

Fitorremediação de tebutiuron por espécies de plantas tolerantes a herbicidas

Phytoremediation of tebutiuron by herbicide-tolerant plant species

Lucas Alceu Rodrigues de Lima¹, Renan Cantalice de Souza², Jorge Luiz Xavier Lins Cunha², Paulo Henrique Barcellos França², Gerlan do Nascimento Rodrigues¹, Luis Eugênio Lessa Bulhões¹

RESUMO: O estudo teve como objetivo identificar espécies vegetais fitorremediadoras de solos contaminados com tebutiuron, por meio da avaliação do desenvolvimento de espécies bioindicadoras, como também quantificar sua dissipação no solo. Foram avaliadas dez espécies vegetais com potencial para fitorremediação de tebutiuron em condição de presença e ausência desse herbicida. O estudo foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado, no esquema fatorial 10 x 2. Os níveis de herbicidas presentes no solo foram quantificados por meio de HPLC-UV. Os parâmetros fisiológicos e biométricos das espécies fitorremediadoras e bioindicadoras foram determinados aos 15, 30, 45 e 60 dias após a semeadura. *Mucuna aterrina* apresentou o melhor potencial para fitorremediação de tebutiuron, evidenciado por meio do bom desenvolvimento da espécie bioindicadora e devido a menor oscilação nos parâmetros fisiológicos e biométricos da espécie, além disso, propiciou uma redução de 86,5% na concentração de tebutiuron no solo.

PALAVRAS-CHAVE: *Mucuna aterrima*; Plantas fitorremediadoras; Residuais; Solo; Tolerância.

ABSTRACT: The study aimed to identify phytoremediation plant species in soils contaminated with tebutiuron, by evaluating the development of bioindicator species, as well as quantifying their dissipation in the soil. Ten plant species with potential for tebutiuron phytoremediation were evaluated in the presence and absence of this herbicide. The study was carried out in a greenhouse, in a completely randomized design, in a 10 x 2 factorial scheme. The levels of herbicides present in the soil were quantified using HPLC-UV. The physiological and biometric parameters of phytoremediation and bioindicator species were determined at 15, 30, 45 and 60 days after sowing. *Mucuna aterrina* showed the best potential for phytoremediation of tebutiuron, evidenced by the good development of the bioindicator species and due to the lower oscillation in the physiological and biometric parameters of the species, in addition, it provided a reduction of 86.5% in the concentration of tebutiuron in the soil.

KEY WORDS: *Mucuna aterrima*; Phytoremediation plants; Residuals; Ground; Tolerance.

Autor correspondente: Luis Eugênio
Email: lessabulhoes@gmail.com

Recebido em: 22/12/2023
Aceito em: 15/02/2024

¹ Doutorando no Programa de *Strico sensu* em Produção Vegetal (PPGPV) na Universidade Federal de Alagoas – CECA-UFAL, Rio Largo (AL), Brasil.

² Docente no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal (PPGPV) na Universidade Federal de Alagoas – CECA-UFAL, Rio Largo (AL), Brasil.

INTRODUÇÃO

O aumento da produção de alimentos e da diversificação de culturas é fundamental para suprir a demanda atual por alimentos no mundo. Contudo, diversos fatores bióticos e abióticos afetam o potencial produtivo dos sistemas agrícolas, acarretando um baixo volume de produção por área cultivada. Dentre estes fatores, as plantas infestantes destacam-se como um dos principais, por competirem com a espécie cultivada pelos recursos do meio, interferindo direta e indiretamente no desempenho produtivo destas espécies (Paz et al., 2017; Monteiro; Santos, 2022).

Diante deste cenário, o emprego do controle químico de plantas daninhas destaca-se como a principal forma de manejo, por ser eficiente, relativamente de baixo custo e apresentar alto rendimento operacional, tornando o processo produtivo menos oneroso (Khaffagy et al., 2022). Dentre as moléculas herbicidas existentes no mercado, aquelas aplicadas em pré- emergência da cultura e que apresentam efeito residual no solo tem sido as mais empregadas, pois mantém a espécie cultivada livre da interferência das plantas daninhas por um período maior, devido a sua persistência no solo (Krahmer et al., 2021).

No entanto, o uso de herbicidas com efeitos residuais no solo afeta diretamente o emprego da rotação de culturas no ambiente de cultivo, prática esta que pode melhorar as condições físicas, químicas e biológicas do solo, além de ser uma técnica importante no manejo integrado de plantas daninhas, por contribuir para a redução do banco de sementes das infestantes, assim como suprimir a reinfestação destas (Kumar et al., 2022).

Dentre os herbicidas residuais, o tebutiuron, herbicida frequentemente usado para o manejo de plantas infestantes em culturas de cana-de-açúcar, merece especial atenção por ser um composto de alta persistência no solo, tempo de meia-vida longa, toxicidade que varia de moderada a extrema e alta solubilidade em água, características de extrema importância e que estão diretamente associadas à contaminação ambiental, aonde aplicações incoerentes e sucessivas no ambiente agrícola podem potencializar os impactos do mesmo no solo, nas águas subterrâneas e nas culturas sucessoras (Ferreira et al., 2021; Guimarães et al., 2022).

A fim de minimizar os efeitos persistentes e fitotóxicos dos herbicidas no solo vem sendo empregada à técnica da fitorremediação, que consiste em utilizar espécies vegetais com

potencial de remover e/ou degradar estes compostos presentes no mesmo, reduzindo assim os riscos de fitotoxicidade de culturas sensíveis, por meio do efeito *carryover*, assim como a contaminação ambiental (Ferreira et al., 2021). Estudos anteriores demonstraram que as espécies milheto [*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.], mucuna preta [*Mucuna aterrima* (Piper; Tracy) Holland], tremosso branco [*Lupinus albus* L.] e feijão-de-porco [*Canavalia ensiformis* (L.) DC] cultivadas em solo contaminado com tebutiuron se mostraram tolerantes e remediadoras (Kopittke et al., 2010; Varshney et al., 2012; Ferreira et al., 2021).

Ressalta-se que no Brasil os estudos com plantas fitorremediadoras de solos contaminados por herbicidas são muito promissoras, sendo importante o estudo de novas técnicas que possibilitem a redução e/ou anulação dos níveis de herbicidas no solo, assim como a descoberta de espécies vegetais que apresentem potencial de remediação destes compostos (Pires et al., 2003a). Nesse sentido, esse estudo teve como objetivo avaliar o desenvolvimento e a fisiologia de espécies potenciais fitorremediadoras e bioindicadoras de tebutiuron, além de quantificar a dissipação desse herbicida no solo pelo método de cromatografia líquida.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em duas etapas no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas – CECA/UFAL (latitude 09°28'22" S; longitude 35°49'43" W; altitude 127 m), em

casa de vegetação. As unidades experimentais consistiram de vasos de polietileno com capacidade para 10 dm³ de solo.

O solo utilizado no experimento foi obtido de áreas de pousio do CECA/UFAL, na profundidade de 0-20 cm, sendo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, de textura areno argilosa, com 305 g/kg de argila, 26 g/kg de silte, 206 g/kg de areia fina e 463 g/kg de areia grossa. O solo apresentou ainda pH de 6,2, 54 ppm de P, 240 ppm de K⁺, 0 meq/100 mL de Al³⁺, 2,2 meq/100 mL de Mg²⁺, 3,2 meq/100 mL de H + Al, 12 meq/100 mL de CTC, saturação por bases de 73,3% e 2,9% de matéria orgânica. O substrato foi previamente peneirado (peneira de malha de 4 mm). Posteriormente, os vasos foram preenchidos e pesados conforme a capacidade descrita acima.

Em seguida foi realizada a aplicação do herbicida tebutiuron em pré-emergência, na dose de 1,0 kg.ha⁻¹, conforme a recomendação do fabricante para aplicação na cultura da cana-de-açúcar. A aplicação do produto foi realizada com pulverizador costal pressurizado a CO₂, acoplado em uma barra com dois bicos de jato plano (“leque”) 11002, espaçados entre si de 0,50 m com pressão constante de 2,0 kgf.cm⁻², proporcionando um volume de calda de 200 L.ha⁻¹.

Na primeira etapa do estudo foi conduzido um experimento em delineamento inteiramente ao acaso, no esquema fatorial 10 x 2 (espécies fitorremediadoras x presença ou não do herbicida), em seis repetições. As espécies fitorremediadoras avaliadas foram: mucuna (*Mucuna aterrima* L.), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformes* L.), esponja (*Luffa aegyptiaca* L.), calopogonio (*Callopogonium mucunoides* L.), feijão bóer (*Cajanus cajan* L.), rabanete (*Raphanus sativus* L.), vagens de chocalho (*Crotalaria spectabilis* L.), sena (*Senna obtusifolia* L.), leucena (*Leucaena leucocephala* L.) e mamona (*Ricinus communis* L.).

Aos 30 dias após a aplicação do herbicida, foi realizada a semeadura das possíveis espécies fitorremediadoras, depositando-se 10 sementes por vaso, sem tratamento prévio, da profundidade de 5 mm. Os vasos foram irrigados a cada 3 dias, com o objetivo de sempre manter o solo próximo da capacidade de campo.

Com o objetivo de avaliar a persistência do herbicida no solo foi realizado um segundo estudo com espécies bioindicadoras. Desta forma, aos 60 dias após a ação das plantas fitorremediadoras no solo contaminado por tebutiuron, sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e de pepino (*Cucumis sativus* L.) foram semeadas nos vasos. O experimento também foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado, com dois tratamentos (solo com e sem herbicida), em três repetições, para cada espécie avaliada. Esta segunda etapa do estudo foi conduzida sob as mesmas condições de cultivo e avaliação das espécies remediadoras, sendo o bioensaio realizado nas mesmas unidades experimentais onde foram cultivadas as plantas com potencial fitorremediador.

Aos 15, 30, 45 e 60 dias após a semeadura (DAS) das plantas fitorremediadoras e bioindicadoras foram realizadas as avaliações fitotécnicas, por meio da contagem do número de folhas verdes e da medição com fita métrica da altura das plantas (mm).

Nas mesmas épocas também foram realizadas as avaliações fisiológicas das plantas fitorremediadoras e bioindicadoras. Avaliou-se o rendimento quântico potencial do fotossistema II (Fv/Fm), por meio de fluorômetro portátil de frequência modulada modelo PAM 2500, Walz – Germany, sendo realizadas duas leituras na parte mediana da folha para obtenção da média de cada repetição. Antes das mensurações, as folhas foram mantidas no escuro por 30 minutos para a desativação da cadeia transportadora de elétrons do fotossistema. Também foi mensurado o teor de clorofila nas folhas das plantas, por meio do índice SPAD, com o auxílio de um clorofilômetro portátil modelo SPAD 502, realizando-se três leituras por planta para a obtenção do valor médio.

Também foi realizada a quantificação do herbicida tebutiuron presente no solo. Aos 61 dias após o plantio das plantas fitorremediadoras, coletou-se três alíquotas de solo em diferentes

profundidades em cada tratamento. Utilizou-se 5,0 g de solo seco a temperatura ambiente para a extração do tebutiuron, onde foi transferido para tubos do tipo Falcon, sendo adicionado 10 mL de metanol (MeOH). A amostra foi homogeneizada, e em seguida, centrifugada a 3.000 rpm por 10 minutos. Posteriormente o sobrenadante foi removido com o auxílio de uma seringa (Descarpack®), filtrado em membrana de PVDF de porosidade de 0,45 μm (Millipore Millex- HV) e coletado em frascos de 2,0 mL.

A análise cromatográfica do extrato foi realizada em cromatógrafo líquido Shimadzu Corporation LC20AD (Kyoto, Japão) com detector UV-Vis (Shimadzu DGU-20A) e coluna C8 (Shim-pack CLC-C8 (M), 150 mm \times 4,6 mm di). As separações cromatográficas foram realizadas de forma isocrática utilizando uma mistura água/acetonitrila 70:30 (v/v) como fase móvel, com vazão de 1,0 mL/min, volume de injeção de 20 μL e temperatura do forno 40°C O comprimento de onda monitorado foi fixado em 254 nm. Uma solução estoque do herbicida na concentração de 1 mg/mL em metanol foi preparada a partir do padrão analítico com 98,0% de pureza (Sigma-Aldrich, St. Louis, EUA).

A fortificação foi realizada adicionando 1 mL de soluções de trabalho de tebutiuron em MeOH (com concentrações de 0,5 mg.mL⁻¹, 1,1 mg.mL⁻¹, 2,1 mg.mL⁻¹, 3,1 mg.mL⁻¹, 4,1 mg.mL⁻¹, 5,1 mg.mL⁻¹, 6,1 mg.mL⁻¹) a 5,0 g de solo não contaminado, a fim de obter amostras de solo com concentrações finais de 0,1 mg.g⁻¹, 0,22 mg.g⁻¹, 0,42 mg.g⁻¹, 0,62 mg.g⁻¹, 0,82 mg.g⁻¹, 1,02 mg.g⁻¹ e 1,22 mg.g⁻¹, respectivamente. Após a adição, as amostras foram homogeneizadas por agitação em Mini-Beadbeater-96 por 5 minutos e depois secas em estufa com circulação forçada de ar a 35°C. Para cada concentração final, as amostras foram obtidas em triplicata. A extração do tebutiuron foi realizada posteriormente de acordo com a metodologia já descrita e os extratos foram então analisados por CLAE (método de cromatografia líquida de alta eficiência), para construção da curva de calibração.

A seletividade foi estabelecida por inspeção visual dos picos quando se verificou que o pico de resposta correspondia exclusivamente ao tebutiuron. A linearidade foi observada na faixa de 0,5 a 6,1 mg/mL com base em uma regressão linear, considerando R² maior que 0,98. O limite de detecção foi feito injetando amostras contendo concentrações decrescentes conhecidas do analito. O limite de quantificação definido foi o ponto mínimo na curva de calibração.

Precisão e exatidão foram determinadas *intraday* e *interday* (por 3 dias). Portanto, a precisão para cada amostra fortificada foi determinada com base na estimativa do desvio padrão relativo e a exatidão foi determinada para cada concentração calculando a recuperação relativa das amostras fortificadas.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as médias contrastadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Para as análises, utilizou-se o programa estatístico SISVAR 5.3 (Ferreira, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ESPÉCIES FITORREMEIADORAS

Aos 15 DAS (Figura 1-A), os efeitos sobre o rendimento quântico máximo (Fv/Fm) no tratamento com herbicida indicaram uma mudança significativa na saúde do fotossistema das espécies. Os maiores decréscimos em relação ao tratamento sem herbicida, para esta variável, foram verificados nas espécies *R. sativus*, *C. cajan*, *L. leucocephala*, *C. ensiformis* e *S. obtusifolia*. Em contraste, as espécies menos suscetíveis foram *L. aegyptiaca*, *M. aterrima*, *R. communis*, *C. mucunoides* e *C. spectabilis* com menor decréscimo em relação ao controle.

Em condições normais, o Fv/Fm pode variar de 0,75 a 0,83 para a maioria das espécies não submetidas ao estresse (Maxwell; Johnson, 2000). Neste estudo, foram observadas reduções drásticas de Fv/Fm devido ao efeito do herbicida. Dessa forma, a redução dessa proporção é um excelente indicador do efeito fotoinibitório (Silva et al., 2022).

Recuperação do fotossistema para a razão (Fv/Fm) nas espécies *M. aterrima* e *C. ensiformes* foi observada aos 30 DAS (Figura 1-B), no qual não houve diferença significativa em relação à testemunha. Essa característica está relacionada com a capacidade de algumas plantas se recuperarem de injúrias após a aplicação de herbicidas (Varga et al., 2020). Ressalta-se que nos demais tempos de avaliação (45 e 60 DAS) apenas *M. aterrima* manteve a saúde do fotossistema quando comparada com o tratamento controle (Figura 1-C e 1-D), o que indica a tolerância dessa espécie a esse herbicida na dose aplicada.

O mesmo comportamento das espécies para a variável Fv/Fm foi observado no rendimento quântico efetivo (Rendimento) (Figuras 1 E-H), no qual o uso de herbicida teve efeito altamente significativo em relação ao tratamento controle para todas as espécies avaliadas. Recuperação do rendimento quântico efetivo foi observado para *M. aterrima* e *C. ensiformes* aos 30 e 45 DAS. No entanto, aos 60 DAS, apenas *M. aterrima* manteve as atividades do fotossistema com padrões similares para o tratamento com uso de tebutiuron e com o tratamento controle. Os resultados obtidos demonstram que o nível de interação do herbicida com o local de ação diminui levemente após a intoxicação inicial, porém a planta retorna às suas atividades normais em espécies tolerantes.

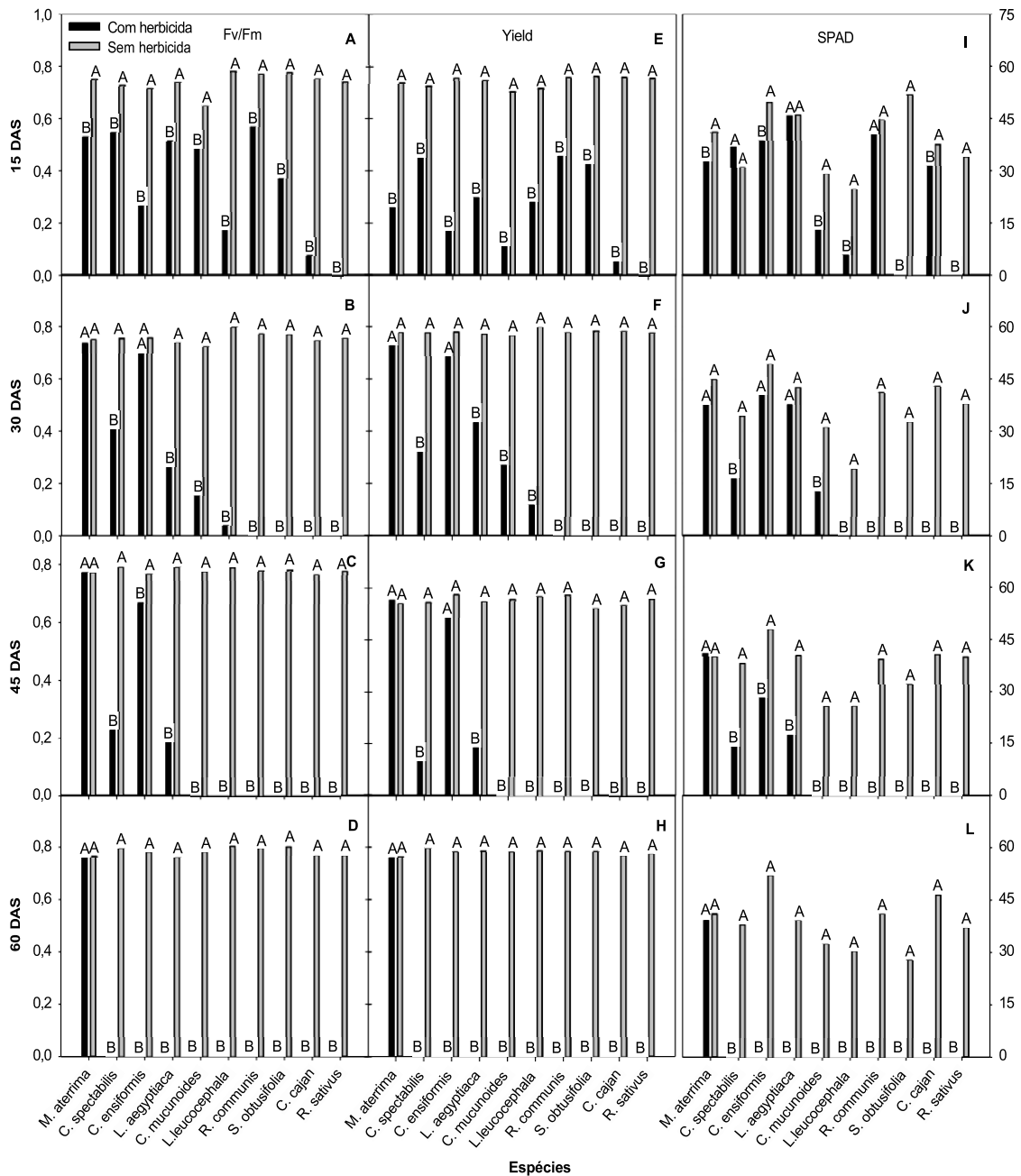


Figura 1. Rendimento quântico máximo (Fv/Fm), efetivo (YIELD) do índice FSII e SPAD das espécies fitorremediadoras nos períodos de avaliação (15, 30, 45 e 60 dias).

Para o índice SPAD, com exceção das espécies *R. communis*, *C. spectabilis* e *L. aegyptiaca*, observou-se diferenças entre os tratamentos aos 15 DAS, com redução nessa variável quando do uso de tebutiuron (Figura 1-I). Recuperação do índice SPAD para o tratamento com uso de herbicida em relação ao tratamento controle foi observado para os demais tempos de avaliação (30, 45 e 60 DAS) (Figura 1-J, 1-K e 1-L) em *M. aterrima*. Essas alterações no metabolismo da planta resultam na degradação das clorofilas, que possuem uma estrutura química instável, sensível à ação de herbicidas. Dessa forma, métodos de

quantificação e estimativa para tais pigmentos são usados como ferramentas de diagnóstico da condição fisiológica da planta (Mandal; Dutta, 2020).

Em relação às variáveis biométricas (Figura 2), aos 15 DAS, com exceção de *C. spectabilis*,

S. obtusifolia e *R. sativus*, as potenciais espécies fitorremediadoras não apresentaram diferença significativa para a altura de plantas (Figura 2-A) em relação ao uso ou não de herbicida no solo. No entanto, para os demais períodos de avaliação, apenas *M. aterrima* manteve esse comportamento (Figura 2-B, 2-C e 2-D), resultados que evidenciam que essa espécie foi a única a não ter seu crescimento influenciado negativamente pela presença de tebutiuron no solo. Destaca-se que aos 60 DAS as demais espécies apresentaram mortalidade total. Padrões similares aos observados para altura de plantas também foram observados para o número de folhas verdes, no qual *M. aterrima* também se destacou, especialmente aos 60 DAS.

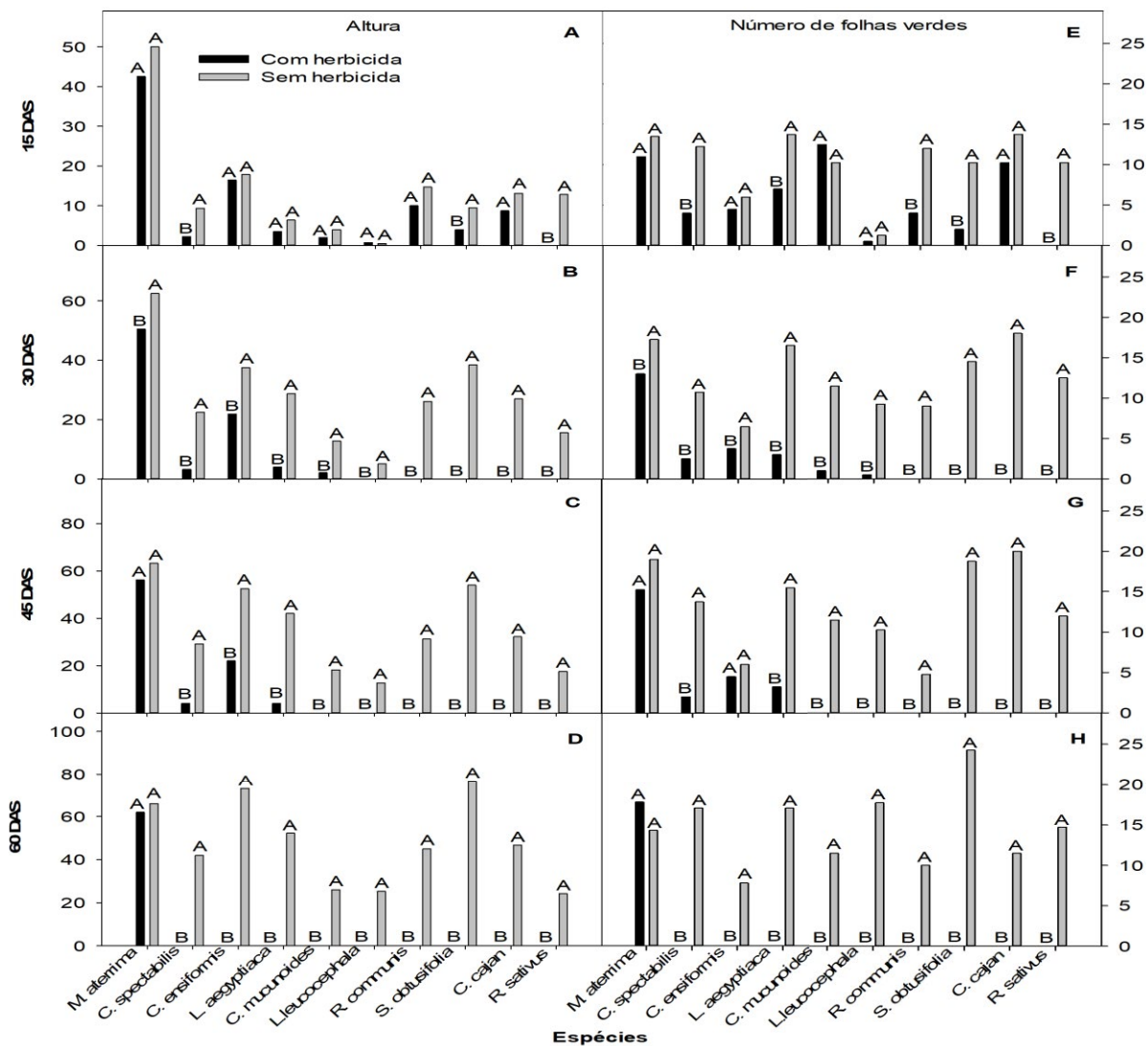


Figura 2. Altura (cm) e número de folhas verdes das espécies fitorremediadoras nos períodos de avaliação (15, 30, 45 e 60 dias).

Esses resultados demonstram a atividade residual no solo de tebutiuron. Achados que estão de acordo com os reportados para *M. aterrima*, *C. cajan* e *C. ensiformes* na dose de 0,5 kg. ha⁻¹ (Pires et al., 2005). Ainda, essa quantidade de herbicida representa um valor provável de ser encontrado no solo após sua aplicação, mesmo que ocorra degradação microbiana e química, além do potencial de lixiviação e da absorção pela cultura (Anderson et al., 1995).

M. aterrima se mostrou tolerante ao tebutiuron no solo, o que é um importante determinante na escolha dessa espécie para cultivo em áreas próximas aos canais onde esse herbicida é comumente encontrado utilizado. Os resultados obtidos com essa planta podem ser explicados pela tolerância que algumas espécies podem ter aos herbicidas, especialmente devido às enzimas que metabolizam esses compostos e podem garantir essa tolerância (Dimaano; Iwakami, 2021).

Resultados promissores com o uso de *M. aterrima* como fitorremediador de tebutiuron no solo também são reportados por Pires et al. (2003b), no qual essa espécie apresentou menor redução na altura da planta e peso da matéria seca da parte aérea em relação ao tratamento controle. Além do tebutiuron, alguns estudos também apontam a eficácia de *M. aterrima* na descontaminação de áreas tratadas com o herbicida trifloxysulfuron-sodium, no qual a interação de fitoestimulação e fitegradação é o provável mecanismo envolvido na descontaminação do solo (Carmo et al., 2008; Santos et al., 2007).

1.1 PEPINO COMO PLANTA BIOINDICADORA

No tocante ao desempenho fisiológico do pepino, aos 15 DAS (Figura 3) já foi possível observar mortalidade dessa espécie no tratamento com uso do herbicida e posteriormente cultivado com *L. aegyptiaca*, *C. mucunoides* e *R. Sativus*, o que indica a presença de tebutiuron em concentrações tóxicas. De modo geral, para as variáveis fisiológicas, o pepino apresentou melhor desempenho quando cultivado em sucessão à *M. aterrima*, no qual a partir dos 30 DAS o tratamento com uso de herbicida não diferiu do tratamento controle (Figura 3).

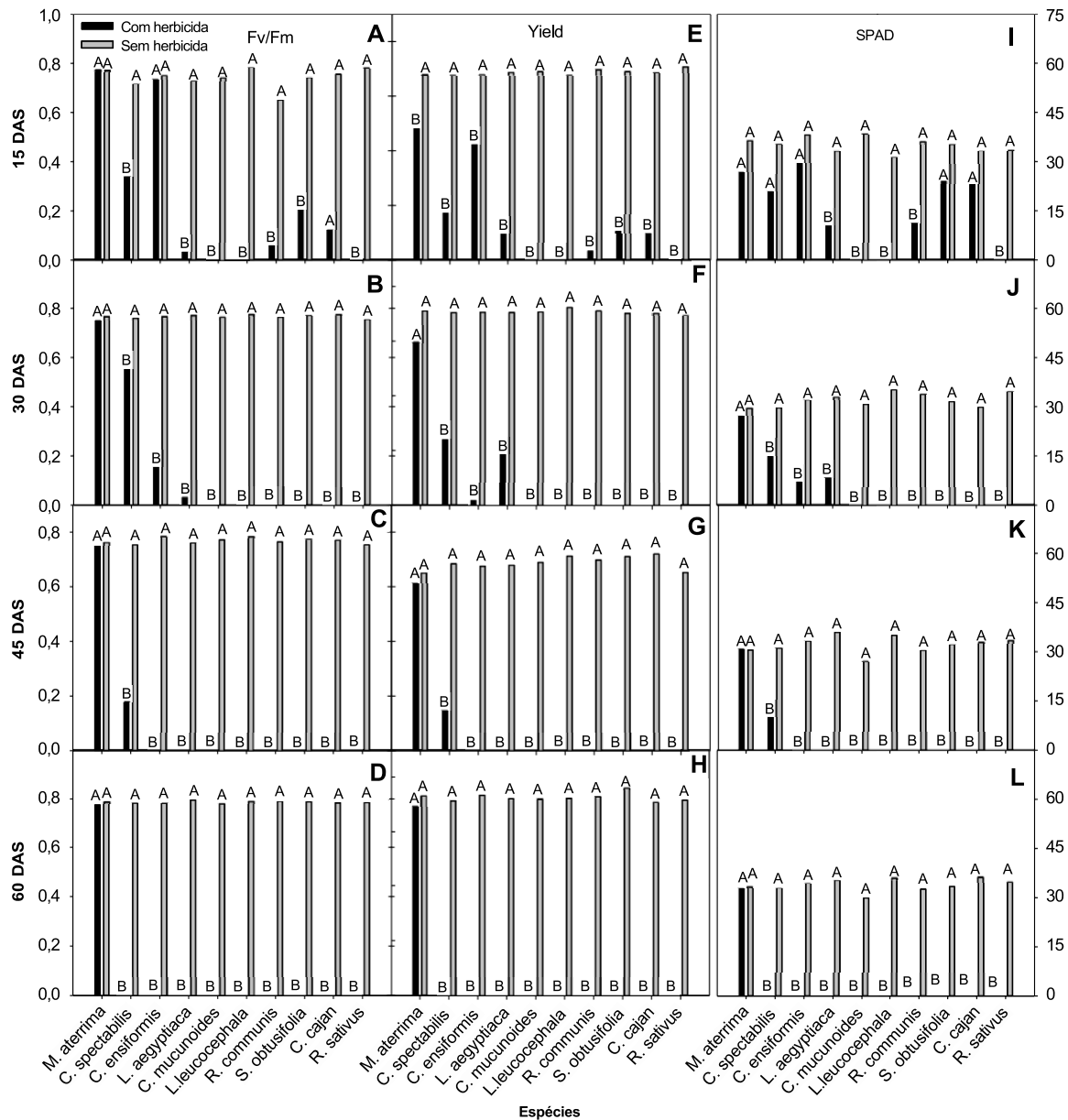


Figura 3. Rendimento quântico máximo (Fv/Fm), efetivo (YIELD) do índice FSII e SPAD do bioindicador pepino ao longo dos períodos de avaliação (15, 30, 45 e 60 dias).

Em relação às variáveis biométricas (Figura 4), tanto para altura (Figura 4 A-D) quanto para número de folhas verdes (Figura 4 E-H), apenas quando cultivado em sucessão à *M. aterrima*, o pepino apresentou desempenho estatisticamente igual entre o tratamento com o uso ou não de tebutiuron em todos os períodos de avaliação.

Esses resultados atestam que nos tratamentos em que não houve remediação do herbicida, ocorreu um desequilíbrio na atividade fotossintética das plantas de pepino, afetando diretamente o seu fotossistema, o que ocasionou a diminuição da sua taxa de desenvolvimento.

M. aterrima foi a potencial espécie fitorremediadora que propiciou menores alterações fotossintéticas do pepino cultivado em sucessão, o que demonstra seu alto potencial fitorremediador em solos com resíduo do herbicida tebutiuron.

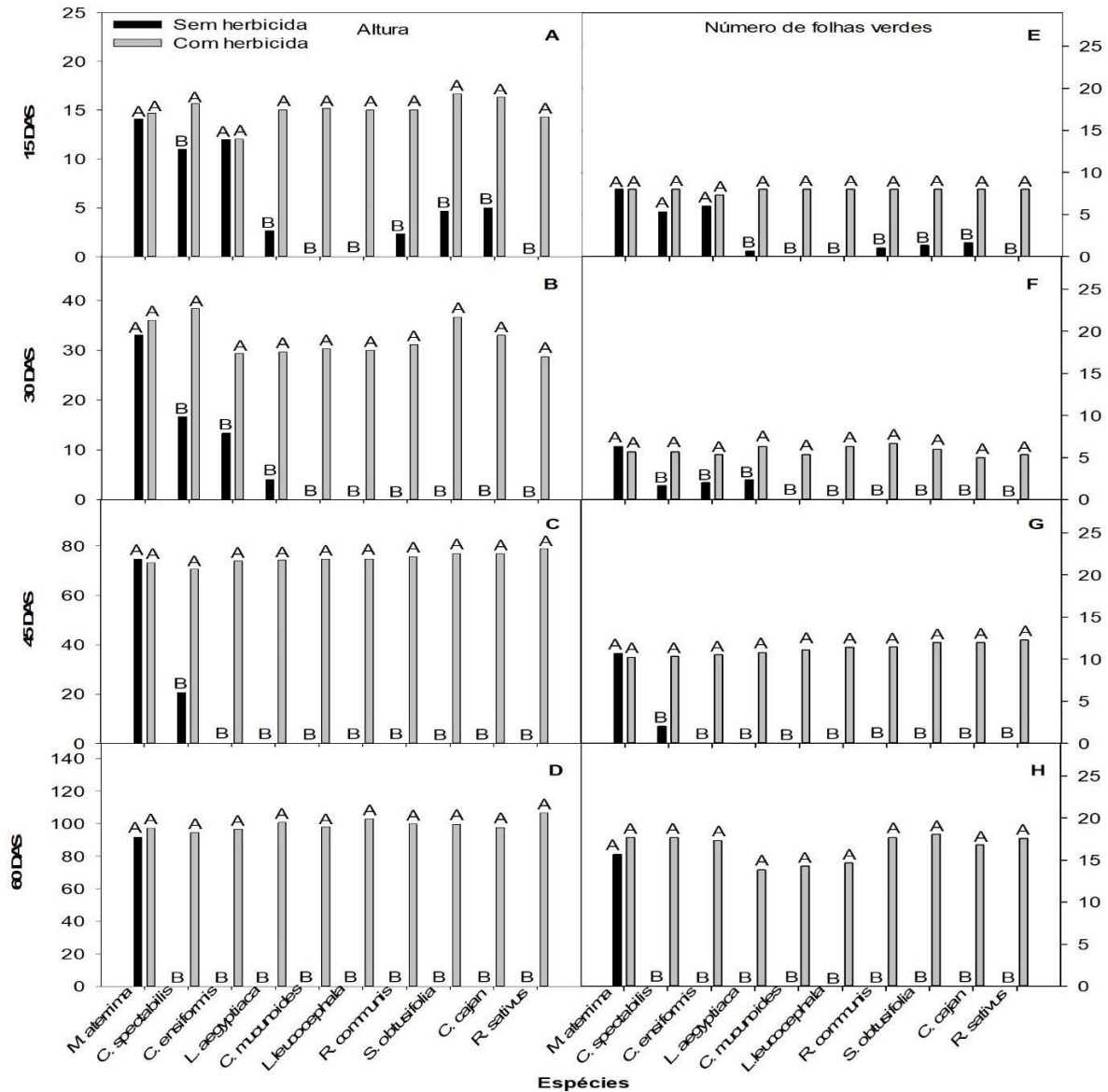


Figura 4. Altura (cm) e número de folhas verdes do pepino bioindicador nos períodos de avaliação (15, 30, 45 e 60 dias).

3.3 FEIJÃO COMO PLANTA BIOINDICADORA

O feijão, como planta bioindicadora cultivada em sucessão à *M. aterrima*, exibiu resultados que indicaram a saúde do fotossistema em todos os momentos de avaliação (Figura 5). Achados que reforçam o potencial de fitorremediação de *M. aterrima*.

Resultados similares também foram observados para o rendimento, no qual apenas o feijão cultivado em sucessão à *M. aterrima* não diferiu da testemunha em todos os períodos de avaliação. Nos demais cultivos da espécie o valor chegou a zero ou houve queda drástica no

valor desta variável com sua posterior morte. A mortalidade das plantas tornou-se visível a partir de 30 dias após o plantio, diferindo significativamente entre as espécies e a testemunha.

O índice SPAD seguiu o mesmo padrão observado para as demais variáveis fisiológicas para o feijão em sucessão à *M. aterrima*, no qual não se obteve diferença significativa entre os tratamentos com e sem herbicida em todos os períodos de avaliação.

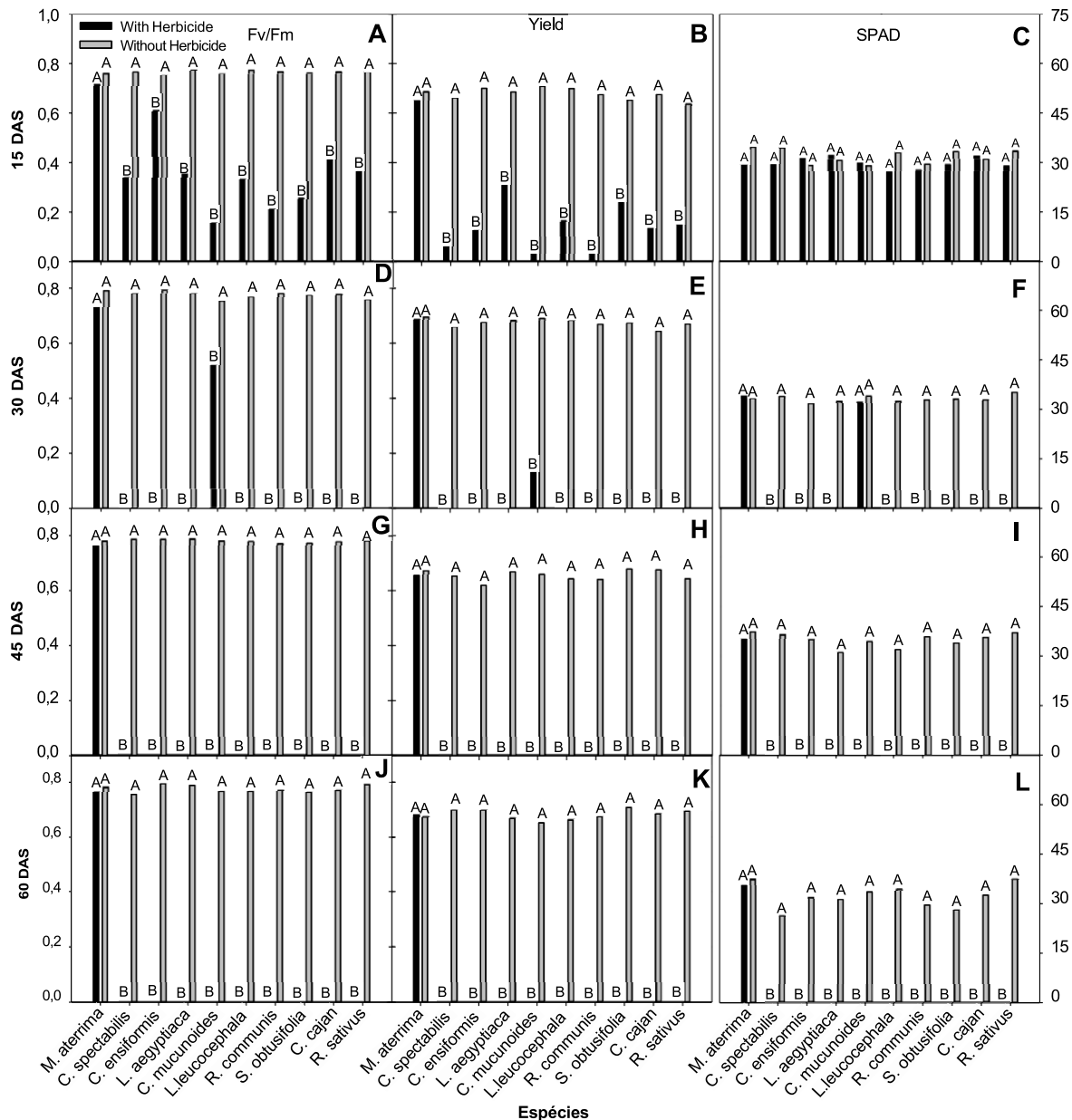


Figura 5. Rendimento quântico máximo (Fv/Fm), efetivo (YIELD) do índice FSII e SPAD dos grãos bioindicadores ao longo dos períodos de avaliação (15, 30, 45 e 60 dias).

Ressalta-se que, embora para essa variável aos 15 DAS (Figura 5-C) o feijão tenha apresentado desempenho estatisticamente igual nos tratamentos com e sem o uso de tebutiuron

ao ser cultivado em sucessão à todas as potenciais espécies fitorremediadoras, a presença de remanescentes desse herbicida no solo proporcionou uma queda drástica nessa variável com a posterior morte dessa leguminosa ao longo das avaliações, com exceção do cultivo em sucessão à *M. aterrima*, o que indica concentrações tóxicas do herbicida no solo dos vasos.

Analisando-se à altura das plantas de feijão, observou-se que aos 15 DAS, apenas as plantas cultivadas em sucessão à *M. aterrima*, *C. ensiformis* e *L. aegyptiaca* não apresentaram diferenças para o uso ou não de tebutiuron (Figura 6-A). No entanto, para os demais intervalos de tempo, apenas *M. aterrima* conseguiu manter esse padrão de crescimento (Figura 6-B a 6- D).

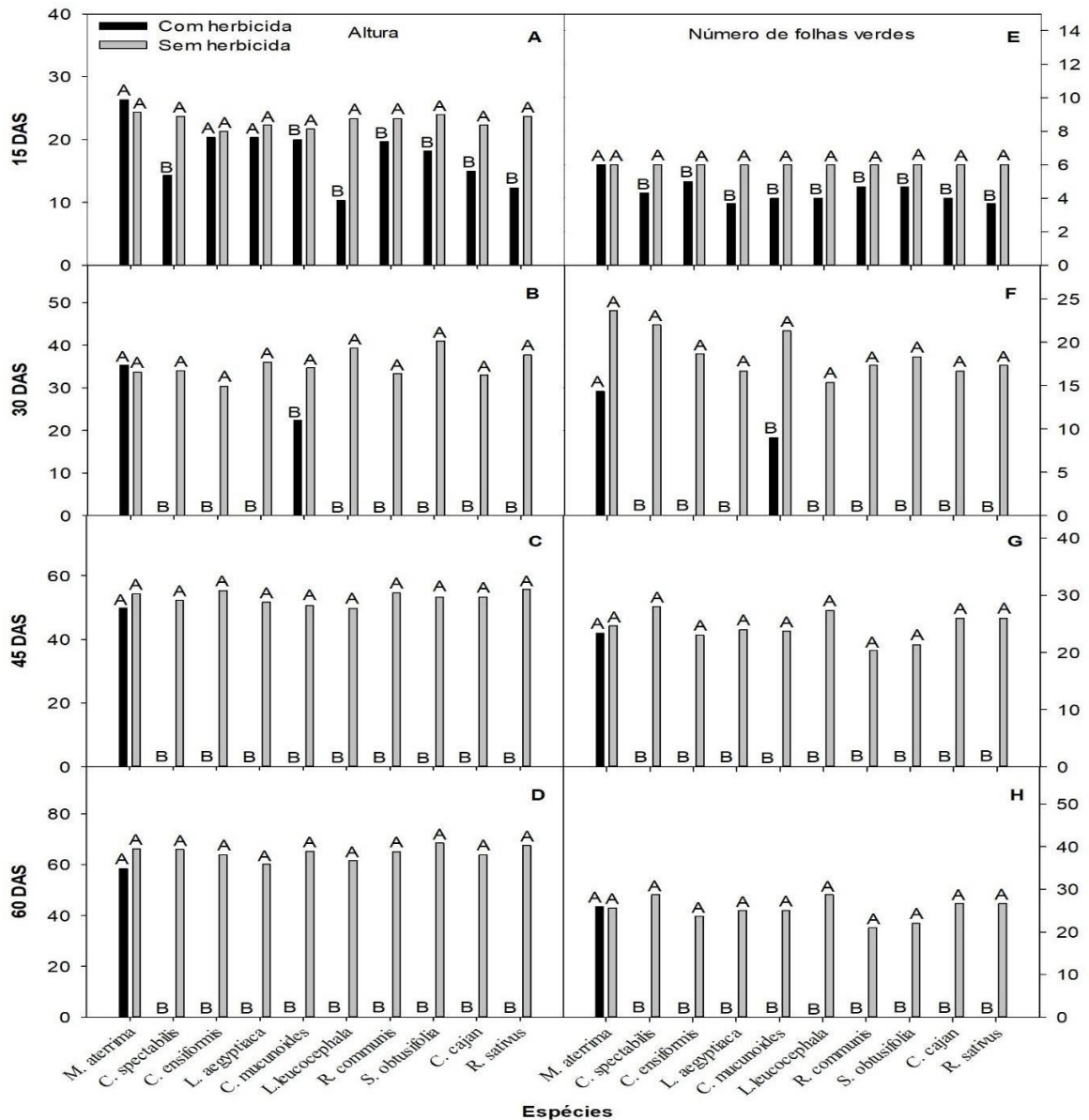


Figura 6. Altura (cm) e número de folhas verdes do feijão bioindicador nos períodos de avaliação (15, 30, 45 e 60 dias).

O número de folhas verdes do feijoeiro cultivado em sucessão à *M. aterrima* também não sofreu influência significativa do uso de herbicida, independentemente do período de avaliação (Figura 6-E a 6-H). Esse fato indica a potencial descontaminação do solo com o uso dessa espécie fitorremediadora. Ainda, esses resultados também demonstraram uma alta sensibilidade do feijão quando na presença de tebutiuron no solo.

3.4 CONCENTRAÇÃO DE TEBUTIURON NO SOLO

Após a retirada das potenciais espécies fitorremediadoras, observou-se redução da concentração de tebutiuron no solo para todas as espécies avaliadas (Figura 7). No entanto, essa redução foi variável a depender da espécie utilizada. Dentre os materiais avaliados, *S. obtusifolia* foi a que propiciou menor redução do teor desse herbicida no solo. Em contraste, o uso de *M. aterrima* levou a um decréscimo de 86,5% da concentração de tebutiuron no solo em relação ao controle positivo.

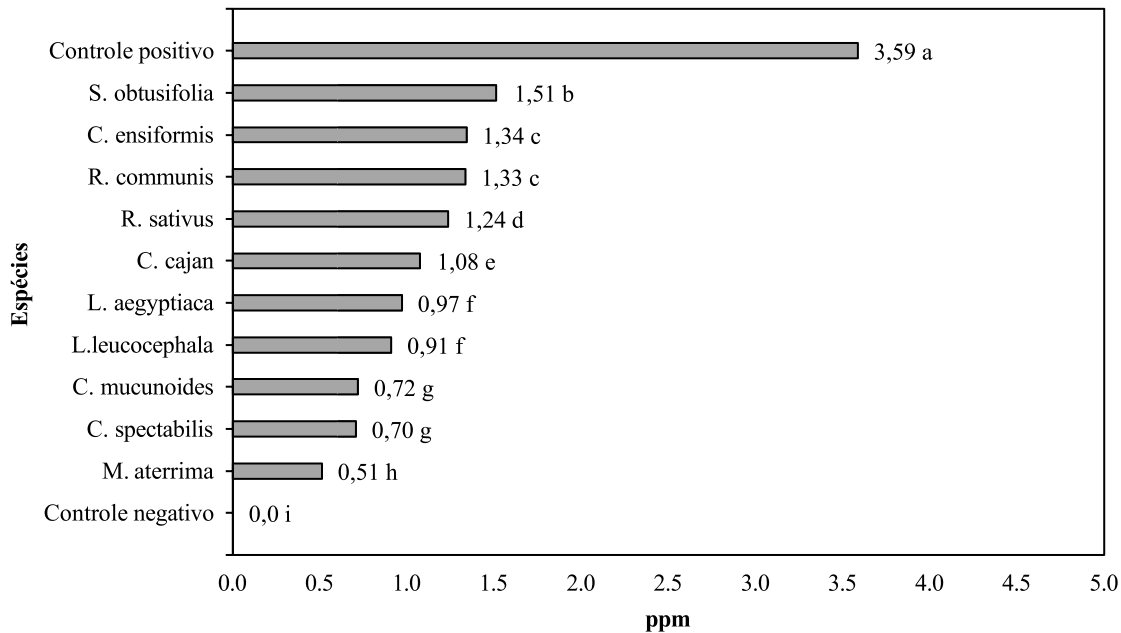


Figura 7. Concentração de tebutiuron no solo após o cultivo de espécies fitorremediadoras, pelo método de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC).

Esses achados atestam a capacidade fitorremediadora de *M. aterrima* em solos contaminados com tebutiuron. Essa espécie propicia esse efeito fitorremediador utilizando o mecanismo da fitoextração, no qual há a extração e acúmulo desses compostos em seus tecidos (Santos et al., 2012).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mucuna aterrima apresenta tolerância a solos contaminados com tebutiuron. Essa espécie apresenta ainda capacidade de fitorremediação desse herbicida, levando a redução da concentração de tebutiuron no solo. O uso de *M. aterrima* propiciou o bom desenvolvimento de *Phaseolus vulgaris* e *Cucumis sativus* cultivados em sucessão a essa espécie fitorremediadora.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Screening rhizosphere soil samples for the ability to mineralize elevated concentrations of atrazine and metolachlor. **Journal of Environmental Science and Health**, v. 30, n. 4, p. 473-484, 1995. Doi: 10.1080/03601239509372948
- CARMO, M. L.; PROCOPIO, S. O.; PIRES, F. R.; CARGNELUTTI FILHO, A.; BARROSO, A. L. L.; SILVA, G. P.; CARMO, E. L.; BRAZ, G. B. P.; SILVA, W. F. P.; BRAZ, A. J. B. P.; PACHECO, L. P. Seleção de plantas para fitorremediação de solos contaminados com picloram. **Planta Daninha**, v.26, n. 2, p. 301-313, 2008. Doi: 10.1590/S0100- 83582008000200006
- DIMAANO, N. G.; IWAKAMI, S. Cytochrome P450-mediated herbicide metabolism in plants: current understanding and prospects. **Pest management science**, v. 77, n. 1, p. 22-32, 2021. Doi:10.1002/ps.6040
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, p. 1039-1042, 2011. Doi: 10.1590/S1413-70542011000600001

FERREIRA, L. C.; MOREIRA, B.; MONTAGNOLLI, R. N.; PRADO, E. P.; VIANA, R.; TOMAZ, R. S.; CRUZ, J. M.; BIDOIA, E. D.; FRIAS, Y. A.; LOPES, P. Green Manure Species for Phytoremediation of Soil With Tebuthiuron and Vinasse. **Frontiers in bioengineering and biotechnology**, n. 8, v. 613642, 2021. Doi:10.3389/fbioe.2020.613642

GUIMARÃES, A. C. D.; PAULA, D. F. DE; MENDES, K. F.; SOUSA, R. N. DE; ARAÚJO, G. R.; INOUE, M. H.; TORNISIELO, V. L. Can soil type interfere in sorption-desorption, mobility, leaching, degradation, and microbial activity of the ¹⁴C-tebuthiuron herbicide? **Journal of Hazardous Materials Advances**, n. 6, p. 1-12, 2022. Doi:10.1016/j.hazadv.2022.100074

KHAFFAGY, A.E.; MAZROU, Y.S.A.; MORSY, A.R.; EL-MANSOURY, M.A.M.; EL-TOKHY, A.I.; HAFEZ, Y.; ABDELAAL, K.; KHEDR, R.A. Impact of Irrigation Levels and Weed Control Treatments on Annual Weeds. Physiological Traits and Productivity of Soybean under Clay Soil Conditions. **Agronomy**, n. 12, v. 1037, 2022. Doi: 10.3390/agronomy12051037

KOPITTKE, P. M.; BLAMEY, F. P. C.; ASHER, C. J.; MENZIES, N. W. Trace metal phytotoxicity in solution culture: a review. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 4, p. 945–954, 2010. Doi: 10.1093/jxb/erp385

KRÄHMER, H.; WALTER, H.; JESCHKE, P.; HAAF, K.; BAUR, P.; EVANS, R. What makes a molecule a pre- or a post-herbicide - how valuable are physicochemical parameters for their design? **Pest management science**, v. 77, n. 11, p. 4863–4873, 2021. Doi: 10.1002/ps.6535

KUMAR, N.; NATH, C. P.; HAZRA, K. K.; PRAHARAJ, C. S.; SINGH, S. S.; SINGH, N. P. Long-term impact of zero-till residue management in post-rainy seasons after puddled rice and cropping intensification on weed seedbank, above-ground weed flora and crop productivity. **Ecological engineering**, n. 176, p. e106540, 2022. Doi: 10.1016/j.ecoleng.2022.106540

MANDAL, R.; DUTTA, G. From photosynthesis to biosensing: Chlorophyll proves to be a versatile molecule. **Sensors International**, v. 1, p. e100058, 2020. Doi: 10.1016/j.sintl.2020.100058

MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll fluorescence a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 345, p. 659-668, 2000. Doi: 10.1093/jexbot/51.345.659

MONTEIRO, A.; SANTOS, S. Sustainable Approach to Weed Management: The Role of Precision Weed Management. **Agronomy**, v. 12, n. 1, p. 118, 2022. Doi: 10.3390/agronomy12010118

PAZ, L. B.; GALLO, A. S.; SOUZA, R. L.; OLIVEIRA, L. V. N.; CUNHAV, C.; SILVA, R. F. Desempenho e produtividade do milho safrinha em consórcio com leguminosas em sistema orgânico. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 4, p. 100-109, 2017. Doi: 10.19084/RCA16240

PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A.; CECON, P. R.; PROCÓPIO, S. O.; SANTOS, J. B., FERREIRA, L. R. Fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron utilizando-se espécies cultivadas para adubação verde. **Planta Daninha**, v. 23, n. 4, p. 711-717, 2005. Doi: 10.1590/S0100-83582005000400020

PIRES, F. R.; SOUZA, C.; SILVA, A.; PROCÓPIO, S.; FERREIRA, L. Fitorremediação de Solos Contaminados Com Herbicidas. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 335-341, 2003. Doi:10.1590/s0100-83582003000200020.

SANTOS, C. H.; GARCIA, A. L. O.; CALONEGO, J. C.; TIRITAN, C. S.; RIGOLIN, I. M.; SPÓSITO, T. H. N. Desempenho da mucuna preta (*Mucuna aterrima* Piper & Tracy) na fitorremediação de solo contaminado com chumbo. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 6, n. 3, 215-221, 2013. Doi: 10.18227/1982-8470ragro.v6i3.705

SANTOS, E. A.; SANTOS, J. B.; FERREIRA, L. R.; COSTA, M. D.; SILVA, A. A. Fitoestimulação por *Stizolobium aterrimum* como processo de remediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v. 25, n. 2, p. 259-265, 2007. Doi: 10.1590/S0100-83582007000200004

SILVA, C. T.; ROJAS-CHAMORRO, J. A.; BARROSO, G. M.; SANTOS, M. V.; EVARISTO, A. B.; SILVA, L. D.; GALIANO, E. C.; SANTOS, J. B. D. Crops with potential for diclosulam remediation and concomitant bioenergy production. **International Journal of Phytoremediation**, v. 11, n. 1, p. 1-8, 2022. Doi: 10.1080/15226514.2022.2074363

VARGA, M.; ZURGA, P.; BRUSIĆ, I.; HORVATIĆ, J.; MOSLAVAC, M. Growth inhibition and recovery patterns of common duckweed *Lemna minor* L. after repeated exposure to isoproturon. **Ecotoxicology**, v. 29, n. 9, p. 1538-1551, 2020. Doi: 10.1007/s10646-020-02262-9

VARSHNEY S.; HAYAT S.; ALYEMENI, M. N.; AHMAD, A. Effects of herbicide applications in wheat fields: is phytohormones application a remedy? **Plant Signaling & Behavior**, v. 7, n. 5, p. 570-575, 2012. DOI: 10.4161/psb.19689.