

PLINIO SAULO SIMÕES

**“MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DO RISCO AMBIENTAL DA
APLICAÇÃO DE HERBICIDAS (CAPINA QUÍMICA) EM FERROVIA
NA REGIÃO DA SERRA DO MAR”**

*Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrônômicas FCA,
Departamento de Proteção Vegetal, Botucatu*

*Supervisor:
Prof. Dr. Edivaldo Domingues Velini (FCA/UNESP)*

**BOTUCATU - SP
Setembro 2024**

1. Introdução

O controle de plantas daninhas em áreas não agrícolas é essencial para manter a segurança de pessoas e funcionalidade das ferrovias. As ferrovias são um exemplo de área não agrícola que requer controle eficiente de plantas daninhas para garantir a segurança e evitar problemas com a operação dos trens (FRENHANI, 1986).

As plantas daninhas podem crescer rapidamente em áreas próximas às linhas férreas, especialmente em climas quentes e úmidos. As raízes dessas plantas podem penetrar no solo e causar danos aos dormentes, enfraquecendo a estrutura e diminuindo sua vida útil (ANTUNIASSI; VELINI; CAMPOSILVAN, 1996). Além disso, as plantas daninhas podem crescer em torno do trilho, interferindo na tração e causando problemas de segurança (SILVA, 2019). As plantas também podem interferir na sinalização ferroviária, o que pode levar a atrasos e outros problemas de operação.

Entre os exemplos de problemas causados pelas plantas daninhas em ambientes não agrícolas destacam-se: macrófitas em ambiente aquático; crescimento em rodovias e ferrovias; plantas daninhas em áreas de transmissão de energia elétrica; ambientes urbanos, florestas nativas, parques para geração de energia fotovoltaica, entre outros. Especificamente em ferrovias, as plantas daninhas causam os seguintes problemas:

- A vegetação no gabarito da via impede a drenagem da água pelas pedras e britas da via contribuindo para o aumento da umidade e consequente apodrecimento precoce dos dormentes de madeira. Os dormentes são o elo principal de sustentabilidade dos trilhos à plataforma férrea, devendo permanecer em bom estado de conservação, garantindo assim a segurança do transporte de cargas, inclusive as consideradas perigosas;
- A capacidade de suporte de carga da linha, devido à retenção de umidade, fica comprometida e a vegetação alta dificulta a visibilidade, aumentando o risco de acidentes com pedestres e animais silvestres

- A dificuldade na manutenção e substituição da conservação das linhas (trilhos, placas, dormentes, chaves e acessórios) ocultadas pela vegetação e pela água não drenada;
- O encobrimento da sinalização e interferências no funcionamento dos aparelhos de mudança de via pela vegetação;
- A vegetação sobre os trilhos aumenta reduz a tração, dificulta a frenagem, aumenta consumo de combustível e reduz a eficiência logística do sistema.
- Dificuldade de visualização e identificação de possíveis defeitos na linha pelos equipamentos de detecção como ultrassom e carro controle, além das vistorias por rondas, comprometendo a segurança da ferrovia;
- A vegetação acaba escondendo animais peçonhentos ao longo da linha colocando em risco os colaboradores durante a operação e revisão de trens.
- A linha férrea pode ser a porta de entrada de espécies exóticas e de alto risco para as áreas de preservação ambiental. Muitas espécies de plantas daninhas de áreas agrícolas, resistentes a herbicidas, contaminam grãos e são dispersadas nas ferrovias quando há vazamento dos vagões graneleiros, o que é frequente.
- Na época seca, se houver muita biomassa de plantas daninhas, há riscos de incêndios que podem dispersar nas áreas vizinhas. Em 2024 um grande incêndio no Pantanal – MS foi iniciado por descarilhamento de vagões que produziu faíscas e o incêndio das plantas daninhas secas no entorno da linha. O fogo se alastrou para as áreas vizinhas.

2. Objetivo

Monitorar e avaliar riscos ambientais associados ao uso de herbicidas em ferrovia no trecho total com 34 km de via dentro do Parque Estadual da Serra do Mar PESM/SP (Núcleo Curucutu e Itutinga-Pilões).

3. Material e Métodos

O experimento foi instalado no Parque Estadual da Serra do Mar, Estado de São Paulo (23°55'49.59"S / 46°29'15.74"O) em uma área férrea de aproximadamente 35 km de extensão, com seu ponto inicial no km 72 (próximo à estação de evangelista) e Final no Km 102 (próximo ao acesso de Gaspar) (Figura 1).



Figura 1. Imagem Google Earth para orientação espacial do experimento. (Botucatu, 2021)

Para a aplicação de toda área monitorada foi desenvolvido um equipamento específico para aplicação, para assim preservarmos as áreas adjacentes como proposto no projeto. O equipamento foi planejado em parceria entre Rumo e Unesp, sendo o mesmo composto por uma composição (vagão plataforma) (Figura 2) com um tanque de calda de 2000L acoplado, juntamente com um tanque de 3000L de água para posterior preparo de calda no decorrer da aplicação. O sistema de bombeamento é composto por uma bomba Jacto JP 75, com válvula de sucção de um reservatório de 200L onde foi preparada a calda de aplicação e diluição dos produtos.



Figura 2. Etapa inicial de desenvolvimento do equipamento de aplicação. (Rio Claro, 2021).

A barra de pulverização do equipamento foi montada com 3 pontas TTJ08 no centro do equipamento, essas pontas foram responsáveis pela pulverização central nos trilhos, onde ocorre o deslocamento das composições. Nas extremidades para atingirmos uma maior faixa de aplicação foram instalados as pontas $\frac{1}{2}$ XP40 R e L, que são responsáveis pela pulverização de áreas laterais aos trilhos. Esse conjunto de pontas resultaram em uma faixa efetiva de pulverização de 6 metros.

Esse sistema de pulverização com faixa efetiva de 6 metros foi controlado por um regulador de pressão (Teejet 854), que conta com corte de seção em três pontos, sendo canal 2: ponta XP40 esquerda; canal 3: pontas centrais TTJ08 e canal 4: ponta XP40 direita (Figura 3). Foi optado por esse modelo de equipamento pela possibilidade de corte de aplicação em áreas de penhascos laterais, água corrente e demais locais que não seria o objetivo do controle químico da região.

O regulador de pressão variável Teejet 854, tem a função de realizar controle de vazão, que se adequa de acordo com a velocidade de deslocamento da aplicação, desta forma, depositando a mesma quantidade de calda independente da velocidade de deslocamento. A taxa programada para aplicação foi de 200L ha^{-1} , com variação

de velocidade de 12 a 22 km h⁻¹. Esse tipo de equipamento é indispensável quando se atua em áreas férreas, pois a velocidade de deslocamento das composições é variável, sendo assim compensada a vazão pelo controlador em questão (Figura 4).



Figura 3. Disposição de pontas de aplicação com largura efetiva total de 6 metros (Rio Claro, 2021).

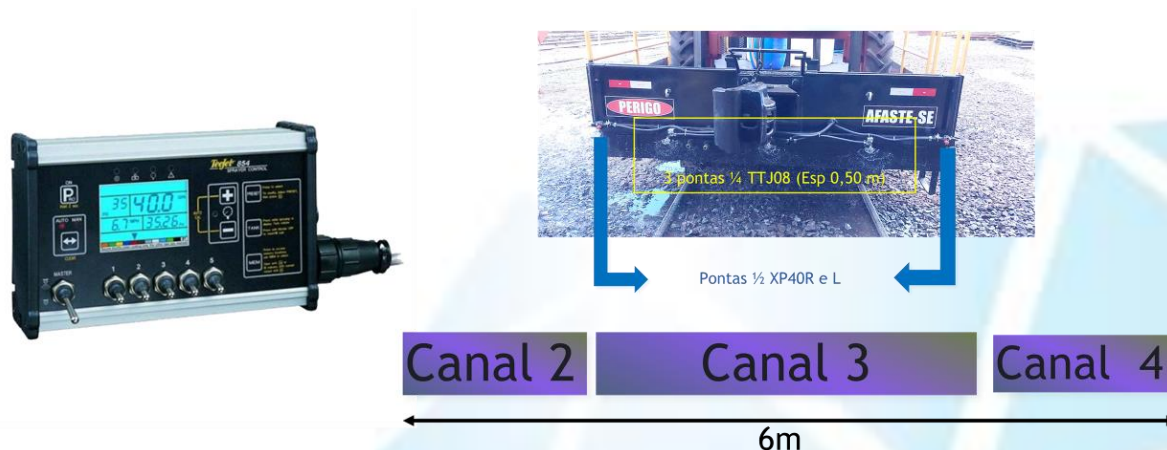


Figura 4. Controlador de vazão e distribuição de canais de pulverização (Botucatu, 2021).



Figura 5. Teste e calibração do equipamento (Rio Claro, 2021)

Na Figura 6 pode-se observar a disposição dos equipamentos que na aplicação foi tracionado por um auto de linha. Já na plataforma de aplicação podem-se visualizar as válvulas, manômetro e atuadores de controle vazão que são interligadas ao equipamento de controle dentro do auto de linha. Foram planejadas também barreiras de contenção na plataforma caso haja algum incidente ou derramamento de herbicida durante o preparo da calda. O sistema contempla um tanque de água limpa (3000L) para preparo de calda; um tanque auxiliar (200L) para preparo de calda e tanque de calda (2000L) já preparada para aplicação e o sistema de barra de aplicação.



Figura 6. ilustração de composição e principais componentes desenvolvidos pelas equipes Rumo / Unesp (Botucatu, 2021)

A aplicação de toda extensão (34km) do Parque Estadual da Serra do Mar foi realizada nos dias: Aplicação 1: 18/02/2021 (Linha 2) e 19/02/2021 (linha 1), com faixa de aplicação de 6 metros e corte das seções laterais, vazão 200 L ha^{-1} , velocidade de controle de 12 a 22 Km h^{-1} ; aplicação foi realizada entre as 8 e 14 horas em ambas as datas com tempo estável, temperatura média de 28° C e umidade de 86%. Aplicação 2: 13/10/2021 (Linha 1 e 2) entre as 9 e 16 horas em ambas as datas com tempo estável, com faixa de aplicação de 6 metros e corte das seções laterais, vazão 200 L ha^{-1} , velocidade de controle de 12 a 22 Km h^{-1} ; temperatura média de 28° C e umidade de 86%.

O tratamento utilizado em toda a área foi glifosato na dosagem de 6 L ha^{-1} (Dunn NA[®]) + imazapir na dosagem de 10 L ha^{-1} (Arsenal NA[®]).



Figura 7. Controlador de teejet 854 durante a aplicação (Botucatu, 2021)

3.1. Coleta de solo e água para monitoramento (Aplicação 1).

As coletas de solo e água após a aplicação foram realizadas aos 15, 45 e 90 dias após a aplicação. As coletas de solo e água foram concentradas fora das áreas de aplicação dos herbicidas, para assim avaliarmos a possibilidade de caminhamento dessas moléculas para fora da área aplicada e possíveis níveis em áreas adjacentes a aplicação (Figura 8). Durante as coletas observou-se o confinamento da aplicação dentro da área de interesse da capina química em função da faixa de controle verificada, resultado esse do desenvolvimento do equipamento que teve como principal objetivo a preservação dessas áreas (Figuras 9, 10, 11 e 12).

No controle de plantas daninhas sobre os trilhos e áreas de interesse observou-se um controle satisfatório em toda extensão do perímetro aplicado. No entanto, devido ao grande trânsito de composições com carregamentos de soja aos 90 DAA foi observada a emergências de novos fluxos de germinação de espécies como soja principalmente, em pontos isolados na área aplicada, fato esse que pode indicar a falta de residual suficiente para controle na camada superior do solo do herbicida imazapyr que foi o pré-emergente utilizado (Figura 14).

Em alguns pontos da área aplicada pode-se observar escape de controle da vegetação, esse fato se dá pela presença de pessoas ou equipes de manutenção no momento da aplicação sendo assim o sistema de aplicação foi totalmente desligado por motivo de segurança (Figura 13).



Figura 8. Coleta de água e solo em áreas adjacentes a aplicação (Botucatu, 2021)

Coordenadas		Amostra		Coordenadas		Amostra	
		Solo	Água			Solo	Água
-23.972.392	-46.651.974	1	1	-23.932.556	-46.492.137	17	17
-23.976.954	-46.630.683	2	2	-23.930.106	-46.472.074	22	27
-23.977.519	-46.621.849	3	3	-23.930.416	-46.473.288		28
-23.969.372	-46.600.378	4	4	-23.930.589	-46.474.014		29
-23.973.157	-46.590.423	5	5	-23.929.981	-46.477.054		30
-2.397.162	-46.579.697	6	6	-23.930.036	-46.477.519		31
-2.396.308	-46.564.116	7		-23.929.668	-46.481.081	23	32
-23.955.158	-46.544.653	8	8	-23.928.308	-46.483.069		33
-23.960.264	-46.498.879	9		-23.928.594	-46.484.505		34
-23.958.192	-46.499.971	10	10	-23.929.026	-46.485.234		35
-23.962.965	-46.494.838		11	-23.929.459	-46.485.815	24	36
-23.929.887	-46.476.512	12	12	-23.964.787	-46.496.398	25	37
-23.930.016	-46.477.598	13	13	-23.962.797	-46.494.879		38
-23.929.624	-46.481.022	14	14	-23.960.212	-46.498.676	26	39
-23.928.304	-46.483.103	15	15	-23.959.735	-46.499.299		40
-23.928.738	-46.484.878		7	-23.959.572	-46.499.409		41
-23.930.275	-46.487.641	16	16	-2.395.734	-46.499.753		42
-23.930.882	-46.489.895		9	-23.957.617	-46.499.835	27	
		Amostra					
Coordenadas (UTM)		Solo	Água				
23k 0332052 7349099		19	19				
23k 0332039 7349375			20				
23k 0332157 7349759			21				
23k 0332260 7350088		22	22				
23k 0332145 7350546			23				
23k 0332214 7350723		24	24				
23k 0332467 7350838			25				
23k 0332807 7351753			26				

Figura 9. Relação de pontos de coleta e coordenadas (Botucatu, 2021)



Figura 10. Controle de plantas daninhas na linha e preservação de áreas adjacentes 15 DAA (Botucatu, 2021)



Figura 11. Controle de plantas daninhas na linha e preservação de áreas adjacentes 15 DAA (Botucatu, 2021)



Figura 12. Controle de plantas daninhas na linha e preservação de áreas adjacentes 15 DAA (Botucatu, 2021)



Figura 13. Controle de plantas daninhas na linha e preservação de áreas adjacentes 30 DAA (Botucatu, 2021)



Figura 14. Estação Acaraú áreas com trânsito de pessoas no momento da aplicação (Botucatu, 2021)



Figura 15. Ponto com escape de controle de soja (Botucatu, 2021).

Nas Figuras 16 e 17, são apresentadas as informações das condições climáticas, temperatura máxima e mínima, umidade relativa e precipitação mensal e acumulada durante a condução do experimento.

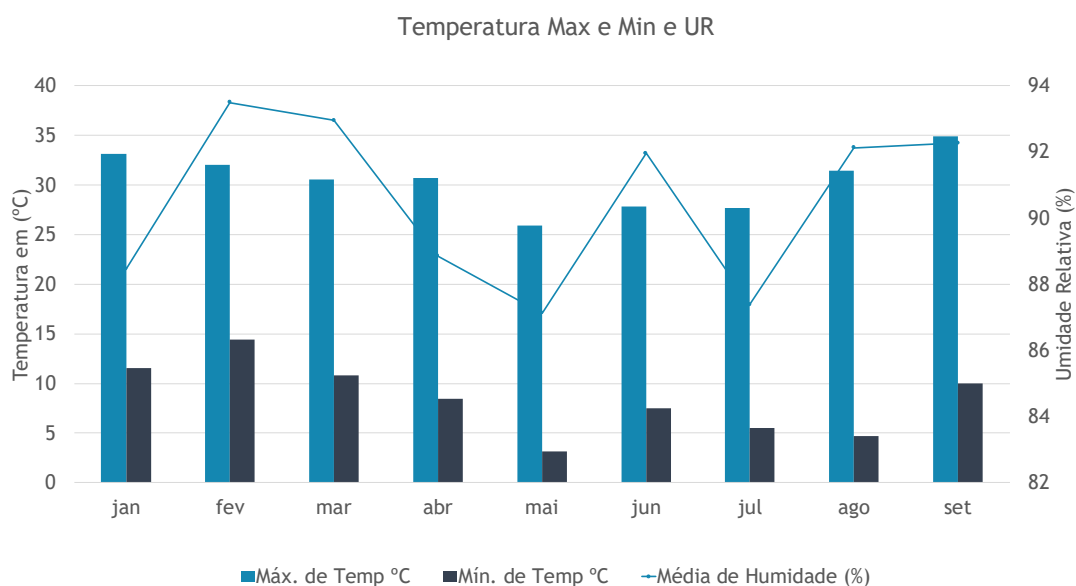


Figura 16. Temperatura máxima, mínima e humidade relativa durante a condução do experimento (Botucatu, 2021).

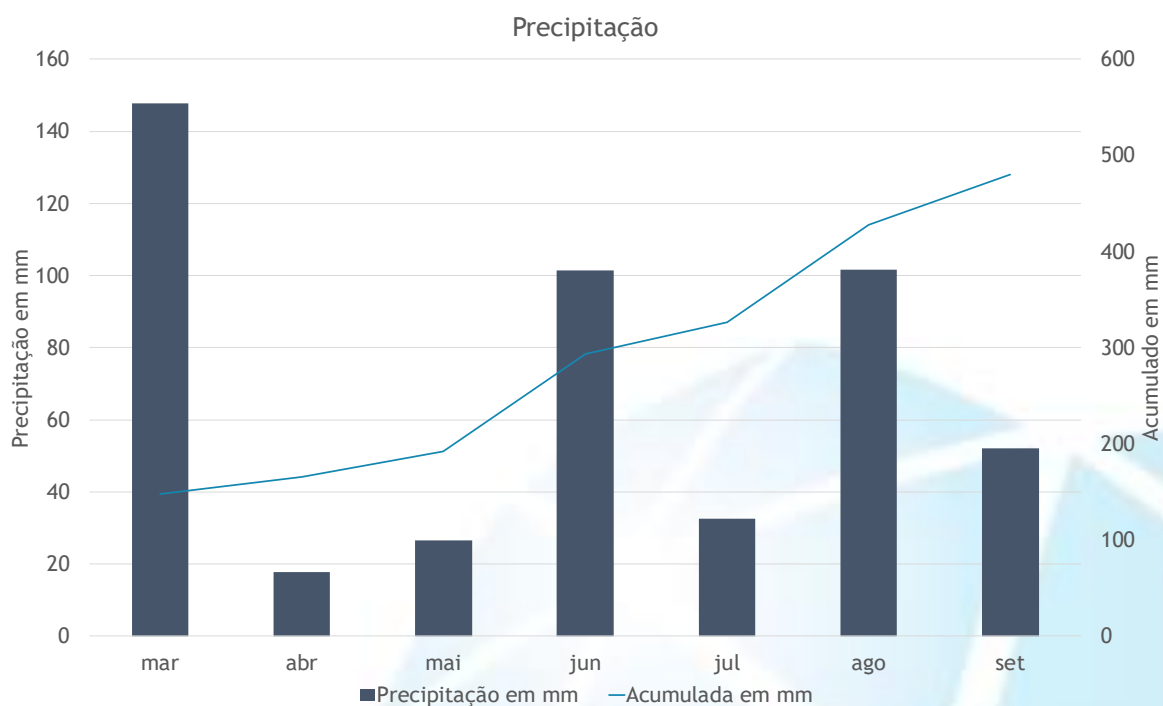


Figura 17. Precipitação mensal e acumulada em mm durante a condução do experimento (Botucatu, 2021).

3.2. Coleta de solo e água para monitoramento (Aplicação 2).

As coletas de solo e água após a aplicação foram realizadas aos 15, 45 e 130 dias após a aplicação. As coletas de solo e água foram concentradas fora das áreas de aplicação dos herbicidas, para assim avaliarmos a possibilidade de caminhamento desses herbicidas para fora da área aplicada e possíveis contaminações em áreas adjacentes a aplicação (Figura 8). Durante as coletas observou-se o confinamento da aplicação dentro da área de interesse da capina química em função da faixa de controle verificada, resultado esse do desenvolvimento do equipamento que teve como principal objetivo a preservação dessas áreas (Figuras 18, 19, 20 e 21).

Para o controle de plantas daninhas sobre os trilhos e áreas de interesse, observou-se um controle satisfatório em toda extensão do perímetro aplicado. No entanto, devido ao grande trânsito de composições com carregamentos de soja, aos 90 DAA foi observada a emergência de novos fluxos de germinação de soja principalmente, em pontos isolados na área aplicada (Figura 22).

Em alguns pontos da área planejada para a aplicação pode-se observar que não houve a aplicação em função da presença de pessoas ou equipes de manutenção no momento da aplicação. Nesses pontos, no dia da aplicação, o sistema de aplicação foi totalmente desligado por motivo de segurança (Figura 13).



Figura 18. Coleta de água e solo em áreas adjacentes a aplicação (Botucatu, 2022)

Coordenadas		Amostra	
		Solo	Água
-23.972.392 -46.651.974		1	1
-23.976.954 -46.630.683		2	2
-23.977.519 -46.621.849		3	3
-23.969.372 -46.600.378		4	4
-23.973.157 -46.590.423		5	5
-2.397.162 -46.579.697		6	6
-2.396.308 -46.564.116		7	
-23.955.158 -46.544.653		8	8
-23.960.264 -46.498.879		9	
-23.958.192 -46.499.971		10	10
-23.962.965 -46.494.838			11
-23.929.887 -46.476.512		12	12
-23.930.016 -46.477.598		13	13
-23.929.624 -46.481.022		14	14
-23.928.304 -46.483.103		15	15
-23.928.738 -46.484.878			7
-23.930.275 -46.487.641		16	16
-23.930.882 -46.489.895			9
-23.932.556 -46.492.137		17	17
-23.930.106 -46.472.074		22	27
-23.930.416 -46.473.288			28
-23.930.589 -46.474.014			29
-23.929.981 -46.477.054			30
-23.930.036 -46.477.519			31
-23.929.668 -46.481.081		23	32
-23.928.308 -46.483.069			33
-23.928.594 -46.484.505			34
-23.929.026 -46.485.234			35
-23.929.459 -46.485.815		24	36
-23.964.787 -46.496.398		25	37
-23.962.797 -46.494.879			38
-23.960.212 -46.498.676		26	39
-23.959.735 -46.499.299			40
-23.959.572 -46.499.409			41
-2.395.734 -46.499.753			42
-23.957.617 -46.499.835		27	
Coordenadas (UTM)		Amostra	
		Solo	Água
23k 0332052 7349099		19	19
23k 0332039 7349375			20
23k 0332157 7349759			21
23k 0332260 7350088		22	22
23k 0332145 7350546			23
23k 0332214 7350723		24	24
23k 0332467 7350838			25
23k 0332807 7351753			26

Figura 19. Relação de pontos de coleta e coordenadas (Botucatu, 2022)



Figura 20. Controle de plantas daninhas na linha e preservação de áreas adjacentes 15 DAA (Botucatu, 2022)



Figura 21. Controle de plantas daninhas na linha e preservação de áreas adjacentes 15 DAA (Botucatu, 2022)



Figura 22. Controle de plantas daninhas na linha e preservação de áreas adjacentes 45 DAA (Botucatu, 2022)



Figura 23. Controle de plantas daninhas na linha e preservação de áreas adjacentes 15 DAA (Botucatu, 2022)



Figura 24. Ponto de coleta Gaspar, áreas com trânsito de pessoas no momento da aplicação – área não aplicada (Botucatu, 2022)



Figura 25. Ponto com escape de controle – pessoas transitando no momento da aplicação (Botucatu, 2022).

Nas Figuras 16 e 17, são apresentadas as informações das condições climáticas, temperatura máxima e mínima, umidade relativa e precipitação mensal e acumulada durante a condução do experimento.

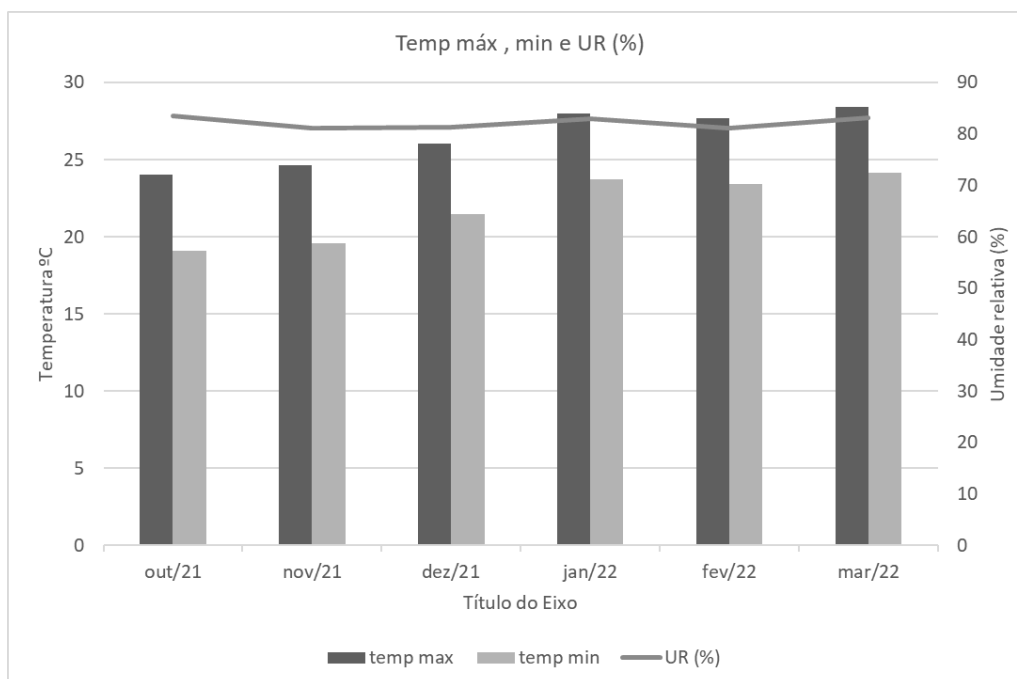


Figura 16. Temperatura máxima, mínima e humidade relativa durante a condução do experimento (Botucatu, 2022).

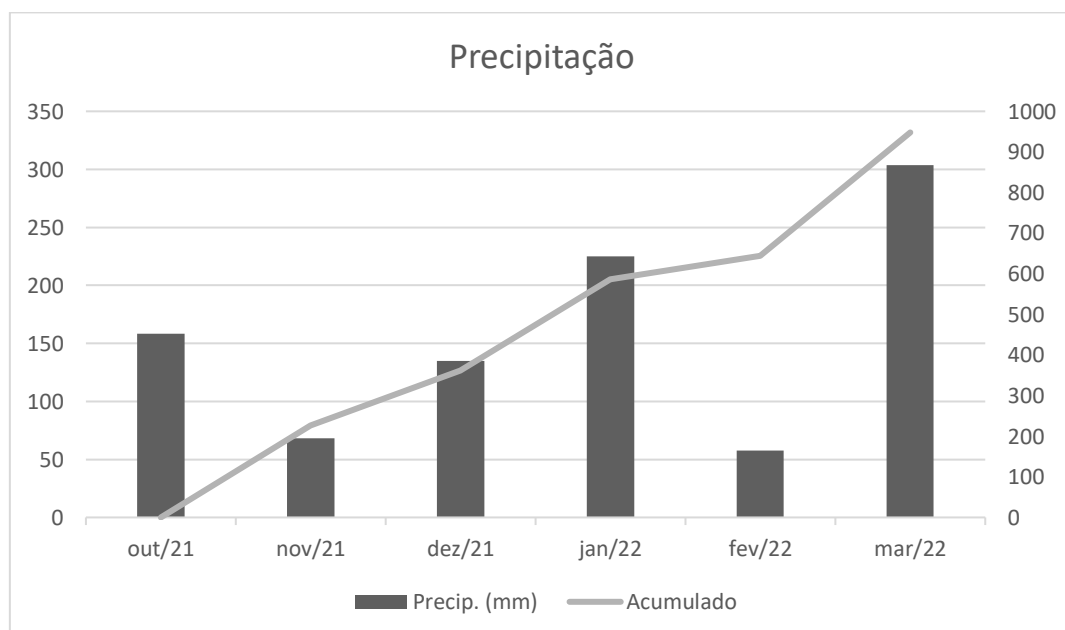


Figura 17. Precipitação mensal e acumulada em mm durante a condução do experimento (Botucatu, 2022).

3.3. Métodos de quantificação.

Para quantificação do herbicida, após a uniformização das amostras de solo, foram pesados 7 g de cada amostra e acondicionadas em cartuchos plásticos com volume total de 10 mL, constituídos por uma pastilha porosa para retenção de partículas de solo e acoplados a um compartimento para a coleta da solução (Carbonari, 2009; Macedo et al., 2020). Os cartuchos foram saturados com água deionizada com quantidade entre 0,8 a 2,0 ml por cartucho (Figura 17). Depois de saturados os cartuchos contendo o solo permaneceram em repouso durante 24 horas a 20°C.



Figura 26. Procedimentos para extração dos herbicidas do solo.

Para a extração da solução do solo, os cartuchos foram centrifugados a 3270 G, a 20°C por 5 minutos (centrífuga Hettich Zentrifugen). A solução presente no

coletor foi filtrada (membrana de PVDF 0,45 μm e 13,0 mm diâmetro) e acondicionada em "vials" de 2,0 mL e armazenados em freezer para posterior quantificação dos herbicidas.

Os herbicidas e alguns metabólitos foram analisados utilizando um sistema LC-MS/MS (Figura 18), composto por um Cromatógrafo Líquido de Alta Eficiência (HPLC) (Shimadzu, Proeminence UFLC, Kyoto, Japão) equipado com duas bombas LC-20AD, auto-injetor SIL-20AC, degazeificador DGU-20A5, sistema controlador CBM-20A e forno CTO-20AC. Acoplado ao HPLC está o espectrômetro de massas 4500, Triple Quad (Applied Biosystems, Foster City, EUA). As análises cromatográficas foram realizadas com uma coluna C18 (Phenomenex Gemini 5 μ C18RP 110Å) utilizando um volume de injeção de 20 μL , com 5 mM de acetato de amônio (Avantor Performance Materials, Inc., Center Valley, PA) em água e 5 mM de acetato de amônio em metanol (Merck KGaA, Darmstadt, Germany). O fluxo utilizado foi de 1,0 mL min^{-1} , a proporção de solventes aumentou gradualmente de 80:20 (água/metanol) para 5:95 aos 4 min e retornou à condição inicial aos 10 min, Foi utilizada fonte de ionização por eletropulverização (ESI) no modo negativo para glyphosate e AMPA. Para os demais herbicidas o fluxo utilizado foi de 0,6 mL min^{-1} , a proporção de solventes aumentou gradualmente de 70:30 (água + 0,1% ácido acético/metanol + 0,1% ácido acético) para 5:95 aos 4 min e retornou à condição inicial aos 10 min.

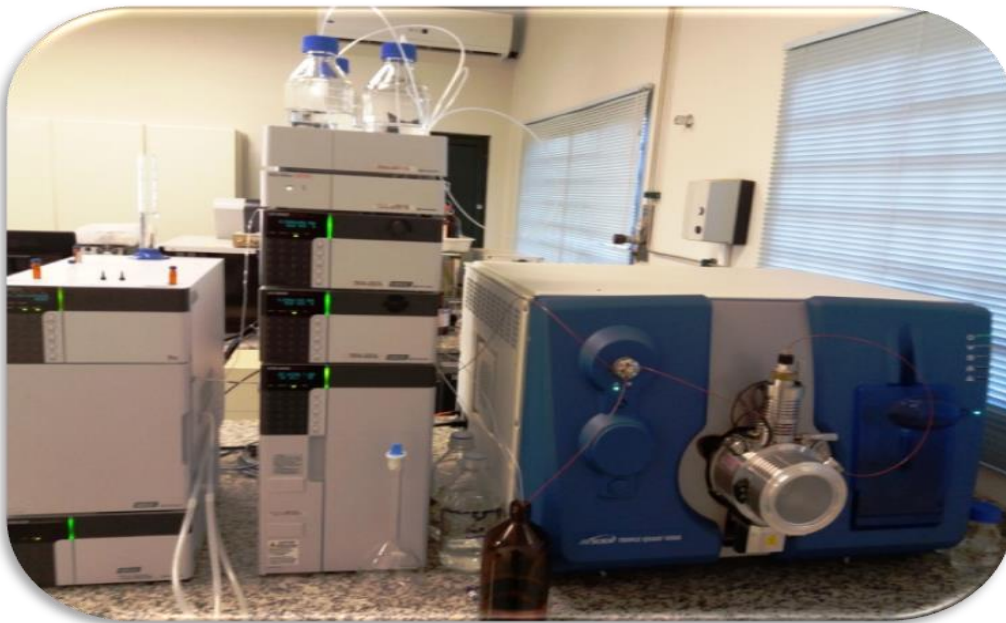


Figura 27. Cromatógrafo líquido (Proeminence UFLC) acoplado ao espectrômetro de massas (Triple Quad 3200) – LC-MS/MS.

4. Resultados.

4.1. Resultados aplicação 1.

4.1.1. Controle de plantas daninhas

O controle geral de plantas daninhas foi realizado de forma visual em 2 km para cada lado dos pontos de acesso aos 15, 45, 90 e 180 dias. O ponto utilizado como referência foram os pontos em que não foram realizadas as aplicações que foram selecionados no momento da aplicação.

Até os 90 dias após a aplicação (DAA) foram observados altos índices de controle com notas acima de 70% de controle, já aos 180 dias os índices de controle observados foram abaixo dos 65% de controle, avaliação essa que enfatiza a necessidade de nova intervenção como prevista no projeto e similar aos níveis de controle encontrados no estudo inicial realizado nos anos de 2020/ 2021 (Figura 28).

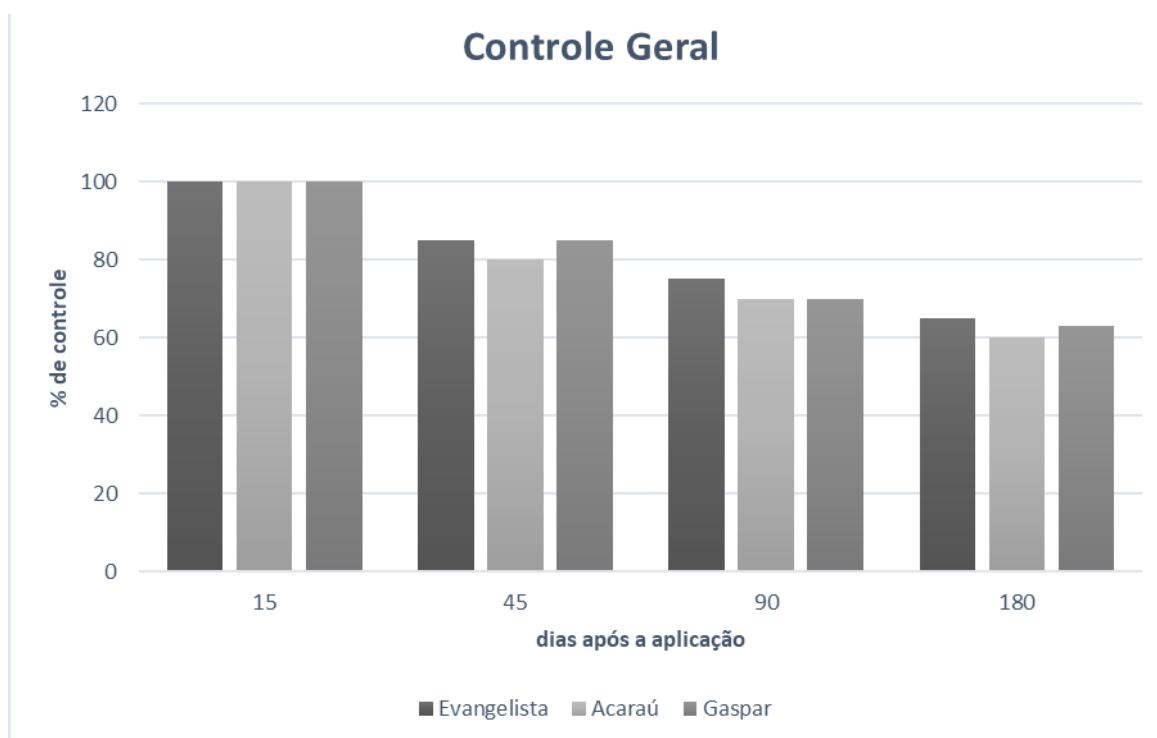


Figura 28. Controle geral de plantas daninha após a capina química aos 15, 45, 90 e 180DAA.

4.1.2. Análises dos herbicidas e metabólitos em água e solo.

Para as análises dos resultados obtidos nas quantificações de água e solo foram utilizados os padrões toxicológicos internacionais disponíveis no Pesticide Properties Database – PPDB https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/atoz_herb.htm (PPDB, 2020) que é um banco de dados relacional abrangente de dados de identidade química, físico-química, saúde humana e ecotoxicológica de pesticidas. Ele foi desenvolvido pela Unidade de Pesquisa em Agricultura e Meio Ambiente (AERU) da Universidade de Hertfordshire para uma variedade de usuários e para dar suporte a avaliações e gerenciamento de riscos.

Estudo toxicológicos ou testes de longa duração são aqueles em que os animais são observados durante toda a sua vida ou boa parte desta, e nos quais a exposição do material de teste ocorre em todo ou boa parte do tempo de observação. Os resultados desses estudos são expressos em termos de níveis de dose em que

são observados efeitos específicos ou nos quais não há efeito. Neste último caso, o resultado é expresso pelo termo NOEL (acrônimo da expressão em inglês *No Observable Effect Level*), que a legislação define como "nível de uma substância administrada a um grupo de animais experimentais, no qual os efeitos observados nos níveis superiores estão ausentes e nenhuma outra diferença significativa entre os animais expostos e não expostos é observada". Esses estudos, segundo Stützer e Guimares (2003), têm por finalidade analisar os efeitos observados em animais de laboratório para, posteriormente, fazer sua extrapolação para espécie humana.

As concentrações dos diferentes herbicidas foram confrontadas com as concentrações seguras para o organismo mais sensível na base de estudos ecotoxicológicos de cada herbicida (PPDB, 2020). Sendo para o Imazapyr os valores referência são: Fish - Chronic 21 day NOEC (mg l^{-1}) 43.1 PPM ou 43100 PPB e Earthworms - Acute 14 day LC_{50} (mg kg^{-1}) 133 PPM ou 133000 PPB.

Para as quantificações de possíveis resíduos após a aplicação da capina química podemos observar que nas áreas adjacentes coletadas durante o monitoramento tanto em água quanto em solo não foi encontrado o herbicida glyphosate nas amostras analisadas, fator esse que se dá pela característica do composto de apresentar baixa persistência no ambiente, sendo o mesmo indisponível para quantificação mesmos nos mais sensíveis métodos utilizados.

Já para o herbicida imazapyr foram encontrados traços na maioria das amostras coletadas, no entanto, quando comparado com o fator NOEC do PPDB (Fish-Chronic 21 days) os níveis encontrados em água correspondem a 0,32% maior dose utilizada para avaliar o NOEC. Desta forma, a máxima concentração observada durante o período de avaliação do monitoramento foi muito inferior ao limite seguro para os organismos mais sensíveis da maior dose utilizada do herbicida (Figura 28).

Na figura 29, podemos observar os resultados dos pontos de coleta sem a interferência do limite de PPDB, o que se pode observar é que aos 45 DAA os traços de maior intensidade do composto em água foram detectados nos pontos Acaraú e Gaspar. Uma suposição é o fato de ser uma região movimentada com deslocamento de pessoas e manutenção na via regularmente.

O mesmo comportamento das análises realizadas em água foi observado em solo, com índices muito distantes dos níveis de NOEC, sendo a detecção em solo máxima observada 0,02% do limite estabelecido (Earthworms - Acute 14 day LC₅₀). Aos 45 DAA também foi observado comportamento similar as amostragens de água sendo a região de Acaraú e Gaspar com os maiores índices encontrados devido a movimentação e manutenção na região, mas sempre com níveis bem abaixo dos parâmetros utilizados (Figuras 28 e 32).

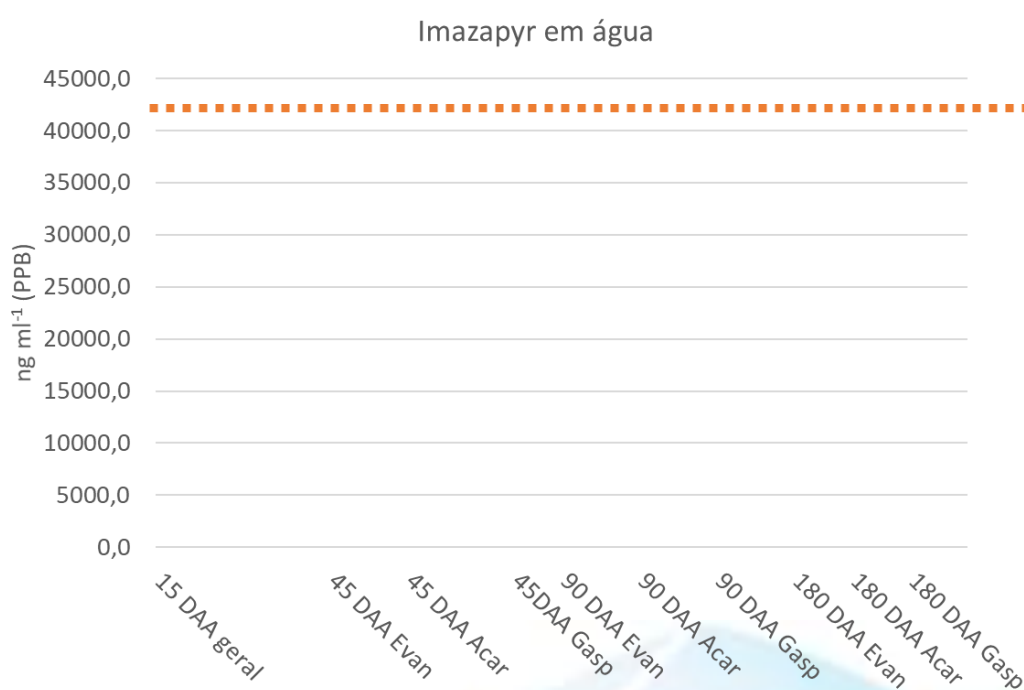


Figura 29. Concentrações de Imazapyr em amostras de água aos 15, 45, 90 e 180DAA após a capina química. Linha tracejada em vermelho corresponde ao limite seguro para o organismo mais sensível (PPDB, 2020).

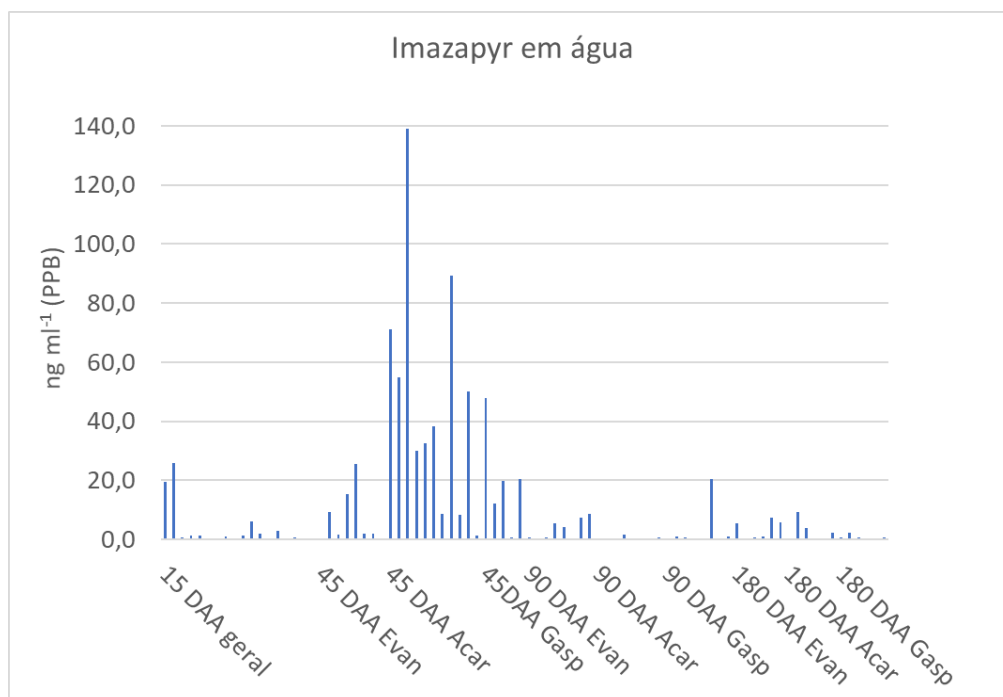


Figura 30. Concentrações de imazapyr (ppb) nas amostras de água nos diferentes pontos amostrados aos 0, 45, 90 e 180 DAA. Observação: O intervalo das ordenadas foi reduzido para permitir a visualização dos dados que foram muito inferiores aos que poderiam ser associados a limites ainda seguros (NOEC) conforme a figura anterior.

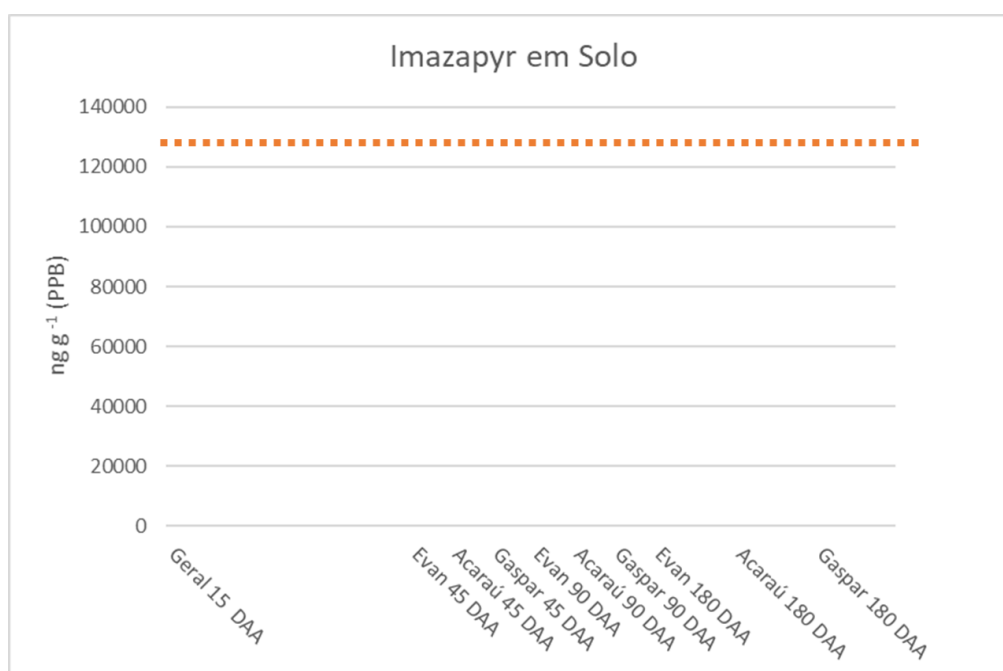


Figura 31. Concentrações de imazapyr (ppb) nas amostras de solo nos diferentes pontos amostrados aos 0, 45, 90 e 180 DAA. Linha tracejada em vermelho corresponde ao limite seguro para o organismo mais sensível (PPDB, 2020).

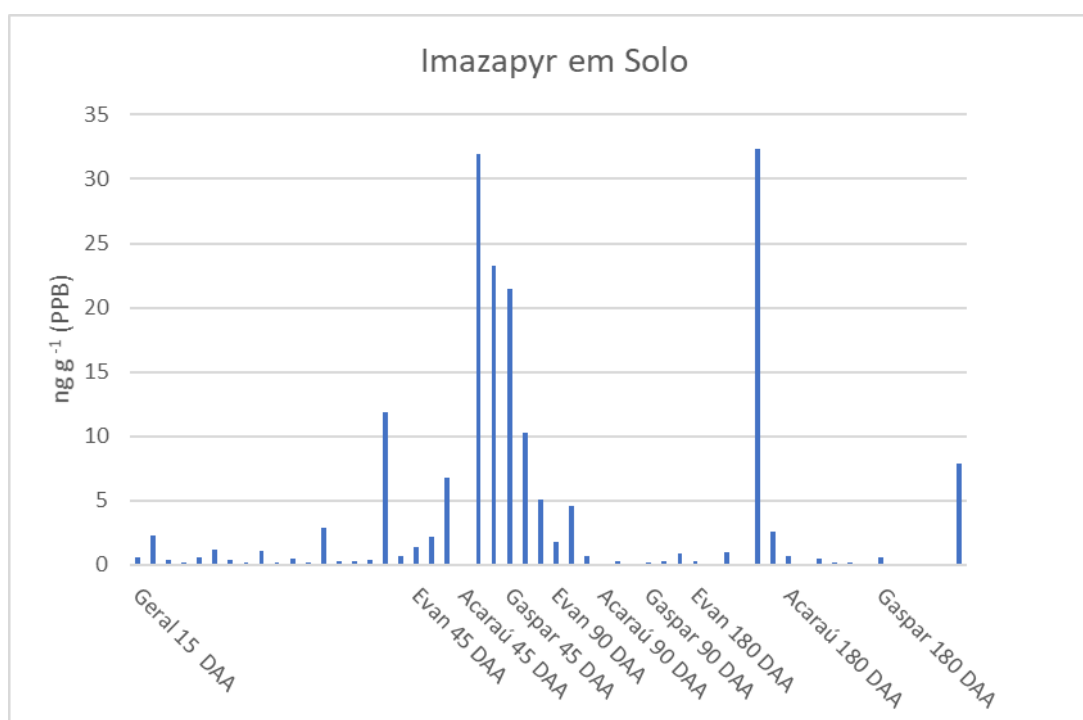


Figura 32. Concentrações de imazapyr (ppb) nas amostras de solo nos diferentes pontos amostrados aos 0, 45, 90 e 180 DAA. Observação: O intervalo das ordenadas foi reduzido para permitir a visualização dos dados que foram muito inferiores aos que poderiam ser associados a limites ainda seguros (NOEC) conforme a figura anterior.

4.2. Resultados aplicação 2.

4.2.1. Controle de plantas daninhas

Aos 15 e 45 DAA foram observados altos níveis de controle nas áreas aplicadas. Já aos 130 dias foram observados uma redução de controle das plantas daninhas, abaixo de 60 %. Tal fato está relacionado à degradação do herbicida imazapyr que tem efeito residual no solo, conforme foi observado no estudo inicial (Aplicação 1). Para fins de comparação os resultados de controle no ciclo 1, aos 180 DAA foi ao redor de 65%. As elevadas precipitações e temperaturas durante o ciclo 2 de aplicação, promoveram uma redução no residual do herbicida e desta forma optou-se pela reaplicação da área após a avaliação de 130 DAA.

A aplicação em épocas úmidas deverá ser realizada com maior frequência (períodos de intervalos mais curtos entre aplicações), no entanto, em épocas mais secas esse intervalo entre as aplicações é maior o que permite um ciclo anual de controle com duas aplicações anuais.

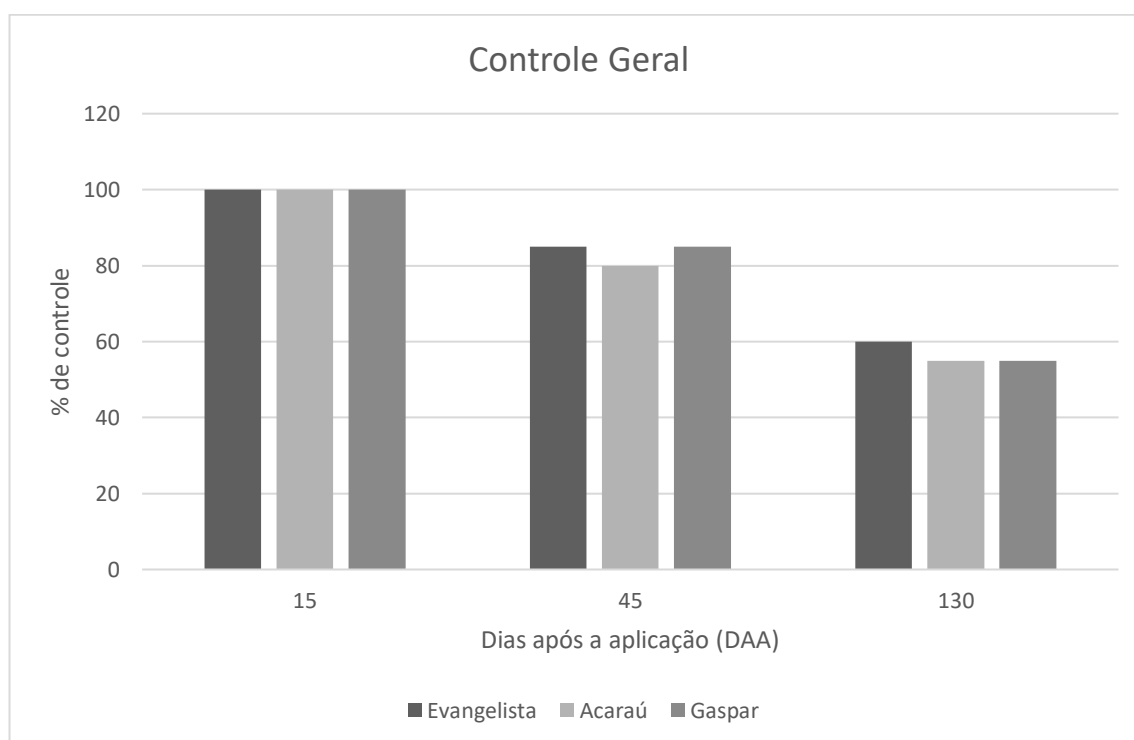


Figura 33. Controle geral de plantas daninha após a capina química aos 15, 45, 130 DAA.

4.2.2. Análises dos herbicidas em água e solo.

Para as análises dos resultados obtidos nas quantificações de água e solo foram utilizadas as informações ecotoxicológicas disponíveis no Pesticide Properties Database – PPDB https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/atoz_herb.htm (PPDB, 2024) que é um banco de dados relacional abrangente de dados de identidade química, físico-química, saúde humana e ecotoxicológica de pesticidas. Ele foi desenvolvido pela Unidade de Pesquisa em Agricultura e Meio Ambiente (AERU) da Universidade de Hertfordshire para uma variedade de usuários e para dar suporte a avaliações e gerenciamento de riscos.

Estudos toxicológicos ou testes de longa duração são aqueles em que os animais são observados durante toda a sua vida ou boa parte desta, e nos quais a exposição do material de teste ocorre em todo ou boa parte do tempo de observação. Os resultados desses estudos são expressos em termos de níveis de concentrações

em que são observados efeitos específicos ou nos quais não há efeito. Neste último caso, o resultado é expresso pelo termo NOEL (acrônimo da expressão em inglês *No Observable Effect Level*), que a legislação define como "nível de uma substância administrada a um grupo de animais experimentais, no qual os efeitos observados nos níveis superiores estão ausentes e nenhuma outra diferença significativa entre os animais expostos e não expostos é observada". Esses estudos, segundo Stützer e Guimares (2003), têm por finalidade analisar os efeitos observados em animais de laboratório para, posteriormente, fazer sua extrapolação para espécie humana.

As concentrações dos diferentes herbicidas foram confrontadas com as concentrações seguras para o organismo mais sensível na base de estudos ecotoxicológicos de cada herbicida (PPDB, 2020). Na Tabela 2 estão apresentados os valores de referência do NOEC para os organismos mais sensíveis para cada herbicida.

Tabela 1. NOEC (No Observed Effect Concentration) para os organismos mais sensíveis para cada composto analisado.

Organismo mais sensível			NOEC	mg/L
imazapyr	Fish	Chronic 21 Day NOEC		43,1
glyphosate	Fish	Chronic 21 Day NOEC		1,000
AMPA	Algae	Acute 72 hours EC50 growth		200

Para as quantificações de resíduos dos herbicidas após a aplicação dos podemos observar que nas áreas adjacentes amostradas durante o monitoramento, tanto da água quanto do solo, não foi encontrado o herbicida glyphosate e seu metabólito AMPA. O glyphosate apresenta baixa persistência no ambiente e tem elevada sorção aos colóides do solo, tornando-o indisponível no solo.

Para o herbicida imazapyr foram encontradas baixas concentrações na maioria das amostras coletadas. No entanto, quando comparado com o NOEC para o organismo mais sensível (Fish-Chronic 21 days), a maior concentração encontrada em água, correspondeu a 0,32% do NOEC. Desta forma, a máxima concentração

observada durante o período de avaliação do monitoramento foi muito inferior ao limite seguro para o organismo mais sensível a este herbicida.

Nas figuras 21 e 22, podemos observar os resultados das concentrações do imazapyr nas diferentes amostras (pontos) de água e solo coletadas, respectivamente. Aos 15 DAA as maiores concentrações observadas em água foram detectadas nos pontos Acaraú e Gaspar.

O mesmo comportamento foi observado em solo, com concentrações muito inferiores aos valores de NOEC. A máxima concentração observada foi equivalente a 0,02% do NOEC para minhocas (Earthworms - Acute 14 day LC₅₀). Aos 45 DAA também foi observado comportamento similar as amostragens de água sendo a região de Evangelista com as maiores concentrações encontradas. Essa é uma região com maior movimentação e manutenção, ainda assim, as concentrações encontradas não oferecem riscos ambientais (Figuras 34 e 36).

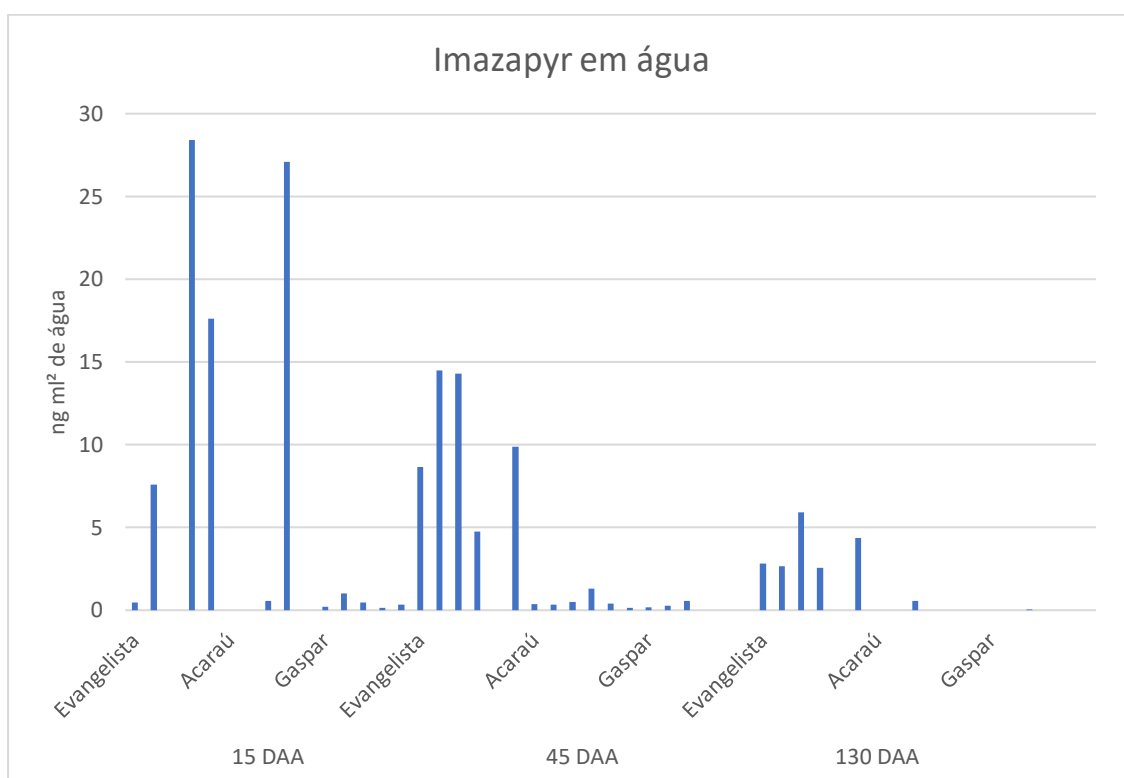


Figura 34. Concentrações de imazapyr (ppb) nas amostras de água nos diferentes pontos amostrados aos 15, 45 e 130 DAA

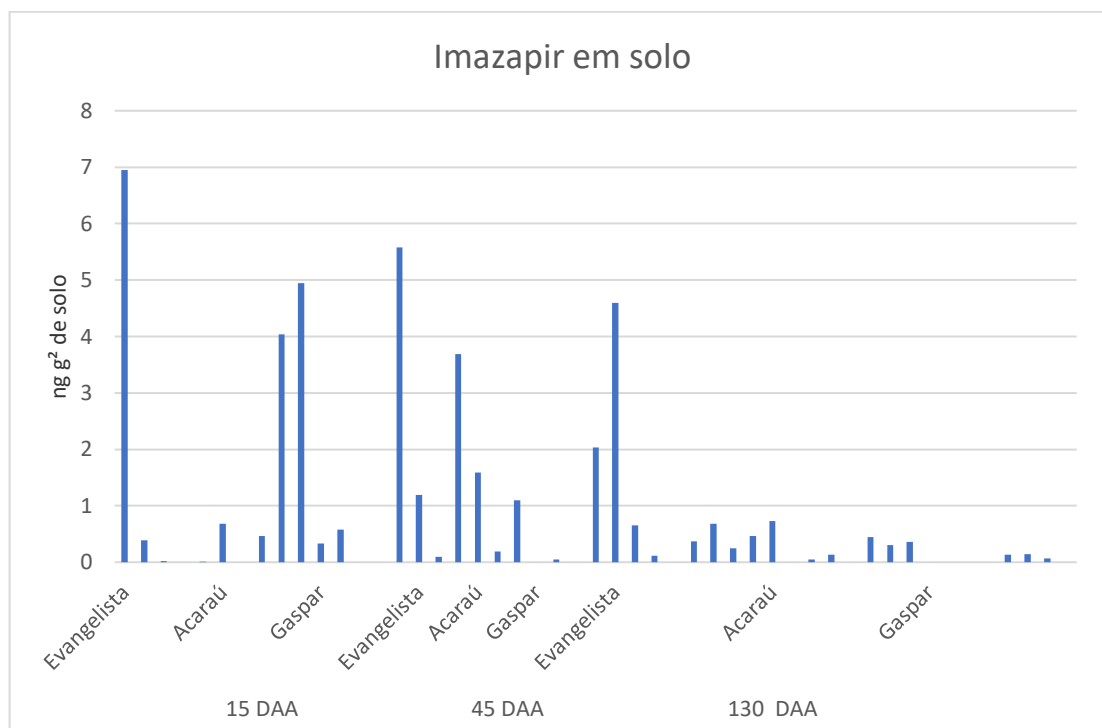


Figura 35. Concentrações de imazapir (ppb) nas amostras de solo nos diferentes pontos amostrados aos 15, 45 e 130 DAA

Na figura 36 estão apresentados os resultados das quantificações médias de imazapir por época de coleta. As concentrações encontradas são muito baixas e não oferecem riscos nas condições em que foi realizada a aplicação. Ainda assim, devido a elevada sensibilidade do método analítico e a quantificação desses resíduos foi determinada a curva de dissipação do imazapir nas áreas aplicadas.

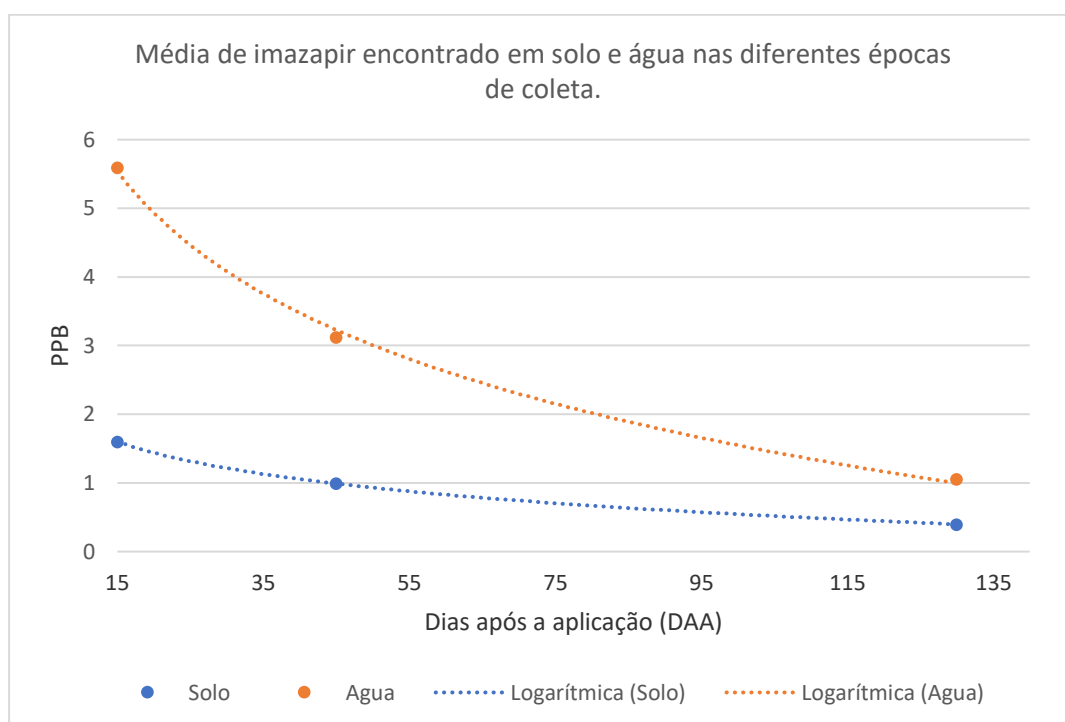


Figura 36. Médias das concentrações de imazapir por período de coleta em solo e água nos diferentes pontos amostrados aos 15, 45 e 130 DAA.

5. Conclusões

O uso dos herbicidas imazapir + Glyphosate nas condições operacionais mostrou-se seguro, sendo dissipados no solo e sem promover a contaminação do entorno das áreas de aplicação, seguindo o comportamento conforme estudo prévio realizado no ano de 2020. O mesmo comportamento foi observado na segunda aplicação da etapa 2.

De forma geral a reinfestação da área deu-se aproximadamente 180 e 130 dias após aplicação, aplicação 1 e 2, respectivamente. A partir desta reinfestação foi realizada uma nova aplicação para início de um novo ciclo de coletas e monitoramento no dia 13 de outubro de 2021. A diferença de tempo de controle entre as duas aplicações se deu pelo fato da diferença de regime hídrico entre elas.

6. Referências

ANTUNIASSI, Ulisses R.; VELINI, Edivaldo D.; CAMPOSILVAN, Daniel. Viabilidade econômica dos sistemas manual e mecanizado de aplicação de herbicidas em ferrovias. *Planta Daninha*, v. 14, p. 14-25, 1996.

FRENHANI, Ariltom Antonio. Efeitos do imazapyr no controle de plantas daninhas em áreas não agrícolas, e no controle da tiririca (*Cyperus rotundus* L.) e da grama-seda (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.). 1986. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SILVA, Francisco Gildemir Ferreira da; MACAMBIRA, José Kleber; ROCHA, Carlos Henrique. Medindo a eficiência produtiva do transporte por ferrovias brasileiras: uma aplicação dos modelos DEA e Tobit. 2019.

STÜTZER, Gottfried; GUIMARÃES, Guilherme. Aspectos toxicológicos e ambientais relacionados com o uso de produtos fitossanitários. Zambolim L, Conceição MZ, Santiago T, organizadores. O que os engenheiros agrônomos devem saber para orientar o uso de produtos fitossanitários. Viçosa: UFV, p. 69-84, 2003.