

GUILHERME BACARIM PAVAN

USO DE LASER DE CO₂ NO CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS

BOTUCATU

2022

GUILHERME BACARIM PAVAN

USO DE LASER DE CO₂ NO CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agricultura.

Orientador: Edivaldo Domingues Velini

BOTUCATU

2022

P337u Pavan, Guilherme Bacarim
Uso de laser de CO2 no controle de plantas
daninhas / Guilherme Bacarim Pavan. -- Botucatu,
2022
67 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas,
Botucatu
Orientador: Edivaldo Domingues Velini

1. Agricultura. 2. Lasers de dióxido de carbono. 3.
Ervas daninhas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.
Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados
fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: USO DE LASER DE CO₂ NO CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS

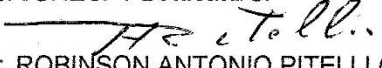
AUTOR: GUILHERME BACARIM PAVAN

ORIENTADOR: EDIVALDO DOMINGUES VELINI

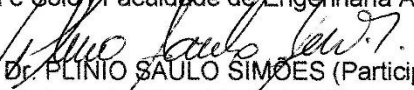
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. EDIVALDO DOMINGUES VELINI (Participação Presencial)
Proteção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu UNESP


Prof. Dr. CAIO ANTONIO CARBONARI (Participação Presencial)
FCA/UNESP / Botucatu/SP


Dr. ROBINSON ANTONIO PITELLI (Participação Presencial)
/ ECOSAFE AGRICULTURA E MEIO AMBIENTE


Prof. Dr. LUIZ LONARDONI FOLONI (Participação Presencial)
Água e Solo / Faculdade de Engenharia Agrícola/Universidade de Campinas


Prof. Dr. PLÍNIO SAULO SIMÕES (Participação Presencial)
Pós-Doutorado / Faculdade de Ciências Agrônômicas - UNESP

Botucatu, 01 de julho de 2022

A minha sobrinha,

Giovana,

dedico.

AGRADECIMENTOS

Sou grato à minha família por todo o amor e apoio que sempre me deram, e que permaneceram ao meu lado em toda a minha trajetória. Em especial a minha primeira sobrinha, Giovana, que encheu meu coração de amor e de esperança. Que me deu forças para lutar em tempos difíceis, e reencontrar o meu caminho.

A todos os professores com os quais tive aula, durante todos esses anos de estudo. Quanto mais eu vivo, mais admiro o que todos fizeram por mim no caminho até aqui. Ao meu orientador, Prof. Dr. Edivaldo Domingues Velini, por toda compreensão, paciência e ensinamentos. Por todas as conversas, conselhos, confiança e orientações. Por acreditar em mim e me incentivar. Por me inspirar a acreditar no poder de transformação da educação e da inovação.

Ao Prof. Dr. Caio Antônio Carbonari, pelo incentivo, compreensão e orientações.

A todos os amigos e companheiros de trabalho do NUPAM. Em especial ao José Roberto, José Guilherme, Marcelo, Gisleide, Saulo, Roque, Ana Karollyna, Ivana, Fernando e a todos que participaram da minha jornada nesse período.

A todos que compõem o Programa de Pós-graduação em Agronomia (Agricultura) da Faculdade de Ciências Agronômicas - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Botucatu-SP, pela oportunidade e por acreditarem em mim desde o início.

À empresa Santo Antônio Energia pelo financiamento do projeto "Biomonitoramento e Controle Integrado de macrófitas e mosquitos do gênero *Mansonia* (Diptera: Culicidae) em região associada a lago de Usina Hidrelétrica (UHE) no Brasil" na linha de pesquisa P&D ANEEL. Os equipamentos de produção e aplicação de laser utilizados foram adquiridos com recursos deste projeto.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida.

RESUMO

Ao longo de toda a história humana, métodos químicos, físicos ou mecânicos de controle de plantas daninhas sempre foram utilizados. Dispositivos que se aproveitam de meios mecânicos e térmicos para o controle de plantas daninhas têm se tornado cada vez mais adotados. O método de controle de plantas daninhas pelo uso de laser ainda é pouco conhecido, havendo poucos estudos publicados. Esse trabalho teve o objetivo de avaliar qual o melhor método de aplicação para experimentos de dose-resposta com laser, por cabeçote ou direta, e avaliar a relação dose-resposta para aplicação de laser em plantas daninhas. Os experimentos foram divididos em duas etapas, a primeira para comparação de métodos de aplicação, por cabeçote ou direta. Na segunda foram feitos experimentos de dose-resposta com diferentes espécies e estádios. Estes foram elaborados no delineamento inteiramente casualizado, com nove tratamentos e quatro repetições, sendo oito doses mais a testemunha. Um conjunto de trinta e seis plantas recebeu as doses através da aplicação direta e o outro pelo cabeçote. As aplicações foram feitas em plantas de *Bidens pilosa* no estádio de dois pares de folhas completamente expandidas (E2). As aplicações foram realizadas com alvo na parte inferior do caule, a 0,5 cm de distância do solo. As doses aplicadas foram: 0,33, 0,66, 1,33, 2,65, 5,31, 10,61, 21,22 e 42,44 J.mm⁻². Aos 7 DAA foi medida a massa de matéria fresca da parte aérea das plantas. Estes dados foram transformados em porcentagem de controle em relação a testemunha e submetidos ao modelo de Mitscherlich. Na segunda etapa sete espécies (*Amaranthus viridis*, *Bidens pilosa*, *Cenchrus echinatus*, *Digitaria horizontalis*, *Eleusine indica*, *Panicum maximum* e *Urochloa decumbens*) foram submetidas a experimentos de dose-resposta pelo método de aplicação direta, nos estádios E1, E2 e E3. Um conjunto de testemunhas (4 parcelas experimentais) por experimento foi utilizado para análises de massa de matéria fresca, massa de matéria seca e área foliar, AFEMF, AFEMS, teor de umidade e EC80. Esses dados, de todas as espécies e estádios, foram agrupados para realização da análise de correlação de Pearson. Para os tratamentos submetidos a aplicação de laser, foi medida a massa de matéria seca 14 DAA. Os dados foram transformados em porcentagem de controle em relação a testemunha e submetidos ao modelo de Mitscherlich. Concluiu-se que a aplicação da mesma dose de laser de forma direta proporciona um controle mais eficaz de plantas de *Bidens pilosa* do que por cabeçote. O sistema de aplicação direta é o

indicado para realização de experimentos de dose-resposta. As espécies *Amaranthus viridis*, *Bidens pilosa*, *Cenchrus echinatus*, *Digitaria horizontalis*, *Eleusine indica*, *Panicum maximum* e *Urochloa decumbens* podem ser controladas com o uso de laser de CO₂, em E1, E2 e E3. Existe correlação positiva entre a dose estimada para o controle de plantas daninhas por laser e a massa de matéria fresca, massa de matéria seca e área foliar.

Palavras-chave: laser; planta daninha; controle; energia; dose-resposta.

ABSTRACT

Throughout human history, chemical, physical or mechanical methods of weed control have always been used. Devices that take advantage of mechanical and thermal means for weed control have become increasingly adopted. The method of weed control by laser use is still little known, with few studies published. The objective of this work was to evaluate the best application method for dose-response experiments with laser, using a scanner head or direct, and to evaluate the dose-response ratio for laser application in weeds. The experiments were divided into two stages, the first for comparison of application methods, by scanner head or direct. In the second, dose-response experiments were carried out with different species and stages. These were elaborated in a completely randomized design, with nine treatments and four replicates, eight doses plus the control. A set of thirty-six plants received the doses through direct application and the other by the scanner head. The applications were made in *Bidens pilosa* plants in the stage of two pairs of completely expanded leaves (E2). The applications were performed with a target at the bottom of the stem, 0.5 cm away from the ground. The doses applied were: 0.33, 0.66, 1.33, 2.65, 5.31, 10.61, 21.22 and 42.44 J.mm⁻². At 7 DAA, the fresh matter mass of the aerial part of the plants was measured. These data were transformed into a control percentage in relation to the control treatment and submitted to the Mitscherlich model. In the second stage, seven species (*Amaranthus viridis*, *Bidens pilosa*, *Cenchrus echinatus*, *Digitaria horizontalis*, *Eleusine indica*, *Panicum maximum* and *Urochloa decumbens*) were submitted to dose-response experiments by the direct application method at stages E1, E2 and E3. A set of controls (4 experimental plots) per experiment was used for analysis of fresh matter mass, dry matter mass and leaf area, AFEMF, AFEMS, moisture content and EC80. These data, from all species and stages, were grouped to perform Pearson's correlation analysis. For the treatments submitted to laser application, the dry matter mass 14 DAA was measured. The data were transformed into a control percentage in relation to the control treatment and submitted to the Mitscherlich model. It was concluded that the application of the same laser dose directly provides a more effective control of *Bidens pilosa* plants than using the scanner head. The direct application system is indicated for dose-response experiments. The species *Amaranthus viridis*, *Bidens pilosa*, *Cenchrus echinatus*, *Digitaria horizontalis*, *Eleusine indica*, *Panicum maximum* and *Urochloa decumbens* can be controlled with

the use of CO₂ laser, in E1, E2 and E3. There is a positive correlation between the estimated dose for laser weed control and fresh matter mass, dry matter mass and leaf area.

Keywords: laser; weed; control; energy; dose-response.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E LASER	18
2.2	O USO DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NO CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS.....	19
3	MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1	COMPARAÇÃO ENTRE APLICAÇÃO DIRETA E ATRAVÉS DE CABEÇOTE.....	24
3.1.1	Caracterização dos sistemas de aplicação.....	24
3.1.1.1	<i>Sistema de aplicação por cabeçote.....</i>	<i>24</i>
3.1.1.2	<i>Sistema de aplicação direta</i>	<i>26</i>
3.1.2	Delineamento e método de aplicação.....	28
3.1.3	Método experimental, avaliações e análise estatística.....	31
3.2	DOSE-RESPOSTA EM DIFERENTES ESPÉCIES DE PLANTAS DANINHAS.....	33
3.2.1	Delineamento e método de aplicação.....	33
3.2.2	Avaliações e análise estatística	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	COMPARAÇÃO ENTRE APLICAÇÃO DE LASER DIRETA E ATRAVÉS DE CABEÇOTE.....	36
4.2	DOSE-RESPOSTA EM DIFERENTES ESPÉCIES DE PLANTAS DANINHAS.....	39
4.2.1	Análise de coeficientes de correlação de Pearson	39
4.2.2	Dose-resposta em <i>Amaranthus viridis</i>, <i>Bidens pilosa</i>, <i>Cenchrus echinatus</i>, <i>Digitaria horizontalis</i>, <i>Eleusine indica</i>, <i>Panicum maximum</i> e <i>Urochloa decumbens</i>	40
4.2.2.1	<i>Amaranthus viridis</i>	41
4.2.2.2	<i>Bidens pilosa</i>	44
4.2.2.3	<i>Cenchrus echinatus</i>	47
4.2.2.4	<i>Digitaria horizontalis</i>	49
4.2.2.5	<i>Eleusine indica</i>	51
4.2.2.6	<i>Panicum maximum</i>	54

4.2.2.7	<i>Urochloa decumbens</i>	56
5	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Ao longo de toda a história humana, métodos físicos ou mecânicos de controle de plantas daninhas sempre foram utilizados. Apenas no final do século XIX alguns sais inorgânicos (por exemplo, sais de cobre) e óleos botânicos passaram a ser usados como pesticidas para controlar plantas daninhas ou outras pragas. A descoberta das propriedades herbicidas e introdução do 2,4-D foi um passo importante que abriu as portas para a descoberta, desenvolvimento e formulação de vários outros herbicidas (Peterson, 1967). Após sua descoberta e uso na agricultura, os herbicidas vêm proporcionando uma grande contribuição no manejo de plantas daninhas no aumento da produtividade das culturas.

Os herbicidas são ferramentas seguras, que exigem o uso correto, e são essenciais no manejo de plantas daninhas. O uso incorreto do método químico pode levar a consequências que dificultam bastante o manejo de plantas daninhas, como a seleção de plantas resistentes. Dentro desse contexto, é importante discutir as falhas e suas possíveis soluções para a construção de um caminho mais sustentável. O uso de novas tecnologias deve ser enxergado como um aliado em um sistema de manejo integrado. É importante avaliar métodos de controle com parâmetros técnicos de análise de risco, e fomentar sempre a capacitação de agricultores para o uso correto de todos os métodos disponíveis.

Apesar de todos os benefícios obtidos com a aplicação de herbicidas, a evolução da resistência das plantas daninhas a herbicidas tem se apresentado como um problema sério (Heap, 2014; Powles, 2008). A sustentabilidade do controle de plantas daninhas alcançado apenas através da aplicação de herbicidas tornou-se questionável (Gaba *et al.*, 2016; Heap, 2014; Powles, 2008) e evidenciou a necessidade do resgate de conceitos de manejo integrado. Diante disso, métodos não químicos de controle são bem vindos para complementar o controle de plantas daninhas.

A escassa disponibilidade de ingredientes ativos (IA) para culturas menores, como hortaliças, e o aumento da agricultura orgânica tem estimulado o desenvolvimento de novos métodos de controle não químicos de plantas daninhas (Harker e O'Donovan, 2013; Pannacci e Tei, 2014). Na União Europeia, a Comissão Europeia (CE) está promovendo a agricultura com baixo teor de defensivos nos Estados-Membros e espera-se que os governos individuais criem as condições

necessárias para os agricultores implementarem o controle físico de plantas daninhas (Hillocks, 2012). Dispositivos que se aproveitam de meios mecânicos e térmicos para o controle de plantas daninhas têm se tornado cada vez mais usados, devido à rígida legislação da União Europeia sobre defensivos (Martelloni *et al.*, 2016).

A automatização do controle de plantas daninhas fornece um caminho com ferramentas alternativas muito promissoras, especialmente para culturas de alto valor agregado, “speciality crops”, podendo ser complementar ao modelo tradicional de uso de herbicidas. Há menos de 10 empresas no mundo que têm a capacidade de descobrir, desenvolver e registrar herbicidas (Jeschke, 2016). Em contraste, há muito mais empresas com experiência em robótica que podem construir novos equipamentos para controle de plantas daninhas, e o desenvolvimento de novas tecnologias nessa área é muito mais viável em escalas menores.

O poder do controle automatizado de plantas daninhas é a fusão da tecnologia tradicional de controle de plantas daninhas com a robótica. Quando a tecnologia de automação, detecção de plantas daninhas e atuação são combinadas com um dispositivo de controle, o resultado é a criação de uma ferramenta diferente e possivelmente mais eficaz (Westwood *et al.*, 2018).

Existem algumas medidas novas e não tradicionais promissoras que poderiam ser usadas para controlar plantas daninhas na agricultura. Métodos como a aplicação de radiação infravermelha (IR), eletricidade (Slaughter, Giles e Downey, 2008), lasers (Mathiassen, S.K. *et al.*, 2006), radiação de microondas (Brodie, Hamilton e Woodworth, 2007), sistemas de controle ultrassônicos e sistemas robóticos de controle de plantas daninhas em tempo real (Perez-Ruiz *et al.*, 2012), podem ser usados para controle em condições de campo.

O método de controle de plantas daninhas através do uso de laser ainda é pouco conhecido, havendo poucos estudos publicados sobre o assunto atualmente. Não há padronização de métodos para aplicação e avaliação, o que dificulta a comparação de resultados e o planejamento de experimentos futuros. Além disso, estudos de dose-resposta com aplicação de laser são escassos na literatura, principalmente com aplicação de um mesmo método em diversas espécies diferentes. Sendo assim esse estudo teve os objetivos de:

Avaliar qual o melhor método de aplicação para experimentos de dose-resposta com laser, por cabeçote ou direta.

Avaliar hipóteses sobre a influência do estágio de desenvolvimento e conteúdo de água das plantas na eficácia de controle da aplicação de laser.

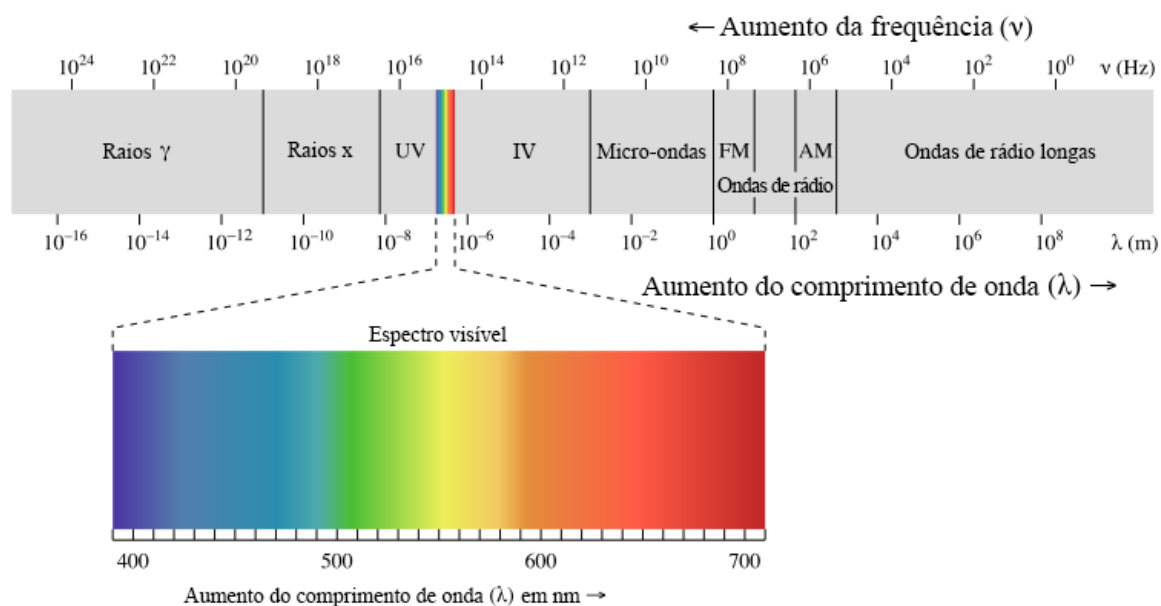
Definir a relação dose-resposta para aplicação de laser em plantas de *Amaranthus viridis* L.(caruru-de-mancha), *Bidens pilosa* L.(picão-preto), *Cenchrus echinatus* L.(capim-carrapicho), *Digitaria horizontalis* Willd.(capim-colchão), *Eleusine indica* (L.) Gaertn.(capim-pé-de-galinha), *Panicum maximum* Jacq. (capim-colonião) e *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D.Webster (braquiária decumbens).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E LASER

A radiação eletromagnética é uma das várias maneiras pelas quais a energia viaja no espaço. As ondas eletromagnéticas podem ser classificadas e organizadas de acordo com seus diversos comprimentos de onda/frequências. Esta classificação é conhecida como o espectro eletromagnético. O espectro visível compõe apenas uma pequena fração dos diferentes tipos de radiação que existem. À direita do espectro visível (Figura 1), encontramos os tipos de energia de frequência mais baixa (e, portanto, de maior comprimento de onda) que a luz visível. Esses tipos de energia incluem os raios infravermelhos (RI), que são ondas de calor emitidas por corpos térmicos, as micro-ondas e as ondas de rádio.

Figura 1 – Infográfico do espectro da radiação eletromagnética



Fonte: Electromagnetic Radiation - Chemistry LibreTexts

Laser é um acrônimo para “light amplification by stimulated emission of radiation”. Um laser é um dispositivo que emite luz por meio de amplificação óptica baseada na emissão estimulada de radiação eletromagnética. Foi descoberto por Th.H. Maiman, 50 anos atrás, usando uma lâmpada de flash com cristais de rubi como meio (Maiman, 1960). O conceito de “emissão estimulada de radiação” foi concebido

pela primeira vez por Einstein (1917). Mas foi em 1951 que seu uso para amplificação prática de ondas eletromagnéticas foi reconhecido e, em 1954, o primeiro dispositivo desse tipo, a maser (amplificação de microondas por emissão estimulada), foi construído. Schawlow e Townes (1958) apontaram como o mesmo processo poderia funcionar para ondas eletromagnéticas visíveis, o que desencadeou uma enxurrada de trabalhos em muitos lugares para construir tal dispositivo (Townes, 2007).

A incursão do laser na biologia foi feita por Bessis *et al.* (1962), com a aplicação de um laser de rubi em organelas celulares. Rounds e Okigaki (1965) demonstraram que a destruição de tecidos pigmentados e não pigmentados pelo laser é dependente da capacidade da célula de absorver a energia imposta. Wilde *et al.* (1969) e Paleg e Aspinall (1970) foram pioneiros no uso de laser de rubi e HeNe, respectivamente, na agricultura. Wilde *et al.* (1969) mostraram que a exposição de certas sementes à radiação laser parecia acelerar a germinação e o crescimento de suas plantas. Paleg e Aspinall (1970) demonstraram que a emissão de laser de 632,8 nm ativa o sistema fitocromo, sendo possível ativar a resposta a grande distância. Desde estes primeiros relatos até os dias de hoje existem inúmeros estudos do uso de laser na agricultura e estes têm demonstrado a potencialidade de sua aplicação neste campo.

2.2 O USO DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NO CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS

Desde o começo do uso de laser na agricultura até agora, diferentes tipos de lasers foram usados, desde ultravioleta até infravermelho distante, incluindo UV (200-400 nm), luz visível (400-700 nm), radiação infravermelha próxima (750-2500 nm) e infravermelho distante (5000-10,6nm). Lasers sólidos, gasosos e diodo têm sido aplicados na agricultura, por exemplo: laser de rubi (694 nm), He-Ne (632,8 nm), laser de nitrogênio (337,1 nm), argônio (514,5 nm), laser YAG: Nd (532 nm), laser de diodo (510, 632, 650, 670, 810, 940 e 980 nm), laser semiconductor AsAlGa (650, 660 e 850 nm) e CO₂ (10600 nm). Esses lasers têm sido usados sozinhos ou em formas combinadas; com regimes de irradiação simples ou complexos.

Os lasers têm sido considerados método válido para o controle físico de plantas daninhas, e nos últimos anos tem sido intensificadas as pesquisas sobre os seus efeitos. A irradiação a laser leva à absorção de energia no tecido da planta e geralmente a uma conversão em calor, por meio da qual o tecido é destruído. O ponto

crítico durante o uso em larga escala da tecnologia a laser é focar o feixe do laser no ponto correto das plantas daninhas, mas vários outros fatores são importantes: o comprimento de onda do laser, intensidades de radiação, dispositivos de direcionamento tecnicamente viáveis, bem como as espécies de plantas daninhas e seus estágios de crescimento (BAYRAMIAN; FAY; DYER, 1992; MARX et al., 2012; MATHIASSEN et al., 2006).

Experimentos de laboratório destacaram que as diferenças na eficácia do tratamento dependem do hábito de crescimento da planta. O crescimento mais aberto de dicotiledôneas os torna mais acessíveis para o feixe de laser, comparado ao crescimento mais fechado de monocotiledôneas (Wöltjen, Rath e Herzog, 2008).

A influência do posicionamento do feixe foi importante, pois o tratamento desfocado resultou em uma diminuição da letalidade. A absorção da radiação laser no tecido vegetal depende dos comprimentos de onda do laser utilizado. Lasers com alto grau de absorção no tecido vegetal (CO₂) tem melhor desempenho no controle de plantas daninhas (Marx, César, *et al.*, 2012). Em outro estudo concluiu-se que a dose necessária para controlar a planta monocotiledônea estudada foi de 54 J. Como as proporções da distribuição de monocotiledôneas e dicotiledôneas mudam no campo, pelo menos esses 54 J devem estar disponíveis (MARX et al., 2012a).

Experimentos foram realizados por Heisel *et al.* (2001, 2002) com o intuito de fornecer as especificações para parâmetros de aplicação a laser. Eles aplicaram o laser no caule de três espécies de plantas e verificaram correlação na dose-resposta. O laser foi capaz de cortar os caules das plantas daninhas e reduzir significativamente o peso seco das plantas tratadas, com a ressalva da posição de corte ser abaixo do meristema apical das plantas, para que não haja rebrota.

O conhecimento da penetração do tecido vegetal pela radiação laser em determinados comprimentos de onda, efeitos térmicos no tecido irradiado e os mecanismos prejudiciais correspondentes são de especial importância para o controle bem-sucedido das plantas daninhas pelo uso de laser. Sabe-se que, depois de exceder certo nível de energia de radiação e a decomposição das camadas de tecido por pirolíse, a radiação na faixa infravermelha média (MIR) (por exemplo, a radiação a laser CO₂) é absorvida diretamente na superfície da folha, causando queimaduras superficiais (Barcikowski, Koch e Odermatt, 2006). Na faixa de infravermelho próximo (NIR) (por exemplo, de Nd:YAG e radiação de laser diodo), a absorção da superfície é menor, seguida por uma penetração mais profunda do tecido, levando à plastificação

da lignina (Haferkamp *et al.*, 2004) e danos no tecido interno. A radiação a laser afeta o equilíbrio térmico da planta, onde a destruição parcial do tecido é causada pela influência dos mecanismos termodinâmicos de transporte de calor conhecidos e radiação, convecção e condução. Em contraste com os tratamentos pelo uso de chamas, a aplicação da energia laser é seletiva e com alta resolução espacial. Assim, a transferência de resultados preliminares de pesquisas com uso de flamejamento à aplicação do laser é limitada severamente. Couch e Gangstad (1974) já investigaram a interação entre a radiação a laser e o tecido de folhas. Bayramian *et al.* (1992) não conseguiram uma erradicação completa de plantas daninhas em estufas usando um laser CO₂, embora uma redução substancial do crescimento tenha sido alcançada.

Ferramentas de reconhecimento baseadas em inteligência artificial foram desenvolvidas, e permitem distinguir plantas daninhas de plantas cultivadas em ambientes agrícolas em tempo real (Ge *et al.*, 2013; Rakhmatulin e Andreassen, 2020). O meristema pode ser detectado usando câmeras de alta resolução, enquanto o posicionamento pode ser guiado por scanners a laser precisos.

Langner *et al.* (2006) também estudaram o conceito de controle de plantas daninhas pelo uso do laser de CO₂ e um laser Nd:YAG para controle de plantas daninhas em experimentos de laboratório. Devido à falta de precisão de no alvo e à idade avançada das plantas daninhas utilizadas, eles calcularam um baixo equilíbrio energético para um controle efetivo. Mathiassen *et al.* (2006) realizaram estudos com um sistema portátil. Eles irradiaram os meristemas de três espécies de plantas (*Brassica napus*, *Stellaria media* e *Tripleurospermum inodorum*) e documentaram a influência dos parâmetros de diâmetro do feixe do laser (0,9- 2,4 mm), comprimento de onda (532 e 810 nm), densidades energéticas (0,6-49,7 J.mm⁻²) e suas relações de dose-resposta. Mathiassen *et al.* (2006) concluíram que a melhora da precisão de aplicação no alvo, tamanho feixe do laser e densidade de energia podem melhorar a aplicação a laser.

Ao longo da revisão do assunto foram encontrados muitos resultados diferentes e quase nenhuma padronização de métodos, o que dificulta a comparação de resultados e o planejamento de experimentos futuros. Além disso, não foi encontrado nenhum estudo com aplicação extensiva de dose-resposta em mais de três espécies. Sendo assim esse estudo teve os objetivos de:

Verificar qual o melhor método de aplicação para experimentos de dose-resposta, por cabeçote ou direta.

Investigar hipóteses sobre a influência do estágio de desenvolvimento e conteúdo de água das plantas na eficácia da aplicação de laser.

Definir a relação dose-resposta para aplicação de laser em plantas de *Amaranthus viridis* L.(caruru-de-mancha), *Bidens pilosa* L.(picão-preto), *Cenchrus echinatus* L.(capim-carrapicho), *Digitaria horizontalis* Willd.(capim-colchão), *Eleusine indica* (L.) Gaertn.(capim-pé-de-galinha), *Panicum maximum* Jacq. (capim-colonião) e *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D.Webster (Braquiária decumbens).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia (NUPAM), pertencente ao Departamento de Proteção de Plantas da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), em Botucatu, São Paulo.

Os experimentos foram divididos em duas etapas, onde a primeira foi constituída pela comparação de diferentes métodos de aplicação de laser, por cabeçote ou direta. Na segunda etapa foram feitos experimentos avaliando eficácias de controle de relações de dose-resposta com diferentes espécies de plantas daninhas e diferentes estádios de crescimento.

Em todos os experimentos as parcelas experimentais foram constituídas de plantas produzidas em tubetes cônicos, de 2,7 cm de diâmetro e 12 cm de altura, com volume de 63 ml (Figura 2). Os tubetes foram preenchidos com substrato Carolina II, com a seguinte composição: turfa de sphagnum, vermiculita expandida, casca de arroz torrefado, calcário dolomítico, gesso agrícola e traços de NPK; condutividade elétrica (CE) = $0,7 \text{ mS.cm}^{-1} \pm 0,3$; pH 5,5; densidade 155 kg.m^{-3} e capacidade de retenção de água 55%.

Figura 2 – Foto mostrando tubete utilizado para parcela experimental em todas as etapas



Foto: Guilherme Bacarim Pavan - 2021

Em cada tubete foram semeadas 20 sementes da planta daninha e, após a emergência, foi realizada a seleção e desbaste, de forma que permanecesse apenas uma planta por tubete. Em todos os experimentos as plantas foram mantidas em casa-de-vegetação em condição de plena luz e com irrigação periódica.

3.1 COMPARAÇÃO ENTRE APLICAÇÃO DIRETA E ATRAVÉS DE CABEÇOTE

O objetivo dessa etapa foi avaliar qual a melhor forma de aplicação de energia na forma de feixe laser, para definição de um método padronizado na segunda etapa desse trabalho.

3.1.1 Caracterização dos sistemas de aplicação

Ambos os sistemas avalizados usaram como gerador do laser um tubo SPT de 150 Watts. O tubo produz radiação eletromagnética com comprimento de onda 10,6 micrometros (laser), por meio da excitação dos gases selados no interior do tubo principalmente o CO₂. A excitação é provocada pela alta tensão alimentada nos eletrodos positivo e negativo do tubo, fornecida pela fonte HY-T100 de 150 watts. Esse processo gera calor, por isso existe um sistema de arrefecimento do tubo, que possibilita o funcionamento do sistema por períodos extensos. Essa refrigeração é feita apela circulação forçada de água em espirais que circundam a capsula de gases, onde a água absorve o calor gerado pela excitação dos gases e é resfriada por um “chiller” S&A, modelo CW-5000.

Em ambos os sistemas o feixe de laser gerado deixa o tubo com 6 mm de diâmetro, portanto 28,2735 mm² de área.

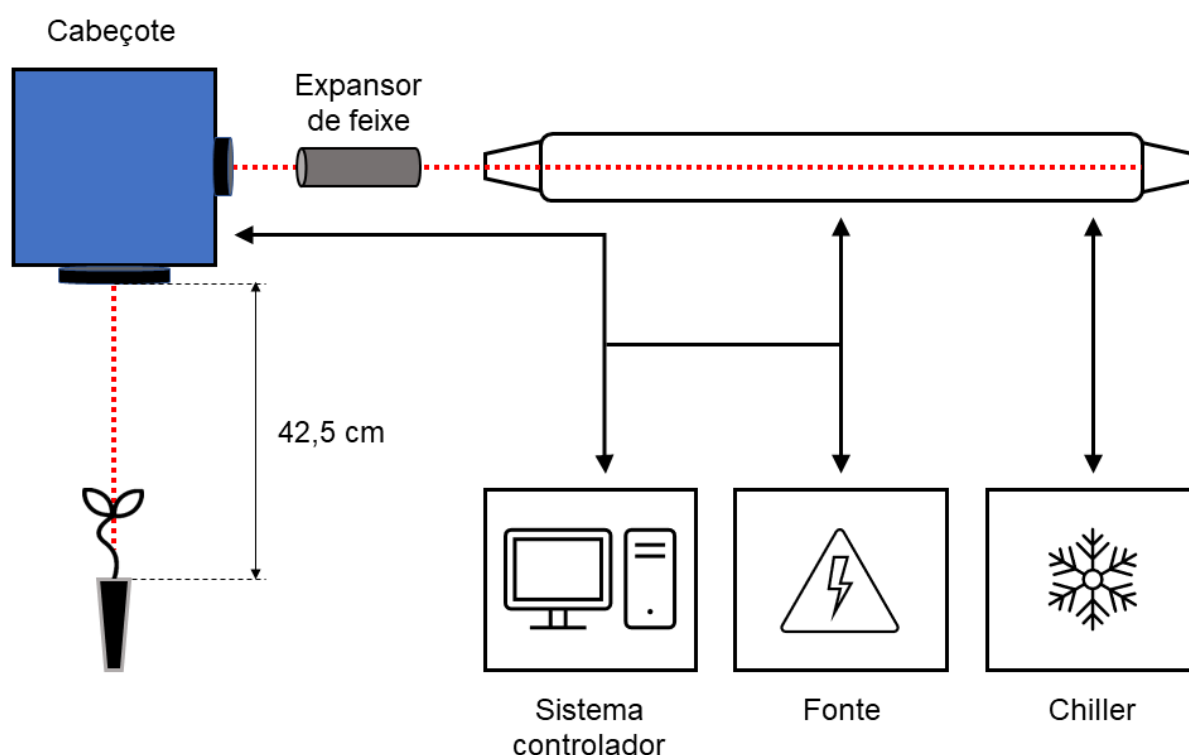
3.1.1.1 Sistema de aplicação por cabeçote

Nesse sistema o feixe de laser percorre um conjunto de lentes e espelhos antes de atingir a planta. Ao deixar o tubo de CO₂ o feixe passa pelo expensor de feixe (RONAR-SMITH BEX-10.6-4X) antes de entrar no cabeçote. O cabeçote (Sino-Galvo JD2808) tem como componentes principais um conjunto de dois espelhos anexados a motores-galvanômetros, que definem o trajeto e velocidade que o laser incidirá sobre a planta. Os espelhos do cabeçote são direcionados por um sistema

controlador, composto por uma placa de interface conectada a um computador com o software (EZcad). Esse conjunto também é responsável por controlar a ativação e a potência da fonte de alimentação elétrica do tubo. Na saída do cabeçote existe uma lente F-theta, responsável pelo foco do feixe expandido.

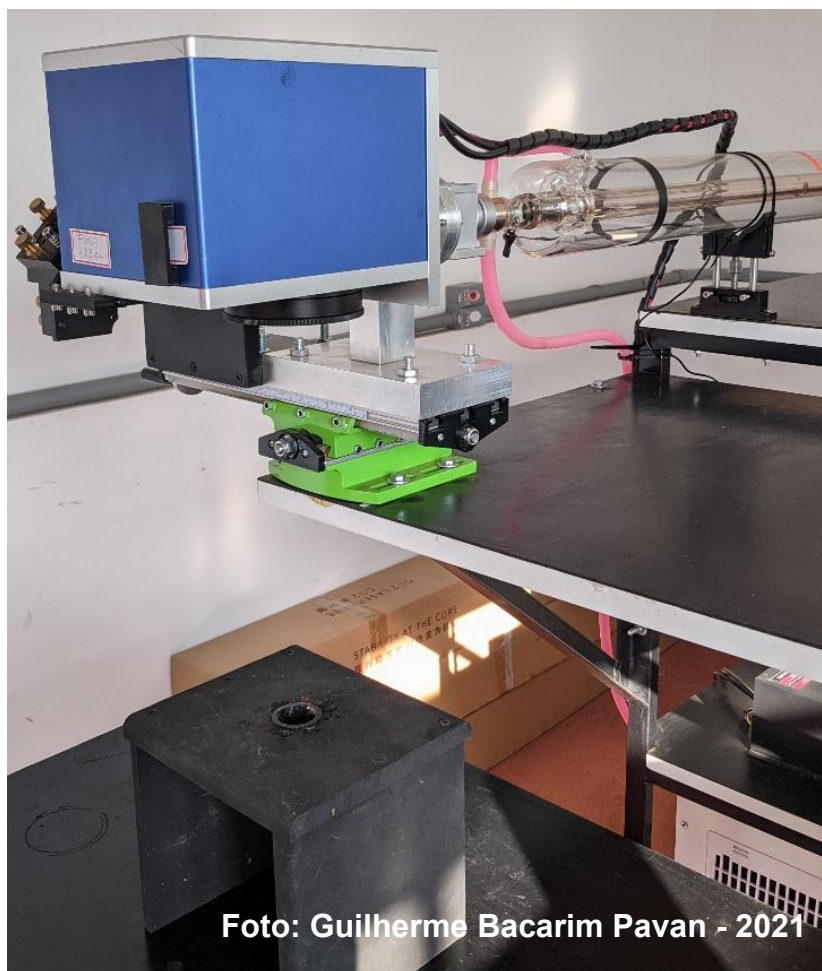
No sistema de aplicação pelo cabeçote o tubo foi posicionado em uma bancada de suporte, ficando paralelo ao solo, como representado no diagrama da Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de representação do sistema desenvolvido para aplicação de laser pelo do cabeçote



Na Figura 4 é possível visualizar o sistema real usado para aplicação de laser pelo cabeçote, assim como a base onde foram posicionados os tubetes para aplicação com estabilidade. Na ocasião da aplicação o suporte de tubetes foi posicionado em uma mesa com ajuste de altura, o que permitiu o ajuste preciso da distância estabelecida. Também pode ser observado o suporte móvel onde foi montado o conjunto do cabeçote e expansor de feixe. Esse suporte foi adotado para atingir um bom alinhamento entre o tubo e os demais componentes óticos.

Figura 4 - Sistema desenvolvido para aplicação de laser pelo do cabeçote

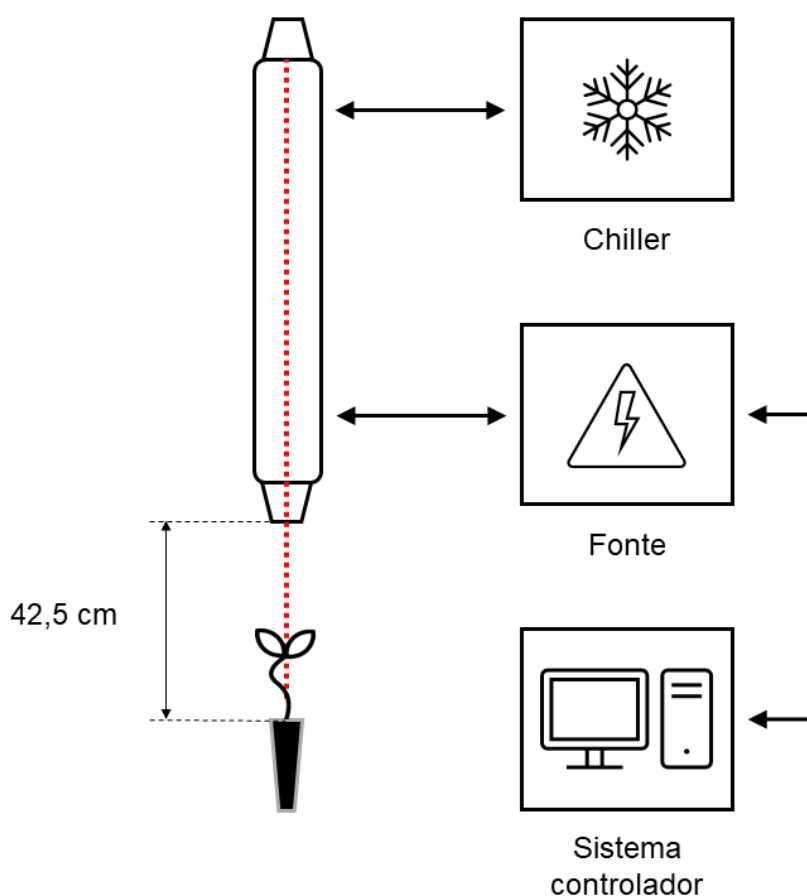


3.1.1.2 Sistema de aplicação direta

No sistema de aplicação direta o tubo foi posicionado verticalmente através de uma estrutura de suporte, ficando perpendicular ao solo. O suporte foi projetado com um trilho que permitiu o ajuste de altura, com o intuito de garantir o ajuste de distância entre a base do tubete e a saída do tubo de laser CO₂. Nesse sistema não há a necessidade de direcionar o feixe, portanto o sistema controlador foi responsável apenas por ativar e desativar a fonte nos períodos determinados pelos tratamentos.

O diagrama do sistema ilustra o posicionamento de todos os componentes na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama de representação do sistema desenvolvido para aplicação direta de laser



Nesse sistema foi necessário adotar alguns cuidados especiais, se tratando de uma adaptação, as condições de operação também precisam ser ajustadas para o bom funcionamento dos componentes. O cátodo é o extremo do tubo de CO_2 onde a maior parte do calor é gerada, portanto é necessário que a água que retorna resfriada do chiller entre por esse extremo e circule em direção do ânodo. Com o tubo na posição vertical o cátodo fica na posição inferior, o que dificulta essa circulação, então é preciso adotar um chiller que seja capaz de vencer a força adicional de coluna de água consequente dessa orientação. Ressalta-se também a importância de aterramento das estruturas metálicas e de todos os componentes do sistema.

O sistema real usado para aplicação direta pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Sistema desenvolvido para aplicação direta de laser

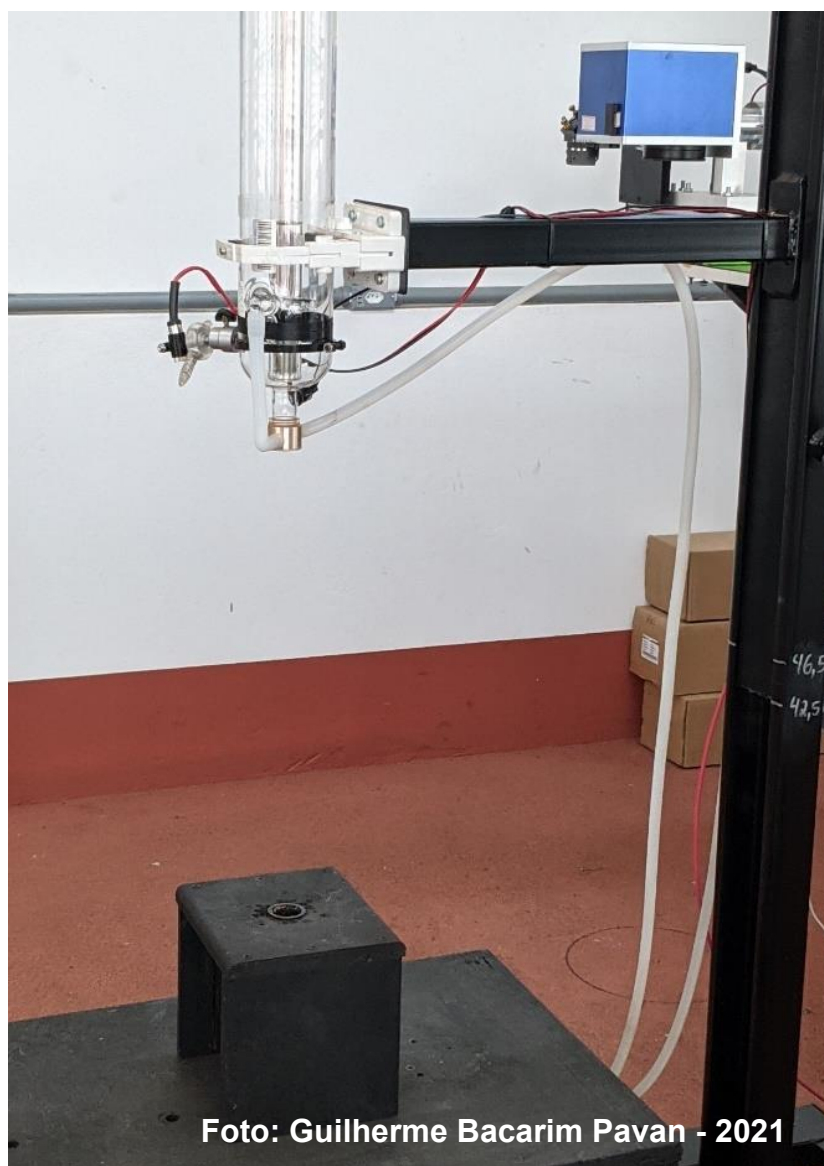


Foto: Guilherme Bacarim Pavan - 2021

3.1.2 Delineamento e método de aplicação

Os experimentos foram instalados no delineamento experimental inteiramente casualizado, com 9 tratamentos e 4 repetições, sendo os tratamentos compostos por 8 doses de radiação mais a testemunha sem aplicação, totalizando 36 parcelas experimentais por experimento. Um conjunto de 36 plantas recebeu as doses através da aplicação direta e o outro pelo cabeçote. Quando finalizado o experimento foi repetido seguindo o mesmo delineamento.

As aplicações foram feitas em plantas de *Bidens pilosa* L. (picão-preto), quando essas atingiram o estágio de desenvolvimento com dois pares de folhas

completamente expandidas (E2). As aplicações foram realizadas com alvo na parte inferior do caule, a 0,5 cm de distância do solo. Em casos em que as plantas ainda não haviam atingido esse tamanho, o feixe foi direcionado ao meristema apical de crescimento, também sempre coincidente com o caule. A definição do alvo foi fruto das observações realizadas durante o ajuste do método aliadas as recomendações de autores que investigaram o tema (Brodie, 2018; Heisel *et al.*, 2001; Jones, Blair e Orson, 1996).

As doses aplicadas foram atingidas pelo incremento do período no qual as plantas foram expostas ao laser, baseadas no tempo mínimo de 0,0625 segundos. Esse foi o tempo mínimo limite no qual foi possível atingir uniformidade de aplicação e estabilidade do conjunto de fornecimento de energia para o tubo. A partir desse tempo foram estabelecidas as demais doses, seguindo o crescimento exponencial, sendo essas 1x, 2x, 4x, 8x, 16x, 32x, 64x, 128x o valor base de 0,0625 segundos, ou: 0,0625, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4 e 8 segundos. Posteriormente essas doses foram convertidas em densidade de energia, razão de energia por área aplicada, ou Joules por milímetro quadrado, seguindo o método proposto por Coleman *et al* (2021). Essa padronização torna factível a comparação com outros métodos baseados na aplicação de energia. A conversão foi feita através da equação (eq. 1):

$$y = \frac{P \times t}{\pi r_{feixe}^2} \quad (1)$$

Onde y é a dose expressa em densidade de energia ($J.mm^{-2}$), P é a potência total do tubo (watts), r_{feixe} é o raio do feixe (milímetros) e t é o tempo de exposição do tratamento (segundos).

As doses obtidas através da conversão, em forma final, foram: 0,33, 0,66, 1,33, 2,65, 5,31, 10,61, 21,22 e 42,44 $J.mm^{-2}$. Para validação dessa metodologia foi aferida a potência do tubo, onde foi confirmada a potência de 150 watts. No entanto, no sistema de aplicação pelo cabeçote foi aferida uma perda de potência de 58%, consequente da transmissão do feixe por diversos componentes óticos até atingir o alvo. Para que os resultados pudessem comparados com o método de aplicação direta, essa perda foi compensada através do incremento no tempo de aplicação em 58%. Com isso, os tempos de exposição relativos aos tratamentos da aplicação pelo

cabeçote foram: 0,0988, 0,1975, 0,395, 0,79, 1,58,3,16, 6,32 e 12,64 segundos (Tabela 1).

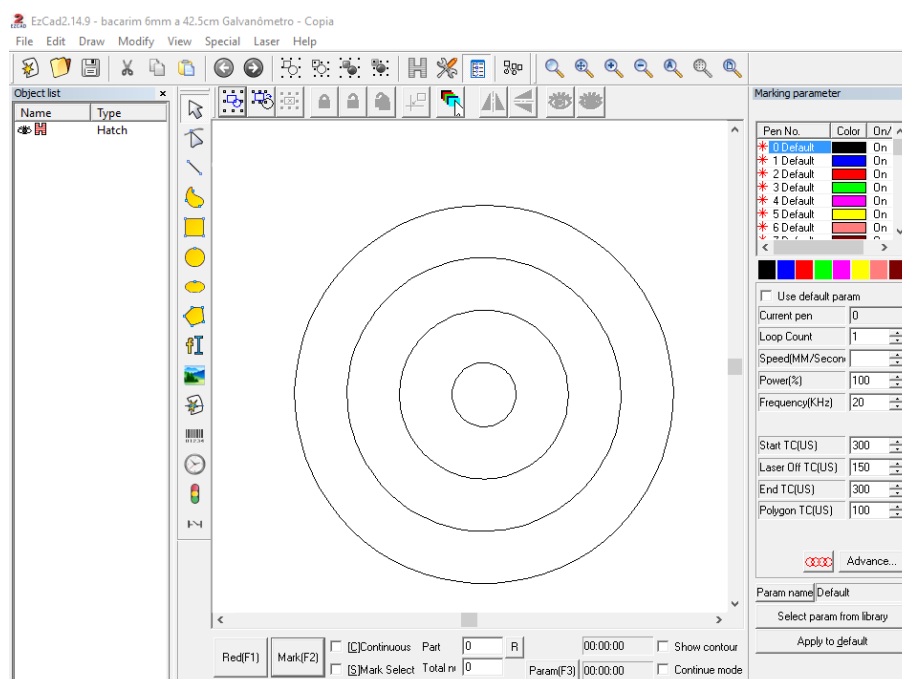
Tabela 1 – Descrição dos tratamentos e parâmetros utilizados para obtenção das doses de energia aplicadas

Tratamento	Tempo (s)	Tempo Galv. (s)	Energia total (J)	Dose (J.mm ⁻²)
T1	0	0	0	0,00
T2	0,0625	0,0988	9,375	0,33
T3	0,125	0,1975	18,75	0,66
T4	0,25	0,395	37,5	1,33
T5	0,5	0,79	75	2,65
T6	1	1,58	150	5,31
T7	2	3,16	300	10,61
T8	4	6,32	600	21,22
T9	8	12,64	1200	42,44

As aplicações foram realizadas a 42,5 cm de distância das plantas, considerando, como referência, a base do tubete e a última lente pela qual o feixe passou em cada sistema. Essa distância foi adotada pois é o ponto onde o feixe direcionado pelo cabeçote atinge seu foco máximo. A mesma distância foi adotada no sistema de aplicação direta, com o intuito de igualar o máximo possível as condições de aplicação para posterior comparação.

Para a aplicação pelo cabeçote foi elaborado, através do software EzCad 2.14.9, um modelo de aplicação com a finalidade de reproduzir a mesma área (28,2735 mm²) e forma do círculo formado pelo tubo de feixes em aplicação direta. O modelo foi desenhado com 4 círculos concêntricos, com diâmetros de 5,25, 3,75, 2,25 e 0,75 mm, considerando que o feixe focado pelo cabeçote forma linhas de 1,5 mm de espessura. A representação gráfica do modelo e do software utilizado pode ser vista na Figura 7.

Figura 7 - Modelo de aplicação do laser pelo cabeçote, desenvolvido no software Ezcad 2.14.9



3.1.3 Método experimental, avaliações e análise estatística

Aos 7 dias após a aplicação (DAA) foi medida a massa de matéria fresca da parte aérea das plantas. Os dados de massa de matéria fresca foram transformados em porcentagem de controle em relação a testemunha, tendo o valor médio da massa da testemunha considerado como 0% de controle e os demais valores calculados em relação à média.

Os dados da primeira e segunda repetição dos experimentos foram submetidos à aplicação do teste F pela análise da variância, não sendo encontrada diferença significativa entre as repetições dos experimentos, os dados foram agrupados para os demais testes. Quando verificada diferença significativa entre os tratamentos pelo teste F, os dados foram submetidos ao modelo de regressão não-linear, adaptado a partir do proposto por Mitscherlich (1909).

O modelo de regressão original é representado pela equação (eq. 2):

$$y = a(1 - 10^{-c(x+b)}) \quad (2)$$

Onde y é a porcentagem de controle, x é a dose de energia aplicada ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$), a , b e c são constantes. O parâmetro c representa a concavidade da curva, a representa a assíntota máxima de y e b assíntota mínima. Como os dados utilizados para o ajuste da regressão foram transformados para escala de porcentagem de controle, os parâmetros a e b foram fixados em 100 e 0. Com isso, foi utilizada a versão simplificada do modelo (eq. 3):

$$y=100(1 - 10^{-cx}) \quad (3)$$

Resolvendo a equação para x se obtém (eq. 4):

$$x = - \frac{\log_{10} \left(- \frac{1}{\frac{y}{100} - 1} \right)}{c} \quad (4)$$

Usando essa versão da equação e a estimativa do parâmetro c , fornecida pela regressão, foram calculados os valores de estimativas de controle.

O ED50 é um parâmetro universalmente usado em estudos de dose-resposta, originado nos estudos em farmacologia, onde tem a definição de: Dose estatisticamente derivada de um agente químico ou físico, que se espera produzir um certo efeito em 50% dos organismos de teste em uma determinada população, ou produzir um efeito meio-máximo em um sistema biológico sob um conjunto definido de condições (PAC, 1993). Na interpretação e contexto para esse estudo, foram calculados os valores de estimativa para 50, 80, 90 e 95% de controle (EC50, EC80, EC90 e EC95). O EC80 foi incluído pois representa o nível de controle exigido por lei para registro de defensivos agrícolas no Brasil, e o EC90 e EC95 por serem níveis esperados de controle de plantas daninhas em campo. Estimar esses níveis elevados de controle é importante para o planejamento do manejo integrado de plantas daninhas a longo prazo, principalmente do ponto de vista da ecologia da população e suas consequências para o banco de sementes.

As análises foram realizadas com o programa estatístico SAS (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM), SAS Institute, version 9.1.3, Carry, North Carolina, USA).

3.2 DOSE-RESPOSTA EM DIFERENTES ESPÉCIES DE PLANTAS DANINHAS

Nessa segunda etapa sete espécies de plantas daninhas foram submetidas a experimentos de dose-resposta, utilizando como base o método de aplicação direta descrito na primeira etapa. As espécies avaliadas foram: *Amaranthus viridis* L.(caruru-de-mancha), *Bidens pilosa* L.(picão-preto), *Cenchrus echinatus* L.(capim-carrapicho), *Digitaria horizontalis* Willd.(capim-colchão), *Eleusine indica* (L.) Gaertn.(capim-pé-de-galinha), *Panicum maximum* Jacq. (capim-colonião) e *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D.Webster (Braquiária decumbens).

3.2.1 Delineamento e método de aplicação

Os experimentos foram instalados no delineamento experimental inteiramente casualizado, com 10 tratamentos e 4 repetições, sendo os tratamentos compostos por 8 doses, mais dois conjuntos de testemunhas, totalizando 40 parcelas experimentais por experimento (um para cada espécie). Um conjunto de testemunhas (4 parcelas experimentais) por experimento foi utilizado para análises destrutivas, com a intenção de representar o estado das plantas no momento da aplicação. Para todas as espécies foram avaliadas aplicações em três estádios diferentes, sendo esses: primeiro par ou primeira folha completamente expandida (E1), segundo par ou segunda folha completamente expandida (E2) e terceiro par ou terceira folha completamente expandida (E3). Foram consideradas folhas cotiledonares na contagem. Quando finalizados os experimentos foram repetidos seguindo o mesmo delineamento.

Foi adotado o método de aplicação direta do laser, como descrito na primeira etapa, com a única diferença na forma de avaliação das plantas ao final do experimento.

3.2.2 Avaliações e análise estatística

Para os tratamentos submetidos a aplicação de laser, foi medida a massa de matéria seca 14 dias após a aplicação (DAA). A secagem das plantas foi feita em estufa de circulação forçada de ar, a 65 graus celsius, por 72 horas. Os dados de massa de matéria seca foram transformados em porcentagem de controle em relação

a testemunha, tendo o valor médio da massa da testemunha considerado como 0% de controle e os demais valores calculados em relação à média.

Os dados da primeira e segunda repetição dos experimentos foram submetidos à aplicação do teste F pela análise da variância, não sendo encontrada diferença significativa entre as repetições dos experimentos, os dados foram agrupados para os demais testes. Quando verificada diferença significativa entre os tratamentos pelo teste F, os dados foram submetidos ao modelo de regressão não-linear, adaptado a partir do proposto por Mitscherlich, seguindo o mesmo protocolo já descrito na primeira etapa.

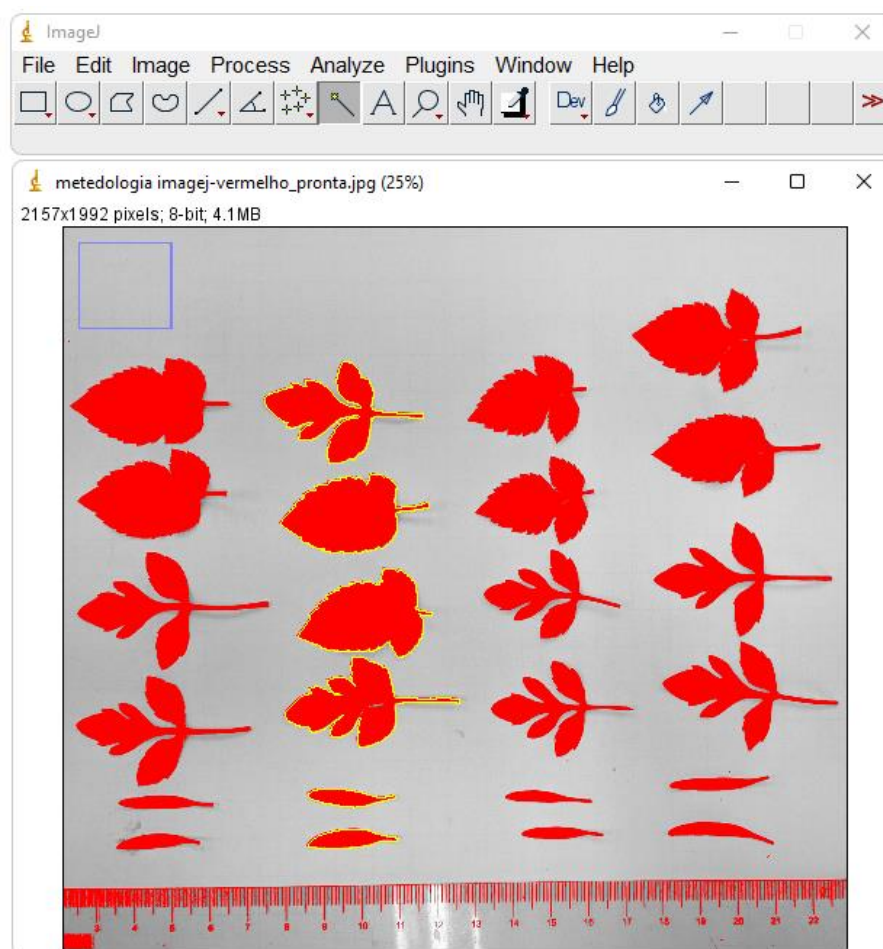
No dia da aplicação as 4 plantas de cada tratamento “testemunhas para análises destrutivas” foram separadas das demais para avaliações de massa de matéria fresca, massa de matéria seca da parte aérea da planta e da área foliar. Esse tratamento, portanto, não foi considerado para a análise de variância e regressões. Com base nos dados de massa de matéria fresca e massa de matéria foi avaliado o conteúdo de água das plantas, calculando o teor de umidade conforme a equação (eq. 5)

$$y = 100 - \frac{s * 100}{f} \quad (5)$$

Onde y é o teor de umidade (%), f é a massa fresca (g) e s é a massa seca (g).

A área foliar foi aferida pelo uso do software ImageJ versão 1.53K (Wayne Rasband National Institute of Health, USA). Para análise da área foliar através do software ImageJ as folhas foram fotografadas em escala RGB ao lado de uma régua, para calibração de escala. Essas imagens foram convertidas para forma monocromática (8 bits) e passaram pelo processo de “thresholding”, onde os píxeis são estratificados em classes e as folhas são separadas da imagem de fundo (Figura 8). Em seguida as folhas de cada planta foram selecionadas e medidas por meio da função de medida de área foliar. A calibração de escala foi repetida em cada foto utilizada no processo, para garantir a maior precisão possível. Em todo o método foi adotado o padrão de medidas em milímetros, portanto os dados de área foliar foram gerados em milímetros quadrados.

Figura 8 – Avaliação de área foliar em *Bidens Pilosa* pelo software ImageJ, etapa de “thresholding” e seleção de folhas por planta



Usando os dados de área foliar, massa de matéria seca, massa de matéria fresca foram calculadas a área foliar específica para massa de matéria seca (AFEMS) e área foliar específica para massa de matéria fresca (AFEMF), obtidas pela divisão do valor de área foliar pela respectiva medida de massa. Os dados de área foliar, massa de matéria seca, massa de matéria fresca, área foliar, AFEMF, AFEMS, teor de umidade e EC80, de todas as espécies e estádios, foram agrupados para realização da análise de correlação, pela qual se obteve os coeficientes de correlação de Pearson. Os coeficientes foram submetidos ao teste de hipóteses de Student e a partir dos resultados foi calculado o *P*-value para cada coeficiente de correlação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COMPARAÇÃO ENTRE APLICAÇÃO DE LASER DIRETA E ATRAVÉS DE CABEÇOTE

Na ANOVA realizada para os dados de *Bidens pilosa* verificou-se que não houve diferença significativa entre as repetições de experimentos (Tabela 2), portanto os dados foram agrupados para demais análises. Como foi constatada diferença significativa entre os tratamentos, tanto para aplicação direta quanto para aplicação através de cabeçote, foram realizadas as análises de regressão.

Tabela 2 – Resultado da análise de variância, médias de controle (%) em função da aplicação de laser direta e através do cabeçote (J.mm^{-2}) e parâmetros da regressão para controle das plantas de *Bidens pilosa* no estádio E2, aos 7 dias após a aplicação. Botucatu - SP, 2022

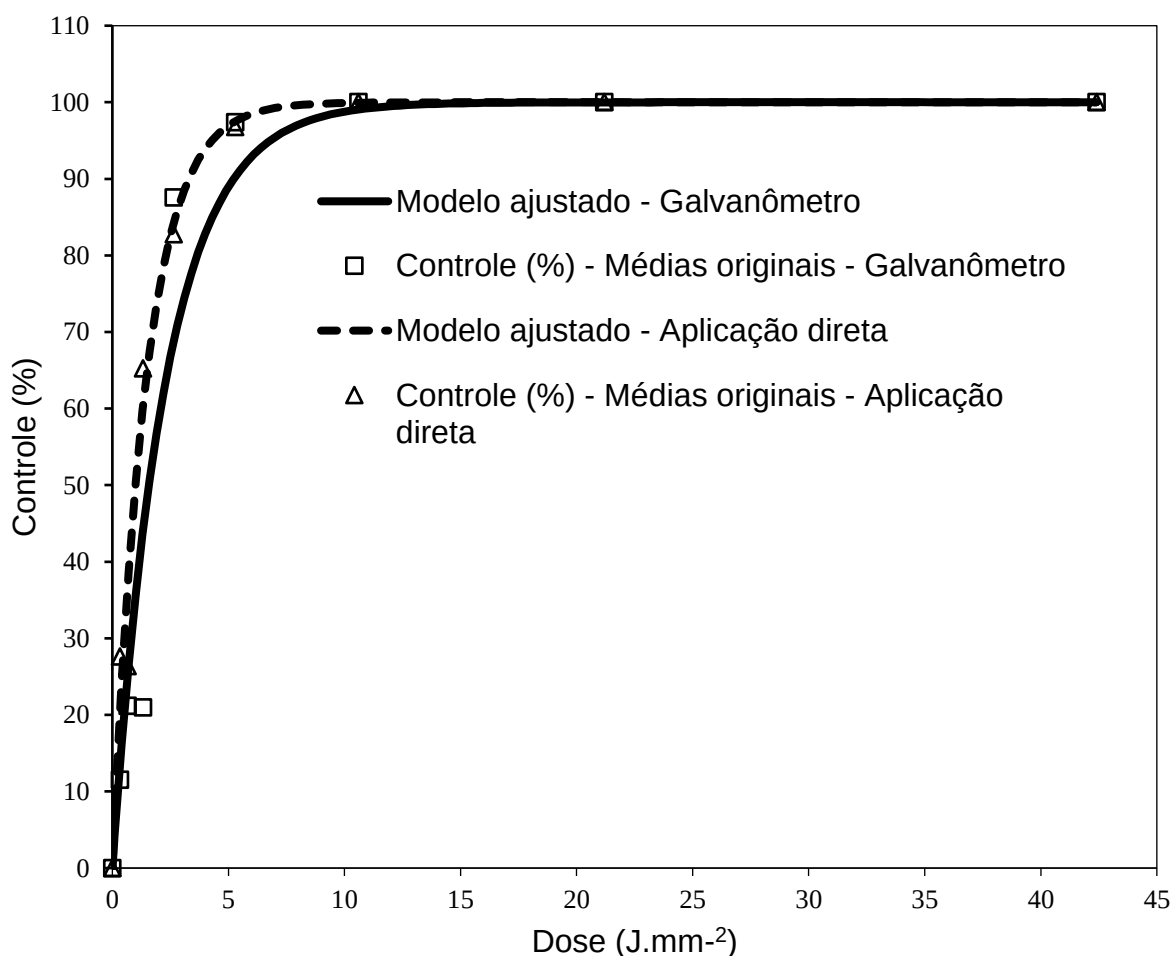
Doses (J.mm^{-2})	Médias de controle (%)	
	Cabeçote	Direta
0,0000	0,00	0,00
0,3316	11,54	27,63
0,6631	21,18	26,34
1,3263	20,97	65,24
2,6525	87,55	82,76
5,3050	97,39	96,77
10,6100	100,00	100,00
21,2200	100,00	100,00
42,4400	100,00	100,00
F Tratamentos	89,2806 **	28,7193 **
F Experimentos	3,1478 ns	2,0614 ns
CV (%)	22,32	30,85
Parâmetro C	0,1913	0,3036
F Regressão	349,41 **	114,49 **
R ²	0,9784	0,9966
Estimativas	Dose (J.mm^{-2})	
EC50	1,5736	0,9915
EC80	3,6538	2,3023
EC90	5,2274	3,2938
EC95	6,8010	4,2853

CV: coeficiente de variação; EC: dose estimada para controle; ** significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F; * significativo a $p \leq 0,05$ pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F

Comparando as médias de controle entre os dois métodos constatou-se que os dois métodos controlaram totalmente as plantas a partir da dose 10,61 J.mm⁻². Também foram atingidos níveis de controle bastante similares nas doses de 2,6525 J.mm⁻² e 5,305 J.mm⁻², havendo menos de 6% de diferença entre os métodos nessas doses. Porém, na dose 1,3263 J.mm⁻² e inferiores as diferenças foram expressivas em favor do sistema de aplicação direta de laser.

A regressão para os dados de controle (Figura 9) de ambos os sistemas refletiu a diferença observada nas médias, gerando a estimativa EC80 de 2,3023 J.mm⁻² para o sistema de aplicação direta e uma dose 58,7% maior (3,6538 J.mm⁻²) para o sistema de aplicação por cabeçote.

Figura 9 – Representação gráfica do modelo de Mitscherlich ajustado para controle (%), aos 7 dias após a aplicação de laser direta e por cabeçote (J.mm⁻²), em plantas de *Bidens pilosa* no estágio E2



Não existem publicações com o uso de laser para o controle de *Bidens pilosa*, porém comparações entre métodos de aplicação similares já foram realizadas. Em estudos com aplicação de laser (445 nm) em *Galinsoga parviflora* foi possível atingir 88% de controle (Osadčuks *et al.*, 2020) com a dose de $0,725 \text{ J.mm}^{-2}$, utilizando um modelo de aplicação em espiral de diâmetro 10mm, em plantas com um par de folhas completamente expandidas. Também foi avaliado o método de aplicação em zig-zag (10 mm^{-2}), que se mostrou menos eficaz, atingindo também 88% de controle, porém com a dose de $0,898 \text{ J.mm}^{-2}$.

Em estudos com aplicação de laser, a definição do diâmetro do feixe no ponto de aplicação, pode impactar a energia total necessária para controle (Kaierle *et al.*, 2013; Mathiassen, Solvejg K. *et al.*, 2006; Wöltjen *et al.*, 2008), com feixes maiores facilitando o atingimento do alvo, enquanto diâmetros de feixe menores reduzem o potencial desperdício de energia. Outros autores (Coleman *et al.*, 2021) que discutiram o tema resolveram adotar o uso de um feixe de 5 mm de diâmetro, propondo essa como a melhor solução para acomodar tanto o estágio de mudas muito pequenas quanto de plantas maiores.

Os resultados de controle das plantas de *Bidens pilosa* foram a base para a tomada de decisão sobre qual método adotar para a realização das curvas de dose-resposta da etapa seguinte, no entanto, é importante destacar que diversos outros fatores foram considerados. O cabeçote de foco fixo é um sistema desenvolvido para trabalhar em superfícies planas, sua adaptação para o controle de plantas carrega uma série de complicações. As principais observadas ao longo do ajuste da metodologia foram:

- a) A complexidade do sistema de aplicação através do cabeçote é alta, pois apenas no conjunto ótico existem três lentes e dois espelhos, além do necessário para aplicação direta. Todas as lentes dependem de alinhamento com precisão de décimos de milímetro. Essa complexidade também torna difícil para outros pesquisadores reproduzirem o sistema;
- b) O cabeçote possui limitações técnicas que dificultam a uniformidade de aplicação, como a “deriva” produzida pela inércia dos espelhos que direcionam o feixe. Essa deriva ocorre quando os espelhos precisam trabalhar muito rápido, condição comum para atingimento de doses baixas de energia;

- c) A perda de 52% de potência torna o sistema menos eficaz, reduz a vida útil dos componentes e tem como colateral a geração de calor ao longo do conjunto ótico;
- d) O sistema foca o feixe laser a uma distância muito específica, pequenas variações nessa distância produzem grandes efeitos no resultado obtido. Naturalmente as plantas apresentam variação de tamanho, o que dificulta atingir a uniformidade na aplicação.

Todos esses fatores introduzem variabilidade ao método, que é um produto a ser evitado para fins experimentais. Diante disso, decidiu-se adotar o sistema de aplicação direta como padrão para a realização das curvas de dose-resposta, em diferentes espécies de plantas daninhas.

4.2 DOSE-RESPOSTA EM DIFERENTES ESPÉCIES DE PLANTAS DANINHAS

4.2.1 Análise de coeficientes de correlação de Pearson

Pela análise de coeficientes de correlação de Pearson verificou-se correlações significativas entre massa de matéria seca e massa de matéria fresca (Tabela 3), massa de matéria seca e área foliar, massa de matéria seca e EC80, massa de matéria fresca e área foliar, massa de matéria fresca e EC80, área foliar e EC80, área foliar específica para massa de matéria seca e área foliar específica para massa de matéria fresca, e entre teor de umidade e área foliar específica para massa de matéria fresca .

Os fortes coeficientes de correlação positivos entre EC80 e medidas diretas de crescimento das plantas (área foliar, massa de matéria seca e massa de matéria fresca) mostram a íntima relação entre o estágio de desenvolvimento das plantas e eficácia de controle obtido pela aplicação direta de laser, quanto mais desenvolvida a planta, maior a dose necessária para atingir o controle. Esses resultados corroboram com estudos anteriores, sob diversas condições de aplicação, estádios de plantas avaliadas e tipos diferentes de laser (Bayramian, Fay e Dyer, 1992; Coleman *et al.*, 2021; Couch e Gangstad, 1974; Heisel *et al.*, 2001, 2002; Kaierle *et al.*, 2013; Marx, Barcikowski, *et al.*, 2012; Mathiassen, Solvejg K. *et al.*, 2006; Rakhmatulin e Andreassen, 2020; Wöltjen *et al.*, 2008), que também verificaram a necessidade de

doses maiores de energia para o controle de plantas em estádios de desenvolvimento mais avançados.

Tabela 3 – Coeficientes de correlação de Pearson para dados agrupados de *Amaranthus viridis*, *Bidens pilosa*, *Cenchrus echinatus*, *Digitaria horizontalis*, *Eleusine indica*, *Panicum maximum* e *Urochloa decumbens*. Botucatu - SP, 2022

	MF	MS	AF	AFEMF	AFEMS	T.UMID	EC80
MF	1						
MS	0,9841 **	1					
AF	0,9618 **	0,9492 **	1				
AFEMF	-0,2071	-0,1981	-0,0459	1			
AFEMS	-0,1430	-0,2129	0,0193	0,6577 **	1		
T.UMID	0,0934	-0,0095	0,0788	-0,4900 *	0,3211	1	
EC80	0,9594 **	0,9382 **	0,9512 **	-0,1026	-0,0417	0,0727	1

MF: Massa de matéria fresca; MS: Massa de matéria seca; AF: Área foliar; AFEMF: Área foliar específica para MF; AFEMS: Área foliar específica para MS; T.UMID: Teor de umidade; ** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$

Pela ausência de correlação entre o teor de umidade e EC80 é possível definir que a hipótese, de que o conteúdo de água teria influência direta na eficácia de controle, não se comprovou para essas espécies. Também é possível inferir, por não haver correlação significativa entre a área foliar específica e EC80, que a correlação entre área foliar e EC80 é mais relacionada ao estágio de desenvolvimento das plantas do que a influência do tamanho das folhas na aplicação.

4.2.2 Dose-resposta em *Amaranthus viridis*, *Bidens pilosa*, *Cenchrus echinatus*, *Digitaria horizontalis*, *Eleusine indica*, *Panicum maximum* e *Urochloa decumbens*

A análise de variância determinou que não houve diferença significativa entre as repetições dos experimentos com todas as espécies estudadas (*Amaranthus viridis*, *Bidens pilosa*, *Cenchrus echinatus*, *Digitaria horizontalis*, *Eleusine indica*, *Panicum maximum* e *Urochloa decumbens*). Portanto, os dados foram agrupados para as demais análises. Como em todas as espécies foi constatada diferença significativa entre os tratamentos, para os três estádios, foram aplicadas as análises de regressão.

4.2.2.1 *Amaranthus viridis*

Tanto no estágio E1 quanto o E2 de *Amaranthus viridis* (Tabela 4) a dose, de 0,3316 J.mm⁻², já foi 100% eficaz no controle do caruru, o que se repetiu para todas as doses maiores seguintes. Em situações como essa, onde o controle total foi atingido já na menor dose (0,3316 J.mm⁻²), enfatiza-se a recomendação de novos estudos que explorem os “pontos cegos” encontrados aqui. É preciso entender melhor como a relação dose-resposta acontece em doses menores, no intervalo entre a testemunha e a dose de 0,3316 J.mm⁻².

Tabela 4 – Resultado da análise de variância, médias, estimativas e parâmetros do modelo ajustado para controle (%) aos 14 dias após a aplicação direta de laser (J.mm⁻²), em plantas de *Amaranthus viridis* nos estádios E1, E2 e E3. Botucatu – SP, 2022

Doses (J.mm ⁻²)	Médias de controle (%)		
	E1	E2	E3
0,0000	0,00	0,00	0,00
0,3316	100,00	100,00	15,74
0,6631	100,00	100,00	24,67
1,3263	100,00	100,00	46,22
2,6525	100,00	100,00	100,00
5,3050	100,00	100,00	100,00
10,6100	100,00	100,00	100,00
21,2200	100,00	100,00	100,00
42,4400	100,00	100,00	100,00
F Tratamentos	320,13 **	336,30 **	29,02 **
F Experimentos	0,00 ns	0,00 ns	2,41 ns
CV (%)	5,93	5,78	34,59
Parâmetro C	6,5871	6,5871	0,2701
F Regressão	1280,46 **	1345,14 **	114,83 **
R ²	1,0000	1,0000	0,9892
Estimativas	Doses (J.mm ⁻²)		
EC50	0,0457	0,0457	1,1145
EC80	0,1061	0,1061	2,5878
EC90	0,1518	0,1518	3,7023
EC95	0,1975	0,1975	4,8168

CV: coeficiente de variação; EC: dose estimada para controle; ** significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F; * significativo a $p \leq 0,05$ pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F

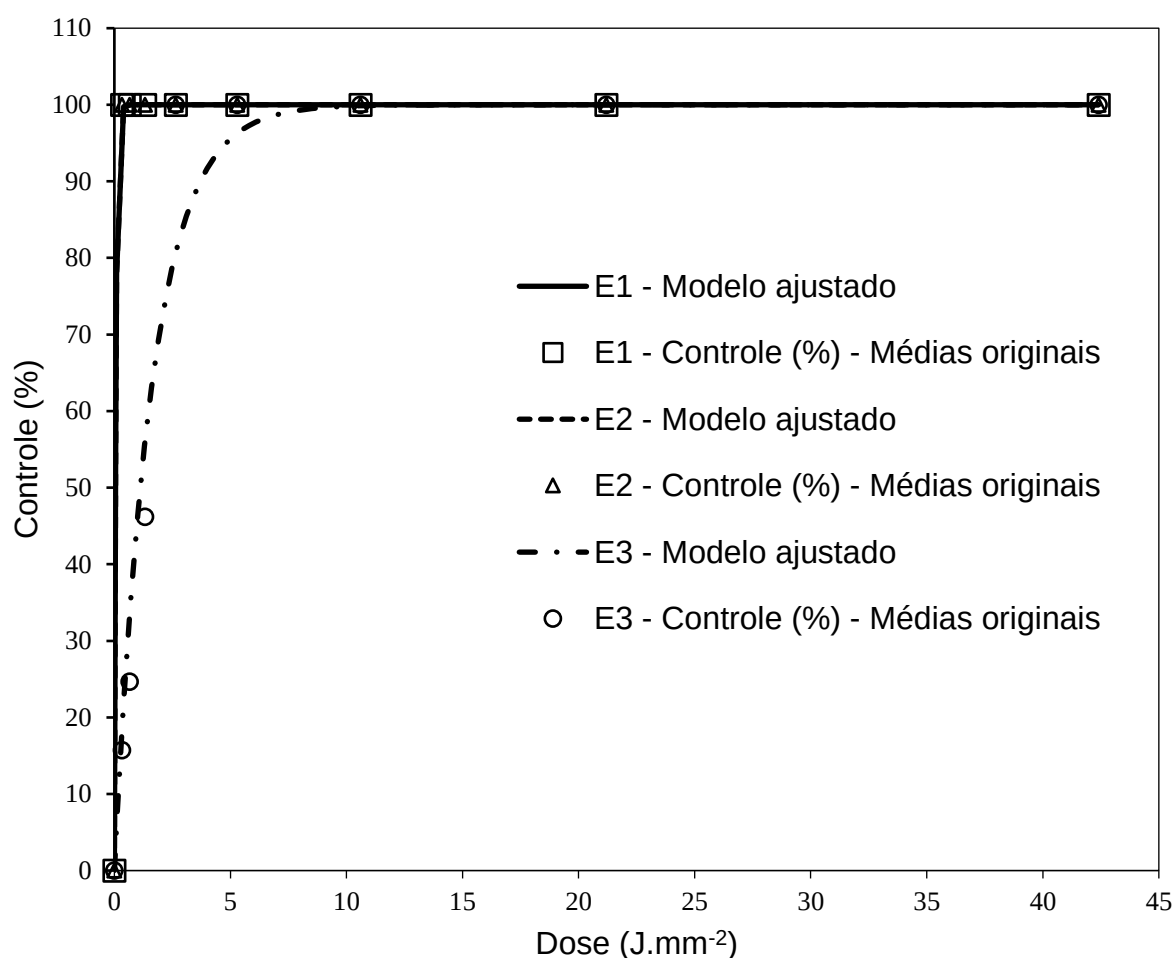
Na literatura foi encontrado um estudo de controle de *Amaranthus retroflexus* L. realizado com métodos similares aos aqui aplicados (Marx, Barcikowski, *et al.*, 2012), mas com resultados diferentes. Um dos experimentos consistiu na aplicação de laser (10,6 μ m), nas doses 0,08, 0,31, 0,63, 1,25, 2,50, e 5,00 J.mm⁻², com feixe de diâmetro 6 mm no ponto de aplicação, em três estádios de desenvolvimento BBCH10, BBCH12 e BBCH14, equivalentes aos E1, E2 e E3 aqui empregados. Em plantas no estádio BBCH10 os autores verificaram que: a dose 0,08 J.mm⁻² causou mais de 60% de controle, e as doses 2,50, e 5,00 J.mm⁻² proporcionaram um controle superior a 95%, mas nunca foi atingido o controle total. No estádio BBCH12 a dose de 0,08 J.mm⁻² controlou menos de 50% das plantas, ultrapassou 75% apenas a partir da dose 2,50 J.mm⁻², chegando a 100% na dose de 5,00 J.mm⁻². Em BBCH14 nem a maior dose (5,00 J.mm⁻²) foi capaz de controlar mais de 75% das plantas. A diferença de resultados pode ser devida apenas ao fato de serem espécies de *Amaranthus* diferentes, apesar de formarem plântulas muito parecidas. No entanto, é relevante destacar que, apesar da aplicação final ter parâmetros muito parecidos, a forma como essa é constituída apresenta diferenças importantes. No estudo realizado com *Amaranthus retroflexus* o feixe foi redirecionado por dois espelhos fixos, focado por uma lente (f=190,5mm), atingindo o diâmetro de 6mm na zona de divergência após a distância focal. Cada elemento pelo qual o feixe passa no sistema produz algum tipo de aberração ou distorção ótica, que pode ter efeitos importantes no resultado final.

No estádio E3 as doses 0,3316 J.mm⁻², 0,6631 J.mm⁻² e 1,3263 J.mm⁻² se mostraram ineficazes, proporcionando apenas 15,74%, 24,67% e 45,22% de controle. A partir da dose 2,6525 J.mm⁻² a aplicação de laser foi suficiente para controlar as plantas de *Amaranthus viridis*, causando a morte de todas as plantas que receberam os tratamentos.

Em plantas de *Amaranthus viridis* maiores (E3) verificou-se que as doses estimadas necessárias para atingir níveis eficazes de controle foram 2,5878 J.mm⁻², 3,7023 J.mm⁻² e 4,8168 J.mm⁻², para EC80, EC90 e EC95. Em plantas que produzem grandes quantidades de sementes e tem esse como o principal método de dispersão, como as espécies de *Amaranthus* (Sellers *et al.*, 2003), o uso dos parâmetros de estimativa de controle mais altos que o EC80 é especialmente importante. Em uma situação de campo esse nível de controle poderá ser insuficiente para controlar a planta daninha ao longo dos anos, pois em cada novo ciclo de reprodução milhares de sementes podem ser produzidas pelas plantas não controladas.

Como só houve morte total das plantas a partir da dose 2,6525 J.mm⁻², o modelo de Mitscherlich ajustado (Figura 10) ao estágio E3 assumiu uma curva menos acentuada do que a dos modelos para os estádios E1 e E2.

Figura 10 – Representação gráfica do modelo de Mitscherlich ajustado para controle (%), aos 14 dias após a aplicação direta de laser (J.mm⁻²), em plantas de *Amaranthus viridis* nos estádios E1, E2 e E3



Os dados da estimativa ED80 mostram que o controle eficaz de *Amaranthus viridis* pode ser atingido em plantas pequenas (E1 e E2), com a dose de 0,1061 J.mm⁻². Esse dado é importante principalmente para o raciocínio e planejamento do uso de laser como forma de controle em situações não experimentais de campo. A dose de 0,1061 J.mm⁻² representa um tempo de exposição ao laser de apenas 0,7 milissegundos, usando um tubo de 150W. Atingir o controle com períodos de exposição curtíssimos torna promissora a perspectiva de uso dessa tecnologia na

prática, considerando a eficiência operacional é um dos principais fatores para o desenvolvimento de novas máquinas agrícolas.

Protótipos de máquinas para o controle de plantas daninhas tem sido desenvolvidos em alguns países. Em um desses estudos foi construída uma máquina, baseada em um tubo de laser (810nm) de 90w, gerando um feixe de 1,8 mm de diâmetro, que foi capaz de atingir altas taxas de eficácia de controle (Wang *et al.*, 2022). Em condições de campo, a taxa de acerto de plantas foi de 99,2%, e o tempo para controle de aproximadamente 0,73 segundos por planta, sendo 0,09 s para identificação e posicionamento do sistema e 0,64 segundos para aplicação do laser, em uma velocidade de rastreamento de 0,1 m.s⁻¹. Outro robô, desenvolvido por uma equipe da Universidade Harper Adams, obteve 99,2% de taxa de acerto de plantas, direcionando o feixe a velocidade de 30 mm.s⁻¹ e com o tempo de permanência por planta de 0,64 segundos (Xiong *et al.*, 2017).

4.2.2.2 *Bidens pilosa*

No estágio E1 de *Bidens pilosa* a dose de 0,3316 J.mm⁻² proporcionou 95,06% de controle (Tabela 5) e a dose seguinte, de 0,6631 J.mm⁻², causou a morte total das plantas. Tanto no estágio E2 quanto E3, a resposta é mais progressiva, sendo que a dose necessária para controlar 100% das plantas nos estádios E2 e E3 foram oito (5,305 J.mm⁻²) e sessenta e quatro (42,44 J.mm⁻²) vezes maiores do que a para o estágio E1. No entanto as estimativas de EC80 mostram que doses menores podem ser capazes de atingir o controle eficaz das plantas, sendo 0,1757 J.mm⁻² para o estágio E1, 1,5860 J.mm⁻² para o estágio E2 e 8,5974 J.mm⁻² para o estágio E3.

Tabela 5 – Resultado da análise de variância, médias, estimativas e parâmetros do modelo ajustado para controle (%) aos 14 dias após a aplicação direta de laser (J.mm⁻²), em plantas de *Bidens pilosa* nos estádios E1, E2 e E3. Botucatu – SP, 2022

Doses (J.mm ⁻²)	Médias de controle (%)		
	E1	E2	E3
0,0000	0,00	0,00	0,00
0,3316	95,06	14,01	17,74
0,6631	100,00	57,30	7,84
1,3263	100,00	73,37	32,59
2,6525	100,00	97,44	22,84
5,3050	100,00	100,00	64,54
10,6100	100,00	100,00	91,54
21,2200	100,00	100,00	99,24
42,4400	100,00	100,00	100,00
F Tratamentos	661,71 **	45,47 **	51,72 **
F Experimentos	0,12 ns	0,01 ns	3,97 ns
CV (%)	4,13	23,28	32,95
Parâmetro C	3,9773	0,4407	0,0813
F Regressão	2646,80 **	181,03 **	203,45 **
R ²	1,0000	0,9953	0,9835
Estimativas	Doses (J.mm ⁻²)		
EC50	0,0757	0,6831	3,7027
EC80	0,1757	1,5860	8,5974
EC90	0,2514	2,2691	12,3001
EC95	0,3271	2,9522	16,0028

CV: coeficiente de variação; EC: dose estimada para controle; ** significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F; * significativo a $p \leq 0,05$ pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F

Bidens pilosa foi uma das espécies que demonstrou como o resultado das aplicações foi bastante dependente do quanto o laser foi capaz de causar de danos aos tecidos no momento da aplicação. Plantas que sofreram o corte total do caule não se recuperaram, como exemplo as plantas que receberam a dose de 42,44 J.mm⁻². Porém algumas plantas onde o laser foi capaz de danificar as estruturas o suficiente para “tombar” a planta, mas não cortar o caule, sobreviveram até os 14 DAA. Isso ocorreu principalmente o estádio E2 (Figura 11) e E3.

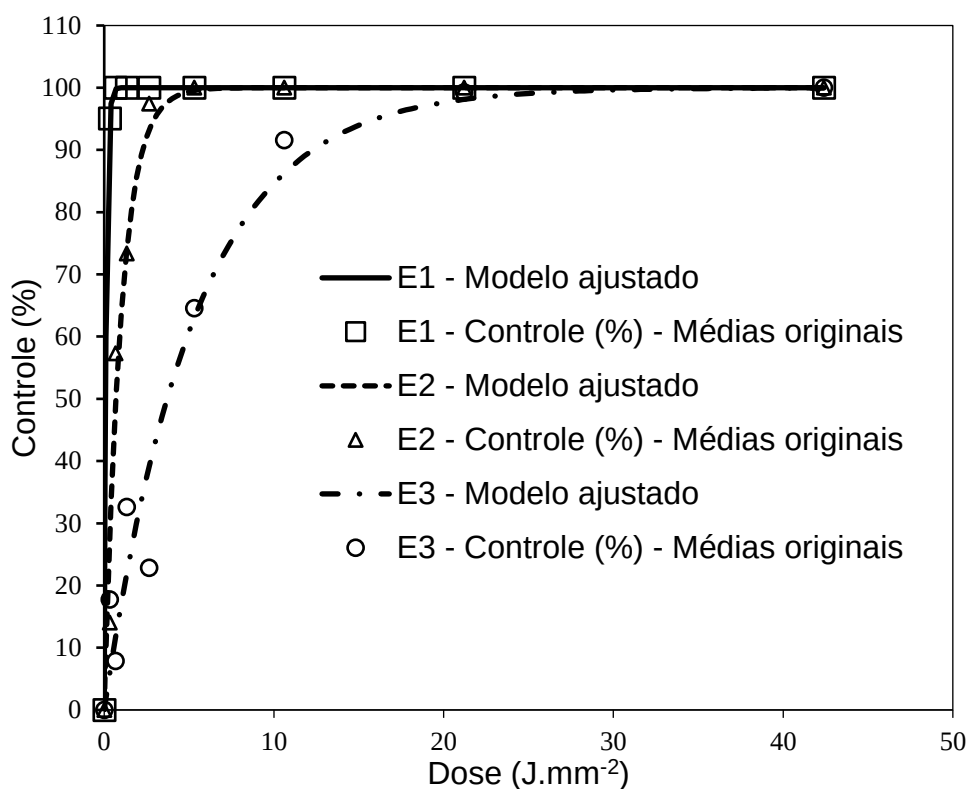
Figura 11 – *Bidens pilosa*, aos 14 dias após a aplicação direta de laser ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$) em plantas no estágio E2



Um estudo realizado com *Solanum nigrum* L. e beterraba (*Beta vulgaris* var. *saccharifera*) avaliou a relação das respostas causadas por doses de laser ($10,6 \mu\text{m}$), aplicadas em linhas horizontais, perpendiculares às plantas, buscando o controle por meio do corte do caule (Heisel *et al.*, 2002). Foi constatado que as estimativas de ED90 aumentaram com o estágio de desenvolvimento das plantas e espessura do caule, ou que mais energia foi necessária para matar plantas mais velhas com caules mais grossos. Os autores sugerem que resultado provavelmente esteja relacionado à necessidade de um caminho de corte mais longo, mas podendo também ser devido ao envelhecimento e lignificação das células vegetais, que as torna mais resistentes. O estudo concluiu que a espessura do caule é uma variável importante, que pode ser integrada em um modelo baseado no modelo dose-resposta. Caso a intenção seja exclusivamente o corte do caule, a autores que exploraram o tema recomendam o uso de um feixe com menor ponto focal de aplicação, pois essa característica favorece a penetração e corte (Sirikunkitti *et al.*, 2019).

As análises de regressão para a espécie *Bidens pilosa* estão expostas na Figura 12.

Figura 12 – Representação gráfica do modelo de Mitscherlich ajustado para controle (%), aos 14 dias após a aplicação direta de laser ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$), em plantas de *Bidens pilosa* nos estádios E1, E2 e E3



4.2.2.3 *Cenchrus echinatus*

Pela análise dos dados obtidos com *Cenchrus echinatus* obteve-se um resultado interessante na comparação entre os estádios E1 e E2, verificou-se que foi necessária a mesma dose ($2,6525 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$) de energia para realizar 100% de controle das plantas, no entanto, as médias de controle foram maiores para o estágio E1 nas doses anteriores ($0,3316 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$, $0,6631 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ e $1,3263 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$). Esses resultados foram suficientes para que houvesse um incremento de 178% na dose para atingir a EC80 (Tabela 6).

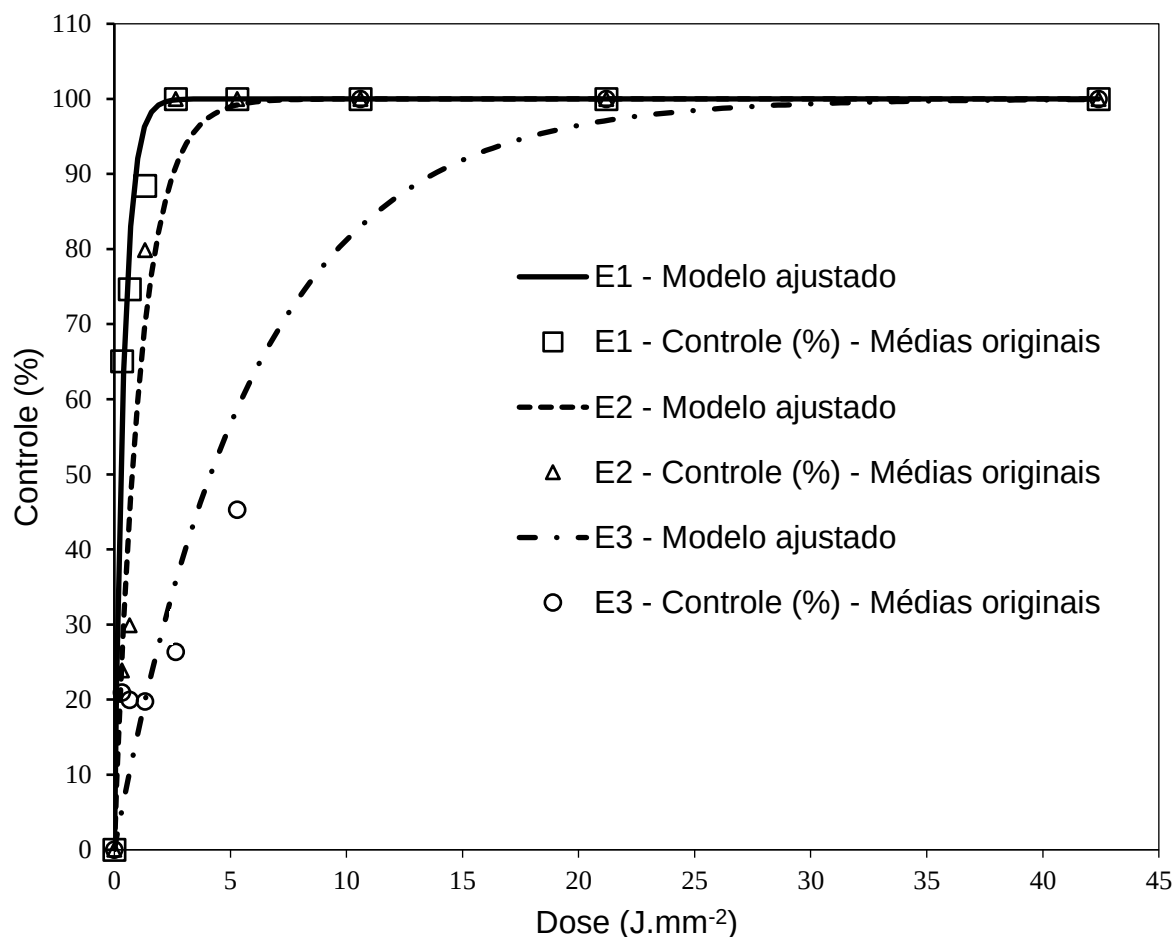
Tabela 6 – Resultado da análise de variância, médias, estimativas e parâmetros do modelo ajustado para controle (%) aos 14 dias após a aplicação direta de laser (J.mm^{-2}), em plantas de *Cenchrus echinatus* nos estádios E1, E2 e E3. Botucatu – SP, 2022

Doses (J.mm^{-2})	Médias de controle (%)		
	E1	E2	E3
0,0000	0,00	0,00	0,00
0,3316	65,06	23,85	20,93
0,6631	74,68	29,88	19,96
1,3263	88,43	79,88	19,74
2,6525	100,00	100,00	26,36
5,3050	100,00	100,00	45,29
10,6100	100,00	100,00	100,00
21,2200	100,00	100,00	100,00
42,4400	100,00	100,00	100,00
F Tratamentos	76,32 **	58,44 **	36,64 **
F Experimentos	0,72 ns	0,03 ns	2,18 ns
CV (%)	13,21	21,38	39,53
Parâmetro C	1,0997	0,3952	0,0726
F Regressão	304,47 **	232,12 **	142,72 **
R ²	0,9974	0,9930	0,9738
Estimativas	Doses (J.mm^{-2})		
EC50	0,2737	0,7617	4,1464
EC80	0,6356	1,7686	9,6277
EC90	0,9093	2,5304	13,7741
EC95	1,1831	3,2921	17,9205

CV: coeficiente de variação; EC: dose estimada para controle; ** significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F; * significativo a $p \leq 0,05$ pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F

Na aplicação de laser no estágio E3 de *Cenchrus echinatus* chama a atenção o quanto as plantas foram resistentes ao método até a dose de $5,305 \text{ J.mm}^{-2}$, que proporcionou 45,29% de controle. Esse resultado fez com que o modelo ajustado (Figura 13) curva de resposta bastante diferente dos estádios inferiores.

Figura 13 - Representação gráfica do modelo de Mitscherlich ajustado para controle (%), aos 14 dias após a aplicação direta de laser ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$), em plantas de *Cenchrus echinatus* nos estádios E1, E2 e E3



As informações de controle de *Cenchrus echinatus* pela aplicação de laser podem ser úteis para o futuro desenvolvimento de sistemas de controles de plantas daninhas em áreas urbanas, onde a ocorrência dessa planta é comum (Brandão *et al.*, 1995; GOES MACIEL, *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2015) e a legislação impede o uso de herbicidas. O controle em áreas urbanas é comumente feito por capina manual, um método de difícil execução e custoso, que poderia ser substituído por novas tecnologias.

4.2.2.4 *Digitaria horizontalis*

No estágio E1 foi obtido o controle de 83,28% (Tabela 7) na primeira dose aplicada ($0,3316 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$), e $1,3263 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ para causar a morte total das plantas. Já

no estádio E2 o controle proporcionado pela dose 0,3316 J.mm⁻² foi insatisfatório, de apenas 28,15% e a dose necessária para o controle total, 2,6525 J.mm⁻².

Tabela 7 – Resultado da análise de variância, médias, estimativas e parâmetros do modelo ajustado para controle (%) aos 14 dias após a aplicação direta de laser (J.mm⁻²), em plantas de *Digitaria horizontalis* nos estádios E1, E2 e E3. Botucatu - SP, 2022

Doses (J.mm ⁻²)	Médias de controle (%)		
	E1	E2	E3
0,0000	0,00	0,00	0,00
0,3316	83,28	28,15	25,28
0,6631	97,07	85,50	33,36
1,3263	100,00	98,03	55,02
2,6525	100,00	100,00	97,96
5,3050	100,00	100,00	100,00
10,6100	100,00	100,00	100,00
21,2200	100,00	100,00	100,00
42,4400	100,00	100,00	100,00
F Tratamentos	67,66 **	140,34 **	34,92 **
F Experimentos	0,04 ns	0,37 ns	0,04 ns
CV (%)	13,08	11,42	28,18
Parâmetro C	2,3516	0,8273	0,3199
F Regressão	270,65 **	556,59 **	139,05 **
R ²	1,0000	0,9915	0,9954
Estimativas	Doses (J.mm ⁻²)		
EC50	0,1280	0,3639	0,9410
EC80	0,2972	0,8449	2,1850
EC90	0,4252	1,2088	3,1260
EC95	0,5533	1,5726	4,0670

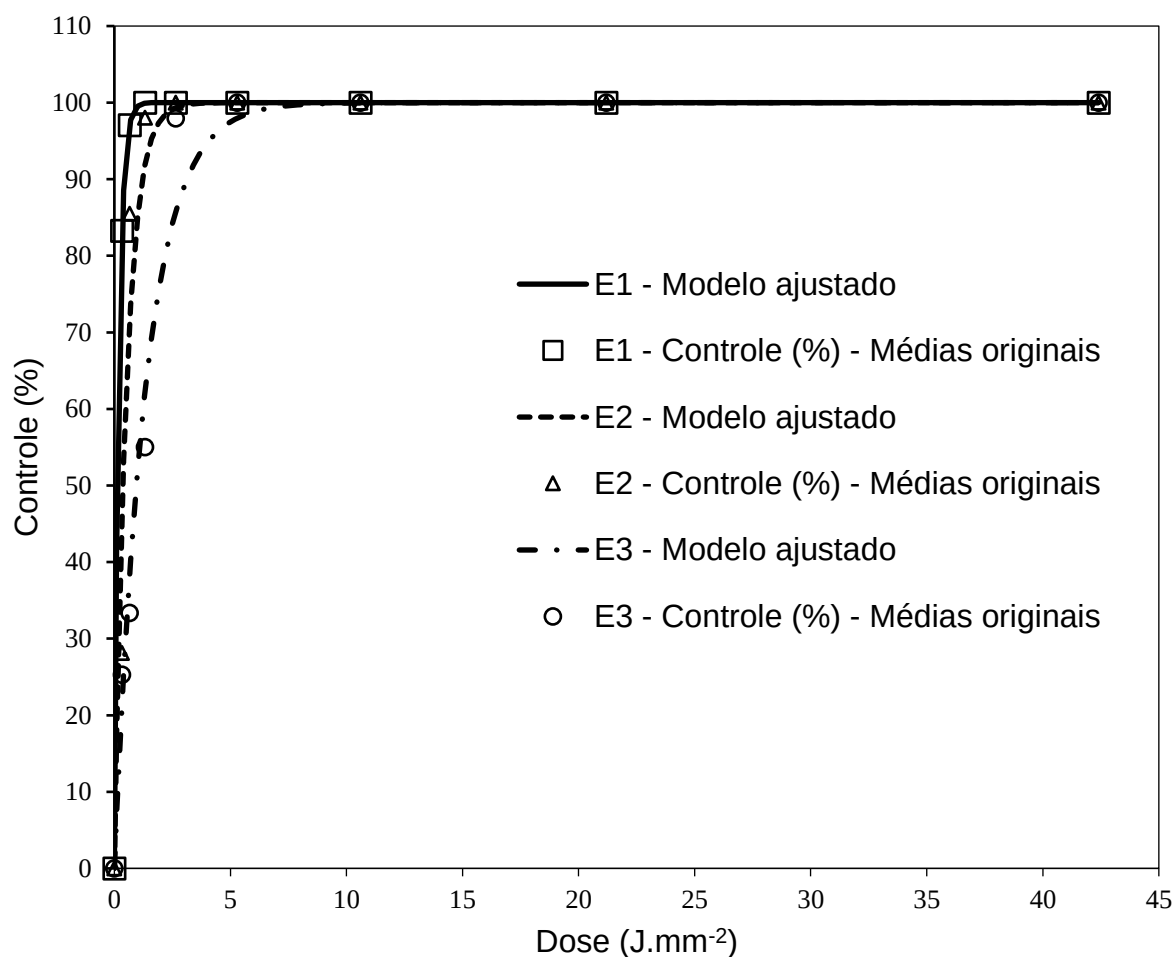
CV: coeficiente de variação; EC: dose estimada para controle; ** significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F; * significativo a $p \leq 0,05$ pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F

Dentre todas as espécies estudadas no estádio E3, *Digitaria horizontalis* foi a mais sensível a aplicação de laser, tendo a menor EC80 estimada (2,1850 J.mm⁻²). Uma das explicações possíveis é que as plantas nesse estádio, apesar de terem três folhas completamente expandidas, tem porte pequeno. A alta eficácia de controle é salientada em plantas com diferentes estratégias de dispersão e sobrevivência, como o capim-colchão. Esse desenvolve crescimento prostrado e forma raízes nos entrenós em contato com o solo, então um novo método com capacidade de controle expressiva pode ser uma ferramenta para o manejo integrado.

Não há trabalhos publicados sobre o controle de *Digitaria horizontalis* com laser, mas alguns estudos em gramíneas estão disponíveis. Para *Echinochloa crus-galli*, foi estimada uma EC90 de 0,75 J.mm⁻² em plantas com uma folha completamente expandida (Wöltjen *et al.*, 2008), que é uma estimativa 79% maior do que a aqui constatada para *Digitaria horizontalis* (0,4252 mm⁻²).

Na Figura 14 podem ser observadas as análises de regressão para a espécie *Digitaria horizontalis*.

Figura 14 - Representação gráfica do modelo de Mitscherlich ajustado para controle (%), aos 14 dias após a aplicação direta de laser (J.mm⁻²), em plantas de *Digitaria horizontalis* nos estádios E1, E2 e E3



4.2.2.5 *Eleusine indica*

Nos experimentos com o estágio E1 de *Eleusine indica* (Tabela 8), ocorreu também o que foi descrito nos resultados para *Amaranthus viridis*, a morte total das

plantas já na primeira dose aplicada ($0,3316 \text{ J.mm}^{-2}$). Assim como as plantas de *Amaranthus viridis* em estágio E1, as plantas de *Eleusine indica* nesse estágio apresentam um porte muito reduzido, condição ideal para o controle através do laser.

Para os estádios E2 e E3 as doses que causaram 100% de controle nas plantas de *Eleusine indica* foram $2,6525 \text{ J.mm}^{-2}$ e $5,305 \text{ J.mm}^{-2}$, e as doses estimadas para EC80, $2,7562$ e $4,3334 \text{ J.mm}^{-2}$, respectivamente.

Tabela 8 – Resultado da análise de variância, médias, estimativas e parâmetros do modelo ajustado para controle (%) aos 14 dias após a aplicação direta de laser (J.mm^{-2}), em plantas de *Eleusine indica* nos estádios E1, E2 e E3. Botucatu - SP, 2022

Doses (J.mm^{-2})	Médias de controle (%)		
	E1	E2	E3
0,0000	0,00	0,00	0,00
0,3316	100,00	2,95	8,22
0,6631	100,00	6,83	20,86
1,3263	100,00	58,18	20,03
2,6525	100,00	100,00	69,45
5,3050	100,00	100,00	100,00
10,6100	100,00	100,00	100,00
21,2200	100,00	100,00	100,00
42,4400	100,00	100,00	100,00
F Tratamentos	548,83 **	34,20 **	27,54 **
F Experimentos	0,00 ns	0,33 ns	2,19 ns
CV (%)	4,53	35,94	41,63
Parâmetro C	6,5871	0,2536	0,1613
F Regressão	2195,23 **	133,32 **	108,64 **
R ²	1,0000	0,9745	0,9861
Estimativas	Doses (J.mm^{-2})		
EC50	0,0457	1,1870	1,8663
EC80	0,1061	2,7562	4,3334
EC90	0,1518	3,9432	6,1996
EC95	0,1975	5,1302	8,0659

CV: coeficiente de variação; EC: dose estimada para controle; ** significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F; * significativo a $p \leq 0,05$ pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F

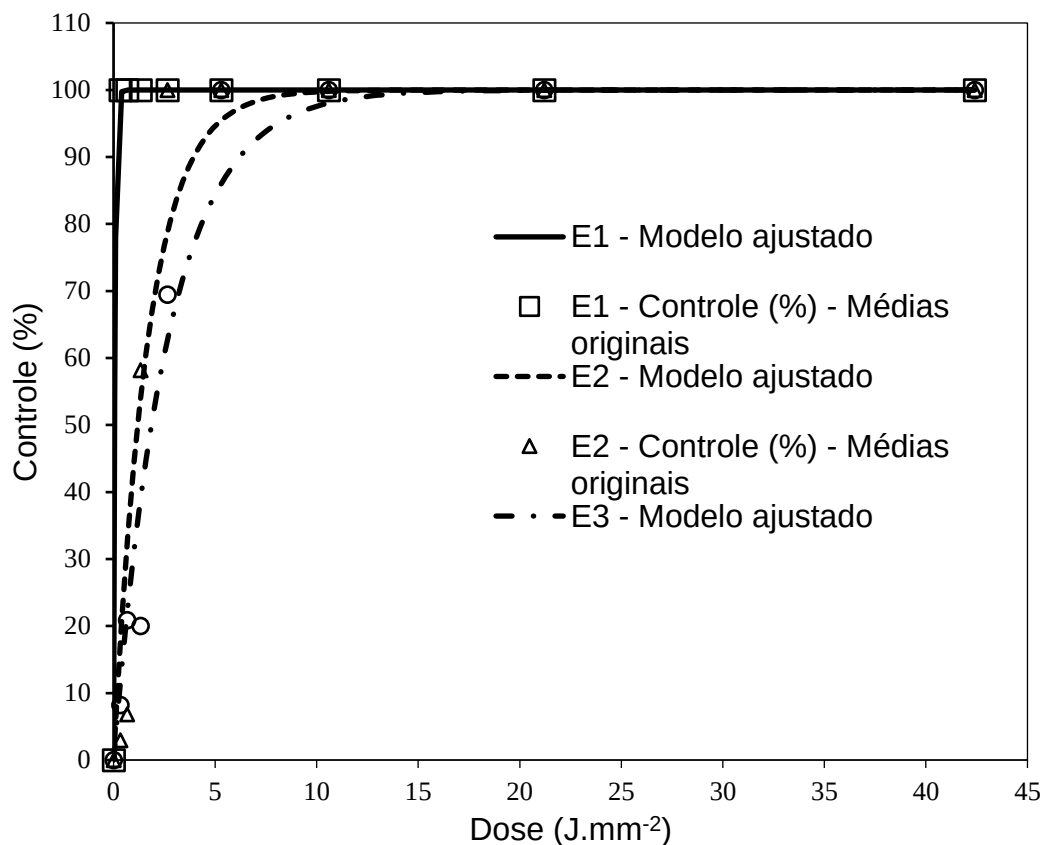
Nos três estádios de *Eleusine indica* foi observado um padrão de resposta, também presente em outras espécies aqui estudadas, em que os níveis de controle sobem abruptamente ao longo de 2 ou 3 doses. Esse comportamento parece ser intrínseco da forma como o laser causa danos nos tecidos vegetais, bastante diferente

do que se normalmente encontra em estudos com herbicidas e outras substâncias absorvidas por plantas. Marx *et al* (2012b) buscaram esclarecer como a velocidade de aumento da temperatura nos pontos de aplicação causa a morte das plantas, usando o registro da aplicação por termografia. Com base nas medições realizadas, verificou-se os seguintes valores de referência de aumento necessário de temperatura por acoplamento de energia: em plantas pequenas um acoplamento de energia letal ocorreu quando o aumento de temperatura foi maior que $1,0 \text{ K m.s}^{-1}$ (Kelvin metro por segundo) a 1 mm de distância radial do ponto central do alvo. Para plantas grandes (estádio de 4 folhas), o valor guia necessário foi de $2,5 \text{ K m.s}^{-1}$ a 2 mm de distância radial.

Existem poucos trabalhos na literatura que tratam do tema de forma mais aprofundada, o que faz com que o “mecanismo de ação” da energia aplicada através de laser ainda seja pouco compreendido em termos de controle de plantas daninhas. Sugere-se que novos estudos sejam realizados, para esclarecimento mais detalhado dos processos envolvidos na morte das plantas. Além disso, em estudos de dose-resposta com laser, recomenda-se avaliar a possibilidade de constituir os tratamentos com intervalos menores entre as doses. A adoção dessa medida tem o intuito de buscar respostas menos abruptas entre as doses, que facilitam o ajuste de modelos de regressão e, portanto, podem gerar análises mais acuradas.

A representação gráfica das análises de regressão para os três estádios de *Eleusine indica* se encontram na Figura 15.

Figura 15 - Representação gráfica do modelo de Mitscherlich ajustado para controle (%), 14 dias após a aplicação direta de laser ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$), em *Eleusine indica* nos estádios E1, E2 e E3



4.2.2.6 *Panicum maximum*

Aplicação de laser nas plantas em estágio E1 resultou em níveis de controle muito altos desde as primeiras doses. A dose de $0,3316 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ resultou em um controle de 99,20% e a dose de $0,6631 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$, 99,39%, porém a morte total das plantas só foi atingida com a dose de $0,6631 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$. No estágio E2 e E3 a dose que resultou no controle de 100% das plantas foi a de $5,305 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$. Resultados próximos foram observados para o controle de *Echinochloa crus-galli*, onde foram ajustadas doses-resposta para plantas com uma, duas e três folhas completamente expandidas, submetidas a aplicação de laser (10,6m) e feixe de 6mm de diâmetro (Marx, Barcikowski, et al., 2012). Para os estádios E2 e E3 de *Echinochloa crus-galli* a doses mínimas letais verificadas foram de 149 e 176 Joules. Essas doses são bastante similares a energia total aplicada pelo tratamento de $5,305 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ aqui adotado, que produz 150 J.

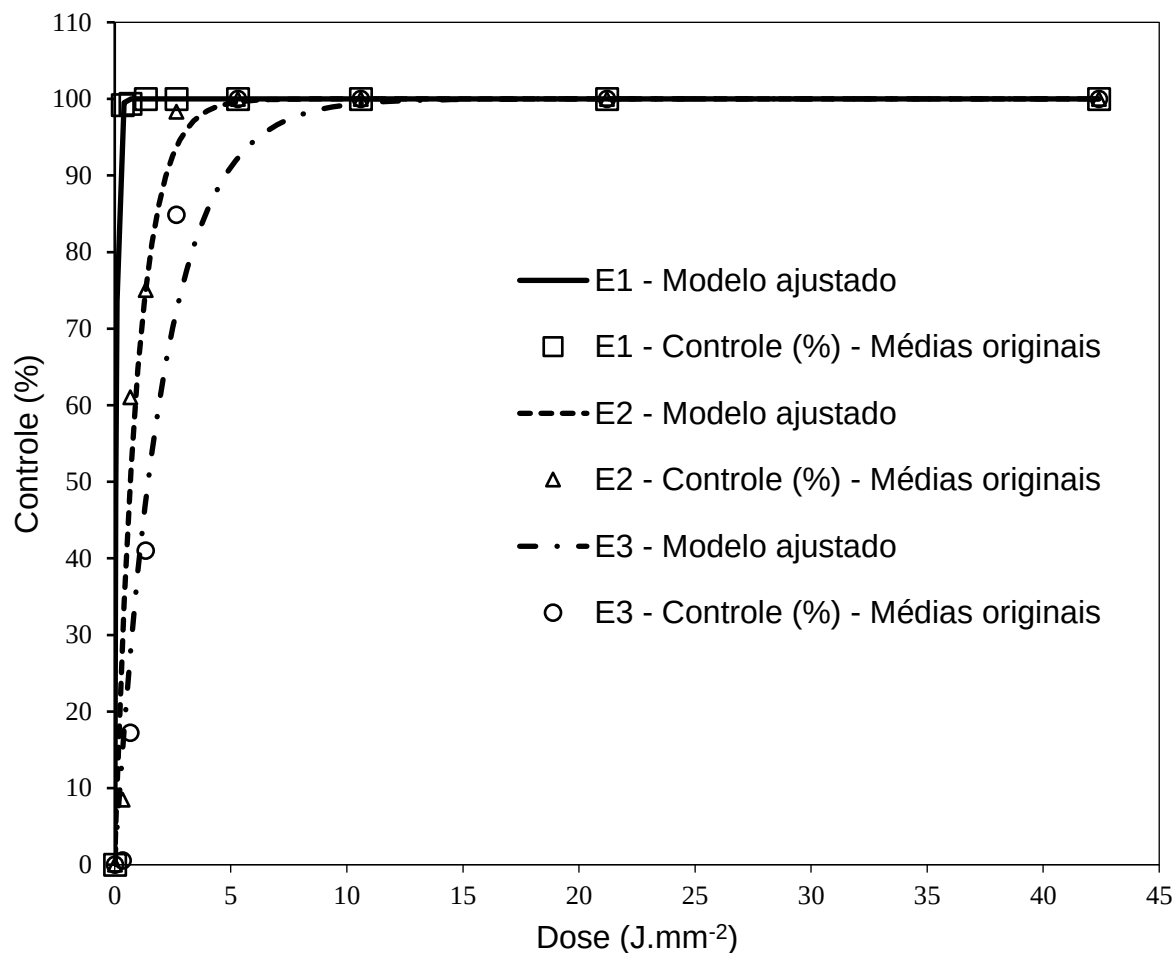
Tabela 9 – Resultado da análise de variância, médias, estimativas e parâmetros do modelo ajustado para controle (%) aos 14 dias após a aplicação direta de laser (J.mm^{-2}), em plantas de *Panicum maximum* nos estádios E1, E2 e E3. Botucatu - SP, 2022

Doses (J.mm^{-2})	Médias de controle (%)		
	E1	E2	E3
0,0000	0,00	0,00	0,00
0,3316	99,20	8,48	0,57
0,6631	99,39	61,06	17,24
1,3263	100,00	75,05	41,00
2,6525	100,00	98,32	84,85
5,3050	100,00	100,00	100,00
10,6100	100,00	100,00	100,00
21,2200	100,00	100,00	100,00
42,4400	100,00	100,00	100,00
F Tratamentos	193,20 **	34,55 **	49,96 **
F Experimentos	0,04 ns	0,35 ns	1,03 ns
CV (%)	7,63	27,34	29,94
Parâmetro C	5,7825	0,4527	0,2100
F Regressão	772,79 **	136,94 **	197,49 **
R ²	1,0000	0,9909	0,9883
Estimativas			
EC50	0,0521	0,6650	1,4335
EC80	0,1209	1,5440	3,3284
EC90	0,1729	2,2090	4,7619
EC95	0,2250	2,8739	6,1954

CV: coeficiente de variação; EC: dose estimada para controle; ** significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F; * significativo a $p \leq 0,05$ pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F

Apesar da constatação de mesma dose para controle total de *Panicum maximum*, no estádio E2 a dose de 0,6631 J.mm^{-2} já atingiu 61,06% de controle, e só 17,24% nas plantas em E3. Os dados de baixo controle alcançado pelas primeiras doses em E3 tiveram impacto na regressão e estimativas EC80, que foram de 0,1209 J.mm^{-2} para E1, 1,5440 J.mm^{-2} para E2 e 3,3284 J.mm^{-2} para E3. Essas diferenças podem ser visualizadas nas curvas de regressão apresentadas na Figura 16.

Figura 16 - Representação gráfica do modelo de Mitscherlich ajustado para controle (%), aos 14 dias após a aplicação direta de laser ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$), em plantas de *Panicum maximum* nos estádios E1, E2 e E3



4.2.2.7 *Urochloa decumbens*

As doses necessárias para causar a morte total de plantas de *Urochloa decumbens* em seus três estádios mostraram um comportamento inverso ao observado em outras espécies, resultado oportuno para discutir uma das respostas que as plantas podem ter a aplicação de laser (Tabela 10). Verificou-se que em E1 a dose que causou 100% de controle foi a de $10,61 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$, em em E3, $5,305 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$. O fenômeno que explica esse resultado é a rebrota das plantas após a aplicação, que ocorreu em plantas do estádio E1 e E2.

Tabela 20 – Resultado da análise de variância, médias, estimativas e parâmetros do modelo ajustado para controle (%) aos 14 dias após a aplicação direta de laser (J.mm⁻²), em plantas de *Urochloa decumbens* nos estádios E1, E2 e E3. Botucatu - SP, 2022

Doses (J.mm ⁻²)	Médias de controle (%)		
	E1	E2	E3
0,0000	0,00	0,00	0,00
0,3316	75,52	32,25	7,86
0,6631	73,14	31,46	6,31
1,3263	85,05	80,80	33,91
2,6525	92,51	100,00	96,57
5,3050	96,63	99,14	100,00
10,6100	100,00	100,00	100,00
21,2200	100,00	100,00	100,00
42,4400	100,00	100,00	100,00
F Tratamentos	57,31 **	40,60 **	72,22 **
F Experimentos	2,60 ns	1,22 ns	0,004 ns
CV (%)	14,82	24,39	25,81
Parâmetro C	1,3501	0,4289	0,2094
F Regressão	227,37 **	161,37 **	281,36 **
R ²	0,9918	0,9937	0,9739
Estimativas	Doses (J.mm ⁻²)		
EC50	0,2230	0,7019	1,4376
EC80	0,5177	1,6297	3,3380
EC90	0,7407	2,3315	4,7755
EC95	0,9637	3,0334	6,2131

CV: coeficiente de variação; EC: dose estimada para controle; ** significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F; * significativo a $p \leq 0,05$ pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F

A espécie *Urochloa decumbens* é uma planta que foi introduzida no Brasil como forrageira por conta das suas características naturais adequadas para pastoreio. Uma das características comuns em plantas para pastoreio é a capacidade de rebrota. A explicação encontrada para a rebrota das plantas de *Urochloa decumbens* é a sobrevivência do ponto de crescimento, apesar da aparente morte imediata das plantas. Em analogia ao que acontece em plantas de milho, quando a geada atinge as plantas antes do estágio V2, o ponto de crescimento ou meristema fundamental ainda está abaixo da linha do solo, o que permite que a planta rebrote e sobreviva (Homero Bergamaschi e Ronaldo Matzenauer, 2014). Na literatura esse fenômeno também foi relatado em experimentos anteriores que avaliaram o controle de plantas daninhas pelo uso de laser. A resposta de rebrota foi observada em plantas de *Lolium*

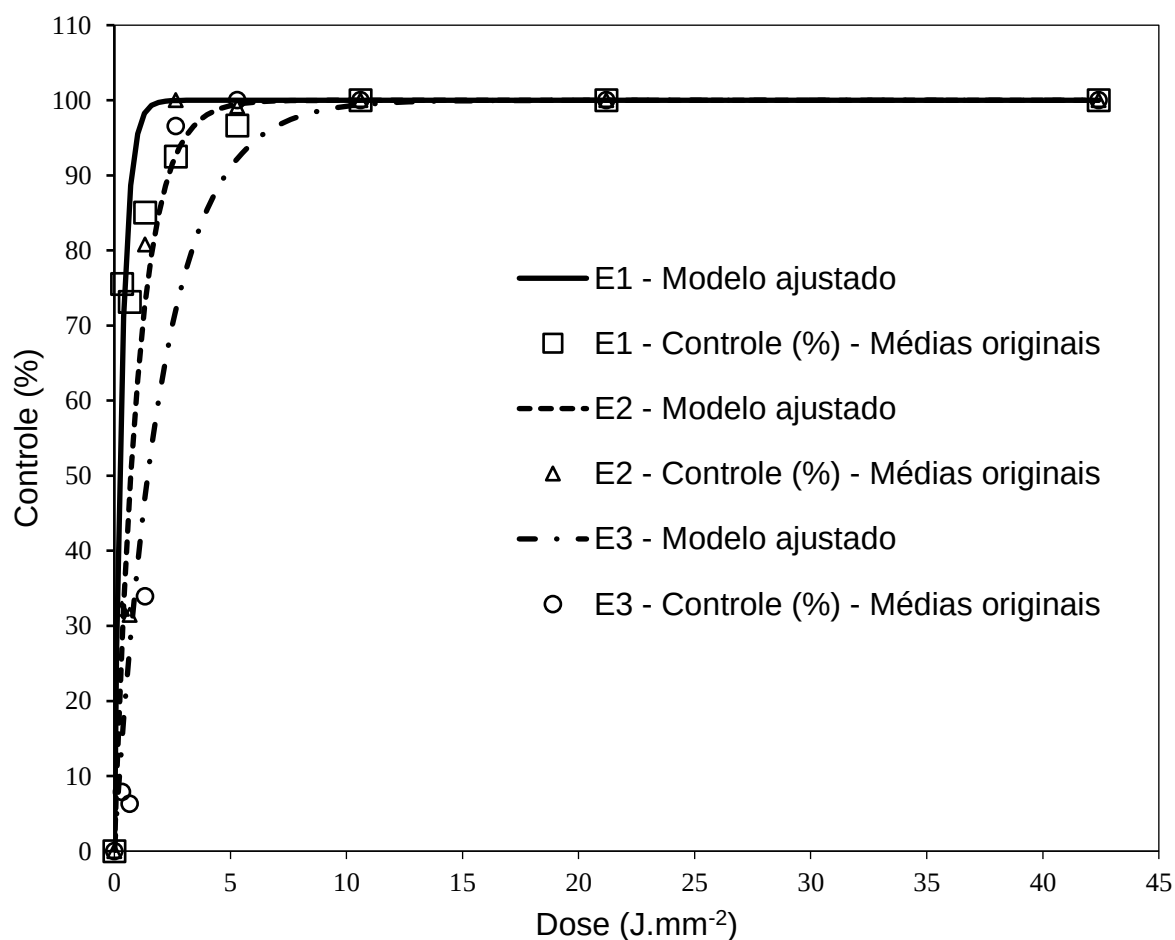
rigidum, com três folhas completamente expandidas, submetidas a aplicação de laser (975 nm) nas doses de 1,3, 2,5, 6,4, 19,1 e 76,4 J.mm⁻², com a constatação de controle de 53,3% e 93,3% nas doses de 6,4 e 19,1 J.mm⁻² (Coleman *et al.*, 2021). Osadčuks *et al* (2020) verificaram que plantas de *Galium aparine* já haviam rebrotado um par de folhas novos, apenas sete dias após a aplicação de laser azul (445nm) nas doses de 0,619 e 0,229 J.mm⁻².

Os resultados de rebrota de apenas algumas repetições expõem outro ponto de discussão importante, o quanto pequenas diferenças no momento da aplicação de laser podem influenciar o resultado, apesar da seleção de plantas com a maior uniformidade de estágio possível (Figura 17).

Figura 17 - Plantas de *Urochloa decumbens* no processo de seleção para aplicação do experimento dose-resposta com laser



Mesmo com a repetição precisa do método no momento da aplicação, pequenas variações na morfologia interna das plantas, ou na inclinação do caule no momento da aplicação, podem ser responsáveis pelas variações descritas. Essas observações também foram destacadas por outros autores (Marx, Barcikowski, *et al.*,



Apesar do recorte feito para exemplificar desafios encontrados no uso da tecnologia, essas pequenas variações nas respostas de plantas de *Urochloa decumbens* foram exceções, as curvas de regressão ajustadas tiveram bons coeficientes de determinação (R^2) e os parâmetros estimados seguiram o padrão esperado. As doses EC80 para controle de *Urochloa decumbens* foram $0,5177 \text{ J.mm}^{-2}$ para o estágio E1, $1,6297 \text{ J.mm}^{-2}$ para o estágio E2 e $3,3380 \text{ J.mm}^{-2}$ para o estágio E3.

5 CONCLUSÕES

A aplicação da mesma dose de laser de forma direta, sem a interferência de lentes e espelhos, proporciona um controle mais eficaz de plantas de *Bidens pilosa* L. do que através de cabeçote. O sistema de aplicação direta é o indicado para realização de experimentos de dose-resposta.

As espécies *Amaranthus viridis* (caruru-de-mancha), *Bidens pilosa* (picão-preto), *Cenchrus echinatus* (capim-carrapicho), *Digitaria horizontalis* (capim-colchão), *Eleusine indica* (capim-pé-de-galinha), *Panicum maximum* (capim-colonião) e *Urochloa decumbens* (braquiária decumbens) podem ser controladas com o uso de energia transportada por radiação eletromagnética, de comprimento de onda 10.6 μm (laser). O controle pode ser atingido para todas as espécies nos estádios de uma a três folhas, ou pares de folhas, completamente expandidas.

Existe correlação positiva entre a dose estimada para o controle eficaz de plantas daninhas pelo uso de laser e a massa de matéria fresca, massa de matéria seca e área foliar das plantas.

REFERÊNCIAS

- BARCIKOWSKI, S.; KOCH, G.; ODERMATT, J. Characterisation and modification of the heat affected zone during laser material processing of wood and wood composites. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 64, n. 2, p. 94–103, 31 abr. 2006.
- BAYRAMIAN, A. J.; FAY, P. K.; DYER, W. E. **Weed control using carbon dioxide lasers. Proceedings Western Society of Weed Science**, 1992.
- BERGAMASCHI, H; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84 p. il.
- BESSIS, M. et al. Cytophysiologie-irradiation des organites cellulaires a laide dun laser a rubis. **Comptes rendus hebdomadaires des seances de l'academie des sciences**, v. 255, n. 5, p. 1010-&, 1962.
- BRANDÃO, M.; PALUMA, E.; KEIN, V. L. G.; MAUTONE, L.; GUIMARÃES, E. F.; PEREIRA, R. C.; MIGUEL, J. R. Plantas daninhas do estado do Rio de Janeiro: acréscimo aos trabalhos já efetuados no estado. **Planta Daninha**, v. 13, n. 2, p. 98–116, 1995.
- BRODIE, G. The Use of Physics in Weed Control. **Non-Chemical Weed Control**, p. 33–59, 1 jan. 2018.
- BRODIE, G.; HAMILTON, S.; WOODWORTH, J. An assessment of microwave soil pasteurization for killing seeds and weeds. **Plant Protection Quarterly**, v. 22, n. 4, p. 143–149, 2007.
- COLEMAN, G.; BETTERS, C.; SQUIRES, C.; LEON-SAVAL, S.; WALSH, M. Low Energy Laser Treatments Control Annual Ryegrass (*Lolium rigidum*). **Frontiers in Agronomy**, v. 2, p. 35, 14 jan. 2021.
- COUCH, R.; GANGSTAD, E. O. Response of Waterhyacinth to Laser Radiation. **Weed Science**, v. 22, n. 5, p. 450–453, set. 1974.
- DUFFUS, J. Glossary for chemists of terms used in toxicology (IUPAC Recommendations 1993). **Pure and Applied Chemistry**, v. 65, n. 9, p. 2003–2122, 1 jan. 1993.
- EINSTEIN, A. Zur Quantentheorie der Strahlung. **Phys. Z.**, v. 18, p. 121–128, 1917.
- Electromagnetic Radiation - Chemistry LibreTexts**. Disponível em: <[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Text_book_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Spectroscopy/Fundamentals_of_Spectroscopy/Electromagnetic_Radiation](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Text_book_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Fundamentals_of_Spectroscopy/Electromagnetic_Radiation)>. Acesso em: 5 jun. 2022.
- GABA, S.; GABRIEL, E.; CHADŒUF, J.; BONNEU, F.; BRETAGNOLLE, V. Herbicides do not ensure for higher wheat yield, but eliminate rare plant species. **Scientific Reports 2016 6:1**, v. 6, n. 1, p. 1–10, 25 jul. 2016.

GE, Z. Y.; WU, W. W.; YU, Y. J.; ZHANG, R. Q. Design of Mechanical Arm for Laser Weeding Robot. **Applied Mechanics and Materials**, v. 347–350, p. 834–838, ago. 2013.

GOES MACIEL, C. D. DE; JUSTINIANO, W.; OLIVEIRA NETO, A. M. DE; GUERRA, N. Monitoramento de plantas daninhas em gramados de grama-batatais (*Paspalum notatum* Flüggé) no Município de Paraguaçu Paulista, SP. **Revista Brasileira de Horticultura Ornamental**, v. 16, n. 1, 9 jun. 2010.

HAFERKAMP, H.; BUSSE, A. VON; BARCIKOWSKI, S.; OSTENDORF, A.; BUNTE, J. Laser transmission welding of polymer and wood composites: Material and joint mechanism related studies. **Journal of Laser Applications**, v. 16, n. 4, p. 198–205, nov. 2004.

HARKER, K. N.; O'DONOVAN, J. T. Recent Weed Control, Weed Management, and Integrated Weed Management. **Weed Technology**, v. 27, n. 1, p. 1–11, 20 mar. 2013.

HEAP, I. Global perspective of herbicide-resistant weeds. **Pest Management Science**, v. 70, n. 9, p. 1306–1315, 1 set. 2014.

HEISEL, T.; SCHOU, J.; ANDREASEN, C.; CHRISTENSEN, S. Using laser to measure stem thickness and cut weed stems. **Weed Research**, v. 42, n. 3, p. 242–248, 1 jun. 2002.

HEISEL, T.; SCHOU, J.; CHRISTENSEN, S.; ANDREASEN, C. Cutting weeds with a CO₂ laser. **Weed Research**, v. 41, n. 1, p. 19–29, 11 fev. 2001.

HILLOCKS, R. J. Farming with fewer pesticides: EU pesticide review and resulting challenges for UK agriculture. **Crop Protection**, v. 31, n. 1, p. 85–93, jan. 2012.

HOMERO BERGAMASCHI; RONALDO MATZENAUER. **O milho e o clima**. Porto Alegre: [s.n.].

JESCHKE, P. Progress of modern agricultural chemistry and future prospects. **Pest Management Science**, v. 72, n. 3, p. 433–455, 2016.

JONES, P. A.; BLAIR, A. M.; ORSON, J. H. **Mechanical damage to kill weeds** SP., , 1996.

KAIERLE, S.; MARX, C.; RATH, T.; HUSTEDT, M. Find and Irradiate — Lasers Used for Weed Control. **Laser Technik Journal**, v. 10, n. 3, p. 44–47, 1 maio 2013.

LANGNER, H.-R.; EHLERT, D.; HEISIG, M.; ANDREAS KIRSTE, SOWIE. Thermische Wirkung von Laserstrahlung auf Pflanzen. **LANDTECHNIK**, v. 61, n. 5, p. 252–253–252–253, 30 out. 2006.

MAIMAN, T. H. Stimulated Optical Radiation in Ruby. **Nature** **1960 187:4736**, v. 187, n. 4736, p. 493–494, 1960.

MARTELLONI, L.; FRASCONI, C.; FONTANELLI, M.; RAFFAELLI, M.; PERUZZI, A. Mechanical weed control on small-size dry bean and its response to cross-flaming. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 1, p. e0203, 2 mar. 2016.

MARX, C.; BARCIKOWSKI, S.; HUSTEDT, M.; HAFERKAMP, H.; RATH, T. Design and application of a weed damage model for laser-based weed control. **Biosystems Engineering**, v. 113, n. 2, p. 148–157, 1 out. 2012.

MARX, C.; CÉSAR, J.; PÉREZ, P.; HUSTEDT, M.; BARCIKOWSKI, S.; HAFERKAMP, H.; RATH, T. Investigations on the absorption and application of laser radiation for weed control. **LANDTECHNIK**, v. 67, n. 2, p. 95–101–95–101, 30 abr. 2012.

MATHIASSEN, S.K.; BAK, T.; CHRISTENSEN, S.; KUDSK, P. The Effect of Laser Treatment as a Weed Control Method. **Biosystems Engineering**, v. 95, n. 4, p. 497–505, 2006.

MATHIASSEN, SOLVEJG K.; BAK, T.; CHRISTENSEN, S.; KUDSK, P. The Effect of Laser Treatment as a Weed Control Method. **Biosystems Engineering**, v. 95, n. 4, p. 497–505, 1 dez. 2006.

MITSCHERLICH, E.A. Das gesetz des minimums und das gesetz des abnehmenden bodenertrages. **Landwirtschaftliches Jahrbuch**, v.38, p.537-552, 1909.

NADIMI, E. S.; ANDERSSON, K. J.; JØRGENSEN, R. N.; MAAGAARD, J.; MATHIASSEN, S.; CHRISTENSEN, S. Designing, modeling and controlling a novel autonomous laser weeding system. **ASABE - 7th World Congress on Computers in Agriculture and Natural Resources 2009, WCCA 2009**, p. 299–303, 2009.

OSADČUKS, V.; KOSTROMINS, A.; PECKA, A.; KOTELENECS, V.; JAŠKO, J. Experimental efficiency evaluation of 445 nm semiconductor laser for robotized weed control applications. **Agronomy Research**, v. 18, n. Special Issue 2, p. 1380–1387, 2020.

PALEG, L. G.; ASPINALL, D. Field control of plant growth and development through the laser activation of phytochrome. **Nature**, v. 228, n. 5275, p. 970–973, 1970.

PANNACCI, E.; TEI, F. Effects of mechanical and chemical methods on weed control, weed seed rain and crop yield in maize, sunflower and soyabean. **Crop Protection**, v. 64, p. 51–59, out. 2014.

PEREZ-RUIZ, M.; SLAUGHTER, D. C.; GLIEVER, C.; UPADHYAYA, S. K. Tractor-based Real-time Kinematic-Global Positioning System (RTK-GPS) guidance system for geospatial mapping of row crop transplant. **Biosystems Engineering**, v. 111, n. 1, p. 64–71, 2012.

PETERSON, G. E. The discovery and development of 2,4-D. **Agricultural History**, v. 41, n. 3, p. 243–253, 1967.

POWLES, S. B. Evolved glyphosate-resistant weeds around the world: lessons to be learnt. **Pest Management Science**, v. 64, n. 4, p. 360–365, 1 abr. 2008.

RAKHMATULIN, I.; ANDREASEN, C. A Concept of a Compact and Inexpensive Device for Controlling Weeds with Laser Beams. **Agronomy** **2020**, Vol. **10**, Page **1616**, v. 10, n. 10, p. 1616, 21 out. 2020.

ROUNDS, D. E.; CHAMBERLAIN, E. C.; OKIGAKI, T. LASER RADIATION OF TISSUE CULTURES*. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 122, n. 2, p. 713–727, 1 maio 1965.

SCHAWLOW, A. L.; TOWNES, C. H. Infrared and Optical Masers. **Physical Review**, v. 112, n. 6, p. 1940–1949, 15 dez. 1958.

SELLERS, B. A.; SMEDA, R. J.; JOHNSON, W. G.; KENDIG, J. A.; ELLERSIECK, M. R. Comparative Growth of Six Amaranthus Species in Missouri. **Weed Science**, v. 51, n. 3, p. 329–333, 2003.

SILVA, A. A. P.; KARPINSKI, R. A. K.; HELVIG, E. O.; SOARES, C. R. B.; PIVATTO, R. A. D.; MACIEL, C. D. G. **Levantamento de Plantas Daninhas em Gramados de Praças Públicas no Município de Guarapuava-PR** Anais do VII Simpósio Sobre Gramados. **Anais...** Botucatu, São Paulo, Brasil: FCA/UNESP, 2015

SIRIKUNKITTI, S.; CHONGCHAROEN, K.; YOONGSUNTIA, P.; RATANAVIDIS, A. Progress in a Development of a Laser-Based Weed Control System. **RI2C 2019 - 2019 Research, Invention, and Innovation Congress**, 1 dez. 2019.

SLAUGHTER, D. C.; GILES, D. K.; DOWNEY, D. Autonomous robotic weed control systems: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, n. 1, p. 63–78, 2008.

TOWNES, C. H. Theodore H. Maiman (1927–2007). **Nature** **2007** **447**:7145, v. 447, n. 7145, p. 654–654, 6 jun. 2007.

WANG, M.; LEAL-NARANJO, J.-A.; CECCARELLI, M.; BLACKMORE, S. A Novel Two-Degree-of-Freedom Gimbal for Dynamic Laser Weeding: Design, Analysis, and Experimentation. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, p. 1–11, 2022.

WESTWOOD, J. H.; CHARUDATTAN, R.; DUKE, S. O.; FENNIMORE, S. A.; MARRONE, P.; SLAUGHTER, D. C.; SWANTON, C.; ZOLLINGER, R. Weed Management in 2050: Perspectives on the Future of Weed Science. **Weed Science**, v. 66, n. 3, p. 275–285, 1 maio 2018.

WILDE, W.H.A.; PAAR, W.H.; MCPEAK, D.W. Seeds bask in laser light. **Laser Focus**, 5, 23, 41-42, 1969.

WÖLTJEN, C.; HAFERKAMP, H.; RATH, T.; HERZOG, D. Plant growth depression by selective irradiation of the meristem with CO₂ and diode lasers. **Biosystems Engineering**, v. 101, n. 3, p. 316–324, 1 nov. 2008.

WÖLTJEN, C.; RATH, T.; HERZOG, D. INVESTIGATIONS ABOUT THE TECHNICAL BASICS OF LASER BEAM USE FOR PLANT MANIPULATION. **Acta Horticulturae**, n. 801, p. 587–594, nov. 2008.

XIONG, Y.; GE, Y.; LIANG, Y.; BLACKMORE, S. Development of a prototype robot and fast path-planning algorithm for static laser weeding. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 142, p. 494–503, 1 nov. 2017.