

Artigos

Prognóstico do potencial da contaminação hídrica superficial e subterrânea dos principais agrotóxicos comercializados no Estado de Goiás

Prognosis of the potential for surface and underground water contamination of the main pesticides sold in the Goiás State

Liliana Alves Pereira Queiroz¹; Adilson Correia Goulart¹; Simone Machado Goulart¹; Joao Paulo Victorino Santos¹

¹ Instituto Federal de Goiás (IFG), Camús Itumbiara, GO, Brasil.

✉ lilianaalves1234.com.br@gmail.com, adilson.goulart@ifg.edu.br, simone.goulart@ifg.edu.br, joao.santos1@ifg.edu.br

Palavras-chave:

Agrotóxicos em Goiás;
Contaminação ambiental;
Modelos matemáticos ambientais;
Águas subterrâneas;
Águas superficiais.

Keywords

Pesticides in Goiás;
Environmental contamination;
Environmental mathematical models;
Surface water;
Underground water.

Revisão por pares.
Recebido em: 28/10/2022.
Aprovado em: 26/12/2022.

Resumo

O Estado de Goiás é um importante centro agroindustrial brasileiro, a ocupação do solo é voltada principalmente para o plantio de soja, milho, cana-de-açúcar, feijão, tomate, entre outros. Devido à grande extensão agrícola, Goiás é o segundo maior consumidor de agrotóxico da região Centro-Oeste. Desta forma, esta pesquisa teve como objetivo realizar um prognóstico do potencial de contaminação hídrica dos principais agrotóxicos comercializados no Estado. Para o estudo foram utilizadas as propriedades físico-químicas destas substâncias as quais foram aplicadas aos índices GUS, LEACH, GOSS e Constante de Henry. Para a seleção dos agrotóxicos, priorizou os 30 princípios ativos cuja comercialização média foi superior a 100 toneladas nos últimos 5 anos. Os resultados obtidos apontam que os agrotóxicos comercializados em Goiás apresentam de moderada a alta probabilidade de lixiviação, cerca de 46%; Médio a alto potencial de transporte adsorvidos ao sedimento; Grande parcela, 50%, apresentaram alto potencial de transporte dissolvidos em água; Volatilidade moderada a alta. Além disso, os agrotóxicos comercializados no Estado de Goiás apresentam propensão à contaminação ambiental. Desta forma, é preciso que a aplicação seja coordenada por um profissional capacitado, seguir as orientações de aplicação dos mesmos e investir em práticas agrícolas que diminuam a aplicação de agrotóxicos.

Abstract

The Goiás State is an important Brazilian agro-industrial center, the occupation of the land is mainly focused on the planting of soybeans, corn, sugar cane, beans, tomatoes, among others. Due to the large agricultural extension, Goiás State is the second largest consumer of pesticides in the Midwest region. In this way, this research aimed to carry out a prognosis of the potential for water contamination of the main pesticides sold in the State. For the study, the physicochemical properties of these substances were used, which were applied to the GUS, LEACH, GOSS and Henry's constant indices. For the selection of pesticides, priority was given to 30 active principles whose average sales were over 100 tons in the last 5 years. The results indicate that the pesticides sold in Goiás have a moderate to high probability of leaching, around 46%; Medium to high transport potential adsorbed to the sediment; A large portion, 50%, had a high transport potential dissolved in water; Moderate to high volatility. In addition, pesticides sold in the State of Goiás are prone to environmental contamination. In this way, it is necessary that a trained professional coordinate the application, follow the application guidelines and invest in agricultural practices that reduce the pesticides application.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v37i1.30191>

1. INTRODUÇÃO

Os agrotóxicos são compostos aplicados com o intuito de proteger os ecossistemas rurais e urbanos de espécies consideradas perniciosas a estes sistemas (BRASIL, 2002). São produtos que aumentam a produção agrícola e diminuem consideravelmente o custo de produção. No entanto, são substâncias que agredem o meio ambiente e nocivas à saúde humana mesmo em pequenas doses. Além do termo agrotóxicos, esses produtos são comumente conhecidos como pesticidas, praguicidas, defensivos agrícolas e produtos fitossanitários (TAVARES et al., 2020). O uso intenso de agrotóxicos tem provocado a contaminação

generalizada no ambiente e até mesmo dos seres humanos (ABRASCO, 2015). A poluição ambiental tem sido motivo de grande inquietude para ambientalistas e para a população em geral, sobretudo para o Brasil que, desde 2008, é o maior consumidor de agrotóxicos entre todos os países do mundo (SUN et al., 2018; MEFTAUL et al., 2020).

No momento da aplicação dos agrotóxicos, independente da forma de manejo, o princípio ativo sempre ficará à deriva no ambiente. O solo é o compartimento ambiental onde grande parte do volume dos agrotóxicos se depositam. As moléculas de agrotóxico ao entrarem em contato com a camada superficial deste

compartimento serão degradadas, lixiviadas e/ou carregadas superficialmente (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011). A lixiviação é o processo físico de deslocamento vertical dos agrotóxicos ao longo do perfil do solo (GEBLER; SPADOTTO, 2004). Nesta movimentação, as moléculas de agrotóxicos presentes na camada superficial do solo infiltram pelos seus poros, devido à ação da água proveniente da chuva ou de irrigação, podendo alcançar o lençol freático e contaminar as águas subterrâneas. O escoamento superficial compreende o processo de arraste das moléculas dos agrotóxicos horizontalmente pela superfície do solo, podendo levá-los até as águas superficiais (GEBLER; SPADOTTO, 2004).

Os agrotóxicos ao entrarem em contato com os recursos hídricos poderão contaminar grandes áreas, interferir diretamente no funcionamento dos ecossistemas aquáticos e terrestres, e ainda prejudicar a saúde humana (ABRASCO, 2015). Em razão das diferentes configurações químicas, cada molécula apresenta características próprias. Até mesmo as moléculas idênticas, os chamados isômeros, possuem características distintas e se relacionam com o meio ambiente de forma singular (HALL et al., 2004). Estas características moleculares não se diferem nos princípios ativos utilizados na produção de agrotóxicos. Desta forma, cada tipo de agrotóxico irá interagir de forma diferente com o meio onde serão lançados (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011). As análises laboratoriais e estudos a campo são indispensáveis para o conhecimento da movimentação dos agrotóxicos no ambiente. No entanto, na maioria dos casos, o estudo a campo se torna dispendioso e necessita de parcerias para sua execução. Já as análises em laboratório são caras e demandam o uso de solventes, reagentes específicos e mão de obra qualificada. Assim sendo, os estudos teóricos envolvendo as propriedades físico-químicas dos agrotóxicos e algoritmos se tornam ferramentas importantes e suplementares de modo a otimizar os estudos práticos (LINDAHL; BOCKSTALLER, 2012).

Na literatura científica são encontrados alguns trabalhos que obtiveram bons resultados acerca da predição teórica dos agrotóxicos no ambiente, como, por exemplo, a análise realizada por De Carvalho Marques et al. (2019) que avaliaram contaminação ambiental por agrotóxicos no Estado de Pernambuco. Outro estudo interessante foi a estimativa feita por De Oliveira et al. (2016) em relação a contaminação de águas subterrâneas por agrotóxicos aplicados em lavouras de tomate. Para a avaliação e prognóstico quanto a movimentação e potencial de contaminação de um princípio ativo no ambiente as propriedades físico-químicas essenciais são: Solubilidade em água (S.A); Pressão de vapor; Coeficiente de partição octanol-água (Kow); Constante de adsorção ao carbono orgânico (Koc); Tempo de meia vida no solo (DT50); Tempo de meia vida na água e; Constante de Henry (KH). Os algoritmos mais aplicados para o prognóstico ambiental são Índice de GUS; Índice de LEACH e Método de GOSS (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011; GOULART et al., 2022).

O Estado de Goiás é um importante polo do agronegócio. A ocupação do solo estadual, em grande parte, é designada para o

plantio de diferentes culturas como, a soja, milho, cana-de-açúcar, feijão, tomate, entre outros (CODEVASF, 2021). A região Centro-Oeste se destaca no consumo de agrotóxico: segundo o último relatório do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA – em 2019 foram mais de 500 mil toneladas comercializadas. Dentro desta região o Estado de Goiás ocupa o segundo lugar em consumo de agrotóxico, ficando atrás apenas do Estado do Mato Grosso (IBAMA, 2020). A hidrografia do Estado de Goiás é vasta e muito importante não somente para a região, mas também para o equilíbrio aquático de vários outros Estados brasileiros, como, por exemplo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul; Bahia, Minas Gerais e outros (GOIÁS, 2015, NASCIMENTO, 2017).

Deste modo, esta pesquisa objetivou realizar um levantamento acerca dos principais agrotóxicos comercializados no Estado de Goiás e avaliar o potencial de contaminação hídrica, tanto de águas superficiais quanto águas subterrâneas, de cada princípio ativo empregando os índices GUS e LEACH, o método de GOSS e a Constante de Henry.

2. METODOLOGIA

2.1. Apresentação e caracterização hídrica da área de estudo

O Estado de Goiás, em termos territoriais, corresponde a 4% do território brasileiro. Localiza-se dentro da região Centro-Oeste a qual é composta por outros 2 Estados, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul e ainda o Distrito Federal. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2021) o Estado possui uma extensão de aproximadamente 340 mil Km² e é constituído por 246 cidades (IBGE, 2021). A principal atividade econômica do Estado de Goiás está pautada no agronegócio, sendo que cerca de 46% do solo é utilizado para pastagem e 18% para agricultura das mais diferentes espécies (GOIÁS, 2015; FERREIRA, LINO; 2021).

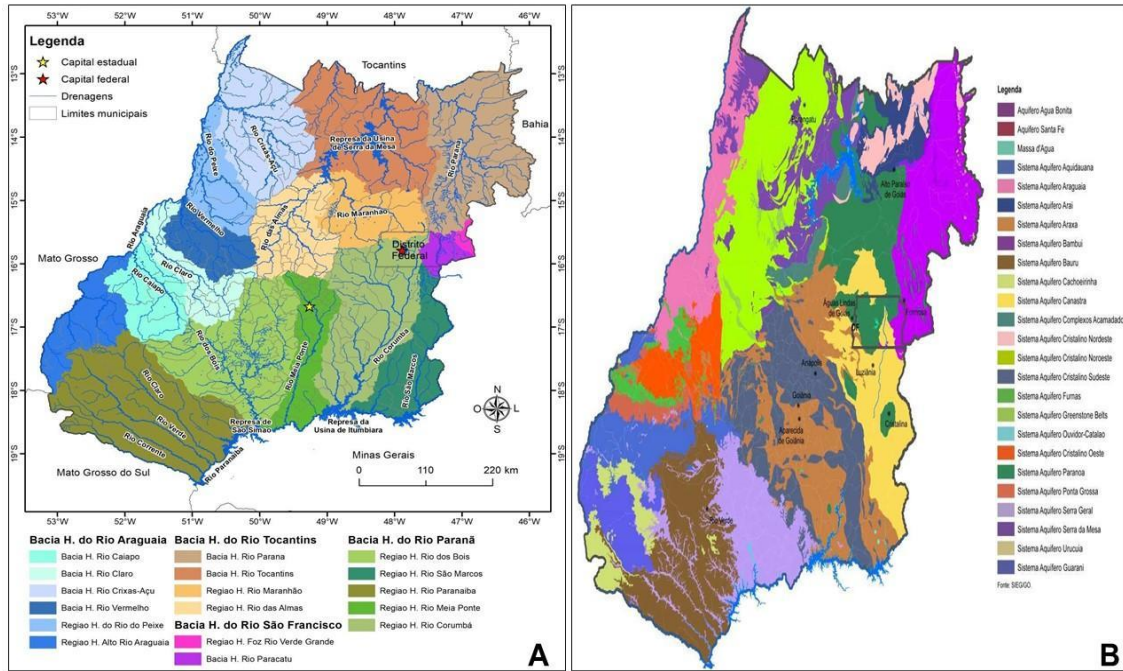
O ecossistema hegemônico no Estado de Goiás é o Cerrado, cobrindo cerca de 70% de todo território estadual; dentro deste bioma as savanas, floresta estacional e campo são dominantes, o que classifica o cerrado como o segundo bioma mais importante e mais diversificado em todo o território nacional (DE MIRANDA et al., 2020; PASQUALETTO et al., 2022). A hidrologia goiana é composta por importantes bacias hidrográficas, as mais sobresalientes são: Bacia Araguaia/Tocantins; Paraná e São Francisco. As águas superficiais são representadas principalmente pelos rios Araguaia, Paranaíba, rio do Peixe, rio Vermelho, rio Paraná entre outros que estão dispostos na Figura 1A (GOIÁS, 2015; NASCIMENTO, 2017; PASQUALETTO et al., 2022).

Além dos corpos d'água apresentados, o Estado de Goiás guarda uma extraordinária quantidade de águas subterrâneas, são vários aquíferos catalogados ao longo de toda a extensão do Estado. Alguns exemplos são o aquífero de Cristalino Sudeste e Noroeste de Goiás, Paranoá, Serra Geral, Canastra, Araguaia e

alguns outros que podem ser vistos na Figura 1B (GOIÁS, 2015). As águas dos aquíferos, ou simplesmente águas subterrâneas, são importantes devido a sua capacidade de reter a água da chuva e posteriormente distribuir estas águas para a superfície para a formação dos rios (COSTA et al., 2022). Segundo Hirata et al. (2019) as águas de origem subterrâneas é o principal

recurso natural utilizado pelos brasileiros. Ainda segundo os autores cerca de 30% do volume de água subterrânea extraída são para uso doméstico, 24% são para utilização na agropecuária, 18% em abastecimento urbano e 14% para múltiplas formas de utilização (HIRATA et al., 2019).

Figura 1 - Sistema hidrográfico do Estado de Goiás. (A) - Apresenta as principais bacias hidrográficas bem como alguns dos rios mais representativos. (B) - Demonstra as reservas subterrâneas dos principais aquíferos catalogados



Fonte: (A) Nascimento (2017); (B) Goiás (2015).

2.2. Levantamento dos agrotóxicos comercializados no Estado de Goiás

O levantamento dos principais agrotóxicos comercializados no Estado de Goiás foi pautado por diagnóstico quantitativo. Nesta etapa o levantamento foi realizado junto ao Ministério da Agricultura (IBAMA, 2020). Nesta página são apresentadas informações consolidadas acerca da quantidade de agrotóxicos comercializados em todo o território nacional. Os relatórios foram separados em vendas por Estados; classe de uso; periculosidade ambiental; dentre outras classificações. Para a seleção dos agrotóxicos foram priorizados os princípios ativos cuja média de comercialização, no Estado de Goiás, excedeu a marca de 100 toneladas nos últimos 5 anos. Nestas condições foram encontrados 30 agrotóxicos os quais foram objetivos de estudo nesta pesquisa.

2.3. Obtenção das propriedades físico-químicas dos agrotóxicos

Para a obtenção das propriedades físico-químicas dos agrotóxicos, foram consultados três websites, sendo eles: O *International Union of Pure and Applied Chemistry/ Footprint pesticides*

properties database – IUPAC (PPDB, 2022). A IUPAC disponibiliza em seu site, várias informações a respeito dos agrotóxicos comercializados no mundo todo, como, por exemplo, as propriedades físico-químicas; *PubChem* que apresenta em sua página a maior coleção do mundo acerca de informações de moléculas químicas (PUBCHEM, 2022) e o site da Agência de Vigilância Sanitária – ANVISA que possui em sua página, todas as monografias dos agrotóxicos autorizados no Brasil (BRASIL, 2022).

2.4. Avaliação do Potencial de contaminação dos agrotóxicos Índice de GUS

Proposto por Gustafson (1989), o índice GUS (Groundwater Ubiquity Score) é uma das ferramentas mais aplicadas na literatura científica. O método utiliza os logaritmos das propriedades, tempo de meia vida no solo (DT50) e coeficiente de adsorção à matéria orgânica (K_{oc}). Na Equação 1 é apresentado o modelo matemático para previsão da lixiviação dos agrotóxicos (GUSTAFSON, 1989; RABELO; CALDAS, 2014).

$$GUS = [\log (DT50)] \cdot [4 - \log (K_{oc})] \quad (1)$$

Para verificação do potencial de lixiviação dos agrotóxicos estudados, as propriedades físico-químicas foram aplicadas no algoritmo e o resultado foi comparado com a faixa classificatória dos valores de referência, onde $GUS < 1,8$ – Baixo potencial; $1,8 \leq GUS \leq 2,8$ – Faixa de Transição; $S \leq 2,8$ – Faixa de Transição e $GUS > 2,8$ – Provável Lixiviação (GUSTAFSON, 1989).

2.5. Índice de LEACH

O método LEACH, elaborado por Laskowski *et al.* (1982), avalia o potencial de contaminação dos agrotóxicos tanto em águas superficiais quanto em águas subterrâneas. O modelo utiliza as seguintes propriedades do composto para calcular o potencial de contaminação: solubilidade em água (S.A), tempo de meia vida no solo (DT50), pressão de vapor (VP) e o coeficiente de adsorção à matéria orgânica (K_{oc}). Na equação 2 é apresentada a equação do índice de LEACH.

$$LEACH = [(SA * DT50) / (VP * K_{oc})] \quad (2)$$

A avaliação da capacidade de contaminação dos agrotóxicos estudados foi realizada por meio do modelo matemático apresentado na Equação 2. Quanto mais alto o valor obtido neste algoritmo, maior o potencial de contaminação do agrotóxico (LASKOWSKI *et al.*, 1982; ARMAS *et al.*, 2005).

2.6. Método de GOSS

Desenvolvido por Goss (1992), este método tem como objetivo avaliar a capacidade dos agrotóxicos em contaminar águas superficiais. O modelo avalia a movimentação do princípio ativo tanto dissolvido em água quanto adsorvido em sedimento. Para a realização do prognóstico, são utilizadas as propriedades tempo de meia-vida no solo (DT50), coeficiente de adsorção à matéria orgânica (K_{oc}) e solubilidade em água (S.A). Para a avaliação, os valores das propriedades dos agrotóxicos são confrontados com um conjunto de regras que seguem apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Regras método GOSS para avaliar o potencial de contaminação de água superficiais

		I Potencial de transporte adsorvido ao sedimento		
		DT50 (dias)	K_{oc} (mL.g ⁻¹)	S.A (mg.L ⁻¹)
APT	Regra 1	≥ 40	≥ 1000	-
	Regra 2	≥ 40	≥ 500	≤ 0,5
BPT	Regra 1	< 1	-	-
	Regra 2	≤ 2	≤ 500	-
	Regra 3	≤ 4	≤ 900	≥ 0,5
	Regra 4	≤ 40	≤ 500	≥ 0,5
	Regra 5	≤ 40	≤ 900	≥ 2
		II Potencial de transporte dissolvido em água		
		DT50 (dias)	K_{oc} (mL.g ⁻¹)	S.A (mg.L ⁻¹)
APT	Regra 1	> 35	< 100000	≥ 1
	Regra 2	< 35	≤ 700	≥ 10 S ≤ 100
BPT	Regra 1	-	≥ 100000	-
	Regra 2	≤ 1	≥ 1000	-
	Regra 3	< 35	-	< 0,5
MPT	Caso não atenda a nenhuma das regras anteriores			

Fonte: Adaptado de Goss, 1992. APT = Alto potencial de transporte; BPT = Baixo potencial de transporte; MPT = Médio potencial de transporte.

2.7. Avaliação da Volatilização dos agrotóxicos

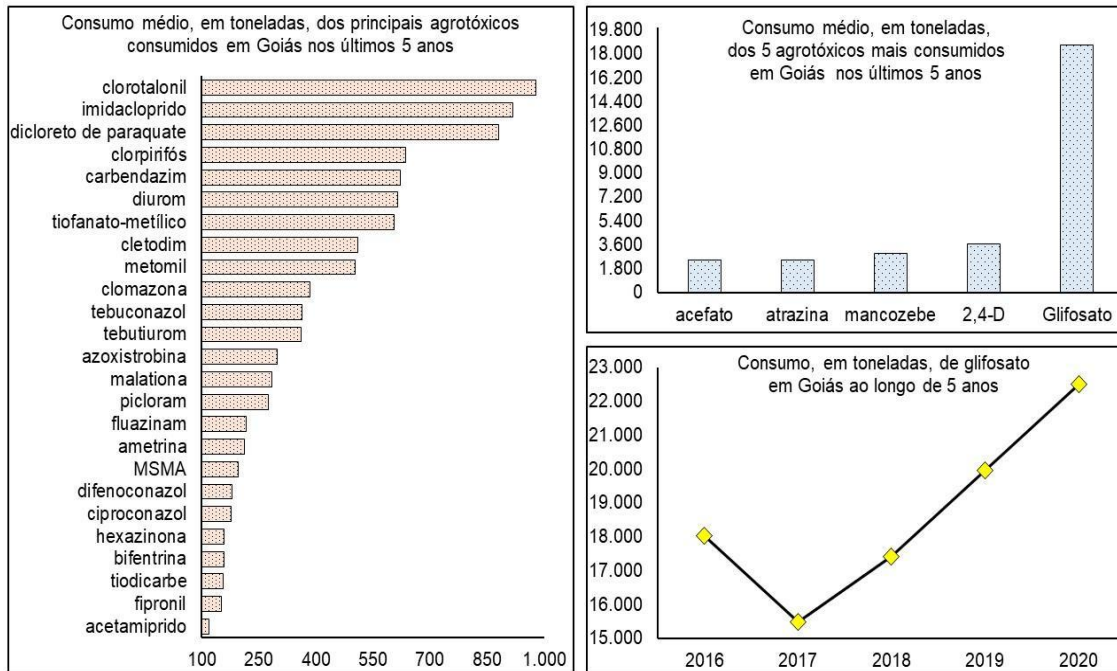
A volatilidade é um parâmetro muito importante a ser analisado em se tratando de contaminação ambiental, isso porque, ela prevê a capacidade que um princípio ativo tem de entrar na atmosfera. Para mensurar a capacidade de volatilização dos agrotóxicos em estudo foram utilizados os valores da constante da lei de Henry (K_H) de cada agrotóxico e em seguida estes valores foram confrontados com a faixa classificatória de volatilização dos agrotóxicos, onde valores de $K_H < 10^{-7}$ são não voláteis; $10^{-7} < K_H < 10^{-5}$ apresentam baixa volatilidade; $10^{-5} < K_H < 10^{-3}$ possuem volatilidade moderada e $K_H > 10^{-3}$ detêm alta volatilidade (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011; LAVORENT *et al.*, 2003).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Consumo de Agrotóxicos em Goiás nos últimos 5 anos

Existem vários tipos de agrotóxicos, muitas variedades de princípios ativos e diferentes formulações utilizados no Estado de Goiás. Desta forma, com o intuito de tornar o estudo mais objetivo, foram selecionados apenas 30 princípios ativos. O critério de seleção adotado foi quantitativo, assim sendo, foram selecionados os agrotóxicos cujo consumo médio anual, nos últimos 5 anos, tenha ultrapassado a quantidade de 100 toneladas. Na Figura 2, são apresentados os agrotóxicos selecionados e a quantidade consumida destes princípios ativos em Goiás nos últimos 5 anos.

Figura 2 - Consumo médio de agrotóxicos no Estado de Goiás nos últimos 5 anos



Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados extraídos de IBAMA (2021).

Como visto na Figura 2, os agrotóxicos mais consumidos entre os anos de 2016 a 2020 foram o acefato, atrazina, mancozebe, 2,4-D e glifosato, todos com valores superiores a 2000 mil toneladas. O agrotóxico glifosato se destaca entre os mais consumidos com uma média superior a 18 mil toneladas consumidas nos últimos 5 anos. Observando o gráfico do consumo de glifosato ao longo do período analisado é possível observar que desde o ano de 2018 essa quantidade vem sendo consumida no Estado de Goiás. Observa-se uma redução do ano de 2016 para o ano de 2017, no entanto verifica-se que no ano de 2020 o consumo ultrapassou um total de 22 mil toneladas, um aumento de aproximadamente 21%.

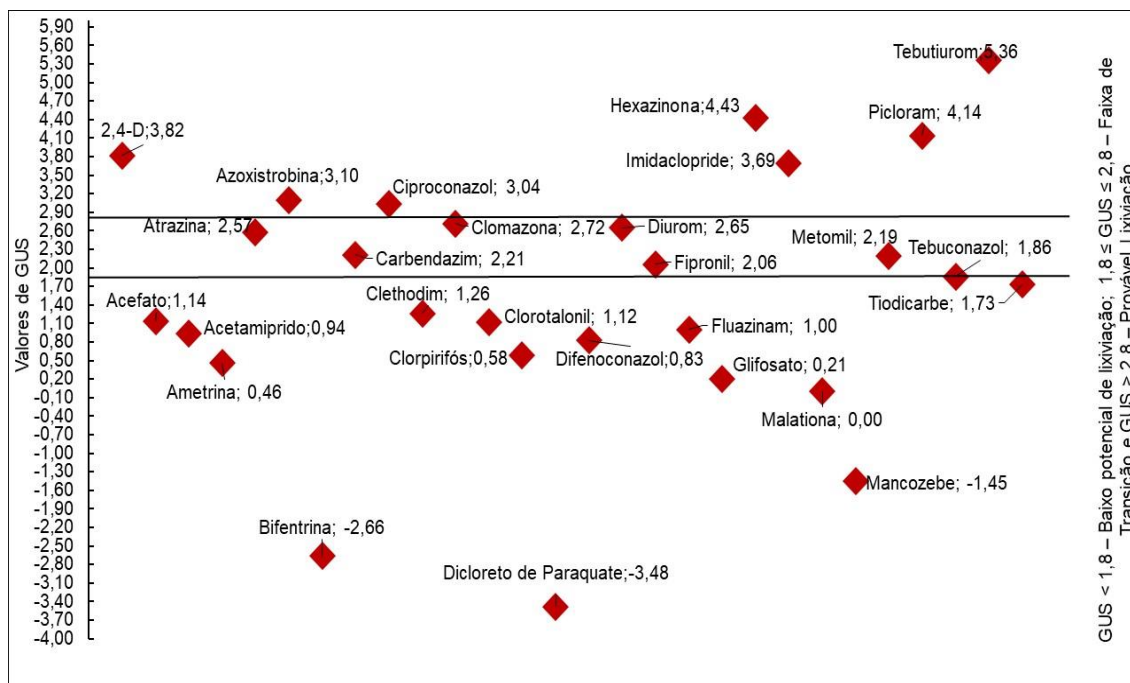
Estudos têm demonstrado o crescimento substancial de agrotóxicos em de Goiás. Um exemplo é a pesquisa realizado por De Campos *et al.* (2021) que analisou por regressão linear o consumo de agrotóxicos, no Estado, em função da área plantada e passar dos anos. Os autores constaram um aumento expressivo, de 76% no consumo de agrotóxicos em Goiás em um período de

9 anos (2009 – 2017). Em consonância com a pesquisa apresentada, Tavares *et al.* (2022) constatou que nas últimas décadas, entre os anos 2000 a 2013, alguns municípios de Goiás tiveram sua área de plantio ampliada aumentando substancialmente o consumo de agrotóxico (DE CAMPOS *et al.*, 2021; TAVARES *et al.*, 2022).

3.2. Potencial de contaminação dos agrotóxicos pelo método GUS

A Figura 3 apresenta os valores de GUS para cada agrotóxico estudado em função da faixa classificatória do respectivo índice. Observa-se que 50% dos agrotóxicos estudados apresentaram baixo potencial de lixiviação, 25% estão na faixa de transição e outra parcela de 25% na de provável lixiviação. Os agrotóxicos com maior probabilidade de serem lixiviados são o tebutiurum, hexazinona, picloram e o 2,4 D. Em contrapartida, os menores índices de lixiviação foram dos princípios ativos dicloreto de paraquate, bifentrina e mancozebe.

Figura 3 - Valores de GUS dos agrotóxicos estudados em função da faixa classificatória do índice de GUS



Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados extraídos de PPDB (2022) e PUBCHEM (2022).

Existe na literatura científica algumas publicações que corroboram com os resultados apresentados na Figura 3. A título de exemplo, destaca-se a pesquisa realizada por Santos *et al.* (2015), neste estudo foi analisada a contaminação de águas subterrâneas por 13 agrotóxicos. As amostras foram coletadas em 32 poços artesanais, localizados dentro da microbacia do córrego Rico, no Estado de São Paulo. Nas amostras foram encontradas concentrações dos agrotóxicos hexazinona, ametrina, diuron e clomazona. Em seus resultados os autores destacam que o princípio ativo clomazona foi o de maior ocorrência estando presente em 60% das amostras analisadas. Em consonância a este estudo, observa-se a pesquisa realizada por Caldas *et al.* (2010). Neste trabalho, os autores analisaram amostras de água subterrâneas provenientes de áreas de cultivo no sul do Brasil. Nas análises foram detectadas concentrações de clomazona e tebuconazol. Os autores ressaltam, em seus resultados, que os dois princípios ativos foram detectados em vários níveis de concentração (CALDAS *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2015).

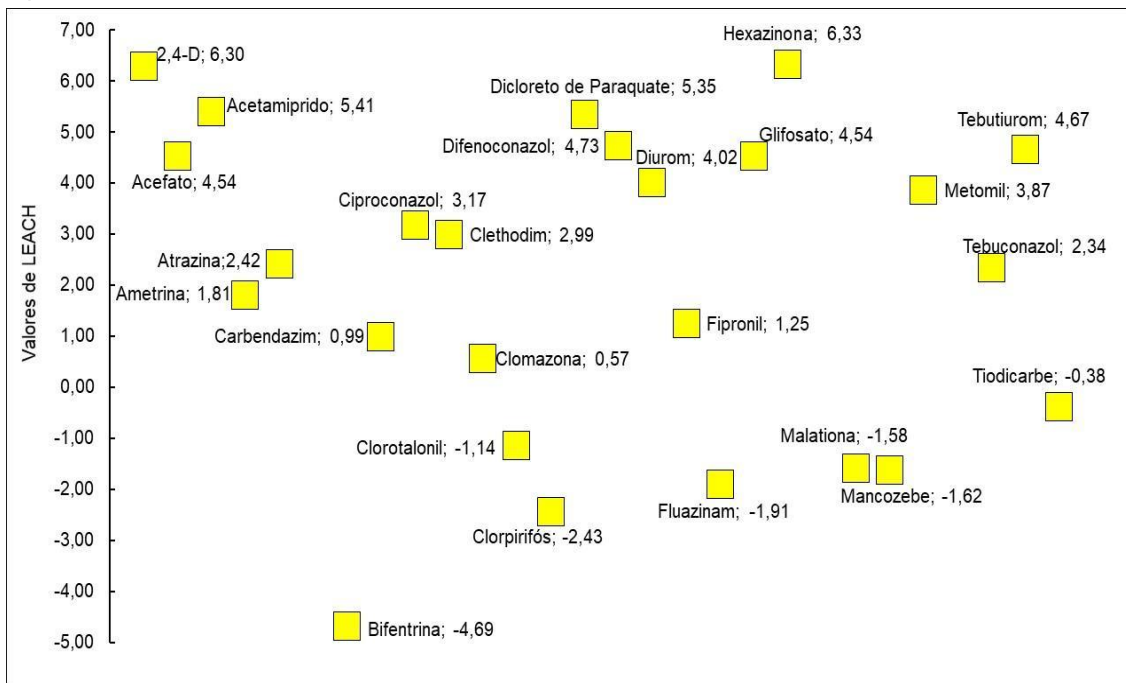
Os estudos citados demonstram o perigo eminente que os agrotóxicos representam as águas subterrâneas. Segundo Srivastav

(2020) a contaminação do solo e conseqüente contaminação do lençol freático é ocasionada principalmente pelo uso exacerbado de agrotóxicos. Ainda segundo o autor as águas subterrâneas são uma das principais fontes de água potável, assim sendo, é indispensável a imediata implantação de sistemas agrícolas sustentáveis com enfoque em práticas que amenizem a utilização de agrotóxicos (SRIVASTAV, 2020).

3.3. Potencial de contaminação dos agrotóxicos pelo índice de LEACH

O modelo matemático LEACH avalia tanto a capacidade de lixiviação quanto a tendência do escoamento superficial do agrotóxico. O índice de LEACH não apresenta uma escala como visto no índice de GUS, neste caso, quanto maior o valor de LEACH mais propenso o agrotóxico está de lixiviar até águas subterrâneas ou escoar superficialmente para águas superficiais. Na Figura 4, são apresentados os valores de LEACH para cada agrotóxico em estudo, os valores foram expressos em escala logarítmica para melhor observação dos resultados.

Figura 4 - Valores de LEACH, em escala logarítmica, dos agrotóxicos estudados



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados extraídos de PPDB (2022) e PUBCHEM (2022).

Como visto no gráfico apresentado na Figura 4, os princípios ativos que apresentaram maior índice de LEACH e, portanto, maior propensão a lixiviar ou escoar superficialmente foram o hexazinona; 2,4 - D; acetamiprido; dicloro de paraquate; difeconazol; tebutiurum, acefato e glifosato. Já os agrotóxicos que apresentaram os menores índices de contaminação foram o bifentrina; clorpirifós; fluazinam; mancozebe; malationa; clorotalonil e tiodicarbe.

Na literatura científica foram encontradas pesquisas que corroboram o resultado obtido pela aplicação do índice de LEACH, isso porque, estudos como de Pinheiro *et al.* (2010) e Marchesan *et al.* (2010) apontaram a presença de 2,4 - D em águas superficiais de rios localizados em Santa Catarina e Rio Grande do Sul respectivamente. A pesquisa realizada por Ribeiro *et al.* (2013) detectou em águas superficiais do Rio São Lourenço em Mato Grosso o princípio ativo acetamipride. Em relação ao glifosato e sua contaminação em águas superficiais foi observado um relevante estudo realizado na China, nesta pesquisa foram analisadas amostras de águas superficiais de 8 diferentes regiões, localizadas próximas a áreas destinadas à agricultura. Foram coletadas 196 amostras de água em 76 pontos de amostragem. O glifosato e seu metabólito ácido aminometilsulfônico (AMPA) foram detectados em mais de 20% das águas superficiais circunvizinhas às lavouras (GENG *et al.*, 2021).

Como visto, independente da região, os agrotóxicos representam um perigo para toda hidrosfera, isso porque, quaisquer que sejam as formas de aplicação são várias as vias de acesso para que estas moléculas alcancem os corpos d'água (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011). Segundo De Souza *et al.* (2020) a contaminação dos ambientes aquáticos, por agrotóxicos, representa um risco generalizado, isso porque a contaminação da fauna aquática pode ocasionar a bioacumulação, podendo chegar ao topo da cadeia alimentar pelo processo de biomagnificação. Como o homem está no topo desta cadeia alimentar, são vários os riscos provenientes desta contaminação generalizada como, por exemplo, desregulação endócrina, problemas imunológicos, excesso de radicais livres e até problemas neurológicos (DE SOUZA *et al.*, 2020).

3.4. Potencial de contaminação dos agrotóxicos pelo Método de GOSS

O método GOSS, por meio de um conjunto de regras, classifica os agrotóxicos em alto, médio e baixo potencial de transporte em sedimento e água. O Quadro 1 apresenta a classificação dos 30 agrotóxicos estudados divididos em suas faixas classificatórias.

Quadro 1 - Avaliação do potencial de contaminação de águas superficiais utilizando as propriedades físico-químicas e método de GOSS

I Potencial de transporte adsorvido ao sedimento	
ALTO potencial de transporte	Agrotóxicos
	Bifentrina; Dicloreto de paraquate; Difenconazol; Fipronil; Tebuconazol.
MÉDIO potencial de transporte	Azoxistrobina; Ciproconazol; Clethodim; Clorotalonil; Clorpirifós; Diurom; Fluazinam; Glifosato; Hexazinona; Imidaclopride; Malationa; MSMA; Tebutiurom, Tiofanato-metílico
BAIXO potencial de transporte	2,4-D; Acefato; Acetamiprido; Ametrina; Atrazina; Carbendazim; Clomazona; Mancozebe; Metomil; Picloram; Tiodicarbe.
II Potencial de transporte dissolvido em água	
ALTO potencial de transporte	Agrotóxicos
	2,4-D; Ametrina; Atrazina; Azoxistrobina; Carbendazim; Ciproconazol; Dicloreto de paraquate; Difenconazol; Diurom; Fipronil; Hexazinona; Imidaclopride; Tebuconazol; Tebutiurom; Tiodicarbe.
MÉDIO potencial de transporte	Acefato; Acetamiprido; Clethodim; Clomazona; Clorotalonil; Clorpirifós; Glifosato; Metomil; Mancozebe; MSMA; Picloram; Tiofanato-metílico.
BAIXO potencial de transporte	Bifentrina; Fluazinam; Malationa.

Fonte: Os autores (2022). Dados extraídos de PPDB (2022) e PUBCHEM (2022).

Analisando o Quadro 1, verifica-se que para o transporte em sedimento, apenas 16% dos princípios ativos apresentaram alto potencial de transporte, a maior parcela 46% estão na faixa de médio potencial e 36% baixo potencial de transporte adsorvidos ao sedimento. Em contrapartida, quando observados os resultados para o transporte em água é visto que metade dos princípios ativos, ou seja 50%, apresentaram alto potencial, 40% médio potencial e uma pequena parcela, apenas 10%, apresentaram baixo potencial de transporte em água.

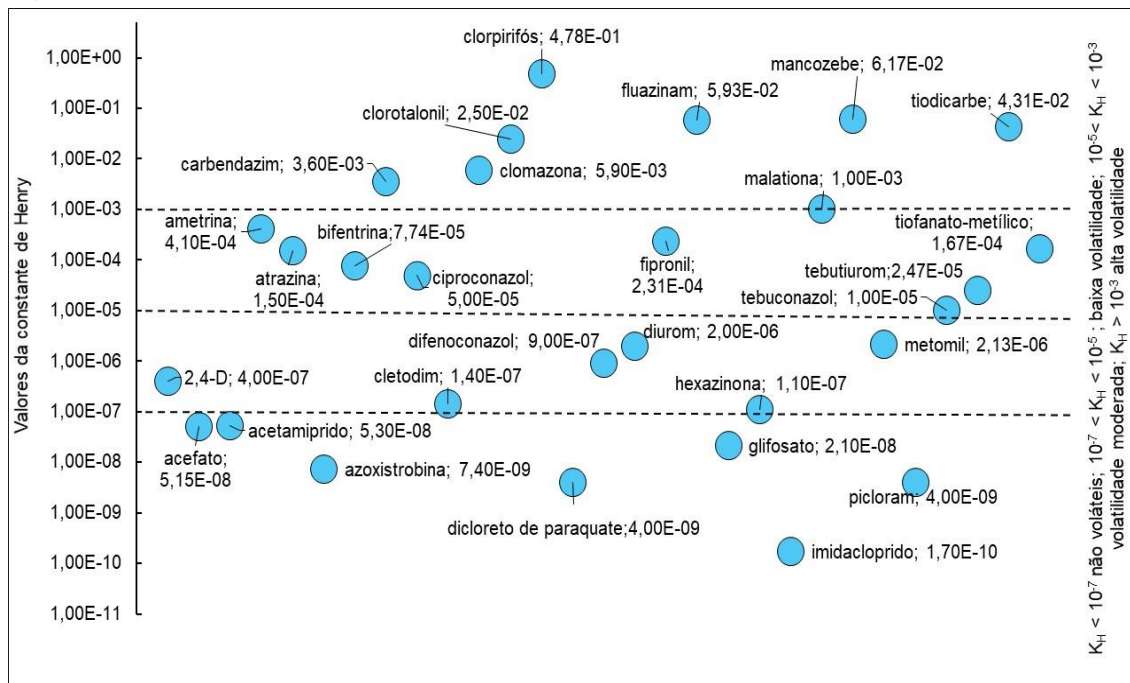
Os resultados encontrados neste estudo vão de encontro com algumas pesquisas encontradas em periódicos científicos, como, por exemplo, o trabalho realizado por Chiarello *et al.* (2017) que analisaram a água superficial e o sedimento da bacia hidrográfica Lajeado Tacongava, no Rio Grande do Sul. Segundo os autores, esta bacia hidrográfica é margeada por diferentes formas de agricultura. O Estudo investigou a presença de 70 princípios ativos, nos dois tipos de amostra, sedimento e água. Entre os princípios ativos detectados o acetamiprido e a azoxistrobina foram verificados nos dois tipos de amostras (CHIARELLHO *et al.*, 2017).

Outro estudo que constata as observações realizadas nesta pesquisa é a investigação promovida por De Albuquerque Junior e Dos Santos Rodrigues (2022), os autores averiguaram a contaminação por diurom em sedimentos do Rio Botafogo em Pernambuco, os resultados das análises apontaram que o diurom estava presente em toda a extensão do corpo hídrico. Os pesquisadores ressaltam que esta constante detecção pode ser devido à alta persistência do princípio ativo e também devido a intensa atividade agrícola da região (DE ALBUQUERQUE JUNIOR; DOS SANTOS RODRIGUES, 2022). Vale ressaltar que os princípios ativos citados nestas pesquisas estão classificados neste estudo como médio e alto potencial de transporte em sedimento e água.

3.5. Avaliação da Volatilização dos agrotóxicos

Na Figura 5 é apresentado o grau de volatilização de cada agrotóxico estudado. Para esta análise foram utilizados os valores da constante de Henry (K_H), de cada princípio ativo, em função da faixa classificatória de volatilização (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011; LAVORENT *et al.*, 2003).

Figura 5 - Classificação da volatilidade dos agrotóxicos em estudo segundo a constante de Henry (K_H)



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados extraídos de PPDB (2022) e PUBCHEM (2022).

É verificado na Figura 5, que apenas 17% dos agrotóxicos estudados apresentaram alta volatilidade. É visto que a maior parcela, cerca de 37%, apresentam volatilidade moderada. Aproximadamente 27% dos princípios ativos em estudo foram classificados como não voláteis e outra parcela de 17% foram avaliados com baixa volatilidade. Nesta análise destaca-se o princípio ativo clorpirifós, o agrotóxico foi o que apresentou maior K_H e consequentemente maior volatilidade. Agrotóxicos com alta ou moderada volatilidade são motivos de preocupação ambiental, isso porque, esta característica facilita a entrada do princípio ativo na atmosfera. Uma vez presente na atmosfera estas moléculas podem ser transportadas por longas distâncias em função da deriva atmosférica. Além disso, os princípios ativos podem ser solubilizados pela umidade atmosférica e precipitar em diferentes regiões (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011; SCHREIBER et al., 2015).

Alguns estudos evidenciam o diagnóstico realizado, como, por exemplo, o trabalho de Yera e Vasconsellos (2021) que analisou o ar atmosférico de 3 localidades no Estado de São Paulo. As coletas dos aerossóis foram realizadas em ambientes urbanos com o propósito de verificar a ocorrência de deriva dos agrotóxicos. Três alturas distintas foram selecionadas para a coleta das amostras 500 metros; 1000 metros e 1500 metros. As análises apontaram a presença de 10 tipos de agrotóxicos, entre eles, foi detectado o princípio ativo atrazina em 100% das amostras (YERA; VASCONSELLOS, 2021). Outro estudo que corrobora com o prognóstico realizado é o de Novais et al. (2021) que demonstram em seus estudos um panorama acerca da contaminação ambiental por agrotóxico no Estado do Mato Grosso. Os

resultados desta pesquisa apontam a detecção de atrazina, clorpirifós e malationa em águas provenientes da chuva, águas superficiais e também em águas subterrâneas (NOVAIS et al., 2021). Os resultados das pesquisas citadas são um indicativo da presença dos agrotóxicos na atmosfera e consequente contaminação generalizada ocasionada possivelmente pela volatilização e deriva atmosférica (DE SOUZA et al., 2020; YERA; VASCONSELLOS, 2021).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo desenvolvido nesta pesquisa possibilitou a realização de um prognóstico acerca do potencial de contaminação dos principais agrotóxicos comercializados no Estado de Goiás. Com a aplicação das propriedades físico-químicas dos agrotóxicos em estudo aos índices GUS e LEACH, método de GOSS e Constante de Henry, foi possível verificar que cerca de 46% dos agrotóxicos apresentaram moderada a alta propensão de lixiviação para águas subterrâneas. A metade dos agrotóxicos em estudo demonstraram alto potencial de transporte dissolvidos em água e 46% apresentaram médio a alto potencial de transporte adsorvido ao sedimento, o que demonstra uma alta probabilidade de contaminar águas de superfície. O estudo realizado demonstra que os agrotóxicos comercializados no Estado de Goiás apresentaram relevante probabilidade de transporte pelos compartimentos ambientais. Assim sendo, é preciso cautela na aplicação dos agrotóxicos, é necessário que esta aplicação seja guiada e acompanhada por um profissional capacitado para esta prática. Além disso, é indispensável investir em práticas agrícolas que minimizem o uso de agrotóxicos.

REFERÊNCIAS

- ABRASCO. Dossiê ABRASCO: um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde. Rio de Janeiro: EPSJV; São Paulo: Expressão Popular, 628 p., 2015.
- ARMAS, E. D. et al. Uso de agrotóxicos em cana-de-açúcar na bacia do rio Corumbataí e o risco de poluição hídrica. *Química Nova*, v. 28, n. 6, p. 975-982, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000600008>
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA. *Monografias de agrotóxicos*. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/setorregulado/regularizacao/agrotoxicos/monografias>. Acesso em: 03 ago. 2022.
- BRASIL. Decreto nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002. Regulamenta a Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989. Casa Civil da Presidência da República, disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4074.htm, acessado em: 20 abr. 2022.
- CALDAS, S. S. et al. Pesticide residue determination in groundwater using solid-phase extraction and high-performance liquid chromatography with diode array detector and liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 21, p. 642-650, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532010000400009>
- CHIARELLO, M. et al. Determinação de agrotóxicos na água e sedimentos por HPLC-HRMS e sua relação com o uso e ocupação do solo. *Química Nova*, v. 40, p. 158-165, 2017. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160180>
- CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. *Caderno de Caracterização Estado de Goiás/ Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba*. - Brasília: Codevasf, 60 p., 2021.
- COSTA, C. W. et al. Combinação de atributos naturais e antrópicos na definição do potencial de contaminação de aquíferos, sudeste do Brasil. *Sociedade & Natureza*, v. 32, p. 603-619, 2022. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-56221>
- DE ALBUQUERQUE JUNIOR, E. C.; DOS SANTOS RODRIGUES, H. O. Ocorrência do herbicida Diurom no sedimento de rios da sub-bacia do Rio Botafogo, litoral norte de Pernambuco. *Revista de Biotecnologia & Ciência*, v. 11, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.31668/rbc.v11i1.12701>
- DE CAMPOS, A. L. et al. O avanço do agrotóxico no Brasil e seus impactos na saúde e no ambiente. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 14, n. 1, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n1e007934>
- DE CARVALHO MARQUES, J. G. et al. Comparação entre índices de potencial de lixiviação para agrotóxicos utilizados na Sub-Bacia do Natuba, Vitória de Santo Antão-Pernambuco. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 1, p. 58-67, 2019. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29239>
- DE MIRANDA, S.C. et al. Relação solo-vegetação em duas áreas de Cerrado sentido restrito na Serra Dourada, Goiás. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 4, p. 21-35, 2020. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.004.0002>
- DE OLIVEIRA, M. C. et al. Índice gus e gsi na avaliação da contaminação em águas subterrâneas por fungicidas na tomaticultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 19., 2017. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28787>. Acesso em: 20 de set. 2022. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.28787>
- DE SOUZA, R. M. et al. Occurrence, impacts and general aspects of pesticides in surface water: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 135, p. 22-37, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.12.035>
- FERREIRA, R. M.; LINO, E.S Expansão agrícola no cerrado: o desenvolvimento do agronegócio no Estado de Goiás entre 2000 a 2019. *Caminhos de Geografia*. Uberlândia, v. 22, p. 1-17, 2021. <https://doi.org/10.14393/RCG227951217>
- GBELER, L.; SPADOTTO, C. A. Comportamento ambiental dos herbicidas. In: VARGAS, L.; ROMAN, E. S. *Manual de manejo e controle de plantas daninhas*. Bento Gonçalves, Embrapa Uva e Vinho, p. 59, 2004.
- GENG, Y. et al. Glyphosate, aminomethylphosphonic acid, and glufosinate ammonium in agricultural groundwater and surface water in China from 2017 to 2018: Occurrence, main drivers, and environmental risk assessment. *Science of The Total Environment*, v. 769, p. 144396, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144396>
- GOIÁS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. *Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Goiás*. 298 p., 2015. Disponível em: https://www.meioambiente.go.gov.br/images/imagens_migradas/upload/arquivos/2016-01/p05_plano_estadual_de_recursos_hidricos_refinal2016.pdf. Acesso em: 19 de set. 2022.
- GOSS, D.W. Screening procedure for soils and pesticides for potential water quality impacts. *Weed Technology, Champaign*, v.6, n.4, p.701-708, 1992. <https://doi.org/10.1017/S0890037X00036083>
- GOULART, A. C. et al. Agrotóxico: Uma revisão sobre suas propriedades físico-químicas de interesse ambiental. In: *Ciências*

- agrárias multidisciplinares* [livro eletrônico]: avanços e aplicações múltiplas: volume 2. Organizadoras Danyelle Andrade Mota... [et al.]. – Rio de Janeiro, RJ: e-Publicar, 2022. <https://doi.org/10.47402/ed.ep.c20222318150>
- GUSTAFSON, D. I. Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Elmsford, v. 8, n. 4, p. 339-357, 1989. <https://doi.org/10.1002/etc.5620080411>
- HALL, N. et al. *Neoquímica: A química moderna e suas aplicações*. Bookman, Porto Alegre, 392p. 2004.
- HIRATA, Ricardo et al. *A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento*. Instituto Trata Brasil, 19 p., 2019.
- IBAMA/MMA. *Relatório de Comercialização de Agrotóxicos*. 2020. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/areas-tematicas-qa/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos/pagina-3>. Acesso em: 15 jul. 2022.
- IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Área territorial brasileira 2020*. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/go.html>. Acesso em: 26 de set. 2022.
- LASKOWSKI, D. A. et al. Terrestrial Environment. In: CONWAY, R. A. (Ed.) *Environmental Risk Analysis for Chemicals*. New York: Krieger Publishing Company, p. 198-240. 1982.
- LAVORENTI, A et al. Comportamento de pesticidas em solos: fundamentos. In: CURTI, N. et al. *Tópicos especiais em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. Vol. 3, p. 335- 400.
- LINDAHAL, A. M. L.; BOCKSTALLER, C. An indicator of pesticide leaching risk to groundwater. *Ecological Indicators*, 23, p. 95-108, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.03.014>
- MARCHESAN, E. et al. Resíduos de agrotóxicos na água de rios da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Ciência Rural*, v. 40, p. 1053-1059, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000078>
- MEFTAUL, I. M. et al. Pesticides in the urban environment: a potential threat that knocks at the door. *Science of the Total Environment*, 2020.
- NASCIMENTO, D. T. F. Caracterização ambiental do Estado de Goiás e Distrito Federal como insumo à gestão dos recursos hídricos. *Revista Sapiência: Sociedade, Saberes e Práticas Educacionais*. v. 6, n. 2, p. 34-50, 2017.
- NOVAIS, C. M. et al. Panorama da contaminação ambiental por agrotóxicos no estado do mato grosso: risco para o abastecimento urbano. *Research, Society and Development*, v.10, n. 1, p. e23010111667-e23010111667, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.11667>
- OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A. M. Comportamento dos herbicidas no ambiente. In: OLIVEIRA J. R.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (Ed.). *Biologia e manejo de plantas daninhas*. Curitiba-PR: Omnipax, p. 263-304, 2011.
- PASQUALETTO, A. et al. Diagnóstico da disponibilidade e demanda de recursos hídricos em Goiás. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 7, p. e25111730084-e25111730084, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i7.30084>
- PINHEIRO, A. et al. Presença de pesticidas em águas superficiais e subterrâneas na bacia do Itajaí, SC. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 7, n. 2, p. 17-26, 2010. <https://doi.org/10.21168/rega.v7n2.p17-26>
- PPDB - PESTICIDE PROPERTIES DATA BASE. *Agricultural substances databases: background and support information*. Disponível em: <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/iupac/atoz.htm>. Acesso em: 07 jun 2022.
- PUBCHEM. *Explore Chemistry*. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>. Acesso em: 03 de ago. 2022.
- RABELO, R.M.; CALDAS, E.D. Avaliação de risco ambiental de ambientes aquáticos afetados pelo uso de agrotóxicos. *Química Nova*, v. 37, n. 7, 1199-1208, 2014.
- RIBEIRO, A. C. A. et al. Resíduos de pesticidas em águas superficiais de área de nascente do rio São Lourenço-MT: Validação de método por extração em fase sólida e cromatografia líquida. *Química Nova*, v. 36, p. 284-290, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000200015>
- SANTOS, E. A. et al. Detecção de herbicidas em água subterrânea na microbacia do Córrego Rico-SP. *Planta Daninha*, v. 33, p. 147-155, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582015000100017>
- SCHREIBER, F. Volatility of different formulations of clomazona herbicide. *Planta Daninha*, v. 33, p. 315-321, 2015. <https://doi.org/10.1590/0100-83582015000200017>
- SRIVASTAV, A. L. et al. Chemical fertilizers and pesticides: role in groundwater contamination. In: *Agrochemicals detection, treatment and remediation*. Butterworth-Heinemann, 2020. p. 143-159. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00006-4>

SUN, S. *et al.* Pesticide pollution in agricultural soils and sustainable remediation methods: a review. *Current Pollution Reports*, p.240-250, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0092-x>

TAVARES, D. C. G. *et al.* Utilização de agrotóxicos no Brasil e sua correlação com intoxicações. *Sistemas & Gestão*, v.15, n.1, p. 2-10, 2020. <https://doi.org/10.20985/1980-5160.2020.v15n1.1532>

TAVARES, G. G. *et al.* Território de plantar, colher e adoecer? Produção agrícola, agrotóxicos e adoecimento em Goiás, Brasil (2000 a 2013). *Sociedade & Natureza*, v. 32, p. 362-372, 2022. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-46823>

YERA, A. M. B.; VASCONCELLOS, P. C. Pesticides in the atmosphere of urban sites with different characteristics. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 156, p. 559-567, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.10.049>