



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



MARIA EDUARDA GONÇALVES FERNANDES CARNEIRO

**AVALIAÇÃO DA POTENCIABILIDADE DE TRATAMENTOS
PARA O HERBICIDA *IMAZAPIC* COMO CONTAMINANTE
AMBIENTAL**

UBERLÂNDIA

2022

MARIA EDUARDA GONÇALVES FERNANDES CARNEIRO

**AVALIAÇÃO DA POTENCIABILIDADE DE TRATAMENTOS
PARA O HERBICIDA *IMAZAPIC* COMO CONTAMINANTE
AMBIENTAL**

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Química.

Professora: Profa. Dra. Patrícia Angélica Vieira

UBERLÂNDIA

2022

**AVALIAÇÃO DA POTENCIABILIDADE DE TRATAMENTOS
PARA O HERBICIDA *IMAZAPIC* COMO CONTAMINANTE
AMBIENTAL**

Uberlândia, 11 de agosto de 2022

Monografia aprovada para a disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Química, da Universidade Federal de Uberlândia (MG) pela banca examinadora formada por:

Profa. Dra. Patrícia Angélica Vieira, FEQUI/UFU (Orientador)

Profa. Dra. Larissa Nayhara Soares Santana Falleiros, FEQUI/UFU

Doutoranda Amanda Carmelo da Rocha, FEQUI/UFU

RESUMO

O Brasil é o país que mais consome agrotóxicos e o terceiro maior exportador agrícola do mundo, ocupando o primeiro lugar no ranking mundial de produção de cana-de-açúcar, com cerca de 654,5 milhões de toneladas produzidas na safra 2020/21. Esses resultados obtidos são possíveis devido ao uso de herbicidas, visto que as ervas daninhas comprometem a produtividade da lavoura em até 80%. O herbicida mais comumente utilizado para o controle de daninhas no cultivo de cana-de-açúcar é o *Imazapic*, o qual possui aplicação recente, logo, não há muito conhecimento sobre suas propriedades, impactos ao meio ambiente e formas de remediá-lo. Diante disso, este trabalho objetivou reunir informações sobre o *Imazapic* por meio de revisão bibliográfica de livros, monografias, teses e artigos da área. De acordo com dados da literatura foi constatado que para a eficiência de remoção do *Imazapic* de solos e ambiente aquático o tratamento mais aplicado é a fitorremediação, devido a eficiência de descontaminação e baixo custo. Neste contexto, um estudo de caso foi realizado sobre o potencial de adubos verdes (prática que utiliza plantas como adubo, que crescem junto ou antes da plantação e depois quando cortadas, são misturadas ao solo ou deixadas sobre a terra, tornando o solo mais fértil) na fitorremediação de solo contaminado com *Imazapic*. Verificou-se que para o sucesso da fitorremediação no tratamento de solos contaminados por *Imazapic*, pode ser utilizada a espécie *C. Ensiformis*, mas também se faz necessário a análise das condições climáticas, composição e umidade do solo. Dessa maneira, de acordo com essas premissas, nota-se que a biorremediação se mostra eficiente para descontaminar e minimizar esses impactos.

Palavras-chaves: *Imazapic*. Impactos ao meio ambiente. Fitorremediação.

ABSTRACT

*Brazil is the country which consumes the most pesticides and is the third largest agricultural exporter in the world, taking first place in the world ranking of sugarcane production, with about 654.5 million tons in th 2020/21 harvest. These results are possible dueto the use of herbicides, because weeds compromise crop productivity by up to 80%. The herbicide most commonly used for weed control in sugarcane cultivation is Imazapic, which has recent application, so there is not much knowledge about its properties, impacts on the environment and ways to remedy it. Therefore, this study aimed to gather information about Imazapic through a literature review of books, monographs, theses and articles in the area. According to literature data it was found that for the efficiency of removal of Imazapic from soils and aquatic environment the most applied treatment is the phytoremediation, due to the efficiency of decontamination and low cost. In this context, a case study was conducted on the potential of green manures (a practice that uses plants as fertilizer, which grow together or before planting and then, when cut, are mixed with the soil or left on the ground, making the soil more fertile) in the phytoremediation of soil contaminated with Imazapic. It was verified that for the success of phytoremediation in the treatment of soils contaminated by Imazapic, can be used the species *C. Ensiformis*, but it is also necessary to analyze the climatic conditions, composition and humidity of the soil. Thus, according to these premises, it can be seen that bioremediationis efficient to decontaminate and minimize these impacts.*

Keywords: *Imazapic. Impacts on the enviroment. Phytoremediation.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diferença na translocação de um herbicida de contato (A) e sistêmico (B).	16
Figura 2- Fórmula estrutural do <i>Imazapic</i>	18
Figura 3- Estruturas química do herbicida <i>Imazapic</i> : forma catiônica, neutra e aniônica.	19
Figura 4 - Mecanismos utilizados pelas plantas no processo de fitorremediação.	31
Figura 5- Valores de fitotoxicidade(%) das espécies <i>U. brizantha</i> , <i>M. pruriens</i> e <i>C. ensiformis</i> cultivadas em solo com diferentes doses de <i>Imazapic</i> , aos 45 dias de tratamento.	37
Figura 6- - Valores de fitotoxicidade (%) do <i>Sorghum bicolor</i> em solo anteriormente plantado e sem cultivo aos 14 e 28 DAE.....	38
Figura 7- Índice de alturas das espécies <i>U. brizantha</i> , <i>M. pruriens</i> e <i>C. ensiformis</i> aos 14 e 28 DAE.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades físico-químicas do <i>Imazapic</i>	20
Tabela 2- Valores de LMR para o herbicida <i>Imazapic</i>	25
Tabela 3- Resíduo de <i>Imazapic</i> nos tecidos de raízes, parte aérea e no solo com e sem cultivo aos 80 dias de tratamento.	37

SUMÁRIO

RESUMO	4
1. Introdução	9
2. Objetivos.....	11
2.1. Objetivo Geral	11
2.2. Objetivo Específicos.....	11
3. Revisão Bibliográfica	12
3.1. Herbicidas	12
3.1.1. Utilização dos Herbicidas	12
3.1.2. Classificação dos herbicidas	13
3.1.2.1. Seletividade	13
3.1.2.2. Época de aplicação	14
3.1.2.3. Translocação.....	15
3.1.3. Propriedades Físico-Químicas dos Herbicidas	17
3.2. Herbicida <i>Imazapic</i>	18
3.3. Uso de <i>Imazapic</i> no Brasil.....	21
3.4. Legislação de Herbicidas no Brasil	22
3.5. Contaminações de Solo e Água por <i>Imazapic</i>	26
3.6. Tipos de Tratamentos para Remediação de Solos Contaminados por <i>Imazapic</i>	28
3.7. Uso Alternativo de Adubos Verdes para Melhoria de solos.....	33
4. Estudo de Caso	35
4.0. Resumo Geral	35
4.1. Metodologia Aplicada	35
4.4. Conclusão	40
5. Conclusão Geral	41
6. Referências	42

1. Introdução

Os agrotóxicos tiveram seu uso propagado na década de 50 devido a Revolução Verde, que tinha como objetivo o aumento da produção de alimentos em escala, visto o cenário pós Segunda Guerra Mundial. A Revolução proporcionou melhorias por meio das inovações tecnológicas, como, sementes geneticamente modificadas, maquinários agrícolas e os insumos químicos (CARNEIRO,2015). No entanto, o uso excessivo e deliberado desses insumos, gerou preocupações e viu-se então a necessidade de regulamentação desse uso, sendo assim em 1989 foi criada a Lei dos Agrotóxicos (Lei 7.802, de 11 de julho de 1989), atualizada conforme a necessidade até os anos atuais (PELAEZ; TERRA; SILVA, 2010).

Os agrotóxicos são, agentes constituídos por uma grande variedade de compostos químicos ou biológicos, desenvolvidos para matar, combater, repelir ou controlar pragas, como insetos e ervas daninha (SOUZA, 2011). Estes compostos têm impactos sobre a saúde das pessoas, além de serem importantes contaminantes ambientais. E são classificados de acordo com o tipo da praga controlada, sendo:

- a) inseticidas: possuem ação de combate a insetos, larvas e formigas;
- b) fungicidas: combatem fungos;
- c) herbicidas: combatem ervas daninhas;
- d) raticidas: utilizados no combate a roedores e ratos;
- e) acaricidas: ação de combate a ácaros diversos.

Além disso, com relação aos riscos que os mesmos podem causar no ambiente, esses poluentes são divididos em classes que variam de I a V e por determinação legal, todos os produtos devem apresentar nos rótulos uma faixa com a cor indicativa de sua classe toxicológica, sendo elas: Classe I (extremamente tóxicos/faixa vermelha); Classe II (altamente tóxicos/faixa vermelha); Classe III (medianamente tóxicos/faixa amarela); Classe IV (poucos tóxicos/faixa azul); Classe V (produto improvável de causar dano agudo/faixa azul) (ANVISA, 2019).

O Brasil é considerado um dos grandes produtores agrícolas mundiais que reúne características como competitividade e área disponível para suprir a demanda de alimentos, fibras e energia renovável no mundo (ANDEF, 2009). Desde 2008, assumiu a colocação

mundial de maior consumidor de agrotóxico e o terceiro maior exportador agrícola, atrás apenas dos Estados Unidos e da União Européia. O uso de tecnologia em toda a cadeia produtiva é fundamental para baixar o custo final de produção, promovendo assim o uso crescente de agrotóxicos. Estima-se que, em 2020, cerca de 686 mil toneladas de agrotóxicos tenha sido utilizadas nas lavouras e pastagens do país, desses 48% correspondem aos herbicidas, 25% aos inseticidas e 22% aos fungicidas. Esse uso crescente tem causado preocupações por parte da sociedade e assim, tem ocorrido a busca por métodos de tratamento para os efluentes contaminados por esses produtos (IBAMA, 2021).

Geralmente, os métodos utilizados para tratar os efluentes contaminados por agrotóxicos são, quando se refere a água, a aplicação de ozônio, filtração, osmose reversa e os processos oxidativos avançados e, em relação aos solos, há a biorremediação, oxidação química e destinação do solo, que se baseia no deslocamento do solo contaminado para tratamento e devolução para o local de origem, não é muito utilizada visto o risco de contaminação secundária (TAVARES, 2013). Não necessariamente uma maneira de se tratar a contaminação, mas de se evitá-la, é com a utilização do biocarvão, material rico em carbono proveniente do aquecimento da biomassa pela decomposição térmica da matéria orgânica, sobre o solo para reduzir a lixiviação de herbicidas e assim, diminuir os riscos de contaminação ao ambiente (LYRA MENDONÇA, 2019).

Além do uso do biocarvão, outra técnica de eficácia conhecida é a fitorremediação, que consiste em um método biológico em que se utiliza plantas na detoxificação de compostos poluentes presentes no ambiente, sendo esta técnica uma abordagem da biorremediação (ROMEIRO *et al.*, 2007).

Neste trabalho, foi realizado um levantamento bibliográfico em específico sobre o herbicida *Imazapic*, um dos herbicidas mais utilizados em lavouras de cana-de-açúcar devido sua alta eficácia no controle de ervas daninhas, como a Tiririca (*Cyperus rotundus*), uma das principais plantas invasoras presentes nesses cultivos. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e na safra 2020/2021, foi responsável pela produção de 654,5 milhões de toneladas (NACHILUK, 2021), o *Imazapic* foi utilizado em grande quantidade, possibilitando atingir esses resultados. Porém, este é um herbicida de uso recente e por isso, não é muito conhecido cientificamente os impactos que seu uso pode provocar nos solos e na água, e as formas de remediá-lo.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo trazer uma abordagem de revisão bibliográfica sobre a classificação, descrição das propriedades físicas e químicas do herbicida *Imazapic*, e avaliar os tratamentos existentes para este contaminante quando presente no meio ambiente.

2.2. Objetivo Específicos

- Compreender quais as classificações existentes e mecanismos de ação dos herbicidas;
- Entender os impactos causados pelos herbicidas no meio ambiente;
- Explorar as propriedades físicas e químicas do *Imazapic*;
- Avaliar os principais métodos usados para tratar o contaminante *Imazapic* em solo e ambiente aquático.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Herbicidas

Os herbicidas são agentes biológicos ou substâncias químicas capazes de matar ou suprimir o crescimento de espécies específicas de plantas. A função dos herbicidas nas lavouras é como um método de controle para plantas daninhas, visto que estas podem comprometer a produtividade da lavoura em até 80% (ROMAN *et al.*, 2005).

Planta ou erva daninha é o termo utilizado para uma planta que nasce espontaneamente em local e momento indesejados, limitando o potencial produtivo das culturas. Essa limitação se dá pelo fato de elas competirem por água, luz e nutrientes com as plantas cultivadas. Além disso, as plantas daninhas também podem ser hospedeiras de pragas e organismos que podem causar doenças nas plantações, afetando o desenvolvimento da lavoura e interferindo também na produção, necessitando assim, de controle químico maior, com a aplicação de defensivos agrícolas (GIRALDELI, 2020).

3.1.1. Utilização dos Herbicidas

Na década de 40, haviam poucas opções de herbicidas e a escolha entre qual utilizar era bem simples, ou se utilizava o herbicida 2,4-D para folhas largas, ou um dos herbicidas não seletivos, isto é, aqueles com amplo espectro de ação. Mas com o avanço tecnológico a quantidade de herbicidas aumentou severamente, e atualmente há uma quantidade enorme de herbicidas disponíveis, sendo necessário o conhecimento sobre seu funcionamento ou como devem ser usados para obter um resultado eficiente. Segundo MARCHI, MARCHI, GUIMARÃES (2008), os pesticidas podem ser classificados com relação a essa forma de uso em:

- a) **Aplicados ao solo:** se movem das raízes para as folhas (translocados pelo xilema). Um exemplo é *atrazina* que é translocado apenas pelo xilema. A vantagem desses tipos de herbicidas é que possuem uma vida útil longa, permanecendo no solo até que seja degradado ou transportado para fora da região onde poderiam exercer seus efeitos, outra vantagem é a facilidade na aplicação. No entanto, a eficiência desses herbicidas está relacionada a umidade do solo, se o solo estiver seco a eficiência será baixa porque a dissolução no solo será pequena, podendo então, não serem

absorvidos pelas plantas.

- b) **Aplicados às folhas (contato):** reagem rapidamente no local de contato e não transloca pelo interior da planta. Matam as ervas daninhas muito rapidamente, o que faz com que seja preferido em relação aos sistêmicos. Como não há persistência, culturas podem ser plantadas em seguida do tratamento. Uma desvantagem é que plantas perenes com raízes profundas não morrem, visto que estes herbicidas danificam somente a parte que entram em contato, isto é, a parte aérea, então a parte subterrânea permanece intacta e pode iniciar novo ciclo de crescimento.
- c) **Aplicados às folhas (sistêmicos):** movimentam-se das folhas para os locais de crescimento das plantas. Para que esses herbicidas façam efeito, é preciso que eles penetrem uma cutícula, que é uma membrana cerosa, hidrofóbica, que cobre toda a superfície da planta. Há três rotas para que os herbicidas difundam através da cutícula, sendo elas, para os solúveis em água, para os não solúveis e uma rota pela ectoderme da planta. Possuem a vantagem de não necessitar que toda a planta entre em contato com o herbicida, visto que ele se transloca, porém pode interferir no crescimento das demais espécies.

3.1.2. Classificação dos herbicidas

Há várias maneiras de classificar os herbicidas, porém nenhuma delas é completamente definitiva, visto que há uma grande variedade de modos de ação e de composição química dos herbicidas. A maioria das classificações abordam apenas certos fatores relacionados às características ou ao comportamento dos produtos. As principais formas de classificação utilizadas são quanto a: seletividade, época de aplicação, translocação e mecanismo de ação (OLIVEIRA JR; TORMENA, 2002).

3.1.2.1. Seletividade:

É um fator importante visto que, revela quais as plantas são mais ou menos sensíveis ao uso de determinados herbicidas. Existem os herbicidas seletivos e não seletivos, sendo eles (OLIVEIRA JR; TORMENA, 2002):

- a) Herbicidas seletivos** – Podem ser seletivos para a cultura, ou seja, quando aplicados não causa danos à mesma. Porém, podem ser seletivos às próprias plantas daninhas, isto é, afeta apenas um grupo de plantas daninhas sem causar danos a outro (OLIVEIRA JR; TORMENA, 2002). São exemplos de herbicidas seletivos mais aplicados no Brasil: 2,4-D (ácido 2,4 diclorofenoxiacético) para cana-de-açúcar, *atrazina* e *mesotriona* para milho, *diuron* para café e laranja, *Imazapic* para cana-de-açúcar e amendoim (CARVALHO, 2013).
- b) Herbicidas não seletivos** – São aqueles com um amplo espectro de ação, que afetam tanto a cultura, como as plantas daninhas. Um exemplo é o *glifosato* que atualmente é o herbicida mais utilizado no país e no mundo, utilizado em culturas de arroz, cana de açúcar etc (CARVALHO, 2013), outro herbicida não seletivo bastante conhecido é o *paraquat*, usado em cultura de soja, que teve seu uso suspenso pela ANVISA em 2017 por ser um produto altamente tóxico para humanos.

3.1.2.2. Época de aplicação

A grande maioria dos herbicidas possuem épocas específicas de aplicação, para que se possa obter melhor controle e seletividade, utilizando menos produto. É um fator importante de se ter conhecimento para que seja feito um uso apropriado e prudente, em consequência menos riscos ao meio ambiente e às culturas.

Esse tipo classificação reflete a eficiência de absorção por diferentes estruturas das plantas. Os herbicidas quando aplicados ao solo geralmente são absorvidos pelas raízes ou por estruturas subterrâneas antes, durante ou imediatamente após a emergência. Já quando aplicados na parte aérea das plantas são de preferência absorvidos pelas folhas. Visto que alguns herbicidas podem ser aplicados com sucesso em diferentes épocas, este sistema, como os anteriores, embora seja de grande importância prática, não é conclusivo também. No geral, as épocas de aplicação são definidas em (OLIVEIRA JR; TORMENA, 2002):

- a) Pré plantio** – Herbicidas aplicados no solo e que em seguida é necessário a incorporação mecânica. Esses herbicidas, aplicados desta forma, normalmente apresentam uma ou mais das seguintes características:
- Mecanismo de ação que requer contato entre o herbicida e os germens das plantas antes da emergência;

- Baixa solubilidade em água;
- Fotodegradação;
- Volatilidade (alta pressão de vapor) (OLIVEIRA JR; TORMENA, 2002).

Exemplos de herbicidas aplicados em pré-plantio são o *acetochlor*, usado para controle de gramíneas em lavouras de milho, soja e cana-de-açúcar, e *trifluralin*, também utilizado para controle de gramíneas em culturas de algodão, soja e amendoim. Ambos são de baixa solubilidade e de alta pressão de vapor, que faz com que ocorra uma grande perda do produto quando ele se encontra na superfície, sendo necessário a incorporação do mesmo solo.

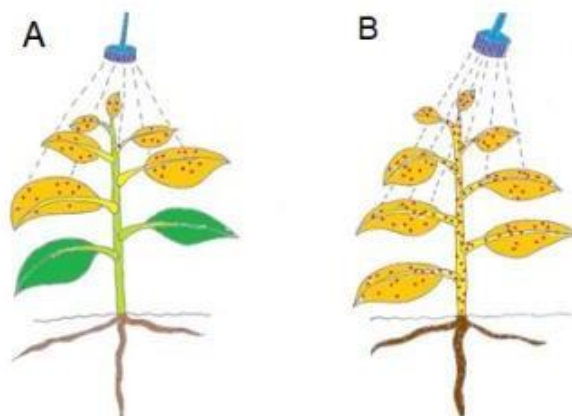
b) Pré emergente – Herbicida aplicado após a semeadura ou plantio da cultura, mas antes da emergência das plantas daninhas. Este tipo de herbicida depende de solos úmidos para obter um funcionamento adequado. No país é comum a utilização dos herbicidas pré-emergentes, *diuron*, para controle de plantas daninhas, de folhas largas e gramíneas em culturas de algodão, café e cana-de-açúcar e, *napropamide* aplicado em cafeeiros.

c) Pós emergente – Herbicida é absorvido principalmente pela parte aérea da planta daninha e neste caso a cultura deve ser tolerante ao mesmo. As aplicações normalmente são feitas em fases precoces do desenvolvimento das invasoras. Para a cultura de milho é comumente utilizado o *mesotrione* e *glifosato*, para controle pós-emergente de plantas daninhas e na cultura de soja o herbicida *2,4-D* (EMBRAPA, 2006).

3.1.2.3. Translocação

Descreve a maneira como o herbicida se movimenta ao interior da planta. Existem, dois tipos de herbicidas de translocação (CARVALHO, 2013). Como demonstrado na Figura 1.

Figura 1-Diferença na translocação de um herbicida de contato (A) e sistêmico (B).



Fonte: (INTERNATIONAL SUSTAINABILITY ET CARBON CERTIFICATION (ISCC)., 2013)

a) Herbicidas tópicos (ou de contato) – Estes defensivos não se translocam ou, se o fazem, é de forma limitada, por isso só causam danos nas partes que entram em contato direto, portanto a pulverização necessita ter uma boa cobertura. O efeito, no entanto, é rápido e costuma levar poucas horas.

Exemplos de herbicidas de contato são o *Paraquat* não mais permitido no Brasil, o *Diquat* utilizado na dessecação pré-colheita das culturas de soja, feijão e batata e *Sulfentrazone* usado para controle de daninhas nas culturas do abacaxi, café, cana-de-açúcar, citros, eucalipto, fumo e soja.

b) Herbicidas sistêmicos – São herbicidas com alta capacidade de movimentação dentro da planta daninha, podendo deslocar pelo xilema, tecido que transporta a água (seiva bruta); pelo floema, tecido vegetal que carrega as substâncias orgânicas (seiva elaborada); ou, ainda, por ambos. Importante se ter conhecimento das condições climáticas e umidade do solo, antes da aplicação desses herbicidas, pois essas influenciam na eficiência.

Os herbicidas dessa classificação comumente utilizados são *Glifosato*, *2,4-D* e *Imazatapir* indicado para controle de plantas daninhas de folhas largas e estreitas na cultura de soja.

3.1.2.4. Mecanismo de ação

O mecanismo de ação se trata do primeiro processo bioquímico ou biofísico, isto é, evento metabólico, que é inibido pela ação do herbicida. O evento metabólico é o conjunto de reações químicas que ocorrem em cada célula vegetal e que garante a existência das plantas. A característica é uma das mais usadas para classificar os herbicidas por envolver diversos fatores: condições ambientais, seletividade e o próprio comportamento dos herbicidas nas plantas e no ambiente.

Assim, segundo CARVALHO (2013), de acordo com o mecanismo de ação, podemos dividir os herbicidas em dois grupos principais:

- a) **Enzimático** – ação do herbicida ocorre diretamente sobre alguma enzima do metabolismo da planta (exemplo: *triazina* que inibe o fluxo de elétrons no fotossistema II).
- b) **Não-enzimático** – ocorre sobre algum evento metabólico da planta, mas sem ligação com uma enzima específica, como por exemplo: dinitroanilinas e *paraquat* (MARCHI, MARCHI, GUIMARÃES, 2008).

3.1.3. Propriedades Físico-Químicas dos Herbicidas

Para o uso correto dos herbicidas e visando minimizar os impactos causados ao meio ambiente, é de fundamental importância ter conhecimento sobre as propriedades físico-químicas do produto. Visto que, essas características é que auxiliarão na escolha de qual o produto mais adequado a ser utilizado em cada ocasião, como por exemplo, a aplicação ou não em situações limite, tais como a proximidade de corpos d'água, lençol subterrâneo raso, acúmulo do produto no meio etc. Sendo assim, as principais propriedades físico-químicas dos herbicidas relacionadas com o seu comportamento são:

- a) **Solubilidade em água (S)**: Quantidade máxima do herbicida que se dissolve em água pura em determinada temperatura (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011);
- b) **Pressão de vapor (Pv)**: Definida como a pressão exercida por um vapor em equilíbrio com um líquido a uma determinada temperatura. Seu conhecimento é importante para determinar se o herbicida, irá permanecer em determinada área da superfície, ou irá se volatilizar, passando para a atmosfera (GEBLER; SPADOTTO, 2008);

- c) **Coefficiente de partição octanol-água (K_{ow}):** Refere-se à medida da intensidade da afinidade da molécula pela fase polar, no caso a água e apolar, representada pelo octanol. Mede-se a lipofilicidade de uma molécula, ou seja, a habilidade de um composto químico ser dissolvido em lipídios no geral (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011);
- d) **Constante de equilíbrio de ionização ácido (pK_a) ou base (pK_b):** Permite conhecer o potencial de dissociação de um herbicida ácido ou básico, em meio líquido, em relação ao pH do meio. Quanto maior o pK_a do herbicida, menor será a probabilidade de estar na forma aniônica e assim, menos solúvel e, vice-versa (BIANCO, 2017).
- e) **Constante da lei de Henry (H):** Esta constante leva em consideração a solubilidade, pressão de vapor e o peso molecular, e indica o grau de volatilidade de um composto químico em uma solução (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011);
- f) **Meia-vida (t_{1/2}):** Tempo necessário para que 50% da molécula que foi inicialmente aplicada seja degradada (REIS, 2017).

3.2. Herbicida *Imazapic*

O herbicida *Imazapic* pertence ao grupo químico das Imidazolinonas, de ação sistêmica, ou seja, são absorvidos pelas plantas através das raízes e translocam via xilema até as folhas, é de classe toxicológica III, isto é, pouco tóxico. Utilizado como herbicida seletivo no controle pré e pós emergência de plantas infestantes em culturas de amendoim e cana de açúcar (ISMAEL, 2019).

A fórmula molecular e a estrutural do *Imazapic* é apresentado a seguir (Figura 2):

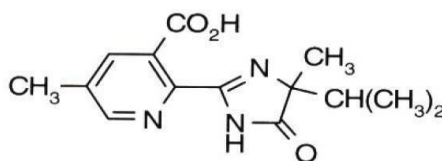
Fórmula molecular: C₁₄H₁₇N₃O₃

Nome químico: (RS)-2-(4-isopropyl-4-methyl-5-oxo-2-imidazolin-2-yl)-5methylnicotinic acid

Nome comum: *Imazapic*

Nome comercial: Plateau (70% *Imazapic*)

Figura 2- Fórmula estrutural do *Imazapic*

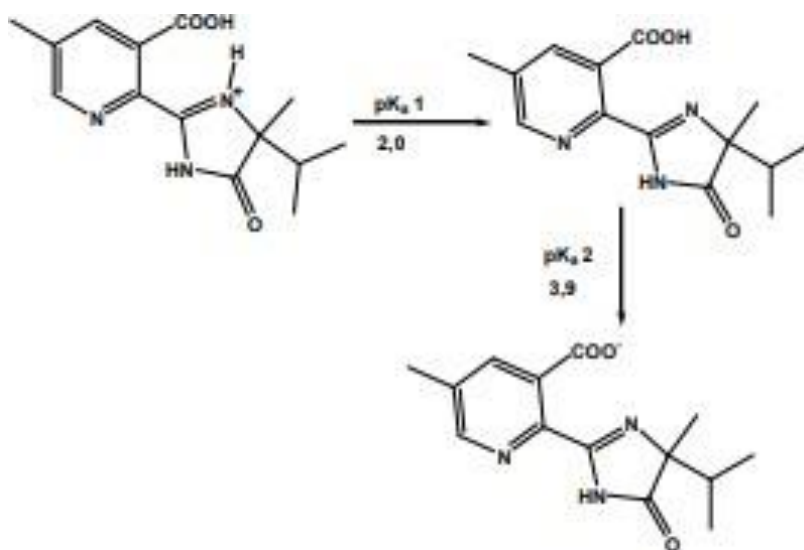


Fonte: ANVISA (2007)

Os herbicidas pertencentes aos grupos da imidazolinonas são inibidores da enzima aceto-hidroxiácido sintetase (AHAS), esta inibição interrompe a síntese proteica, que por sua vez interfere na síntese de Ácido desoxirribonucleico (DNA) e no crescimento celular, causando a morte da planta (BASF, 2006).

O *Imazapic* apresenta natureza anfótera, pois possui um grupo carboxílico (ácido) e um grupo amino (básico), que permite que os mesmos existam na forma catiônica, aniônica ou neutra dependendo do pH do meio, como ilustrado na Figura 3. Desse comportamento resulta a menor sorção do herbicida, já que o mesmo é fracamente adsorvido em solos com pH elevado, mas a sua adsorção aumenta em condições ácidas e quando os teores de matéria orgânica e argila são mais elevados (ISMAEL, 2019). Assim, fatores como o pH, teor de carbono orgânico e força iônica regulam sua persistência no ambiente.

Figura 3- Estruturas químicas do herbicida *Imazapic*: forma catiônica, neutra e aniônica.



Fonte: (MARINHO, 2015)

Na Tabela 1, apresentam-se as principais características físico-químicas do *Imazapic*.

Tabela 1- Propriedades físico-químicas do *Imazapic*.

Massa Molar	pKa ₁ (25°C)	Mobilidade (Koc) ¹	Solubilidade em água (mg L ⁻¹) (20°C)	Pressão de vapor (Mpa) (25°C)
275,3	3,6	137	2230	0,01

Fonte: Adaptado de International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).

De acordo com informações fornecidas pela BASF/AS (2009), fabricante do herbicida Plateau (70% *Imazapic*), o produto possui as seguintes características:

- Perigoso ao meio ambiente (CLASSE II);
- Altamente móvel, apresentando alto potencial de deslocamento no solo, podendo atingir principalmente as águas subterrâneas;
- Altamente persistente no meio ambiente.

O herbicida *Imazapic* é recomendado para gramíneas, de folhas largas e perenes de difícil controle. Apresenta meia-vida ($t_{1/2}$) de 120 dias e em sistemas aquáticos é rapidamente degradado via fotólise, sendo sua meia-vida ($t_{1/2}$) de 0,3 dias. Efeito agudo em mamíferos dose média letal(DL50) ocorre em doses superiores a 5000 mg kg⁻¹, em peixes e aves a DL50 é maior que 100 e 2.150 mg L⁻¹, respectivamente. A intoxicação aguda em algas (CE50) é verificada na dose 0,051 mg. (VASCONCELO, 2017).

A persistência ou bioatividade de um herbicida consiste no período em que o mesmo permanece biologicamente ativo no solo, promovendo o controle de plantas daninhas, e ela depende da dose aplicada de herbicida, das suas propriedades químicas, das características do

¹ Koc= Coeficiente de sorção – Coeficiente que estima a tendência de partição do herbicida da fase líquida para a matéria orgânica do solo. (SCHWARZENBACH, RENE P. GSCHWEND; IMBODEN, 1993).

solo e dos fatores climáticos envolvidos. Por depender desses vários fatores, os dados de persistência obtidos em uma determinada região não podem ser generalizados (ROMAN *et al.*, 2005).

De acordo com a USEPA, “Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos” (2001) em decorrência de sua alta atividade, o *Imazapic* é altamente persistente em corpos d’água em que não há incidência luminosa. Nessas condições, o herbicida possui efetiva potencialidade em poluir águas subterrâneas. Em estudo realizado na região sul do Brasil, onde em grande parte são de cultivos de arroz, SILVA *et al.*(2011) constataram que em todas as amostras de água coletada em mananciais hídricos foram detectadas a presença de pelo menos um agrotóxico, entre eles o herbicida *Imazapic*, porém em quantidades relativamente baixas, sendo necessário realizar trabalhos de análise de riscoambiental para essa quantidade, visto que em tais concentrações não são encontrados dados de seus impactos na literatura. O monitoramento de pesticidas em águas superficiais e subterrâneas ainda não é uma prática muito corrente no Brasil, devido à ausência de infraestrutura laboratorial necessária e aos custos elevados envolvidos na realização das análises (SOUZA, 2013).

3.3. Uso de *Imazapic* no Brasil

A quantidade de novos agrotóxicos registrados no Brasil vem aumentando desde 2016, sendo 2021, até o momento, o ano com o maior número de registros. Somente no ano de 2021, foram liberados 562 novos agrotóxicos (SALATI, 2022).

O aval para um novo agrotóxico no país passa por três órgãos reguladores, sendo eles: a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), que avalia os riscos à saúde, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), que analisa os perigos ambientais e o Ministério da Agricultura (MAPA), que pondera se ele é eficaz para matar pragas e doenças no campo, sendo o responsável por formalizar o registro, desde que o produto tenha sido aprovado por todos os órgãos. O registro dos agrotóxicos constitui-se no instrumento básico do processo de controle governamental sobre essas substâncias e consiste em uma etapa obrigatória em vários países com o intuito de minimizar os riscos à saúde humana e ambiental (PERES; MOREIRA, 2005). É dividido em duas classificações (MAPA, 2019).

- **Produto técnico** - possui princípio ativo novo, não é comercializado puramente, é usado na composição de produtos que serão vendidos;

- **Produto técnico equivalente ou genérico** - trata-se de reproduções dos princípios ativos novos, que podem ser realizadas quando caem as patentes e serão usadas na formulação de produtos comerciais. Um exemplo comum é as empresas registrarem um mesmo princípio ativo várias vezes, para poder fabricar agrotóxicos específicos para diferentes culturas.

Entre janeiro de 2019 e junho de 2020 foram aprovados 680 novos produtos no país (503 em 2019 e 177 em 2020), sendo 611 produtos contendo ingredientes ativos químicos, desses, 252 são proibidos na União Européia, entre eles o herbicida *Imazapic*, que teve sua proibição decretada em 2009, mas no Brasil tem seu uso liberado e, em 2020, foram comercializadas cerca de 109 toneladas do mesmo, sua maior utilização no país é em plantações de cana de açúcar (IBAMA, 2021). Seu uso vem gerando preocupações de ambientalistas visto, a carência de conhecimento na literatura sobre os impactos que ele pode causar.

3.4. Legislação de Herbicidas no Brasil

Com o aumento populacional e da demanda agrícola, aumentou também o uso de agrotóxicos e apesar da produtividade agrícola aumentar com o uso destes, o uso indiscriminado acarreta problemas tanto para a saúde humana quanto para o meio ambiente. Como já citado anteriormente, esses impactos já são conhecidos, em seres humanos vão desde irritações na pele, problemas neurológicos e alguns tipos de câncer, ao meio ambiente os impactos incluem contaminação da água, plantas e solos, diminuição no número de organismos vivos e aumento da resistência de pragas. Visto esses problemas provocados pelo uso excessivo e sem orientação de agrotóxicos, houve a necessidade de se regulamentar normas de segurança quanto ao manuseio destes produtos, assim como buscar alternativas que possam contribuir para a redução de seus impactos no ambiente e seus malefícios para a saúde humana e dos demais seres vivos. Assim, foi criada a Lei Federal nº 7802 em julho de 1989, que substituiu o Decreto 24.114 de 1934, o grande avanço dessa lei, deu-se com o estabelecimento de regras mais rigorosas para uso e permissão de registro aos agrotóxicos (MAPA, 2019).

A Lei nº 7802, também conhecida como lei dos agrotóxicos, dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins, e dá outras providências (BRASIL, 1989).

A legislação prevê a proibição do registro de novos agrotóxicos nos casos em que (BRASIL, 1989):

- A ação tóxica sobre o ser humano e meio ambiente do novo produto, seus componentes e afins, não for comprovadamente igual ou menor do que a daqueles já registrados, para o mesmo fim.
- Para os casos em que o país não disponha de métodos para desativação de seus componentes, de maneira que impeça que os seus resíduos remanescentes provoquem riscos ao meio ambiente e à saúde pública;
- Apresentem características teratogênicas, carcinogênicas, mutagênicas ou que provoquem distúrbios hormonais, de acordo com os resultados atualizados de experiências da comunidade científica;
- Se revelem mais perigosos para o homem do que os testes de laboratório, com animais, tenham podido demonstrar, segundo critérios técnicos e científicos atualizados;

Prevê também a possibilidade de impugnação ou cancelamento do registro por solicitação de entidades representativas da sociedade civil, quando comprovados os prejuízos ao meio ambiente, à saúde humana e dos animais.

Da mesma forma são definidas condições para as embalagens, como:

- serem projetadas e fabricadas de forma resistente, para que impeça vazamentos, evaporação ou perdas no transporte;
- devem ser de materiais resistente e inertes aos componentes do agrotóxico armazenado;
- devem ser providas de um lacre que seja irremediavelmente destruído ao ser aberto pela primeira vez.

Também sobre as embalagens, outro fator importante é sobre o descarte, que diferente de outras embalagens plásticas não pode ser reutilizada, devidos os riscos de contaminação em humanos e nos solos. Sendo assim, é muito importante que seja feito da forma correta e para isso fica definido na legislação pelo decreto n° 4.074, de 4 de janeiro de 2022, que:

- A destinação final das embalagens vazias e dos resíduos de agrotóxicos deverá cumprir as orientações prescritas na bula. Os usuários de agrotóxicos possuem o prazo de até um ano da compra, para devolver as embalagens vazias juntamente com suas tampas, no local em que foram adquiridos.

- Após o uso, antes da devolução, cabe ao agricultor realizar a primeira lavagem das embalagens no campo e esta água deve ser usada para pulverizar a plantação e não deve ter seu descarte realizado em qualquer lugar, muito menos dentro de rios, lagos ou açudes. Depois deve-se lavar mais duas vezes, furá-las, para que não sejam reutilizadas e entregues na unidade de recebimento indicada.
- A norma técnica NBR 13968 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), define a chamada “tríplice lavagem” e a lavagem sob pressão, onde os resíduos contidos nas embalagens podem ser removidos e reutilizados na lavoura.
- Os estabelecimentos comerciais são os responsáveis pelo recebimento e armazenamento, em locais seguros e adequados, das embalagens vazias que foram devolvidas. Posteriormente, essas embalagens serão recolhidas pelas respectivas empresas titulares do registro, produtoras e comercializadoras, responsáveis pela destinação final dessas embalagens.
- Os estabelecimentos comerciais, postos de recebimento e centros de recolhimento de embalagens vazias fornecerão comprovante de recebimento das embalagens onde deverão constar, no mínimo:
 - I- nome da pessoa física ou jurídica que efetuou a devolução;
 - II- data do recebimento;
 - III- quantidades e tipos de embalagens recebidas.
- As empresas titulares de registro, produtoras e comercializadoras de agrotóxicos, são as responsáveis pelo recolhimento, pelo transporte e pela destinação final das embalagens vazias.

Antes da regulamentação da Lei federal, os agricultores já possuíam noção de que as embalagens eram prejudiciais à saúde, portanto não poderiam ser reutilizadas, mas até então não havia finalidade para elas, então eles as queimavam, o que provocava mais um efeito nocivo para o meio ambiente, já que a combustão desse material emite uma grande quantidade de CO₂.

Outro hábito dos agricultores era enterrar as embalagens, que também provoca danos ao meio ambiente, já que o solo, além de contaminado pelo produto, leva décadas para decompor esses materiais (BERNARDI; RAFAELA; BOFF, 2018).

Atualmente, existe no país 411 unidades de recebimentos das embalagens usadas de agrotóxicos. Em 2020, foram cerca de 805 toneladas de embalagens de agrotóxicos devolvidas

pelos agricultores, essas embalagens são recolhidas pelas fábricas e destinadas para as associações de recicláveis. Essas embalagens, quando recicladas, viram novas embalagens para as próprias fábricas de agrotóxicos e muitos outros materiais, quando reciclados, tornam-se úteis para a produção dos tubos de fiação, cabos subterrâneos, cabos para irrigação (INPEV, 2021).

O decreto nº 4.074 também definiu valores para Limite Máximo de Resíduo (LMR) isto é, a quantidade máxima de resíduo de agrotóxico oficialmente aceita no alimento, em decorrência da aplicação adequada numa fase específica, desde sua produção até o consumo, expressa em partes (em peso) do agrotóxico, afim ou seus resíduos, por milhão de partes de alimento (em peso) (ppm ou mg/kg) (BRASIL, 2002). Na Tabela 2, são apresentados os valores de limite máximo de resíduo permitido pela a ANVISA para o herbicida *Imazapic*.

Tabela 2- Valores de LMR para o herbicida *Imazapic*.

Culturas	Modalidade de Emprego (Aplicação)	LMR (mg/Kg)	Intervalo de Segurança
Amendoim	Pós-emergência	0,1	70 dias
Arroz	Pré/Pós-emergência	0,05	60 dias
Cana-de-açúcar	Pré/Pós-emergência	0,1	150 dias
Milho	Pós-emergência	0,1	96 dias
Pastagem	Pós-emergência	0,1	(1)
Soja	Pré-emergência	0,3	(1)
Soja	Pós-emergência	0,3	60 dias

Fonte: (ANVISA, 2007)

Como foi verificado a necessidade de elaborar normas e determinar um padrão de potabilidade da água para o consumo humano, foram criadas leis que estabelece um padrão bacteriológico, físico-químico e radiológico que a água deve apresentar para ser considerada potável, analisando turbidez, odor e substâncias químicas presentes (ALVES; MARIA; FORMAGGIA, 2021).

Na Portaria nº 2.914/2011, que trata dos padrões de potabilidade, há menção de Valores Máximos Permitidos (VMP) para alguns defensivos agrícolas, como *Diuron*, *DDT* e *Paraquat*. No entanto, não há valores limitantes para a presença de *Imazapic* (BRASIL, 2011), porém em consulta a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) é encontrado um valor de ingestão diário tolerável (IDT) de 0,5 mg kg⁻¹ dia⁻¹ para o *Imazapic* (UMBUZEIRO, 2012).

3.5. Contaminações de Solo e Água por *Imazapic*

O uso crescente de defensivos agrícolas no Brasil juntamente com seu uso indiscriminado tem promovido impactos significativos à saúde humana e do ponto de vista ambiental, através da contaminação do solo e da água. No país a maior parte do território cultivado é constituído por relevo de planalto, o que por si só favorece a lavagem do solo por escoamento superficial e aumenta os riscos de contaminação dos corpos hídricos por pesticidas (DELLAMATRICE, P. M.; MONTEIRO, 2014).

O herbicida *Imazapic* como já citado anteriormente apresenta toxicidade relativa para mamíferos, pássaros e anfíbios, além de apresentar alta solubilidade em água e, quando dissolvido, possui poder de contaminação das águas superficiais e subterrâneas (ASSIS, 2016).

Como forma de avaliar o potencial risco de contaminação que determinados agrotóxicos impõem sobre a qualidade das águas subterrâneas, foi criado o Índice de Vulnerabilidade de Águas Subterrâneas (GUS), que prioriza o monitoramento no local. O *Imazapic* apresenta GUS =3,87, o que indica alto potencial de lixiviação. Isso demonstra seu poder de poluição e/ou contaminação nos compartimentos ambientais, principalmente solo e água (LYRA MENDONÇA, 2019).

A falta de informação sobre o comportamento do *Imazapic* no solo é preocupante, visto que o herbicida possui alta solubilidade e mobilidade no solo. A movimentação do *Imazapic* pode ser ainda maior, já que a textura do solo é diretamente proporcional ao transporte vertical dos herbicidas. Dessa maneira, solos arenosos ou de textura média permitem maior deslocamento do produto para os aquíferos, aumentando os riscos de contaminação (SANTOS; SILVA; BARICCATTI, 2013).

Em condições de solo em pH próximo a neutralidade, a molécula do *Imazapic* torna-se dissociada da fração sólida do solo, repelido pelas cargas negativas dele. Nessas circunstâncias, os riscos da mobilidade do *Imazapic* ser maior, o torna ainda mais perigoso para o meio ambiente, no que se refere à contaminação e poluição (SILVA, 2016).

O solo é um sistema aberto e de grande complexidade, constituído por minerais, matéria orgânica, microrganismos, água e ar, sendo que a variação de um desses componentes pode provocar alterações nos demais (TONI, L. R. M.; SANTANA, H.; ZAIA, 2006).

A movimentação do herbicida no solo é definida como transporte, podendo ocorrer por lixiviação, escoamento superficial e volatilização. A lixiviação se refere a mobilidade do herbicida em profundidade na terra, enquanto o escoamento superficial diz respeito ao

deslocamento sobre a superfície do solo. A volatilização é o processo pelo qual o herbicida é transportado do solo para a atmosfera, processo da passagem das moléculas do estado líquido para o estado de vapor (CHRISTOFFOLETI *et al.*, 2008).

Ao ser utilizado no campo, os herbicidas podem passar por diversos processos, como sorção, transformação ou degradação e transporte, que são processos dinâmicos e podem ocorrer simultaneamente no solo. Assim, o que determina o comportamento do herbicida e, conseqüentemente, a eficácia e seletividade do produto no controle de plantas daninhas, é a intensidade em que cada um destes processos acontece, sendo eles (CHRISTOFFOLETI *et al.*, 2008):

- Sorção: consiste na capacidade das partículas do solo em reter as moléculas do composto;
- Degradação: promove a fragmentação das moléculas dos compostos;
- Transporte: processo que transfere os poluentes nos diferentes compartimentos ambientais (água, ar e solo).

A sorção envolve mecanismos de troca de íons em reações de adsorção e precipitação, dependendo das propriedades do solo e do soluto. O conhecimento dessas propriedades é fundamental, visto que elas interferem na disponibilidade dos nutrientes, na eficiência dos herbicidas, fungicidas e outros, e principalmente, na transferência das moléculas (ISMAEL, 2019).

Através dos estudos de sorção de herbicidas nos solos, é possível determinar a persistência e disponibilidade na solução do solo para degradação e transporte. Dessa forma, deve-se considerar que a sorção é influenciada pelas propriedades físico-químicas tanto do solo quanto do herbicida, além das condições do ambiente. Conhecer o processo de sorção é útil visto que, permite conhecer o comportamento e destino do herbicida no ambiente e assim, compreender o poder de degradação, mobilidade e, logo, o potencial de contaminação de águas superficiais e subterrâneas (ISMAEL, 2019).

Portanto, para se ter mais conhecimento sobre o potencial de contaminação de um pesticida no ambiente, é necessário conhecer a sorção do mesmo, sendo assim uma forma de medir a sorção de herbicidas em solos é por meio da determinação de Isotermas, que possibilita compreender sobre o efeito da variação de concentração do composto sobre sua retenção (LIMA *et al.*, 2007). As Isotermas descrevem o equilíbrio da adsorção na forma de diagramas mostrando a variação da concentração de equilíbrio no sólido adsorvente em temperatura constante. Portanto, variando as concentrações iniciais de adsorbato na presença do adsorvente

é possível a construção de gráficos envolvendo a capacidade de adsorção versus concentração de equilíbrio (CALISTO, 2020).

Em geral, os pesticidas são degradados pela atividade microbiana (cujas reações químicas acontecem devido à ação catalítica de enzimas produzidas pelos microrganismos), química (não têm origem biológica) ou por exposição ultravioleta (as reações químicas acontecem na presença de luz - radiação solar na faixa do ultravioleta) (CORREIA, 2018). Os três processos podem participar da quebra molecular de um único produto. O uso exacerbado e sem orientação dessas moléculas influencia no equilíbrio bioquímico do solo, reduzindo sua produtividade e fertilidade. Os pesticidas mais persistentes e hidrofílicos podem ser lixiviados causando a contaminação das águas subterrâneas, enquanto aqueles hidrofóbicos e estáveis possuem propensão em adsorver-se em partículas do solo ou matéria orgânica, tornando-se menos biodisponíveis (VASCONCELO, 2017).

Com objetivo de reduzir a quantidade de aplicações e mesmo assim obter um controle eficiente por um tempo maior, foram desenvolvidos herbicidas com efeito residual prolongado. No entanto, após o uso desses herbicidas foram relatados efeitos de fitotoxicidade em culturas sensíveis, há também o problema ambiental provocado pela persistência. De acordo com as características do produto, as moléculas permanecem mais tempo no solo sem serem adsorvidas aos coloides, degradadas ou mineralizadas, aumentando os riscos de contaminação das águas subterrâneas e de lixiviação no solo, sendo então necessário buscar soluções para remediar os impactos provocados (VASCONCELO, 2017).

3.6. Tipos de Tratamentos para Remediação de Solos Contaminados por *Imazapic*

O setor agrícola contribui com a poluição ambiental em consequência do uso incorreto dos pesticidas, seja por aplicação sem orientação técnica, superdosagens, reaplicações em intervalos irregulares, outras vezes pelo descarte inadequado das embalagens e/ou resíduos de soluções aquosas, por meio de acidentes em fábricas ou durante o transporte dos agroquímicos. Estes acontecimentos aumentam o risco à saúde (GASPAROTTO; PEREIRA, 2000).

O *Imazapic* é altamente móvel, apresentando alto potencial de deslocamento no solo, e possui alta persistência (BASF/AS, 2009), após a aplicação ele pode ser transportado pela ação do vento ou por lixiviação, contaminando outras áreas, podendo atingir principalmente as águas subterrâneas, causando toxicidade aos organismos alvo e não alvo, podendo até mesmo acumular se na cadeia alimentar (SOUZA, 1982).

É dentro deste contexto que o desenvolvimento de técnicas de remediação de áreas

contaminadas por pesticidas vem se desenvolvendo. A remediação dos solos se refere à redução dos teores de contaminantes a níveis seguros para a saúde humana, dificultando a dispersão de substâncias nocivas ao ambiente, com a aplicação de medidas de contenção, degradação e/ou tratamento do contaminante. As técnicas de remediação podem ser classificadas em processos químicos, físicos ou biológicos. Na literatura o termo remediação tem sido relacionado a técnicas não biológicas para remoção ou contenção do contaminante. Atualmente, a tendência é de dar preferência às técnicas de remediação *in situ*, por apresentarem baixos custos e não provocarem contaminações secundárias, fato observado na remediação *ex situ*, já que ocorre o transporte do material contaminado até o local de tratamento (ALVES *et al.*, 2016).

Atualmente, na literatura são encontradas duas formas mais utilizadas para o tratamento de solos contaminados por *Imazapic*, sendo elas a fitorremediação e o uso do biocarvão, que são explicadas abaixo. A fitorremediação funciona como pós tratamento, isto é, quando se quer descontaminar o solo, já o biocarvão se utiliza como uma forma de pré tratamento.

- **Fitorremediação:**

A fitorremediação funciona como uma medida de pós tratamento, ela consiste no uso de plantas para reduzir a concentração de contaminantes no solo, principalmente com metais pesados e poluentes orgânicos, com o objetivo de atingir níveis seguros para seres humanos, além de contribuir na melhoria das características físicas, químicas e biológicas destas áreas (TAVARES, 2013).

As plantas possuem diversos mecanismos para promover o controle da sua homeostase e tolerar o estresse oxidativo causado por compostos tóxicos, isto faz com que os vegetais se adaptem a ambientes variados e apresentem capacidade de interagir em harmonia com diversos organismos, tendo fácil adaptação em solos ácidos, salinos, pobres e ricos em nutrientes, ou excessivamente contaminado por elementos químicos como os metais pesados. O estresse oxidativo provoca graves danos a nível bioquímico, como peroxidação lipídica da membrana e lesão oxidativa no DNA. Como mecanismo de defesa, algumas enzimas atuam como antioxidantes ou detoxificantes conduzindo a maior tolerância das plantas mediante as perturbações do meio (VASCONCELO, 2017).

As principais vantagens da fitorremediação são a 1) aplicação em áreas extensas, (2) promove melhorias na qualidade do solo, com relação as características químicas e físicas, já que aumentam a porosidade, a infiltração de água, previne a erosão além de fornecer e reciclar nutriente, (3) aplicável *in situ* sendo que o solo pode ser reutilizado posteriormente, (4) aplicável

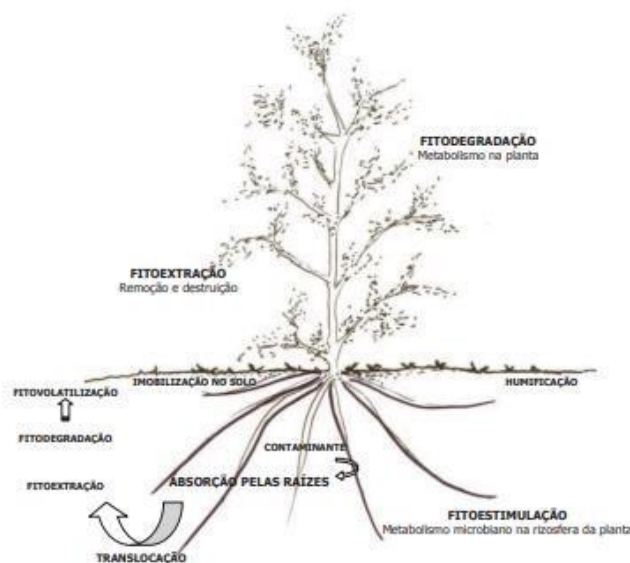
em grande variedade de poluentes, (5) baixo custo (TAVARES, 2013).

Dentro da fitorremediação, há diferentes formas de como as plantas podem remover os poluentes orgânicos, conforme na Figura 4, são elas (TAVARES, 2013):

- a) fitoextração: a planta absorve o contaminante do solo, armazena-o em suas raízes ou nas folhas e caules, facilitando posteriormente seu descarte.
- b) fitotransformação: transformação do poluente orgânico para formas menos tóxicas, por via metabólica ou enzimática;
- c) fitovolatilização: transformação do poluente a uma forma volátil ou gasosa, com posterior liberação na atmosfera pela transpiração;
- d) rizodegradação: a planta estimula a biodegradação por microrganismos rizosféricos dos contaminantes presentes no solo ou na água, estimulados pela produção de secreções e exsudatos radiculares², fornecimento de energia, sombreamento e aumento da umidade do solo, favorecendo as condições ambientais para o desenvolvimento dos microrganismos.
- e) fitoestabilização: capacidade que algumas plantas possuem em reduzir a mobilidade e a migração dos contaminantes presentes no solo, seja por meio da imobilização, lignificação ou humidificação dos poluentes nos seus tecidos vegetais..

² Exsudados são as substâncias químicas secretadas pelas raízes no solo

Figura 4 - Mecanismos utilizados pelas plantas no processo de fitorremediação.



Fonte: (TAVARES, 2013)

A eficácia da fitorremediação está relacionada a capacidade da planta em se desenvolver em um meio com elevada concentração de poluentes, na literatura vem sendo relatados resultados eficazes para o uso de plantas na remediação de herbicidas SOUTO *et al.* (2013) observaram taxa de degradação média de 93% para os herbicidas *Imazapic* e *Imazetapir* determinados em solo rizoférico das espécies *Canavalia ensiformis*, *Glycine max*, *Lolium multiflorum*, *Lotus corniculatus*, *Stizolobium aterrimum*, *Vicia sativa* quantificados aos 63 dias. VASCONCELO *et al.*(2020), relataram a eficácia da espécie *Mucuna aterrima*, popularmente conhecida como *Mucuna Preta*, para a fitorremediação do herbicida *Imazapic*, visto a alta produção de biomassa constatada. Outra espécie com potencial fitorremediador é *Urochloa Brizantha cv. Marandú (Brachiarão)*, conforme constatado em resultados obtidos comparando a capacidade de remediação com as espécies *Sorghum bicolor* e *Panicum maximum* em dois tipos de solos: Solo A – carbono orgânico (g dm^{-3}) – 15,4, teor argila – 32%; e solo B – carbono orgânico (g dm^{-3}) – 24,5, teor de argila – 26%, onde os resultados obtidos demonstraram que a mesma apresentou maior tolerância sem grandes danos quando cultivada nos dois tipos de solo e tratada com crescentes doses de *Imazapic* (SOUSA, GUSTAVO DORNELES DE; JAKELAITIS *et al.*, 2017).

No entanto, a fitorremediação também possui limitações as quais incluem a (1) contaminação por múltiplos poluentes, (2) as mudanças climáticas que alteram a dinâmica do poluente e modifica as interações entre plantas e microrganismos do solo, (3) o tempo de tratamento necessário para redução dos níveis de toxicidade, (4) estabelecimento e

manutenção das plantas no local, (5) a possibilidade de geração de subprodutos tóxicos (VASCONCELO, 2017). Outro fator importante, é a seleção das espécies a serem utilizadas na remediação de forma eficiente, para isso é necessário avaliar a capacidade das plantas em resistirem a ambientes poluídos por compostos orgânicos.

As plantas mais tolerantes retiram os contaminantes orgânicos, principalmente por meio da rizodegradação, mas ao mesmo tempo pode contribuir para uma qualidade do solo melhor, produção de biomassa e assim de biocombustível, diminuição da emissão de carbono e a conservação da biodiversidade. A fitorremediação em relação aos demais métodos convencionais de tratamento como, coagulação, absorção em carvão ativado, osmose reversa, POA e outras, é mais sustentável, mais atrativa economicamente, além de ter uma melhor aceitação pública e por ser um método de tratamento biológico possui maior amparo das agências reguladoras ambientais.

Para que se obtenha resultados eficazes com a técnica é necessário a seleção de plantas com alta tolerância ao ambiente estressor, capacidade em transformar e acumular os poluentes, possua alta taxa de transpiração e de produção de biomassa, rápido crescimento, propagação e controle da área, um sistema radicular denso e profundo, e possua também alta geração de exsudatos radiculares. (VASCONCELO, 2017).

- **Biocarvão**

Na região amazônica, as chamadas Terras Pretas do Índio (TPI), chamaram a atenção devido sua alta fertilidade, estudos concluíram que as TPI foram formadas pela interferência do homem cerca de 500 a 2500 anos atrás, de forma não intencional, proveniente da deposição de carvão vegetal, ossos e cascos de animais. Esse solo possui fertilidade tão elevada que alguns sítios chegam a conter mais de 1000 ppm de fósforo, sem falar nos demais nutrientes, e alto teor de matéria orgânica. Além disto, esta fertilidade é permanente, isto é, ainda que se cultive por anos e anos, estes solos permanecerão férteis sem a necessidade de adubação (NETO *et al.*, 2019).

Suas propriedades e elevada fertilidade têm chamado a atenção de diversos grupos de pesquisadores no mundo, com o objetivo de desenvolver um composto com características similares, denominado de biocarvão para uso agrônômico. O biocarvão é aplicado no solo com o objetivo de promover o estoque de carbono, melhorar a produtividade, além de a alta

capacidade de troca catiônica (CTC) permitir a realização de trocas iônicas com o solo, permitindo a liberação de nutrientes para as plantas (ISMAEL, 2019).

As características da biomassa iniciadora e a temperatura de pirólise, isto é, a degradação térmica do material orgânico na ausência parcial ou total de oxigênio em altas temperaturas, estão associadas às propriedades do biocarvão para uso nos solos, essas características influenciam na capacidade de reter íons, porosidade, superfície e na resistência física e química, que são capazes de interferir nas propriedades do solo, influenciando principalmente a passagem dos contaminantes para as águas subterrâneas (FIGUEREDO, 2015).

Outras vantagens proporcionadas pelo biocarvão, são a melhoria da qualidade da água através da diminuição da lixiviação de nutrientes, maior retenção de água no solo, redução da erosão e degradação do solo, os benefícios ambientais e climáticos, como o sequestro e redução de carbono, além do aproveitamento de resíduos orgânicos (ISMAEL, 2019).

De acordo com TRAZZI *et al.*(2018), a aplicação de biocarvão no solo é capaz de aumentar a sorção, diminuir as taxas de dissipação, diminuir a lixiviação e o movimento do herbicida no solo além de reduzir a biodisponibilidade dele, reduzindo então os riscos de contaminação das águas subterrâneas

Em resumo qualquer fonte de biomassa pode ser utilizada na produção de biocarvão, porém a escolha da biomassa é que gerará alterações na composição química e na morfologia desses materiais, assim como nas condições da pirólise. Tudo isso interfere nas respostas agronômicas obtidas quando da aplicação do biocarvão no solo. Por outro lado, o tipo de solo e a cultura explorada também respondem diferentemente a esses materiais.

Pelo levantamento realizado pode-se considerar que o uso de biocarvão nos solos funciona como uma forma de pré-tratamento, visto que ele é utilizado no solo antes da aplicação do herbicida para poder minimizar a dispersão do mesmo (ISMAEL, 2019).

3.7. Uso Alternativo de Adubos Verdes para Melhoria de solos

Uma forma de se usar a fitorremediação é por meio da adubação verde, que é uma técnica milenar, utilizada há mais de 3000 anos por chineses, gregos e romanos. É definida como a incorporação ao solo de plantas, que são capazes de reciclar os nutrientes presentes em camadas profundas do solo ou na atmosfera. Essas plantas possuem elevada produção de biomassa, são ricas em nutrientes, melhorando-o solo, física, química e biologicamente,

promovendo a conservação, o aumento da fertilidade e produtividade (DA SILVA, 2015).

Essa prática pode ser realizada com diferentes espécies vegetais, no entanto cada uma possui características diferentes como: tempo de decomposição, velocidade de crescimento, produção de compostos alelopáticos (substâncias químicas liberadas pelas plantas, que influenciam o desenvolvimento de outras plantas) e produção de biomassa. Normalmente, são utilizadas espécies da família das leguminosas, devido a elevada concentração de fósforo, potássio, cálcio e nitrogênio fixado da atmosfera por meio da ação das bactérias que se desenvolvem em suas raízes (ALCANTARA, 2016)

A prática promove muitas vantagens, sendo elas:

- Diminuição da amplitude térmica entre o dia e a noite;
- O sistema denso de raízes, aumenta a penetração de água no solo, garantindo a umidade dele, reduzindo as perdas por evaporação e conseqüentemente, promovendo a fertilidade do solo devido ao aumento da matéria orgânica;
- Capacidade de troca de cátions e da disponibilidade de macro e micronutrientes;
- Melhora a agregação e aeração já que cria uma barreira entre as gotas de chuva e o solo, evitando a compactação do mesmo;
- Dificulta o desenvolvimento de sementes de plantas daninhas e pode suprimir ou controlar invasoras, devido a competição por luz, água e nutrientes (alelopatia);
- Promove a reciclagem de nutrientes, que são acumulados durante seu crescimento e liberados durante sua decomposição (SARTORI, 2011).

Dependendo do sistema de produção adotado pelo agricultor, a adubação verde pode estar associada a rotação, consorciação ou sucessão com outras culturas, sendo possível, inclusive, que as espécies vegetais utilizadas na adubação verde sejam incorporadas ao solo ou mantidas na superfície. Quando incorporadas, maneira possível de ser realizada apenas no cultivo convencional, tem a finalidade de aumentar os teores de matéria orgânica no solo e a rápida mineralização dos nutrientes, e quando deixados sobre a superfície do solo, o objetivo é a cobertura e a proteção do solo contra a erosão e plantas daninhas (ERASMO; AZEVEDO; GARCIA, 2004).

As principais leguminosas utilizadas como adubos verdes, são: Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), milheto (*Pennisetum glaucum*), Feijão- maluco (*Mucuna pruriens*),

ervilhaca comum (*Vicia sativa*) e as as crotalárias. No estudo de caso abordaremos a *C. ensiformis* (feijão de porco), *M. pruriens* (feijão maluco) e *U. brizantha* (capim marandu), todas são leguminosas, resistentes às altas temperaturas e à seca (SARTORI, 2011).

Para potencializar o uso da adubação verde é necessário conhecer as espécies mais adaptadas as condições de clima, temperatura e afins, da região, e adequá-las a melhor forma de manejo. O conhecimento sobre as diferentes espécies de adubos verdes existentes é fundamental para aumentar a sustentabilidade da produção nos agroecossistemas.

4. Estudo de Caso

4.1. Resumo Geral

O constante uso de herbicidas demanda de técnicas a fim de diminuir os impactos gerados. Assim, tem sido crescente as pesquisas sobre a efetividade da fitorremediação, técnica que utiliza plantas como agente de descontaminação e é muito utilizada para tratar solos contaminados com poluentes orgânicos e/ou metais pesados. A fim de exemplificar a técnica empregada na abordagem de remoção de *Imazapic* (IMZ) de solos foi realizado um estudo referente ao Caso do capítulo II – Potencial de adubos verdes na fitorremediação de solo contaminado com *Imazapic*, da dissertação intitulada: Fitorremediação de Solo Contaminado com *Imazapic* da autora Simonny Montthiel Araújo Vasconcelo (2017). Este teve como objetivo avaliar o potencial remediador de adubos verdes das espécies *C. ensiformis* (feijão de porco), *M. pruriens* (feijão maluco) e *U. brizantha* (capim marandu) ao herbicida *Imazapic*. Foi utilizada a espécie *Sorghum bicolor* como planta bioindicadora de resíduos do herbicida no solo, a qual foi cultivada em sucessão às espécies remediadoras. Verificou-se que a espécie *C. Ensiformis* é uma espécie promissora na fitorremediação de solos contaminados por *Imazapic*, em condições de solo similares, visto que a fitorremediação é função de vários fatores como, condições climáticas, composição e umidade do solo.

Palavras chaves: Fitorremediação. *Imazapic*. Impactos.

4.2. Metodologia Aplicada

O ensaio foi realizado em estufa climatizada no IF Goiano Campus de Rio Verde,

utilizando as três espécies vegetais tolerantes ao *Imazapic*: *C. ensiformis*, *M. pruriens*, *Urochloa brizantha*, mais um tratamento sem cultivo combinadas com quatro doses de *Imazapic* (0; 87,5; 175 e 350 g ha⁻¹) em esquema fatorial 4x4, com quatro repetições. Em vasos de 6L foram colocados o solo peneirado, coletado na região rural de Rio Verde com composição de: 34% de argila, 2% de silte, 64% de areia, 7,5g dm⁻³ de CO, V de 50%, CTC 3,34 cmolc dm⁻³ e pH (CaCl₂) 5,3, e o herbicida. Depois de 7 dias da aplicação, as espécies foram semeadas e após a emergência foram deixadas apenas três plantas em cada vaso.

Aos 45 e 80 dias após emergência (DAE) os sintomas de fitointoxicação foram avaliados usando parâmetros visuais, e atribuída uma nota de 0 a 100%, em que 0 significava que não havia lesão e 100 a morte da planta. A altura também foi medida com base no meristema apical para as dicotiledôneas e a última folha mais expandida para a *U. Brizantha*. No fim, foi calculado a quantidade de massa seca presente na parte aérea e da raiz da planta, por meio da secagem em estufa e pesagem.

Para determinar e quantificar o *Imazapic* presente no solo e nos extratos vegetais, foram utilizados 5g de solo e 1 g de tecido da planta e colocado 10 mL de acetronitrila, depois a amostra foi homogeneizada e centrifugada, por fim a amostra obtida foi levada para a coluna cromatográfica.

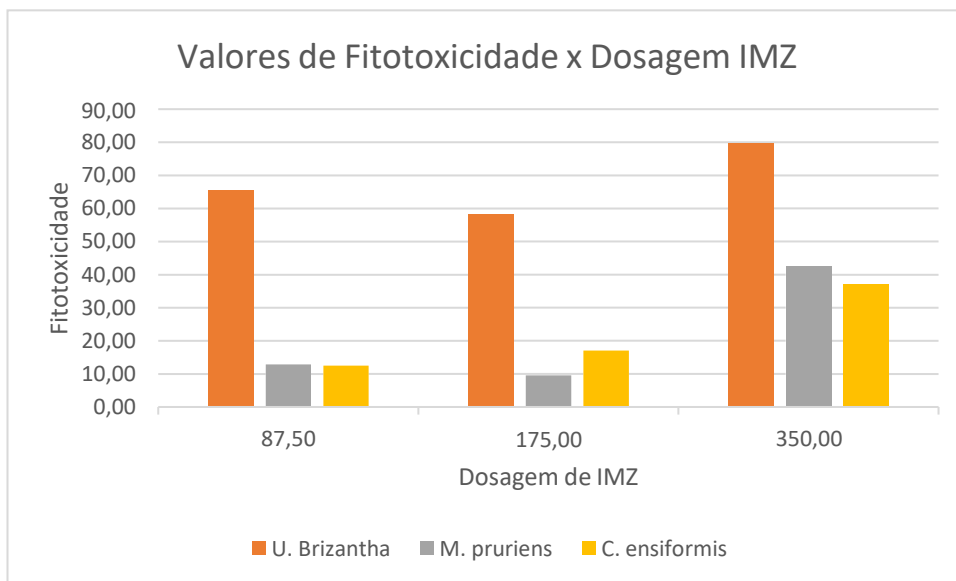
Foram coletados 300 g de solo por vaso para estimar o efeito residual do *Imazapic* no *Sorghum bicolor*. Aos 14 e 28 dias observou a fitotoxicidade e a altura das plantas. Aos 28 dias, determinou a massa seca da planta bioindicadora a partir da parte aérea e da raiz.

4.3. Resultados e discussão

Em relação as plantas biocumuladoras é visto na literatura, que cada espécie possui características específicas para remover, imobilizar ou degradar moléculas orgânicas, e essas características são afetadas pelas propriedades químicas dos componentes e condições ambientais.

Nesse estudo, os resultados mostraram que a espécie *U. brizantha* apresentou maior sensibilidade a presença de *Imazapic*, diferindo das demais espécies a partir da dose de 87,5 g ha⁻¹, tendo valores de fitotoxicidade maiores com o incremento das doses. Para as outras espécies os efeitos visuais foram menos notáveis com a variação das doses, conforme pode ser visto na Figura 5.

Figura 5- Valores de fitotoxicidade(%) das espécies *U. brizantha*, *M. pruriens* e *C. ensiformis* cultivadas em solo com diferentes doses de *Imazapic* (IMZ), aos 45 dias de tratamento.



Fonte: A autora (2022)

As concentrações de *Imazapic* presente no solo e massa seca são apresentadas na Tabela 3 a seguir. Nela, nota-se que não houve influência significativa das espécies e das doses sobre a concentração de *Imazapic* na parte aérea, nas raízes e solo aos 80 dias.

Tabela 3- Resíduo de *Imazapic* nos tecidos de raízes, parte aérea e no solo com e sem cultivo aos 80 dias de tratamento.

Tratamentos	Concentração de <i>Imazapic</i> (mg g ⁻¹)			Total
	Solo ^{NS}	Raiz *	Parte aérea *	
<i>Urochloa Brizantha</i>	0,0002 a	0,0028 b	0,0075 ab	0,0105
<i>Mucuna pruriens</i>	0,0001 a	0,0064 b	0,0021 b	0,0086
<i>Canavalia ensiformes</i>	0,0015 a	0,0381 a	0,0101 a	0,0497
Sem cultivo	0,0002 a	-----	-----	0,0002

Fonte: VASCONCELO (2017)

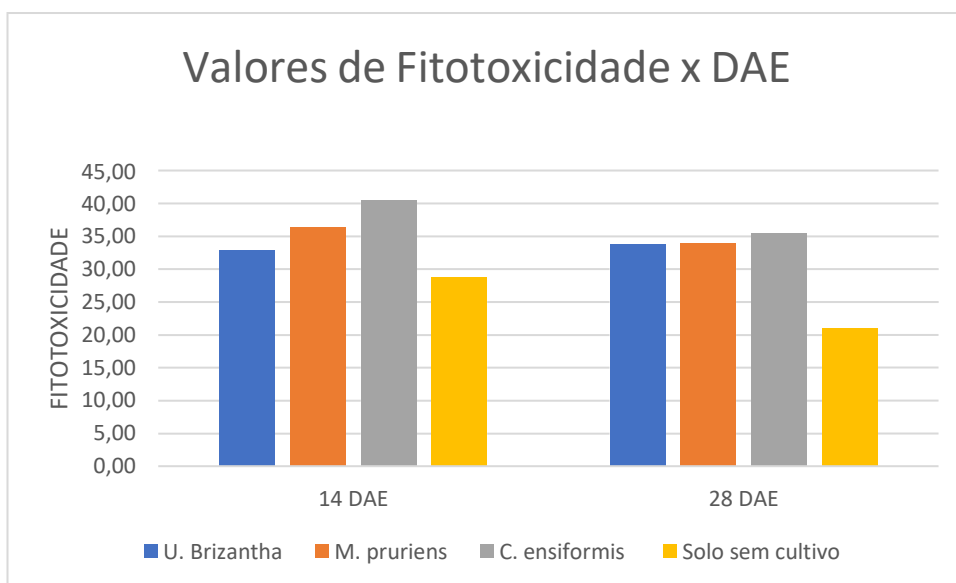
*Médias seguidas das mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. NS: Não significativo

As espécies *M. pruriens* e *C. ensiformis* acumularam maiores concentrações de *Imazapic* nas raízes, porém com diferenças. Na parte aérea, a maior concentração do herbicida foi verificada em *C. Ensiformis*. Contudo, a espécie *U. brizantha* foi a única que translocou para a parte aérea com níveis superiores ao detectado nas raízes, o que indica a ocorrência de

uma maior atividade herbicida. No solo, houve o aumento da concentração de *Imazapic* com o incremento da dose, mas sendo de baixo valor, não passando de $0,0015 \text{ mg g}^{-1}$, se comparado a concentração nas raízes e parte aéreas, que apresentaram valores de até $0,0381$ e $0,0101 \text{ mg g}^{-1}$, respectivamente.

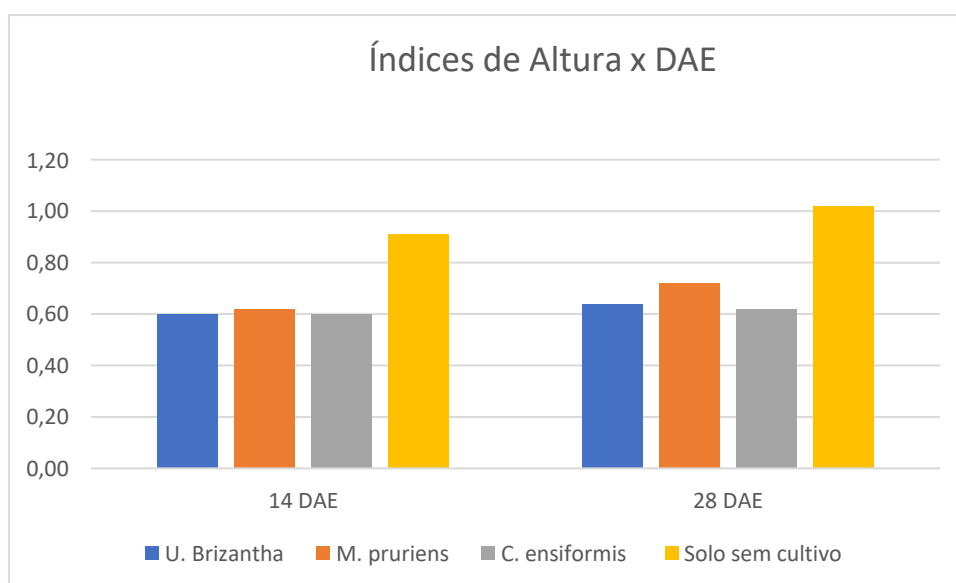
Nas Figuras 6 e 7, são apresentados os parâmetros avaliados nas plantas bioindicadoras aos 14 e 28 dias.

Figura 6- Valores de fitotoxicidade (%) do *Sorghum bicolor* em solo anteriormente plantado e sem cultivo aos 14 e 28 DAE.



Fonte: A autora (2022)

Figura 7- Índice de alturas das espécies *U. brizantha*, *M. pruriens* e *C. ensiformis* aos 14 e 28 DAE.



Fonte: A autora (2022)

De acordo com os resultados apresentados observa-se que, os efeitos de fitotoxicidade

não apresentou diferença significativa entre os tipos de espécies aos 28 DAE. No entanto, nota-se que o solo sem cultivo promoveu maior altura nas plantas bioindicadoras, diferindo dos solos cultivados em que basicamente não houve diferença entre as espécies. Essa altura maior da planta bioindicadora, pode ser relacionada ao efeito alelopático das outras espécies, isto é, o impacto negativo que as plantas, aqui utilizadas como remediadoras, causam sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas, no caso o *Sorghum*, através da liberação de substâncias químicas no ambiente.

Na literatura, estudos demonstram a capacidade de tolerância e adaptação em diferentes condições de estresses abióticos das espécies *Canavalia ensiformis* e *Mucuna pruriens*, além da capacidade de imobilizar, acumular metais pesados e degradar compostos orgânicos. No estudo de caso, os resultados obtidos para a leguminosa *Urochloa brizantha* não apresentou resultados satisfatórios para fitorremediação do *Imazapic*, contudo a espécie é bastante conhecida pelo seu potencial remediador devido sua alta densidade radicular e por atuar como barreira hidráulica, pois promove um fluxo ascendente de água, reduzindo a lixiviação da molécula (VASCONCELO, 2017).

A redução da biomassa da parte aérea e de raiz foi menos notada em *Mucuna pruriens* com o incremento das doses de *Imazapic*. Ainda há pouco conhecimento sobre sua tolerância aos compostos orgânicos, no entanto, a sua utilização para remediação com metais pesados já é conhecida.

Vale salientar, que se é conhecido a tolerância de *C. ensiformis* a diversas condições de estresse biótico, essa tolerância é devido as associações simbióticas que são formadas com bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos arbusculares (AMF), que aumentam sua capacidade para tolerar deficiências nutricionais, hídricas, bem como a fitotoxicidade de metais pesados e poluentes orgânicos (VASCONCELO, 2017).

Por meio dos resultados apresentados pode-se verificar, que a resposta de ação da remoção do contaminante de acordo com cada espécie é função da sua capacidade bioacumuladora. Os resultados obtidos mostraram que a *C. Ensiformis* foi a espécie que melhor removeu o *Imazapic*, fitoextraíndo concentrações maiores do que as demais. Essa remoção se dá por meio das raízes que absorvem o herbicida e que depois é translocado pelo xilema e floema para as folhas e caules (VASCONCELO *et al.*, 2020).

A *C. Ensiformis* tem o seu potencial reconhecido, sendo utilizado para fitorremediação de metais pesados, *glifosato*, entre outros e demonstra ser eficaz para o *Imazapic*. A espécie é

bastante utilizada devido sua alta capacidade de absorção e de acumulação interna, baixo custo, crescimento rápido e capacidade de mesmo em ambientes com alta concentração de poluente, fitoextrair e se desenvolver mutuamente (LEAL *et al.*, 2013). O potencial de descontaminação dos solos por *Imazapic* pode ser aumentado através do uso de outras espécies e/ou de associações de uma sequência de espécies até a máxima capacidade de remoção final.

4.4. Conclusão

Observa-se pelos resultados apresentados no Estudo de Caso avaliado que a fitorremediação é função de vários fatores como, condições climáticas, composição e umidade do solo. Nesse estudo, sugere-se que em condições de solo similares a espécie *C. ensiformis* é uma espécie promissora na remediação do herbicida *Imazapic*, pois em comparação com as outras espécies cultivadas, apresentou maior tolerância e índice de massa seca quando expostas as doses de *Imazapic* avaliadas.

5. Conclusão Geral

Apesar do setor agrícola ser um dos mais relevantes economicamente no Brasil, está também entre as principais atividades causadoras de impactos ambientais no país, devido ao uso exacerbado de agrotóxicos, provocando a contaminação dos solos e das águas. O uso em grande quantidade do herbicida *Imazapic*, classificado como altamente móvel e persistente, além de possuir alto poder de lixiviação, o tornando perigoso ao meio ambiente, faz com que seja cada vez mais urgente a busca por métodos para identificar a presença desse poluente no meio ambiente e de estudos sobre a análise de risco toxicológico que ele apresenta.

Nexte contexto, é de extrema importância a procura por formas de remediação e de pesquisas que associem diferentes métodos de tratamento. Também sugere-se que a aplicação de processos oxidativos avançados são tratamentos em potencial já que o *Imazapic* é um composto facilmente foto-degradado.

6. Referências

ALCANTARA, F. **O que é e como fazer adubação verde**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2016. 1 folder. (Saber e fazer agroecologia, 5).

ALVES, Adriano Gama; MARIA, Denise; FORMAGGIA, Elisabeth. Padrão de potabilidade : Contexto histórico das portarias de potabilidade , dúvidas , indagações , considerações e preocupações da nova Portaria GM / MS n ° 888 / 21. [S. l.], p. 1–25, 2021.

ALVES, Obede Rodrigues *et al.* BIOTECNOLOGIAS DE REMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS COM AGROQUÍMICOS. **AGRARIAN ACADEMY, Centro Científico Conhecer**, [S.l.],v.5, n.June, p.1–11, 2016. Disponível em:<https://doi.org/10.18677/Agrarian>

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DEFESA VEGETAL (ANDEF). **Tecnologia em primeiro lugar: o Brasil a caminho de se tornar o maior produtor mundial de grãos**. Revista Defesa Vegetal, Maio de 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Índice Monográfico. Imazapic. [S. l.], n. 1, p. 5, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Publicada reclassificação toxicológica de agrotóxicos**. [s. l.], 2019. Disponível em: http://antigo.anvisa.gov.br/resultado-de-busca?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&p_p_col_id=column1&p_p_col_count=1&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=5578706&_101_type=content&_101_groupId=2. Acesso em: 17 jul. 2022.

ASSIS, Fernando Xavier de. **Transporte e sorção do imazapic em solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2016. 75 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. Disponível em: <<http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/7719>>

BADISCHE ANILIN & SODA FABRIK (BASF/AS). Ficha de Segurança. São Paulo – SP, BRASIL, p. 1-9. 2009.

BADISCHE ANILIN & SODA FABRIK (BASF/AS). **PLATEAU - BASF**. [s. l.], 2006. Disponível em: https://www.adapar.pr.gov.br/sites/adapar/arquivos_restritos/files/documento/2021-01/plateau.pdf.

BERNARDI, Ana Carolina Alves; RAFAELA, Hermes ;; BOFF, Vilmar Antônio.

MANEJO E DESTINO DAS EMBALAGENS DE AGROTÓXICOS. **Erechim PERSPECTIVA**, [S. l.], v. 42, n. 159, p. 15–28, 2018. Disponível em:https://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/159_719.pdf

BIANCO, Leonardo. **Propriedades físico-químicas dos Herbicidas**. 2017. Apresentação do Power Point. Disponível em:

<https://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidade/leonardobiancodecarvalho/disciplinas5307/matologia/aula29-30.05.2017.pdf>. Acesso em 10 de julho de 2022.

BRASIL. **LEI Nº 7.802 DE 11 DE JULHO DE 1989**. DISPÕE SOBRE A PESQUISA, A EXPERIMENTAÇÃO, A PRODUÇÃO, A EMBALAGEM E ROTULAGEM, O TRANSPORTE, O ARMAZENAMENTO, A COMERCIALIZAÇÃO, A PROPAGANDA COMERCIAL, A UTILIZAÇÃO, A IMPORTAÇÃO, A EXPORTAÇÃO, O DESTINO FINAL DOS RESÍDUOS E EMBALAGENS, O REGISTRO, A CLASSIFICAÇÃO, O CONTROLE, A INSPEÇÃO E A FISCALIZAÇÃO, DE AGROTÓXICOS, SEUS COMPONENTES, E AFINS, E DÁ OUTRAS PROVIDÊNCIAS. Brasília: Presidência da República, 1989. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/17802.htm

BRASIL. **DECRETO Nº 4.074 DE 04 DE JANEIRO DE 2002**. REGULAMENTA ALEI Nº 7.802, DE 11 DE JULHO DE 1989, QUE DISPÕE SOBRE A PESQUISA, A EXPERIMENTAÇÃO, A PRODUÇÃO, A EMBALAGEM E ROTULAGEM, O TRANSPORTE, O ARMAZENAMENTO, A COMERCIALIZAÇÃO, A PROPAGANDA COMERCIAL, A UTILIZAÇÃO, A IMPORTAÇÃO, A EXPORTAÇÃO, O DESTINO FINAL DOS RESÍDUOS E EMBALAGENS, O REGISTRO, A CLASSIFICAÇÃO, O CONTROLE, A INSPEÇÃO E A FISCALIZAÇÃO DE AGROTÓXICOS, SEUS COMPONENTES E AFINS, E DÁ OUTRAS PROVIDÊNCIAS. Brasília: Presidência da República, 2002.

Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4074.htm BRASIL.

PORTARIA Nº 2.914 - Vig da AGUA e PADRÃO DE POTABILIDADE. **Diário Oficial da União**, [S. l.], p. 10, 2011.

CALISTO, Josiane de Souza. Adsorção dos herbicidas 2,4-diclorofenoxiacetato de sódio (2,4 - D) e 6-cloro, 4-N-etila-2-N-propan-2-ila-1-1,3,5-triazina- 2,4-diamina de sódio (atrazina) em Hidróxidos Duplos Lamelares [Co-Al-Cl. [S. l.], 2020.

CARNEIRO, Fernando Ferreira (Org.) Dossiê ABRASCO: um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde / Organização de Fernando Ferreira Carneiro, Lia Giraldo da Silva Augusto, Raquel Maria Rigotto, Karen Friedrich e André Campos Búrgio. - Rio de Janeiro: EPSJV; São Paulo: Expressão Popular, 2015.

CARVALHO, Leonardo Bianco de. **Herbicidas**. Lages, SC, 2013, 62 p.

CHRISTOFFOLETI, Pedro Jacob *et al.* Comportamento dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar. [S. l.], p. 90, 2008.

CORREIA, Núbia Maria. Comportamento dos herbicidas no ambiente / Núbia Maria Correia - Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2018. 30 p. : il. color. ; 21 cm x 27 cm. (Documentos / Embrapa Hortaliças, ISSN 1415-2312 ; 160).

DA SILVA, RITA DE CÁSSIA FERREIRA. **AVALIAÇÃO DE DIFERENTES COBERTURAS MORTA NA PRODUÇÃO DE BETERRABA (BETA VULGARIS L.)**. 2015. [s. l.], 2015.

DELLAMATRICE, P. M.; MONTEIRO, R. T. R; Principais aspectos da poluição de rios

brasileiros por pesticidas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 18, n. 12, p. 1296–1301, 2014.

EMBRAPA. **Principais herbicidas indicados para cultura de milho no sistema plantio direto e no preparo convencional do solo**. [s. l.], 2006. Disponível em: [http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do61_13.htm#:~:text=Callisto é herbicidaseletivo%2C de,e no sistema plantio direto](http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do61_13.htm#:~:text=Callisto%20%C3%A9%20herbicida%20seletivo%20de,e%20no%20sistema%20plantio%20direto).

ERASMO, E. A. L.; AZEVEDO, W. R.; GARCIA, E. POTENCIAL DE ESPÉCIES UTILIZADAS COMO ADUBO VERDE NO MANEJO INTEGRADO DE PLANTAS DANINHAS Potential of Species Used as Green Manure in the Integrated Weed Management. **Planta Daninha**, [S. l.], v. 22, n. 39, p. 337–342, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/0D/pd/v22n3/22357.pdf>

FIGUEREDO, NATÁLIA ARAGÃO DE; **LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES E CONTAMINANTES E SORÇÃO DE CÁDMIO E CHUMBO POR BIOCÁRVÕES DERIVADOS DE FONTES DISTINTAS**. 2015. [s. l.], 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/269107473_What_is_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0Ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/Civilwars_12December2010.pdf%0Ahttps://thinkasia.org/handle/11540/8282%0Ahttps://www.jstor.org/stable/41857625

GASPAROTTO, L.; PEREIRA, J. C. R. Manuseio de defensivos agrícolas. **Embrapa Amazônia Ocidental-Documentos (INFOTECA-E)**, [S. l.], 2000.

GEBLER, L. e SPADOTTO, C.A. Comportamento ambiental dos herbicidas. In: VARGAS, L. **Manual de manejo e controle de plantas daninhas**. Embrapa Uva e Vinho, p. 40-68, 2008.

GIRALDELI, Ana Ligia. **Competição entre plantas daninhas e plantas cultivadas**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://maissoja.com.br/competicao-entre-plantas-daninhas-e-plantas-cultivadas/>.

IBAMA. **Relatório de Comercialização de Agrotóxicos**. [s. l.], 2021. Disponível em: http://ibama.gov.br/phocadownload/qualidadeambiental/relatorios/2022/2022-08-05_Producao_importacao_exportacao_vendas_2020.xls. Acesso em: 10 jul. 2022.

INPEV. **Sistema Campo Letimpo em Números**. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.inpev.org.br/sistema-campo-limpo/em-numeros/>.

INTERNATIONAL SUSTAINABILITY ET CARBON CERTIFICATION (ISCC). **General notes on chemicals**. [s. l.], 2013. Disponível em: <https://www.iscc-system.org/smallholder-academy/snvwur-better-management-trainingprogramme/module-2>.

ISMAEL, Daniele Aparecida Monteiro. **EFICIÊNCIA DO BIOCÁRVÃO NA SORÇÃO DO HERBICIDA IMAZAPIC EM UM ARGISSOLO AMARELO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR**. 2019. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, [s. l.], 2019.

International Union of Pure Applied Chemistry. Imazapic. Disponível em: 44<

<http://sitem.herts.ac.uk/aeru/iupac/Reports/1152.htm>>. Acesso em 15 de julho de 2022. Kerle EA, Jenkins JJ, Vogue PA. 2007. Understanding pesticide persistence and mobility for groundwater and surface water protection. Oregon State Univ Extension Service, EM8561- E.

LEAL, Emylly Figueredo *et al.* Fitoremediação de chumbo pelas espécies Vetiver (*Vetiveria zizanioides* L), Feijão de porco (*Canavalia ensiformis* L .), e Singônio (*Syngonium*) **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, [S. l.], n. 1, p. 1–4, 2013.

LIMA, Cesar Gustavo da Rocha *et al.* Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 31, n. 6, p. 1233–1244, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832007000600002>

LYRA MENDONÇA, Zabele Laís. **EFICÁCIA DO BIOCÁRVÃO NO CONTROLE DA LIXIVIAÇÃO DO IMAZAPIC NO SOLO**. 2019. - UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO, [s. l.], 2019.

MAPA. MAPA - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. [S. l.: s. n.]. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2022/01/18/apos-novo-recorde-brasil-encerra-2021-com-562-agrotoxicos-liberados-sendo-33-ineditos.ghtml>

MAPA, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Manual de procedimentos para o registro de agrotóxicos**. [S. l.: s. n.]. 2019. Disponível em: http://portal.anvisa.gov.br/documents/33880/4967127/Biblioteca+de+Agrotóxicos_Portal.pdf.

MARCHI, Giuliano; MARCHI, Edilene Carvalho Santos; GUIMARÃES, Tadeu Graciolli. Herbicidas: mecanismos de ação e uso. **Documentos**, [S. l.], p. 36, 2008.

MARINHO, MARIA INÊS DA COSTA. **QUANTIFICAÇÃO DA SORÇÃO, DESSORÇÃO, MEIA-VIDA E POTENCIAL DE LIXIVIAÇÃO DOS HERBICIDAS IMAZETHAPYR E IMAZAPIC EM SOLOS**. 2015. - Universidade Federal de Viçosa, [s. l.], 2015.

NACHILUK, K. **Alta na Produção e Exportações de Açúcar Marcam a Safra 2020/21 de Cana**.

[s. l.], 2021. Disponível em: <http://www.iewa.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=15925>. Acesso em: 22 jul. 2022. FARIAS NETO, A. L. de; NASCIMENTO, A. F. do; ROSSONI, A. L.; MAGALHÃES, C. A. de S.; ITUASSU, D. R.; HOOGERHEIDE, E. S. S.; IKEDA, F. S.; FERNANDES JUNIOR, F.; FARIA, G. R.; ISERNHAGEN, I.; VENDRUSCULO, L. G.; MORALES, M. M.; CARNEVALLI, R. A. (ed.). **Embrapa Agrossilvipastoril: primeiras contribuições para o desenvolvimento de uma agropecuária sustentável**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 823 p.

OLIVEIRA JR, R.S. ; TORMENA, Cássio Antonio. Dinâmica de herbicidas no solo e controle de plantas daninhas. **Apostila do Simpósio sobre dinâmica de defensivos agrícolas no solo: aspectos práticos e ambientais**. Piracicaba, SP: ESALQ USP, [S. l.], 2002.

OLIVEIRA, Maurílio Fernandes De; BRIGHENTI, Alexandre Magno; **Comportamento dos Herbicidas no Ambiente**. [S. l.: s. n.]. E-book. 2011.

PELAEZ, Victor; TERRA, Fábio Henrique Bittes; SILVA, Letícia Rodrigues da. A regulamentação dos agrotóxicos no Brasil: entre o poder de mercado e a defesa da saúde e do meio ambiente Agrochemical regulation in Brazil: market power vs. health and environment defense. **Revista de Economia**, [S. l.], v. 36, n. ano 34, p. 27–48, 2010. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/economia/article/view/20523/13714>

PERES, Frederico;; MOREIRA, Josino Costa; **É veneno ou é remédio? agrotóxicos, saúde e ambiente**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2005. v. 21E-book.

REIS, Fabrícia Cristina dos. **COMPORTAMENTO DE HERBICIDAS NO AMBIENTE**. USP. 2017. Apresentação do Power Point. Disponível em: [http://www.lpv.esalq.usp.br/sites/default/files/Comportamento%20Ambiental%20%20Herbicidas%20-%20Disciplina\(1\).pdf](http://www.lpv.esalq.usp.br/sites/default/files/Comportamento%20Ambiental%20%20Herbicidas%20-%20Disciplina(1).pdf). Acesso em 09 de jul. 2022.

ROMAN, Erivelton Scherer *et al.* Como Funcionam Os Herbicidas: da biologia à aplicação. **Gráfica Editora Berthier**, [S. l.], p. 1–152, 2005.

ROMEIRO, Solange *et al.* Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de Canavalia ensiformes L. **Bragantia**, [S. l.], v. 66, n. 2, p. 327–334, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0006-87052007000200017>

SALATI, Paula. **Após novo recorde, Brasil encerra 2021 com 562 agrotóxicos liberados, sendo 33 inéditos**. [s. l.], 2022.

SANTOS, Katia; SILVA, Edson Antônio; BARICCATTI, Reinaldo Aparecido. Remoção do herbicida Bentazon de soluções aquosas utilizando adsorventes. **Engevista**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 242–247, 2013.

SARTORI, Valdirene Camatti. ADUBAÇÃO VERDE E COMPOSTAGEM - Estratégias de Manejo do Solo para Conservação das Águas. **CARTILHA PARA AGRICULTORES**, [S. l.], p. 17, 2011.

SCHWARZENBACH, RENE P. GSCHWEND, Philip M.; IMBODEN, Dieter M. **ENVIRONMENTAL ORGANIC CHEMISTRY**. [S. l.: s. n.]. E-book. 1993.

SILVA, D. R. O.; AVILA, L. A.; AGOSTINETTO, D.; BUNDT, A.D.C.; PRIMEL, E.G.; CALDAS, S. S. OCORRÊNCIA DE AGROTÓXICOS EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE ÁREAS ADJACENTES A LAVOURAS DE ARROZ IRRIGADO. *Química Nova (Online)*, v. 34, p. 748-752, 2011.

SILVA, F. X. da. Interação físico-química do herbicida Imazapic em solos cultivados com Cana-de-Açúcar na Mata Norte de Pernambuco. **Dissertação (Programa de Pós- Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco.**, [S. l.], p. 92, 2016.

SOUSA, GUSTAVO DORNELES DE; JAKELAITIS, Adriano; *et al.* FITOTECNOLOGIA APLICADA EM SOLOS CONTAMINADOS COM O HERBICIDA IMAZAPIC. [S. l.], p. 26–28, 2017.

SOUTO, K. M. *et al.* Biodegradação dos herbicidas imazetapir e imazapique em solo rizosférico de seis espécies vegetais. **Ciencia Rural**, [S. l.], v. 43, n. 10, p. 1790–1796, 2013.

Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013001000010>

SOUZA, JÉFERSON LUCIANO NOVACZYK DE. **O USO DE AGROTÓXICOS ENTRE PRODUTORES DE HORTALIÇAS NA LOCALIDADE RURAL DO PASSO DO VIGÁRIO, VIAMÃO/RS.** 2011. - UFRGS, Balneário Pinhal, 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/38168>

SOUZA, Rogério Rodrigues de. **EFEITOS DA ATRAZINA NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MORFOLOGIA DE CASCAS DE OVOS DE Podocnemis expansa (TESTUDINES, PODOCNEMIDIDAE) INCUBADOS ARTIFICIALMENTE.** 2013. [S. l.], 2013.

SOUZA, I. F. Comportamento dos herbicidas no solo. **Informe agropecuario**, [S. l.], v. 8, n. 87, p. 38–44, 1982.

TAVARES, Sílvio Roberto De Lucena. Técnicas de Remediação. **Remediação De Solos E Águas Contaminadas Por Metais Pesados**, [S. l.], p. 61–89, 2013.

TONI, L. R. M.; SANTANA, H.; ZAIA, D. A. M; Adsorção de glyphosate sobre solos e minerais. **Química Nova**, [S. l.], v. 29, n. 4, p. 829–833, 2006.

TRAZZI, Paulo André ;. *et al.* BIOCARVÃO: REALIDADE E POTENCIAL DE USO NO MEIO FLORESTAL. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 875–887, 2018.

Disponível em:

<http://www.fao.org/3/I8739EN/i8739en.pdf%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.adolescence.2017.01.003%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.chilgyouth.2011.10.007%0Ahttps://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23288604.2016.1224023%0Ahttp://pdx.sagepub.com/lookup/doi/10>

UMBUZEIRO, Gisela de Aragão. Guia de potabilidade para substâncias químicas. **Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S. l.], p. 144, 2012.

USEPA. Opp official record health effects division scientific data reviews EPA series 361. [S. l.], 2001.

VASCONCELO, Simony Montthiel Araújo. **Fitorremediação de solo contaminado com imazapic.** 2017. [S. l.], 2017.

VASCONCELO, Simony Montthiel Araújo *et al.* Seleção de espécies tolerantes para a fitorremediação de solo contaminado com imazapic. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 149–158, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5965/223811711922020149>