

DANIEL RESENDE FONTES

**EFICÁCIA AGRONÔMICA E COMPORTAMENTO DO INDAZIFLAM EM SOLOS
COM ADIÇÃO DE COBERTURAS ORGÂNICAS NO CAFEIEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal), para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Kassio Ferreira Mendes

Coorientador: Marcelo Rodrigues Reis

**RIO PARANAÍBA - MINAS GERAIS
2023**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Universidade Federal de Viçosa - Campus Rio Paranaíba

T

F683e
2023
Fontes, Daniel Resende, 2023-
Eficácia agrônômica e comportamento do Indaziflam em solos com adição de coberturas orgânicas no cafeeiro / Daniel Resende Fontes. – Rio Paranaíba, MG, 2023.
103 f.: il. (algumas color.).

Orientador: Kássio Ferreira Mendes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Agronomia, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvcrp.2023.012>

1. Pré-emergência. 2. Controle Químico. 3. Manejo Integrado. I. Mendes, Kássio Ferreira, 1990-. II. Universidade Federal de Viçosa. Agronomia. Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal). III. Título.

771

DANIEL RESENDE FONTES

**EFICÁCIA AGRONÔMICA E COMPORTAMENTO DO INDAZIFLAM EM SOLOS
COM ADIÇÃO DE COBERTURAS ORGÂNICAS NO CAFEIEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal), para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 24 de agosto de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 DANIEL RESENDE FONTES
Data: 04/01/2024 08:10:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Daniel Resende Fontes
Autor

Documento assinado digitalmente
 KASSIO FERREIRA MENDES
Data: 20/12/2023 14:59:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Kassio Ferreira Mendes
Orientador

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, expresso minha gratidão a Deus por sempre iluminar meu caminho, concedendo saúde e sabedoria até a conclusão desta importante fase em minha vida.

À minha amada esposa, Carla Timoteo Fontes, que tem sido minha companheira incansável, sempre me apoiando e cuidando de nossa filha, permitindo que eu me dedicasse a realizar este sonho.

À minha querida filha, Liz Timoteo Fontes, cuja luz e amor puro têm sido compartilhados generosamente.

Aos meus pais, Helvecio Agostinho Fontes e Vera Lúcia Resende Fontes, que sempre acreditaram em minha vitória.

À minha irmã, Susana Fontes Struiving, meu cunhado, Tiago Struiving, e minha sobrinha, por estarem sempre torcendo e apoiando a conclusão deste projeto profissional.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realizar o mestrado e contribuir para minha formação acadêmica.

Ao programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da UFV – Campus Rio Paranaíba, pela oportunidade de adquirir conhecimentos e contribuir com pesquisas relevantes para a sociedade.

Ao professor Kassio Ferreira Mendes, pela orientação, confiança e inestimáveis ensinamentos ao longo desse ciclo.

Aos professores Antônio Alberto da Silva e Francisco Cláudio Lopes de Freitas, pelas valiosas sugestões.

À Bayer CropScience, pelo apoio financeiro que tornou possível a condução desta pesquisa.

Agradeço a todos os membros do grupo de Manejo Integrado de Plantas Daninhas pela convivência, conselhos e amizade ao longo dos anos.

Esta conquista é fruto de um esforço coletivo!

Grato a todos!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

FONTES, Daniel Resende, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2023. **Eficácia agronômica e comportamento do indaziflam em solos com adição de coberturas orgânicas no cafeeiro.** Orientador: Kassio Ferreira Mendes. Coorientador: Marcelo Rodrigues Reis.

O Brasil lidera a produção, exportação e consumo de café. As plantas daninhas que competem com o cafeeiro por recursos devem ser manejadas. Herbicidas são frequentemente utilizados na cultura do café, porém, é crucial selecionar o herbicida adequado, considerando fatores como estágio de desenvolvimento das plantas daninhas, fase da cultura e tipo de solo. A escolha criteriosa maximiza a eficácia agronômica e minimiza os impactos ambientais. O indaziflam é um herbicida amplamente utilizado nessa cultura, mas ainda existem lacunas de conhecimento sobre seu comportamento e interações com diferentes condições do solo e cobertura vegetal. Assim, o objetivo do presente estudo foi avaliar a eficácia agronômica, dinâmica da comunidade daninha, efeito residual, dissipação e lixiviação do indaziflam em solos com duas coberturas na cultura do café. As duas coberturas estudadas são comumente utilizadas na cultura do café, uma formada por restos culturais denominada cisco e outra formada por palha com adição de esterco de galinha denominado composto orgânico, ambas aplicadas na dose de 5 t ha⁻¹. Os estudos de eficácia agronômica, efeito residual e dissipação foram realizados em duas fazendas em Rio Paranaíba, MG, Brasil (Latosolo Vermelho muito argiloso - IPACER e Latossolo Vermelho argiloso - Glória) com aplicação de 75 g i.a. ha⁻¹ do indaziflam e foram realizadas avaliações do controle da comunidade de plantas daninhas usando notas de nível de injúria. Além disso, foram medidos o tempo de meia-vida residual (RL₅₀) através das notas de injúria ao longo do tempo, e o tempo de meia-vida da dissipação (DT₅₀) por meio de quantificação dos resíduos de indaziflam por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC). Em experimentos em casa de vegetação, a lixiviação do indaziflam foi avaliada em colunas de PVC preenchidas com os diferentes solos e coberturas, utilizando a soja como planta bioindicadora da presença do herbicida. O RL₅₀ do indaziflam foi superior a 180 dias após a aplicação (DAA), e o herbicida mostrou-se eficiente no controle (>80%) da comunidade de plantas daninhas por mais de 100 DAA para todos os solos e coberturas utilizados. A DT₅₀ variou de 135 a 161 dias no Latossolo Vermelho muito

argiloso nas duas coberturas estudadas. Enquanto a DT₅₀ variou de 95 a 119 dias no Latossolo Vermelho argiloso. A lixiviação do indaziflam foi limitada no perfil do solo, causando altos níveis de injúrias e grandes reduções no acúmulo de biomassa da soja na profundidade de 0-5 cm. Nas camadas de 5-10 cm os níveis de injúria foram de 20-30% e a partir de 15 cm não foi detectada nenhuma injúria na cultura da soja para todos os solos e coberturas com simulação de 100 mm de chuva após aplicação do herbicida. De modo geral, as coberturas não influenciaram nenhuma das variáveis estudadas, e a utilização das coberturas cisco e composto orgânico não alteraram a eficácia agrônômica, efeito residual, dissipação e lixiviação do indaziflam nos solos estudados. Nesse sentido, as coberturas podem ser utilizadas, nas condições do presente estudo, sem prejudicar o desempenho agrônômico do indaziflam e podem auxiliar na proteção do solo e no manejo de plantas daninhas. Entretanto, são necessários mais estudos variando doses de cobertura e indaziflam com diferentes tipos de solo para entender melhor a dinâmica da interação tripla entre coberturas, solo e indaziflam.

Palavras-chave: Pré-emergência. Controle químico. Manejo integrado. Plantas daninhas.

ABSTRACT

FONTES, Daniel Resende, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August 2023. **Agronomic efficacy and behavior of indaziflam in soils amended with organic covers in coffee cultivation.** Advisor: Kassio Ferreira Mendes. Co-advisor: Marcelo Rodrigues Reis.

Brazil leads in coffee production, exportation, and consumption. Weeds that compete with coffee plants for resources must be managed. Herbicides are commonly used in coffee cultivation; however, it is crucial to select the appropriate herbicide, considering factors such as the developmental stage of weeds, crop growth phase, and soil type. Prudent selection maximizes agronomic efficacy while minimizing environmental impacts. Indaziflam is a widely used herbicide in this crop, but there are still knowledge gaps regarding its behavior and interactions with different soil conditions and vegetation cover. Therefore, the aim of this study was to assess agronomic efficacy, weed community dynamics, residual effects, dissipation, and leaching of indaziflam in soils with two different covers in coffee cultivation. The two covers studied are commonly used in coffee cultivation: one consisting of crop residues known as "cisco," and the other composed of straw with the addition of chicken manure, referred to as "organic compost," both applied at a rate of 5 t ha⁻¹. Agronomic efficacy, residual effects, and dissipation studies were conducted on two farms in Rio Paranaíba, MG, Brazil, one with a very clayey Oxisol (IPACER) and the other with a clayey Oxisol (Glória). A dose of 75 g a.i. ha⁻¹ of indaziflam was applied, and weed control was assessed using injury level ratings. Additionally, the residual half-life (RL₅₀) was determined over time through injury ratings, and the dissipation half-life (DT₅₀) was quantified using high-performance liquid chromatography (HPLC) to measure indaziflam residues. In greenhouse experiments, leaching of indaziflam was assessed in PVC columns filled with different soils and covers, using soybeans as a bioindicator of herbicide presence. RL₅₀ for indaziflam exceeded 180 days after application (DAA), and the herbicide effectively controlled (>80%) weed communities for over 100 DAA in all soils and covers used. DT₅₀ ranged from 135 to 161 days in the very clayey Oxisol for both covers studied, while it varied from 95 to 119 days in the clayey Oxisol. Indaziflam leaching was limited in the soil profile, causing high levels of injury and significant reductions in soybean biomass accumulation at a

depth of 0-5 cm. In the 5-10 cm layers, injury levels were 20-30%, and no injury was detected in the soybean crop from 15 cm depth onward for all soils and covers after simulating 100 mm of rain following herbicide application. Overall, the covers did not influence any of the variables studied, and the use of cisco and organic compost covers did not alter the agronomic efficacy, residual effects, dissipation, and leaching of indaziflam in the soils studied. Thus, under the conditions of this study, covers can be used without compromising the agronomic performance of indaziflam and may assist in soil protection and weed management. However, further studies are required to investigate variations in cover and indaziflam doses with different soil types to better understand the dynamics of the tripartite interaction between covers, soil, and indaziflam.

Keywords: Pre-emergence. Chemical control. Integrated management. Weeds.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	10
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1	Cultura do café: Manejo de plantas daninhas	13
2.2	Aplicação de herbicidas em pré-emergência	15
2.3	Características gerais do indaziflam e eficiência de controle de plantas daninhas 20	
3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25
4	CAPÍTULO 1. EFICÁCIA AGRONÔMICA, DINÂMICA DA COMUNIDADE INFESTANTE DE PLANTAS DANINHAS E EFEITO RESIDUAL DO INDAZIFLAM EM SOLOS COM DUAS COBERTURAS NA CULTURA DO CAFÉ.....	32
4.1	INTRODUÇÃO.....	36
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	38
4.2.1	Locais de estudo.....	38
4.2.2	Delineamento experimental	39
4.2.3	Coberturas do solo.....	40
4.2.4	Aplicação do indaziflam	41
4.2.5	Efeito residual do indaziflam no solo.....	42
4.2.6	Análises estatísticas dos dados do nível de injúria e efeito residual	42
4.2.7	Eficácia agronômica do indaziflam e dinâmica da comunidade infestante de plantas daninhas	42
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.3.1	Eficiência de controle da comunidade infestante e tempo de meia-vida residual do indaziflam.....	45
4.3.2	Composição florística da comunidade infestante.....	49
4.3.3	Índice de valor de importância	52
4.3.4	Índice de Similaridade.....	57
4.4	CONCLUSÕES	59
4.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

5	CAPÍTULO 2. DISSIPAÇÃO E LIXIVIAÇÃO DO INDAZIFLAM EM SOLOS COM DUAS COBERTURAS NA CULTURA DO CAFÉ.....	64
5.1	INTRODUÇÃO.....	68
5.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	71
5.2.1	Dissipação do indaziflam.....	71
5.2.2	Estudo de lixiviação do indaziflam.....	78
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	80
5.3.1	Estudo de dissipação do indaziflam.....	80
5.3.2	Estudo de lixiviação do indaziflam no solo.....	88
5.4	CONCLUSÕES.....	97
5.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil ocupa uma posição de destaque como o maior produtor, exportador e o segundo maior consumidor mundial de café (EMBRAPA, 2020). A produção brasileira representa, em média, cerca de um terço da safra global, com aproximadamente 60% dessa produção sendo destinada à exportação (IBGE, 2022).

A utilização de tecnologias tem desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento da agricultura brasileira nos últimos anos, e esse avanço também é evidente na cafeicultura. O manejo integrado de pragas, doenças e plantas daninhas, a nutrição adequada do cafeeiro, as podas e condução das lavouras, a irrigação e o desenvolvimento de novas variedades têm chave para tornar o Brasil mais competitivo nessa cultura (RONCHI et al., 2003).

No contexto específico do cultivo do cafeeiro no Cerrado brasileiro, uma região importante para a produção, o manejo das plantas daninhas assume um destaque significativo (RONCHI et al., 2003). Embora o cafeeiro seja considerado uma planta robusta, ele é sensível à competição com as plantas daninhas. Essas plantas indesejadas são altamente eficientes na absorção de luz, extração de nutrientes e água do solo, o que lhes confere um rápido desenvolvimento e, conseqüentemente, representam um risco para a produtividade das lavouras se não forem adequadamente controladas (RONCHI e SILVA, 2003).

O uso de herbicidas é comum na lavoura cafeeira, porém, para obter rendimento e eficácia ideais, o agricultor deve escolher criteriosamente o herbicida apropriado. Aspectos como a comunidade de plantas daninhas, grau de infestação, estágio de desenvolvimento, fase da cultura, tipo de solo, época de aplicação, toxicologia do herbicida, custo, equipamentos e mão-de-obra especializada devem ser considerados para maximizar a eficiência e minimizar os impactos no meio ambiente (BLANCO, 2004).

Quando aplicados em pré-emergência, os herbicidas precisam estar biodisponíveis para que as plantas os absorvam, e um dos processos que determinam a biodisponibilidade é a sorção. Esse processo envolve a atração e ligação do herbicida aos coloides do solo. As principais características do herbicida que interferem nesse processo são: solubilidade em água (S_w), coeficiente de partição octanol-água (K_{ow}), constante de dissociação ácida ou básica (pK_a/pK_b) e coeficiente de sorção normalizado para o teor de carbono orgânico do solo (K_{oc}). As

características do solo que podem interferir na sorção são: teor de matéria orgânica (MO), pH, teor de argila, umidade, capacidade de troca catiônica (CTC) (FREITAS et al., 2014). Entretanto, podem ocorrer outros processos de retenção, transporte e transformação dos herbicidas no ambiente que regem a dissipação dos mesmos, como adsorção, absorção e precipitação; lixiviação, escoamento superficial (*runoff*), erosão, volatilização; e degradação luminosa, biológica e química, que são mediados por condições edafoclimáticas e tornam o herbicida indisponível para as plantas daninhas (GERSTL, 2000). Outro fator importante a ser discutido é o tempo de persistência, pois irá afetar o efeito residual de controle das daninhas ou o risco para causar injúrias nas culturas em rotação/sucessão. A presença de MO desempenha um papel fundamental na sorção de herbicidas e na redução da lixiviação desses compostos. Para aumentar o conteúdo de MO no solo, uma estratégia eficaz é o uso de coberturas orgânicas.

A aplicação de material orgânico no solo após a colheita, no período de setembro a novembro, é uma prática bastante comum na cafeicultura. Os materiais orgânicos mais utilizados são: palha de café, esterco bovino e de galinha, "cisco" (restos vegetais do café triturado no recolhimento mecanizado), composto (esterco + palha). A matéria orgânica (MO) exerce um papel fundamental na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, tendo um impacto direto ou indireto na sua fertilidade (MALAVOLTA, 2006). Além disso, a presença de MO contribui para o arejamento e a permeabilidade do solo, resultando em uma maior capacidade de retenção de umidade, o que é benéfico para as plantas. A MO também atua como uma fonte de nutrientes, liberando-os de forma lenta e gradual, e aumenta a CTC do solo, favorecendo a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Isso pode interferir na eficiência agrônômica de herbicidas aplicados diretamente no solo, como o indaziflam.

Como mencionado anteriormente, no manejo nutricional do cafeeiro, é comum a aplicação anual de compostos orgânicos no solo. Na cultura do café, tem sido notada uma tendência crescente no uso de herbicidas em pré-emergência, como o indaziflam. Por ser uma prática recente no Brasil, ainda há lacunas de conhecimento em relação à eficiência de controle, efeito residual e lixiviação do indaziflam em solos com coberturas orgânicas. Estudos científicos são fundamentais para preencher essas lacunas e fornecer informações precisas para um manejo sustentável e eficaz de plantas daninhas na cafeicultura.

O indaziflam está registrado no Brasil para aplicações em pré-emergência em diversas culturas perenes (MAPA, 2022), e atua na inibição da biossíntese da parede celular (GUERRA et al., 2013; BRABHAM et al., 2014). O indaziflam pertence ao grupo químico alkylazine, possui longo efeito residual no controle de plantas daninhas, meia-vida superior a 150 dias (BROSNAN et al., 2012), baixa solubilidade em água ($S_w = 2,8 \text{ mg L}^{-1}$ a 20°C) e comportamento ácido ($pK_a = 3,5$) (U.S. EPA, 2010).

O controle de plantas daninhas monocotiledôneas e dicotiledôneas em estágios iniciais com indaziflam é altamente eficaz (CLARCK et al., 2020; SEBASTIAN et al., 2019). Estudos com herbicidas derivados de ácidos fracos, como o indaziflam, demonstraram que esses compostos são mais sorvidos em solo com maiores teores de MO (BARCELLOS JÚNIOR et al., 2020). Portanto, o indaziflam se mostra promissor no manejo eficiente e sustentável de plantas daninhas, proporcionando soluções para manejo adequado em diferentes cultivos. O objetivo do presente estudo foi avaliar a eficiência agronômica, efeito residual, dissipação e lixiviação do indaziflam em duas coberturas de solo na cultura do café em dois locais na região do Alto do Paranaíba – MG.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura do café: Manejo de plantas daninhas

O café (*Coffea* sp.) é uma cultura de grande importância no Brasil. Aproximadamente 37% da produção mundial de café é proveniente do Brasil. O país possui a maior área plantada, correspondendo a 1.873.197,9 hectares em 2023, dividido entre as espécies Arábica e Conilon. De acordo com a CONAB, a produção total alcançou 59,2 milhões de sacas em 2023 e Minas Gerais é o estado que possui maior área plantada (1.083.601 hectares) e produção (25,7 milhões de sacas) (CONAB, 2023).

As lavouras de café estão amplamente distribuídas pelas cinco regiões geográficas do Brasil, abrangendo 16 estados e envolvendo 1.448 municípios produtores de café, o que corresponde a cerca de 26% de todos os municípios brasileiros (IBGE, 2022). Além do desenvolvimento tecnológico, o país também se destaca pela disponibilidade de terras e mão-de-obra, fatores que contribuem para torná-lo competitivo no cenário internacional. Devido à natureza intensiva em tecnologia do cultivo, a produção de café gera empregos e renda significativos, especialmente considerando as diversas atividades ao longo da cadeia do produto, e contribui para um superávit na balança comercial, favorecendo o desenvolvimento econômico do país.

O sucesso econômico na cultura do café depende do controle dos fatores de produção como o controle adequado de plantas daninhas, para não somente alcançar altos índices de produtividade, mas também preservar a saúde do solo e prolongar a vida útil dos cafeeiros (ALCANTARA e SILVA, 2010). A fase inicial do desenvolvimento da lavoura de café e a fase de crescimento exigem tratamentos culturais distintos, o que torna o manejo da cultura complexo (DO NASCIMENTO et al., 2020). Entretanto, o manejo de plantas daninhas é indispensável em ambas as fases, visando minimizar reduções na produtividade, que podem chegar a quase 95% (MORAIMA et al., 2000; LEMES et al., 2010). As plantas daninhas devem ser manejadas para preservar o crescimento de ramos e a produção de frutos de forma eficiente (RONCHI, 2011).

O cafeeiro, sendo uma planta perene, é sensível à competição imposta pelas plantas daninhas, o que acarreta redução no crescimento das plantas durante a

formação da lavoura ou redução na produtividade das lavouras já formadas devido a competição por água, luz e nutrientes (ALFONSI et al., 2005; RONCHI e SILVA, 2006).

O manejo de plantas daninhas ocorre durante todo o ciclo produtivo do café, começando no preparo do solo para as mudas do viveiro, depois no período de formação, durante os dois primeiros anos após o transplante, e no período de produção da cultura.

As plantas de café apresentam uma taxa de crescimento inicial lenta, o que prejudica a cobertura da área (DAMATTA et al., 2010; RONCHI et al., 2001). Esse fato torna a cultura do café sensível à competição com plantas daninhas, principalmente durante a fase juvenil (formação) (RONCHI et al., 2018). Como resultado, podem ocorrer reduções no crescimento e na produção do café, sendo o controle de plantas daninhas indispensável, mas também com altos custos associados (RONCHI e SILVA, 2001).

O Período Crítico de Prevenção à Interferência (PCPI) das plantas daninhas em culturas perenes refere-se a época do ano em que a competição é mais intensa, e a ocorrência de plantas daninhas resultará em grandes reduções no crescimento ou na produção do café (SILVA e RONCHI, 2004). Em Minas Gerais, o PCPI abrange toda a época das chuvas durante os meses de outubro a março, estendendo-se desde o florescimento até a frutificação do café (BLANCO et al., 1982).

Na fase de produção do cafezal, geralmente é realizado o manejo de plantas daninhas em toda a entrelinha da cultura ou apenas sob a saia do cafeeiro em faixas de 1 metro de cada lado (MATIELLO et al., 2016). Essa prática tem como objetivo controlar as plantas daninhas de forma eficiente, mantendo a área próxima ao cafeeiro livre de competição, o que contribui para um crescimento saudável e produtivo das plantas de café.

O cafeeiro, para o seu bom desenvolvimento, requer a manutenção da área do solo ao redor do caule, sob a projeção da copa, livre de plantas daninhas. Essa prática previne a competição com plantas daninhas na cultura do café, além de permitir a ciclagem de nutrientes na entrelinha (SILVA e RONCHI, 2004). É importante ressaltar que a maioria do sistema radicular do cafeeiro se concentra na região próxima ao caule da planta (ALFONSI et al., 2005). Portanto, manter essa

área limpa é essencial para promover o crescimento e produtividade adequada do cafeeiro.

O manejo de plantas daninhas pode ser feito por diferentes métodos. Na cultura do café, é possível destacar o controle preventivo, físico, cultural, biológico, mecânico e químico. O controle químico é muito utilizado e considerado uma necessidade na cultura do café devido sua alta eficiência e praticidade. No entanto, é essencial ter conhecimento das características do produto a ser utilizado para garantir maior eficiência na aplicação (RONCHI, 2001). O uso criterioso e responsável de herbicidas é fundamental para promover reduções nos impactos ambientais negativos e compatibilizar com a produção sustentável do café.

Por fim, o conhecimento da composição florística da comunidade de plantas daninhas é a primeira etapa o manejo adequado da lavoura porque relaciona características qualitativas e quantitativas da comunidade vegetal, ou seja, relaciona as espécies ocorrentes, o número de indivíduos e a densidade de plantas daninhas na área.

2.2 Aplicação de herbicidas em pré-emergência

A utilização de herbicidas em pré-emergência (PRÉ) é empregada nas fases de desenvolvimento inicial de sistemas de produção para controle eficiente de plantas daninhas (BUSI et al., 2020). As principais vantagens dos herbicidas aplicados em PRÉ estão relacionadas ao efeito residual para controle de vários fluxos de emergência de plantas daninhas, prevenção de interferências nas fases iniciais de estabelecimento e desenvolvimento da cultura, além de aumentar a janela e flexibilidade para o controle em pós-emergência (PÓS) (MONQUERO et al., 2008; SANTIN et al., 2019). Em muitos casos a utilização de herbicidas em PRÉ reduz os custos com controle químico, pois são necessárias menos aplicações de herbicidas em PÓS. A aplicação em PRÉ também aumenta a eficiência de herbicidas aplicados em PÓS de modo sequencial na cultura. Como consequência do controle de plantas daninhas mais eficiente no início do ciclo da cultura e melhor estabelecimento, ocorre aumento na produtividade da cultura (SUSHA, 2018).

As condições ambientais durante a aplicação e permanência do herbicida influenciam seu comportamento e destino (MENDES et al., 2013). Herbicidas com ação em PRÉ requerem umidade adequada no solo para que ocorra a germinação

das plantas daninhas e absorção do herbicida presente na solução do solo (OLIVEIRA JR., 2011).

Outra questão relevante é a possível presença de barreiras que interferem na chegada das gotas pulverizadas ao solo, sendo a mais conhecida a palhada. As características como baixa solubilidade em água (S_w), e alta lipofilicidade (K_{ow}), presentes em alguns herbicidas, reduzem sua transposição pela palhada (ROSSI et al., 2013; SILVA e MONQUERO, 2013). Essas particularidades destacam a importância de compreender as condições ambientais e as características dos herbicidas utilizados em aplicações em PRÉ para maximizar sua eficácia no controle de plantas daninhas e garantir um manejo sustentável no cultivo de café.

A cultura do café possui alguns herbicidas com registro em PRÉ, sendo os mais utilizados: o oxyfluorfen, utilizado para controle de mono e dicotiledôneas, que apresenta tempo de meia-vida da degradação (DT_{50}) de até 40 dias, mas pode ter efeito residual por seis meses (RODRIGUES e ALMEIDA, 2018). A degradação deste herbicida ocorre principalmente por meio de fotólise, portanto em áreas sujeitas a maior sombreamento e umidade o período residual do oxyfluorfen é maior (RODRIGUES e ALMEIDA, 2018). Além disso, em solos com altos teores de MO e argila, a sorção do oxyfluorfen é alta devido sua interação com os colóides do solo, tornando-o menos disponível para o controle de plantas daninhas (WAUCHOPE et al., 1992; WSSA, 1994). Outro herbicida utilizado na cultura do café é o sulfentrazone, que apresenta mobilidade moderada e persistência prolongada no solo, com uma meia-vida (DT_{50}) entre 110 e 280 dias (HATZIOS, 1998; MARTINEZ et al., 2008; RODRIGUES e ALMEIDA, 2018). Por sua vez, o flumioxazin possui baixa solubilidade em água, com DT_{50} de 22 dias (RODRIGUES e ALMEIDA, 2018). Essas características ressaltam a importância de considerar a sorção e persistência dos herbicidas no solo ao escolher as estratégias de manejo no cultivo de café, visando a proteção da cultura e a preservação do meio ambiente.

As interações do herbicida com a matriz do solo ocorrem de maneira singular, de modo que a dissipação se torna um processo dinâmico e particular para cada combinação de herbicida e solo (ROCHA et al., 2013). O tempo que o herbicida está ativo no solo para controle de plantas daninhas é denominado efeito residual, e o mesmo pode ser determinado por meio da DT_{50} . Os processos de sorção e as degradações por via microbiana, química e fotólise interferem na DT_{50} do herbicida (FERRI e VIDAL, 2003; CHRISTOFFOLETI et al., 2009).

Os estudos por meio de bioensaios são as técnicas mais comuns para detectar resíduos biologicamente ativos de herbicidas no solo e determinar seu efeito residual e persistência no ambiente (BLANCO et al., 2010). Os parâmetros geralmente avaliados são níveis de injúria por meio de avaliação visual, mas também podem ser utilizadas medições diretas como percentual de germinação ou acúmulo de biomassa ou peso de grãos, permitindo estimar a DT_{50} e dissipação do herbicida (MENDES et al., 2014; PINTAR et al., 2017).

A lixiviação do herbicida no solo é influenciada pelas condições edafoclimáticas e por características como solubilidade em água e lipofilicidade, que determinam sua capacidade de movimentação no solo (MANCUSO et al., 2011). O processo de lixiviação é importante para o bom controle de plantas daninhas, pois é necessário que o herbicida também alcance as camadas até 10 cm de profundidade onde se encontra mais de 95% de todo o banco de sementes (DOS REIS et al., 2017). No entanto, o herbicida não deve ser lixiviado para camadas mais profundas para evitar redução na eficiência de controle e contaminação de lençóis freáticos (MONQUERO et al., 2008; AMIM et al., 2016).

A quantidade de chuvas afeta o comportamento do herbicida, principalmente no que se refere a lixiviação, persistência e eficácia agronômica. A ocorrência de chuvas torrenciais poucas horas após a aplicação do herbicida pode aumentar perdas por lixiviação e run-off, principalmente quando o herbicida é muito solúvel (CHRISTOFFOLETI et al., 2009; SILVA et al., 2019). Apesar disso, a infiltração e distribuição uniforme do produto no solo não ocorre quando o mesmo está seco e teores adequados de umidade devem ser atendidos. O teor de água necessária depende de características do solo, do próprio herbicida, da lavoura em questão e da comunidade de plantas daninhas presentes na área (CHRISTOFFOLETI et al., 2009; LEWAN et al., 2009).

A MO no solo se divide em substâncias humificadas e não humificadas. Os ácidos húmicos, encontrados nas substâncias húmicas, possuem grupos funcionais oxigenados que retêm herbicidas. O teor de MO no solo influencia a capacidade de sorção de herbicidas, resultando em menor lixiviação para aqueles com alta sorção. A MO tem papel relevante nesse processo (OLIVEIRA e BRIGHENTI, 2011), principalmente para herbicidas com baixa S_w , em que a MO é o principal sítio de sorção (KAWAMOTO e URANO, 1989). Os coloides de argila também podem contribuir para a sorção desses herbicidas, porém em menor intensidade (VIVIAN et

al., 2007; INOUE et al., 2008; ROCHA et al., 2013). Resíduos culturais podem interagir e reter os herbicidas tanto quanto o solo, mas essa capacidade depende da polaridade do herbicida, pois herbicidas mais polares tendem a ficar menos retidos nos restos culturais (NEGRISIOLI, 2005). Assim, herbicidas mais solúveis em água tendem a interagir menos com a palhada (SILVA, 2018). O flumioxazim, por exemplo, apresenta alta afinidade a compostos lipofílicos ($K_{ow} = 2,55$) e baixa solubilidade em água ($S_w = 1,79 \text{ mg L}^{-1}$ a 25°C) (SILVA et al., 2019), o que indica baixa mobilidade em resíduos vegetais (RODRIGUES e ALMEIDA, 2018).

A MO exerce uma forte influência na retenção de herbicidas não polares no solo, enquanto a argila e o pH do solo desempenham um papel significativo na sorção de herbicidas polares ou ionizáveis (CHENG, 1990). De modo geral, os teores de argila e MO são diretamente proporcionais ao potencial de sorção do solo, onde maiores teores desses componentes refletem em maior sorção dos herbicidas e menor biodisponibilidade na solução do solo, afetando a eficácia agrônômica dos herbicidas (REGITANO et al., 2001; INOUE et al., 2007, MELO et al., 2010).

A eficácia agrônômica do flumioxazin no controle de plantas daninhas é reduzida quando há muita cobertura vegetal no solo, provavelmente pela formação de barreira física para que o herbicida atinja o solo, devido suas características lipofílicas (DA SILVA, 2019). O material orgânico pode interagir de diferentes formas com o herbicida e afetar diferentes aspectos do comportamento do produto como aumentar a sorção, diminuir a lixiviação e degradação; ou, dependendo do tipo de material orgânico, pode haver maior atividade microbiana que promoverá maior degradação do herbicida (TAKESHITA et al., 2019).

Informações sobre o destino e comportamento de transporte de herbicidas aplicados em PRÉ são necessárias para minimizar o risco de injúria fora do alvo da planta (JEFFRIES et al., 2014). Estudos relataram diminuição da lesão de indaziflam em grama bermuda com o aumento dos teores de MO e argila em condições de laboratório (JONES et al., 2013a e 2013b). Outra informação relevante, segundo Gomes (2019), a redução dos efeitos do indaziflam no sistema radicular nos tratamentos em que foi utilizado esterco bovino pode estar associada ao aumento da comunidade microbiana na rizosfera das plântulas. Além disso, Alonso et al. (2016) ao estudar a sorção de indaziflam em solos com adição de MO, avaliando o comportamento deste herbicida em diferentes solos, concluem que a sorção deste herbicida está diretamente correlacionada com o aumento da MO do solo. Neste

estudo, a adição de MO, na forma de esterco, pode ter reduzido a disponibilidade do herbicida na solução do solo próximo às mudas, diminuindo assim seus danos ao sistema radicular (GOMES et al., 2019).

O K_{oc} (coeficiente de sorção normalizado pelo teor de carbono orgânico) do herbicida é uma propriedade físico-química que exerce grande influência no período residual das moléculas de herbicida e indica a afinidade do herbicida com a MO (PRIMEL et al., 2005). Alonso et al. (2011) demonstraram uma correlação positiva do teor de MO no solo e a sorção do indaziflam, já que o indaziflam apresenta uma sorção considerada moderada a forte (ATSDR, 1992) com um K_{oc} de 1544 g mL^{-1} . Outros herbicidas lipofílicos e de baixas S_w (INOUE et al., 2008; TOMPKINS, 2010), também demonstraram comportamento semelhante ao indaziflam (FREITAS et al., 1999; ALISTER e KOGAN, 2010; INOUE et al., 2010; LIU et al., 2010; ROCHA et al., 2013).

O potencial de lixiviação e a biodisponibilidade de herbicidas na solução do solo para plantas e microrganismos é reduzido em solos com altos teores de MO e argila (INOUE et al., 2008). Outro fator importante é a ocorrência de chuvas e o próprio manejo da irrigação,

A ocorrência de precipitações e o manejo de irrigação são fatores que também devem ser levados em consideração pois afetam a lixiviação, uma vez que o movimento vertical de infiltração da água no perfil do solo pode carrear principalmente herbicidas de alta solubilidade, aumentando seu potencial de lixiviação (MARTINI et al., 2011). Portanto, é essencial estar atento ao processo de lixiviação de herbicidas, pois ele pode influenciar a seletividade e a eficácia de controle das plantas daninhas pelo produto químico, além de representar um possível agente de contaminação de corpos d'água.

A persistência do herbicida no solo também é afetada pelas características do solo como origem do material, tipo da fração argila e teor de MO (WEBER et al., 2004). Além disso, o clima do local e dose do herbicida aplicada também desempenham um papel importante na sorção, dessorção e formação de metabólitos, determinando a permanência da molécula no solo (KRAEMER et al., 2009). Os compostos resultantes da degradação microbiana são geralmente metabólitos do produto parental ou, quando ocorre mineralização completa, CO_2 e H_2O , além de resíduos ligados (KÄSTNER, 2000; YOUNG e CRAWFORD, 2004).

O indaziflam é um herbicida de amplo espectro de controle com atividade na PRÉ e PÓS inicial de plantas daninhas, destacando-se por ser especialmente eficaz em monocotiledôneas (AMIM et al., 2014). Sua seletividade é mais direcionada a culturas semiperenes e perenes, demonstrando menor seletividade para espécies de ciclo curto e proveniente de sementes. Estudos realizados com culturas como milho, milho, sorgo, girassol, algodão, beterraba e pepino evidenciaram que essas espécies foram sensíveis quando semeada em áreas previamente tratadas com indaziflam, resultando na não emergência das plântulas (GUERRA et al., 2013). De acordo com as características físico-químicas do indaziflam (Tabela 1), esse herbicida pode ser classificado como uma molécula de baixa solubilidade em água (S_w), apresentando uma moderada mobilidade e uma alta persistência no solo. Essas características são cruciais para seu efeito residual prolongado, tornando-o uma ferramenta valiosa no manejo de áreas agrícolas e na proteção das culturas cultivadas.

Tabela 1 - Características físico-químicas da molécula de indaziflam.

Características	Valores
Nome químico (IUPAC)	<i>N</i> -[(1 <i>R</i> ,2 <i>S</i>)-2,3-dihidro-2,6-dimethyl-1H-inden-1-yl]-6-[(1 <i>R</i>)-1-fluoroethyl]-1,3,5-triazine-2,4-diamine
Nome comum	Indaziflam
Número CAS	950782-86-2
Fórmula molecular	C ₁₆ H ₂₀ FN ₅
Massa molecular	301,36 g mol ⁻¹
Classe	Herbicida
Grupo	Alkylazine
Ponto de fusão	183 °C
Pressão de vapor (PV) a 20 °C	2,5 x 10 ⁻⁰⁵ mPa
Constante da lei de Henry à 25 °C (K _H)	2,69 x 10 ⁻⁰⁶ (Pa m ³ mol ⁻¹)
Solubilidade em água (S _w)	2,8 mg L ⁻¹ (20°C)
Coefficiente de partição ácido (pK _a)	3,5 (à 25 °C)
Coefficiente octanol-água (K _{ow})	6,31 x 10 ⁻² (pH 7, 20°C)

Coeficiente de sorção normalizado pelo teor de carbono orgânico (K_{oc})	1000 L Kg ⁻¹
Tempo de meia-vida da degradação no solo (DT_{50})	150 dias

Fonte: Adaptado de PPDB (2023).

O indaziflam possui comportamento de um ácido fraco (pK_a de 3,5) o que significa que seu comportamento é fortemente influenciado pelo pH do solo em que é aplicado (ALONSO et al., 2011). Quando o pH do solo é maior que o valor de pK_a do herbicida a sorção tende a ser reduzida pela predominância da forma dissociada aniônica do herbicida que é repelida pelas cargas negativas do solo (EL MADANI et al., 2003). Por outro lado, quando os valores de pH do solo está próximo ao pK_a do indaziflam, o herbicida estará mais na forma molecular, o que aumenta sua sorção (SILVA et al., 2013).

A quantidade e disponibilidade de sítios de sorção nos solos podem variar sob diferentes condições físicas e químicas, afetando a retenção e mobilidade do herbicida. Essas variações influenciam diretamente na eficiência agrônômica do indaziflam e no potencial de contaminação, tornando essencial a compreensão desses processos para um posicionamento mais eficiente do produto em práticas agrícolas (REFATTI et al., 2015).

Os resultados do estudo conduzido por Savaris et al. (2019) demonstraram que o indaziflam apresentou efeito residual por até 100 dias. Esses achados corroboram com os resultados obtidos por Guerra et al. (2014), os quais observaram que baixas doses do indaziflam (20 g ha⁻¹) impediram a emergência do pepino em solo de textura franco argilo-arenosa. Essas evidências reforçam a persistência e o potencial de controle prolongado das plantas daninhas pelo indaziflam após a aplicação no solo.

Diversos estudos demonstraram a eficiência de controle do indaziflam em vários sistemas de produção. Clarck et al. (2020) verificaram a eficiência de controle de diversas gramíneas anuais com aplicação de indaziflam tais como *Bromus tectorium*, *Bromus arvensis* e *Secale cereale*. Sebastian et al. (2019) ressaltaram o alto potencial do indaziflam para controlar diversas espécies de ciclo anual, como *Pascopyrum smithii*, *Bouteloua gracilis*, *Artemisia frigida*, *Sphaeralcea coccinea*, *Elymus lanceolatus*, *Agropyron cristatum*, *Senecio spartioides* e *Astragalus*

shortianus. Amim et al. (2016) e Sebastian et al. (2019) relataram que o indaziflam controla uma grande diversidade de plantas daninhas, como: *Digitaria horizontalis*, *Panicum maximum* e *Rottboellia cochinchinensis*, presentes no Brasil. Segundo Gomes et al (2019), em estudo do indaziflam na cultura do café, as plantas daninhas mais abundantes na área foram *Eleusine indica*, *Cyperus rotundus*, *Raphanus raphanistrum*, *Bidens pilosa* e *Melampodium paludosum*.

De acordo com o estudo conduzido por Pucci et al. (2019), a eficiência de controle do indaziflam aos 30, 68 e 104 DAA, nas seguintes plantas daninhas: *Bidens pilosa*., *Commelina benghalensis*, *Urochloa decumbens*, *Emilia fosbergii* e *Melampodium perfoliatum*, plantas comumente encontradas em cafezais e de maior abundância na região, apresentou controle satisfatório em praticamente todas plantas daninhas, porém no controle de *C. benghalensis* em média abaixo de 80% a partir de 30 DAA considerado insatisfatório.

Dessa forma, o indaziflam representa uma opção muito eficaz para controle de plantas daninhas em PRE, inclusive no manejo de biótipos resistentes a outros herbicidas, como *Euphorbia heterophylla*, *Amaranthus deflexus*, *Amaranthus hybridus*, *Commelina benghalensis*, *Conyza bonariensis*, *Sida rhombifolia* e *Bidens pilosa*, que apresentam resistência ao glyphosate (HEAP, 2022).

Diversos estudos sobre indaziflam remetem diferentes modos de utilização desse herbicida, demonstrando grande flexibilidade e utilidade no manejo de plantas daninhas. o indaziflam pode ser utilizado também em misturas de tanque com outros herbicidas, como glyphosate, imazapic, flumioxazin e glufosinate de amônio, proporcionando maior intervalo de aplicação e mantendo o controle prolongado sem interações antagônicas (CLARCK et al. 2020).

O indaziflam apresenta diversas possibilidades de uso. Entretanto, devido a suas características físico-químicas e persistência no solo, seu uso deve ser feito levando em consideração a influência do solo na sua biodisponibilidade na solução. De fato, estudos têm evidenciado que o comportamento do indaziflam no solo é influenciado por suas características, tais como o pH e teor de matéria orgânica (GONÇALVES, 2018). Assim, a compreensão dos processos de sorção e dessorção em solos tropicais é essencial para fornecer recomendações seguras tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental. É importante destacar que fatores edafoclimáticos podem exercer uma influência direta no comportamento do indaziflam no solo, tornando a sua dosagem dependente da interação desses fatores (MAPA, 2022),

diferentemente do que é descrito na bula, que se baseia apenas no teor de argila como critério para determinar a dosagem.

O manejo de cobertura pode interferir na eficiência de controle do indaziflam. Saha et al. (2019) relataram que a utilização de coberturas orgânicas diminui a eficiência de controle de herbicidas aplicados em PRÉ, incluindo indaziflam, sugerindo que a sorção desse produto ocorre fortemente em coberturas orgânicas, como casca de pinus, palha de pinus e cascas de eucalipto.

De modo geral, o indaziflam por ser um herbicida de baixa Sw e de baixa polaridade depende diretamente da MO para ser sorvido. As demais propriedades do solo, como pH, argila e CTC, apesar de serem relatadas na literatura como tendo influência na sorção, possuem importância muito menor do que a MO (ALONSO et al., 2015; SCHNEIDER et al., 2015).

O indaziflam, devido as suas características de baixa mobilidade no solo e efeito residual prolongado, se mostra como uma excelente molécula para se aplicar na cultura do café e obter eficiência no controle de plantas daninhas.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). **Indaziflam Sorption** 1992. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov>. Acesso em: 26 junho de 2023.

ALCANTARA, E. N.; SILVA, R. A. Manejo do Mato em Cafezais. In: REIS, P. R.; CUNHA, R. L. (Eds.). **Café arábica do plantio a colheita**. Lavras: EPAMIG, v.1, 2010. p. 519-572.

ALFONSI, E.L. et al. Crescimento, fotossíntese e composição mineral em genótipos de *Coffea* com potencial para utilização como porta-enxerto. **Bragantia**, v. 64, n.1 p. 1-13, 2005.

ALISTER, C., KOGAN, M. Rainfall effect on dissipation and movement of diuron and simazine in a vineyard soil. **Planta Daninha**, v. 28, n. spc., p. 1059-1071, 2010.

ALONSO, D. G. et al. Changes in sorption of indaziflam and three transformation products in soil with aging. **Geoderma**, v. 239, n. 240, p. 250-256, 2015.

ALONSO, D.G. et al. Sorption–desorption of indaziflam in selected agricultural soils. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, n. 24, p. 13096-13101, 2011.

AMIM, R. T. et al. Banco de sementes do solo após aplicação de herbicidas pré-emergentes durante quatro safras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 10, p. 1710-1719, 2016.

AMIM, R. T. et al. Controle de plantas daninhas pelo indaziflam em solos com diferentes características físico-químicas. **Planta Daninha**, v. 32, n. 4, p. 791- 800, 2014.

BLANCO, F. M. G. **Controle químico das plantas daninhas na cultura do café**. Mococa, SP: Instituto Biológico do Café, 2004.175p.

BLANCO, F. M. G. et al. Persistência do sulfentrazone em solo cultivado com cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 71-75, 2010.

BLANCO, H. G. et al. Período de competição de uma comunidade natural de mato em uma cultura de café, em formação. **Biológico**, v. 48, p. 9-20, 1982.

BROSNAN, J. T. et al. PRE and POST control of annual bluegrass (*Poa annua*) with indaziflam. **Weed Technology**, v. 26, n. 1, p. 48-53, 2012.

BUSI, R. et al. Rotations and mixtures of soil-applied herbicides delay resistance. **Pest Management Science**, v. 76, n. 2, p. 487-496, 2020.

CHENG, H.H. et al. **Pesticides in the soil environment: processes, impacts, and modeling**. Madison, USA: Soil Science Society of America, 1990. 554 p.

CHRISTOFFOLETI, P. J. et al. **Comportamento dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba, SP: CP, v. 2, 2009. 72 p.

CLARCK, S. C. et al. Evaluating winter annual grass control and native species establishment following applications of indaziflam on rangeland. **Invasive Plant Science and Management**, v. 13, n. 3, p. 199-209, 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Levantamento de safra CONAB**. Disponível em: http://www.sapec.embrapa.br/arquivos/consorcio/levantamento/conab_safr a2020_n4.pdf. Acesso: 23 de junho de 2023.

DAMATTA, F. M. et al. Coffee: environment and crop physiology. In: DAMATTA, F. M. **Ecophysiology of tropical tree crops**. New York, USA: Nova Science Publishers, p. 181-216, 2010.

DO NASCIMENTO, J. L. M. et al. Tolerância de plantas jovens de café a herbicidas aplicados isoladamente ou em mistura com o fertilizante fertiactyl. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 18, n. 4, p. 681 - 688, 2020.

DOS REIS, F. C. et al. Leaching of diuron, hexazinone, and sulfometuron-methyl applied alone and in mixture in soils with contrasting textures. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 13, p. 2645-2650, 2017.

EL MADANI, M. et al. pH effect and kinetic studies of the binding behaviour of imazethapyr herbicide on some Moroccan soils. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 12, n. 9, p. 1114-1119, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Evolução da cafeicultura brasileira nas últimas duas décadas**. Disponível em: http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes_tecnicas/Consortio-Embrapa-Cafe-Evolucao-21-10-20.pdf. Acesso em: 26 de junho de 2023.

FERRI, M. V. W.; VIDAL, R. A. Persistência do herbicida acetochlor em função de sistemas de preparo e cobertura com palha. **Ciência Rural**, v. 33, n. 3, p. 399-404, 2003.

FREITAS, M. A. M. et al. Sorção do sulfentrazone em diferentes tipos de solo determinada por bioensaios. **Plantas Daninha**, v. 32, n. 2, p. 385- 392, 2014.

FREITAS, S. D. P. et. al. Efeitos de dejetos de suínos na forma líquida e de composto orgânico na atividade do metribuzin. **Planta Daninha**, v. 17, n. 1, p. 109-117, 1999.

GERSTL, Z. An update on the $K_{(oc)}$ concept in regard to regional scale management. **Crop Protection**, v. 19, n. 810, p. 643-648, 2000.

GOMES, C. A. et al. Indaziflam application in newly transplanted Arabica coffee seedlings. **Coffee Science**, v. 14, p. 373, 2019.

GONÇALVES, V. A. et al. Sorption of indaziflam in Brazilian soils with diferente pH values. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 3, pp. 494-504, 2021.

GRIFFIN, J.L. Inhibition of cell wall synthesis. In: GRIFFIN, J.L. (Eds.) **Weed Course**. Baton Rouge, USA: LSU, p. 150-153, 2005.

GUERRA, N. et al. Aminocyclopyrachlor e indaziflam: Seletividade, controle e comportamento no ambiente. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.12, n. 3, p. 285-295, 2013.

GUERRA, N. et al. Sensibility of plant species to herbicides aminocyclopyrachlor and indaziflam. **Planta Daninha**, v. 32, n. 3, p. 609-617, 2014.

HATZIOS, K. K. et al. **Supplement to herbicide handbook**. 7th ed. Lawrence, USA: Weed Science Society of America, 1998. 104 p.

HEAP, I. **The International Herbicide-Resistant Weed Database**. <http://www.weedscience.org/Home.aspx>. Acesso em: 10 de junho de 2023.

INOUE, M. et al. Potencial de lixiviação de herbicidas utilizados na cultura do algodão em colunas de solo. **Planta Daninha**, v. 28, n. 4, p. 825- 833, 2010.

INOUE, M. H. et al. Lixiviação e degradação de diuron em dois solos de texturas contrastante. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, n. 1, p. 631-638, 2008.

INOUE, M. H. et al. Potencial de lixiviação de imazapic e isoxaflutole em colunas de solo. **Planta Daninha**, v. 25, n. 3, p. 547-555, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 02 de junho de 2023.

JEFFRIES, M. et al. Effect of simulated indaziflam drift rates on various plant species. **Weed Technology**, v. 28, n. 4, p. 608-616, 2014.

JONES, P. et al. Effect of reed-sedge peat moss on hybrid bermudagrass injury with indaziflam and prodiamine in sand-based root zones. **Weed Technology**, v. 27, n. 3, p.547-551, 2013a.

JONES, P. et al. Soil type and rooting depth affect hybrid bermudagrass injury with preemergence herbicides. **Crop Science**, v. 53, n. 2, p. 660-665, 2013b.

KAAPRO, J.; HALL, J. Indaziflam - a new herbicide for pre-emergent control of weeds in turf, forestry, industrial vegetation and ornamentals. **Pakistan Journal of Weed Science Research**, v.18, p. 267-270 2012.

KÄSTNER, M. The "humification" Process or formation of refractory soil organic matter, In: REHM, H.J.; REED, G.; PÜHLER, A.; STADLER, P. (Eds.). **Biotechnology**. 2nd Edition. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, p. 89-125, 2000.

KAWAMOTO, K.; URANO, K. Parameters for predicting fate of organochlorine pesticides in the environment (II) Adsorption constant to soil. **Chemosphere**, v.19, p. 1223-1231, 1989.

KRAEMER, A.F. et al. Lixiviação do imazethapyr em solo de várzea sob dois sistemas de manejo. **Ciência Rural**, v. 39, n. 6, p. 1660-1666, 2009.

LEMES, L. N. et al. Weed interference on coffee fruit production during a four-year investigation after planting. **African Journal of Agricultural Research**, v. 5, n. 10, p. 1138-1143, 2010.

LEWAN, E. et al. Implications of precipitation patterns and antecedent soil water content for leaching of pesticides from arable land. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 11, p. 1633-1640, 2009.

LIU, Y. et al. Adsorption and desorption behavior of herbicide diuron on various Chinese cultivated soils. **Journal of Hazardous Materials**, v. 178, n. 1, p. 462- 468, 2010.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MANCUSO, M. A. C. et al. Efeito residual de herbicidas no solo (“Carryover”). **Revista Brasileira Herbicida**, v. 10, p.151-164, 2011.

MARTINEZ, C. O. et al. The effects of moisture and temperature on the degradation of sulfentrazone. **Geoderma**, v. 147, p. 56–62, 2008.

MARTINI, L. F. D. et al. Lixiviação de imazethapir + imazapic em função do manejo de irrigação do arroz. **Planta Daninha**, v. 29, n. 1, p. 185-193, 2011.

MATIELLO, J. B. et al. **Cultura de café no Brasil: Manual de recomendações**. ed. São Paulo, SP: Futurama Editora, p. 132-145, 2016.

MELO, C. A. D. et al. Efeito residual de sulfentrazone, isoxaflutole e oxyfluorfen em três solos. **Planta Daninha**, v. 28, n. 4, p. 835- 842, 2010.

MENDES, K. F. et al. Leaching and residual effects of oxadiazon as a function of the movement of water depth application and incorporation of soil organic matter. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 12, n. 2, p. 855-860, 2014.

MENDES, K. F. et al. Lixiviação do hexazinone e da mistura hexazinone+ diuron em colunas de solos com texturas distintas. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 7, n. 2, p. 218-224, 2013.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Agrofit**. Disponível em: http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 01 de maio de 2023.

MONQUERO, P.A. et al. Eficiência de herbicidas pré-emergentes após períodos de seca. **Planta Daninha**, v. 26, n.1, p.185-193, 2008.

MORAIMA, G. S. et al. A contribution to determine critical levels of weed interference in coffee crops of Monagas state, Venezuela. **Bioagro**, v. 12, n. 3, p. 63-70, 2000.

NEGRISOLI, E. et al. Influência da palha e da simulação de chuva sobre a eficácia da mistura formulada clomazone+ hexazinone no controle de plantas daninhas em área de cana-crua. **Planta Daninha**, v. 29, n. 1, p. 169-177, 2011.

OLIVEIRA JR. et al. Sorption and leaching potential of herbicides on Brazilian soils. **Weed Research**, v. 41, p. 97-110, 2001.

OLIVEIRA JR., R. S. et al. Introdução ao controle químico. In: OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (Eds) **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba, PR: Omnipax, p. 125-140, 2011.

OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A. M. Comportamento dos herbicidas no ambiente. In: OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (Eds) **Biologia e Manejo de Plantas Daninhas**. Curitiba, PR: Omnipax, p. 263-304, 2011.

PESTICIDE PROPERTIES DATA BASE - PPDB. **Indaziflam**. Disponível em: <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/Reports/1663.htm#none>. Acesso em: 20 de junho de 2023.

PINTAR, A. et al Bioassay methods for detecting herbicide residues in soil. **Glasilo Biljne Zaštite**, v. 17, n. 4, p. 369-377, 2017.

PUCCI, L. F. et al. Association of indaziflam and oxyfluorfen in coffee pre-transplantation. **Coffee Science**, v. 14, n. 3, p. 359–365, 2019.

REFATTI, J. P. et al. Efeito da calagem na lixiviação de imazethapyr e imazapyr em solo de cultivo de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v.44, n.6, 2014.

REGITANO, J. B. et al. Atributos de solos tropicais e a sorção de imazaquin. **Scientia Agricola**, v. 58, p. 801-807, 2001.

ROCHA, P.R.R. et al. Sorção e dessorção do diuron em quatro latossolos brasileiros. **Planta Daninha**, v. 31, n.1, p. 231-238, 2013.

RODRIGUES, B.N.; ALMEIDA, F.S. **Guia de herbicidas**. 7ª ed. Londrina, PR: Edição dos autores, 2018. 764 p.

RONCHI, C. P. et al. Acúmulo de nutrientes pelo cafeeiro sob interferência de plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p.219-227, 2003.

RONCHI, C. P.; SILVA, A. A. Tolerância de mudas de café a herbicidas aplicados em pós-emergência. **Planta Daninha**, v. 21, n. 3, p. 421-426, 2003.

RONCHI, C.P.; SILVA, A. A. **Manejo de plantas daninhas em lavouras de café**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2001. 94 p.

RONCHI, et al. Sustainable Weed Control in Coffee. In KORRES, N. E.; BURGOS, N. R.; DUKE, S. O. (Ed.) **Weed control sustainability, hazards and risks in cropping systems worldwide**. Boca Raton, USA: CRC Press, p. 425-441, 2018.

ROSSI, C. V. S. et al. Dinâmica do herbicida metribuzin aplicado sobre palha de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). **Planta Daninha**, v. 31, n. 1, p. 223-230, 2013.

SAHA, D. et al. Short-term preemergence herbicide adsorption by mulch materials and impacts on Weed Control. **HortTechnology**, v. 29, n. 6, p. 889-897, 2019.

SANTIN, C. O. et al. Weed management in soybean using burndown herbicides associated to pre-emergent herbicides. **Communications in Plant Science**, v. 9, p. 46-52, 2019.

SAVARIS, Q. M. et al. Determination of residual effect of indaziflam and amicarbazone in two soils through. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 18, n. 3, p. 617 - 624, 2019.

SCHNEIDER, J. G. et al. Indaziflam effect on bermudagrass (*Cynodon dactylon* L. Pers.) shoot growth and root initiation as influenced by soil texture and organic matter. **Crop Science**, v. 55, n. 1, p. 429-436, 2015.

SEBASTIAN, D. J. et al. Total vegetation control: a comprehensive summary of herbicides, application timings, and resistance management options. **Weed Technology**, v. 34, n. 2, p. 155-163, 2019.

SILVA, A. A.; RONCHI, C. P. Manejo e controle de plantas daninhas em café. In: VARGAS, L.; ROMAN, E.S. (Org.). **Manual de manejo e controle de plantas daninhas**. Bento Gonçalves, RS: Embrapa Uva/Vinho, p. 337-396, 2004.

SILVA, P. V.; MONQUERO, P. A. Influência da palha no controle químico de plantas daninhas no sistema de cana crua. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 12, n. 1, p. 94-103, 2013.

SILVA, T. S. et al. Use of neural networks to estimate the sorption and desorption coefficients of herbicides: A case study of diuron, hexazinone, and sulfometuron-methyl in Brazil. **Chemosphere**, v. 236, p. 124333, 2019.

SUSHA, V. S. et al. Impacts of tillage and herbicide mixture on weed interference, agronomic productivity and profitability of a maize – Wheat system in the North-western Indo-Gangetic Plains. **Field Crops Research**, v. 219, p. 180-191, 2018.

TAKESHITA, V. et al. Effect of Organic Matter on the Behavior and Control Effectiveness of Herbicides in Soil. **Planta Daninha**, v. 37, p. e019214401, 2019.

TOMPKINS, J. Environmental Protection Agency **Pesticide Fact Sheet: Indaziflam**. Disponível em: <http://www.epa.gov/opprd001/factsheets/indaziflam.pdf>. Acesso: 27 de junho de 2023.

U.S. EPA. 2010. Pesticide fact sheet: **Indaziflam**. Conditional registration. Disponível em: https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC-080818_26-Jul-10.pdf. Acesso em: 08 de julho de 2023.

VIVIAN, R. et al. Adsorção e dessorção de trifloxysulfuron-sodium e ametryn em solos brasileiros. **Planta Daninha**, v. 25, n.1, p. 97-109, 2007.

WAUCHOPE, R. D. et al. Pesticide properties database for environmental decisionmaking. **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology**, v.123, p. 123–155, 1992.

WEBER, B.J. et al. Calculating pesticide sorption coefficients (K_d) using selected soil properties. **Chemosphere**, v. 55, n. 2, p. 157-166, 2004.

WEED SCIENCE SOCIETY OF AMERICA - WSSA. **Herbicide Handbook**. 7th ed. Champaign, USA: WSSA, 1994. 352 p.

YOUNG, J. M.; CRAWFORD, J. W. Interactions and self-organization in the soil-microbe complex. **Science**, v. 304, p.1634–1637, 2004.

4 CAPÍTULO 1. EFICÁCIA AGRONÔMICA, DINÂMICA DA COMUNIDADE INFESTANTE DE PLANTAS DANINHAS E EFEITO RESIDUAL DO INDAZIFLAM EM SOLOS COM DUAS COBERTURAS NA CULTURA DO CAFÉ

RESUMO

O café é uma *commodity* de grande importância para a economia brasileira. O controle de plantas daninhas com herbicidas em pré-emergência, como o indaziflam, é essencial para o controle de plantas daninhas nessa cultura. A presença de coberturas vegetais no solo pode afetar a eficiência e o efeito residual do indaziflam. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar a eficácia agronômica e o efeito residual do indaziflam em solos com diferentes coberturas na cultura do café. Os estudos foram realizados no município de Rio Paranaíba, MG, Brasil, nas fazendas IPACER (Latosolo Vermelho argiloso - LV_{ar}) e Glória (Latosolo Vermelho muito argiloso - LV_{ma}). A implantação dos estudos nas duas fazendas foi em delineamento inteiramente casualizado em cada local, em um fatorial 2x3x6, com 5 repetições, em que o primeiro fator correspondeu a aplicação do indaziflam (75 g i.a. ha⁻¹) e a não aplicação, o segundo a três coberturas de solo (cisco, composto e sem cobertura) e o terceiro a seis épocas de avaliação (30, 60, 90, 120, 150, 180 dias após a aplicação - DAA). Os materiais utilizados para cobertura do solo foram: os ciscos (5 t ha⁻¹) (resíduos vegetais do meio da entrelinha do café) e compostos (palha + esterco, 2 + 3 t ha⁻¹, respectivamente). A determinação do efeito residual do indaziflam no solo foi realizada por meio da avaliação de nível de injúria. Os dados de injúria foram utilizados no modelo de primeira ordem para determinar o tempo de meia-vida residual (RL₅₀) em cada solo. Aos 60 e 120 DAA do indaziflam foi realizada a caracterização da comunidade infestante de plantas daninhas nas áreas com e sem aplicação do indaziflam, por meio de amostragem com quadrados vazados com 0,5 m de lado e área interna de 0,25 m². Os parâmetros fitossociológicos de frequência absoluta e relativa (FRE e FR), densidade absoluta e relativa (DEN e DR), abundância absoluta e relativa (ABU e AR) e o índice de valor de importância (IVI) das plantas daninhas foram determinados. Também foi realizado o cálculo do índice de similaridade de Jaccard para cada combinação de pares dos tratamentos. Não houve interação entre da cobertura utilizada com o solo ou época de avaliação na eficiência de controle do indaziflam na

comunidade de plantas daninhas e foi observado controle de plantas daninhas >90% até aos 120 DAA para todos os solos e coberturas. A RL_{50} foi >180 dias para todos os solo e coberturas avaliados. A composição florística da comunidade de plantas daninhas foi afetada pelo indaziflam, em que foram identificadas 21 espécies de plantas daninhas nas duas fazendas avaliadas, distribuídas em 12 famílias e 22,7% das espécies encontradas pertenciam a família Asteraceae, 13,6% a Poaceae e 13,6% a família Rubiaceae. Para os índices fitossociológicos foi observado que em áreas que não foi aplicado o indaziflam houve ocorrência principalmente de maior IVI, acompanhado de aumento na densidade relativa e frequência relativa de plantas daninhas. Entretanto, ao avaliar a similaridade dos tratamentos, foi observado que a comunidade de plantas daninhas foi determinada primeiramente pela origem do solo, mas também houve influência das coberturas utilizadas na composição da comunidade de plantas daninhas. A utilização das coberturas do solo com cisco e composto orgânico não reduziram a eficiência de controle das plantas daninhas com a aplicação de indaziflam. Portanto, essas coberturas essas coberturas podem ser utilizadas na cultura do café, nas condições deste estudo, sem a necessidade de aumentar a dose do indaziflam necessária para o controle eficiente da comunidade infestante de plantas daninhas. Entretanto, mais estudos são necessários para avaliar variações nas doses da cobertura e herbicida.

Palavras-chave: Controle químico. Fitossociologia. Persistência.

ABSTRACT

The coffee is a commodity of great importance to the Brazilian economy. Weed control with pre-emergence herbicides like indaziflam is crucial for managing weeds in this crop. The presence of vegetative covers in the soil can affect the efficacy and residual effect of indaziflam. Therefore, the objective of this study was to evaluate the agronomic efficacy and residual effect of indaziflam in soils with different covers in coffee cultivation. The studies were conducted in Rio Paranaíba, MG, Brazil, on two farms: IPACER (Clayey Oxisol - LV_{ar}) and Glória (Very Clayey Oxisol - LV_{ma}). The experiments were designed as completely randomized with a 2x3x6 factorial arrangement, with 5 repetitions. The first factor corresponded to indaziflam application (75 g a.i. ha⁻¹) or no application, the second factor consisted of three soil covers (cisco, organic compost, and bare soil), and the third factor included six evaluation times (30, 60, 90, 120, 150, 180 days after application - DAA). The soil covers used were: cisco (5 t ha⁻¹) (vegetative residues from the coffee inter-row area) and compost (straw + manure, 2 + 3 t ha⁻¹, respectively). The determination of indaziflam residual effect in the soil was conducted by evaluating the injury level. The injury data were used in a first-order model to determine the residual half-life (RL₅₀) in each soil. At 60 and 120 DAA of indaziflam, weed infestation was characterized in areas with and without indaziflam application using square quadrats with sides of 0.5 m and an internal area of 0.25 m². The phytosociological parameters of absolute and relative frequency (FRE and FR), absolute and relative density (DEN and DR), absolute and relative abundance (ABU and AR), and the importance value index (IVI) of the weeds were determined. The Jaccard similarity index was calculated for each combination of treatment pairs. There was no interaction between the soil cover, evaluation time, and indaziflam efficacy in controlling the weed community, and weed control was observed to be >90% until 120 DAA for all soils and covers. The RL₅₀ was >180 days for all soils and covers evaluated. The floristic composition of the weed community was affected by indaziflam, with 21 weed species identified in the two evaluated farms, distributed across 12 families. Asteraceae, Poaceae, and Rubiaceae were the most represented families, accounting for 22.7%, 13.6%, and 13.6% of the species found, respectively. Regarding the phytosociological indices, areas without indaziflam application showed a higher IVI, accompanied by an increase in relative density and relative frequency of weeds. However, when

evaluating treatment similarity, it was observed that the weed community was primarily determined by soil origin, but the covers used also influenced the composition of the weed community. The use of cisco and organic compost covers did not reduce the weed control efficacy when applying indaziflam. Therefore, these covers can be used in coffee cultivation under the conditions of this study without the need to increase the dose of indaziflam for efficient control of the weed infestation. However, further studies are required to evaluate variations in cover and herbicide doses.

Keywords: Chemical control. Phytosociology. Persistence.

4.1 INTRODUÇÃO

O café (*Coffea* sp.) é uma cultura de grande importância no Brasil. Aproximadamente 37% da produção mundial de café é proveniente do Brasil. O país possui a maior área plantada, correspondendo a 1.873.197,9 hectares em 2023, dividido entre as espécies Arábica e Conilon. De acordo com a CONAB, a produção total alcançou 59,2 milhões de sacas em 2023, e Minas Gerais é o estado que possui maior área plantada (1.083.601 hectares) e produção (25,7 milhões de sacas) (CONAB, 2023).

O sucesso econômico na cultura do café depende do controle dos fatores de produção como o controle adequado de plantas daninhas, para não somente alcançar altos índices de produtividade, mas também preservar a saúde do solo e prolongar a vida útil dos cafeeiros (ALCANTARA e SILVA, 2010). A fase inicial do desenvolvimento da lavoura de café e a fase de crescimento exigem tratamentos culturais distintos, o que torna o manejo da cultura complexo (DO NASCIMENTO et al., 2020). Entretanto, o manejo de plantas daninhas é indispensável em ambas as fases, visando minimizar reduções na produtividade, que podem chegar a quase 95% (MORAIMA et al., 2000; LEMES et al., 2010).

A utilização de herbicidas em pré-emergência (PRÉ) é muito empregada nas fases de desenvolvimento inicial de sistemas de produção para controle eficiente de plantas daninhas (BUSI et al., 2020). As principais vantagens dos herbicidas aplicados em PRÉ estão relacionadas ao efeito residual para controle de várias ondas de emergência de plantas daninhas, prevenção de interferências nas fases iniciais de estabelecimento e desenvolvimento da cultura, além de aumentar a janela e flexibilidade para o controle em pós-emergência (PÓS) (MONQUERO et al., 2008; SANTIN et al., 2019). Entretanto, para utilização correta de herbicidas em PRÉ é necessário levar em consideração práticas culturais na cultura de interesse pois elas podem interferir na eficiência do herbicida.

A aplicação de material orgânico no solo após a colheita, no período de setembro a novembro, é uma prática bastante comum na cafeicultura. Os materiais orgânicos mais utilizados são: palha de café, esterco bovino e de galinha, "cisco" (restos vegetais do café triturado no recolhimento mecanizado), composto (esterco + palha). Entretanto, a presença de coberturas do solo na forma de resíduos vegetais

podem diminuir a eficiência de controle e o efeito residual de herbicidas aplicados na PRÉ.

O indaziflam é um herbicida PRÉ registrado na cultura do café. Por se tratar de uso recente no Brasil, pouco se sabe a respeito do comportamento do indaziflam no que se refere a eficiência de controle e efeito residual em condições de solos com coberturas orgânicas. Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência de controle e o efeito residual do indaziflam em dois solos com diferentes tipos de cobertura na cultura do café.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Locais de estudo

Os estudos foram realizados em Rio Paranaíba-MG em duas fazendas distintas. A área pertencente à fazenda Glória, situa-se em latitude 19°10'11" S e longitude 46°12'49" O (Figura 1), altitude de 1100 m acima do nível mar, com cultivar Catucaí 2 SL (*Coffee arabica*), espaçamento de 4 m entre linhas e 0,5 m entre plantas, plantio realizado em 12/2001. O solo onde foram implantados os experimentos foi classificado como Latossolo Vermelho de textura muito argilosa (LV_{ma}) (Tabela 1). A outra área pertencente a fazenda IPACER, situa-se latitude 19°10'35" S e longitude 46°06'09" O (Figura 1), altitude 990 m ao nível do mar, com cultivar Catucaí 144 (*C. arabica*), espaçamento de 3,8 m entre linhas e 0,6 m entre plantas, plantio realizado em 12/2018, onde o solo desta área foi classificado como Latossolo Vermelho de textura argilosa (LV_{ar}) (Tabela 1). O clima dos locais experimentais foi denominado Cwb, de acordo com a classificação Köeppen (clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado), com temperatura média entre 16 e 23°C e precipitação inferior a 2000 mm anuais.

Figura 1 - Locais de estudos cultivados com café (*Coffee arabica*) - cultivar Catucaí 2 SL e Catuaí 144 nas unidades experimentais da fazenda Glória e IPACER, respectivamente. Rio Paranaíba-MG.

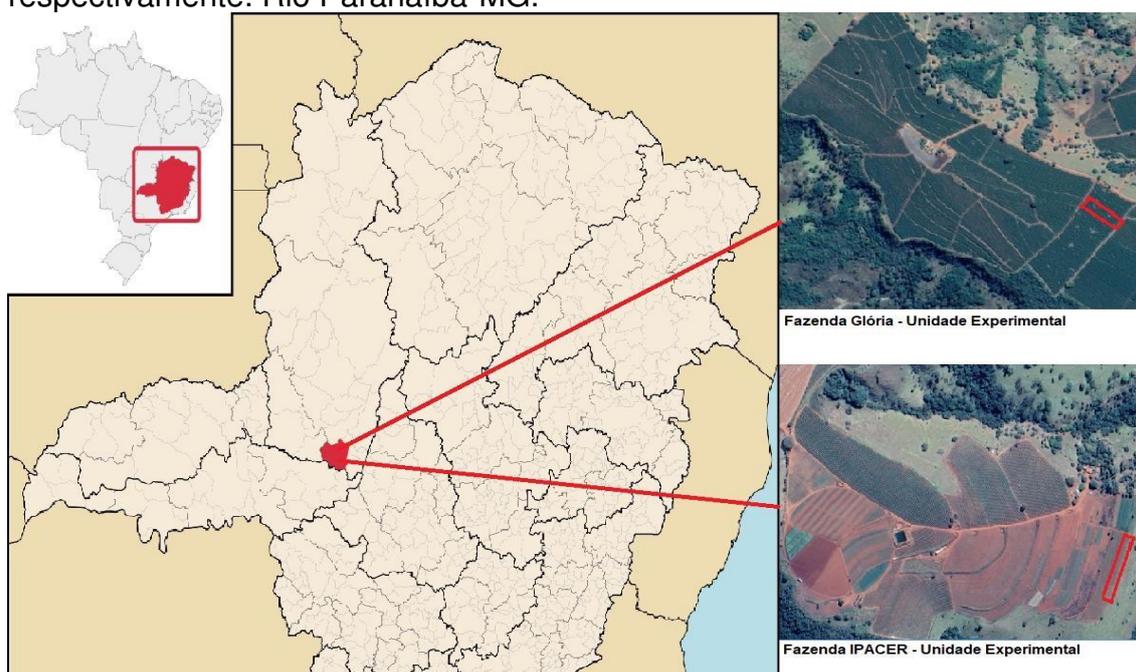


Tabela 1 - Propriedades físico-químicas dos solos nas áreas de estudo. Rio Paranaíba-MG.

Propriedades	Unidade	Local	
		IPACER	Glória
pH	CaCl ₂	4,90	5,30
pH	H ₂ O	5,50	5,90
H+Al	cmol _c dm ⁻³	3,80	2,60
Alumínio	cmol _c dm ⁻³	0	0
Cálcio	cmol _c dm ⁻³	2,60	2,90
Magnésio	cmol _c dm ⁻³	0,60	0,50
Potássio	cmol _c dm ⁻³	0,20	0,05
Fósforo (Mehlich)	mg dm ⁻³	10,0	3,00
Fósforo (Resina)	mg dm ⁻³	17,0	7,00
Carbono orgânico	%	2,32	1,40
Matéria orgânica	%	4,00	2,40
Soma de Bases	cmol _c dm ⁻³	3,40	3,50
Capacidade de troca catiônica	cmol _c dm ⁻³	7,20	6,05
Saturação de bases	%	47,22	57,02
Enxofre	mg dm ⁻³	15,4	7,10
Sódio	mg dm ⁻³	2,00	2,40
Boro	mg dm ⁻³	0,30	0,30
Ferro	mg dm ⁻³	19,80	13,40
Manganês	mg dm ⁻³	12,80	2,20
Cobre	mg dm ⁻³	2,70	1,10
Zinco	mg dm ⁻³	10,20	2,60
Cascalho	%	0	0
Areia Grossa	%	15,60	6,00
Areia Fina	%	14,10	6,00
Argila	%	45,00	73,00
Silte	%	25,30	15,00
Densidade Aparente	g cm ⁻³	1,20	1,10
Densidade Real	g cm ⁻³	2,90	3,00
Classe textural		Argiloso	Muito argiloso

pH = potencial de hidrogênio. H+Al = hidrogênio + alumínio.

Fonte: Laboratório Unithal, Rio Paranaíba, MG, Brasil.

4.2.2 Delineamento experimental

A implantação dos estudos nas duas fazendas foi em delineamento inteiramente casualizado (DIC) em cada local, composto de um fatorial 2x3x6, com 5 repetições, em que o primeiro fator correspondeu a aplicação do indaziflam (75 g i.a. ha⁻¹) e a não aplicação, o segundo a três coberturas de solo (cisco, composto e sem

cobertura) e o terceiro a sete épocas de avaliação (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 dias após a aplicação - DAA). Os tamanhos das parcelas foram de 10 m de comprimento e 1 m de largura, totalizando 10 m². A bordadura foi de 1 m de cada extremidade perfazendo um total de área útil de 8 m².

4.2.3 Coberturas do solo

Os materiais utilizados para cobertura do solo foram: os ciscos (5 t ha⁻¹) (resíduos vegetais do meio da entrelinha do café) e compostos (palha + esterco, 2 + 3 t ha⁻¹, respectivamente), produzida na Fazenda IPACER, em Rio Paranaíba - MG e esterco de galinha, produzido na granja Ferrão, em Santo Antônio do Monte – MG, além do solo exposto sem nenhuma cobertura. As propriedades químicas dos materiais estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades químicas dos materiais composto orgânico e cisco.

Propriedades	Unidade	Cisco	Composto orgânico
Nitrogênio		1,11	2,15
Fósforo		0,64	3,40
Potássio		0,07	2,87
Cálcio	%	0,86	6,80
Magnésio		0,20	0,45
Enxofre		2,05	0,95
Ferro		7,30	1,58
Sódio		0,03	0,33
Manganês	ppm	286,00	284,00
Cobre		76,00	52,00
Zinco		107,00	218,00
Boro		196,00	196,00
Matéria orgânica		30,12	43,47
Cinzas	%	69,88	56,53
Umidade		4,88	13,40
pH (CaCl ₂)		6,80	7,6
Carbono/Nitrogênio		15/1	11/1

pH = potencial de hidrogênio, ppm = partes por milhão.

Fonte: Laboratório Unithal, Rio Paranaíba, MG, Brasil.

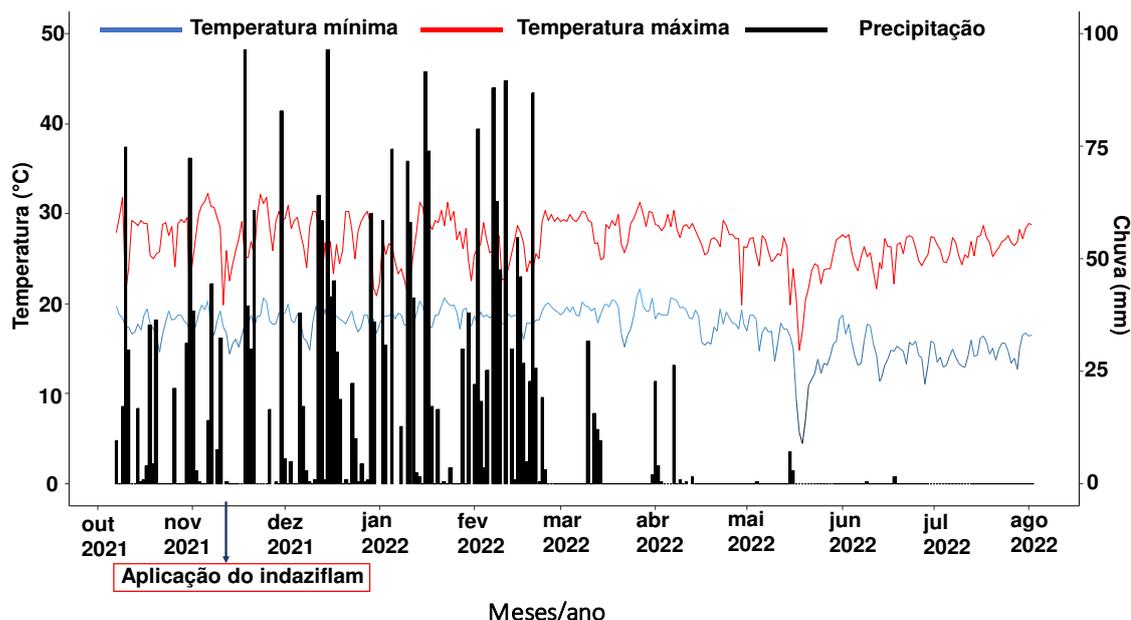
Antes da montagem do experimento, foi realizado a dessecação da faixa de 1 m de largura da linha do café, com glyphosate (1440 g e.a. sal de isopropilamina ha⁻¹

1). As aplicações das diferentes coberturas de solo foram realizadas com a adubadora Minami M 535 – D tratorizada direcionada na linha do café.

4.2.4 Aplicação do indaziflam

A aplicação do indaziflam (produto comercial Alion®) foi realizada uma semana após aplicação das coberturas em faixa de 1 m na linha do café de cada lado da planta utilizando um pulverizador PH 400 Jacto tratorizado acoplado com 1 ponta de pulverização Jacto tipo leque, modelo XR110.02, com volume de calda equivalente a 200 L ha⁻¹ e pressão de trabalho de 0,2942 MPa, na altura de 20 cm do solo e espaçamento de 10 cm do caule das plantas de café. Os parâmetros meteorológicos médios no dia da aplicação foram: umidade relativa de 80%, temperatura do ar de 25°C e velocidade dos ventos de 4 km/h. Ao longo do período do estudo foram contabilizados, os dados meteorológicos de temperaturas máxima, mínima e precipitação, disponibilizados pela Cooperativa Regional de Cafeicultores de Guaxupé (Cooxupé), Núcleo Rio Paranaíba (Figura 2).

Figura 2 - Precipitação e temperaturas máxima e mínima em Rio Paranaíba, MG, Brasil entre outubro de 2021 e agosto de 2022, aplicação do indaziflam em 08/11/2021 e 16/11/2021 nas fazendas Glória e Ipacer, respectivamente.



4.2.5 Efeito residual do indaziflam no solo

A determinação do efeito residual do indaziflam no solo foi realizada em campo nas diferentes épocas após aplicação do indaziflam (30, 60, 90, 120, 150 e 180 DAA) e nas áreas sem aplicação do indaziflam por meio da avaliação de nível de injúria por meio de escala de notas na qual 0% representa nenhuma injúria e 100% morte das plantas, conforme a metodologia proposta pela SBPCPD (1995).

4.2.6 Análises estatísticas dos dados do nível de injúria e efeito residual

Ao avaliar o efeito residual de herbicidas por meio da comunidade de plantas daninhas, foi utilizado o tempo de meia-vida residual (*do inglês Residual Lifetime - RL₅₀*). Nestes casos, os valores de RL₅₀ foram determinados utilizando cinética de primeira ordem, por meio das Equações (2) e (3) (HOSKINS, 1961; LEWIS e TZILIVAKIS, 2017)

$$C_t = C_0 e^{-kt} \quad (2)$$

$$RL_{50} = \ln 2/k \quad (3)$$

Em que C_t representa a concentração do herbicida no tempo t mensurado indiretamente pelo nível de injúria na espécie bioindicadora, C_0 representa a concentração inicial com base no nível de injúria, e k é a constante de taxa de dissipação do herbicida em dias. A RL₅₀ é então determinada a partir do valor de k (MENDES et al., 2019; PAULA et al., 2023). As análises de regressão, ANOVA e RL₅₀ foram realizadas no Software R versão 4.2.3 (R CORE TEAM, 2023) e os gráficos no programa SigmaPlot® (versão 13.0 para Windows, Systat Software Inc., Point Richmond, CA, EUA).

4.2.7 Eficácia agrônômica do indaziflam e dinâmica da comunidade infestante de plantas daninhas

Aos 60 e 120 DAA do indaziflam foi realizada a caracterização da comunidade infestante de plantas daninhas nas áreas com e sem aplicação do indaziflam, por meio de amostragem com quadrados vazados com 0,5 m de lado e área interna de 0,25 m². Os quadrados foram lançados ao acaso por quatro vezes na área útil das parcelas, e as plantas daninhas presentes dentro dos limites do quadrado de

amostragem foram contabilizadas e identificadas. Os dados de quantidade de plantas daninhas foram extrapolados para número de plantas por metro quadrado.

Os parâmetros fitossociológicos de frequência absoluta e relativa (FRE e FR) (Equações 4 e 5), densidade absoluta e relativa (DEN e DR) (Equações 6 e 7), abundância absoluta e relativa (ABU e AR) (Equações 8 e 9) e o índice de valor de importância (IVI) (Equação 10) das plantas daninhas foram determinados conforme proposto por Mueller-Dombois e Ellenberg (1974), por meio de equações:

$$FRE = \frac{\text{n}^\circ \text{ total de quadrados com a espécie}}{\text{n}^\circ \text{ de quadrados totais}} \quad (4)$$

$$FR = FRE \times 100 / \sum FRE \quad (5)$$

$$DEN = \frac{\text{n}^\circ \text{ total de indivíduos da espécie}}{\text{Área total amostrada}} \quad (6)$$

$$DR = DEN \times 100 / \sum DEN \quad (7)$$

$$ABU = \frac{\text{n}^\circ \text{ total de indivíduos da espécie}}{\text{n}^\circ \text{ de parcelas com a espécie}} \quad (8)$$

$$AR = ABU \times 100 / \sum ABU \quad (9)$$

$$IVI = DR + FR + AR \quad (10)$$

Os parâmetros fitossociológicos das plantas daninhas foram plotados em figuras de barras utilizando o software SigmaPlot® (versão 13.0 para Windows, Systat Software Inc., Point Richmond, CA, EUA) e analisados por meio de análise descritiva.

Para avaliar a composição florística dos tratamentos, foi utilizado o índice de similaridade de Jaccard (VALENTIN, 2000). Esse índice é uma medida estatística empregada para calcular a similaridade entre duas amostras ou comunidades, levando em consideração a presença ou ausência de espécies em cada amostra. O

índice de similaridade de Jaccard varia de 0 a 1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam uma maior similaridade entre as comunidades.

O cálculo do índice de similaridade de Jaccard foi realizado para cada combinação de pares dos tratamentos utilizando a equação 11:

$$J = a / (a + b + c) \quad (11)$$

Em que *a* representa o número de espécies presentes em ambas as comunidades, *b* representa o número de espécies exclusivas da primeira comunidade e *c* representa o número de espécies exclusivas da segunda comunidade.

A matriz de similaridade resultante foi utilizada para realizar análises de agrupamento (cluster) e para avaliar a dissimilaridade entre os tratamentos. As análises de similaridade foram realizadas no Software R versão 4.2.3 (R CORE TEAM, 2023).

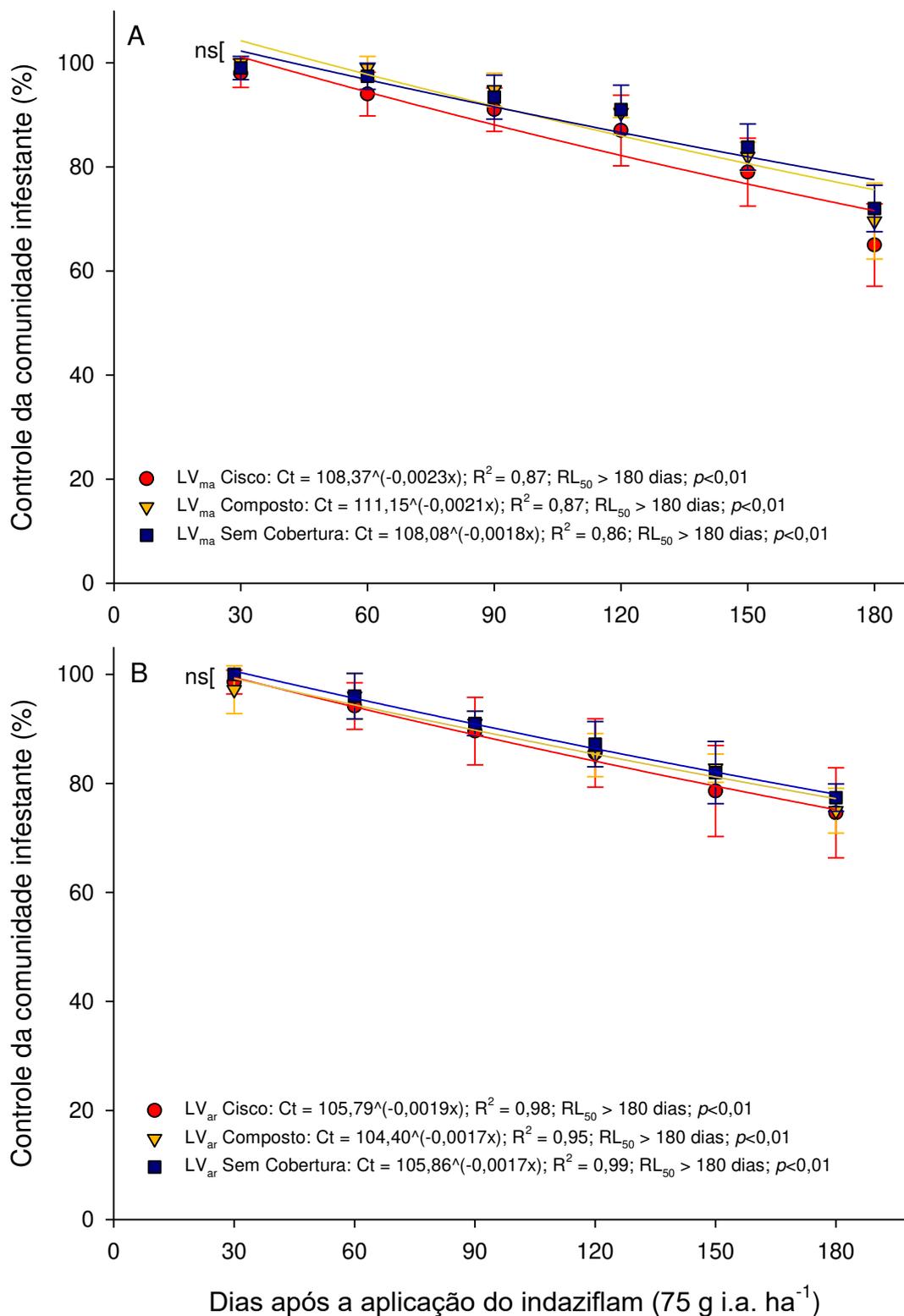
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Eficiência de controle da comunidade infestante e tempo de meia-vida residual do indaziflam

No controle da comunidade infestante de plantas daninhas ao longo do tempo não houve interação entre os tipos de cobertura utilizada com o solo e época de avaliação ($F = 0,21$; $p = 0,99$), da cobertura com o solo ($F = 1,21$; $p = 0,28$) ou época de avaliação ($F = 0,38$; $p = 0,95$). Tais resultados, indicaram que a utilização de cisco e composto orgânico não comprometeram a eficiência agrônômica do indaziflam para o controle da comunidade infestante em nenhum solo ou época avaliada.

Ao avaliar a eficiência de controle da comunidade infestante de plantas daninhas com a aplicação de indaziflam em dois solos com diferentes coberturas foi observado controle $>90\%$ até aos 90 DAA em ambos os solos, independente da cobertura aplicada (Figura 3). Entre 90 e 120 DAA, a eficiência de controle no LV_{ma} foi reduzida de 93% para 89%, mas entre 120 e 150 DAA houve redução acentuada de $\sim 10\%$ na eficiência de controle em todas as coberturas de solo, o que resultou em $\sim 68\%$ de controle no final da avaliação (Figura 3A). No solo LV_{ar}, o decréscimo na eficiência de controle se comportou de forma linear, com redução de $\sim 5\%$ a cada 30 dias (Figura 3B). Isso resultou em 75% de controle aos 180 DAA. No geral, é importante ressaltar que para o controle de plantas daninhas foi necessário pelo menos 80% para considerar um controle satisfatório.

Figura 3 - Controle da comunidade de infestante de plantas daninhas (% em relação ao tratamento sem herbicida) após aplicação de indaziflam ($75 \text{ g i.a. ha}^{-1}$) aos 30, 60, 90, 120, 150 e 180 dias em: A) Latossolo Vermelho argiloso (LV_{ar}) (fazenda da IPACER) e B) Latossolo Vermelho muito argiloso (LV_{ma}) (fazenda Glória) com três tipos de cobertura (cisco, composto e sem cobertura). Os símbolos correspondem aos valores da média e as barras os desvios padrões da média ($n = 4$). ns: não significativo pelo teste de t ($p < 0,05$).



O indaziflam continuou ativo no solo, exercendo o controle de plantas daninhas até 180 DAA e o tipo de cobertura do solo não afetou a eficiência de controle do indaziflam em ambos os solos. Como não houve observações de controle <50% das plantas daninhas em nenhum dos solos e coberturas nos períodos avaliados, não foi possível estimar os valores RL_{50} com os parâmetros

gerados nas regressões, portanto, a RL_{50} do indaziflam foi classificado como >180 dias para ambos os solos, independente das coberturas.

O indaziflam tem efeito residual de longa duração em baixas doses de aplicação, devido à sua longa persistência no solo (>150 dias) (U.S. EPA, 2010) e baixa mobilidade (JHALA e SINGH 2012; GUERRA et al. 2016; GONZÁLEZ-DELGADO e SHUKLA, 2020). Savaris et al. (2019) observaram que o indaziflam permanece ativo no solo controlando plantas bioindicadoras (pepino) após 100 dias da aplicação do herbicida. Entretanto, é importante ressaltar que os autores não avaliaram o efeito residual do indaziflam diretamente na comunidade infestante de plantas daninhas.

Um estudo realizado por Guerra et al. (2016), investigou a persistência da atividade biológica do indaziflam em solos brasileiros com diferentes texturas. Os resultados demonstraram que, independentemente da textura do solo, houve uma inibição completa do acúmulo de biomassa nas plantas bioindicadoras (beterraba e soja) até 150 dias após a semeadura. Esses resultados estão de acordo com os encontrados no presente estudo, em que o LV_{ma} possui 73% de argila, enquanto o LV_{ar} possui 45% (Tabela 1), e houve pouca variação na eficiência de controle da comunidade de plantas daninhas e no efeito residual até a última época de avaliação (180 DAA).

No entanto, é imprescindível considerar as características físico-químicas do solo ao recomendar doses do indaziflam. Amin et al. (2014) conduziram um estudo com o intuito de avaliar a eficácia de controle do indaziflam em diversas espécies de plantas daninhas, e constataram que solos com teores mais elevados de argila demandaram doses superiores para o controle efetivo em comparação a solos de textura mais arenosa. Segundo os autores, a necessidade de doses mais altas em solos argilosos pode ser atribuída à elevada capacidade de sorção desses solos, bem como às propriedades lipofílicas do indaziflam.

O teor da MO do solo é um dos principais fatores que devem ser levados em consideração ao recomendar doses do indaziflam. Jeffries e Gannon (2016) observaram que o aumento dos teores da MO diminuiu a biodisponibilidade do indaziflam na solução do solo e a eficiência de controle de plantas daninhas. Nesse estudo, os solos LV_{ar} e LV_{ma} apresentaram teores de MO de 4 e 2,4%, respectivamente (Tabela 1). Uma possível explicação para a semelhança no controle de plantas daninhas entre os solos LV_{ar} e LV_{ma} reside no fato de que o LV_{ar} ,

apesar de possuir um teor de argila menor (45%), apresenta maior teor de MO, o que pode resultar em uma biodisponibilidade equivalente de indaziflam em ambos os solos.

O pH é outra característica do solo que pode ter influência direta na eficiência de controle do indaziflam, e neste estudo os valores de pH em CaCl_2 observados para o LV_{ar} e LV_{ma} foram 4,9 e 5,3, respectivamente (Tabela 1), e não proporcionaram diferenças no controle de plantas daninhas. Entretanto, Gonçalves et al. (2021) observaram que o aumento do pH de 5,10 para 6,10 em um mesmo solo tende a tornar o indaziflam mais biodisponível na solução do solo e aumentar o controle de plantas daninhas.

Em culturas perenes, como o café, o prolongado efeito residual do indaziflam é altamente desejado. Embora não existam dados específicos em áreas cultivadas com essa cultura, um estudo indicou que o indaziflam pode proporcionar um controle residual por um período de três a cinco meses, dependendo das condições climáticas e da pressão de plantas daninhas na área (SINGH et al., 2011). Davies et al. (2023) observaram que o indaziflam pode permanecer ativo no solo controlando gramíneas com propagação via sementes por até três anos após uma única aplicação de $66,7 \text{ g i.a. ha}^{-1}$. No entanto, é importante salientar que a persistência do indaziflam pode variar de acordo com as condições climáticas e o manejo da área aplicada, e em alguns casos, podem ser detectados resíduos mesmo após um ano da aplicação (GONZALES-DELGADO et al., 2015). Portanto, o longo efeito residual observado no presente estudo ($\text{RL}_{50} > 180$ dias) para todos os solos e coberturas é interessante em áreas com cultivo de café.

Uma das preocupações da utilização de herbicidas com alta persistência em cultivos perenes é a possibilidade de ocorrência de injúrias nas plantas cultivadas ao longo do tempo. Apesar de não haver informações específicas para a cultura do café, alguns estudos avaliaram aplicações sucessivas em outros cultivos perenes. Por exemplo, Grey et al. (2018) observaram que aplicações com frequências de cinco vezes a cada três anos nas doses de até $146 \text{ g i.a. ha}^{-1}$ do indaziflam não alteraram o diâmetro do tronco, altura e não causam sintomas visuais em plantios de noz-pecã (*Carya illinoensis*) e oliva (*Olea europaea*). O estudo de Courkamp et al. (2022) demonstrou que a aplicação de indaziflam reduziu a densidade e a diversidade do banco de sementes de gramíneas em cultivos perenes sem causar

injúrias na cultura. Nesse sentido, em cultivos perenes já estabelecidos o potencial de danos causados pelo indaziflam é baixo.

A ausência de interação das coberturas do solo e o efeito residual do indaziflam no presente estudo não significam que esse fator deve ser desprezado durante a aplicação do indaziflam. Silva et al. (2019) avaliaram o efeito da palhada de cana-de-açúcar e precipitação na eficácia do indaziflam e relataram que em doses de 100 g i.a. ha⁻¹ não houve redução no controle de *U. plantaginea* e *P. maximum* com até 10 t ha⁻¹ de palhada no solo. Entretanto, em doses de 75 g i.a. ha⁻¹ de indaziflam houve redução na eficácia do herbicida quando a quantidade de palhada no solo foi de 10 t ha⁻¹. Os autores ainda relatam que quanto maior a quantidade de palha presente na superfície do solo no momento da aplicação do indaziflam menor será a sua eficácia, indicando uma possível interceptação e/ou sorção do herbicida na palha de cana-de-açúcar, e diminuindo assim a quantidade que é transposta para a superfície do solo. Logo, na aplicação de herbicidas lipofílicos, como o indaziflam, sobre palha de cana-de-açúcar, pequenas quantidades de precipitação podem ser insuficientes para promover a transposição em quantidades suficientes do herbicida para promover o controle adequado das plantas daninhas (SILVA et al. 2019; CLARK et al., 2019).

A avaliação da eficiência de controle e efeito residual do indaziflam na presença de coberturas no solo é muito importante para a cultura do café, pois a época de aplicação do indaziflam nessa cultura coincide com os períodos pós-colheita do grão e presença de resíduos na entrelinha, sejam eles provenientes de cisco ou compostos orgânicos. Portanto, são necessários mais estudos com diferentes doses do indaziflam e práticas de manejo para entender melhor a eficiência agrônômica no banco de sementes de plantas daninhas do solo com esse herbicida.

4.3.2 Composição florística da comunidade infestante

De acordo com o levantamento fitossociológico foram identificadas 21 espécies de plantas daninhas nas duas fazendas avaliadas (Tabela 3). As espécies de plantas daninhas foram distribuídas em 12 famílias e 22,7% das espécies encontradas pertenciam a família Asteraceae, 13,6% a Poaceae e 13,6% a família Rubiaceae (Figura 4). Resultado semelhante foi observado por Rodrigues et al

(2022) que caracterizando as famílias das principais espécies de plantas daninhas presentes em fazendas de produção de café no cerrado mineiro, observando predomínio de espécies da família Asteraceae e Poaceae, além da presença da família Rubiaceae. Corroborando com esses resultados, Oliveira e Freitas (2008) afirmaram que as famílias Poaceae e Asteraceae são as principais famílias de plantas daninhas existentes no Brasil. A predominância dessas famílias pode estar relacionada pelas interações das condições climáticas e as características biológicas dessas plantas daninhas que incluem alta capacidade ecológica de dominância, alta produção de propágulos, fácil dispersão e tolerância à desfolhação (LINDER et al., 2018).

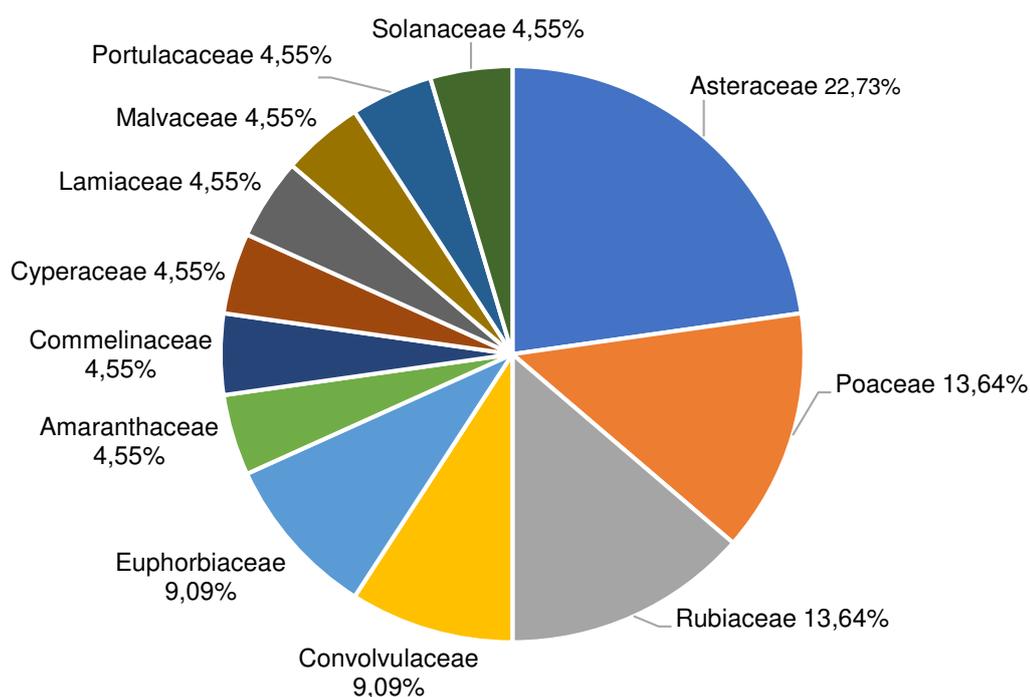
Tabela 3 - Espécies de plantas daninhas encontradas nos levantamentos fitossociológicos até 120 dias após a aplicação (DAA) de indaziflam em ambas as fazendas.

Família	Nome científico	Nome comum	Ciclo de vida	Forma de reprodução
Amaranthaceae	<i>Amaranthus</i> spp.	Caruru	Anual	Sementes
	<i>Bidens subalternans</i> DC.	Picão-Preto	Anual	Sementes
	<i>Conyza</i> spp.	Buva	Anual	Sementes
Asteraceae	<i>Emilia fosbergii</i> Nicolson	Falsa-Serralha	Anual	Sementes
	<i>Galinsoga parviflora</i> Cav.	Picão-Branco	Anual	Sementes
	<i>Taraxacum officinale</i> (L.) Webber ex F. H. Wigg.	Dente-de-leão	Anual ou bienal	Sementes
Commelinaceae	<i>Commelina benghalensis</i> L.	Trapoeraba	Perene	Sementes, estolões e rizomas
Convolvulaceae	<i>Ipomoea purpurea</i> (L.) Roth.	Corda-de-viola	Anual	Sementes
	<i>Ipomoea</i> spp.	Corda-de-viola	Anual	Sementes
Cyperaceae	<i>Cyperus rotundus</i> L.	Tiririca	Perene	Sementes, tubérculos, bulbos basais e rizomas
Euphorbiaceae	<i>Chamaesyce hirta</i> (L.) Millsp.	Erva-de-Santa-Luzia	Anual	Sementes
	<i>Euphorbia heterophylla</i> L.	Leiteiro	Anual	Sementes

Lamiaceae	<i>Mentha suaveolens</i> Ehrh.	Mentrassto	Anual	Sementes
Malvaceae	<i>Malvastrum</i> <i>coromandelianum</i> (L.) Garcke.	Guaxuma	Anual ou perene	Sementes
	<i>Digitaria insularis</i> (L.) Fedde	Capim- amargoso	Perene	Sementes ou rizomas
Poaceae	<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn	Pé-de-galinha	Anual ou perene	Sementes
	<i>Urochloa decumbens</i> (Stapf) R. D. Webster	Braquiária	Perene	Rizomas e estolões
Portulacaceae	<i>Portulaca oleracea</i> L.	Beldroega	Anual	Sementes
	<i>Carapichea</i> <i>ipecacuanha</i> (Brot.) L. Andersson	Poaia-branca	Anual	Sementes
Rubiaceae	<i>Richardia brasiliensis</i> Gomes	Poaia-branca	Anual	Sementes
	<i>Spermacoce latifolia</i> Aubl.	Erva-quente	Anual	Sementes
Solanaceae	<i>Solanum americanum</i> Mill.	Maria-pretinha	Anual	Sementes

Fonte: Adaptado de Lorenzi (2014).

Figura 4 - Famílias botânicas das plantas daninhas encontradas nas duas áreas experimentais.



As famílias botânicas que estavam presentes nas áreas de estudos são muito frequentes na cultura do café. A família Poaceae apresenta alto número de espécies perenes com produção de grande número de sementes e estruturas morfofisiológicas que facilitam a dispersão por meio de fatores ambientais como o vento, homem, animais e água (HOLM et al., 1991). A família Asteraceae também é bastante difundida por possuir alta capacidade de adaptação ambiental de seus representantes que se encontra em diversas formações vegetais predominantes na região Centro-Sul do país (CORREIA et al., 2021). A família Rubiaceae é cosmopolita, predominantemente Pantropical e estão adaptadas a praticamente todos os habitats e são especialmente diversas na Bacia Amazônica, nos cerrados, nas caatingas, nas restingas e nas florestas atlânticas do Brasil (DELPRETE e JARDIM, 2012).

A maior parte das espécies que foram identificadas são de ciclo anual e propagadas por sementes, entretanto algumas espécies são bienais como *Taraxacum officinale*, e perenes como *Commelina benghalensis*, *Cyperus rotundus*, *Malvastrum coromandelianum*, *Urochloa decumbens*, *Digitaria insularis* e *Eleusine indica* (Tabela 3). A propagação vegetativa foi presente apenas nas espécies *C. benghalensis*, *C. rotundus*, *U. decumbens* e *D. insularis*. As famílias Asteraceae e Rubiaceae ocorreram apenas com espécies de propagação por sementes, enquanto na família Poaceae havia espécies com propagação por rizomas, estolões e sementes. Essas características são essenciais para auxiliar na tomada de decisão quanto ao manejo de plantas daninhas a ser adotado. A ocorrência de espécies com diferentes ciclos de vida e propagação é relatada em diversos estudos na cultura do café (OLIVEIRA et al., 2020; CONCENÇO et al., 2014; MOREIRA et al., 2013; RODRIGUES et al., 2020) e esse comportamento está diretamente relacionado com altas ocorrências das famílias Asteraceae (sementes) e Poaceae (sementes e estruturas vegetativas).

4.3.3 Índice de valor de importância

Ao avaliar a comunidade infestante de plantas daninhas no LV_{ar} sem cobertura do solo aos 60 e 120 DAA com e sem aplicação de indaziflam (Figuras 5A, 5B, 5C e 5D) foi possível observar que o indaziflam modificou a dinâmica da

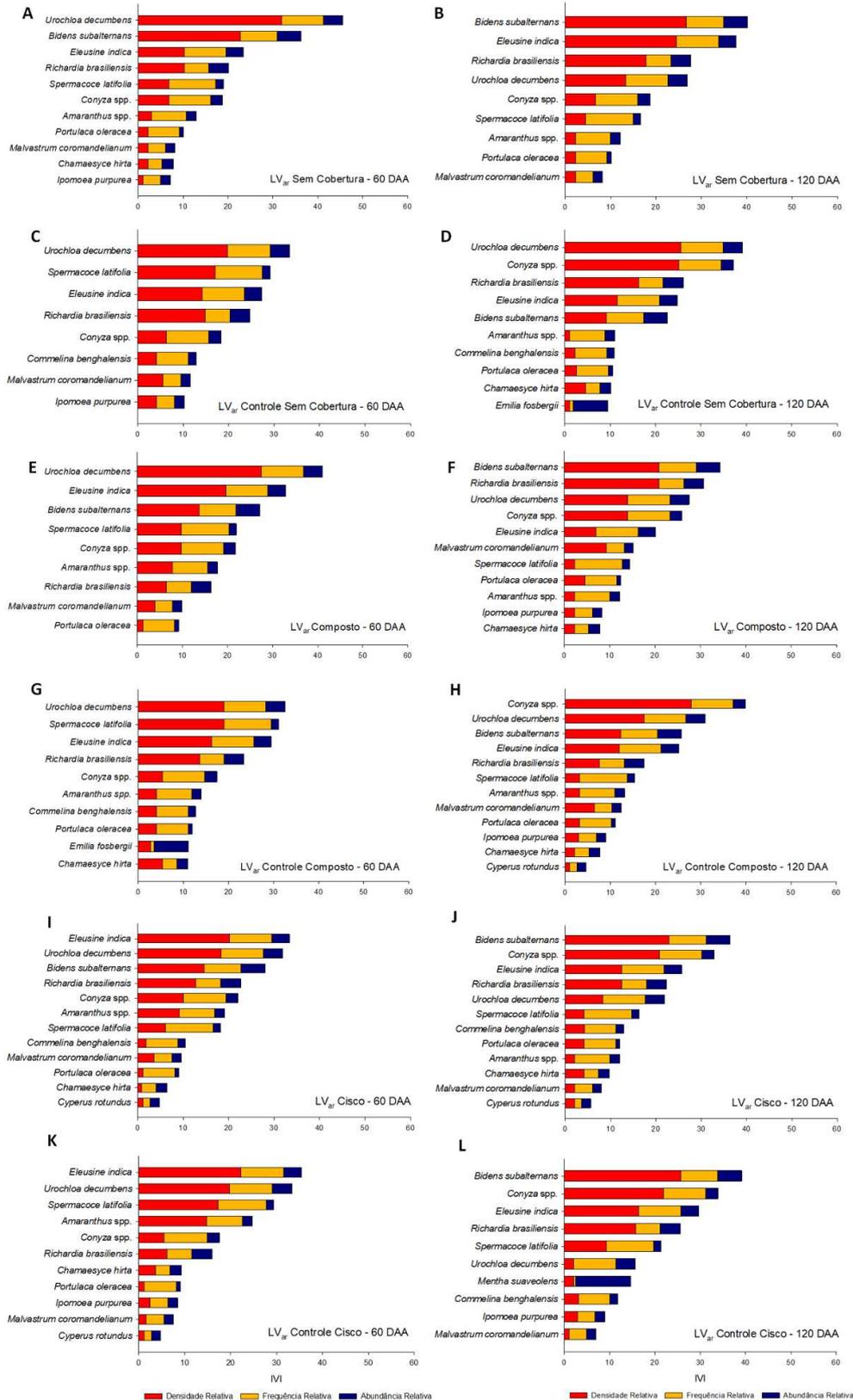
comunidade infestante. Com aplicação de indaziflam aos 60 DAA ocorreu maior número de espécies em comparação ao controle, entretanto a maioria das espécies apresentaram baixos valores de IVI, exceto para *B. subalternans* (36,28) e *U. decumbens* (45,52). Aos 120 DAA, as espécies com maiores IVI na área aplicada com LV_{ar} foram *B. subalternans* (40,13), *E. indica* (37,63) e *R. brasiliensis* (27,63), além de *U. decumbens* (26,91) (Figura 5B). Enquanto nas áreas sem aplicação de indaziflam foi observado grande valor de IVI para a *Conyza* spp. (37,19) (Figura 4D), que pode apresentar problemas de controle de biótipos resistentes ao glyphosate na cultura do café (SILVA et al., 2018).

As espécies com maiores IVI das plantas daninhas em LV_{ar} com composto aos 60 DAA foram *U. decumbens* (41,03), *E. indica* (32,81), *B. subalternans* (21,18) e *S. latifolia* (21,93) nas áreas com aplicação de indaziflam (Figura 5E). Enquanto nas áreas sem aplicação de indaziflam aos 60 DAA, as espécies com maiores IVI foram *U. decumbens* (32,60), *S. latifolia* (31,16) e *E. indica* (29,50) (Figura 5G). Aos 120 DAA, nas áreas com aplicação do indaziflam (Figura 5F) as espécies com maior IVI foram *B. subalternans* (34,39), *R. brasiliensis* (30,78) e *U. decumbens* (27,53). Nas áreas sem aplicação do indaziflam aos 120 DAA (Figura 5H), destacou-se novamente o maior número de espécies de plantas daninhas e a grande importância de *Conyza* spp.

A aplicação de indaziflam no LV_{ar} com cisco (Figuras 5I) proporcionou menor número de espécies de plantas daninhas, bem como redução na densidade relativa da maioria das espécies observadas comparado aos 60 DAA comparada aos 60 DAA sem aplicação de indaziflam (Figura 5K). Aos 120 DAA, observou-se a presença de *Conyza* spp. com alto valor IVI nas áreas com e sem aplicação de indaziflam (Figuras 5J e 5L). A incidência de *Conyza* spp. mesmo na área com aplicação de indaziflam pode estar relacionada à natureza da cobertura do solo utilizada, pois o cisco é composto basicamente de restos vegetais provenientes da roçada na entrelinha do café, ou seja, pode conter sementes de diversas espécies de plantas daninhas. Entretanto, aos 120 DAA, foi observado redução principalmente na densidade relativa da comunidade de plantas daninhas nas áreas com aplicação de indaziflam.

Figura 5 - Índice de valor de importância (IVI) (densidade relativa + frequência relativa + abundância relativa) da comunidade infestante de plantas daninhas aos 60

(A, C, E, G, I e K) e 120 (B, D, F, H, J e L) dias após a aplicação (DAA) de indaziflam (75 g i.a. ha⁻¹) (A-B, E-F e I-J) comparado com o controle (sem aplicação do herbicida) (C-D, G-H, K-L) em Latossolo Vermelho argiloso da fazenda IPACER sem cobertura do solo (A-D), com composto orgânico (5 t ha⁻¹) (E-H) e cisco (5 t ha⁻¹) (I-L). Os resultados estão expressos em porcentagem (%).

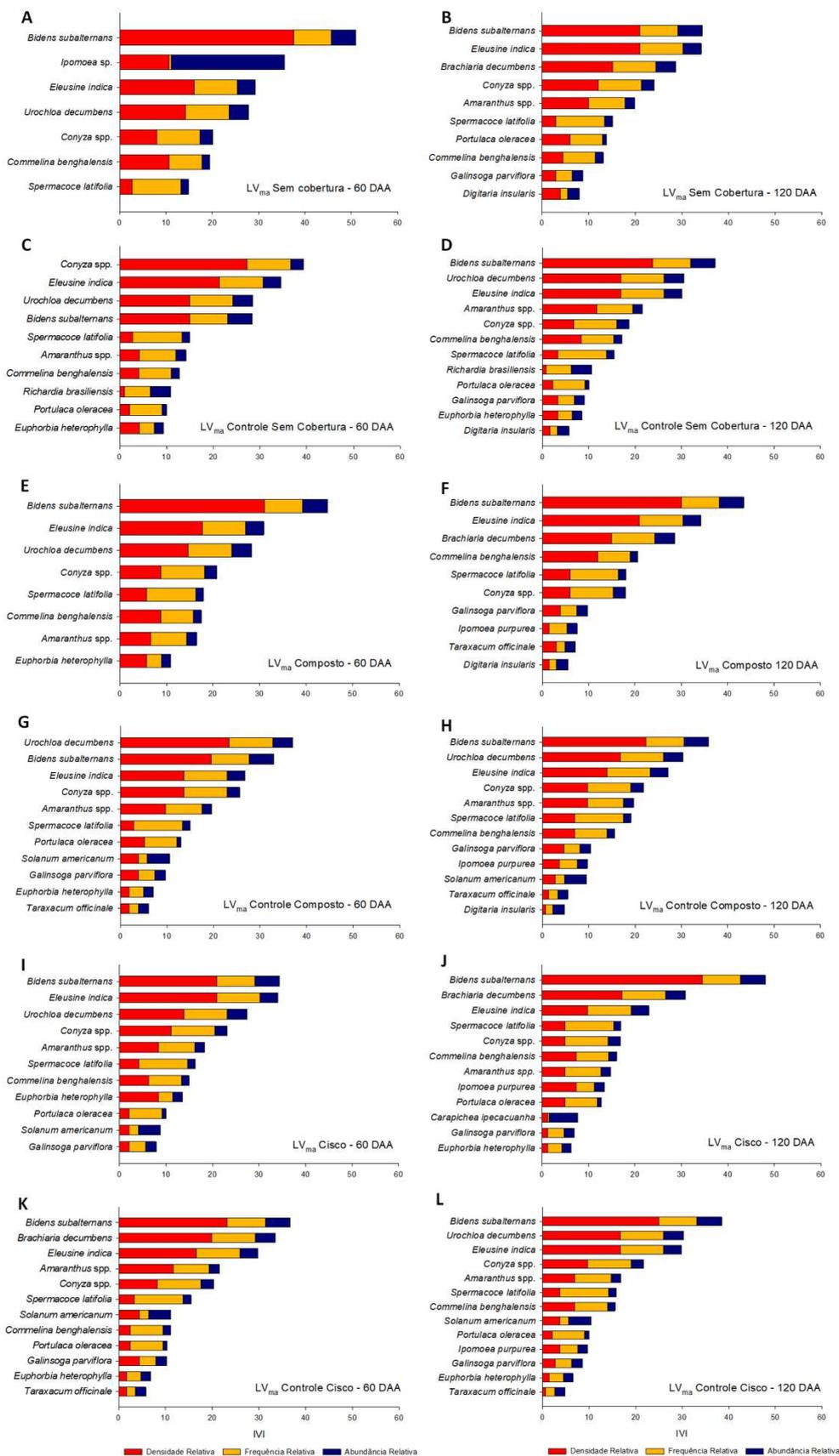


A comunidade de plantas daninhas do LV_{ma} sem cobertura (Figuras 6A, 6B, 6C e 6D) foi modificada pela aplicação do indaziflam, principalmente até aos 60 DAA, em que foram observadas 7 espécies nos locais com aplicação de indaziflam e 10 espécies nos solos sem aplicação (Figuras 6A e 6C). Aos 120 DAA, foram observadas 10 espécies nas áreas com indaziflam e 12 espécies nas áreas sem indaziflam (Figuras 6B e 6D), apesar da pequena diferença, relatou-se que espécies de difícil controle na cultura do café, como *U. decumbens* e *C. benghalensis*, que tiveram maior IVI nas áreas sem aplicação do indaziflam (Figura 6D).

Nas áreas de LV_{ma} com composto (Figuras 6E, 6F, 6G e 6H), o número total de espécies observadas com aplicação de indaziflam foi menor (8) quando comparado às áreas sem aplicação (11), aos 60 DAA (Figuras 6E e 6G). Essa redução no número de espécies foi acompanhada por uma redução na densidade relativa da maioria das espécies observadas nas áreas com aplicação de indaziflam. Aos 120 DAA, essa diferença foi menor, mas ainda houveram menos espécies nas áreas com aplicação de indaziflam (Figuras 6F e 6H).

No LV_{ma} com cisco (Figuras 6I, 6J, 6K e 6L), aos 60 DAA, foi observado menor número total de espécies (11) nas áreas com aplicação de indaziflam em relação ao controle (12) (Figuras 6I e 6K). Além disso, houve redução no IVI das plantas daninhas mais importantes, indicando maior equilíbrio competitivo na comunidade infestante. Aos 120 DAA, houve maior IVI para a espécie *B. subalternans*, *U. decumbens* e *E. indica* nas áreas com e sem aplicação do indaziflam (Figuras 6J e 6L). Isso indica que essas espécies possuem maior adaptação e capacidade de sobrevivência na presença de indaziflam no solo em comparação com o restante da comunidade infestante de plantas daninhas.

Figura 6 - Índice de valor de importância (IVI) (densidade relativa + frequência relativa + abundância relativa) da comunidade infestante de plantas daninhas aos 60 (A, C, E, G, I e K) e 120 (B, D, F, H, J e L) dias após a aplicação (DAA) de indaziflam (75 g i.a. ha⁻¹) (A-B, E-F e I-J) comparado com o controle (sem aplicação do herbicida) (C-D, G-H, K-L) em Latossolo Vermelho muito argiloso da fazenda Glória sem cobertura do solo (A-D), com composto orgânico (5 t ha⁻¹) (E-H) e cisco (5 t ha⁻¹) (I-L). Os resultados estão expressos em porcentagem (%).



O indaziflam interferiu diretamente na composição da comunidade florística de plantas daninhas nas lavouras de café. De acordo com o estudo realizado por Pucci

et al. (2019), a eficiência de controle com indaziflam aos 30, 68 e 104 DAA, nas seguintes plantas daninhas: *Bidens pilosa*, *C. benghalensis*, *U. decumbens*, *E. fosbergii* e *M. perfoliatum*, plantas comumente encontradas em cafezais e de maior abundância na região, foi satisfatória em todas plantas daninhas, com exceção da *C. benghalensis*, que foi <80%, a partir de 30 DAA.

De acordo com o estudo de Clarck et al. (2020) o indaziflam foi eficiente no controle de diversas gramíneas anuais. Sebastian et al. (2016) ressaltaram o alto potencial do indaziflam para controlar diversas espécies de ciclo anual, monocotiledôneas e eudicotiledôneas. Amim et al. (2016) e Sebastian et al. (2019) relataram que o indaziflam controla uma grande diversidade de plantas daninhas, como *D. horizontalis*, *P. maximum* e *R. cochinchinensis*, presentes no Brasil. Essas informações são importantes para a cultura do café, pois frequentemente são encontradas essas espécies nas áreas de cultivo, como relatado por Gomes et al. (2019), em estudo do indaziflam na cultura do café, as plantas daninhas mais abundantes na área foram *E. indica*, *R. raphanistrum*, *B. pilosa* e *Melampodium paludosum*.

Dessa forma, o indaziflam representa uma opção muito eficaz para controle de plantas daninhas em PRE, inclusive no manejo de biótipos resistentes ou tolerantes a outros herbicidas, como *E. heterophylla*, *Amaranthus hybridus*, e *Conyza bonariensis* ao glyphosate (MENDES, 2020; HEAP, 2023).

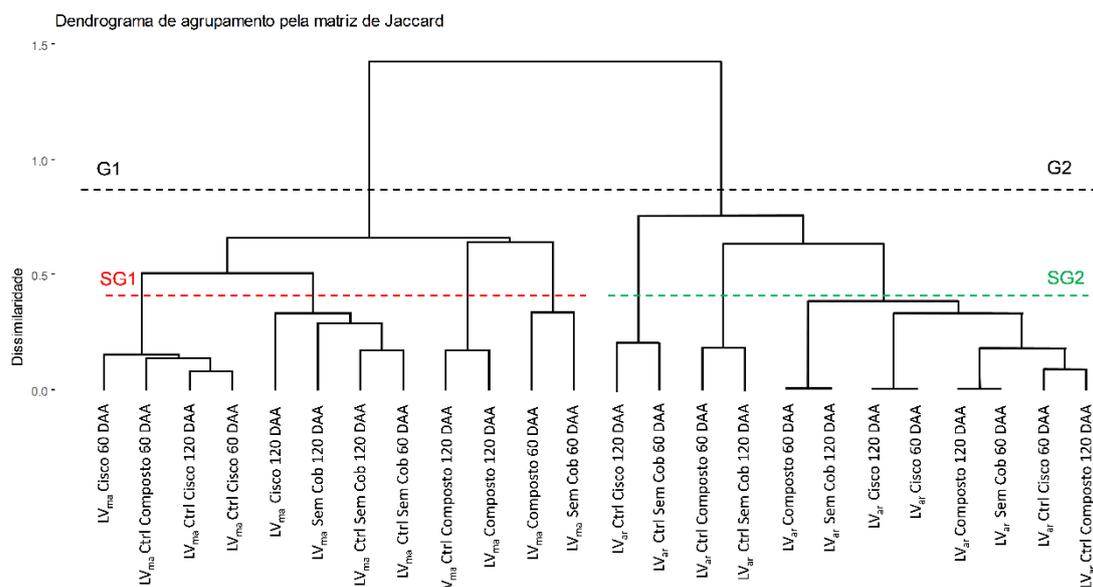
De modo geral, as maiores diferenças em relação ao número total de espécies e seus respectivos IVI em ambos os solos foram observadas até aos 60 DAA. Por outro lado, aos 120 DAA, as maiores diferenças observadas em ambos os solos na maioria das plantas foram na densidade relativa. Isso indica que apesar de haver a presença das espécies nas áreas com aplicação de indaziflam, o nível da infestação foi muito diferente quando comparado às áreas sem aplicação.

4.3.4 Índice de Similaridade

De acordo com o dendrograma gerado a partir da matriz de dissimilaridade da comunidade infestante de plantas daninhas em ambos os solos com diferentes coberturas e aplicação de indaziflam comparado aos controles foi possível distinguir dois grupos principais (G1 e G2) (Figura 7). Nesse agrupamento foi encontrado que as comunidades presentes no G1 foram todos no LV_{ma}, enquanto o G2 pertenceram

exclusivamente ao LV_{ar} . Portanto, a comunidade infestante de plantas daninhas foi diretamente influenciada pelo local de origem dos solos.

Figura 7 - Dendrograma de similaridade entre comunidades infestantes de plantas daninhas de Latossolo Vermelho argiloso (LV_{ar}) da fazenda Ipacer e Latossolo Vermelho muito argiloso (LV_{ma}) da fazenda Glória com três coberturas (cisco, composto e sem cobertura) submetidos aos 60 e 120 dias após a aplicação (DAA) de indaziflam ($75 \text{ g i.a. ha}^{-1}$) em comparação ao controle (Ctrl, sem aplicação). Linha pontilhada preta = divisão nos dois grupos principais (G1 e G2). Linha pontilhada vermelha = divisão do subgrupo 1 (SG1). Linha pontilhada verde = divisão do subgrupo 2 (SG2).



Dentro do G1 foram observados subgrupos (SG1) com alta similaridade, que foram compostos principalmente pelas áreas com utilização de cisco, sem cobertura do solo e com a cobertura de composto orgânico, respectivamente (Figura 7). Esse comportamento destacou que as coberturas do solo exerceram efeito direto na composição da comunidade infestante de plantas daninhas no LV_{ma} .

No G2 também foram formados subgrupos (SG2), e neles foi possível observar uma divisão baseada principalmente na aplicação ou não do indaziflam, independente da cobertura utilizada (Figura 7). Portanto, no LV_{ar} o efeito da cobertura foi menos influente para determinar a dinâmica da comunidade infestante de plantas daninhas.

4.4 CONCLUSÕES

As coberturas do solo com cisco e composto orgânico aplicados na dose de 5 t ha⁻¹ não afetaram o efeito residual do indaziflam (75 g i.a. ha⁻¹) nos dois solos estudados e a RL₅₀ foi > 180 dias para todos os solos e coberturas.

A utilização das coberturas do solo com cisco e composto orgânico não reduziram a eficiência de controle das plantas daninhas com a aplicação de indaziflam. Portanto, essas coberturas podem ser utilizadas na cultura do café, nas condições deste estudo, sem a necessidade de aumentar a dose do indaziflam necessária para o controle eficiente da comunidade infestante de plantas daninhas. Entretanto, mais estudos são necessários para avaliar variações nas doses da cobertura e herbicida.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCANTARA, E. N.; SILVA, R. A. Manejo do Mato em Cafezais. In: REIS, P. R.; CUNHA, R. L. (Eds.). **Café arábica do plantio a colheita**. Lavras: EPAMIG, v.1, 2010. p. 519-572.
- AMIM, R. T. et al. Banco de sementes do solo após aplicação de herbicidas pré-emergentes durante quatro safras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 10, p. 1710-1719, 2016.
- AMIN, R. T. et al. Controle de plantas daninhas pelo indaziflam em solos com diferentes características físico químicas. **Planta Daninha**, v. 32, n. 4, p. 791-800, 2014.
- BUSI, R. et al. Rotations and mixtures of soil-applied herbicides delay resistance. **Pest Management Science**, v. 76, n. 2, p. 487-496, 2020.
- CLARCK, S. C. et al. Evaluating winter annual grass control and native species establishment following applications of indaziflam on rangeland. **Invasive Plant Science and Management**, v. 13, n. 3, p. 199-209, 2020.
- CLARK, S. L. et al. The influence of winter annual grass litter on herbicide availability. **Weed Science**, v. 67, n. 6, p. 702-709, 2019.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Levantamento de safra CONAB**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso: 01 de julho de 2023.
- CONCENÇO, G. et al. Infestation of weed species in monocrop coffee or intercropped with banana, under agroecological system. **Planta Daninha**, v. 32, n. 4, p. 665–674, 2014.
- CORREIA, N. M. et al. **Levantamento fitossociológico de plantas daninhas em áreas de milho com e sem consórcio com BRS Zuri**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados; 2021. 22 p.
- COURKAMP, J. S. et al. Indaziflam reduces seed bank richness and density but not sagebrush-grassland plant diversity. **Rangeland Ecology & Management**, v. 84, p. 31-34, 2022.
- DAVIES, K. W. et al. Effects of using indaziflam and activated carbon seed technology in efforts to increase perennials in *Ventenata dubia*-invaded rangelands. **Rangeland Ecology & Management**, v. 88, p. 70-76, 2023.
- DELPRETE, P. G.; JARDIM, J. G. Systematics, taxonomy and floristics of Brazilian Rubiaceae: an overview about the current status and future challenges. **Rodriguésia**, v. 63, n. 1, p. 101–128, 2012.
- DIAS, R. C. et al. Seleção de espécies bioindicadoras para o herbicida indaziflam. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 18, n. 2, p. e651, 2019.

DO NASCIMENTO, J. L. M. et al. Tolerância de plantas jovens de café a herbicidas aplicados isoladamente ou em mistura com o fertilizante fertiactyl. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 18, n. 4, p. 681-688, 2020.

GOMES, C. A. et al. Indaziflam application in newly transplanted Arabica coffee seedlings. **Coffee Science**, v. 14, p. 373-381, 2019.

GONÇALVES, V. A. et al. Sorption of indaziflam in Brazilian soils with different pH values. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 3, p. 494-504, 2021.

GONZALES-DELGADO, A. M. et al. Mobility of indaziflam influenced by soil properties in a semi-arid area. **Plos One**, v. 10, n. 5, p. 1-12, 2015.

GONZÁLEZ-DELGADO, A. M.; SHUKLA, M. K. Mobility, degradation, and uptake of indaziflam under greenhouse conditions. **HortScience**, v.55, p.1216-1221, 2020.

GREY, T. L et al. Response of young pecan trees to repeated applications of indaziflam and halosulfuron. **HortScience horts**, v. 53, n. 3, p. 313-317, 2018.

GREY, T. L. et al. High-density plantings of olive trees are tolerant to repeated applications of indaziflam. **Weed Science**, v. 64, n. 9, p. 766-771, 2016.

GUERRA, N. et al. Persistence of biological activity and leaching potential of herbicides aminocyclopyrachlor and indaziflam in soils with different textures. **Planta Daninha**, v. 34, n. 2, p. 345–56, 2016.

HEAP, I. **The International Herbicide-Resistant Weed Database**. <http://www.weedscience.org/Home.aspx>. Acesso em: 10 de junho de 2023.

HOLM, L. G. et al. **The world's worst weeds – distribution and biology**. 2nd ed. Malabar, USA: Krieger Publishing Company, 1991. 609 p.

HOSKINS, W.M. Mathematical treatment of the rate of loss of pesticide residues. **Food and Agriculture Organization Plant Protection Bulletin**, v. 9, p. 214–215, 1961.

JEFFRIES, M.; GANNON, T. Soil Organic Matter Content and Volumetric Water Content Affect Indaziflam–Soil Bioavailability. **Weed Science**, v. 64, n. 4, p. 757-765, 2016.

JHALA, A. J.; SINGH, M. Leaching of indaziflam compared with residual herbicides commonly used by Florida citrus. **Weed Technology**, v. 26, n. 3, p. 602-607, 2012.

LEMES, L. N. et al. Weed interference on coffee fruit production during a four-year investigation after planting. **African Journal of Agricultural Research**., v. 5, n. 10, p. 1138-1143, 2010.

LEWIS, K.; TZILIVAKIS, J. Development of a data set of pesticide dissipation rates in/on various plant matrices for the pesticide properties database (PPDB). **Data**, v. 2, n. 3, p. e28, 2017.

LINDER, H. P. et al. Global grass (Poaceae) success underpinned by traits facilitating colonization, persistence and habitat transformation. **Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society**, v. 93, n. 2, p. 1125-1144, 2018.

MENDES, K. F. et al. Efeito residual de herbicidas em solos agricultáveis. In. TORNISIELO, V. L.; VILCA, F. Z.; GUIMARÃES, C. D.; MENDES, K. (Eds.). **Contaminantes Orgânicos: da Análise a Biorremediação**. Piracicaba, SP: FFEALQ: Piracicaba, SP, Brasil, p. 157-178, 2019.

MENDES, K. F. **Plantas daninhas resistentes ao glyphosate no Brasil: biologia, mecanismo de resistência e manejo**. 1. ed. Curitiba PR, Brasil: Brazil Publishing, 2020. v. 1. 266 p.

MONQUERO, P. A. et al. Eficiência de herbicidas pré-emergentes após períodos de seca. **Planta Daninha**, v. 26, n.1, p.185-193, 2008.

MORAIMA, G. S. et al. A contribution to determine critical levels of weed interference in coffee crops of Monagas state, Venezuela. **Bioagro**, v. 12, n. 3, p. 63-70, 2000.

MOREIRA, G. M. et al. Phytosociology of weeds in a coffee plantation intercropped with legume crops. **Planta Daninha**, v. 31, n. 2, p. 329-340, 2013.

OLIVEIRA A. R.; FREITAS SP. Levantamento fitossociológico de plantas daninhas em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 28, n. 1, p. 33-46, 2008.

OLIVEIRA, S. M. et al. Phytosociological survey of weeds in coffee plants irrigated under different systems. **Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 11, p. 179-189, 2020.

PAULA, D. F. et al. Oxyfluorfen and Linuron: Residual Effect of Pre-Emergence Herbicides in Three Tropical Soils. **Agrochemicals**, v. 2, n. 1, p. 18-33, 2023.

PUCCI, L. F. et al. Association of indaziflam and oxyfluorfen in coffee pre-transplantation. **Coffee Science**, v. 14, n. 3, p. 359-365, 2019.

R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING. **R: a language and environment for statistical computing**, version 3.6.0; R core team: Viena, Austria, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org>. Acesso em: 15 julho de 2023.

RODRIGUES, R. J. A. et al. Phytosociology of weeds on Cerrado Mineiro coffee growing farms. **Advances in Weed Science**, v. 40, p. e020220029, 2022.

SANTIN, C. O. et al. Weed management in soybean using burndown herbicides associated to pre-emergent herbicides. **Communications in Plant Science**, v. 9, p. 46-52, 2019.

SAVARIS, Q. M. et al. Determinação do efeito residual de indaziflam e amicarbazone em dois solos por meio de bioensaio. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 18, n. 3, p. 1-7, 2019.

SEBASTIAN, D. J. et al. Total vegetation control: a comprehensive summary of herbicides, application timings, and resistance management options. **Weed Technology**, v. 34, n. 2, p. 155-163, 2019.

SILVA, C. A. et al. Chemical control of *Conyza canadensis* (L.), in mixtures of herbicides with glyphosate in coffee crop. **Coffee Science**, v. 13, n. 2, p. 252-256, 2018.

SILVA, P. V. et al. Efeito da palha de cana-de-açúcar e da precipitação na eficácia de indaziflam. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 4, p. 1040-1051, 2019.

SINGH, M. et al. Indaziflam: A new preemergence herbicide for citrus. In: Weed Science Society of America, 51., Portland – Oregon, USA. **Proceedings ...** v. 49, p. 44, 2011.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE PLANTAS DANINHAS - SBCPD. **Procedimento para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas**. Londrina, PR: SBCPD, 1995. 72 p.

U.S. EPA. 2010. Pesticide fact sheet: **Indaziflam**. Conditional registration. Disponível em: https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC-080818_26-Jul-10.pdf. Acesso em: 08 de julho de 2023.

VALENTIN, J. L. **Ecologia numérica**. Rio de Janeiro, RJ: Ed. Interciência. 2000. 118 p.

5 CAPÍTULO 2. DISSIPAÇÃO E LIXIVIAÇÃO DO INDAZIFLAM EM SOLOS COM DUAS COBERTURAS NA CULTURA DO CAFÉ

RESUMO

O controle de plantas daninhas na cultura do café com uso de herbicidas em pré-emergência, como o indaziflam, é uma prática comum. Entretanto, o destino do herbicida pode ser afetado pelo manejo cultural na área, como adição de coberturas vegetais na entrelinha da cultura. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar a dissipação e lixiviação do indaziflam em solos com duas coberturas na cultura do café. O estudo de dissipação foi realizado no campo nas fazendas IPACER (Latossolo Vermelho argiloso – LV_{ar}) e Glória (Latossolo Vermelho muito argiloso - LV_{ma}) em um esquema fatorial 2x3x8, com 5 repetições. O primeiro fator correspondeu a aplicação do indaziflam (75 g i.a. ha⁻¹) e a não aplicação, o segundo a três coberturas de solo (cisco, composto e sem cobertura) e o terceiro a oito épocas de avaliação (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210 dias após a aplicação - DAA). As amostras de solo foram coletadas do campo, secas e peneiradas para quantificação dos resíduos por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) pelo método de extração sólido-líquido com partição em baixa temperatura (ESL-PBT). O tempo de meia-vida da dissipação (DT₅₀) foi determinado utilizando cinética de primeira ordem. O estudo de lixiviação foi realizado em casa-de-vegetação em colunas de PVC com solos provenientes das fazendas IPACER e Glória sem a aplicação do indaziflam. O estudo foi realizado em delineamento inteiramente casualizado 2x3x6+1 com três repetições, com dois solos, três tipos de cobertura e seis profundidades avaliadas, além do controle sem a aplicação do indaziflam. As coberturas foram adicionadas no topo das colunas e foi aplicado o indaziflam (75 g i.a. ha⁻¹) com posterior simulação de 100 mm de chuva. Após 24 h os canos foram seccionados nas diferentes profundidades e foi avaliado o nível de injúria por meio de escala de notas e a quantificação da massa seca da espécie bioindicadora (soja). Os valores de DT₅₀ no LV_{ar} foram 95, 106 e 119 dias, para as áreas sem cobertura, composto e cisco, respectivamente. No LV_{ma}, os DT₅₀ foram de 135, 138 e 161 dias no solo com composto orgânico, cisco e sem cobertura, respectivamente. A dissipação do indaziflam foi mais lenta no LV_{ar} do que LV_{ma}. Apesar disso, a utilização de coberturas de composto orgânico e cisco não alterou a dissipação e

lixiviação do indaziflam. De modo geral, o indaziflam sofreu lixiviação limitada e os maiores níveis de injúria e redução na biomassa da espécie bioindicadora permaneceram nas camadas de 0-5 cm para ambos os solos e cobertura. Entretanto, também foram observadas injúrias e redução na biomassa da bioindicadora nas profundidades de 5-10 cm. Os resultados aqui demonstrados podem auxiliar os produtores de café na escolha de manejos de cobertura do solo compatíveis com aplicações indaziflam.

Palavras-chave: Herbicida. Pré-emergência. Transporte. Degradação.

ABSTRACT

Weed control in coffee crops using pre-emergence herbicides like indaziflam is a common practice. However, the fate of the herbicide can be affected by cultural management practices in the area, such as the addition of vegetative covers in the coffee inter-row spaces. Therefore, the objective of this study was to evaluate the dissipation and leaching of indaziflam in soils with two types of covers in coffee cultivation. The dissipation study was conducted in the field at the IPACER (Clayey Oxisol - LV_{ar}) and Glória (Very Clayey Oxisol - LV_{ma}) farms in a 2x3x8 factorial design, with 5 repetitions. The first factor corresponded to indaziflam application (75 g a.i. ha⁻¹) or no application, the second factor included three soil covers (cisco, organic compost, and bare soil), and the third factor involved eight evaluation times (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, and 210 days after application - DAA). Soil samples were collected from the field, dried, and sieved for residue quantification using high-performance liquid chromatography (HPLC) with the solid-liquid extraction method using low-temperature partition (ESL-PBT). The dissipation half-life (DT₅₀) was determined using first-order kinetics. The leaching study was conducted in a greenhouse using PVC columns filled with soils from the IPACER and Glória farms without the application of indaziflam. The experiment followed a completely randomized 2x3x6+1 design with three repetitions, involving two soils, three types of cover, and six evaluated depths, in addition to the control without indaziflam application. The covers were added to the top of the columns, and indaziflam (75 g a.i. ha⁻¹) was applied, followed by a simulation of 100 mm of rain. After 24 hours, the pipes were sectioned at different depths, and the injury level was assessed using a rating scale, along with the quantification of the dry mass of the bioindicator species (soybean). The DT₅₀ values in LV_{ar} were 95, 106, and 119 days for areas without cover, with compost, and with cisco, respectively. In LV_{ma}, the DT₅₀ values were 135, 138, and 161 days in the soil with organic compost, cisco, and without cover, respectively. The dissipation of indaziflam was slower in LV_{ar} than in LV_{ma}. However, the use of organic compost and cisco covers did not alter the dissipation and leaching of indaziflam. Overall, indaziflam exhibited limited leaching, and the highest injury levels and reduction in the biomass of the bioindicator species were observed in the 0-5 cm layers for both soils and covers. However, injuries and biomass

reduction of the bioindicator were also observed at depths of 5-10 cm. The results presented here can assist coffee producers in choosing soil cover management practices compatible with indaziflam applications.

Keywords: Herbicide. Pre-emergence. Transport. Degradation.

5.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e exportador de café no mundo e ocupa o segundo lugar entre os países consumidores. Essa produção corresponde a um terço da produção mundial de café, o que o coloca como o maior produtor há mais de 150 anos (FONTES et al., 2022). Além do desenvolvimento tecnológico, a disponibilidade de terra e mão de obra torna o Brasil internacionalmente competitivo. Como uma cultura intensiva em tecnologia, o café gera emprego e renda, especialmente quando se considera as outras atividades ao longo da cadeia produtiva, bem como o superávit da balança comercial, favorecendo o desenvolvimento econômico (FONTES et al., 2022).

A cultura do café possui um crescimento inicial lento e é muito sensível a competição com plantas daninhas, principalmente nos dois primeiros anos. A competição reduz o crescimento e rendimento do café. Nesse sentido, o controle de plantas daninhas com herbicidas é uma das principais práticas no manejo do café (ALCÂNTARA et al., 2000; RONCHI et al., 2001; SCHROTH et al., 2009; DAMATTA et al., 2010; ARAÚJO et al., 2012; RONCHI e SILVA, 2018).

A aplicação de herbicidas em PRÉ-emergência, diretamente no solo, é uma alternativa interessante para a cultura do café, pois esses produtos podem ser seletivos, possuem um período residual na área e são capazes de controlar os fluxos de emergências de plantas daninhas ao longo do tempo. Entre os principais herbicidas utilizados em PRÉ para a cultura do café, destaca-se o indaziflam, um herbicida registrado para essa cultura no ano de 2016 no Brasil. O indaziflam atua inibindo a biossíntese de celulose e pertence ao grupo químico alkylazine (TOMPKINS, 2010). Esse produto possui alta eficiência no controle de plantas daninhas, com amplo espectro de controle em espécies monocotiledôneas e dicotiledôneas, mesmo em doses baixas (BROSNAN et al., 2011; BROSNAN et al., 2012).

Ao recomendar doses de herbicidas em PRÉ é importante considerar as condições ambientais e o manejo da área, pois esses fatores influenciam processos como a dissipação e a lixiviação, bem como o destino final do herbicida (MENDES et al., 2013).

As interações do herbicida com a matriz do solo são complexas, de modo que a dissipação se torna um processo dinâmico e particular para cada combinação de

herbicida e solo (ROCHA et al., 2013). O tempo que o herbicida está ativo no solo para controle de plantas daninhas é denominado efeito residual e o mesmo pode ser determinado por meio da DT_{50} . Os processos de sorção e degradação por via microbiana, química e fotólise interferem diretamente na DT_{50} do herbicida (FERRI e VIDAL, 2003; CHRISTOFFOLETI et al., 2009). A DT_{50} do indaziflam é de aproximadamente 150 dias (PPDB, 2023). A persistência do herbicida é um fator importante para a eficiência dos herbicidas aplicados em PRÉ pois ela deve durar o suficiente para controlar os fluxos de emergência de plantas daninhas ao longo do tempo. Entretanto, persistências muito longas podem causar injúrias na cultura de interesse caso o herbicida entre em contato com as raízes. Além disso, altas persistências podem causar injúrias em culturas em sucessão, efeito denominado *carryover*.

A lixiviação do herbicida no solo é influenciada pelas condições edafoclimáticas e por características como solubilidade em água e lipofilicidade, que determinam sua capacidade de movimentação no solo (MANCUSO et al., 2011). O processo de lixiviação de certa forma é importante para o bom controle de plantas daninhas, pois é necessário que o herbicida também alcance as camadas até 10 cm de profundidade onde se encontra mais de 95% de todo o banco de sementes (DOS REIS et al., 2017). No entanto, o herbicida não deve ser lixiviado para camadas mais profundas para evitar redução na eficiência de controle e contaminação de lençóis freáticos (MONQUERO et al., 2008; AMIM et al., 2016).

A utilização de coberturas vegetais é uma prática muito comum na cultura do café em complemento ao controle químico. Os materiais orgânicos mais utilizados são: palha de café, esterco bovino e de galinha, "cisco" (restos vegetais do café triturado no recolhimento mecanizado), composto (esterco + palha). Entretanto, a presença de coberturas vegetais no solo como palhadas pode afetar os processos de lixiviação e dissipação dos herbicidas (SILVA et al., 2019). Nesse sentido, informações sobre a persistência e transporte do indaziflam são necessárias para minimizar o risco de injúria fora do alvo da planta (JEFFRIES et al., 2014). Além disso, existem poucas informações sobre persistência e transporte do indaziflam na cultura do café, principalmente em condições de campo. Esses estudos podem auxiliar os produtores de café na escolha de manejos de cobertura do solo compatíveis com aplicações indaziflam.

Diante das informações apresentadas, o objetivo deste estudo foi avaliar a dissipação e a lixiviação do indaziflam em solos com duas coberturas na cultura do café.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Dissipação do indaziflam

5.2.1.1 Locais de estudo

Os estudos foram realizados em Rio Paranaíba-MG em duas fazendas distintas. A área pertencente à fazenda Glória, situa-se em latitude 19°10'11" S e longitude 46°12'49" O (Figura 1), altitude de 1100 m acima do nível mar, com cultivar Catucaí 2 SL (*Coffee arabica*), espaçamento de 4 m entre linhas e 0,5 m entre plantas, plantio realizado em 12/2001. O solo onde foram implantados os experimentos foi classificado como Latossolo Vermelho de textura muito argilosa (LV_{ma}) (Tabela 1). A outra área pertencente a fazenda IPACER, situa-se latitude 19°10'35" S e longitude 46°06'09" O (Figura 1), altitude 990 m ao nível do mar, com cultivar Catucaí 144 (*C. arabica*), espaçamento de 3,8 m entre linhas e 0,6 m entre plantas, plantio realizado em 12/2018, onde o solo desta área foi classificado como Latossolo Vermelho de textura argilosa (LV_{ar}) (Tabela 1). O clima dos locais experimentais foi denominado Cwb, de acordo com a classificação Köppen (clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado), com temperatura média entre 16 e 23°C e precipitação inferior a 2000 mm anuais.

Figura 1 - Locais de estudos cultivados com café (*Coffee arabica*) - cultivar Catucaí 2 SL e Catuaí 144 nas unidades experimentais da fazenda Glória e IPACER, respectivamente. Rio Paranaíba-MG.

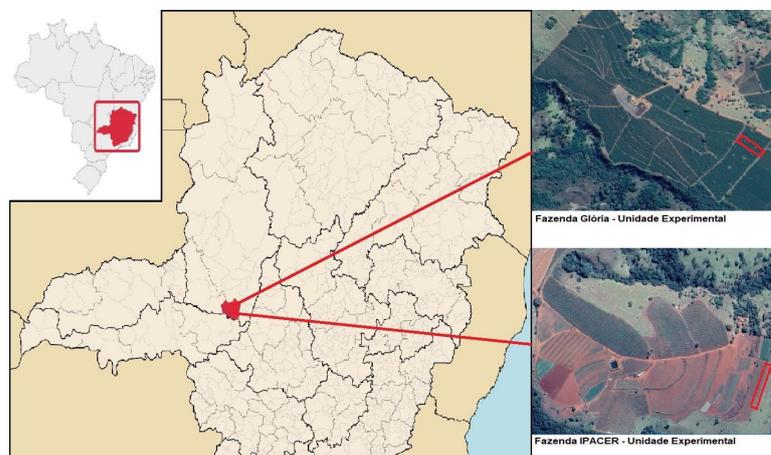


Tabela 1 - Propriedades físico-químicas dos solos nas áreas de estudo. Rio Paranaíba-MG.

Propriedades	Unidade	Local	
		IPACER	Glória
pH	CaCl ₂	4,90	5,30
pH	H ₂ O	5,50	5,90
H+Al	cmol _c dm ⁻³	3,80	2,60
Alumínio	cmol _c dm ⁻³	0	0
Cálcio	cmol _c dm ⁻³	2,60	2,90
Magnésio	cmol _c dm ⁻³	0,60	0,50
Potássio	cmol _c dm ⁻³	0,20	0,05
Fósforo (Mehlich)	mg dm ⁻³	10,0	3,00
Fósforo (Resina)	mg dm ⁻³	17,0	7,00
Carbono orgânico	%	2,30	1,40
Matéria orgânica	%	4,00	2,40
Soma de Bases	cmol _c dm ⁻³	3,40	3,50
Capacidade de troca catiônica	cmol _c dm ⁻³	7,20	6,05
Saturação de bases	%	47,22	57,02
Enxofre	mg dm ⁻³	15,4	7,10
Sódio	mg dm ⁻³	2,00	2,40
Boro	mg dm ⁻³	0,30	0,30
Ferro	mg dm ⁻³	19,80	13,40
Manganês	mg dm ⁻³	12,80	2,20
Cobre	mg dm ⁻³	2,70	1,10
Zinco	mg dm ⁻³	10,20	2,60
Cascalho	%	0	0
Areia Grossa	%	15,60	6,00
Areia Fina	%	14,10	6,00
Argila	%	45,00	73,00
Silte	%	25,30	15,00
Densidade Aparente	g cm ⁻³	1,20	1,10
Densidade Real	g cm ⁻³	2,90	3,00
Classe textural		Argiloso	Muito argiloso

pH = potencial de hidrogênio. H+Al = hidrogênio + alumínio.

Fonte: Laboratório Unithal, Rio Paranaíba – MG.

5.2.1.2 Delineamento experimental

A implantação dos estudos nas duas fazendas foi em delineamento inteiramente casualizado (DIC) em cada local, composto de um fatorial 2x3x8, com 3 repetições, em que o primeiro fator correspondeu a aplicação do indaziflam (75 g i.a. ha⁻¹) e a não aplicação, o segundo a três coberturas de solo (cisco, composto e sem cobertura) e o terceiro a oito épocas de avaliação (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210 dias após a aplicação - DAA). Os tamanhos das parcelas foram de 10 m de

comprimento e 1 m de largura, totalizando 10 m². A bordadura foi de 1 m de cada extremidade perfazendo um total de área útil de 8 m².

5.2.1.3 Coberturas do solo

Os materiais utilizados para cobertura do solo foram: os ciscos (5 t ha⁻¹) (resíduos vegetais do meio da entrelinha do café) e compostos (palha + esterco, 2 + 3 t ha⁻¹, respectivamente), produzida na Fazenda IPACER, em Rio Paranaíba - MG e esterco de galinha, produzido na granja Ferrão, em Santo Antônio do Monte – MG, além do solo exposto sem nenhuma cobertura. As propriedades químicas dos materiais estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades químicas dos materiais composto orgânico e cisco.

Propriedades	Unidade	Cisco	Composto orgânico
Nitrogênio		1,11	2,15
Fósforo		0,64	3,40
Potássio		0,07	2,87
Cálcio	%	0,86	6,80
Magnésio		0,20	0,45
Enxofre		2,05	0,95
Ferro		7,30	1,58
Sódio		0,03	0,33
Manganês	ppm	286,00	284,00
Cobre		76,00	52,00
Zinco		107,00	218,00
Boro		196,00	196,00
Matéria orgânica		30,12	43,47
Cinzas	%	69,88	56,53
Umidade		4,88	13,40
pH (CaCl ₂)		6,80	7,6
Carbono/Nitrogênio		15/1	11/1

pH = potencial de hidrogênio, ppm = partes por milhão.

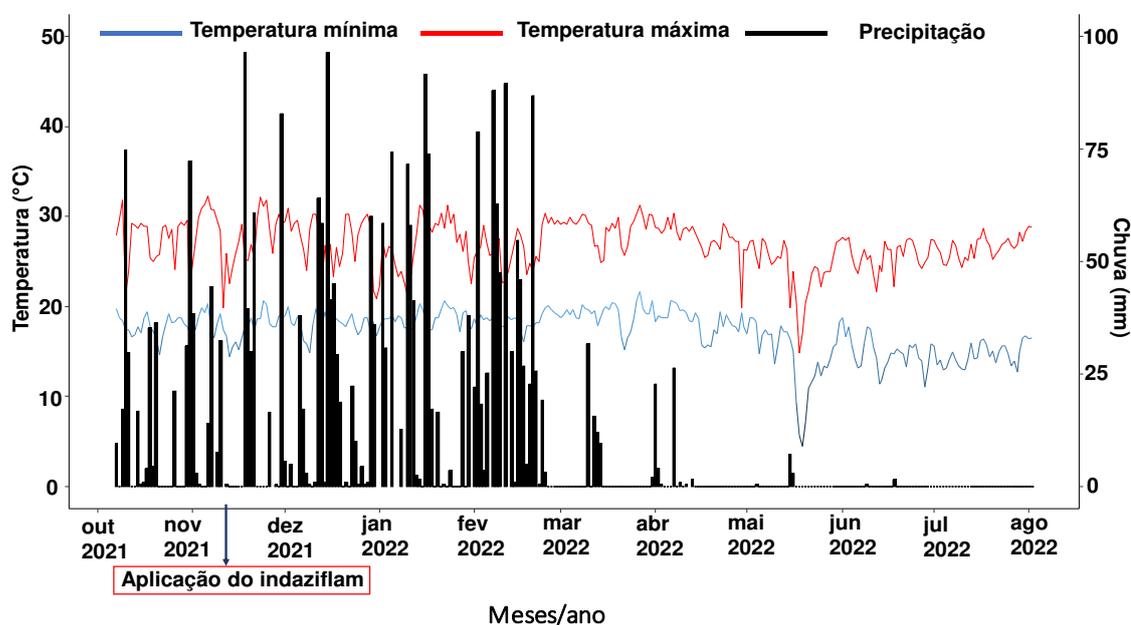
Fonte: Laboratório Unithal, Rio Paranaíba – MG.

Antes da montagem do experimento, foi realizado a dessecação da faixa de 1 m de largura da linha do café, com glyphosate sal de isopropilamina (1440 g e.a. ha⁻¹). As aplicações das diferentes coberturas de solo foram realizadas com a adubadora Minami M 535 – D tratorizada direcionada na linha do café.

5.2.1.4 Aplicação do indaziflam

A aplicação do indaziflam (produto comercial Alion®) foi realizada uma semana após aplicação das coberturas em faixa de 1 m na linha do café de cada lado da planta utilizando um pulverizador PH 400 Jacto tratorizado acoplado com 1 ponta de pulverização Jacto tipo leque, modelo XR110.02, com volume de calda equivalente a 200 L ha⁻¹ e pressão de trabalho de 0,2942 MPa, na altura de 20 cm do solo e espaçamento de 10 cm do caule das plantas de café. Os parâmetros meteorológicos médios no dia da aplicação foram: umidade relativa de 80%, temperatura do ar de 25°C e velocidade dos ventos de 4 km/h. Ao longo do período do estudo foram contabilizados, os dados meteorológicos de temperaturas máxima, mínima e precipitação, disponibilizados pela Cooperativa Regional de Cafeicultores de Guaxupé (Cooxupé), Núcleo Rio Paranaíba (Figura 2).

Figura 2. Precipitação e temperaturas máxima e mínima em Rio Paranaíba, MG, Brasil entre outubro de 2021 e agosto de 2022, aplicação do indaziflam em 08/11/2021 e 16/11/2021 nas fazendas Glória e Ipacer, respectivamente.



5.2.1.5 Quantificação do indaziflam por cromatografia líquida de alta eficiência

A avaliação da dissipação do indaziflam por cromatografia líquida de alta eficiência (do inglês *High Performance Liquid Chromatography* - HPLC) foi realizada a

partir das amostras de solo coletadas em campo nas diferentes épocas após aplicação do indaziflam (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210 DAA) e nas áreas sem aplicação do indaziflam.

No campo, cada amostra foi coletada utilizando um trado tipo sonda com diâmetro de 5 cm na profundidade de 0-10 cm do solo. Após a coleta, as amostras de solo foram peneiradas para remoção dos resíduos presentes na superfície do solo, e posteriormente secas ao ar e acondicionadas em recipientes de polietileno com capacidade de 0,00025 m³ para posterior quantificação por HPLC.

5.2.1.5.1 Condições cromatográficas

A quantificação do indaziflam foi realizada em sistema de HPLC. O equipamento utilizado foi um cromatógrafo modelo Shimadzu LC 20AT (Kyoto, Japão), com detector 43 DAD (Shimadzu SPD 20AT) e coluna C18 de aço inox (Shimadzu VP- ODS Shim-pack 250 mm x 4,6 mm d. i. x 5 µm diâmetro de partículas).

Para extração do herbicida das amostras foi utilizado o método de extração sólido-líquido com partição em baixa temperatura (ESL-PBT) de acordo com a metodologia proposta por Ramirez et al. (2018). Assim, foi pesado 4 g de cada amostra, em tubos falcon de 50 mL. Posteriormente, foi adicionado aos tubos 14 mL da solução extratora, contendo 8 mL de acetonitrila, 4,1 mL de água milli-q e 1,9 mL de acetato de etila.

Em seguida, os tubos foram agitados em vortex Kasvi K45-2810 (São José dos Pinhais, SP, Brasil), por 2 min, para homogeneização da solução. Posteriormente os tubos foram acondicionados em freezer (Consul CHB53EB 534 L, São Bernardo do Campo, SP, Brasil) à -20°C por 4 h. Após o período de repouso no freezer, realizou-se a filtragem da fração não congelada, contendo extrato orgânico (solventes + herbicida) em filtros de papel, para balões volumétricos de fundo redondo de 50 mL, sendo adicionados 2 g de sulfato de sódio anidro no papel filtro, para retirar moléculas de água, segundo recomendações da OECD (2002). Em seguida, os balões foram levados ao evaporador rotativo (80 rpm a 50°C) (Fisatom modelo 802, São Paulo, SP, Brasil), para evaporação dos solventes, permanecendo somente o indaziflam no recipiente. Em seguida, este conteúdo foi lavado com três

alíquotas de 0,5 mL de acetonitrila e filtrado em filtro millipore com membrana PTFE de 0,45 μm diretamente para “*vials*” de 1,50 mL, para análise no HPLC.

5.2.1.5.2 Validação das condições cromatográficas

A metodologia utilizada foi validada de acordo com os parâmetros de seletividade, linearidade, limites de detecção e quantificação, além da precisão e exatidão seguindo orientações propostas para métodos validação de produtos químicos da ANVISA (2017) e INMETRO (2018).

5.2.1.5.3 Seletividade

A seletividade do método ESL/PBT-CLAE-UV/Vis foi validada pela comparação dos cromatogramas de extratos obtidos pelo método otimizado, da matriz isenta do herbicida com o cromatograma da matriz fortificada com o indaziflam.

5.2.1.5.4 Linearidade de resposta na faixa de trabalho

A linearidade de resposta da faixa de trabalho foi avaliada pela análise de regressão dos dados cromatográficos em função da concentração do herbicida em solvente orgânico na faixa de 0,01 a 4,0 mg L⁻¹. Para isto injetou-se soluções contendo o indaziflam nas concentrações de 0,01; 0,05; 0,10; 0,25; 0,50; 1,00; 2,00; 4,00 mg L⁻¹ em acetonitrila. Com as áreas obtidas para cada concentração foi construída a curva analítica. A qualidade da regressão foi avaliada pelo coeficiente de determinação e pela análise dos resíduos.

5.2.1.5.5 Limites de detecção (LD) e quantificação (LQ)

Os limites de detecção (LD) e quantificação (LQ) foram obtidos segundo a metodologia de Ribani et al. (2004). O LD representa a concentração mínima da substância de interesse que é possível ser detectada, mas não necessariamente

quantificada com exatidão, determinada pela razão da estimativa do desvio-padrão da resposta analítica gerada pelo branco, pela inclinação da curva analítica (S), multiplicando esta razão por 3,3 (Equação 1).

$$LD = 3,3 \times s/S \quad (1)$$

O LQ representa a quantidade mínima da substância de interesse possível de ser quantificada com exatidão e foi determinado usando os mesmos parâmetros adotados para o LD, porém a relação desvio/inclinação foi de 10:1 (Equação 2).

$$LQ = 10 \times s/S \quad (2)$$

5.2.1.5.6 Exatidão do método

A exatidão expressa concordância entre o valor encontrado e o valor aceito como verdadeiro ou aceito como referência. Foi avaliada em ensaios de recuperação (%R) (RIBANI et al., 2004). As amostras de solo com diferentes coberturas foram fortificadas em três níveis de concentração (0,25; 0,50 e 1,00 mg L⁻¹), em triplicatas e submetidas ao método ESL/PBT-CLAE-UV/Vis.

5.2.1.5.7 Precisão do método

A precisão representa a dispersão de resultados analíticos obtidos para uma mesma amostra. Neste estudo foi expressa pela repetitividade e pela precisão intermediária. Foi avaliada pelo coeficiente de variação (CV, expresso em %) (Equação 3), também conhecido como desvio padrão relativo (DPR), obtido da equação 3 (INMETRO, 2018):

$$CV = DPR = \left(\frac{DP}{CMD} \right) \times 100 \quad (3)$$

Em que DP é o desvio padrão e CMD é a concentração média determinada.

5.2.1.6 Análise estatística do estudo de dissipação

Ao avaliar a dissipação do indaziflam por CLAE foi utilizado o *Dissipation Time* (do inglês tempo de dissipação), DT₅₀. Nestes casos, os valores de DT₅₀ foram

determinados utilizando cinética de primeira ordem, por meio das equações 4 e 5 (MEHDIZADEH et al., 2017)

$$C_t = C_i e^{-kt} \quad (4)$$

$$DT_{50} = \ln 2/k \quad (5)$$

Em que C_t representa a concentração do herbicida no tempo t , C_i é a maior concentração observada do herbicida (MAHESWARI e RAMESH 2007; YOUSEFI et al. 2016), e k é a constante de taxa de dissipação do herbicida em dias. A DT_{50} é então determinada a partir do valor de k (MENDES et al., 2019).

As análises de regressão, ANOVA e RL_{50} foram realizadas no Software R versão 4.2.3 (R CORE TEAM, 2023) e os gráficos plotados no programa SigmaPlot® (versão 13.0 para Windows, Systat Software Inc., Point Richmond, CA, EUA).

5.2.2 Estudo de lixiviação do indaziflam

5.2.2.1 Local de estudo e delineamento experimental

O estudo de lixiviação foi realizado em casa de vegetação na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. Para isso utilizou-se solos provenientes das Fazendas IPACER e Glória sem a aplicação do indaziflam. O estudo foi realizado em delineamento inteiramente casualizado $2 \times 3 \times 6 + 1$ com três repetições, com dois solos, três tipos de cobertura e seis profundidades avaliadas, além do controle sem a aplicação do indaziflam.

As colunas de solos foram montadas em tubos de PVC com 30 cm de altura e 10 cm de diâmetro. Os tubos de PVC foram envoltos internamente com uma camada de parafina, a fim de evitar escoamento da solução do solo por caminhos preferenciais. Na parte basal, para reter o solo e permitir a drenagem, foram colocadas telas de sombrite 50%. Após o preenchimento com os dois tipos de solo, as coberturas foram adicionadas na parte superior, na proporção de 5 t ha^{-1} . Além disso, na extremidade superior da coluna de solo, foi colocada uma camada de papel-filtro para reduzir o impacto das gotas e assegurar a uniformidade na distribuição da chuva simulada.

Após o preenchimento das colunas de solo, estas foram saturadas com água, para eliminar as bolhas de ar presas nos poros, por um período de 24 h.

Posteriormente, as colunas foram deixadas na posição vertical por 72 h para drenar o excesso de água, ficando a umidade próximo à capacidade de campo.

A aplicação do indaziflam (75 g i.a. ha⁻¹) foi realizada com pulverizador costal pressurizado por CO₂, com uma ponta tipo leque XR11002, mantidos à pressão de trabalho de 0,1961 MPa, resultando em volume de calda de 200 L ha⁻¹, com temperatura de 25°C e umidade relativa em 80%.

Após 12 h da aplicação do indaziflam, foi simulado 100 mm de chuva. Em seguida as colunas foram mantidas em repouso por 72 h para drenagem do excesso de água remanescente. Posteriormente, os tubos foram cortados com o auxílio de uma serra-mármore, nas profundidades de coleta das amostras (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 e 25-30 cm).

As amostras de solo foram acondicionadas em vasos de polietileno com capacidade de 0,30 dm³, com fundos vedados. Posteriormente, foram semeadas cinco sementes de soja (*Glycine max*) por vaso (DIAS et al., 2019). Durante a condução do estudo foram realizadas irrigações diárias de acordo com a necessidade de cada unidade experimental, assim como adubações com solução nutritiva composta de macro e micronutrientes, visando manter bom estatus nutricional da planta. Aos 7, 14 e 21 dias após a emergência (DAE) da espécie indicadora, foram realizadas avaliações visuais de injúrias das plantas, atribuindo-se notas de 0 a 100, onde 0 representa ausência de sintomas de injúrias e 100, morte da planta (SBCPD, 1995). Aos 21 DAE, as plantas foram cortadas rentes ao solo e a parte aérea foi acondicionada em sacos de papel e colocadas em estufa à 65°C até atingir massa constante, para determinação do acúmulo de biomassa seca da parte aérea.

5.2.2.2 Análise estatística do estudo de lixiviação do indaziflam

Os dados referentes à nível de injúria e acúmulo de matéria seca da soja no bioensaio foram plotados em figuras no *software* R (R CORE TEAM, 2023), com as médias de cada profundidade nas colunas, dentro de cada solo, comparadas pelo desvio padrão e analisados de forma descritiva.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

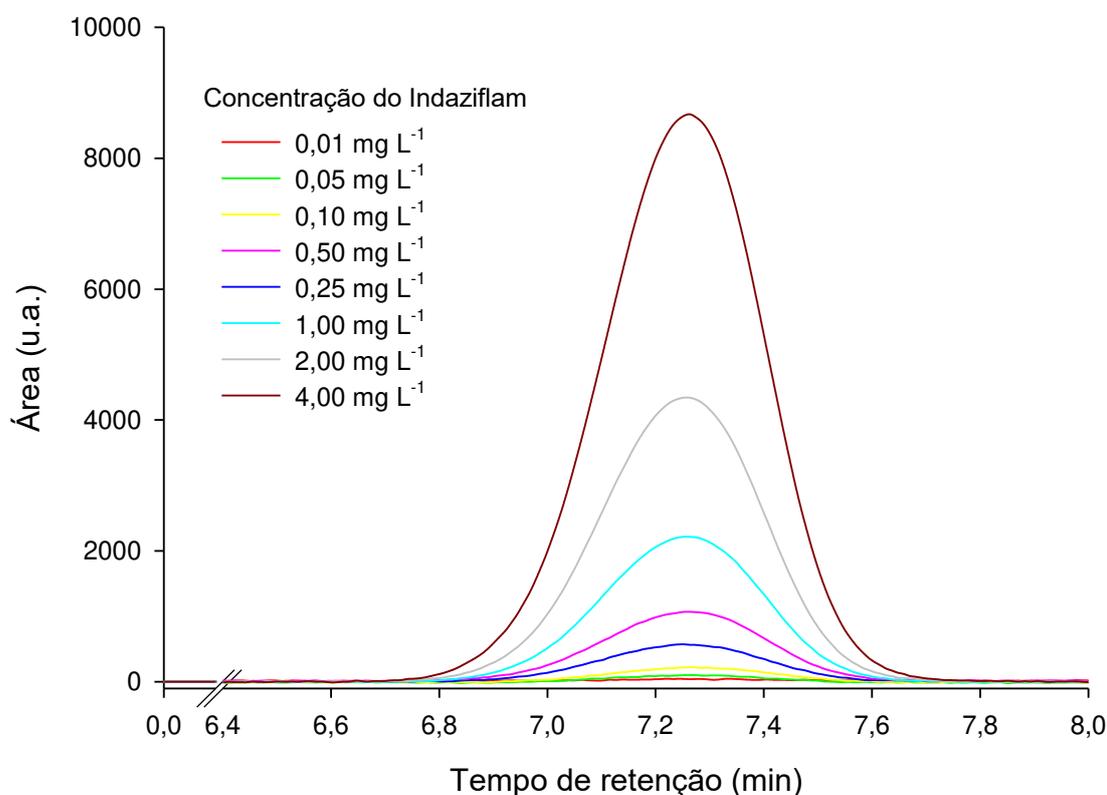
5.3.1 Estudo de dissipação do indaziflam

5.3.1.1 Validação do método cromatográfico

5.3.1.2 Linearidade de resposta na faixa de trabalho

As condições utilizadas neste estudo foram eficientes para quantificar o indaziflam por meio da área do pico, simetria do pico e menor tempo de retenção. Nas condições cromatográficas validadas foi possível identificar o pico atribuído ao indaziflam em acetonitrila com tempo de retenção igual a 7,3 min (Figura 11).

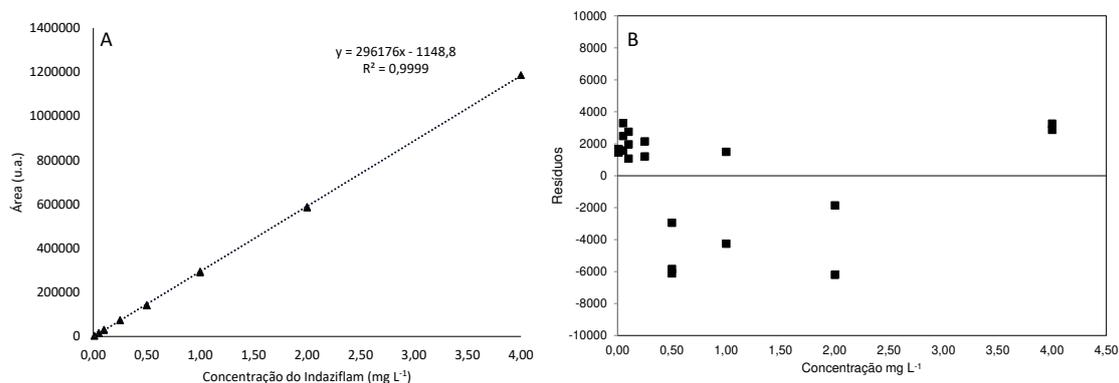
Figura 11 - Cromatograma da solução padrão do indaziflam em várias concentrações em acetonitrila nas condições ótimas, pico atribuído ao indaziflam analisados em HPLC.



A linearidade de resposta da faixa de trabalho de diferentes concentrações de indaziflam preparados em acetonitrila (Figura 13A) apresentou $R^2 = 0,9999$. Esse

valor é $>0,99$ recomendado pela ANVISA (2012) para realização de estudos com pesticidas no Brasil. Portanto, os parâmetros das equações das curvas podem ser utilizados para quantificar o indaziflam. As incertezas do modelo foram avaliadas por regressão e foram plotados os resíduos para o indaziflam (Figura 13B), em que um bom ajuste do modelo aos dados foi obtido.

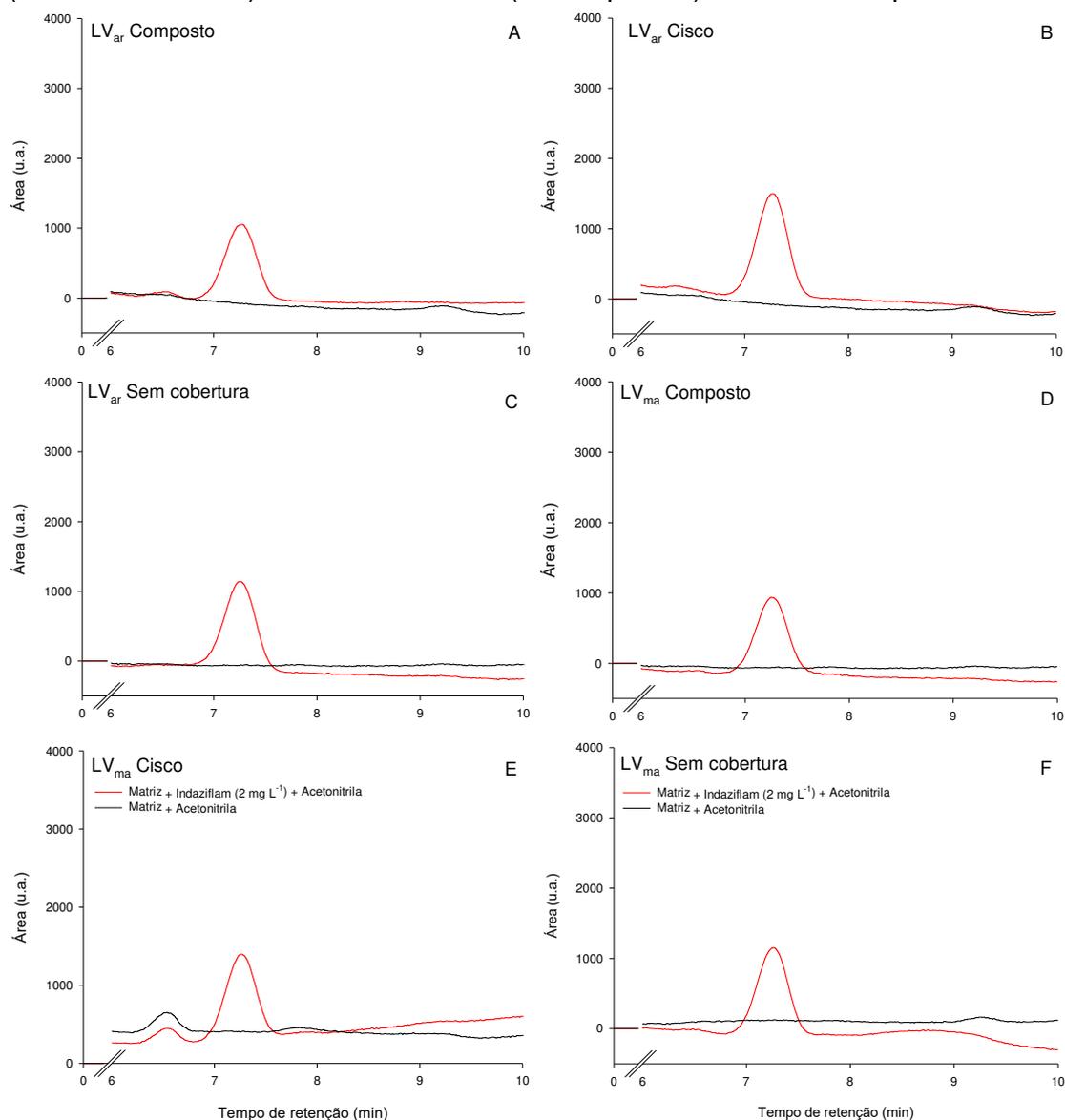
Figura 13 - Curva analítica (A) e resíduos do indaziflam (B) preparados em diferentes concentrações em acetonitrila e analisados por HPLC.



5.3.1.3 Seletividade

A seletividade do método comparando os cromatogramas obtidos dos extratos em solos fortificados e não fortificados com o herbicida demonstrou que não houve a presença de picos interferentes no tempo de retenção do indaziflam e que o método foi seletivo para todos os solos e coberturas utilizados no estudo (Figura 12).

Figura 12 - Cromatogramas dos extratos de Latossolo Vermelho argiloso (LV_{ar}) (A, B, C) e Latossolo Vermelho muito argiloso (LV_{ma}) (D, E, e F) com diferentes coberturas (cisco, composto e sem cobertura) fortificados com indaziflam (2 mg L⁻¹) (linhas vermelhas) e não fortificados (linhas pretas) e analisados por HPLC.



5.3.1.4 Limites de detecção e quantificação

De acordo com os valores de LD e LQ encontrados, o método foi capaz de detectar e quantificar com segurança até 0,0015 mg L⁻¹ e 0,0047 mg L⁻¹, respectivamente (Tabela 3). Os valores dos LD e LQ encontrados neste estudo para o indaziflam foram inferiores aos relatados por Ramirez et al. (2018) que obteve 0,15 e 0,44 mg L⁻¹, respectivamente.

Tabela 3 - Limites de quantificação (LQ) e detecção (LD) do indaziflam e metribuzin da curva analítica preparada em acetonitrila.

Herbicida	A	DP	LD (mg L ⁻¹)	LQ (mg L ⁻¹)
Indaziflam	296176	138,59	0,0015	0,0047

A = inclinação da curva analítica. DP = desvio padrão.

5.3.1.5 Exatidão e precisão

O método de extração obteve boa exatidão e precisão para os dois solos, mostrando está dentro dos padrões exigidos pela ANVISA (2012) e INMETRO (2018) que são de 80-120% para recuperação e <20% o CV da precisão (Tabela 4).

Tabela 4 - Exatidão e precisão do método de extração do indaziflam adotado em amostras de Latossolo Vermelho argiloso (LV_{ar}) e Latossolo Vermelho muito argiloso (LV_{ma}) com cisco, composto orgânico e sem cobertura fortificadas com três concentrações do padrão do herbicida.

Matriz	Concentração do indaziflam (mg L ⁻¹)					
	0,05		0,1		0,25	
	R%	CV%	R%	CV%	R%	CV%
LV _{ma} Sem cobertura	84,59	7,97	91,92	10,69	91,50	4,28
LV _{ma} Cisco	89,70	5,87	92,33	6,30	89,87	4,12
LV _{ma} Composto	111,25	6,63	90,39	13,16	80,01	8,01
LV _{ar} Sem cobertura	96,37	2,07	96,77	6,15	103,08	3,99
LV _{ar} Cisco	95,17	15,55	96,70	10,16	95,17	4,61
LV _{ar} Composto	84,89	5,65	90,28	10,22	87,13	4,27

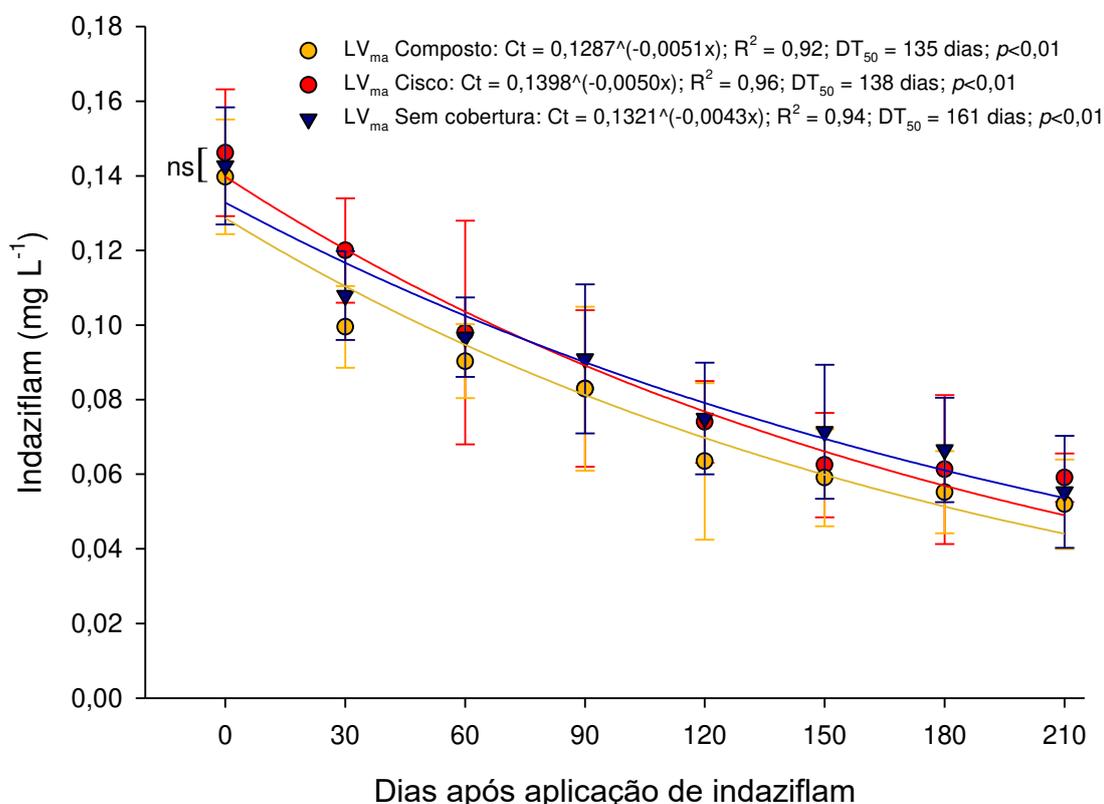
CV = coeficiente de variação. R = recuperação do herbicida.

5.3.1.6 Quantidade de resíduo de indaziflam analisado por HPLC para o estudo de dissipação

A avaliação da dissipação do indaziflam no LV_{ma} demonstrou que quando se utilizou a cobertura com cisco houve dissipação de ~20% até aos 30 DAA em relação ao total do herbicida inicialmente aplicado (Figura 14). Aos 60 DAA, o indaziflam remanescente foi de ~67%, e aos 90 DAA foi de 56%. Aos 120 DAA, 52%

do indaziflam ainda estava no solo, entretanto, a partir dessa avaliação a taxa de dissipação foi reduzida e aos 210 DAA havia ainda 40% do indaziflam inicialmente aplicado. A partir dos parâmetros gerados na regressão não-linear foi possível estimar o DT_{50} do indaziflam em 138 dias no LV_{ma} com a cobertura de cisco.

Figura 14 - Dissipação do indaziflam ($75 \text{ g i.a. ha}^{-1}$) aos 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210 dias após a aplicação (DAA) em Latossolo Vermelho muito argiloso (LV_{ma}) com três coberturas (cisco, composto e sem cobertura). Os símbolos correspondem aos valores médios e barras aos desvios padrões das médias ($n = 3$). ns: não significativo pelo teste de t ($p < 0,05$).



A utilização da cobertura de composto orgânico no LV_{ma} resultou em dissipação do indaziflam de 29% aos 30 DAA e 36% (no acumulado) aos 60 DAA (Figura 14). Aos 90 e 120 DAA, havia 59% e 45% do total de indaziflam inicialmente aplicado, respectivamente. A partir de 150 DAA, a concentração do indaziflam inicialmente aplicado foi de 42% e aos 210 DAA foi de 37%. A DT_{50} do indaziflam no LV_{ma} com composto orgânico foi estimada em 135 dias.

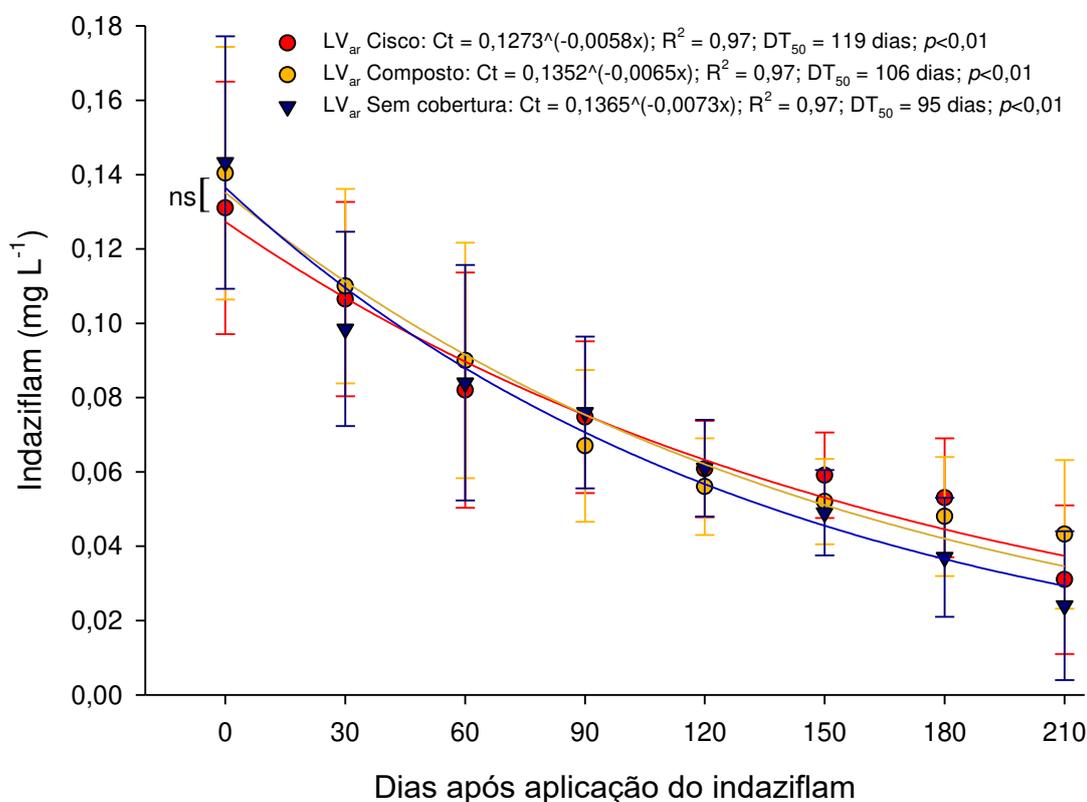
A dissipação no LV_{ma} sem cobertura foi de ~33% até aos 60 DAA (Figura 14). Aos 90 DAA, ainda havia 63% do indaziflam inicialmente aplicado. Entre 120 e 180

DAA, a dissipação foi pouco alterada e mantiveram-se em quantidade entre 52 a 50% nesse período. Aos 210 DAA, a dissipação do indaziflam aumentou e a quantidade do indaziflam foi de 38%. A DT_{50} do indaziflam no LV_{ma} sem cobertura foi estimada em 161 dias.

Não houve efeito das coberturas na dissipação do indaziflam no LV_{ma} ($F = 0,524$, $p = 0,90$). Apesar de haver diferentes valores de DT_{50} , o total de indaziflam dissipado até os 210 DAA foi próximo entre as diferentes coberturas no LV_{ma} .

A dissipação total do indaziflam no LV_{ar} nas três coberturas avaliadas até aos 60 DAA foi de 42% nas áreas sem cobertura, 38% nas áreas com cisco e 36% nas áreas com composto orgânico (Figura 15). Aos 90 DAA, a dissipação do indaziflam nas três coberturas foi de 47, 43 e 53% para sem cobertura, cisco e composto, respectivamente.

Figura 15 - Dissipação do indaziflam ($75 \text{ g i.a. ha}^{-1}$) aos 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210 dias após a aplicação (DAA) em Latossolo Vermelho argiloso (LV_{ar}) com três coberturas (cisco, composto e sem cobertura). Os símbolos correspondem aos valores médios e barras aos desvios padrões das médias ($n = 3$). ns: não significativo pelo teste de t ($p < 0,05$).



O comportamento do indaziflam continuou semelhante aos 120, 150, 180 e 210 DAA nas três coberturas, e aos 210 DAA havia somente 16, 23 e 30% do indaziflam inicialmente aplicado para as áreas sem cobertura, cisco e composto orgânico, respectivamente (Figura 15). Esse comportamento pode estar relacionado à menor incidência de chuvas a partir de março de 2022 (120 DAA) nas áreas de estudo (Figura 2), que pode promover menor dissipação do indaziflam. A partir dos parâmetros das regressões não lineares foi possível determinar a DT_{50} do indaziflam com valor de 95 dias no LV_{ar} sem cobertura. Nas áreas com composto orgânico e cisco a DT_{50} foi estimada em 106 e 119 dias, respectivamente.

O indaziflam é um herbicida novo e há informações limitadas disponíveis sobre o seu destino e transporte em condições de laboratório e campo (GUERRA et al., 2013; TRIGO et al., 2014). Além disso, o indaziflam possui fotodegradação limitada, DT_{50} no solo de cerca de 150 dias e eficiência de controle em doses relativas menores do que outros herbicidas PRÉ (SEBASTIAN et al., 2016a). Essas características trabalham em conjunto para fornecer um controle residual de longo prazo (SEBASTIAN et al., 2016b).

Os valores de DT_{50} do indaziflam encontrados no LV_{ma} e LV_{ar} para todas as coberturas estão próximos aos relatados na literatura de ~150 dias (US EPA, 2010). Entretanto, é importante ressaltar que a dissipação do indaziflam pode variar de acordo com o ambiente, como relatado por Gonzales-Delgado et al. (2015) que quantificaram resíduos de indaziflam (até $7,5 \mu\text{m kg}^{-1}$) com 365 dias após a aplicação, reforçando o caráter altamente persistente desse herbicida. Em outro estudo de Gonzales-Delgado et al. (2017) as DT_{50} do indaziflam no solo variaram de 30 a 86 dias para o indaziflam. Além disso, a dose aplicada do indaziflam interfere diretamente na dissipação do herbicida, como reportado por Gonzáles-Delgado e Shukla (2020) em que as DT_{50} do indaziflam no solo tratado com 25 e 50 g i.a. ha^{-1} variaram de 63 a 77 e de 87 a 99 dias, respectivamente. Apesar de haver poucos estudos que quantifiquem os resíduos de indaziflam no solo, Blanco (2023) relatou em estudo com bioensaio que a persistência do indaziflam pode variar de 365 até 491 dias no solo, em doses de 150 e 400 g i.a. ha^{-1} , respectivamente. Portanto, a dissipação do herbicida ocorre de forma muito lenta e a persistência pode ser maior em doses mais elevadas. Em solos brasileiros, a persistência do indaziflam foi relatada como >150 dias e o teor de argila não afetou a persistência (GUERRA et

al., 2016). Dessa forma, é compreensível haver uma faixa relativamente abrangente para a persistência do indaziflam no ambiente.

A dissipação mais rápida do indaziflam até os 60 DAA observada para LV_{ar} e LV_{ma} em todas as coberturas quando comparados com os períodos a partir de 90 DAA, pode ser resultado de uma atividade microbiana aprimorada e movimentação vertical e lateral do indaziflam no campo nos primeiros 60 DAA. Em condições de campo, um suprimento contínuo de nutrientes por meio da exsudação das raízes na rizosfera promoveria populações microbianas mais resilientes e densas capazes de degradar herbicidas (ROGER et al., 1994).

A dissipação do indaziflam no ambiente é denominada pelos processos de degradação e lixiviação (US EPA, 2010). Eckelmann et al. (2020) demonstraram que em diferentes condições ambientais sob processos de degradação abióticos e bióticos, o indaziflam não sofreu interconversão isomérica para os isômeros 435-IAF (*RRR*), 438-IAF (*RSS*) ou 439-IAF (*SSR*). Assim, os três centros quirais do indaziflam podem ser considerados isomericamente estáveis. A estabilidade isomérica pode afetar a eficácia de um composto. Se um composto é isomericamente estável, isso significa que sua configuração isomérica não se altera facilmente, o que pode ser vantajoso quando se deseja manter sua atividade biológica ou propriedades específicas ao longo do tempo. O indaziflam e seus metabólitos: indaziflam-triazina-indanona (ITI), ácido indaziflam-carboxílico (ICA), indaziflam-hidroxiethyl, indaziflam-olefina e fluoroetil-diaminotriazina (FDAT), apresentam diferentes níveis de reatividade química (ALONSO et al., 2016; MENDOZA-HUIZAR et al., 2019). ITI é o mais reativo, seguido por ICA, indaziflam e FDAT. Isso sugere que a degradação desses compostos pode ocorrer em taxas diferentes no solo. Em resumo, essas interpretações indicam que a degradação e persistência do indaziflam e seus metabólitos no solo podem ser influenciadas por sua reatividade química, distribuição de sítios ativos e interações com os componentes do solo (MENDOZA-HUIZAR et al., 2019). Entretanto, é importante ressaltar que no presente estudo não foram avaliados os metabólitos do indaziflam, somente o produto parental.

Os resíduos de indaziflam em áreas de cultivo de café devem ser levados em consideração na implantação da lavoura ou substituição de plantas em lavouras já formadas, pois a presença do indaziflam no solo pode prejudicar o desenvolvimento das mudas por meio de redução no crescimento de raízes, redução na matéria seca

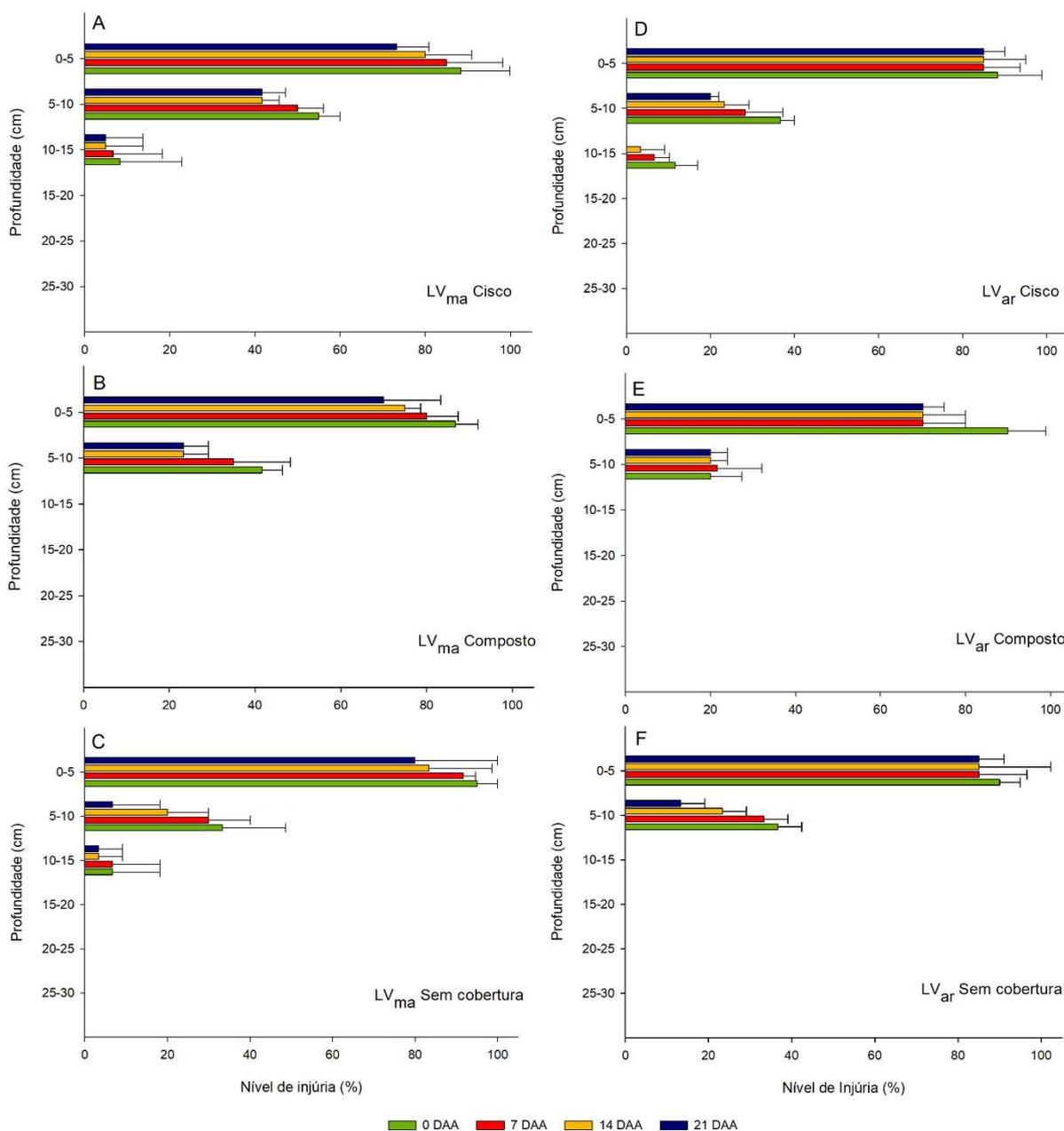
do caule e das folhas (GOMES et al., 2019). O indaziflam apresenta diversas possibilidades de uso. Entretanto, devido a suas características físico-químicas e persistência no solo, seu uso deve ser feito levando em consideração a influência do solo na sua biodisponibilidade na solução. A persistência do indaziflam pode ser influenciado pelas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, sendo as mais importantes a MO, o tipo e teor de argila e o valor de pH do solo (MONQUEIRO e SILVA, 2021). Essa relação foi observada no presente estudo, em que o LV_{ar} com maior teor de MO (Tabela 1) proporcionou maior dissipação do indaziflam em comparação ao LV_{ma}. Isso se deve à influência desses fatores na persistência e disponibilidade dos herbicidas na solução do solo, regulando principalmente os processos de sorção e degradação. Nesse sentido, os dados aqui apresentados podem servir de orientação para a dissipação do indaziflam no cultivo do cafeeiro. Entretanto, mais estudos devem ser realizados para avaliar principalmente o efeito das propriedade físico-químicas do solo nesse processo.

5.3.2 Estudo de lixiviação do indaziflam no solo

5.3.2.1 Nível de injúria e acúmulo de biomassa na espécie bioindicadora

A lixiviação do indaziflam avaliada pelo nível de injúria na espécie bioindicadora soja mostrou que mesmo após a simulação de 100 mm de chuva, a maior parte do herbicida permaneceu nas camadas de 0-5 cm e 5-10 cm em ambos os solos e coberturas (Figura 16). Eventuais injúrias foram observadas nas camadas de 10-15 cm e a partir de 15-20 cm de profundidade não houve nível de injúria observado na soja para nenhum solo ou cobertura.

Figura 16 - Nível de injúria (% em relação ao controle) causada pela aplicação de indaziflam (75 g i.a. ha⁻¹) espécie bioindicadora - soja (*Glycine max*) em diferentes profundidades do solo aos 0, 7, 14 e 21 dias após emergência (DAE), com simulação de 100 mm de chuva em Latossolo Vermelho muito argiloso (LV_{ma}) com cisco (A), composto orgânico (B) e sem cobertura (C) e Latossolo Vermelho argiloso (LV_{ar}) com cisco (D), composto orgânico (E) e sem cobertura (F). As colunas representam as médias e as barras os desvios padrões da média ($n = 3$).



Ao observar o LV_{ma} com a cobertura cisco, o nível de injúria na soja variou de 88% ao 0 DAE até 73% aos 21 DAE no topo do solo (0-5 cm) (Figura 16A). Na profundidade de 5-10 cm, o nível de injúria foi reduzido para 55% ao 0 DAE e 41%

até aos 21 DAE. Um pequeno nível injúria foi observada na profundidade de 10-15 cm que variou de 8% ao 0 DAE e 5% aos 21 DAE.

No LV_{ma} com composto, o nível de injúria na soja na camada superficial (0-5 cm) foi de 86% ao 0 DAE e reduziu para 70% aos 21 DAE (Figura 16 B). Na camada de 5-10 cm, o nível de injúria foi de 41% ao 0 DAE e foi reduzida a 23% aos 21 DAE. Não houve nível de injúria detectada a partir da camada 10-15 cm para nenhuma época ou cobertura.

O nível de injúria no LV_{ma} sem cobertura (Figura 16C) foi de 95% aos 0 DAE e manteve-se próximo a 80% aos 21 DAE na camada 0-5 cm. Na profundidade de 5-10 cm foram observadas níveis injúrias de 33% na soja ao 0 DAE e apenas 6% aos 21 DAE.

O maior nível de injúria da planta no LV_{ma} sem cobertura, quando comparada ao cisco e composto pode estar relacionado diretamente com a maior biodisponibilidade do indaziflam na solução do solo, pois geralmente as coberturas com resíduos vegetais e animais podem interagir com o herbicida e reduzir sua biodisponibilidade na solução.

No LV_{ar} com cobertura cisco houve níveis de injúria de 88% e 85% nas plantas indicadoras aos 0 e 21 DAE, respectivamente, na camada de 0-5 cm (Figura 16D). Na camada de 5-10 cm foram observadas níveis de injúrias de 36% ao 0 DAE que foram reduzidas a 20% aos 21 DAE. Na camada de 10-15 cm foi observado um pequeno nível de injúria de 10% ao 0 DAE que foi reduzida a 0% aos 21 DAE.

Ao observar o nível de injúria nas plantas do LV_{ar} com composto (Figura 16E), é possível constatar injúrias de 90% ao 0 DAE na camada de 0-5 cm, mas aos 21 DAE a injúria foi reduzida para 70% na mesma camada. Na camada de 5-10 cm a injúria foi de apenas 20% ao 0 DAE e manteve-se com o mesmo valor até aos 21 DAE. A partir da camada de 10-15 cm não foram observadas injúrias nas plantas de soja.

Os níveis de injúria nas plantas do LV_{ar} sem cobertura (Figura 16F) foram de 90% ao 0 DAE na camada de 0-5 cm e mantiveram-se altos até aos 21 DAE (85%). Entretanto, na camada de 5-10 cm o nível de injúria que era de 36% aos 0 DAE foi reduzido para 13% aos 21 DAE.

A redução nos níveis de injúria observados nos maiores DAE para todos os tratamentos, profundidades e épocas de avaliação pode estar relacionado à grande

quantidade de reservas presentes na semente de soja que permitem que a cultura possa se recuperar e formar novos tecidos.

A partir da avaliação do acúmulo de biomassa nas plantas de soja foi possível observar que no LV_{ma} (Figura 17A), sem cobertura proporcionou menor acúmulo de biomassa (10%) em relação as coberturas com cisco (18%) e composto (15%) na camada de 0-5 cm. Esse diferencial de acúmulo na biomassa também pode ser observado na Figuras 18A, 18B e 18C. Assim, foi relatado um comportamento semelhante nas camadas de 5-10 cm e 10-15 cm para o mesmo solo, em que o acúmulo de biomassa foi menor no LV_{ma} sem cobertura quando comparados ao cisco e composto. A partir da profundidade de 15-20 cm não foram observadas diferenças no acúmulo de biomassa nas diferentes coberturas em LV_{ma}.

Figura 17 - Acúmulo de biomassa (% em relação ao controle) causada pela aplicação de indaziflam (75 g i.a. ha⁻¹) na cultura da soja (*Glycine max*) em diferentes profundidades do solo aos 21 dias após emergência (DAE), com simulação de 100 mm de chuva em Latossolo Vermelho muito argiloso (LV_{ma}) (A) e Latossolo Vermelho argiloso (LV_{ar}) (B) cobertos com cisco, composto orgânico e sem cobertura. As colunas representam as médias e as barras os desvios padrões da média ($n = 3$).

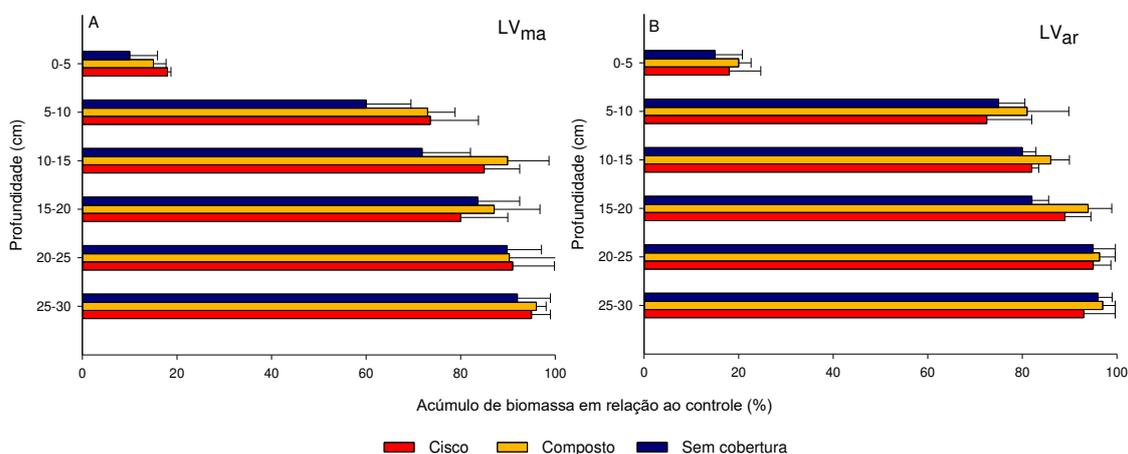


Figura 18 - Imagens das plantas de soja (*Glycine max*) em diferentes profundidades do solo aos 21 dias após emergência (DAE) após aplicação de indaziflam (75 g i.a. ha⁻¹) e sem aplicação de indaziflam com simulação de 100 mm de chuva em Latossolo Vermelho muito argiloso (LV_{ma}) (A, B e C) e Latossolo Vermelho argiloso (LV_{ar}) (D, E e F) com três tipos de cobertura (cisco, composto e sem cobertura).



O acúmulo de biomassa no LV_{ar} com diferentes coberturas (Figura 18B e Figuras 18D, 18E e 18F) foi menor quando não houve cobertura (15%) quando comparado com adição de composto (20%) na camada de 0-5 cm, enquanto a cobertura cisco obteve um acúmulo intermediário (18%) em comparação às demais. Na profundidade de 5-10 cm o acúmulo de biomassa foi de 75, 72 e 81% para sem cobertura, cisco e composto, respectivamente. Com o aumento da profundidade o

acúmulo de biomassa aumentou para todas as coberturas e a partir de 20-25 cm e foi considerado como 100% para todas as coberturas.

O indaziflam possui baixa S_w (3,6 mg L⁻¹) e alto log K_{ow} (2,8), o que significa o herbicida possui a tendência de ficar concentrado na superfície do solo e não ser lixiviação através do perfil do solo (SEBASTIAN et al., 2017). O potencial de lixiviação do indaziflam é menor que a maioria dos herbicidas aplicados em PRÉ, como relatado por Guerra et al. (2016) que observaram que o aminocyclopyrachlor (auxina sintética) possui maior potencial de lixiviação do que o indaziflam, além de ser diretamente influenciado pelo teor de argila do solo. Quanto ao indaziflam, não foram notadas diferenças marcantes entre solos com diferentes texturas. Esses resultados estão de acordo com os encontrados no presente estudo, pois no LV_{ar} (45% de argila) e LV_{ma} (73% de argila) (Tabela 1), o indaziflam permaneceu nas camadas superficiais do solo (até 15 cm), e o teor de argila dos solos não influenciou o potencial de lixiviação do herbicida.

Outro estudo que reforça o baixo potencial de lixiviação do indaziflam é o realizado por Jhala et al. (2012), em que não houve mortalidade das plantas de azevém (*Lolium multiflorum*) além dos 30 cm de profundidade e a biomassa de azevém foi comparável ao controle não tratado, o que indica que o indaziflam não lixiviou além dessa profundidade, mesmo sob uma precipitação de 150 mm, classificando-o como baixo potencial de lixiviação.

A eficiência de controle do indaziflam nas plantas daninhas, principalmente quando há cobertura no solo na cultura do café, depende de umidade adequada no solo para que o herbicida esteja disponível na solução do solo e possa ser absorvido pelas raízes das plantas daninhas. Silva et al. (2020), ao avaliarem a eficiência do indaziflam para controle de capim-marmelada (*U. plantaginea*) aplicado sobre coberturas na cultura do café com diferentes precipitações, observaram um efeito maior do indaziflam na profundidade de 0-5 cm, e quanto maior a simulação de chuva, maior foi a injúria observada em *U. plantaginea*, com 39,75%, 52,50% e 92,06% para as quantidades de chuva de 10, 20 e 40 mm, respectivamente. A *U. plantaginea* mostrou alta suscetibilidade ao controle pelo indaziflam, e o menor controle (82%) foi observado quando o indaziflam foi aplicado na presença de 5 t ha⁻¹ de cobertura com simulação de chuva de 10 mm. O aumento da quantidade de MO na superfície do solo, combinado com menores quantidades de chuva, pode reduzir a lixiviação do indaziflam e o controle de *U. plantaginea*. Por outro lado, o manejo de

cobertura pode interferir na eficiência de controle do indaziflam. Saha et al. (2019) relataram que a utilização de coberturas orgânicas diminui a eficiência de controle de herbicidas aplicados em PRE, incluindo indaziflam, sugerindo que a sorção desse produto ocorre fortemente em coberturas orgânicas. Nesse sentido, a não ocorrência de chuvas após a aplicação do indaziflam não é algo desejável e devem-se definir intervalos de precipitação segura para que o indaziflam tenha eficiência e não ocorra lixiviação para camadas mais profundas.

A baixa mobilidade do indaziflam no solo dificulta encontrar correlações de quais propriedades físico-químicas do solo são mais atuantes nesse processo. Gonzalés-Delgado et al. (2015) não encontraram correlação entre as propriedades físico-químicas do solo e a mobilidade do indaziflam um ano após a aplicação do herbicida. Além disso, o indaziflam não foi identificado em profundidades maiores que 15 cm. Entretanto, Matthew et al. (2016) encontraram uma relação moderada e positiva entre as reduções de biomassa de azevém perene (*Lolium perene*) nas profundidades de 0 a 2,5; 2,5 a 5; 0 a 5; e 0 a 10 cm e a redução da cobertura de grama-seda híbrida (*Cynodon dactylon*), o que sugere que condições que favorecem o aumento da biodisponibilidade de indaziflam no solo podem afetar negativamente o crescimento das plantas (MATTHEW et al., 2016). Mendes et al. (2021a) avaliaram o efeito de *bonechar* (ossos de vaca pirolisados) na eficiência de controle do indaziflam e observaram que o *bonechar* diminuiu a atividade herbicida PRE do indaziflam em solo tropical para o controle de plantas daninhas, provavelmente devido à alta sorção e redução da biodisponibilidade do produto na solução do solo. Nesse sentido, o aumento da sorção do herbicida está diretamente ligado com reduções na biodisponibilidade e, provavelmente, com a lixiviação do herbicida.

Em estudo avaliando a sorção e dessorção do indaziflam em solos agricultáveis, Alonso et al. (2011) encontraram correlação positiva entre a sorção do indaziflam e o teor de CO do solo e classificaram como potencial de lixiviação moderado no perfil do solo, baseado somente na sorção. Além disso, o tempo de incubação no solo pode causar um aumento significativo nos potenciais de sorção e na formação de resíduos ligados, o que pode reduzir o potencial de mobilidade do indaziflam e seus metabólitos no solo e, portanto, a possível contaminação das fontes de água subterrânea (ALONSO et al., 2015). Além do indaziflam, seus metabólitos também são afetados pelos teores de CO no solo, como relatado por

Mendes et al. (2021b), em que a adição de biochars ao solo aumentou a sorção do indaziflam e seu metabólito ITI, mas não afetou o FDAT e ICA.

O aumento da sorção do herbicida com a adição do biomaterial reduz a lixiviação e, conseqüentemente, o risco de contaminação das águas subterrâneas; no entanto, aumentar a sorção do herbicida no solo pode aumentar a persistência do produto e prolongar seu efeito residual, o que pode causar problemas, como resíduos que afetam culturas de rotação/sucessão (SHEETS et al., 1965).

Os herbicidas de caráter ácido fraco, como o indaziflam, podem alterar sua carga líquida dependendo do pH da solução. A mudança na carga líquida da molécula do herbicida desempenha um papel importante na lixiviação e persistência (NAHHAL e HAMDONA, 2017; SOUZA et al., 2020). Herbicidas com baixo pK_a como o indaziflam têm suas cargas, que determinam se o herbicida estará na forma dissociada ou molecular, fortemente influenciadas pelo pH do solo (REFATTI et al., 2014). Assim, para esses herbicidas, quando o valor de pH da solução do solo está próximo da neutralidade e/ou superior ao valor de pK_a do herbicida, haverá predominância da forma dissociada (forma iônica). Essa forma será repelida pelas cargas negativas presentes em abundância na superfície do solo, reduzindo a sorção e tornando o produto mais disponível na solução do solo. Em estudo sobre a sorção do indaziflam em solos brasileiros com diferentes valores de pH, Gonçalves et al. (2021) observaram que a elevação do pH dos solos estudados diminuiu a sorção do indaziflam, influenciando as recomendações desse herbicida, tanto do ponto de vista agrônomo quanto ambiental. No presente estudo, as faixas de pH para LV_{ar} e LV_{ma} foram, 4,90 e 5,3, respectivamente (Tabela 1), ou seja, ligeiramente ácidos, favorecendo os processos de sorção do herbicida no solo e reduzindo os potenciais de lixiviação.

No campo, os solos podem sofrer pequenas mudanças na estrutura causada por ciclos de umedecimento e secagem do solo que pode influenciar na lixiviação de herbicidas. Apesar de Hochman et al. (2020) terem observado que a agregação e a desagregação do solo, induzidas por um umedecimento e secagem do solo, terem suprimido e aumentado a mobilidade de herbicidas, respectivamente, esse efeito não foi observado na lixiviação do indaziflam devido à sua alta sorção no solo, indicando que as propriedades físico-químicas do herbicida podem dominar esse processo.

Além da redução de riscos de contaminação ambiental, o potencial de lixiviação reduzido do indaziflam auxilia a fornecer controle residual prolongado no solo necessário para reduzir o banco de sementes de plantas daninhas no solo, já que as sementes podem permanecer viáveis por longos períodos (SEBASTIAN et al., 2017).

5.4 CONCLUSÕES

A dissipação do indaziflam foi mais lenta no LV_{ar} que LV_{ma} , entretanto todos os solos e coberturas proporcionaram DT_{50} entre 95 e 161 dias. Apesar disso, a utilização de coberturas de composto orgânico e cisco em doses de 5 t ha^{-1} não alterou a dissipação do indaziflam aplicado ($75 \text{ g i.a. ha}^{-1}$). Esse efeito está relacionado com as características físico-químicas do herbicida que possui baixa solubilidade em água, alta estabilidade diante de degradação, baixo potencial de lixiviação e ação herbicida em baixas doses. O somatório dessas características auxilia na em lenta dissipação no solo.

A lixiviação do indaziflam também não foi afetada pela adição de cisco e composto orgânico. De modo geral o indaziflam sofreu lixiviação limitada mesmo com a simulação de 100 mm de chuva e os maiores níveis de injúria e redução na biomassa da cultura bioindicadora permaneceram nas camadas de 0-5 cm para ambos os solos e cobertura. Entretanto, também foram observadas injúrias e redução na biomassa da bioindicadora nas profundidades de 5-10 cm. Os resultados aqui demonstrados podem auxiliar os produtores de café na escolha de manejos de cobertura do solo compatíveis com aplicações de indaziflam.

5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCÂNTRA, E. N.; FERREIRA, M. M. Efeitos de métodos de controle de plantas daninhas na cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sobre a qualidade física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 711-721, 2000.
- ALONSO, D. G. et al. Changes in sorption of indaziflam and three transformation products in soil with aging. **Geoderma**, v. 239-240, p. 250-256, 2015.
- ALONSO, D. G. et al. Sorption and desorption of indaziflam degradates in several agricultural soils. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 2, p. 169-176, 2016.
- ALONSO, D. G. et al. Sorption–desorption of indaziflam in selected agricultural soils. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, n. 24, p. 13096-13101, 2011.
- AMIM, R. T. et al. Banco de sementes do solo após aplicação de herbicidas pré-emergentes durante quatro safras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 10, p. 1710-1719, 2016.
- ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Programa de análise de resíduos de agrotóxicos em alimentos – PARA**. Relatório das avaliações de amostras monitoradas no período de 2017 a 2018. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/219201/2782895/Relat%C3%B3rio+PARA+Vers%C3%A3o+Final/1230de7d-306d-4249-a62c-a68708fab153>. Acesso em: 2 maio de 2023.
- ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução. RDC N°4. **Dispõe sobre os critérios para realização de estudos de resíduos de agrotóxicos para fins de registro de agrotóxicos no Brasil**. Diário Oficial da União, Seção 1: Brasília, DF, Brasil, 2012, p. 40-46.
- ARAÚJO, F. C. et al. Optimizing the width of strip weeding in Arabica coffee in relation to crop age. **Planta Daninha**, v. 30, n. 1, p. 129-138, 2012.
- BLANCO, F. M. G. determination of the persistence in soil of the herbicide indaziflam applied on sugarcane crop under brazilian conditions. **Journal of Environmental Science and Engineering**, v. 12, n. 1, p. 59-67, 2023.
- BROSNAN, J. T. et al. Pre and post emergence annual bluegrass control with indaziflam. **Weed Technology**, v. 26, n. 1, p. 48-53, 2012.
- BROSNAN, J. T. et al. Smooth crabgrass control with indaziflam at various spring timings. **Weed Technology**, v. 25, n. 3, p. 363-366, 2011.
- CHRISTOFFOLETI, P. J. et al. **Comportamento dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba, SP: CP, v. 2, 2009. 72 p.
- DAMATTA F. M. et al. Coffee: Environment and crop physiology. In: DAMATTA F. M. (Ed). **Ecophysiology of Tropical Tree Crops**. New York: Nova Science Publishers, v. 3, 2010, p. 181-216.

DIAS, R. C. et al. Seleção de espécies bioindicadoras para o herbicida indaziflam. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 18, n. 2, p. e651, 2019.

DOS REIS, F. C. et al. Leaching of diuron, hexazinone, and sulfometuron-methyl applied alone and in mixture in soils with contrasting textures. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 13, p. 2645-2650, 2017.

ECKELMANN, D. et al. Isomeric stability of indaziflam and major degradation products in the environment. **Science of The Total Environment**, v. 737, p. e140223, 2020.

FERRI, M. V. W.; VIDAL, R. A. Persistência do herbicida acetochlor em função de sistemas de preparo e cobertura com palha. **Ciência Rural**, v. 33, n. 3, p. 399-404, 2003.

FONTES, R. D. et al. Integrated Weed Management in Coffee for Sustainable Agriculture – A Practical Brazilian Approach. In: MENDES, K. F. (Ed.). **New Insights in Herbicide Science**. London, UK: IntechOpen, p. 1-16. 2023.

GONÇALVEZ, V. A. et al. Sorption of indaziflam in brazilian soils with different pH values. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 3, p. 494-504, 2021.

GONZÁLES-DELGADO, A. M. et al. Effect of application rate and irrigation on the movement and dissipation of indaziflam. **Journal of Environmental Sciences**, v. 51, n. 1, 111-119, 2017.

GONZÁLES-DELGADO, A. M. et al. Mobility of indaziflam influenced by soil properties in a semi-arid area. **PLoS ONE**, v. 10, n. 5, p. e0126100, 2015.

GONZÁLES-DELGADO, A. M.; SHUKLA, M. K. Mobility, degradation, and uptake of indaziflam under greenhouse conditions. **HortScience**, v. 55, n. 8, 2020.

GUERRA, N. et al. Aminocyclopyrachlor e indaziflam: Seletividade, controle e comportamento no ambiente. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 12, n. 3, p. 285-295, 2013.

GUERRA, N. et al. Persistence of biological activity and leaching potential of herbicides aminocyclopyrachlor and indaziflam in soils with different textures. **Planta Daninha**, v. 34, n. 2, p. 345-355, 2016.

HOCHMAN, D. et al. Diverse effects of wetting and drying cycles on soil aggregation: Implications on pesticide leaching. **Chemosphere**, v. 263, p. e127910, 2021.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Orientações sobre validação de métodos de ensaios químicos**. DOQCGCRE-008: 2018. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/CGCRE/DOQ/DOQ-CGCRE-8_05.pdf. Acesso em: 15 junho de 2023.

JHALA, A. T. et al. Leaching of indaziflam applied at two rates under different rainfall situations in florida candler soil. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 88, n. 3, p. 326-332, 2012.

JEFFRIES, M. et al. Effect of simulated indaziflam drift rates on various plant species. **Weed Technology**, v. 28, n. 4, p. 608-616, 2014.

MAHESWARI, S. T.; RAMESH, A. Adsorption and degradation of sulfosulfuron in soils. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 127, n. 1-3, p. 97–103, 2007.
MANCUSO, M. A. C. et al. Efeito residual de herbicidas no solo (“Carryover”). **Revista Brasileira Herbicida**, v. 10, p.151-164, 2011.

MATTHEW, D. et al. Soil organic matter content and volumetric water content affect indaziflam–soil bioavailability. **Weed Science**, v. 64, n. 4, p. 757-765, 2016.

MEHDIZADEH, M. et al. Determination of two sulfonylurea herbicides residues in soil environment using HPLC and phytotoxicity of these herbicides by lentil bioassay. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 99, n. 1. p. 93-99, 2017.

MENDES, K. F. et al. Cow bonechar decreases indaziflam pre-emergence herbicidal activity in tropical soil. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 56, n. 6, p. 532-539, 2021a.

MENDES, K. F. et al. Efeito residual de herbicidas em solos agricultáveis. In: TORNISIELO, V. L.; VILCA, F. Z.; GUIMARÃES, C. D.; MENDES, K. (Eds.). **Contaminantes Orgânicos: da Análise a Biorremediação**. Piracicaba, SP: FFEALQ: Piracicaba, Brasil, p. 157–178, 2019.

MENDES, K. F. et al. Indaziflam sorption-desorption and its three metabolites from biochars- and their raw feedstock-amended agricultural soils using radiometric technique. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 56, n. 8, p. 731-740, 2021b.

MENDES, K. F. et al. Lixiviação do hexazinone e da mistura hexazinone + diuron em colunas de solos com texturas distintas. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 7, n. 2, p. 218-224, 2013.

MENDONZA-HUIZAR, L. H. et al. Analysis of the chemical reactivity of indaziflam herbicide and its metabolites through global and local reactivity descriptors. **Química Nova**, v. 42, n. 6, 2019.

MONQUEIRO, P.; SILVA, P.V. Comportamento de herbicidas no ambiente. In: BARROSO, A.A.; MURATA, A.T. (Eds.). **Matologia**. Jaboticabal, SP: Fábrica da Palavra, p. 253-294, 2021.

MONQUERO, P.A. et al. Eficiência de herbicidas pré-emergentes após períodos de seca. **Planta Daninha**, v. 26, n.1, p.185-193, 2008.

NAHHAL, Y. E.; HAMDONA, N. Adsorption, leaching and phytotoxicity of some herbicides as single and mixtures to some crops. **Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences**, v. 22, n. 1, p 17-25, 2017.

PESTICIDE PROPERTIES DATA BASE - PPDB. **Indaziflam**. Disponível em: <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/Reports/1663.htm#none>. Acesso em: 20 de junho de 2023.

R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING. **R: a language and environment for statistical computing**, version 3.6.0; R core team: Viena, Austria, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org>. Acesso em: 15 julho de 2023.

RAMÍREZ, A. C. R. et al. Development and validation of a solid-liquid extraction with low temperature partitioning (SLE/LTP) method for determination of the herbicide indaziflam in brazilian soils by High Performance Liquid Chromatography (HPLC-UV/Vis). **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 23, n. 3, p. 1-8, 2018.

RIBANI, M. et al. Validation for chromatographic and electrophoretic methods. **Química Nova**, v. 27, p. 771-780, 2004.

ROCHA, P.R.R. et al. Sorção e dessorção do diuron em quatro latossolos brasileiros. **Planta Daninha**, v. 31, n.1, p. 231-238, 2013.

ROGER, P.A. et al. Effects of pesticides on soil and water microflora and mesofauna in wetland rice fields: A summary of current knowledge and extrapolation to temperate environments. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 34, n. 7, p. 1057–1068, 1994.

REFATTI, J. P. et al. Efeito da calagem na lixiviação de imazethapyr e imazapyr em solo de cultivo de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 44, n. 6, p. 1008-1014, 2014.

RONCHI, C. P. et al. **Manejo de plantas daninhas em lavouras de café**. Viçosa, MG, Brasil: UFV, 2001. 94 p.

RONCHI, C. P.; SILVA, A. A. Sustainable weed control in coffee. In: KORRES, N. E. et al. (Eds). **Weed Control Sustainability, Hazards and Risks in Cropping Systems Worldwide**. Boca Raton, FL: CRC Press, p. 425-441, 2018.

SAHA, D. et al. Short-term preemergence herbicide adsorption by mulch materials and impacts on Weed Control. **HortTechnology**, v. 29, n. 6, p. 889-897, 2019.

SCHROTH G, et al. Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 14, n. 7, p. 605-625, 2009.

SEBASTIAN, D. J. et al. A potential new herbicide for invasive annual grass control on rangeland. **Rangeland Ecology & Management**, v. 69, n. 3, p. 195–198, 2016b.

SEBASTIAN, D. J. et al. Influence of soil properties and soil moisture on the efficacy of indaziflam and flumioxazin on *Kochia scoparia* L. **Pest Management Science**, v. 73, n. 2, p. 444–451, 2016a.

SEBASTIAN, D. J. et al. Preemergence control of nine invasive weeds with aminocyclopyrachlor, aminopyralid, and indaziflam. **Invasive Plant Science and Management**, v. 10, n. 1, p. 99-19, 2017.

SHEETS, T. J.; HARRIS, C. I. Herbicide residues in soils and their phytotoxicities to crops grown in rotations. In: GUNTHER, F. A. (Eds). **Residue Reviews/Rückstandsberichte**. New York, NY. Springer, v. 11, p. 119-140, 1965.

SILVA, P. V. et al. Efeito da palha de cana-de-açúcar e da precipitação na eficácia de indaziflam. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 4, p. 1040-1051, 2019.

SILVA, P. V. et al. Indaziflam: Leaching and control of *Urochloa plantaginea* in applications on coffee litter with different rainfall simulations. **Coffee Science**, v. 15, p. e151816, 2020.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE PLANTAS DANINHAS - SBCPD. **Procedimento para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas**. Londrina, PR: SBCPD, 1995. 72 p.

SOUZA, A. S. et al. Leaching and carryover for safrinha corn of the herbicides imazapyr + imazapic in soil under different water conditions. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 2, p. 287-298, 2020.

TOMPKINS, J. **Pesticide fact sheet: indaziflam**. United States, Environmental Protection Agency 2010. Disponível em: http://www.epa.gov/opp00001/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC-080818_26-Jul-10.pdf. Acesso em: 18 junho de 2022.

TRIGO, C. et al. Influence of soil biochar aging on sorption of the herbicides MCPA, Nicosulfuron, Terbutylazine, Indaziflam, and Fluoroethyldiaminotriazine. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 62, n. 45, p. 10855-10860, 2014.

U.S. EPA. 2010. Pesticide fact sheet: **Indaziflam**. Conditional registration. Disponível em: https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC-080818_26-Jul-10.pdf. Acesso em: 08 de julho de 2023.

YOUSEFI, M. et al. Sulfosulfuron persistence in soil under different cultivation systems of wheat (*Triticum aestivum*). **Pedosphere**, v. 26, n. 5, p. 666-675, 2016.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da eficácia agronômica, dinâmica da comunidade infestante de plantas daninhas, efeito residual, dissipação e lixiviação do indaziflam em solos com duas coberturas na cultura do café proporcionou novos conhecimentos sobre o comportamento do indaziflam. Assim, foi possível observar que as coberturas cisco e composto orgânico não reduziram a eficácia agronômica do indaziflam e o herbicida continuou com eficiência de controle > 80% por mais de 100 DAA nos dois solos sem e com as coberturas. Esse efeito também foi observado pela modificação da composição florística das plantas daninhas.

A dissipação e lixiviação do indaziflam também foram pouco afetadas pela adição das coberturas cisco e composto orgânico. Por meio da RL_{50} que variou de 95 à 161 dias, foi relatado que a dissipação do indaziflam foi lenta independente do solo ou cobertura, mas o efeito da matriz do solo foi muito mais influente nesse processo. Além disso, a lixiviação do indaziflam também foi baixa, independente do solo ou cobertura, como reportadas as injúrias nas plantas bioindicadoras somente até as profundidades de 15-20 cm do solo.

Nesse sentido, as coberturas podem ser utilizadas, nas condições do presente estudo, sem prejudicar o desempenho agronômico do indaziflam e podem auxiliar na conservação do solo e no manejo de plantas daninhas. Entretanto, são necessários mais estudos variando doses de cobertura e indaziflam com diferentes tipos de solo para entender melhor a dinâmica da interação tripla entre coberturas, solo e indaziflam.