A aplicação manual de atrazina em parcelas experimentais e suas perdas por escoamento superficial de água

DOI: 10.54446/bcg.v12i2.2845

Taís Coutinho Parente[1], *Sonia Claudia do Nascimento Queiroz*[2] *e José Teixeira Filho*[3]

Resumo

Devido ao aumento do consumo de agrotóxicos, a contaminação de águas superficiais por esses produtos tem sido constantemente estudada. O foco desta pesquisa foi avaliar o destino ambiental da atrazina, herbicida muito utilizado em cultivos de cana-de-açúcar e mostrar como a aplicação manual pode influenciar na distribuição da atrazina ao longo de uma área de plantação e também nas suas perdas. Além disso, antes do planejamento experimental, buscou-se entender a relação entre dados empíricos locais e as causas macro para o aumento do uso de produtos químicos na agricultura, contextualizando o uso de atrazina no Brasil e no Estado de São Paulo. Em seguida, o experimento foi realizado em parcelas experimentais, pois estas são preferíveis quando se objetiva a obtenção de dados primários. As análises físico-químicas realizadas em conjunto com análises geoestatísticas mostraram que a forma de aplicação causou um grande desvio padrão na distribuição do produto ao longo da área de cultivo. Em relação à perda do produto, o fator que mais influenciou foi a intensidade da geração de escoamento superficial em cada parcela experimental.

PALAVRAS-CHAVE: agronegócio, cana-de-açúcar, destino ambiental de herbicidas, distribuição de atrazina ao longo da área de cultivo, impactos ambientais.

1 Graduada em química e Engenharia Química pela Universidade Federal do Ceará (UFC), mestre em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e atua como professora na Secretaria de Educação do Estado do Ceará. E-mail: taiscoutinhop@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9472-8187.

2 Graduada, mestre e doutora em química pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), atua como pesquisadora da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) na área de Meio Ambiente. E-mail: sonia.queiroz@embrapa.br. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1725-183X.

3 Graduado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), mestrado em Ciências Hidrológicas pela Université Montpellier 2 e doutorado em Recursos Hídricos pela mesma universidade, atualmente é professor da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). E-mail: jose@feagri.unicamp.br . ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7668-0979.

Introdução

Desde 2008, o Brasil é o maior consumidor de agrotóxicos do mundo devido, principalmente, ao incentivo de políticas públicas e ao investimento de capital estrangeiro e privado no setor do agronegócio (CARNEIRO et al., 2015). A velocidade com que esses produtos são registrados no Brasil é maior do que a velocidade com que são avaliados seus reais riscos ao meio ambiente. A contaminação de corpos hídricos por agrotóxicos, por exemplo, é um fato constantemente estudado e depende de diferentes variáveis como a quantidade e forma de aplicação do composto, a influência da intensidade e da duração de eventos de chuva, entre outras. Isso dificulta avaliar os reais impactos destes compostos.

As características da planta também são fatores relevantes e influenciam na escolha de qual agrotóxico utilizar. A atrazina, por exemplo, é um herbicida muito utilizado em cultivos de cana-de-açúcar. Esse uso ocorre junto a fertilizantes químicos que contêm nitrogênio, fósforo e potássio[4], possibilitando a expansão das plantações de cana-de-açúcar e, consequentemente, o crescimento do setor sucroenergético brasileiro.

Pesquisadores, de diferentes áreas do conhecimento, analisaram a perda de atrazina por escoamento superficial de água tanto em bacias hidrográficas como em parcelas experimentais (CECILIA; MAGGI et al., 2016; GAYNER *et al*., 1995; JAVARONI; LANDGRAF; REZENDE, 1998; NG; CLEGG, 1997). O uso destas é preferível quando se objetiva obter dados primários para a avaliação do risco de contaminação, visto que há um maior controle de variáveis nestas parcelas.

Gayner *et al*. (1995), por exemplo, compararam a perda de atrazina por escoamento superficial de uma parcela experimental em relação a uma bacia hidrográfica e obtiveram resultados de 1,8% e 0,2%, respectivamente. Javaroni *et al*. (1998) avaliaram o tempo de permanência da atrazina em águas superficiais, realizando coletas de amostras em um dia, 15 dias e 30 dias após a aplicação do composto, verificando uma redução de 97% da concentração do composto no trigésimo dia. Cecilia e Maggi (2016) analisaram modelos numéricos e mostraram que o tempo de meia-vida da atrazina depende da sua concentração inicial e da biomassa presente na plantação.

Apesar de os resultados demonstrarem consistentemente que a atrazina pode escoar em águas superficiais, poucas pesquisas exploraram a relação entre a distribuição da aplicação manual da atrazina em área de cultivo e sua perda por escoamento superficial. A forma como esses produtos são aplicados altera seu destino no meio ambiente. Se, com equipamentos de pulverização calibrados e em situações ideais, grande parte dos compostos não fica retida na planta, indo à deriva (CARNEIRO *et al*., 2015; CHAIM, 2009), o resultado pode ser ainda pior para a aplicação manual. Assim, este estudo se propõe a responder o seguinte

4 O conjunto formado pela utilização de agrotóxicos e fertilizantes químicos juntos denomina-se agroquímicos.

questionamento: como a aplicação manual, feita pelo trabalhador do campo, pode influenciar na distribuição da atrazina ao longo de uma área de plantação?

Buscar respostas para esse problema é relevante por dois motivos. Primeiro, o destino ambiental dos agrotóxicos deve ser estudado em diferentes matrizes, pois a contaminação de corpos hídricos, por exemplo, pode gerar problemas como eutrofização, intoxicação alimentar em seres humanos e degradação do agrossistema (APARICIO *et al*., 2013; BERTI *et al*., 2009; HUTCHINS, 2012). Segundo, permanece a ser explorada a relação entre dados empíricos locais e as causas macro para o aumento do uso de produtos químicos na agricultura.

Entender essas duas relações expostas é importante tanto para a sociedade quanto para pesquisadores no intuito de que os mesmos compreendam o motivo de o Brasil ser o maior consumidor de agrotóxicos do mundo e como isso influencia na contaminação ambiental. Ademais, é importante analisar que a forma como é utilizado o produto pode aumentar ou diminuir os riscos dessa contaminação.

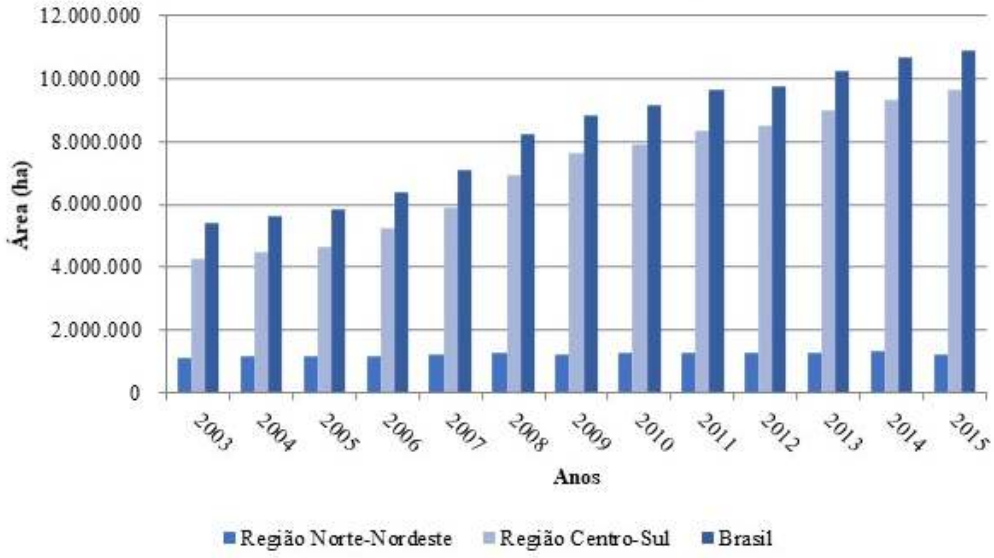
Nesse contexto, esta pesquisa partiu do entendimento macro sobre o aumento do uso de agrotóxicos no Brasil, focando no uso de atrazina em plantações de cana-de-açúcar. Compreendida esta primeira etapa, chegou-se a um contexto local no qual foram estudadas, em parcelas experimentais, a relação da distribuição da aplicação de atrazina em uma área cultivada com cana-de-açúcar e sua perda por escoamento superficial de água.

Contextualização

A expansão do setor sucroenergético no Estado de São Paulo

O setor sucroenergético abrange a estrutura produtiva do álcool etílico, do açúcar e da bioenergia desde a produção dos insumos até a venda ao consumidor final (GRANCO *et al*., 2015; REGAZZINI; BACHA, 2012). Entre o início da década de 1990 e 2000, o setor passou por uma reestruturação, ocorrendo uma expansão acelerada e, consequentemente, aumento da área plantada de cana-de-açúcar (MESQUITA *et al*., 2019; GRANCO *et al*., 2015) - Figura 1.

Figura 1. Gráfico de área plantada com cana de açúcar no Brasil, na Região Norte-Nordeste e Centro-Sul.



Fonte: União da Indústria de cana-de-açúcar (UNICA, 2015); Organização: Autores.

Como observado, da área total de cana plantada no Brasil, 89% está concentrada na região Centro-Sul do país (Figura 1) e, desta área, 60% está no Estado de São Paulo. Tal Estado é o segundo maior consumidor de agrotóxicos do Brasil, com 15%, perdendo apenas para Mato Grosso (18%) (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2010; UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, 2015).

O uso intensivo de Atrazina e os efeitos na contaminação de água

A expansão do setor sucroenergético é possível, entre fatores políticos e econômicos já mencionados, a partir do uso intensivo de agroquímicos, sendo o foco deste trabalho o uso de agrotóxicos, destacando a atrazina utilizada nas plantações de cana-de-açúcar.

No Brasil, há 504 Ingredientes Ativos com registros autorizados e, destes, 149 são proibidos na União Européia (UE). Entre eles, está a atrazina que foi proibida em 2004 na UE e ocupa o 7º lugar entre os agrotóxicos mais vendidos no Brasil. Um dos motivos para que isso aconteça, é a organização das multinacionais fabricantes de agroquímicos que produzem e comercializam de acordo com a aplicação da legislação de cada país (BOMBARDI, 2016). O Brasil está entre os países com menos restrição para a aprovação e comercialização dos Ingredientes Ativos, representando 20% do mercado mundial de agrotóxicos (PELAEZ *et al*., 2015).

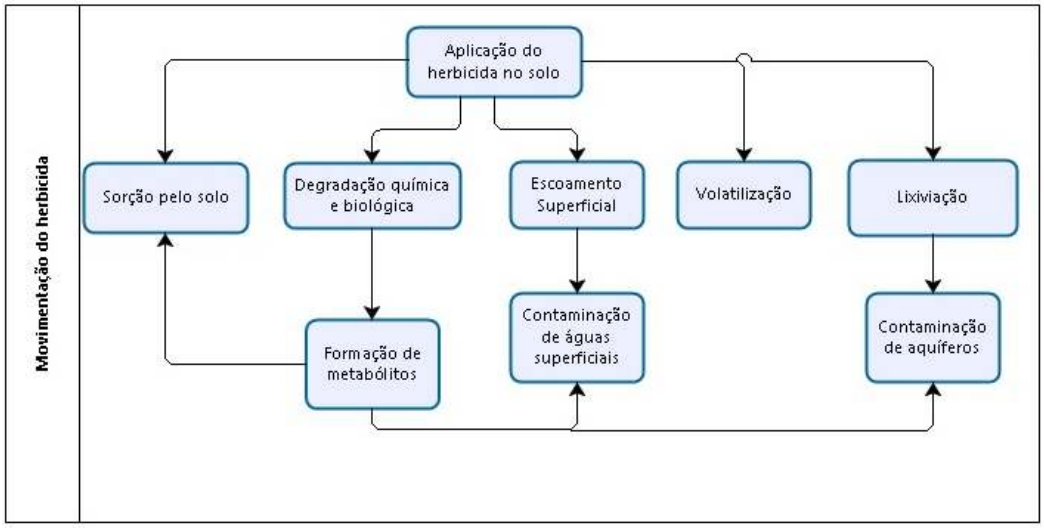
Um dos principais problemas do uso intensivo de agrotóxicos é o efeito dos mesmos na saúde humana, como intoxicação alimentar, neurotoxicidade, carcinogenicidade, desregulação endócrina, mutagenicidade (CUT, 2015). Além disso, a maneira como esses produtos são aplicados altera seu destino no meio ambiente, porém, em alguns casos, mais de 50% dos produtos aplicados não atingem o alvo

estabelecido (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DEFESA VEGETAL, 2010; CARNEIRO *et al*., 2015; CHAIM, 2009). Para onde vai o restante do que é aplicado?

Os corpos hídricos não são os únicos destinos destes compostos. Ao alcançar o solo, os agrotóxicos, do tipo herbicida, podem ser volatilizados, escoados superficialmente, lixiviados, sofrer sorção pelo solo ou degradação química e biológica (Figura 2), que pode gerar metabólitos poluentes nas diferentes matrizes mencionadas (SOUZA, 2006).

Existem diferentes tipos de agrotóxicos empregados na monocultura de cana-de-açúcar, entre eles, a atrazina, herbicida utilizado nos anos de renovação de áreas de cana ou no início do cultivo. Este produto é geralmente encontrado em maior quantidade nas profundidades do solo do que na sua camada superficial ou em águas superficiais (CARMO *et al*., 2013; GONZALEZ *et al*., 2020).

Figura 2. Fluxograma proposto para entender o destino ambiental de herbicidas.



Fonte: Javaroni et al. (1998); Souza (2006). Elaboração: Autores.

Para obtenção de dados primários que explanem o comportamento ambiental de diferentes agrotóxicos, sugere-se estudos em parcelas experimentais. Estas objetivam representar uma bacia hidrográfica em pequenas áreas que tenham condições semelhantes, permitindo um maior controle e entendimento das variáveis (ULRICH; DIETRICH; FOHRER, 2013). Cresce, também, a utilização dos sistemas de simulações de chuva, reduzindo o tempo experimental (antes relacionado à ocorrência de chuvas "naturais") e permitindo uma melhor observação da relação chuva-escoamento superficial (LIU *et al*., 2014).

Materiais e métodos

A partir do exposto, foi possível entender a relevância do estudo da contaminação de águas superficiais por agrotóxicos e a dificuldade de estudar esses compostos devido à quantidade de variáveis que existem e ao pouco controle delas. Com o objetivo de compreender o deslocamento desses produtos em uma

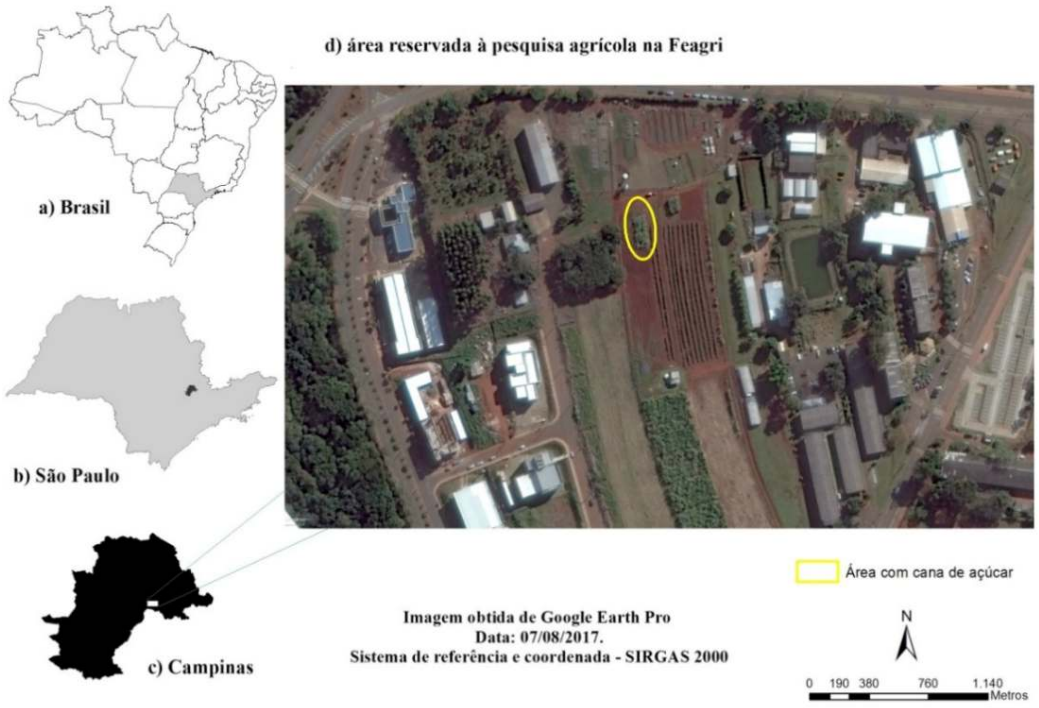
plantação de cana-de-açúcar, optou-se por construir parcelas experimentais, nas quais foi possível simular chuvas e aplicar quantidades conhecidas de atrazina.

O embasamento teórico permitiu formular a hipótese que conduziu o experimento: a forma manual de aplicação do produto pode gerar uma distribuição não uniforme ao longo da parcela experimental, impactando na quantidade de perda por escoamento superficial.

Área de estudo

A área de estudo para a construção das parcelas experimentais se localiza na Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp (Feagri), entre as coordenadas geográficas de latitude 22°53'20''S, longitude 47°04'40''W e altitude média de 640 m (Figura 3). Seu solo é do tipo Latossolo Vermelho distroférrico argiloso (BARBOZA, 2016).

Figura 3. Localização da área de estudo.



Fonte: Google Earth Pro (2017).

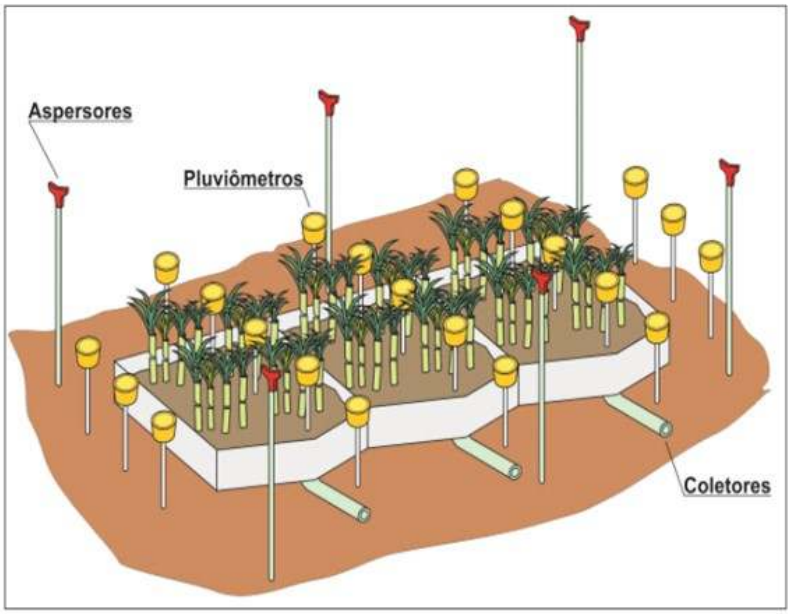
Montagem do experimento

A partir de entrevistas com profissionais do campo sobre métodos de aplicação de herbicida, foi possível escolher a formulação disponível no mercado: atrazina nortox 500 SC. A cana-de-açúcar (variedade disponível: RB867515) foi plantada em três parcelas experimentais e foi feita a adubação por cobertura usando

fertilizante na proporção 20-5-20 NPK[5], seguindo o recomendado na bula do composto.

Cada parcela teve uma área aproximada de 18 m^2 e um coletor de amostras de água. Os aspersores (responsáveis pela simulação de chuva) e os pluviômetros (responsáveis pela medição do volume de chuva total) foram instalados de maneira a conferir uma análise da distribuição de chuva ao longo das parcelas. Para melhor visualização da montagem do experimento, observa-se a ilustração da Figura 4, que mostra as três parcelas experimentais numeradas, da esquerda para a direita, em 1, 2, 3, respectivamente.

Figura 4. Ilustração do conjunto composto por três parcelas experimentais, 6 aspersores, 21 pluviômetros e 3 coletores de água superficial.



Elaboração: Autores.

Coleta de amostras de água

Foi simulado um evento de chuva utilizando pressão de 2 bar nos aspersores, valor calculado depois da realização de testes iniciais com diferentes pressões e tempos de chuva. Neste evento, foram coletadas três amostras de 5 litros em cada parcela experimental para serem analisadas, posteriormente, por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC), servindo como amostra de controle para o experimento.

A calda de atrazina, solução com o produto comercial e água, foi preparada seguindo recomendações da bula (CHAIM, 2013). Antes da aplicação desta calda, foram espalhadas uniformemente 18 placas de Petri nas três parcelas experimentais, sendo 6 placas em cada parcela. Logo após a aplicação do composto, essas placas

5 20-5-20 NPK: nomenclatura utilizada nas bulas de fertilizantes para indicar as proporções, no caso, 20% de nitrogênio, 5% de fósforo e 20% de potássio.

foram retiradas do local e armazenadas para posterior análise por HPLC. Então, iniciou-se as simulações dos eventos de chuva, ocorrendo 3 horas após a aplicação do agrotóxico (29/08/2017), 2, 8 e 15 dias depois, tendo como duração 30 minutos cada, seguindo metodologias propostas por Ulrich, Dietrich e Fohrer (2013) e Warnemuende *et al*. (2007).

As amostras coletadas, em cada evento de chuva simulada, foram duas amostras compostas[6], nas parcelas 1 e 3, e uma amostra, na parcela 2, a cada minuto do experimento, totalizando 32 amostras por evento. As vazões foram monitoradas em cada parcela de minuto a minuto, sendo possível calcular a quantidade total escoada ao final de um experimento.

Análises de atrazina por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC)

As análises de atrazina foram realizadas na Embrapa Meio Ambiente localizada em Jaguariúna-SP, seguindo métodos padrões desta empresa e metodologia proposta por Geronimo *et al*. (2014). Logo, foram divididas em duas etapas: 1- amostras aquosas coletadas a partir do escoamento superficial; e 2- amostras das placas de Petri. Para ambas as etapas, elas foram mantidas congeladas até o dia da análise. As amostras da etapa 1 foram descongeladas, filtradas em unidades filtrantes de 13 mm de diâmetro com poro de 0,45 µm e diluídas em fase móvel (60% Acetonitrila grau HPLC e 40% de água Milli-Q).

Para as amostras da etapa 2, foi necessário extrair a atrazina fixada nas placas de Petri pelo método de extração por metanol. Assim como as amostras da etapa 1, todas as diluições foram filtradas e analisadas por HPLC com detector UV/VIS no comprimento de onda de 254 nm. Com isso, foi possível quantificar a atrazina presente nas placas de Petri e, assim, entender sua distribuição ao longo das parcelas experimentais.

Comparando os dados obtidos das amostras de água coletadas, após a aplicação da atrazina, com as análises realizadas no grupo de controle do experimento, foi possível quantificar a perda de atrazina presente nas amostras de água coletadas em cada evento de chuva simulada. Foi elaborado, também, o perfil de perda no decorrer dos 30 minutos de simulação a partir das amostras coletadas minuto a minuto na parcela 2.

Elaboração de mapas de distribuição espacial da aplicação de atrazina

Os dados obtidos a partir das placas de Petri fornecem informações pontuais da quantidade aplicada de atrazina na área de estudo. Para representar as áreas onde não há informação, é necessário utilizar métodos de interpolação que podem ser realizados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (CUNHA *et al*., 2013). O método mais utilizado para estudar a espacialização de contaminação por herbicidas

6 Amostra composta ocorre quando são coletadas amostras em determinados intervalos de tempo, porém em um mesmo recipiente, obtendo, ao final, uma única amostra.

é a Krigagem (JAMALY; KLEISSL, 2017). Neste trabalho, optou-se pela Krigagem ordinária, que não considera a tendência dos dados (DULCCI *et al*., 2016).

Assim, utilizando os valores experimentais de massa de atrazina, e com auxílio dos SIG, foi construído, a partir do software ArcGIS 10.3, o mapa de distribuição de atrazina aplicada no conjunto de parcelas. A partir da integração da interpolação, foi calculada a quantidade total de atrazina aplicada em cada parcela experimental. As análises estatísticas dos dados, como histograma, distribuição normal e semivariograma, foram realizadas pelo software ArcGIS com o objetivo de validar a possibilidade de utilizar os dados experimentais obtidos.

Com o monitoramento da vazão minuto a minuto, calculou-se a quantidade total de água escoada em cada parcela experimental nos diferentes eventos de chuva simulada. Com os valores de concentração de atrazina nas amostras de água coletadas, pôde-se estimar a quantidade total de atrazina escoada em cada experimento e relacioná-lo com a massa total aplicada estimada pelo ArcGIS. Assim, foi possível estimar a perda, em porcentagem, da atrazina em cada parcela experimental e em cada simulação de chuva.

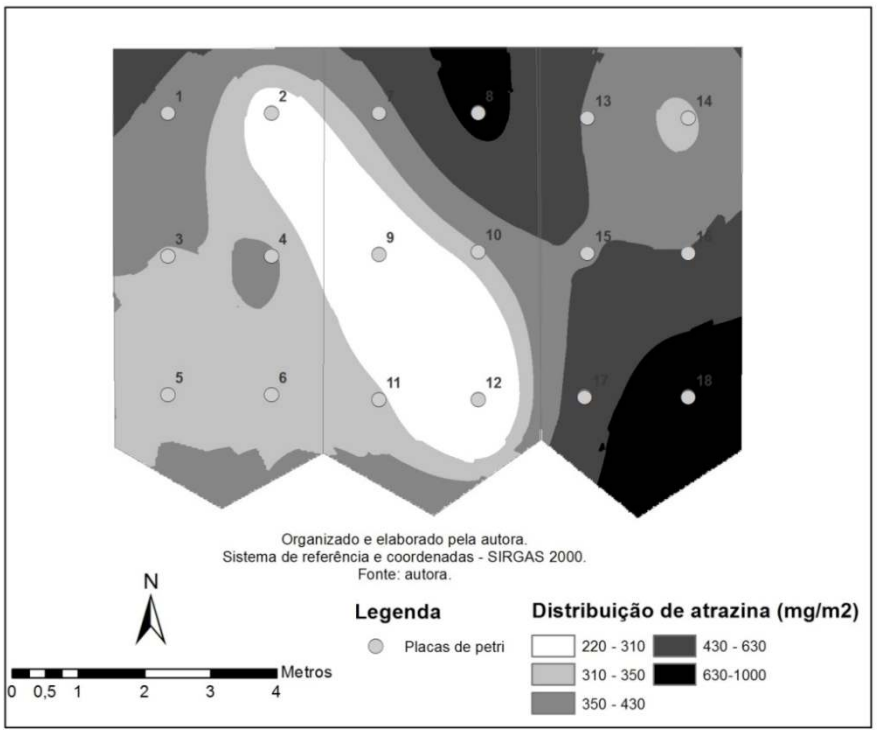
Resultados e discussão

Distribuição da aplicação de atrazina na área de cultivo

Observa-se na Figura 5 a não uniformidade da aplicação manual da atrazina. Nota-se que a parcela 3 recebeu uma maior quantidade de atrazina que as parcelas 2 e 1. A quantidade média de atrazina aplicada foi de 413,3 mg / m^2, com um desvio médio de 132,0 e desvio padrão de 31,9%. Multiplicando pela área de cada parcela, tem-se que as parcelas 1, 2 e 3 receberam, respectivamente, 6207,5 mg; 7125,7 mg; 8945,6 mg de atrazina. Este elevado valor de desvio padrão ocorreu, principalmente, devido à aplicação manual por jato costal, podendo haver diferenças na intensidade de aplicação.

A Krigagem ordinária se mostrou eficiente na interpolação dos dados de concentração de atrazina devido, principalmente, a não tendência dos dados, pois eles dependem, principalmente, do manuseio do operador (OLIVER; WEBSTER, 2014).

Figura 5. Distribuição massa de atrazina aplicada por área.



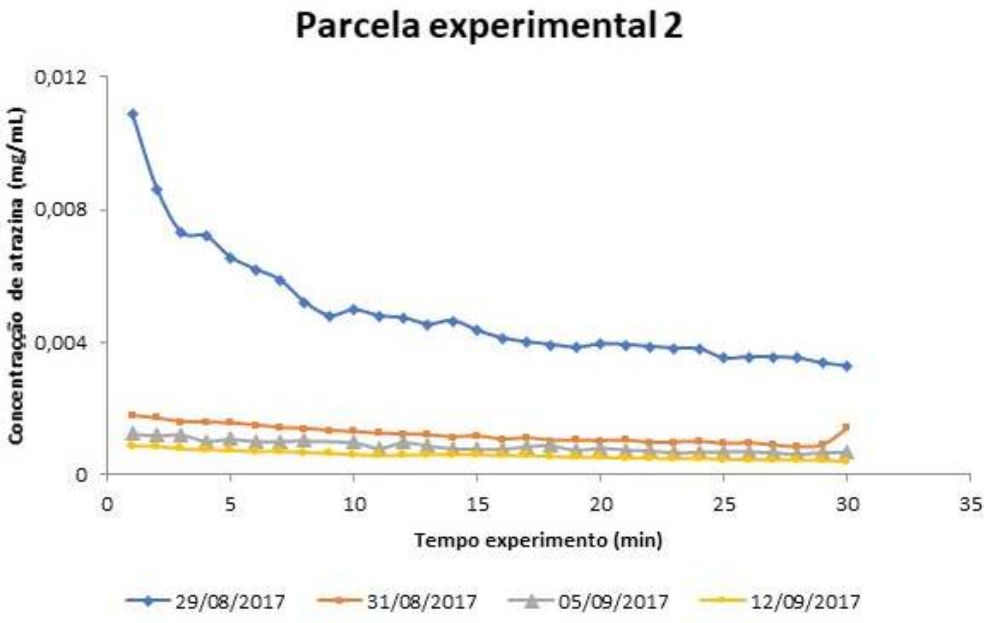
Fonte: Autores.

Comportamento da atrazina ao longo de um evento de chuva

Com o objetivo de analisar o comportamento de atrazina ao longo dos 30 minutos nos quatro eventos de chuva simulada, foi elaborado um gráfico (Figura 6) para as quatro simulações fixando o tempo de 1 a 30 minutos para a parcela 2, pois foi a única a ter coleta de amostras minuto a minuto. Percebe-se que a maior perda de atrazina ocorre no primeiro evento de chuva, resultados semelhantes aos obtidos por Warnemuende *et al*. (2007) e Ng e Clegg (1997).

Nesse primeiro evento, ocorrido 3 horas após a aplicação, a atrazina ainda estava sob a superfície e disponível para escoamento. Dias após a aplicação, a atrazina pode ter sofrido sorção pelo solo, degradação e volatilização, diminuindo sua disponibilidade para escoamento. O tempo entre a aplicação do composto e o primeiro evento de chuva é um fator que influencia significativamente na perda de atrazina e no aumento do risco de contaminação das águas superficiais. Evitar aplicar o composto quando se tem um evento de chuva previsto em até 5 dias após resulta em uma redução de perda de atrazina de 98% (NACHIMUTHU; HALPIN; BELL, 2016).

Figura 6. Comportamento da concentração de atrazina ao longo das quatro simulações.



Fonte: Autores.

Percebe-se que há uma queda na perda de atrazina ao longo do evento de chuva, em todas as simulações. Isso pode ser explicado pela mudança do tipo de transporte da atrazina, sendo o deslocamento inicial causado pela solução do solo no escoamento superficial e finalizando o movimento com a dessorção da atrazina nas partículas do solo (WARNEMUENDE *et al*., 2007).

Relação entre a perda de atrazina, sua aplicação e a geração de escoamento superficial

Comparando o primeiro evento de chuva com o quarto evento, percebe-se que a perda de atrazina foi, em média, 6 vezes maior no primeiro evento de chuva (Tabela 1). Quando se compara perdas de atrazina no mesmo dia, em parcelas diferentes, percebe-se que quanto maior o volume escoado, maior a perda de atrazina. A parcela 3, por exemplo, recebeu os maiores valores de atrazina aplicada, porém teve os menores valores de perda, pois obteve os menores valores de escoamento superficial. Em todas as simulações, a quantidade de água escoada foi maior na parcela 1 e menor na parcela 3, ocasionando uma perda acumulada maior na parcela 1 em relação à parcela 3.

TABELA 1. Dados obtidos a partir da aplicação de atrazina realizada no dia 29/08/2017, em que a Parcela 1 (P1), Parcela 2 (P2) e Parcela 3 (P3) receberam, respectivamente, 6207,5 mg; 7125,7 mg; 8945,6 mg de atrazina.

Eventos de chuva simulados	Parcelas Experimentais	Coeficiente de escoamento (%)*	Perda de atrazina (%)**	Perda acumulada de atrazina (%)
1 29/08/2017	P1 29/08/2017	0,0015	0,46	0,46
	P2 29/08/2017	0,0008	0,13	0,13
	P3 29/08/2017	0,0003	0,05	0,05
2 31/08/2017	P1 31/08/2017	0,0035	0,21	0,67
	P2 31/08/2017	0,0015	0,04	0,17
	P3 31/08/2017	0,0002	0,01	0,05
3 05/09/2017	P1 05/09/2017	0,0009	0,09	0,76
	P2 05/09/2017	0,0007	0,02	0,19
	P3 05/09/2017	0,0003	0,01	0,06
4 12/09/2017	P1 12/09/2017	0,0017	0,06	0,82
	P2 12/09/2017	0,0008	0,02	0,21
	P3 12/09/2017	0,0004	0,01	0,07

*Calculado a partir da relação entre a quantidade de água escoada ao longo do experimento e o volume de chuva total nesse mesmo experimento.

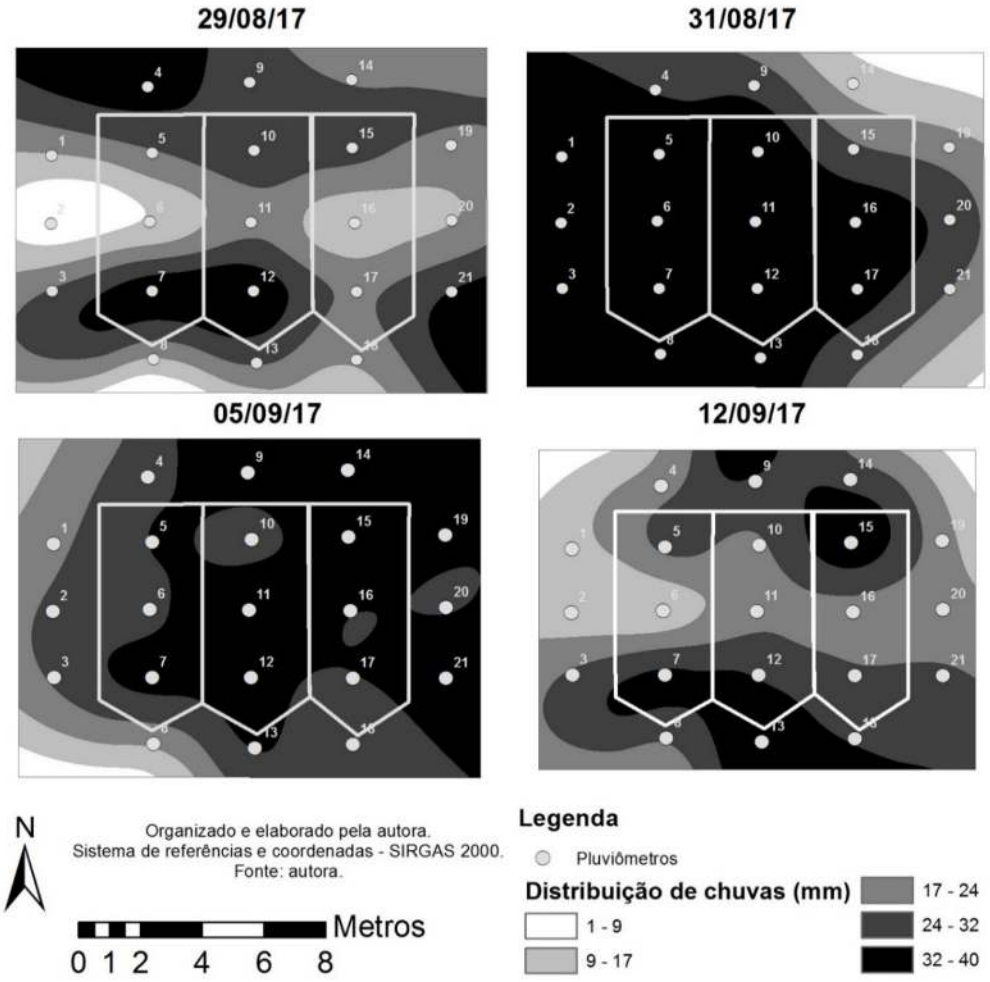
** Calculada a partir da massa de atrazina escoada (obtida pela relação das concentrações obtidas no HPLC e o volume de água coletada) em relação à massa inicial de atrazina recebida na parcela experimental.

Elaboração: Autores.

Desse modo, conclui-se que a forma de aplicação da atrazina influencia na sua distribuição na área de cultivo e pode interferir na sua perda, porém esta é ocasionada, principalmente, pela relação entre o evento de chuva e a geração de escoamento. A variação na intensidade de escoamento, por sua vez, depende de fatores como declividade do terreno e incidência de ventos. Uma forte incidência de vento pode ocasionar uma chuva mais intensa em uma área da parcela experimental, gerando um maior escoamento.

A parcela 1, em todas as simulações, teve um maior valor de vazão que a parcela 2 e a 3, sendo a parcela 2 tendo um maior valor que a parcela 3 em todas as simulações. A geração e vazão de escoamento estão relacionadas com a intensidade de chuva (MOHAMADI; KAVIAN, 2015). Com exceção do evento do dia 31/08/2017, observou-se que quanto maior a intensidade de chuva, maior o valor de vazão média em todas as simulações. A diferença encontrada para o dia 31/08/2017 pode ser explicada pela distribuição de chuva ao longo da área, influenciando a geração de escoamento. Nesse evento houve um alto valor de desvio padrão voltado para as parcelas 1 e 2 (Figura 7).

Figura 7. Mapas de distribuição de chuvas dos 4 eventos simulados.



Elaboração: Autores.

Diante do exposto, retoma-se à ideia inicial de que é preciso cautela na utilização de agrotóxicos, em todas as suas etapas. Com este experimento, percebeu-se a importância de estar atento à forma de aplicação do composto, ao declive da área cultivada e à provável incidência de chuvas e ventos. Mas estas não são as únicas variáveis que influenciam na perda do composto, dificultando, assim, os estudos relacionados ao destino ambiental dos agrotóxicos. Por exemplo, sabe-se que a atrazina tem menor disponibilidade para escoar e seu possível risco de contaminação é consideravelmente maior em solos e águas subterrâneas do que em águas superficiais (LUDOVICE, 2003), sendo necessário, então, estudos complementares que objetivem entender a relação destes parâmetros com a perda de atrazina.

Outro fator que influencia a movimentação dos herbicidas é a composição iônica do solo. No caso de solos com a presença de Fe^{2+}, Al^{3+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} pode haver a formação de sais, sendo o excesso de sal responsável pelo aumento ou diminuição da solubilidade de agrotóxicos. As moléculas neutras ou levemente básicas, como a atrazina, podem ter sua solubilidade diminuída com excesso de sal,

pois pode ocorrer a sorção da molécula de atrazina com os óxidos metálicos, por exemplo óxido de ferro e de alumínio (SOUZA, 2006).

O processo de troca / ligação iônica afeta o transporte de moléculas de agrotóxicos, sendo esse processo influenciado pelo pH do solo. Em solos ácidos, tem-se uma alta concentração de H^+, bloqueando a sorção de outros cátions, logo há uma menor troca catiônica em relação a solos alcalinos. Em solos com alto pH (alcalinos), há uma maior quantidade de hidroxilas (OH^-), resultando em um aumento da carga líquida negativa da solução, favorecendo a troca catiônica (SOUZA, 2006). Ou seja, quanto maior o pH de um solo, mais favorecida é a troca catiônica. Porém, no caso da atrazina, mesmo ela sendo levemente básica, ela possui uma baixa capacidade de se dissociar em meio aquoso, ou seja, baixo valor de pK_a, sendo 1,7 a 21 °C (JAVARONI *et al*., 1998). Este fator não favorece sua protonação e, consequentemente, dificulta a troca iônica em solos alcalinos (VAZ, 2016).

A velocidade da realização destes estudos de avaliação de impactos ambientais causados por agrotóxicos é menor do que a velocidade com que eles são aprovados e utilizados no Brasil. É necessário que, além de análises empíricas, sejam feitas avaliações políticas e sociais que contribuam para entender o risco de se aprovar e facilitar a inserção destes compostos no mercado. Assim, conciliando esses dois pensamentos, é possível diminuir os possíveis impactos socioambientais causados por estes produtos químicos.

Considerações finais

A análise de uma problemática local deve partir de um entendimento macro para que possam ser melhor justificados os resultados empíricos encontrados e sejam pensadas estratégias que solucionem os problemas. Esta pesquisa se iniciou estudando um dos motivos para o aumento da utilização de atrazina em cana-de-açúcar, principalmente no Estado São Paulo, e relacioná-lo com possíveis impactos ambientais locais. Em seguida, o planejamento experimental foi realizado buscando minimizar o efeito das variáveis que influenciam no estudo da perda de atrazina por escoamento superficial de água.

Diferentes autores demonstram consistentemente que a atrazina pode escoar em águas superficiais, entretanto poucas pesquisas exploraram a relação entre a distribuição da aplicação manual dos agrotóxicos em área de cultivo e sua perda por escoamento superficial. Neste estudo, foi possível perceber que a aplicação manual resulta em um elevado desvio padrão na distribuição do composto ao longo da área de cultivo.

Em relação à sua perda por escoamento superficial, a parcela que recebeu maior quantidade do produto e teve menor geração de escoamento superficial, resultou na menor perda total de atrazina ao longo dos experimentos. Enquanto a que recebeu a menor quantidade do composto e teve a maior geração de escoamento, gerou uma perda maior.

Desse modo, conclui-se que a forma manual de aplicação da atrazina influencia na sua distribuição na área de cultivo e pode influenciar na sua perda, todavia esta é influenciada, principalmente, pela relação entre o evento de chuva e a geração de escoamento. A variação na intensidade de escoamento, por sua vez, depende de fatores como declividade do terreno e incidência de ventos.

Bibliografia

APARICIO, V. A. et al. Environmental fate of glyphosate and aminomethylphosphonic acidin surface waters and soil of agricultural basins. *Chemosphere*, v. 93, p. 1866–1873, 2013.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DEFESA VEGETAL. Manual de tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários. Campinas, SP: *Esalq*, 2010. Disponível em: <http://www.lpv.esalq.usp.br/sites/default/files/Leitura%20-%20Manual%20Tecnologia%20de%20Aplicacao.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2020.

BARBOZA, G. C. *Fluxo de seiva e relação hídrica foliar de cana-de-açúcar (saccharum officinarum l.).* 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

BERTI, A. P. et al. Efeitos da contaminação do ambiente aquático por óleos e agrotóxicos. *SaBios: Rev. Saúde e Biol*., v. 4, n. 1, p. 45-51, 2009.

BOMBARDI, L.M. *Pequeno ensaio cartográfico sobre uso de agrotóxicos no Brasil*. São Paulo: Laboratório de geografia agrária da USP, 2016.

CARMO, D. A. *et al*. Comportamento ambiental e toxidade dos herbicidas atrazina e simazina. *Revista Ambiente & Água*, v. 8, n. 1, 2013.

CARNEIRO, F. F. et al. (orgs.). *Dossiê ABRASCO:* Um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde. Rio de Janeiro: EPSJV; São Paulo: Expressão Popular, 2015.

CECILIA, D.; MAGGI, F. Kinetics of atrazine, deisopropylatrazine, and deethylatrazine soil biodecomposers. *Journal of Environmental Management*, n. 183, p. 673-686, 2016.

CHAIM, A. *Manual de tecnologia de aplicação de agrotóxicos.* Brasília: Embrapa, 2009.

CHAIM, A. Calibração de deposição de agrotóxicos e biopesticidas. *Portal Dia de Campo*, 2013. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/100118/1/2013AM06.PDF. Acesso em: 20 fev. 2017.

CUNHA, A. M. *et al*. Espacialização da precipitação pluvial por meio de krigagem e cokrigagem. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasilia, v. 48, n. 9, p. 1179-1191, 2013.

CUT – Central Única dos Trabalhadores. Agrotóxicos, Impactos na vida e no Trabalho, 2015.

DULCCI, D. et al. Combining natural background levels (NBLs) assessment with indicator kriging analysis to improve groundwater quality data interpretation and management. *Science of the Total Environment,* v. 569-570, p. 569-584, 2016.

GAYNER, J. D. et al. Dissipation and loss of atrazine and metolachlor in surface and subsurface drain water: a case study. *Wat. Res.*, v. 29, n. 10, p. 2309-2317, 1995.

GERONIMO, E. et al. Presence of pesticides in surface water from four sub-basins in Argentina. *Chemosphere*, v. 107, p. 423–431, 2014.

GONZALEZ, J. M. et al. Atrazine removal from water by activated charcoal cloths. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.03.002>. Acesso em: 08 mai. 2020.

GRANCO, G. et al. Exploring the policy and social factors fueling the expansion and shift of sugarcane production in the Brazilian Cerrado. *GeoJournal*, v. 27, 2015.

HUTCHINS, M. G. What impact might mitigation of diffuse nitrate pollution have on river water quality in a rural catchment. *Journal of Environmental Management*, v. 109, p. 19-26, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção Agrícola – Lavoura Temporária. Ano 2014. *Portal do IBGE*, 2014. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=sp&tema=lavouratemporaria2014>. Acesso em: 08 mai. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVAVEIS. *Produtos agrotóxicos e afins comercializados em 2009 no Brasil:* uma abordagem ambiental. Brasília: IBAMA, 2010.

JAMALY, M.; KLEISSL, J. Spatiotemporal interpolation and forecast of irradiance data using Kriging. *Solar Energy*, v. 158, p. 407-423, 2017.

JAVARONI, R. C. A.; LANDGRAF, M. D.; REZENDE, M. O. Comportamento dos herbicidas atrazina e alaclor aplicados em solo preparado para o cultivo de cana de açúcar. *Química nova*, v. 22, n. 1, p. 58-64, 1998.

LIU, R. *et al*. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions. *Science of the Total Environment*, v. 468–469, p. 1069–1077, 2014.

LUDOVICE, M. T. F. *Influência de faixa filtro de brachiaria decumbens na retenção de atrazina, nutrientes e sedimentos em escoamento superficial.* 2003. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

MESQUITA, F. et al. Regional hierarchies in the sugarcane agribusiness: border movement and the centrality of São Paulo. *Rev. Bras. Estud. Urbanos Reg.*, v. 21, n. 2, 2019.

MOHAMADI, A.; KAVIAN, A. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 3, p. 273–281, 2015.

NACHIMUTHU, G.; HALPIN, N. V.; BELL, M. J. Effect of sugarcane cropping systems on herbicide losses in surface runoff. *Science of the Total Environment*, v. 557–558, p. 773–784, 2016.

NG, H. Y. F.; CLEGG, S. B. Atrazine and metolachlor losses in runoff events from an agricultural watershed: the importance of runoff components. *The Science of the Total Environment*, v. 193, p. 215-228, 1997.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, v. 113, p. 56–69, 2014.

PELAEZ, V; SILVA, L. R. da; GUIMARÃES, T. A; Dal Ri; TEODOROVICZ, T. A (des)coordenação de políticas para a indústria de agrotóxicos no Brasil. *Revista Brasileira de Inovação,* v. 14, p. 153-178, 2015.

REGAZZINI, L. C.; BACHA, C. J. C. A Tributação no Setor Sucroenergético do Estado de São Paulo: anos de 2000 e 2008. *RESR*, Piracicaba-SP, v. 50, n. 4, p. 801-818, 2012.

SOUZA, M. L. M. *Transporte e sorção do agroquímico paclobutrazol em solos irrigados cultivados com manga.* 2006. 127 f. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

ULRICH, U.; DIETRICH, A.; FOHRER, N. Herbicide transport via surface runoff during intermittent artificial rainfall: A laboratory plot scale study. *Catena*, v. 101, p. 38–49, 2013.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR. Área Plantada com Cana-de-Açúcar, 2015-2015. *Portal UNICA*, 2015. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/historico-de-area-ibge.php?idMn=33&tipoHistorico=5&acao=visualizar&idTabela=1792&produto=%C3%81rea+colhida&anoIni=2012&anoFim=2015&estado=SP>. Acesso em: 08 mar. 2017.

VAZ, L.R.L. *Perdas de hexazinona e diuron por escoamento superficial em sistema de cana crua*. 2016. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Ciências, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, Piracicaba – SP, 2016.

WARNEMUENDE, E. A. *et al*. Effects of tilling no-till soil on losses of atrazine and glyphosate to runoff water under variable intensity simulated rainfall. *Soil & Tillage Research*, v. 95, p. 19-26, 2007.

The manual application of atrazine in experimental plots and its losses by surface runoff

Contamination of surface water by pesticides has been continuously studied due to the constant increase in consumption of these products. This work is focused particularly on the contamination by atrazine, which is a pesticide specially used in sugarcane crops. The aim of this study is to answer the following question: How can manual application influence the distribution of atrazine over a plantation area and its loss? In addition, prior to experimental planning, we attempted to understand the relationship between local empirical data and the macro causes of the increasing use of chemicals in agriculture, especially regarding the use of atrazine in Brazil and in the State of São Paulo. Then, the experiment was carried out in experimental plots, as these are preferable when the objective is to obtain primary data. The physical-chemical and geostatistical analyzes showed that the procedure of the application caused a large standard deviation in the distribution of the product throughout the cultivation area. However, in relation to product loss, the most influential factor was the intensity of the generation of surface runoff.

KEYWORDS: agribusiness, sugarcane, environmental fate of herbicides, distribution of atrazine, environmental impact.

Aplicación manual de atrazina en parcelas experimentales y sus pérdidas por escurrimiento de aguas superficiales

Debido al aumento del consumo de pesticidas, hay diversos estudios a cerca de la contaminación de las aguas superficiales por estos productos. El objetivo de esta investigación fue evaluar el destino ambiental de la atrazina, un herbicida ampliamente utilizado en los cultivos de caña de azúcar, y mostrar cómo la aplicación manual puede influir en la distribución de la atrazina en un área de plantación y también sus pérdidas. Además, antes de la planificación experimental, buscamos entender la relación entre los datos empíricos locales y las macrocausas del aumento del uso de productos químicos en la agricultura, contextualizando el uso de la atrazina en Brasil y en el Estado de São Paulo. El experimento se llevó a cabo en parcelas experimentales, puesto que éstas son preferibles cuando se trata de obtener datos primarios. Los análisis fisicoquímicos realizados junto con los análisis geoestadísticos mostraron que la forma de aplicación provocaba una gran desviación estándar en la distribución del producto en el área de cultivo. En cuanto a la pérdida de producto, el factor que más ha influido ha sido la intensidad de generación de escorrentía en cada parcela experimental.

PALABRAS CLAVE: agro-industria, caña de azúcar, destino medioambiental de los herbicidas, distribución de atrazina a lo largo del área de cultivo, impactos medioambientales.

Artigo recebido em julho de 2022. Aprovado em dezembro de 2022.