, uma vez que há a contenção da erosão reduzindo a formação

de crateras visíveis no solo. O uso de plantas para recuperação de áreas contaminadas é conhecido como fitorremediação, e tem mostrado potencial para tratamento de diferentes grupos de contaminantes, especialmente os metais.⁴ Considerando a relevância do tema, o objetivo desta revisão é apresentar o panorama atual do uso da fitorremediação na remoção de metais do solo, além das perspectivas de uso de espécies florestais nesse processo.

2. Os Metais e a Contaminação dos Solos

Os metais estão presentes em diferentes compartimentos ambientais, como ar, água, solos, sedimentos ou amostras biológicas, e apresentam potencial para tornarem-se tóxicos quando alcançam valores acima das concentrações limites, por exemplo, o chumbo que apresenta concentração limite no solo de 40 mg kg⁻¹.⁵ A ocorrência de metais no ambiente pode ser de origem natural (minérios e rochas sedimentares), ou de origem antrópica como atividades industriais, agrícolas, derramamento de efluentes ou turismo através do descarte de resíduos no ambiente, tais como produtos manufaturados, tecidos, latas de refrigerante e pilhas usadas.

Os ciclos biológicos no ambiente incluem a bioacumulação e a biomagnificação. Este processo poderá transformar teores normais, aquele cuja presença do contaminante não apresenta consequências, porém, ao subir níveis na cadeia trófica, terão seus níveis tão elevados a ponto de ultrapassar os níveis tolerados por diferentes espécies da biota e pelo homem, alcançando concentrações tóxicas.⁶

Dentre os metais mais comumente encontrados em casos de contaminação de solo e que apresentam sérios riscos à saúde humana e ao ambiente destacam-se cádmio Cd, Pb, Co, Cu, Hg, Ni e Zn. O poder contaminante desses elementos pode ser caracterizado pelo potencial de

caminhamento no solo e sua mobilidade pode ser acelerada em condições de campo pelo fluxo na solução do solo,⁷ outros fatores também podem influenciar na mobilidade do metal no solo.

Oliveira *et al.*⁸ apresentaram uma revisão sobre a dinâmica de metais-traço no solo e relacionaram o seu comportamento com o intemperismo que o material de origem sofreu e/ou pelo uso, ocupação e manejo do solo e por fatores que não dependem do elemento químico, mas do meio e das interações que ele apresenta com os elementos do solo. O autor concluiu que é necessário estudar o comportamento de metais-traço no solo em regiões distintas para prever o potencial de contaminação ambiental desses metais no meio ambiente a fim de minimizar os efeitos tóxicos desses elementos para os seres vivos.

Uma opção para avaliar a mobilidade do metal no solo é a especiação. Na análise de especiação física distingue-se o metal entre as frações dissolvida, coloidal e particulada, enquanto na especiação química, avalia-se a distribuição do metal em várias espécies químicas em solução, considerando os metais complexados ou não-complexados e a distinção entre diferentes estados de oxidação.⁹ A determinação da concentração total do metal, muitas vezes não fornece informações suficientes para avaliação de sua real toxicidade no solo. Desta forma, o estudo da análise de especiação fornece informações importantes do ponto de vista ecotoxicológico, pois considera a biodisponibilidade.

Uma maneira de avaliar a biodisponibilidade dos metais e monitorar o seu comportamento diante das alterações das condições ambientais é a extração sequencial. Onde é possível fracionar o elemento em formas geoquímicas específicas usando reagentes apropriados. Martins *et al.*¹⁰ apresentaram diferentes métodos de avaliação da partição geoquímica de metais em solos. Os elementos podem ser divididos nas fases trocável, ligados a carbonatos, óxidos, matéria orgânica e residual. Os autores apresentaram a possibilidade de

quantificar o metal que está complexado ao óxido de ferro ou com óxido de manganês, pois cobre e zinco apresentam a tendência de co-precipitar na presença destes óxidos.

A fração solúvel e trocável encontrada em procedimentos de extração sequencial é considerada a mais móvel e biodisponível, conseqüentemente aquela que irá apresentar maior toxicidade do metal no ambiente.

2.1. Fitorremediação e sua aplicação atual

A fitorremediação está entre as principais metodologias atualmente disponíveis para a remediação de solos contaminados e consiste no uso de plantas para remover, imobilizar ou tornar inofensivos ao ecossistema, contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes no solo e na água. As plantas se adaptam a ambientes extremamente diversos, de forma que muitas espécies possuem a capacidade de interagir simbioticamente com outros organismos. Essa interação é determinante para a adaptação em ambientes como solos salinos, ácidos, pobres e ricos em nutrientes ou excessivamente contaminados com metais.

Magalhães *et al.*¹¹ identificaram um crescente aumento no interesse em desenvolver estratégias de remediação de solos contaminados com metais, que sejam eficientes e duráveis numa escala de tempo de médio a longo prazo. O uso de plantas para recuperação de áreas contaminadas tem apresentado destaque, pois reduz teores de contaminantes a níveis seguros à saúde humana, além de contribuir na melhoria das características físicas, químicas e biológicas destas áreas. Sua aplicação tem se expandido em países como Estados Unidos, Canadá e Alemanha principalmente devido a sua grande viabilidade técnica e econômica. O processo se aplica em quase todos os tipos de contaminantes, incluindo metais, pesticidas, solventes, explosivos, óleo cru e hidrocarbonetos.

O processo de fitorremediação está limitado à profundidade das raízes, uma vez que, para que haja a limpeza, há necessidade de a planta estar em contato com o contaminante. Os diferentes processos envolvidos na fitorremediação envolvem as características morfofisiológicas das espécies e diferem de espécie para espécie. Muitas tentativas têm sido feitas em determinar alguns atributos funcionais destas plantas. De um modo geral, as propriedades da planta que favorecem a fitorremediação são o rápido crescimento, rápida produção de biomassa, alta competitividade, tolerância à poluição, alta capacidade de absorção de nutrientes, alta taxa de translocação e grande acúmulo de substâncias de reserva,¹² sendo que um meio eficiente de identificar potenciais espécies fitorremediadoras é a observação das plantas que colonizam áreas contaminadas.¹³

Entre as vantagens da fitorremediação de acordo com Vasconcellos *et al.*¹⁴ está o baixo custo, possibilidade de aplicação *in situ* em áreas extensas e para diferentes tipos de poluentes, assim como a fácil monitorização das plantas, manutenção do solo e estímulo à vida dos organismos, possibilidade de ser combinada a outros métodos de descontaminação.

Entre esses métodos, temos a biorremediação que se baseia na utilização de fungos, leveduras e bactérias no solo contaminado, de forma que estes promovam a digestão dos contaminantes, a solidificação que é a técnica que encapsula o rejeito em um sólido de alta integridade estrutural ou métodos eletrocinéticos que caracteriza-se basicamente pela aplicação de uma corrente elétrica no solo através de eletrodos que tendem a atrair íons.

Na fitorremediação os vegetais podem atuar de forma direta ou indireta na redução ou remoção dos contaminantes. Na remediação direta, os compostos são absorvidos e acumulados ou metabolizados nos tecidos, através da mineralização dos mesmos. Na forma indireta, os vegetais extraem contaminantes das águas subterrâneas, reduzindo assim a fonte de

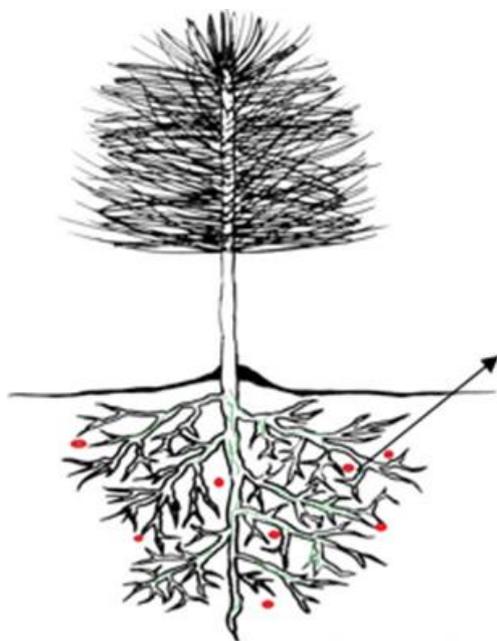
contaminação ou quando a presença de plantas propicia meio favorável ao aumento da atividade microbiana, que degrada o contaminante. Existem diversos mecanismos na fitorremediação, dependendo do tipo de contaminante, a planta pode utilizar diferentes meios para sua remoção.¹⁵ A seguir são apresentadas as principais formas de fitorremediação encontradas na literatura.

2.1.1. Fitodegradação

Nessa técnica os contaminantes são absorvidos pelas plantas conforme representado na Figura 1, que através de seus processos metabólicos quebram as moléculas do contaminante em produtos menos tóxicos. A planta absorve o contaminante da água e do solo fazendo a sua bioconversão, no seu interior ou em sua superfície, para formas menos tóxicas. Essa reação de bioconversão está relacionada com os contaminantes orgânicos, cujos radicais e superfícies

propiciam o meio adequado para o controle da disponibilidade e movimentação desses elementos na solução do solo. A planta de forma geral absorve o metal da solução do solo através da interceptação radicular em que as raízes entram em contato direto com os nutrientes a serem absorvidos e incorporados via fluxo de massa, em que a água absorvida pelas plantas flui ao longo de um gradiente de potencial hídrico, arrastando consigo os elementos da solução do solo para próximo da superfície radicular onde ficam disponíveis para a absorção. Uma vez absorvidos os metais que não são degradáveis são armazenados nos tecidos parenquimáticos da planta, enquanto que as substâncias orgânicas e degradáveis são degradadas pelas enzimas da planta.

A fitodegradação é empregada, principalmente, na remediação de compostos orgânicos. Os subprodutos gerados, pela degradação na planta, são armazenados em vacúolos ou incorporados ao tecido vegetal.¹⁶



O contaminante após ser degradado é incorporado ao tecido vegetal.

Figura 1. Mecanismo de fitodegradação em espécies florestais

2.1.2. Fitoextração ou fitoacumulação

Neste mecanismo a planta absorve o contaminante do solo, armazena em suas raízes ou em suas folhas e caules, facilitando posteriormente seu descarte, conforme visualizado na Figura 2. Esta é a técnica de fitorremediação mais utilizada. Estima-se que a fitoextração possa reduzir a concentração de contaminantes a níveis aceitáveis em um

curto período de tempo.¹⁷ De maneira geral, a fitoextração é utilizada para remediação de metais, com o uso de plantas que podem acumulá-los em seus tecidos, e a tolerância da planta ocorre pela presença de mecanismos bioquímicos e fisiológicos de adaptação. As plantas que realizam esse mecanismo são denominadas hiperacumuladoras, devido a sua capacidade de tolerar concentrações elevadas de metais em seus tecidos.¹⁸

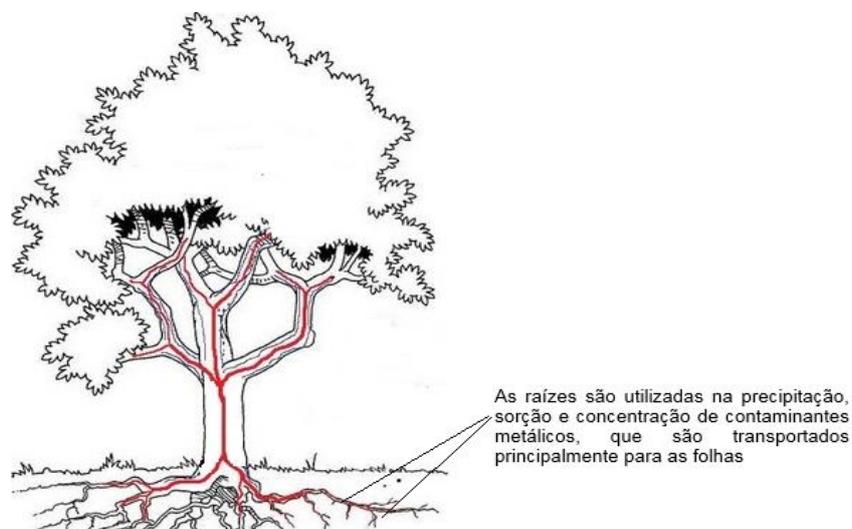


Figura 2. Mecanismo de fitoextração em espécies florestais. Fonte: Adaptado de Almeida¹⁹.

As plantas hiperacumuladoras, segundo Lasat²⁰ podem acumular estes elementos em níveis até cem vezes superiores a uma planta comum. De acordo com Barreto²¹ podem ser consideradas plantas hiperacumuladoras aquelas que acumulam mais de 0,1 % por peso seco do tecido vegetal. O destino do material vegetal produzido dependerá da possibilidade ou não de seu aproveitamento, sendo variável de acordo com a espécie vegetal cultivada, sua capacidade de bioacúmulo e o risco ambiental representado.¹⁶

Diversos trabalhos têm sido conduzidos para avaliar o potencial fitoextrator de espécies vegetais, entretanto ainda são escassos os estudos com espécies florestais perenes. Zancheta²² avaliando o potencial fitoextrator de Cu por plantas de sorgo (*Sorghum bicolor*), milheto (*Pennisetum*

glaucum), crotalária (*Crotalaria juncea*) e feijão de porco (*Canavalia ensiformis*) constatou que o teor e acúmulo de Cu nas plantas foram proporcionais à adição do metal na solução nutritiva, porém, foram muito mais elevados no sistema radicular do que na parte aérea. O acúmulo preferencial de Cu nas raízes, embora diminua o transporte para a parte aérea, contribuiu para a tolerância das plantas ao metal, sendo, portanto, considerado limitante para o emprego da fitoextração. Santos *et al.*¹⁵ avaliaram o acúmulo de Pb no tecido vegetal da mamoneira (*Ricinus communis* L.) em solo contaminado e o potencial de remediação, tendo como resultado acúmulo de Pb nas raízes, diminuição do crescimento das plantas em função da diminuição das massas das matérias secas da parte aérea e das raízes conforme aumento gradual da concentração

de Pb no solo. Santos *et al.*¹⁴ estudaram o potencial de fitorremediação da kenaf (*Hybiscus canabinnus*), mostarda (*Brassica juncea*), rabanete (*Raphanus sativus*) e amaranto (*Amaranthus crentus*), usando solo contaminado por Zn, Cu, Mn, Pb e B. As espécies testadas foram capazes de remover metais do solo, sendo que houve variação quanto a eficiência destas, uma vez que *Hybiscus canabinnus* foi mais tolerante nas condições empregadas, e não apresentou sintomas visuais de toxidez.

Tanto a água como os nutrientes são absorvidos pelas raízes, na rizosfera. A água contendo íons solúveis penetram na raiz por processo de osmose. Essas substâncias entram pelas raízes e seguem até o xilema. A parede celular das células do xilema é reforçada pela lignina, quando totalmente formadas funcionam como vasos condutores. A lignina é uma macromolécula associada à celulose na parede celular, apresenta em sua estrutura grupos fenólicos e álcoois onde os nutrientes podem interagir. Gorduras e óleos são necessários para o armazenamento de carbono pelas plantas. Existem nas plantas na forma de ácidos graxos, ácidos carboxílicos de cadeia reta com um número par de carbono. Íons metálicos reagem com ácidos graxos presentes na planta interagindo diretamente no grupo carboxílico.

As interações entre os metais e grupos presentes nas plantas são utilizadas são usadas em citologia para identificação de grupos funcionais presentes nas plantas. O Hg^{2+} , como outros íons metálicos complexam-se com os grupos carbóxilo e hidroxilo das

proteínas ($COOH^-$ e OH^-). No caso específico do Hg, este, também possui afinidade com os grupos sulfidrilo (SH), sendo a ligação mais estável, podendo levar à formação de ligações entre cadeias de proteínas adjacentes. Algumas moléculas orgânicas, que normalmente não apresentam afinidade para as proteínas forma com elas complexos fortes na presença de íons metálicos, que atuam como pontes de ligação. Os metais mais eficazes neste processo são Hg, Cu, Ag, Ni, Zn, Co e Mn.²³

2.1.3. Fitoestabilização

Na fitoestabilização ocorre a imobilização de um contaminante através das reações de absorção e acumulação, adsorção e/ou precipitação na zona das raízes conforme ilustrado na Figura 3. É usado para imobilizar contaminantes no sistema solo-planta, visando reduzir a biodisponibilidade desses contaminantes e prevenir sua mobilidade nas águas subterrâneas.¹⁹

Essa técnica é empregada para contaminantes inorgânicos e sítios contaminados com esses elementos podem ser remediados com sucesso fazendo-se o uso desse mecanismo. Entretanto, a permanência do contaminante no local, ainda que imobilizado, pode ser posto novamente em disponibilidade, caso sofra reversão em decorrência de mudanças físico-químicas do meio.¹⁶

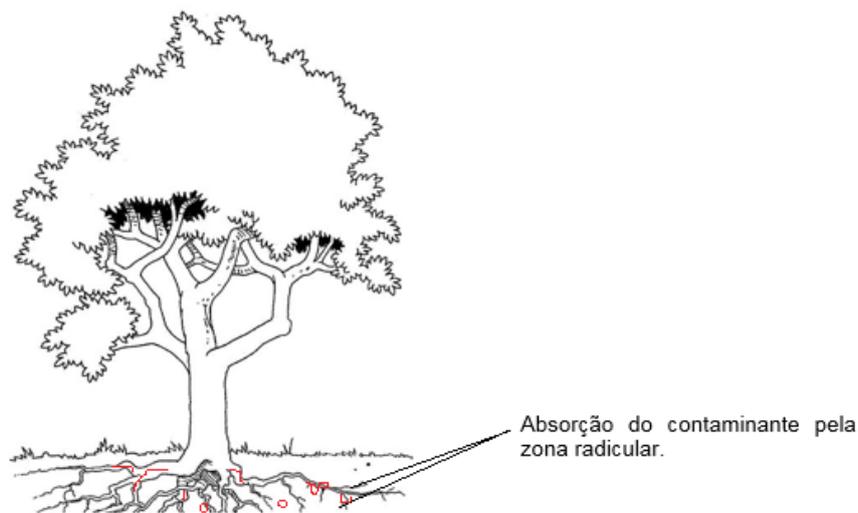


Figura 3. Mecanismo de fitoestabilização em espécies florestais. Fonte: Adaptado de Almeida¹⁹

Pérez-Esteban *et al.*²⁴ realizaram experimentos em condição de estufa para avaliar os efeitos de alterações orgânicas sobre estabilização de metais e do potencial de *Brassica juncea* para fitoestabilização de solos, verificando que o aumento da matéria orgânica pode ser eficaz para a estabilização de metais e para aumentar a fitoestabilização da espécie estudada nos solos. Essa planta demonstrou potencial para fitoestabilização. Da mesma forma Van Nevel *et al.*²⁵ examinaram os efeitos de seis espécies arbóreas bétula (*Betula pendula*), carvalho (*Quercus robur* e *Quercus petraea*), gafanhoto preto (*Robinia pseudoacacia*), aspen (*Populus tremula*), pinheiro silvestre (*Pinus sylvestris*) e *Pseudotsuga menziesii* sobre as características do pH do solo, carbono orgânico e capacidade de troca catiônica (CTC) e sobre a redistribuição de Cd e Zn em um solo arenoso poluído. Observou-se que no período de estudo a espécie *Populus tremula* obteve o melhor desempenho na fitoestabilização desses metais.

Magalhães *et al.*¹⁵ avaliaram a técnica da fitoestabilização para remediar solo contaminado com Zn, utilizando as espécies *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus saligna* em conjunto com os resíduos siderúrgicos. A menor dose foi suficiente para provocar diminuição nas concentrações de Zn, sendo esse efeito evidenciado pelo desenvolvimento

das plantas, enquanto a maior dose promoveu maior crescimento das espécies. A espécie que obteve melhor desenvolvimento foi o *E. urophylla*, entretanto, a que apresentou maior acúmulo total de Zn foi o *E. saligna*. Pereira *et al.*²⁶ avaliaram o potencial das espécies arbóreas *Cordia africana*, *Mimosa caesalpineia*, *Acacia angustissima* e *Anadenanthera colubrina* na fitoestabilização de metais presentes em um substrato contaminado. As espécies vegetais estudadas apresentaram desenvolvimento dentro dos padrões normais, mostrando tolerância a áreas contaminadas, que tendeu a se acumular nas raízes das plantas.

2.2. Fitorremediação com espécies florestais e perspectivas

Os estudos de fitorremediação atualmente tem dado enfoque ao uso de plantas de ciclo anual, todavia essa planta tem apresentado desvantagens características de sua condição, entre as quais tem sido apontado a ocorrência de fitotoxidez nessas plantas, como relata Sodré²⁷ que estudou a fitodisponibilidade do Cu em latossolo tratado com biossólido enriquecido com doses crescentes do metal e avaliou a interação deste com plantas de *Lactuca sativa*. O autor observou que doses de

Cu aplicada ao solo alteraram o crescimento das plantas nos tratamentos, indicando a fitotoxidez do metal, nas plantas verificou-se a concentração correlacionada desse elemento à dose aplicada ao solo. Plantas de aveia cultivadas com adição de doses crescentes de Cu apresentaram grande redução do crescimento e desenvolvimento na dose de 1000 mg kg⁻¹ de Cu no solo.²⁸ Da mesma forma Santana *et al.*²⁹ avaliaram o efeito da inoculação com o fungo *Rhizophagus clarus* na fitorremediação com *Canavalia ensiformis* em um solo com alta concentração de Cu, embora a espécie tenha translocado valores superiores a 100 mg kg⁻¹ para seu sistema foliar, esta apresentou sinais de fitotoxidez e limitação no desenvolvimento. Tiecher *et al.*³⁰ avaliaram se o aumento da concentração de Zn em solos do sul do Brasil pode aumentar toxicidade às plantas de milho, e a viabilidade da espécie para fitorremediação de solos contaminados com Cu e Zn, obtendo sinais de fitotoxidez e comprometimento do desenvolvimento da espécie estudada causado pelo Zn.

Por sua vez, outros estudos têm indicado que espécies perenes, ao contrário das de ciclo anual, são mais resistentes a doses elevadas de Cu, além disso, essas espécies não são usadas na alimentação humana ou animal, não oferecendo, portanto, riscos à saúde como ocorre com as espécies agrícolas usadas em programas de fitorremediação. Dentre esses estudos Silva³¹ avaliou o efeito do Cu sobre o crescimento e qualidade de mudas das espécies florestais açoita-cavalo e aroeira-vermelha. Os resultados revelaram que as doses testadas de Cu não alteraram a qualidade de mudas de aroeira-vermelha, sendo ainda considerado benéfico para o desenvolvimento das plantas de açoita-cavalo que removeu do solo em média 64 mg kg⁻¹, da mesma forma Soares *et al.*³² avaliando o efeito de concentrações crescentes de Cu em mudas de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* observaram que altas concentrações de Cu não causaram redução na absorção e translocação de outros micronutrientes, não representando mecanismo de fitotoxidez desse metal. Santos *et al.*,²⁸ no mesmo sentido, analisando

mudas florestais em experimento não encontraram sinais visíveis de fitotoxidez, e consideraram essa característica como um dos indicadores de espécies fitorremediadora.

A aplicação contínua de quantidades elevadas de fertilizantes no solo pode ocasionar acúmulo metais, causando problemas ambientais e de saúde. Gabriel *et al.*³³ avaliou os níveis de metais Cu e Zn, em diferentes profundidades do solo, submetido a diferentes fontes de fertilizantes (cama de aviário, dejetos suínos e adubação mineral, observando que a adubação com material orgânico ao longo do tempo resulta em aumento do Cu no solo. Moterle *et al.*³⁴ relata adições frequentes de Cu na forma de [CuSO₄ + Ca(OH₂)] utilizado para o controle de doenças fúngicas em videiras e consequente aumento das concentrações deste no solo, estudando essa dinâmica em regiões de Bento Gonçalves – RS. Os autores relatam que em todos os locais amostrados houve resultados significativos com contaminação de Cu ao longo do tempo, resultado da utilização constante de calda bordalesa na viticultura, comprometendo a qualidade e degradando o solo. Do mesmo modo Andrezza *et al.*³⁵ relatam a contaminação com elevadas concentrações de Cu na serra do Nordeste no estado do Rio Grande do Sul em áreas de vitivinicultura.

Abreu *et al.*³⁶ estudaram a capacidade de fitorremediação com *Pinus pinaster* e outras espécies arbóreas em área de rejeito de mineração em Minas Gerais. *Pinus pinaster*, apresentou teores elevados de absorção de metais na parte aérea, superiores aos das outras espécies, a espécie obteve bom desenvolvimento vegetativo e boa cobertura do solo, minimizando a erosão hídrica e eólica e sendo indicada para a fitoestabilização de áreas dessa mineração. Renault *et al.*³⁷ na mesma linha de trabalho investigou o potencial de revegetação e fitorremediação com espécies arbóreas em rejeitos de minas de ouro. Acumulações significativas de Cu foram registradas em espécies de *Pinus banksiana* que cresceram naturalmente no local.

Na mesma linha, Silva *et al.*³⁸ avaliou a tolerância de três espécies florestais nativas ao excesso de Cu no solo utilizando *Parapiptadenia rigida*, *Peltophorum dubium* e *Enterolobium contortisiliquum*. *Enterolobium contortisiliquum* e a *Peltophorum dubium* apresentaram tendência de armazenamento do Cu nas raízes e baixa translocação para a parte aérea, enquanto que *Parapiptadenia rigida* não foi eficiente na remoção dos compostos. Van Tichelen *et al.*³⁹ estudaram capacidade de absorção de Cu e potenciais efeitos tóxicos em plantas de *Pinus sylvestris* utilizando fungos simbiotes. O estudo demonstrou que a colonização de fungos impediu a acumulação de Cu nas acículas, uma vez que os tratamentos sem fungos apresentaram taxas de absorção de até dez vezes maiores do que em plantas associadas com o fungo *P. involutus*. Nirola *et al.*⁴⁰ da mesma forma, estudou a acumulação de metais em *Acacia pycnantha* e *Eucalyptus camaldulensis* crescendo em uma mina de Cu abandonada. Os autores encontraram cerca de 5,3 mg kg⁻¹ de Cu acumulados nas folhas enquanto que a concentração desse metal no sistema radicular foi bem superior, acima de 65 mg kg⁻¹ em média. Esse resultado possivelmente é causado pela presença de células parenquimáticas no sistema radicular, em especial o parênquima cortical que atua como sistema de reserva, apresentando meatos (pequenos espaços) entre as células e que teriam capacidade de armazenar maiores teores de substâncias extraídas do solo.

Placek⁴¹ avaliaram a capacidade das espécies de árvores pinheiro silvestre (*Pinus sylvestris*), Noruega abeto (*Picea abies*), e carvalho (*Quercus robur*) em remediar solos contaminados com Cd, Zn e Pb. O experimento demonstrou que as árvores de *Pinus sylvestris* apresentam excelente capacidade de adaptação sob presença de Zn, podendo ser usado na recuperação de solos.

As espécies arbóreas em geral tem demonstrado ausência de sintomas de toxicidade quando usadas em programas de fitorremediação indicando que seus mecanismos de tolerância podem permitir-

lhes suportar maiores concentrações de metais do que as culturas agrícolas, mesmo árvores que não são especialmente selecionados para a tolerância ao metal geralmente podem sobreviver no solo contaminado, embora com uma taxa de crescimento reduzido.⁴² Na avaliação de *Betula pendula* quanto a sua possível utilidade na fitorremediação de solos contaminados com Zn Dmuchowski *et al.*⁴³ demonstraram a capacidade desta espécie para acumular quantidades elevadas de Zn nas suas folhas.

Viera; Schumacher⁴⁴ avaliaram a concentração e retranslocação de nutrientes em acículas de *Pinus taeda* no município de Cambará do Sul, RS, encontrando taxas de translocação superiores a 50 % para Zn. Assim como espécies perenes, outras espécies vegetais de ciclo anual apresentaram capacidade de translocar o Zn para a parte aérea em alguns estudos, tais como os de Baldantoni *et al.*⁴⁵ que conduziram um experimento com *Populus alba* e *Populus nigra*, para avaliar a capacidade de acumulação de metais por essas espécies. Os resultados mostraram o Zn foi acumulado em maior quantidade nas folhas em relação às outras estruturas da planta.

Testiati *et al.*⁴⁶ avaliaram o potencial de fitorremediação estudando duas plantas perenes *Globularia alypum* e *Rosmarinus officinalis*. As espécies mostraram-se capazes de acumular Zn.

As espécies florestais perenes, de acordo com Caires *et al.*⁴⁷ por produzirem alta quantidade de biomassa e acumularem metais, imobilizando-os por mais tempo, são de grande interesse em programas de revegetação de áreas contaminadas. Por evoluírem em contato com diferentes substâncias de ocorrência natural no solo, estas desenvolveram processos adaptativos e interações com microrganismos que permitem a degradação de compostos orgânicos em outros menos tóxicos, além de substâncias e minerais passíveis de serem utilizados na nutrição vegetal.⁴⁸ Essas espécies são capazes de absorver metais do solo e

transportá-los para suas estruturas conforme representado na Figura 4.

Tem-se buscado cada vez mais, identificar novas espécies fitorremediadoras, especialmente de vegetais não comestíveis, como é o caso das espécies florestais perenes, uma vez que essas não ofereceriam riscos à saúde humana por não serem consumidas, além de possuírem outros usos importantes como a produção de biodiesel, desenvolvimento social, geração de emprego para as populações locais, sequestro de

carbono, redução dos gases do efeito estufa, entre outros.⁴⁹

As espécies arbóreas de crescimento rápido são capazes de colonizar solos com contaminados com metais, contudo sua sobrevivência e estabelecimento nos ambientes contaminados ainda é pouco estudada, e embora espécies vegetais tenham sido testadas para estabilizar e remediar locais contaminados, seu crescimento é muitas vezes deficiente devido à toxicidade de metais.⁵⁰

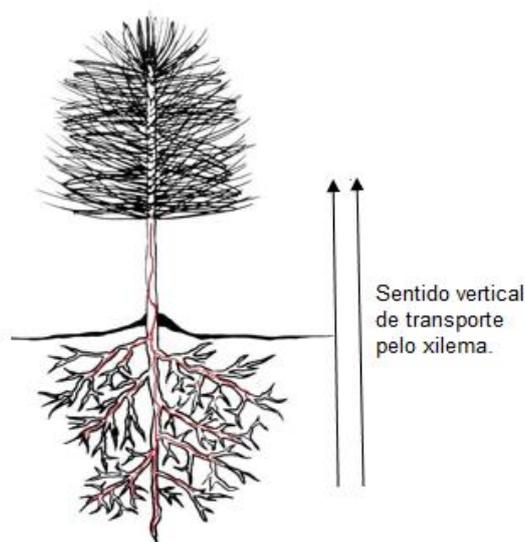


Figura 4. Mecanismo de transporte de metais pelo xilema em espécies florestais

Silva *et al.*⁵¹ avaliando o efeito de doses de Cu no crescimento e qualidade de mudas de Barbatimão (*Stryphnodendron polyphyllum*) e Cássia (*Cassia multijuga*), constatou que no caso da espécie arbórea as doses de Cu testadas não influenciaram a qualidade das mudas, enquanto que para o Barbatimão notou-se tolerância até 300 mg kg⁻¹ de Cu adicionado ao solo, indicando resistência das espécies perenes testadas as doses utilizadas no experimento. Suchkova *et al.*⁵² estudaram o estabelecimento natural de plantas e sua contribuição para a recuperação de depósitos de lodo e seu fator de bioconcentração, os resultados mostraram que as plantas removeram os metais Mn, Cu, Zn, Fe, Cr, Ni e Pb indicando, da mesma forma, potencial para fitoextração por plantas arbóreas.

Nas espécies de pinus, em geral, alta retenção dos metais pelo sistema radicular demonstra que as raízes são o primeiro alvo da toxicidade dos metais, e, portanto, exerce um papel determinante na adaptação das espécies não tolerantes a contaminação dos solos por metais potencialmente tóxicos. Sousa *et al.*⁵³ avaliando a resposta de dois genótipos diferentes de *Pinus pinaster* para a contaminação por Cd em solo contaminado com 15 e 30 mg kg⁻¹ do metal, constatou que em 30 mg kg⁻¹ o genótipo acumulou 1,7 vezes mais Cd na parte aérea e a concentração no sistema radicular foi o parâmetro mais influenciado pela exposição ao metal.

Párraga-aguado *et al.*⁵⁴ estudando a influência dos parâmetros do solo na disponibilidade do metal em uma floresta

mediterrânea afetada por contaminação de mineração usando a espécie *Pinus halepensis* observou que as acículas das plantas presentes nas áreas menos impactadas apresentaram menores concentrações de Mn e Zn em relação as analisadas em áreas de rejeitos, indicando essa espécie como adequada a ser empregadas na fitorremediação dos mesmos. Doichinova *et al.*⁵⁵ testaram em condições de estufa, o potencial fitorremediador de mudas de Carvalho vermelho (*Quercus rubra*) e Pinho austríaco (*Pinus nigra*), em substratos contaminados com metais Zn e Cu, avaliando as concentrações do poluente tanto nas plantas quanto nos substratos ao final do período de estudo, verificou que a bioacumulação e translocação de metais para a parte aérea das plantas dependia fortemente de peculiaridades inerentes à estrutura da espécie.

Em plantas de *Pinus radiata* com doze meses de idade expostas à Pb em cultura hidropônica, com e sem a adição dos agentes quelantes, durante uma semana Jarvis; Leung⁵⁶ observaram o acúmulo de Pb na forma não quelatada predominantemente nos tecidos da raiz, enquanto que quelatados foi transportado principalmente para as acículas, esses mesmos autores analisando a ultra estrutura do tecido da espécie com microscopia eletrônica de transmissão, relataram a presença do metal exclusivamente na parede celular, por sua vez nas raízes foram encontrados em locais adjacentes às paredes celulares e em espaços intercelulares, possivelmente esse resultado pode ser explicado devido ao fato de o sistema radicular possuir células parenquimáticas de reserva distribuídas por diversos compartimentos, o que possibilitaria que os metais absorvidos fiquem armazenados não só na parede celular mas de forma sistêmica pelo tecido vegetal radicular. As células parenquimáticas são células isoladas ou em grupo e reservam o amido, principal carboidrato da planta, que possui a fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$, é um polímero de cadeia longa contendo as funções álcool e éter, o quelato pode ser formado entre dois átomos de

oxigênio das duas funções. O quelato é um composto orgânico químico formado por um íon metálico, neste caso o Pb, formado por ligações covalentes a um agente quelante, ou seja, uma estrutura heterocíclica de compostos orgânicos como é o caso dos aminoácidos, peptídeos ou polissacarídeos presentes na planta. Os quelatos são mais estáveis e, portanto, conseguem ser transportados da raiz às acículas. Outras estruturas celulares, tais como mitocôndrias, ribossomos e retículo endoplasmático, não aparentaram terem sido negativamente afetadas pela presença do metal, indicando tolerância por essa espécie de pinus.

Jagtap *et al.*⁵⁷ por sua vez, compararam três espécies vegetais e suas capacidades de remediar solos contaminados com óleo diesel e potencial para converter sua biomassa em bioetanol, para isso utilizaram *Pinus densiflora*, *Populus tomentiglandulosa*, e *Thuja orientalis* cultivadas numa área de solo contaminado com 6000 mg kg⁻¹ de óleo diesel. O solo contaminado com diesel resultou na redução da biomassa vegetal para a maioria das plantas testadas, essa redução pode ter sido ocasionada por interferências causadas pelo diesel no processo de fotossíntese da planta, que levou a uma menor produção de biomassa. O diesel presente no solo pode ter influenciado o processo de fotossíntese $(6CO_2(g) + 6H_2O(l) + calor \rightarrow C_6H_{12}O_6(aq) + 6O_2(g))$ através da disponibilidade em excesso de carbono para a planta, podendo ter atuado como inibidor do processo fotossintético. No entanto, em *P. densiflora* a biomassa foi maior, também sugerindo potencial da espécie em tolerar elevados teores de contaminante. Puga *et al.*⁵⁸ aplicaram biocarvão derivado de palha de cana de açúcar em experimento em um solo contaminado por metais. A aplicação do biocarvão reduziu as concentrações disponíveis de Cd, Pb e Zn em 56, 50 e 54 %, respectivamente, na mina de solo contaminado e conduziu a uma redução consistente da concentração de Zn na água dos poros.

Algumas plantas podem tolerar níveis elevados desse elemento podendo acumular concentração superior a 1000 mg kg⁻¹ por meio de mecanismos bioquímicos. O acúmulo em diferentes partes das plantas, para Ent & Reeves⁵⁹ está associado a alterações celulares, que contribuem para a tolerância ao metal, como a ligação às substâncias pécticas nas paredes de células do córtex da raiz. Espécies florestais arbóreas tolerantes à toxicidade do Cu podem ser uma opção para o restabelecimento vegetal em áreas contaminadas.⁶⁰

Silva³¹ estudando o efeito do Cu sobre as espécies vegetais açoita-cavalo e aroeira-vermelha identificou que esse elemento afetou primeiramente o sistema radicular das mudas e que a aroeira-vermelha foi mais tolerante a doses elevadas de Cu, indicando variação da capacidade de absorção do elemento entre espécies de plantas diferentes. Da mesma forma Zancheta *et al.*²² obteve resultados que comprovaram que as plantas respondem de maneira diferenciada à contaminação do solo.

3. Conclusão

Embora os estudos de fitorremediação e sua aplicação apresentem como foco principal atualmente a utilização de espécies vegetais de ciclo anual, fica evidente o potencial de uso de espécies florestais em programas de fitorremediação. Os relatos na literatura apontam diversas dessas espécies com capacidades reais de uso, além disso, têm sido apontadas como tolerantes a solos em estágios de grande contaminação, e sua capacidade de fixação de contaminante em suas estruturas por maior tempo em relação a espécies vegetais de ciclo anual. O fator limitante no pleno uso dessas espécies ainda é o reduzido número de pesquisas, que por consequência faz com que muitas espécies eficazes deixem de ser identificadas para fitorremediação.

Agradecimentos

Goveia, D. agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo 2016/23728-8.

Referências Bibliográficas

- ¹ Rajor, A.; Xaxa, M.; Mehta, R. An overview on characterization, utilization and leachate analysis of biomedical waste incinerator ash. *Journal of Environmental Management* **2012**, *108*, 36. [CrossRef]
- ² Abdullahi, M.S. Soil Contamination, remediation and plants. *Soil Remediation and Plants* **2015**, 525. [CrossRef]
- ³ Pontes, J.; Mucha, A. P.; Santos, H.; Reis, I.; Bordalo, A.; Basto, M. C.; Bernabeu, A.; Almeida, C. M. R. Potential of bioremediation for buried oil removal in beaches after an oil spill. *Marine Pollution Bulletin* **2013**, *76*, 258. [CrossRef]
- ⁴ Agnello A.C.; Bagard M.; Van Hullebusch, E.D.; Esposito, G.; Huguenot, D. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation. *Science of The Total Environment* **2015**, 1. [CrossRef]
- ⁵ Dghaim, R.; Al Khatib, S.; Rasool, H. Determination of Heavy Metals Concentration in Traditional Herbs Commonly Consumed in the United Arab Emirates. *Journal of Environmental and Public Health* **2015**, 1. [CrossRef]
- ⁶ Vicente-Martorelli, J.; Galindo-Riaño, M.D.; García-Vargas, M.; Granado-Castro, M.D. Bioavailability of heavy metals monitoring water, sediments and fish species from a polluted estuary. *Journal of Hazardous Materials* **2009**, *162*, 823. [Link]
- ⁷ Achiba, W. B.; Gabteni, N.; Lakhdar, A.; Laing G. D.; Verloo, M.; Gallali N. J. T. Effects of 5-year application of municipal solid waste

- compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **2009**, *130*, 156. [CrossRef]
- ⁸ Oliveira, R. C. B.; Marins, R. V. Dinâmica de Metais-Traço em Solo e Ambiente Sedimentar Estuarino como um Fator Determinante no Aporte desses Contaminantes para o Ambiente Aquático: Revisão. *Revista Virtual de Química* **2011**, *3*, 88. [CrossRef]
- ⁹ Templeton, D. M.; Freek, A.; Cornelis, R.; Danielsson, L.-C.; Muntau, H.; Van Leeuwen, H. P.; Lobniski, R. Guidelines for terms related to chemical speciation and fraction of elements. Definitions, structural aspects, and methodological approaches. *Pure and Applied Chemistry* **2000**, *72*, 1453. [Link]
- ¹⁰ Martins, C. A. S.; Nogueira, N. O.; Ribeiro, P. H.; Rigo, M. M.; Candido, A. de O. A dinâmica de metais-traço no solo. *Revista Brasileira Agrociência* **2011**, *3*, 383. [Link]
- ¹¹ Magalhães, M. O. L.; Sobrinho, N. M. B. A.; Santos, F. S.; Mazur, N. Potencial de duas espécies de eucalipto na fitoestabilização de solo contaminado com zinco. *Revista Ciência Agronômica* **2011**, *3*, 805. [CrossRef]
- ¹² Singh, O. V.; JAIN, R. K. Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. *Applied Microbiology and Biotechnology* **2003**, *63*, 128. [CrossRef]
- ¹³ Sessitsch, A.; Kuffner, M.; Kidd, P.; Vangronsveld, J.; Wenzel, W. W.; Fallmann, K. Puschenreiter, M. The role of plant-associated bacteria in the mobilization and phytoextraction of trace elements in contaminated soils. *Soil Biology and Biochemistry* **2013**, *60*, 182. [CrossRef]
- ¹⁴ Vasconcellos, M. C.; Pagliuso, D.; Sotomaior, V. S. Fitorremediação: Uma proposta de descontaminação do solo. *Estudos de Biologia: Ambiente e Diversidade* **2012**, *83*, 261. [CrossRef]
- ¹⁵ Magalhães, M. O. L.; Sobrinho, N. M. B. A.; Mazur, N. Uso de resíduos industriais na remediação de solo contaminado com cádmio e zinco. *Ciência Florestal* **2011**, *21*, 21. [Link]
- ¹⁶ Andrade, J. C. M.; Tavares, S. R. L.; Mahler, C. F.; *Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental*. Oficina de Textos: São Paulo, 2007. [Link]
- ¹⁷ Santos, G. C. G.; Rodellall, A. A.; Abreu, C. A.; Coscione, A. R. Vegetable species for phytoextraction of boron, copper, lead, manganese and zinc from contaminated soil. *Scientia Agricola* **2010**, *67*, 713. [CrossRef]
- ¹⁸ Santos, C. H.; Garcia, A. L. de O.; Calonego, J. C.; Spósito, T. H. N.; Rigolin, I. M. Potencial de fitoextração de Pb por mamoneiras em solo contaminado. *Semina Ciência Agraria* **2012**, *33*, 1427. [CrossRef]
- ¹⁹ Almeida, E. A. P. E.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2011. [Link]
- ²⁰ Lasat, M. M. Phytoextraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues. *Journal of Hazardous Substance Research* **2000**, *2*, 2. [Link]
- ²¹ Barreto, A. B. Seleção de macrófitas aquáticas com potencial para remoção de metais-traço em fitorremediação. *Saneamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos* **2010**, *81*. [Link]
- ²² Zancheta, A. C. F.; Abreu, C. A. de; Zambrosi, F. C. B.; Erismann, N. de M.; Lagôa, A. M. M. A. Fitoextração de cobre por espécies de plantas cultivadas em solução nutritiva. *Bragantia* **2011**, *70*, 737. [Link]
- ²³ Figueiredo, A. C. da Silva; Barroso, J. M. G.; Pedro, L. M. G.; Ascensão, L.; *Histoquímica e citoquímica em plantas; Princípios e protocolos*. Faculdade de Ciências da Universidade Lisboa: Lisboa, 2007. [Link]
- ²⁴ Pérez-Esteban, J.; Escolástico, C.; Moliner, A.; Masaguer, A.; Fernández, J.R. Phytostabilization of metals in mine soils using Brassica juncea in combination with organic amendments. *Plant Soil* **2013**, *377*, 97. [CrossRef]

- ²⁵ Van Nevel, L.; Mertens, J.; Staelens, J.; Schrijver, A. De; Tack, F. M. G.; Neve, S.; Meers, E.; Verheyen; K. Elevated Cd and Zn uptake by aspen limits the phytostabilization potential compared to five other tree species. *Ecological Engineering* **2011**, *37*, 1072. [CrossRef]
- ²⁶ Pereira, A. C. C.; Rodrigues, A. C. D.; Santos, F. S. dos; Guedes, J. do N.; Sobrinho, N. M. B. A. Concentração de metais pesados em espécies arbóreas utilizadas para revegetação de área contaminada. *Revista Ciência Agrônômica* **2012**, *43*, 641. [CrossRef]
- ²⁷ Sodré, F. F. *Resumos da 23^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química*, Poços de Caldas, Brasil, 2000. [Link]
- ²⁸ Santos, H. P.; Melo G. W. B.; Luz, N. B.; Tomasi, R. J.; *Comportamento fisiológico de plantas de aveia (Avena strigosa) em solos com excesso de cobre*. Embrapa: Bento Gonçalves, 2004. [Link]
- ²⁹ Santana, N. A.; Ferreira, P. A. A.; Soriani, H. H.; Brunetto, G.; Nicoloso, F. T.; Antonioli, Z. I.; Jacques, R. J. S. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and vermicompost on copper phytoremediation in a sandy soil. *Applied Soil Ecology* **2015**, *96*, 172. [CrossRef]
- ³⁰ Tiecher, T. L.; Ceretta, C. A.; Ferreira, P. A. A.; Lourenzi, C. R.; Tiecher, T. Giroto, E.; Fernando T. N.; Soriani, H. H.; Conti, L. De; Mimmo, T.; Brunetto, S. C. The potential of *Zea mays* L. in remediating copper and zinc contaminated soils for grapevine production. *Geoderma* **2016**, *262*, 52. [CrossRef]
- ³¹ da Silva, R. F.; Lupatini, M.; Antonioli, Z. I.; Leal, L. T.; Junior, C. A. M. Comportamento de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan e *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong cultivadas em solo contaminado com cobre. *Ciência Florestal* **2011**, *21*, 103. [Link]
- ³² Soares, C. R. F. S.; Siqueira, J. O.; Carvalho, J. G. De; Moreira; F. M. S.; Graziotti, P. H. Crescimento e nutri o mineral de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em soluço nutritiva com concentra o crescente de cobre. *Revista Brasileira Fisiologia Vegetal* **2000**, *12*, 213. [Link]
- ³³ Gabriel, M.; da Rosa, G. M.; Wastowski, A. D.; Mendonça, A. Maria.; Bairros, P.; *Congresso internacional de tecnologias para o meio ambiente*, Bento Gonçalves, Brasil, 2012.
- ³⁴ Moterle, D. F.; Dal Fr , A. I.; *IV Salão de inicia o científica e inova o tecnológica*, Bento Gonçalves, Brasil, 2014. [Link]
- ³⁵ Andrezza, R.; Camargo, F. A. O.; Antonioli, Z. I. Biorremedia o de áreas contaminadas com cobre. *Revista de Ciências Agrárias*, **2013**, *36*, 127. [Link]
- ³⁶ Abreu, M. M.; Matias, M. J.; Magalhães, M. C. F.; Basto, M. J. Potencialidades do *Pinus pinaster* e *Cytisus multiflorus* na fitoestabiliza o de escombreyras na mina de ouro de Santo Ant nio (Penedono). *Revista de Ciências Agrárias* **2014**, *2*, 335. [Link]
- ³⁷ Renault, S.; Szczerki, C.; Sailerova, E.; Fedikow, M. A. F.; Em: Report of Activities, Manitoba Industry, Economic Development and Mines. Manitoba Geological Survey: Manitoba, 2004 [Link]
- ³⁸ Silva, R. F. DA. Influência da contamina o do solo por cobre no crescimento e qualidade de mudas de  oita-cavalo (*Luehea divaricata* Mart. & Zucc.) E aroeira-vermelha (*Schinus molle* L.). *Ciência Florestal* **2011**, *21*, 111. [Link]
- ³⁹ Van Tichelen, K. K.; Vanstraelen, T.; Jan, V. C. Nutrient uptake by intact mycorrhizal *Pinus sylvestris* seedlings: a diagnostic tool to detect copper toxicity. *Tree Physiology*. **1999**, *19*, 189. [Link]
- ⁴⁰ Nirola, R.; Megharaj, M.; Thavamani, P.; Aryal, R.; Venkateswarlu, K.; R. Naidu. Evaluation of metal uptake factors of native trees colonizing an abandoned copper mine – a quest for phytostabilization. *Journal of Sustainable Mining* **2015**, *14*, 115. [CrossRef]
- ⁴¹ Placek, A.; Grobelak, A.; Kacprzak, M. Improving the phytoremediation of heavy metals contaminated soil by use of sewage sludge. *International Journal of Phytoremediation* **2015**, *18*, 605. [CrossRef]

- ⁴² Pulford, I. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review. *Environment International* **2003**, *29*, 529. [[CrossRef](#)]
- ⁴³ Dmuchowski, W.; Gozdowski, D. Phytoremediation of zinc contaminated soils using silver birch (*Betula pendula* Roth). *Ecological Engineering* **2014**, *71*, 32. [[CrossRef](#)]
- ⁴⁴ Viera, M.; Schumacher, M. V. Concentração e retranslocação de nutrientes em acículas de *Pinus taeda* L. *Ciência Florestal* **2009**, *19*, 375. [[Link](#)]
- ⁴⁵ Baldantoni, D.; Cikatelli, A.; Stefano, A. B. Different behaviours in phytoremediation capacity of two heavy metal tolerant poplar clones in relation to iron and other trace elements. *Journal of Environmental Management* **2014**, *146*, 94. [[CrossRef](#)]
- ⁴⁶ Testiati, E.; Parinet, J.; Massiani, C.; Laffont-Schwob, I.; Rabier, J.; Pfeifer, H. R.; Lenoble, V.; Masotti, V.; Prudent, P. Trace metal and metalloid contamination levels in soils and in two native plant species of a former industrial site: Evaluation of the phytostabilization potential. *Journal of Hazardous Materials* **2013**, *248*, 131. [[CrossRef](#)]
- ⁴⁷ Caires, S. M.; FontesII, M. P. F.; Fernandes, R. B. A.; Neves, J. C. L. Desenvolvimento de mudas de cedro-rosa em solo contaminado com cobre: tolerância e potencial para fins de fitoestabilização do solo. *Revista Árvore* **2011**, *35*, 1181. [[CrossRef](#)]
- ⁴⁸ Andrade, J. C. M. E.; Mahler, C. F.; Em: *International conference on environmental geotechnics*, Rio de Janeiro, Brasil, 2002. [[Link](#)]
- ⁴⁹ Baudhdh, K.; Singh, K. *Ricinus communis*: A robust plant for bio-energy and phytoremediation of toxic metals from contaminated soil. *Ecological Engineering* **2015**, *84*, 640. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁰ Babu, A. G.; Shea, P. J.; Oh, B. *Trichoderma* sp. PDR1-7 promotes *Pinus sylvestris* reforestation of lead-contaminated mine tailing sites. *Science of the Total Environment* **2014**, *476*, 61. [[CrossRef](#)]
- ⁵¹ Silva, R. F. Da; Missio, E. L.; Steffen, R. B.; Weirich, S. W.; Kuss, C. C.; Scheidet D.L. Efeito do cobre sobre o crescimento e qualidade de mudas de *Stryphnodendron polyphyllum* Mart. e *Cassia multijuga* Rich. *Ciência Florestal* **2014**, *24*, 717. [[Link](#)]
- ⁵² Suchkova, N.; siripidis, I. T.; Alifragkis, D.; Ganoulis, J.; Darakas, E.; Sawidis, T. Assessment of phytoremediation potential of native plants during the reclamation of an area affected by sewage sludge. *Ecological Engineering* **2014**, *69*, 160. [[CrossRef](#)]
- ⁵³ Sousa, N. R.; Ramos, M. A.; Marques, A. P. G. C.; Castro. A genotype dependent-response to cadmium contamination in soil is displayed by *Pinus pinaster* in symbiosis with different mycorrhizal fungi. *Applied Soil Ecology* **2014**, *76*, 13. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁴ Párraga-Aguado, I.; Rogel, J. A.; Alcaraz, M. N. G.; Carceles, F. J. J.; Conesa, H. M. Assessment of metal (loid) availability and their uptake by *Pinus halepensis* in a Mediterranean forest impacted by abandoned tailings. *Ecological Engineering* **2013**, *58*, 84. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁵ Doichinova, V.; Velizarova, E. Reuse of Paper Industry Wastes as Additives in Phytoremediation of Heavy Metals Polluted Substrates from the Spoil Banks of the Kremikovtsi Region, Bulgaria. *Procedia Environmental Sciences* **2013**, *18*, 731. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁶ Jarvis, M. D; Leung, D. W. M. Chelated lead transport in *Pinus radiata*: an ultrastructural study. *Environmental and Experimental Botany* **2002**, *48*, 21. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁷ Jagtap, S. S.; MinWoo, S.; Dhiman, S. S.; Kim, D.; Lee, J. K. Phytoremediation of diesel-contaminated soil and saccharification of the resulting biomass. *Fuel* **2014**, *116*, 292. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁸ Puga, A. P.; Abreu, C. A.; Melo, L. C. A.; Beesley, L. Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium. *Journal of Environmental Management* **2015**, *159*, 86. [[CrossRef](#)]

⁵⁹ Ent, A. V. D.; Reeves, R. D. Foliar metal accumulation in plants from copper-rich ultramafic outcrops: case studies from Malaysia and Brazil. *Plant Soil* **2015**, *389*, 418. [[CrossRef](#)]

⁶⁰ Freitas, H; Prasad, M.N.V; Pratas, J. Plant community tolerant to trace elements growing on the degraded soils of São Domingos mine in the south east of Portugal: environmental implications. *Environment International* **2004**, *30*, 65. [[CrossRef](#)]