

BIORREMEDIAÇÃO E FITORREMEDIAÇÃO COMO ALTERNATIVAS PARA A RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE SOLOS CONTAMINADOS POR AGROTÓXICOS

Lucas da Rocha Ferreira¹, Diana Pivatto¹, Janaina Botari¹, Edson Luis Garcia¹, João Paulo Ferreira¹, Gilmar Roberto Tavares¹ e Affonso Celso Gonçalves Jr.²

¹Universidade Estadual de Maringá - UEM, Campus de Umuarama. Estrada da Paca s/n, CEP: 87500-000, Umuarama, PR. E-mail: lukas.rf@hotmail.com diana_ambiental@hotmail.com, jcbotari2@yahoo.com.br, bio.garcia@hotmail.com, ferreira-batuca@hotmail.com, eng.gilmartavares@gmail.com

²Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Campus de Marechal Cândido Rondon. Rua Pernambuco, 1777, CEP: 85960-000, Marechal Cândido Rondon, PR. E-mail: affonso133@hotmail.com

RESUMO: Os problemas ambientais e a contaminação do solo causada pelos agrotóxicos representam um grande risco para a sustentabilidade da agricultura e para o consumo de alimentos. O desenvolvimento de técnicas eficientes para recuperação do meio ambiente natural contaminado é fundamental para a continuidade das atividades agrícolas e para garantir a produção e o consumo de alimentos saudáveis e seguros. A biorremediação e a fitorremediação são importantes alternativas para promover essa recuperação, pois utilizam a capacidade de microorganismos e plantas para reduzir ou eliminar os contaminantes. As duas tecnologias apresentam limitações que devem ser observadas, mas possuem grande potencial para a recuperação de solos contaminados, devido ao baixo custo de utilização e também pela grande quantidade de microorganismos e plantas que podem ser identificados e utilizados para remediação. Este artigo tem por objetivo fazer uma abordagem da biorremediação e da fitorremediação como ferramentas para a recuperação de solos contaminados por agrotóxicos.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade, biodegradação, contaminantes.

BIOREMEDIATION AND PHYTOREMEDIATION AS ALTERNATIVE TO ENVIRONMENTAL RECOVERY OF SOILS CONTAMINATED BY PESTICIDES

ABSTRACT: The environmental problems and the contamination of the soil caused by the pesticides represent a great risk for the sustainability of the agriculture and for the consumption of foods. The development of efficient techniques for recuperation of the contaminated natural environment is basic for the continuity of the agricultural activities and to ensure the production and the consumption of healthy and safe foods. The bioremediation and the phytoremediation are important alternatives to promote this recuperation, since they use the capacity of microorganisms and plants to reduce or to remove the contaminants. Two technologies present limitations that must be observed, but they have great potential for the recuperation of contaminated soils, due to the low use cost and also for the great quantity of microorganisms and plants that can be identified and used for remediation. This article has since objective does an approach of the bioremediation and of the phytoremediation as tools for the recuperation of soils contaminated by pesticides.

KEY WORDS: Sustainability, biodegradation, contaminants.

INTRODUÇÃO

A contaminação do solo é uma preocupação global, tornando-se um obstáculo para o desenvolvimento sustentável, visto que compromete a produção de alimentos saudáveis e acaba por contaminar os recursos hídricos.

Com o objetivo de recuperar as áreas de solo contaminadas, inúmeras técnicas têm sido pesquisadas e desenvolvidas. Este artigo destacará as técnicas de biorremediação e fitorremediação como alternativas para a recuperação de solos contaminados por agrotóxicos. Estes produtos, utilizados em larga escala na agricultura, são substâncias químicas utilizadas para o controle de doenças e pragas em plantas (Ribas e Matsumura, 2009). Estas substâncias causam impactos negativos à saúde e ao meio ambiente por meio da contaminação do ambiente natural em que são aplicados (Siqueira e Kruse, 2009).

Uma área contaminada pode ser definida como um local onde há comprovadamente contaminação, causada pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural. Os contaminantes se infiltram no solo alterando suas características naturais e assim causam impactos negativos no meio ambiente (CETESB, 2014).

Nos sistemas agrícolas, o solo sofre influência direta da utilização de agrotóxicos, principalmente em sistemas inadequados de cultivo de solo. A contaminação do solo e da água pode ser acentuada em áreas manejadas em sistema de preparo convencional, ou seja, em situações em que os solos são submetidos a preparos intensivos e manejados sem a presença de resíduos orgânicos na superfície (Steffen et al., 2011).

Quanto à contaminação do meio ambiente, os agrotóxicos agem de duas maneiras: acumula-se na biota; e contaminam a água e o solo. A dispersão de agrotóxicos no ambiente pode causar um desequilíbrio ecológico na interação natural entre duas ou mais espécies (Soares e Porto, 2007).

Segundo Miranda et al. (2007), não são apenas as populações que habitam em áreas próximas aos locais de cultivo que estão expostas, mas também os moradores de áreas urbanas, devido à contaminação ambiental e os resíduos de agrotóxicos nos alimentos. Scorza Junior et al. (2010) explicam que isso ocorre porque os agrotóxicos, mesmo que sejam aplicados diretamente nas plantas, têm como destino final o solo, pois são lavados das folhas através da ação da chuva ou da água de irrigação.

Diante dos graves impactos causados pelos agrotóxicos, dentre as alternativas que se apresentam como mais promissoras na busca pela solução destes problemas ambientais, estão as técnicas de remediação. O principal objetivo da remediação é implementar soluções que resultem no saneamento da área/material contaminado e/ou na contenção e isolamento dos contaminantes (CETESB, 2014). A remediação consiste na aplicação de diferentes medidas de contenção e tratamento do material contaminado, sendo que a mesma pode ser física (retirada da camada contaminada; injeção de ar), química (quelatos, reagentes), ou biológica (microorganismos e plantas). O emprego de alternativas biológicas para a despoluição, como a fitorremediação e a biorremediação, é hoje uma das principais tendências da pesquisa na área ambiental, pois necessitam de poucos recursos, provocam baixo impacto durante a sua implantação e manutenção, e têm boa aceitação pela sociedade (Melo et al., 2009).

A fitorremediação se apresenta como uma técnica que utiliza plantas selecionadas e com determinadas características específicas, que resultem na remoção, imobilização ou transformação de poluentes do solo (Melo et al., 2009).

A biorremediação trata-se de uma tecnologia de recuperação ambiental que utiliza a habilidade de microorganismos específicos em promover a biotransformação no solo, degradando e removendo os contaminantes presentes (Dams, 2006).

Desta forma, este artigo tem como objetivo abordar a biorremediação e a fitorremediação como alternativas para a recuperação de solos contaminados por agrotóxicos, demonstrando suas aplicações, limitações e potencialidades.

DESENVOLVIMENTO

Técnicas de biorremediação

Diante da exploração intensa dos recursos naturais e da grande quantidade de resíduos deixados no meio ambiente natural, em especial nos solos, a biorremediação coloca-se como uma alternativa importante e promissora para amenizar e resolver este problema.

De acordo com Soares et al. (2011), a biorremediação está entre as tecnologias mais utilizadas na recuperação de áreas degradadas, sendo que a mesma faz uso dos microorganismos como agentes recuperadores de áreas contaminadas, especialmente o solo. Ainda segundo o referido autor, os estudos com microorganismos destinados à degradação de poluentes oriundos de agrotóxicos, são antigos, sendo que a utilização de fungos basidiomicetos teve início em 1980, onde as linhagens de *Phanerochaete chrysosporium*

mostraram-se eficientes em diversos poluentes, dentre eles destaca-se o DDT, um composto amplamente utilizado como inseticida durante décadas e atualmente proibido no Brasil. Conforme Jacques et al. (2007), a tecnologia de biorremediação vem sendo pesquisada desde a década de 1950, onde neste período, diversas bactérias degradadoras de poluentes foram isoladas.

Desde então, os estudos da tecnologia de biorremediação vêm aumentando e sendo aprofundados por diversos pesquisadores. Segundo Carneiro e Gariglio (2010), quando ocorre a presença de substâncias químicas estranhas ao ambiente natural, provoca-se um desequilíbrio, que acabará impulsionando uma série de transformações até que seja atingida uma condição de equilíbrio no local que foi contaminado. Desta forma, os microorganismos mais eficientes em obter este equilíbrio são utilizados pela tecnologia de biorremediação, como forma de descontaminação.

Para que esta tecnologia seja eficiente e consiga atingir seus objetivos na descontaminação de solos, vale destacar que a mesma depende das condições do próprio solo. Desta forma, deve ser feito um estudo prévio do mesmo, analisando os seguintes fatores: Umidade, temperatura, disponibilidade de nutrientes, pH e presença de microorganismos degradadores do contaminante presente (Ferreira e Morita, 2012). O conhecimento destes fatores será importante para o embasamento que permitirá a escolha da técnica mais adequada para biodegradação ou eliminação dos contaminantes presentes, podendo inclusive promover um incremento ou estímulo à microbiota do solo contaminado (Andrade et al., 2010).

Além do conhecimento das características do solo, é fundamental que sejam pesquisados e isolados microorganismos eficientes e capazes de promover a biodegradação dos poluentes de agrotóxicos que estejam presentes no solo. Estes estudos são necessários para determinar o real potencial dos referidos microorganismos em realizar a degradação, sendo que os mesmos podem ser identificados e isolados no próprio ambiente ou solo contaminado (Soares et al., 2011). O fato de realizar a identificação e isolamento dos microorganismos no próprio solo contaminado é o que torna esta tecnologia ainda mais promissora para a recuperação destes solos.

Com o avanço das pesquisas e o aumento da demanda por novas tecnologias de despoluição, foram desenvolvidas diversas técnicas dentro da tecnologia de biorremediação. De acordo com a forma de utilização e implantação, estas técnicas são divididas em *in situ* e *ex situ*.

Segundo Carneiro e Gariglio (2010), as técnicas de biorremediação *in situ* são utilizadas diretamente na área ou local contaminado. No caso específico de solos, com a utilização destas técnicas não há necessidade de retirar o material e levar até outro local para fazer o tratamento. Assim, tem as vantagens de evitar os riscos inerentes ao transporte de material contaminado, o que reduz custos. As técnicas *in situ* são divididas em biorremediação passiva e bioestimulação. Na primeira, o tratamento é feito de forma natural, sem a adição de microorganismos, nutrientes ou outros compostos. Com a bioestimulação, ocorre a adição de microorganismos ou nutrientes, de forma a acelerar o processo de degradação dos contaminantes.

Nas técnicas de biorremediação *ex situ*, o material contaminado é retirado do local original e transportado para outra área, onde receberá o tratamento. O principal objetivo destas técnicas é evitar o alastramento do contaminante até outros locais, o que pode acontecer em poluições localizadas em rios, córregos e no lençol freático (Carneiro e Gariglio, 2010).

A Tabela 1 apresenta as principais técnicas de biorremediação *in situ* e *ex situ*, que podem ser utilizadas para o tratamento de solos contaminados.

Tabela 1 - Técnicas de biorremediação utilizadas em solos e suas aplicações.

| Técnicas de biorremediação | Descrição da aplicação | Forma de aplicação |
|-----------------------------------|---|-------------------------------|
| Bioventilação | Com a utilização de equipamentos específicos e tubulações, oxigênio é adicionado ao solo contaminado, com o objetivo de estimular o crescimento dos microorganismos e acelerar a degradação de compostos. | Técnica <i>in situ</i> |
| Bioaugmentação | Após ser feito a identificação e o isolamento de microorganismos especializados em degradar um determinado tipo de poluente, os mais eficientes são aplicados no local contaminado. | Técnica <i>in situ</i> |
| Air Sparging | Com a utilização de equipamentos específicos, ocorre a formação de pressão positiva por meio da formação de vapor. Isso faz com que os contaminantes do solo sejam levados até a atmosfera, para que assim possam ser tratados. | Técnica <i>in situ</i> |

| | | |
|--------------------|--|--|
| Landfarming | Este tratamento ocorre na camada superior do solo, onde os microorganismos são mantidos ativos para que possam realizar a biodegradação dos compostos, principalmente os provenientes do petróleo. | Técnica <i>in situ</i> e <i>ex situ</i> |
| Compostagem | Trata-se de uma técnica muito importante e utilizada amplamente para promover a descontaminação de solos que serão utilizados na agricultura orgânica. Ocorre por meio da bioxidação aeróbia exotérmica de diferentes substratos orgânicos, como esterco e vegetais. Durante o processo, ocorre a produção de gás carbônico, água, liberação de substâncias minerais até a formação de matéria orgânica estável. | Técnica <i>ex situ</i> |

Fonte: Carneiro e Gariglio (2010).

De acordo com a Tabela 1, pode-se verificar a existência de maior número de técnicas de biorremediação *in situ*, sendo que uma das mais utilizadas é a bioaumentação, na qual microorganismos são selecionados conforme sua capacidade de biodegradação e aplicados no solo contaminado.

Segundo Andrade et al. (2010), em relação à forma de utilização das técnicas, a biorremediação *in situ* é a mais empregada no mundo. Mas independentemente do local ou forma de aplicação, a biorremediação tem como objetivo principal a utilização de microorganismos para realizar a biodegradação dos contaminantes, onde ao mesmo tempo, conseguem se desenvolver por meio da obtenção de nutrientes e energia.

Seleção de microorganismos para biorremediação em solos contaminados por agrotóxicos

Considerando a intensa utilização de agrotóxicos na agricultura, a contaminação dos solos pelos mesmos torna-se um problema ambiental a ser solucionado. Assim, por conta das suas características, a biorremediação apresenta grande potencial para utilização na degradação de diversos contaminantes oriundos de agrotóxicos que estejam presentes no solo. A seguir, estão alguns estudos e pesquisas que obtiveram bons resultados na seleção e utilização de microorganismos para esta finalidade.

Na pesquisa realizada por Vitali et al. (2006), cinquenta e cinco fungos foram identificados e isolados a partir de um solo contaminado com resíduos de compostos a base de

hexaclorobenzeno (HCB). Estes compostos são amplamente utilizados na agricultura, sendo que os mesmos são persistentes em ambientes naturais e representam riscos à saúde humana, podendo apresentar efeito mutagênico e carcinogênico. Ainda conforme o referido autor, os microorganismos foram submetidos a testes de biodegradação, sendo que o *Eupenicillium crustaceus* apresentou-se como o mais eficiente, reduzindo em 35,6% a concentração inicial de HCB. Além disso, o *E. crustaceus* apresentou outras características interessantes para a biorremediação, pois utilizou nutrientes pobres como substratos e demonstrou capacidade em tornar o contaminante menos biodisponível.

Os produtos agrotóxicos com o princípio ativo metamidofós, proibidos no Brasil a partir de 2012, também foram intensamente utilizados nas áreas agrícolas. Trata-se de um produto organofosforado com amplo espectro de ação e classificado como extremamente tóxico. Para a realização da biorremediação em solo contaminado por metamidofós foi utilizada a bactéria *Corynebacterium*, sendo que a mesma apresentou capacidade em degradar e reduzir a concentração do contaminante no solo. Ela degradou a concentração de 7 µg/g de solo, de um total de 10 µg/g de solo de teor de metamidofós, que foi determinado inicialmente. Porém, no decorrer do processo, a degradação é reduzida, não sendo realizada de forma completa, o que demonstra a dificuldade de degradação dos agrotóxicos com este composto (Costa et al., 2010).

Segundo Rodrigues et al. (2010), outro microorganismo que apresentou capacidade de degradação em agrotóxicos foi a bactéria *Klebsiella* sp., por conta da sua capacidade de crescimento na presença do herbicida diclosulam, degradando 3,27 mg do composto. A pesquisa foi realizada em *erlemayers* contendo 90 mL de meio de fermentação e 100 µg/mL de diclosulam. Neste estudo, foram testadas 10 diferentes linhagens de bactérias encontradas e isoladas de solos que tiveram a aplicação de herbicida a base de diclosulam, recomendado para controle de plantas daninhas nas culturas da soja e cana-de-açúcar. Vale destacar que todas apresentaram capacidade de crescimento na presença deste herbicida.

Também foram realizadas pesquisas para a identificação de microorganismos com capacidade de degradar agrotóxicos com o princípio ativo atrazine, que são herbicidas triazínicos utilizados amplamente para controle de plantas daninhas na cultura do milho. Conforme Colla et al. (2008), foram isolados quinze fungos a partir de solos contaminados com atrazine, sendo que os mais eficientes foram os fungos dos gêneros *Aspergillus*, *Penicillium* e *Trichoderma*, visto que os mesmos apresentaram elevada capacidade de crescimento em meios contendo 50 ppm de atrazine. Neste estudo, cada microorganismo foi inoculado no centro de uma placa de petri contendo meio de crescimento a base de batata-

dextrose-ágar e 50 ppm de atrazine, sendo que foram mantidos a uma temperatura de 30°C e o diâmetro de crescimento foi medido a cada 24 h durante 5 dias.

Vantagens e limitações da biorremediação

Diante dos diversos estudos apresentados, as técnicas de biorremediação apresentam algumas vantagens importantes que justificam a continuidade das pesquisas para identificação de microorganismos com capacidade de degradação.

Pode-se destacar que no caso da biorremediação em solos contaminados por agrotóxicos, já existem importantes avanços, sendo que a técnica mais utilizada foi a bioaugmentação. Isso se deve ao fato da possibilidade de identificar e isolar microorganismos no próprio local contaminado, e também à impossibilidade de utilizar equipamentos ou transportar o solo contaminado, visto que as áreas que sofrem aplicação de agrotóxicos são extremamente extensas. De maneira geral, pode-se observar que, devido às suas vantagens, a biorremediação apresenta elevado potencial de utilização na recuperação de solos contaminados por agrotóxicos, o que pode ser comprovado a partir da identificação de microorganismos capazes de degradar contaminantes de produtos a base de metamidofós, atrazine, hexaclorobenzeno e diclosulam.

Segundo Andrade et al. (2010), existem vantagens e desvantagens na utilização da biorremediação. Dentre as vantagens desta tecnologia está a possibilidade de redução ou eliminação dos compostos poluidores, aliados ao baixo custo para a realização do processo e a geração de baixos distúrbios ao meio ambiente, no caso das técnicas *in situ*. Como desvantagens, pesa o fato de que a eficiência da biorremediação depende das características e condições do solo, o processo de biodegradação é influenciado pelas condições climáticas, o monitoramento do tratamento e sua manutenção podem ser necessários por um longo tempo, as áreas agrícolas com solos que possam estar contaminados por agrotóxicos são muito extensas e a técnica é ineficiente para compostos orgânicos adsorvidos no solo.

Técnicas de fitorremediação

A fitorremediação é também uma importante alternativa para a recuperação de solos contaminados por agrotóxicos, visto que diante das grandes áreas de agricultura, plantas específicas podem ser utilizadas no processo de descontaminação. A fitorremediação foi desenvolvida como uma técnica que utiliza plantas na remoção, imobilização ou transformação de poluentes do solo. Destaca-se como uma alternativa eficiente, simples, de baixo custo e com resultados em curto prazo de tempo (Pires et al., 2003).

Em síntese, a fitorremediação pode ser dividida em oito processos biológicos denominados de fitoextração, fitoacumulação, fitodegradação, fitovolatilização, fitoestimulação, rizodegradação, rizovolatilização e rizoestabilização, os quais ocorrem em função das características morfofisiológicas de cada espécie vegetal. Cada um destes processos se desenvolve respectivamente a partir da absorção do contaminante pela espécie vegetal. Ocorre o armazenamento dos contaminantes em órgãos e raízes; a bioconversão do contaminante em formas menos tóxicas ou não-tóxicas; o estímulo da comunidade microbiana apta a realizar biodegradação; a volatilização de um contaminante rizotransformado; a imobilização, lignificação ou humificação do contaminante na rizosfera da espécie vegetal. Todos esses processos não são exclusivos e podem ocorrer simultaneamente ou sequencialmente (Procópio et al., 2009).

Apesar de no Brasil, o termo fitorremediação ainda não possuir grande abrangência para a comunidade científica, é significativo o avanço em estudos que utilizam plantas associadas à fitorremediação para despoluição de ecossistemas. Neste caso, o Brasil possui algumas condicionantes favoráveis, como a biodiversidade existente e o clima. Comparativamente às regiões de clima temperado, apresenta um grande potencial para a aplicação dessa tecnologia, assim, a identificação de espécies tolerantes é fundamental para o sucesso da fitorremediação (CETESB, 2014).

Seleção de espécies vegetais para fitorremediação em solos contaminados por agrotóxicos

Para a implementação da fitorremediação, deve-se inicialmente fazer a seleção da(s) espécie(s) fitorremediadora(s). Para tanto, é imprescindível o conhecimento das características químicas e físicas do contaminante, do solo a ser remediado, da topografia da área e das condições climáticas e ambientais locais. Existem critérios recomendados para a escolha das espécies vegetais a serem avaliadas como potenciais fitorremediadoras, conforme a Tabela 02.

Tabela 2 - Critérios recomendados para seleção de espécies vegetais aptas à fitorremediação

Condicionantes para seleção de espécies vegetais em programas de fitorremediação

1. Sistema radicular profundo e denso.
 2. Alta taxa de crescimento e produção de biomassa.
 3. Capacidade transpiratória elevada, especialmente em árvores e plantas perenes.
-

-
4. Elevada taxa de exsudação radicular.
 5. Resistência a pragas e doenças.
 6. Adaptabilidade ao local a ser remediado (clima e solo).
 7. Fixação biológica de nitrogênio atmosférico.
 8. Alta associação com fungos micorrízicos.
 9. Fácil controle ou erradicação posterior.
 10. Quando necessária, facilidade de remoção das plantas da área contaminada.
 11. Fácil aquisição ou multiplicação de propágulos.
 12. Ocorrência natural em áreas contaminadas.
-

Fonte: Procópio et al. (2009)

Para uma planta ser utilizada como fitorremediadora, é importante que a mesma atenda ao maior número possível das características/condicionantes apresentadas na Tabela 2, de forma a selecionar aquela com a maior capacidade de efetuar o processo de fitorremediação. Outro aspecto significativo, é que, embora a maioria dos testes avalie plantas isoladas, várias espécies podem ser usadas ao mesmo tempo, numa mesma área, promovendo um tratamento mais eficiente (Miller, 1996).

Com o objetivo de fazer a identificação de plantas com capacidade de fitorremediação em solos contaminados por agrotóxicos, diversos estudos e pesquisas foram realizados. Assim, foram identificadas diferentes espécies de plantas capazes de realizar a redução ou eliminação dos seguintes componentes ou princípios ativos de agrotóxicos: Picloram, tebuthiuron, trifloxysulfuron-sodium e sulfendrazone.

De acordo com Pires et al. (2003), dez espécies de plantas foram escolhidas para avaliação de seus potenciais de fitorremediação em solos contaminados pelo herbicida tebuthiuron. Os testes foram realizados em vasos, nas doses de 0,0; 0,5; 1,0; e 2,0 kg ha⁻¹ do produto comercial. Neste estudo, os melhores resultados foram apresentados pela mucuna-preta (*Estizolobium aterrimum*), que demonstrou maior tolerância ao tebuthiuron até a dose comercial de 1,0 kg ha⁻¹, sendo que o milheto (*Pennisetum typhoides*) e o feijão-guandu (*Cajanus cajan*) apresentaram certa capacidade de tolerância ao herbicida até a dose de 0,5 kg ha⁻¹.

No caso de solos contaminados pelo herbicida trifloxysulfuron-sodium, Santos et al. (2006), avaliaram diferentes densidades populacionais do adubo verde feijão-de-porco

(*Canavalia ensiformis*) para fitorremediação. Foram utilizadas quatro densidades, sendo 0; 8; 20; e 32 plantas/m². Cada densidade foi submetida à aplicação de duas doses diferentes do herbicida, 0 e 15 g ha⁻¹, onde esta última equivale a duas vezes a recomendação para a cultura do algodão. Desta forma, foi observado que o cultivo prévio do feijão-de-porco nas densidades de 20 e 32 plantas/m², antes de semear feijão para produção de grãos, foi eficiente na fitorremediação do solo com o herbicida trifloxysulfuron-sodium, evitando a redução do número de vagens por planta.

Para a realização de fitorremediação de solos contaminados pelo herbicida sulfentrazone, foram avaliados os seguintes vegetais: Girassol (*Helianthus annuus*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), lab-lab (*Dolichos lab lab*) e amendoim (*Arachis hypogaea*). Foram utilizadas três doses do produto a base de sulfentrazone (0; 250; e 500 g ha⁻¹) dentro de casa de vegetação, sendo que posteriormente foi realizado o plantio de sorgo como espécie indicadora da presença do referido herbicida. Na dose de 500 g ha⁻¹ foi verificado que onde houve o plantio prévio das espécies de girassol e lab-lab, o sorgo apresentou produção superior de matéria seca, evidenciando maior eficiência destas espécies para fitorremediação. Todas as espécies foram eficientes em comparação com o solo sem cultivo, onde 61,65% das plantas de sorgo apresentaram fitotoxicidade, enquanto que nos solos onde foi feito o cultivo com os vegetais citados, as plantas de sorgo apresentaram no máximo 26,25% de fitotoxicidade. (Belo et al., 2011)

De acordo com Carmo et al. (2008), foram avaliadas 19 espécies vegetais com o objetivo de identificar àquelas com maior capacidade de fitorremediação em solos contaminados por herbicidas a base de picloram, produto que apresenta elevada persistência no solo e pode contaminar águas subterrâneas. O experimento foi realizado em casa de vegetação com cinco doses de picloram (0; 80; 160; 320; e 640 g ha⁻¹). Como os produtos agrotóxicos a base deste composto são indicados para o controle e eliminação de dicotiledôneas em pastagens, as leguminosas apresentaram baixa tolerância, mas a planta feijão-de-porco foi mais tolerante em relação a mucuna-preta na dose de 80 g ha⁻¹, sendo que nas doses maiores, ambas tiveram mais de 95% das plantas com fitotoxicidade. Dentre as demais espécies, todas gramíneas, a que apresentou maior eficiência e tolerância em relação ao picloram, foi o milho (*Zea mays*), apresentando 22% de plantas com fitotoxicidade na dosagem mais alta, de 640 g ha⁻¹. Vale destacar ainda as espécies de sorgo, milheto e capim-pé-de-galinha, que apresentaram entre 45 e 55,5% de plantas com fitotoxicidade, também na dosagem mais alta. Os resultados destacados foram obtidos 84 dias após a aplicação do herbicida.

Verificou-se que a maioria das plantas testadas como fitorremediadoras são as leguminosas, seguidas das gramíneas. As leguminosas são uma ótima opção para fitorremediação, tendo em vista que favorecem o desenvolvimento da microbiota no solo e são plantas de adubação verde que ajudam a melhorar as condições físicas, químicas e biológicas do mesmo, favorecendo bactérias fixadoras de nitrogênio, importante nutriente para as plantas. As gramíneas são mais resistentes a condições adversas de clima e solo, sendo também uma boa opção para a fitorremediação.

É importante ressaltar, que a indicação das espécies mais eficientes deve ser feita de acordo com o contaminante presente no solo e com as características edafoclimáticas da região, por isso a necessidade dos diversos estudos e pesquisas apresentados.

Vários autores estudaram diferentes espécies vegetais em diversos contaminantes, e pode-se observar que plantas capazes de realizar fitorremediação em um determinado contaminante, pode não apresentar bons resultados em outros, como por exemplo as leguminosas em solos com herbicida picloram. Este comportamento está relacionado ao metabolismo da espécie e às características do próprio agrotóxico.

Vantagens e limitações da fitorremediação

A fitorremediação possui alto potencial de utilização, isto ocorre devido às vantagens que esta técnica apresenta. Segundo Procópio et al. (2009), as seguintes vantagens podem ser destacadas: Menores custos em relação às técnicas de remediação tradicionais; degradação dos xenobióticos transformados em compostos não tóxicos internamente nas plantas ou no ambiente rizosférico; as propriedades, físicas, químicas e biológicas do solo são mantidas, e muitas vezes até melhoradas com o cultivo de espécies vegetais fitorremediadoras; fixação de nitrogênio atmosférico, no caso da utilização de leguminosas como espécies remediadoras; e redução da lixiviação de contaminantes no solo, diminuindo a contaminação do lençol freático. O emprego de plantas é visualmente mais favorável em relação a qualquer outra técnica de remediação, e pode ser implementado com mínimo impacto para o ambiente, evitando escavações e tráfego de máquinas, promovendo auxílio no controle do processo erosivo. Neste caso, diminuem o carreamento de contaminantes com a água e com o solo e, por conseguinte, reduz a possibilidade de contaminação dos cursos hídricos. Outras vantagens importantes é que para a realização dos processos de descontaminação, se faz uso da energia solar, e também há uma percepção positiva desta técnica perante a sociedade.

Embora a fitorremediação apresente significativas vantagens em sua aplicação, esta técnica também possui algumas desvantagens e limitações que devem ser previamente

analisadas: A dificuldade na seleção de plantas para fitorremediação, especialmente em relação à descontaminação de solos com resíduos de herbicidas não seletivos; o tempo necessário para obtenção de uma despoluição satisfatória pode exigir mais de um ciclo de cultivo da espécie utilizada; o contaminante deve estar dentro da zona de alcance do sistema radicular das plantas fitorremediadoras; o clima e condições edáficas podem limitar o crescimento de plantas fitorremediadoras; necessidade de remoção das plantas da área contaminada quando o composto tóxico é apenas fitoacumulado ou fitodegradado a um composto ainda tóxico; o perigo dos xenobióticos serem fitotransformados ou rizotransformados em metabólitos mais prejudiciais que o composto inicial; a presença de algum contaminante na área das copas das plantas pode provocar a contaminação de alimentos (Procópio et al., 2009).

CONCLUSÕES

A intensa utilização de produtos agrotóxicos e sua conseqüente contaminação do ambiente natural, em especial o solo, torna cada vez mais urgente e essencial o desenvolvimento de alternativas para a recuperação das áreas que estejam contaminadas, de forma que a produção agrícola tenha crescimento com sustentabilidade. Desta forma, a biorremediação e a fitorremediação são importantes ferramentas no processo de recuperação ambiental dos solos contaminados por agrotóxicos.

Mesmo assim, essas técnicas apresentam alguns limitadores. No caso da biorremediação, o mais complicado é conseguir a produção de quantidade suficiente de microorganismos específicos para aplicar em grandes extensões de áreas cultivadas que estejam contaminadas por agrotóxicos, além disso, é um processo demorado e que depende também de fatores não controlados, como o clima. Para o desenvolvimento da fitorremediação, tem-se o desafio da identificação e seleção de plantas eficientes e que ao mesmo tempo possam ser comercializadas, mantendo a área agrícola contaminada viável economicamente a assegurando a qualidade do produto, caso seja para consumo como alimento; além disso, também pesa o fato da grande diversidade e quantidade de produtos agrotóxicos utilizados, dificultando a recuperação dos solos que estejam contaminados.

Assim, o incentivo e o estímulo para a realização de pesquisas são fundamentais, de forma que a aplicação e as técnicas possam ser aprimoradas, fazendo com que

microorganismos e plantas mais eficientes sejam identificados para os diversos poluentes oriundos de agrotóxicos que acabam por contaminar o solo.

A biorremediação e a fitorremediação, apesar das limitações, são altamente promissoras, visto que possuem baixo custo tanto para a realização de pesquisas, quanto para a implantação. Além disso, os microorganismos e as espécies vegetais necessários para o processo, podem ser encontrados e selecionados no próprio local contaminado, aproveitando assim a capacidade de adaptação e tolerância dos mesmos aos contaminantes.

As vantagens da fitorremediação são mais evidentes em ambientes agrícolas, podendo reduzir ou eliminar o agrotóxico contaminante, mas também melhorando as condições do solo pelo aumento da fertilidade e da matéria orgânica, e evitando a ocorrência de processos erosivos por conta da cobertura vegetal. Vale ressaltar que a biorremediação e a fitorremediação podem ser utilizadas de forma conjunta, visto que muitas espécies vegetais possuem características que favorecem o desenvolvimento da microbiota presente no ambiente.

Embora apresentem limitações, o emprego de alternativas menos dispendiosas, ambientalmente aceitas, e que sejam eficientes para a recuperação ambiental de solos contaminados por agrotóxicos, são fundamentais para a redução ou eliminação dos resíduos destes produtos químicos que acabam por contaminar o solo e conseqüentemente a água e os alimentos.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, J.A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I.C.S.F. **Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados**. Eclét. Quím. online, v.35, n.3, p. 17-43. 2010.

BELO, A.F.; COELHO, A.T.C.P.; FERREIRA, L.R.; SILVA, A. A.; SANTOS, J. B. **Potential of Plant Species in the Remediation of Soil Contaminated with Sulfentrazone**. Planta Daninha, v. 29, n. 4, p. 821-828, 2011.

CARMO, M.L.; PROCOPIO, S.O.; PIRES, F.R.; CARGNELUTTI FILHO, A.; BARROSO, A.L.L.; SILVA, G. P.; CARMO, E. L.; BRAZ, G.B.P.; SILVA, W.F.P.; BRAZ, A.J.B.P.; PACHECO, L.P. **Plant selection for phytoremediation of soils contaminated with picloram**. Planta Daninha, v.26, n.2, p. 301-313, 2008.

CARNEIRO, D.A.; GARIGLIO, L.P. **A biorremediação como ferramenta para a descontaminação de ambientes terrestres e aquáticos**. Revista Tecer, Belo Horizonte, v. 3, n. 4, 2010.

COLLA, L. M.; PRIMAZ, A. L.; LIMA, M.; BERTOLIN, T.E.; COSTA, J. A. **Isolamento e seleção de fungos para biorremediação a partir de solo contaminado com herbicidas triazínicos.** Ciências Agrotéc., Lavras, vol. 32, n. 3, p. 809-813. 2008.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Áreas contaminadas.** Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/anexos/download/1000.pdf>. Acesso em: 25 de Abril de 2014.

COSTA, L.; DELLAMATRICE, P.M.; SOUSA, M.V.; SILVA, G.M.M. **Biorremediação de uma área contaminada com o inseticida metamidofós por *Corynebacterium* sp.** Conexões - Ciência e Tecnologia, Fortaleza, v. 4, n. 1, p. 17-23. 2010.

DAMS, R. I. **Pesticidas: Usos e perigos à saúde e ao meio ambiente.** Revista Saúde e Ambiente: v. 7, n. 2, 2006.

FERREIRA, I.D.; MORITA, D.M. **Biorremediação de Solo Contaminado por Isobutanol, Bis-2-Etil-Hexilftalato e Di-Isodecilftalato.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 36, p. 643-652, 2012.

JACQUES, R.J.S.; BENTO, F.M.; ANTONIOLLI, Z.I.; CAMARGO, F.A.O. **Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos.** Ciência Rural: vol. 37, n. 4. Santa Maria: 2007.

MELO, R.F.; DIAS, L.E.; MELLO, J.W.V.; OLIVEIRA, J.A. **Potential of four herbaceous forage species for phytoremediation of a soil contaminated with arsenic.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, p. 455-465, 2009.

MILLER, R. R. **Phytoremediation.** 1996. Disponível em <http://www.gwrtac.org>. Acessado em 02/05/2014.

MIRANDA, A.C.; MOREIRA, J.C.; CARVALHO, R.; PERES, F. **Neoliberalismo, o uso dos agrotóxicos e a crise da soberania alimentar no Brasil.** Ciência Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, 2007.

PIRES, F.R.; SOUZA, C.M.; SILVA, A.A.; QUEIROZ, M.E.L.R.; PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SANTOS, E.A.; CECON, P.R. **Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de tebuthiuron.** Planta Daninha, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 451-458, 2003.

PROCÓPIO, S.O.; PIRES, F.R.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A. **Fitorremediação de solos com resíduo de herbicidas.** Documentos 156. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009.

RIBAS, P.P.; MATSUMURA, A.T.S. **A química dos agrotóxicos: impacto sobre a saúde e meio ambiente.** Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 10, p. 149-158, 2009.

RODRIGUES, N.R.; ANDRIETTA, M.G.S.; ANDRIETTA, S.R.; SANTOS, P.E.R.. **Diclosulam Biodegradation by bactéria isolated from soybean cultivated soils.** Planta Daninha, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 393-400. 2010.

SANTOS, J.B.; PROCÓPIO, S.O.; PIRES, F.R.; SILVA, A.A.; SANTOS, E.A. **Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por diferentes**

densidades populacionais de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*). Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 30, p. 444-449, 2006.

SCORZA JUNIOR, R.P.; NÉVOLA, F.A.; AYELO, V.S. **Avaliação da contaminação hídrica por agrotóxico.** Boletim de pesquisa e desenvolvimento. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2010.

SIQUEIRA, S.L.; KRUSE, M. H. L. **Agrotóxicos e saúde humana: contribuições dos profissionais do campo da saúde.** Rev Esc Enferm USP. v.42, n.3, 2009. p.584-90

SOARES, I.A.; FLORES, A.C.; MENDONÇA, M.M.; BARCELOS, R.P.; BARONI, S. **Fungos na biorremediação de áreas degradadas.** Arquivos do Instituto Biológico: v. 78, n.2, p. 341-350. São Paulo: abr./jun. 2011.

SOARES, W.L.; PORTO, M.F. **Atividade agrícola e externalidade ambiental: uma análise a partir do uso de agrotóxicos no cerrado brasileiro.** Ciênc. saúde coletiva, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, Mar. 2007.

STEFFEN, G.P.K.; STEFFEN, R.B.; ANTONIOLLI, Z.I. **Contaminação do solo e da água pelo uso de agrotóxicos.** TECNO-LÓGICA, Santa Cruz do Sul, v. 15, n. 1, p. 15-21, jan./jun. 2011.

VITALI, V.M.V.; MACHADO, K.M.G.; DE ANDREA, M.M. **Screening Mitosporic Fungi for Organochlorides Degradation.** Brazilian Journal of Microbiology: Vol. 37, p. 256-261. São Paulo: set. 2006.