



# Herbicide-induced hormesis and its effect on crop development

## *Hormesis induzida por herbicidas e seu efeito no desenvolvimento das culturas*

Glauber Ferreira Barreto\*<sup>1</sup>; José Maria Arcanjo Alves<sup>2</sup>; Paulo Roberto Ribeiro Rocha<sup>2</sup>; Deyse Cristina Oliveira da Silva<sup>3</sup>; Thaís Santiago Castro<sup>1</sup>; José de Anchieta Alves de Albuquerque<sup>1</sup>; Sonicley da Silva Maia<sup>1</sup>; Leandro Torres de Souza<sup>2</sup>

**Abstract:** The beneficial effect of growth stimulation caused by low doses of a toxic product such as an herbicide, is due to the phenomenon known as hormesis. Plants affected by this phenomenon show changes in their metabolism and, as a result, are able to increase nutrient absorption and biomass accumulation. Various herbicides have been developed as growth regulators, proving the hormesis hypothesis. The most notable example is the product 2,4-D, originally developed as auxin. This phenomenon can bring benefits for crops, such as increased yield. However, for the technique to be applied in practice, information is still needed to support its potential application in agriculture. The aim of this review was to define the state of the art and measure the effect of the hormesis phenomenon of herbicides in agriculture. To carry out a bibliographical review using the following databases: SciELO, Scopus, Web of Science, Redalyc, EBSCO, and DOAJ. The quality of the studies was assessed using eligibility, inclusion and exclusion criteria, employing the following indexing terms: dichlorophenoxyacetic acid, herbicide subdose, herbicide toxicity, and growth regulator. Based on a summary of the studies identified via electronic or manual searches relating to the phenomenon of hormesis, it was found that the literature on the subject remains ambiguous, with no consensus regarding the real effects of the phenomenon on crop performance. This article further argues that the magnitude of the hormetic effect on crops depends on several factors, such as the subdose, the age of the plant, and other conditions.

**Key words:** Growth stimulus. Glyphosate. Herbicide subdose. 2,4-D.

**Resumo:** O efeito benéfico de estímulo ao crescimento, causado por baixas doses de um produto tóxico, como um herbicida, é ocasionado pelo fenômeno conhecido como hormesis. As plantas afetadas por esse fenômeno apresentam alterações em seu metabolismo e, conseqüentemente, podem aumentar a absorção de nutrientes e o incremento de biomassa. Diversos herbicidas foram desenvolvidos como reguladores de crescimento, comprovando a hipótese da hormesis. O exemplo mais notável é o produto 2,4-D, originalmente desenvolvido como auxina. Esse fenômeno pode trazer benefícios para as culturas, como aumento no rendimento. No entanto, para que essa técnica seja aplicada na prática, ainda são necessárias informações que sustentem seu potencial de aplicação na agricultura. Assim, objetivou-se com essa revisão demarcar o estado da arte e dimensionar o efeito do fenômeno hormesis de herbicidas na agricultura. As bases empregadas para obter as pesquisas foram: SciELO, Scopus, Web of Science, Redalyc, EBSCO e DOAJ. A qualidade dos estudos foi avaliada pelos critérios de elegibilidade, inclusão e exclusão, utilizando os seguintes termos de indexação: ácido diclorofenoxiacético; subdoses de herbicidas; toxicidade de herbicidas; regulador de crescimento. Com base na sumarização dos estudos identificados por meio da busca eletrônica ou manual sobre o fenômeno da hormesis, foi possível constatar que a literatura sobre o tema permanece ambígua, sem consenso a respeito dos reais efeitos desse fenômeno no desempenho das culturas. Além disso, o artigo discute que a magnitude do efeito hormesis nas culturas depende de diversos fatores, como: subdose, idade da planta e outras condições.

**Palavras-chave:** Estímulo de crescimento. Glyphosate. Subdose de herbicida. 2,4-D.

\*Corresponding author

Submitted for publication on 29/03/2023, approved on 26/05/2023 and published on 20/07/2023

<sup>1</sup> Doutorandos do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, POSAGRO/UFRR, Boa Vista, RR, Brasil, CEP 68.300-000. E-mails: [glauberfbarreto@gmail.com](mailto:glauberfbarreto@gmail.com); [thaiscastro.agr@gmail.com](mailto:thaiscastro.agr@gmail.com); [sony\\_maia@hotmail.com](mailto:sony_maia@hotmail.com)

<sup>2</sup> Prof. Dr. Programa de Pós-Graduação em Agronomia-POSAGRO. Universidade Federal de Roraima. E-mails: [arcanjo.alves@ufr.br](mailto:arcanjo.alves@ufr.br); [paulo.rocha@ufr.br](mailto:paulo.rocha@ufr.br); [jose.albuquerque@ufr.br](mailto:jose.albuquerque@ufr.br); [leandro.torres@ufr.br](mailto:leandro.torres@ufr.br)

<sup>3</sup> Doutora em Agronomia. E-mail: [deyse.cris@hotmail.com](mailto:deyse.cris@hotmail.com)

## INTRODUCTION

The hormesis phenomenon is characterised by a biphasic curve, occurring as a direct stimulatory reaction to low levels of a phytotoxic agent or through a compensatory response to an imbalance in homeostasis. For example, when a plant is exposed to low doses of a substance considered toxic, the result is growth stimulation, seen as a response at the hormetic level that is expressed as a stimulus at low doses and inhibition at high doses (CALABRESE; BLAN, 2011).

The hormetic effect alters the metabolism of a plant, and may stimulate growth, nutrient absorption, biomass accumulation, leaf area, protein content, sugar levels, and an increase in crop production (VELINI *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2009; EL-SHAHAWY; SHARARA, 2011; RABELLO *et al.*, 2012; AMÉRICO *et al.*, 2016).

Several herbicides have been developed as growth regulators, corroborating the hormesis hypothesis. The most noteworthy example is the herbicide dichlorophenoxyacetic acid (2,4D), originally developed as auxin and which, at high doses, has an herbicidal effect (MOUSDALE; COGGINS, 1991). Another herbicide that has been studied for the hormesis effect is glyphosate.

Glyphosate, whose predecessor, glyphosine (the molecule used for ripening and growth regulation in plants), has demonstrated a hormonal effect in various plants (SOUZA *et al.*, 2014). The hormetic mechanism associated with glyphosate is related to the partial inhibition of enol-pyruvyl-shikimate-3-phosphate (EPSPs). The transgenics soya and maize, for example, both resistant to glyphosate, do not show the growth stimulation seen in susceptible species (VELINI *et al.*, 2008).

Responses to low doses of synthetic auxins have been investigated by researchers for decades for their effect on plant growth. Studies with 2,4-D have demonstrated the hormetic response in plants. As such, research focused on increasing production through the activity of auxin should clarify and explore the hormetic responses related to certain plant characteristics (CEDERGREEN *et al.*, 2007).

## INTRODUÇÃO

O fenômeno hormesis caracteriza-se por uma curva bifásica, ocorrendo mediante a reação estimulatória direta em baixas taxas de um fitotóxico ou através da resposta compensatória ao desequilíbrio na homeostase. Por exemplo, quando uma planta é exposta a baixas doses de uma substância considerada tóxica, ocorre um estímulo no crescimento, configurando-se como um fenômeno de nível resposta hormética, que é evidenciado por estímulos com baixas doses e inibição a altas doses (CALABRESE; BLAIN, 2011).

O efeito hormesis modifica o metabolismo das plantas, podendo estimular: crescimento, absorção de nutrientes, acúmulo de biomassa, área foliar, teor proteico, níveis de açúcares e aumento na produção da cultura (VELINI *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2009; EL-SHAHAWY; SHARARA, 2011; RABELLO *et al.*, 2012; AMÉRICO *et al.*, 2016).

Diversos herbicidas foram desenvolvidos como reguladores de crescimento, corroborando a hipótese de hormesis. O exemplo mais notório é o herbicida ácido diclorofenoxiacético (2,4-D), originalmente desenvolvido como auxina e que, em doses elevadas, possui efeito herbicida (MOUSDALE; COGGINS, 1991). Outro herbicida que vem sendo estudado quanto ao efeito hormesis é o glyphosate.

O glyphosate, cujo antecessor, glifosina (molécula utilizada para maturação e regulação de crescimento em plantas), já demonstrou efeito hormonal em diversas plantas (SOUZA *et al.*, 2014). O mecanismo de hormesis, associado ao glyphosate, tem sido relacionado à inibição parcial da enol-piruvil-shikimato-3-fosfato (EPSPs). A soja e o milho transgênico, por exemplo, são resistentes ao glyphosate não apresentam estímulo de crescimento, o que é observado em espécies suscetíveis (VELINI *et al.*, 2008).

As respostas a baixas doses de auxinas sintéticas têm sido investigadas por pesquisadores há décadas quanto ao seu efeito sobre o crescimento das plantas. Estudos com 2,4-D têm evidenciado respostas horméticas em plantas. Desse modo, as respostas horméticas relativas a determinadas características da planta poderiam ser elucidadas e exploradas com estudos focados no aumento da produção através da atividade de auxina (CEDERGREEN *et al.*, 2007).

In research carried out with maize, conventional soya, eucalyptus, pine and *Commelia benghalensis*, Velini *et al.* (2008) found that there was a suboptimal dose of glyphosate for each species they studied, and that the subdoses that promoted greater growth were also responsible for the highest level of shikimic acid (a product formed by degradation of the target enzyme of the herbicide), suggesting that the hormetic effect of glyphosate may be related to its mechanism of action.

Research on hormesis has shown conflicting results, revealing the need for greater understanding and investigation of this phenomenon in agriculture. Studies have shown that subdoses of herbicides, such as 2,4-D, can promote an increase in the productivity of cotton lint, in plant height, the number of reproductive branches and bolls per plant, and stem diameter (AMÉRICO *et al.*, 2016), whereas subdoses of glyphosate had no beneficial effects on the common bean (SILVA *et al.*, 2012). In this respect, the aim of this review was to define the state of the art and measure the effect of the hormesis phenomenon of herbicides in agriculture.

## HORMESIS: AN OVERVIEW

The term hormesis, derived from the Greek ‘*hormo*’ meaning ‘to excite’, was first described by researchers Southam and Erlich in 1943. They observed a biphasic response in fungi exposed to treatment with different doses of a compound derived from the bark of the red cedar, stimulating fungal growth at low doses and inhibiting it at high doses of the same compound (SAGAN, 1991; BELTZ; DUKE, 2014).

When plants are exposed to low doses of a chemical compound, the responses are distinct and can be divided into two parts. The first, monophasic, presents no relevant changes, and results in inhibition at high doses only. The second part of the low-dose response may be marked by changes in intermediate responses prior to the inhibition caused by high doses (BELZ *et al.*, 2018).

Pesquisa realizada por Velini *et al.* (2008), com milho, soja convencional, eucalipto, plantas de pinus e *Commelia benghalensis*, revelaram que houve uma dose subótima do glyphosate para cada espécie estudada, e as subdoses que promoveram maior crescimento, também, foram responsáveis pelo maior nível de ácido chiquímico (produto formado pela degradação da enzima alvo do herbicida), indicando que o efeito hormesis do glyphosate pode estar relacionado com seu mecanismo de ação.

Pesquisas sobre hormesis têm apresentado resultados conflitantes, revelando a necessidade de maior entendimento e investigação desse fenômeno na agricultura. Estudos têm demonstrado que subdoses de herbicidas, como o 2,4-D, podem promover aumento na produtividade do algodão em pluma, na altura da planta, no número de ramos reprodutivos e de capulhos por planta e no diâmetro do caule (AMÉRICO *et al.*, 2016), enquanto subdoses de glyphosate não proporcionaram efeitos benéficos para cultura do feijão comum (SILVA *et al.*, 2012). Nesse contexto, objetivou-se com essa revisão demarcar o estado da arte e dimensionar o efeito do fenômeno hormesis de herbicidas na agricultura.

## HORMESIS: UMA VISÃO GERAL

O termo hormesis, originado do do grego “*hormo*” que significa “excitar”, foi descrito pela primeira vez pelos pesquisadores Southam e Erlich em 1943. Eles observaram uma resposta bifásica de fungos expostos a tratamento com diferentes doses de composto derivado da casca do cedro vermelho, estimulando o crescimento dos fungos em baixas doses e inibindo em altas doses do mesmo composto (SAGAN, 1991; BELTZ; DUKE, 2014).

Quando vegetais são expostos a baixas doses de um composto químico, as respostas apresentadas são distintas e podem ser classificadas em duas partes. A primeira, monophasica, não apresenta mudanças relevantes, resultando somente em inibição em doses elevadas. A segunda parte da resposta de baixa dose pode ser marcada por alterações nas respostas intermediárias, antes da inibição por doses elevadas (BELZ *et al.*, 2018).

The biphasic response that the concept of hormesis presents, described by Southam and Erlich in 1943, had its toxicological origin established in the 16th century by Aureolus Philippus Theophrastus Bombastus von Hohenheim (1493-1541), also known as Paracelsus, famous for his statement “Each substance is a poison and not a poison; only the dose differentiates the poison from the remedy” (DUKE *et al.*, 2006). This precept made it possible to establish a safety margin when using toxic substances at subdoses, and contributed to the development of other scientific areas based on research into different substances, compounds and elements considered toxic, but which, at reduced doses, have a hormetic effect.

Peak stimulation is reached during the biphasic part of the dose-response where inhibition occurs at high doses, resulting in a protective adaptive response driven by chemical stressors. When used at low doses in plants, they lead to better performance, increasing cellular defences and reestablishing cellular homeostasis (BERRY III; LÓPEZ-MARTÍNEZ, 2020).

The most important patterns used to model the biphasic part of the dose-response are those elaborated by Brain and Cousens (1989), and Cedergreen *et al.* (2005). Through the reparameterisation of these patterns, quantitative attributes can be obtained, such as:  $ED_{50}$  (the dose causing 50% inhibition),  $ED_{110}$  (the dose stimulating 110% of the control),  $M$  (the dose causing maximum stimulation),  $LDS$  (the threshold dose for stimulation),  $YMAX$  (maximum stimulatory response, toxic potency, hormetic dose zone) and  $dist_2$  (distance between  $M$  and  $LDS$ ) (BELZ; PIEPHO, 2012; BELZ; PIEPHO, 2015).

There are different opinions among researchers regarding the hormesis effect. Some consider hormesis as an induced adaptive response, while others believe that it occurs independently, possibly causing less development in another part of the plant that does not present hormesis (SILVA; MEDES, 2021). The consensus is that the hormesis effect originates in different stimuli that vary according to the plant species, the time the agent is applied, the type of chemical molecule applied, and the manner in which the agent acts on the metabolic process of the plant (REIS *et al.*, 2021).

A resposta bifásica que o conceito hormesis apresenta, descrita por Southam e Erlich em 1943, teve sua origem toxicológica estabelecida no século XVI, por Aureolus Philippus Theophrastus Bombastus von Hohenheim (1493-1541), também conhecido como Paracelsus, célebre pela sua declaração “Toda substância é veneno e não veneno, sendo a dose correta que diferencia o medicamento do veneno” (DUKE *et al.*, 2006). Esse preceito, declarado por Paracelsus, permitiu estabelecer uma margem de segurança para o uso de substâncias tóxicas em subdoses e contribuiu para o desenvolvimento de outras áreas científicas, a partir da pesquisa de diferentes substâncias, compostos e elementos considerados tóxicos, mas que, em doses reduzidas, apresentam efeito hormesis.

O auge da estimulação é alcançado na parte bifásica da dose-resposta, onde ocorre a inibição em doses altas, resultando em uma resposta adaptativa protetora motivada por estressores químicos. Quando usados em doses baixas nos vegetais, levam a um melhor desempenho, aumentando as defesas celulares e reestabelecendo a homeostase celular (BERRY III; LÓPEZ-MARTÍNEZ, 2020).

Os padrões mais relevantes utilizados para modelar a parte bifásica da dose-resposta são aqueles elaborados por Brain e Cousens (1989) e Cedergreen *et al.* (2005). Por meio da reparametrização desses padrões pode-se obter atributos quantitativos, como:  $ED_{50}$  (dose que causa 50% de inibição),  $ED_{110}$  (dose que provoca estimulação de 110% do controle),  $M$  (dose que causa estimulação máxima),  $LDS$  (dose limite para estimulação),  $YMAX$  (resposta estimulatória máxima, potência tóxica, zona de dose hormética) e  $dist_2$  (distância entre a dose  $M$  e  $LDS$ ) (BELZ; PIEPHO, 2012; BELZ; PIEPHO, 2015).

Com relação ao efeito hormesis, existem diferentes opiniões entre os pesquisadores. Alguns consideram a hormesis como uma resposta de adequação induzida, enquanto outros acreditam que ela acontece independentemente, podendo ocasionar menor desenvolvimento de outra parte do vegetal que não apresentou hormesis (SILVA; MEDES, 2021). Assim, o consenso é de que o efeito hormesis tem origem de estímulos diversos que variam em função da espécie vegetal, época em que o agente é aplicado, tipo de molécula química aplicada e forma como o agente atua no processo metabólico do vegetal (REIS *et al.*, 2021).

Research carried out in several areas of science has confirmed the hormetic effect caused by various substances in different organisms. The hormetic effect of UV-C irradiation, when used on strawberries and grapes, improved the properties of bioactive compounds, increasing the levels of anthocyanins, antioxidants and stilbenes (resveratrol) (CANTOS *et al.*, 2003; ERKAN *et al.*, 2008; JAGADEESH *et al.*, 2011). An increase was also seen in the stem diameter, total dry matter and leaf dry matter of coffee plants (CARVALHO *et al.*, 2013).

The stimulation of photosynthetic activity caused by the hormetic effect in eucalyptus and barley was also seen by Cedergreen and Olesen (2010), and Machado *et al.* (2010). Under stress resulting from the action of herbicides, the chlorophyll content is affected indicating damage, verified symptomatically as chlorosis in the leaf of the plant (CATUNDA *et al.*, 2005).

The earliest research carried out with the aim of studying the hormesis effect of herbicides appeared shortly after the Second World War (DUKE *et al.*, 2006). Nowadays, agricultural crops in contact with low doses of chemical molecules in the field, when not intentional, occurs either due to drift when applying a given product, contact between the target leaves of the weeds and the non-target leaves of the crop, or even the absorption of a low concentration of these molecules from the soil solution.

The principal herbicides used to cause the hormesis effect are auxin, 2,4-dichlorogenoxyacetic acid (2,4-D), and glyphosate, an inhibitor of the EPSPs enzyme (MORAES *et al.*, 2020; MARQUES *et al.*, 2020). However, despite the various studies that take into account the hormesis of herbicides in cultivated plants, to date, the physiological mechanisms of this phenomenon are not fully understood, and are possibly related to an attempt at physiological adaptation in response to the disturbance caused by the chemical molecules (REIS *et al.*, 2021).

Pesquisas realizadas em várias áreas das ciências verificaram o efeito hormesis ocasionado por diversas substâncias em diferentes organismos. O efeito hormético da irradiação UV-C, em morango e uva, melhorou as propriedades dos compostos bioativos, aumentando os níveis de antocianina, antioxidantes e estilbenos (resveratrol) (CANTOS *et al.*, 2003; ERKAN *et al.*, 2008; JAGADEESH *et al.*, 2011). Na cultura do café, também, observou-se incremento no diâmetro do caule, na massa de matéria seca total e na massa de matéria seca das folhas (CARVALHO *et al.*, 2013).

O estímulo da atividade fotossintética ocasionado pelo efeito hormesis em plantas de eucalipto e de cevada também foi observado por Cedergreen e Olesen (2010) e Machado *et al.* (2010). Em estresse decorrente da ação de herbicidas, o teor de clorofila é afetado, sendo esse fato um indicativo de dano, sintomaticamente verificado na forma de clorose na folha da planta (CATUNDA *et al.*, 2005).

Os primeiros trabalhos que foram realizados com o objetivo de estudar o efeito hormesis de herbicidas apareceram logo após a segunda guerra mundial (DUKE *et al.*, 2006). Nos dias atuais, o contato das culturas agrícolas com baixas doses de moléculas químicas nas lavouras, quando não intencional, ocorre pela deriva no instante da aplicação de um determinado produto, quando há o contato das folhas-alvo das plantas daninhas com folhas-não-alvo das culturas ou até quando ocorre a absorção de uma concentração baixa dessas moléculas presentes na solução do solo.

Os principais herbicidas utilizados para ocasionar o efeito hormesis são: auxínico, ácido 2,4-diclorogenoxiacético (2,4-D) e herbicida glyphosate, inibidor da enzima EPSPs (MORAES *et al.*, 2020; MARQUES *et al.*, 2020). No entanto, mesmo com as várias pesquisas que levam em consideração a hormesis de herbicidas nas plantas cultivadas, até o presente, os mecanismos fisiológicos desse fenômeno não são totalmente esclarecidos, podendo ser relacionados a uma tentativa de adaptação fisiológica em resposta a perturbação causada pelas moléculas químicas (REIS *et al.*, 2021).

## HORMETIC EFFECT OF GLYPHOSATE HERBICIDE

Glyphosate (N-Phosphonomethyl-glycine) is one of the most marketed herbicides in the world by volume applied and area treated. Not only is this largely because almost 80% of the cultivated area worldwide contains transgenic crops, such as maize and soya, which are resistant to glyphosate (GR), but also due to its broad spectrum control of annual and perennial, mono- and dicotyledonous plants. As such, farmers are able to control all the weeds in any RG crop using just one herbicide, which reduces costs and labour (BENBROOK, 2016; DAYAN *et al.*, 2019; AGOSTINI *et al.*, 2020).

Currently, the herbicide is manufactured in different formulations, such as isopropylamine salt, dimethylamine, ammonium, and potassium. It is a systemic herbicide, translocated mainly via the phloem, recommended for post-emergent application in weeds, and is non-selective (except for genetically modified crops) (DUKE; POWLES, 2008; GALLI, 2009).

Glyphosate herbicide acts through enzymatic inhibition of the shikimic acid pathway. Its mechanism of action occurs through inhibition of the activity of the enzyme EPSPs, preventing the synthesis of three essential aromatic amino acids, phenylalanine, tyrosine and tryptophan, which are essential for the growth and survival of plants, in addition to being the precursors of other products, such as lignin, alkaloids, flavonoids and benzoic acids (AMARANTE JR. *et al.*, 2002). This mode of action is specific to the 9/G chemical group of glycine derivatives (HRAC, 2022).

The shikimic acid pathway is only part of the metabolism of plants and microorganisms, and is absent in mammals, so that glyphosate is considered less toxic for humans and some animals. The main products of this pathway are phenolic compounds, which represent up to 35% of the plant biomass (BOUDET *et al.*, 1985). It is estimated that around 20% of all the carbon flux fixed by plants may be directed to the shikimic acid pathway under normal developmental conditions (HASLAM, 1993).

## EFEITO HORMESIS DO HERBICIDA GLYPHOSATE

O glyphosate (N-Phosphonomethyl-glycine) é um dos herbicidas mais comercializados no mundo, por volume aplicado e área tratada. Isso ocorre em grande parte porque quase 80% da área cultivada no mundo são com culturas transgênicas, como o milho e a soja, resistentes ao glyphosate (RG). É devido ao seu amplo espectro de controle de plantas mono e dicotiledôneas anuais e perenes. Assim, os agricultores podem controlar todas as plantas daninhas em qualquer cultura RG, com apenas um herbicida, o que reduz custos e mão de obra (BENBROOK, 2016; DAYAN *et al.*, 2019; AGOSTINI *et al.*, 2020).

Atualmente, este herbicida pode ser fabricado em diferentes formulações, como sal isopropilamina, dimetilamina, amônio e potássico. É um herbicida sistêmico, sendo translocado principalmente via floema, recomendado para aplicação em pós-emergência das plantas daninhas, sendo não seletivo (exceto para as culturas geneticamente modificadas) (DUKE; POWLES, 2008; GALLI, 2009).

O herbicida glyphosate atua por meio da inibição enzimática da rota do ácido chiquímico. Seu mecanismo de ação ocorre através da inibição da atividade da enzima EPSPs, evitando a síntese de três aminoácidos aromáticos essenciais, a fenilalanina, tirosina e triptofano, essenciais para o crescimento e sobrevivência das plantas, além de serem precursores de outros produtos, como lignina, alcalóides, flavonóides e ácidos benzoicos (AMARANTE JR. *et al.*, 2002). Esse modo de ação é específico do grupo químico 9/G dos derivados de glicina (HRAC, 2022).

A via do ácido chiquímico faz parte do metabolismo apenas de plantas e microrganismos e é ausente em mamíferos, fazendo com que o glyphosate seja considerado pouco tóxico para seres humanos e alguns animais. Essa via tem como produtos principais os compostos fenólicos, que chegam a representar até 35% da biomassa dos vegetais (BOUDET *et al.*, 1985). Estima-se que cerca de 20% de todo o fluxo de carbono fixado pelas plantas pode ser direcionado para a rota do ácido chiquímico, sob condições normais de desenvolvimento (HASLAM, 1993).

Due to the mechanism of action of glyphosate, which directly inhibits the EPSPs enzyme, the harmful effect presents as chlorosis (yellowing) of the meristems, necrosis and, finally, after days or weeks, the death of the treated plants (YANNICCARI *et al.*, 2012; ZOBIOLE *et al.*, 2012). In this respect, herbicide molecules with an active ingredient based on glycine derivatives, particularly glyphosate, have been among the most studied worldwide in terms of environmental safety and human health, as well as having one of the largest databases among the pesticides (GIESY *et al.*, 2000; WILLIAMS *et al.*, 2000). However, information regarding the effects of subdoses on crops is fairly limited, both in the field and in the laboratory. Understanding how subdoses of the herbicide affect the growth and physiological characteristics of plants is of paramount importance.

The hormetic action of glyphosate may be related to the way it acts on plants due to its mechanism of action, which is related to inhibition of the shikimic acid pathway, the source of lignin precursors (BRITO *et al.*, 2018). In some herbicides, the use of low doses may preferentially inhibit lignin synthesis, so that the cell walls become more elastic and longer lasting during development. This should result in greater longitudinal growth (DUKE *et al.*, 2006).

The use of glyphosate to cause hormesis in plants is discouraged by some researchers, especially when the aim is to stimulate crop growth, as the hormetic dose is extremely variable and has a close relationship to toxicity that depends on a series of factors, important among which are the molecule of the product, the climate conditions at the time of application, and the characteristics of the plants (SILVA *et al.*, 2014).

Despite the difficulties of working with subdoses of glyphosate, when applied correctly, the herbicide can stimulate the growth of such plants as citrus, coffee, soya, beans and eucalyptus (VELINI *et al.*, 2008; MACHADO *et al.*, 2010; CARVALHO *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2016b). In addition, its use is widely reported to help in ripening and sucrose accumulation in sugarcane (ARALDI *et al.*, 2010).

Devido ao mecanismo de ação do glyphosate, que inibe diretamente a enzima EPSPs, o efeito deletério tem sido observado pelos sintomas de clorose (amarelamento) dos meristemas, necrose e, por fim, a morte das plantas tratadas após dias ou semanas (YANNICCARI *et al.*, 2012; ZOBIOLE *et al.*, 2012). Nesse contexto, as moléculas dos herbicidas, com ingrediente ativo à base de derivados de glicina, principalmente o glyphosate, têm sido uma das mais estudadas mundialmente em termos de segurança ambiental e saúde humana, além de possuírem uma das maiores bases de dados dentre todos os agrotóxicos (GIESY *et al.*, 2000; WILLIAMS *et al.*, 2000). No entanto, as informações referentes aos efeitos de subdoses nas culturas são limitadas, tanto em campo quanto em laboratório. Portanto, compreender como subdoses desse herbicida afetam as características de crescimento e fisiologia das plantas é de suma importância.

A ação hormesis do glyphosate pode estar relacionada à forma como ele atua nas plantas, devido ao seu mecanismo de ação, que está relacionado à inibição da via do ácido chiquímico, sendo a fonte dos precursores da lignina (BRITO *et al.*, 2018). Para alguns herbicidas, a utilização de baixas doses pode inibir, preferencialmente, a síntese de lignina, fazendo com que as paredes celulares fiquem mais elásticas e permaneçam por um período maior durante o desenvolvimento. Isso deve resultar em maior crescimento longitudinal (DUKE *et al.*, 2006).

A utilização do glyphosate para causar hormesis em plantas, tem sido desaconselhada por alguns pesquisadores, principalmente quando o objetivo é estimular o crescimento das culturas, pois a dose hormética é muito variável e sua relação com a toxicidade é estreita, dependendo de uma série de fatores, dentre os quais se destacam: molécula do produto, condições climáticas no momento da aplicação e características das plantas (SILVA *et al.*, 2014).

Apesar das dificuldades de se trabalhar com subdoses de glyphosate, quando aplicado de forma correta, esse herbicida pode estimular o crescimento de citros, café, soja, feijão e eucalipto (VELINI *et al.*, 2008; MACHADO *et al.*, 2010; CARVALHO *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2016b). Além disso, sua utilização é relatada para auxiliar a maturação e acúmulo de sacarose em cana-de-açúcar (ARALDI *et al.*, 2010).

According to Velini *et al.* (2010), the application of low doses of glyphosate promotes an increase in the biomass of *Brachiaria decumbens*, with the maximum values for fresh and dry weight seen at a subdose of 11.25 g e.a. ha<sup>-1</sup>; higher doses, however, cause a significant reduction in plant biomass (MORAES *et al.*, 2020).

Studies on the application of subdoses of glyphosate in crops of significant economic importance, such as soya and maize, were conducted by Velini *et al.* (2008), who found a significant increase in the total dry weight and aerial part of conventional soya at doses ranging from 1.8 to 18 g a.e. ha<sup>-1</sup>. Similar results were obtained for maize, at doses ranging from 1.8 to 36 g a.e. ha<sup>-1</sup>.

Hormetic effects on the physiological characteristics of plants treated with subdoses of glyphosate were reported by Silva *et al.* (2015), including an increase in carbon fixation and stomatal conductance in response to the increase in the number of stomata. Cedegreen and Olesen (2010) reported that glyphosate can also stimulate photosynthesis at low doses. Barreto (2020) records a stimulus to the roots of the 'Peróla' pineapple that was promoted by glyphosate at a dose of 1.8 g a.e. ha<sup>-1</sup>, with a 32.25% increase in root fresh weight in relation to the control.

In a study carried out by Velini *et al.* (2008), a hormetic effect was seen on the root system of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden, with a 90% increase in response to the longer cultivation time. However, this effect was not seen on the root system of soya or maize plants, which were cultivated for a shorter period. On the other hand, Silva *et al.* (2016b) found that in soya, the effect on the roots is greater than the effect on the leaves or stems, despite its short cycle. Belz and Duke (2014) report that some herbicides can stimulate root growth at low doses, but have no stimulatory effect on stem growth. This was seen in the pineapple, where the root was the only variable stimulated by the glyphosate (BARRETO, 2020).

Growth stimulation in parts of a plant with the application of subdoses of an herbicide is due to a mechanism wherein the plant attempts to 'escape' and overcome the unfavourable growing conditions or chemical stress, inducing a defence mechanism by means of free oxygen radicals that can lead to increased growth in the presence of low doses of the herbicide (KOVALCHUK *et al.*, 2003; CEDERGREEN *et al.*, 2007; EL-SHAHAWY; SHARARA, 2011).

Segundo Velini *et al.* (2010), a aplicação de baixas doses de glyphosate promove o aumento na biomassa de *Brachiaria decumbens*, sendo os valores máximos de massa fresca e massa seca verificados na subdose de 11,25 g e.a. ha<sup>-1</sup>. Contudo, doses superiores ocasionam reduções significativas na biomassa das plantas (MORAES *et al.*, 2020).

Em culturas de expressiva importância econômica, como soja e milho, foram conduzidos estudos sobre a aplicação de subdoses de glyphosate por Velini *et al.* (2008). Esses pesquisadores observaram aumentos significativos na massa seca total e na parte aérea de soja convencional em doses que variaram de 1,8 a 18 g e.a. ha<sup>-1</sup>. Para o milho, resultados semelhantes foram obtidos, com faixas de doses variando de 1,8 a 36 g e.a. ha<sup>-1</sup>.

Efeitos horméticos nas características fisiológicas em plantas tratadas com subdoses de glyphosate foram relatados por Silva *et al.* (2015), havendo elevação na fixação de carbono e condutância estomática em resposta ao aumento na quantidade de estômatos. Cedegreen e Olesen (2010) relatam que o glyphosate também pode estimular a fotossíntese em doses baixas. Barreto (2020) registra estímulo promovido pelo glyphosate na dose de 1,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> sobre as raízes do abacaxizeiro, cultivar Peróla, com incremento de massa fresca das raízes de 32,25% em relação à testemunha.

Em trabalho realizado por Velini *et al.* (2008), observou-se efeito hormesis no sistema radicular de plantas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden, com um aumento de 90% em resposta a um período mais longo de cultivo. Contudo, esse efeito não foi observado no sistema radicular das plantas de soja e milho, que foram cultivadas por período mais curto. Por outro lado, Silva *et al.* (2016b) verificaram que os efeitos sobre a raiz são superiores aos efeitos nas folhas ou caules para a soja, mesmo possuindo ciclo curto. Belz e Duke (2014) relatam que alguns herbicidas podem estimular o crescimento das raízes em baixas doses, mas não têm efeito estimulador sobre o crescimento de caules. Esse fato ocorreu com o abacaxizeiro, onde a raiz foi a única variável estimulada pelo glyphosate (BARRETO, 2020).

O estímulo no crescimento de partes das plantas à aplicação de subdoses de herbicidas deve-se a um mecanismo para a planta tentar "escapar", superando as condições desfavoráveis de crescimento ou estresse químico e induzir um mecanismo de defesa por meio de radicais livres de oxigênio que podem levar ao aumento do crescimento na presença de baixas doses dos herbicidas (KOVALCHUK *et al.*, 2003; CEDERGREEN *et al.*, 2007; EL-SHAHAWY; SHARARA, 2011).



An increase in the root ratio with no increase of the aerial part can be characterised as a reaction of the plant to stress, whether by increasing the formation of root matter to exploit a greater volume of soil and improve the absorption of water and nutrients, or by reducing dry matter accumulation in the aerial part, thereby reducing the area used for transpiration (SÁ *et al.*, 2013).

Research results have shown harmful effects from the use of glyphosate in concentrations that are expected to have a hormetic effect (SILVA *et al.*, 2012) or even to have no effect and not stimulate growth (SOUSA *et al.*, 2014). The use of glyphosate, even in subdoses, negatively affected the morphological variables of the pineapple and, consequently, the productivity of the crop at a subdose of 2.5 L ha<sup>-1</sup> during post-emergence (MODEL *et al.*, 2010). The authors saw a 54.4% loss in productivity, from 29.9 to 10.9 t ha<sup>-1</sup>. Barreto (2020) also found a loss of total fresh matter in the 'Pérola' pineapple for increased subdoses of glyphosate, with an average reduction of 46.78% in relation to the control. As such, the proximity threshold between the beneficial and toxic effects of the herbicide at a given rate of usage may impede any potential for increasing crop yields.

Some crops show consistent results, such as soya, where research has shown an increase of 28% (VELINI *et al.*, 2008) and 44% (SILVA *et al.*, 2016b) in the total dry mass of the plants, each at a subdose of 1.8 g a.e. ha<sup>-1</sup> glyphosate. On the other hand, using subdoses of glyphosate in the pineapple caused a reduction in leaf fresh weight of 51.75% and 30.58% in relation to the treatment that received no herbicide (BARRETO, 2020).

The vegetative stage of the crop is another factor that should be considered when studying subdoses of herbicides. Carvalho *et al.* (2013), in a study of coffee plants, observed growth stimulation in individuals that received subdoses later than recently transplanted plants. Studies also found that the effect of glyphosate is not sustained over time, and that the period between applying the herbicide and the harvest is extremely important to achieving growth stimuli (BELZ; DUKE, 2014; CEDERGREEN, 2008).

Understanding the effects of subdoses of glyphosate on plants is important, considering that large amounts of the herbicide are used and that it may often reach non-target plant species, which are regularly exposed to subtoxic doses of the herbicide due to drift (SILVA *et al.*, 2016b).

O aumento da relação raiz sem incremento em parte aérea pode ser caracterizado como uma reação da planta ao estresse, seja aumentando a formação de massa das raízes, de modo a explorar maior volume de solo para melhorar a absorção de água e nutrientes, ou diminuindo o acúmulo de matéria seca na parte aérea, o que possibilita redução da área de transpiração (SÁ *et al.*, 2013).

Resultados de pesquisas evidenciaram efeitos prejudiciais do uso do glyphosate em concentrações que se espera efeito hormesis (SILVA *et al.*, 2012) ou até mesmo não ocasionar nenhum efeito, não tendo estímulo de crescimento (SOUSA *et al.*, 2014). O uso do glyphosate, mesmo com subdoses, afetou, negativamente, as variáveis morfológicas do abacaxizeiro e, conseqüentemente, a produtividade da cultura, como verificado por Model *et al.* (2010), com subdose de 2,5 L ha<sup>-1</sup> em pós-emergência. Os autores obtiveram perda de 54,4% da produtividade, reduzindo de 29,9 para 10,9 t ha<sup>-1</sup>. Barreto (2020) também constatou perda de massa fresca total, em abacaxi Pérola, com o aumento de subdoses do glyphosate, com redução média de 46,78% em relação à testemunha. Assim, o limiar de proximidade entre o efeito benéfico e de toxicidade do herbicida em determinada taxa de uso pode dificultar o potencial de uso a fim de aumentar os rendimentos das culturas.

Algumas culturas apresentam resultados consistentes, como a soja, em que pesquisas demonstraram aumento de 28% (VELINI *et al.*, 2008) e de 44% (SILVA *et al.*, 2016b) para a massa seca total das plantas, ambos com a subdose de 1,8 g a.e. ha<sup>-1</sup> de glyphosate. Por outro lado, em abacaxizeiro, o uso de subdoses de glyphosate ocasionaram declínio na massa fresca de suas folhas, com redução de 51,75% em relação ao tratamento que não recebeu aplicação dos herbicidas (BARRETO, 2020).

O estágio vegetativo da cultura é outro fator que deve ser considerado no estudo de subdoses dos herbicidas. Carvalho *et al.* (2013) constataram, em plantas de café, estímulo de crescimento nos indivíduos que receberam subdoses mais tardias que as recém transplantadas. Estudos, ainda, verificam que o efeito não é sustentado ao longo do tempo para o glyphosate, e o intervalo de tempo entre a aplicação do herbicida e a colheita tem grande importância para se obter estímulos de crescimento (BELZ; DUKE, 2014; CEDERGREEN, 2008).

Compreender os efeitos de subdoses de glyphosate sobre as plantas é importante, considerando que grandes quantidades desse herbicida é usado e, muitas vezes, pode atingir espécies de plantas não visadas, mas expostas regularmente a doses subtóxicas do herbicida, por meio de deriva (SILVA *et al.*, 2016b).

## HORMETIC EFFECT OF 2,4-D HERBICIDE

For almost 80 years, 2,4-D, has been one of the most-used herbicides in the world. The success of this herbicide is mainly due to its high efficiency, low cost, and selectivity for grasses, in addition to being an alternative for controlling plants that are resistant to other products such as glyphosate. It is also a key resource when applied with the aim of drying out undesirable individuals in areas under no-till systems (FOLONI, 2016).

According to HARAC, commercial formulations of 2,4-D herbicide belong to the 4/O chemical groups, and include the benzoic, phenolxy-carboxylic, carboxylic, and quinolinecarboxylic acids (ROCHA *et al.*, 2022). Herbicides from these chemical groups are easily soluble in water and oil, as well as in any other solvent, which results in faster penetration of the leaves and roots, making it even more effective when compared to other less or more-slowly soluble herbicides. As such, even at low doses, the herbicide is able to regulate plant growth and imitate the auxin hormone, resulting in cell-elongation and division (ISLAM *et al.*, 2017).

One of the first applications of 2,4-D was as a defoliant during the Vietnam War, acting together with 2,4,5-trichlorophenoxyacetic (2,4,5-T) and pentachlorophenol (PCF) in the formulation known as 'Agent Orange'. When using 2,4-D separately, careful application is recommended to avoid drift, which is very common as the product is highly volatile. Drift occurs in two ways, airborne or as a vapour. Post-emergent application is suggested. Research on the molecule is based on its harmful effects, such as the residual effect on the soil and artificial drift (CONSTANTIN *et al.*, 2007; REIS *et al.*, 2008; NASCIMENTO; YAMASHITA, 2009).

As an auxin herbicide, 2,4-D acts by modifying the plants both biochemically and metabolically until the changes become irreversible, leading to the death of the plant; it also acts by altering the synthesis of proteins, nucleic acids and RNA polymerase. The result of these biochemical and metabolic changes is the epinasty that occurs in the leaves and stem, interrupting the flow of photoassimilates transported by the phloem (TAIZ; ZEIGER, 2013). When translocated to the plant meristems, 2,4-D acts in three ways: increasing the production of ABA and ethylene, influencing the production of proteins, and altering the plasticity of the cell walls (SONG, 2014).

## EFEITO HORMESIS DO HERBICIDA 2,4-D

O 2,4-D é tido como um dos herbicidas mais usados no mundo há quase 80 anos. O sucesso desse herbicida deve-se, principalmente, à sua alta eficiência, ao baixo custo, à seletividade em gramíneas, além de ser uma alternativa para o controle de plantas resistentes a outros produtos, como o glyphosate. Também é um recurso chave quando aplicado com o objetivo de dessecar indivíduos indesejáveis em lavouras sob sistemas de plantio direto (FOLONI, 2016).

As formulações comerciais do herbicida 2,4-D pertencem aos grupos químicos 4/O, segundo o HARAC, e compreende os ácidos benzoicos, fenolxy-carboxílicos, carboxílicos, quinolinocarboxílico (ROCHA *et al.*, 2022). Os herbicidas desses grupos químicos são facilmente solúveis em água e óleo, além de qualquer outro solvente, o que resulta em rápida penetrabilidade nas folhas e raízes, tornando-o ainda mais eficiente quando comparado a outros herbicidas menos solúveis ou de solubilidade mais lenta. Assim, mesmo em baixas doses, também, é capaz de regular o crescimento dos vegetais e atuar como um "imitador" do hormônio auxina, proporcionando o alongamento e a divisão celular (ISLAM *et al.*, 2017).

Uma das primeiras aplicações do 2,4-D foi como desfolhante, na Guerra do Vietnã, atuando associado ao 2,4,5-triclorofenoxyacético (2,4,5-T) e ao pentaclorofenol (PCF), na formulação do "agente laranja". Na utilização individual do 2,4-D, a recomendação é de que a aplicação seja realizada com cuidado, para que não ocorra deriva, muito comum por ser um produto volátil. A deriva ocorre de duas formas, quando aerotransportada ou na forma de vapor. Assim, recomenda-se aplicação em pós-emergência. Pesquisas sobre a molécula são baseadas nos efeitos deletérios, como é o caso do efeito residual no solo e derivas artificiais (CONSTANTIN *et al.*, 2007; REIS *et al.*, 2008; NASCIMENTO; YAMASHITA, 2009).

Por ser um herbicida auxínico, o 2,4-D atua modificando as plantas, bioquimicamente e metabolicamente, até que essas alterações se tornem irreversíveis, levando os vegetais à morte. Também age alterando a síntese de proteínas, ácidos nucleicos e de RNA-polimerase. O resultado das mudanças bioquímicas e metabólicas é a epinastia que ocorre nas folhas e caule, ocasionando a interrupção do fluxo de fotoassimilados transportados pelo floema (TAIZ; ZEIGER, 2013). Assim, quando translocado para os meristemas da planta, o 2,4-D atua de três maneiras: aumentando a produção de ABA e etileno, influenciando a produção de proteínas e alterando a plasticidade das paredes celulares (SONG, 2014).

The accumulation of ethylene and ABA is the principal cause of death in most plants exposed to 2,4-D, since this results in oxidative stress driven by the large production of reactive oxygen species. Grossmann (2010) explains that this phenomenon is the result of the excessive auxin concentration, which causes homeostatic and hormonal imbalance. Initially, acidification of the cell wall takes place due to the stimulating action of the ATPase proton pump linked to the cell membrane, affecting the metabolism of nucleic acids and the plasticity of the cell wall. Then, a reduction in apoplastic pH causes cell-elongation, increasing the activity of enzymes that act in loosening the cells (FOLONI, 2016). Once the herbicide molecules move together with sugars to the places they are needed in the plant, the first visual symptom of the action of 2,4-D is inhibition of the growth of young tissue. One example are eudicotyledonous plants where, when affected by 2,4-D, development is marked by badly formed leaves, and dense and twisted stems or petioles, in addition to misshapen and seedless fruit (FOLONI, 2016).

Subdoses of 2,4-D have the opposite effect to stress: growth stimulation. At low concentrations, this herbicide has physiological and biochemical effects similar to those of indoleacetic acid (IAA), the main natural auxin found in plants. However, due to the high stability of its molecule, the effects of 2,4-D are more intense and longer lasting, promoting the constant increase of hydrogen in the cell wall, which in turn promotes the formation of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC), responsible for producing ethylene that plays a part in controlling cell expansion, resulting in growth of the vegetative structures (VANNESTE; FRIML, 2009; GROSSMANN, 2010).

In an experiment by Américo *et al.* (2016), the authors found a productivity of 1,965 kg ha<sup>-1</sup> in cotton using 2,4-D at a subdose of 1.90 g a.e. ha<sup>-1</sup>, further noting that higher doses induced the herbicidal effect of the commercial product. In seed cotton, the maximum dose of 1.75 g a.e. ha<sup>-1</sup> 2,4-D resulted in a productivity of 2,021.15 kg ha<sup>-1</sup> (AMÉRICO *et al.*, 2016). Similar results from the use of 2,4-D were seen by Aguilar *et al.* (2021), who found an increase in cotton production from 1,724 kg ha<sup>-1</sup> to 1,915 kg ha<sup>-1</sup> at a hormetic dose of 1.8 g a.e. ha<sup>-1</sup>.

O acúmulo de etileno e ABA é a principal causa de morte da maioria das plantas expostas ao 2,4-D, pois ocorre o estresse oxidativo, impulsionado pela grande produção de espécies reativas de oxigênio. Grossmann (2010) explica que esse fenômeno é resultado da superconcentração de auxina, que causa o desequilíbrio na homeostase e nas interações hormonais. No início, ocorre a acidificação da parede celular, pela ação estimulante da atividade da bomba de prótons da ATPase, ligada à membrana celular, afetando o metabolismo dos ácidos nucleicos e a plasticidade da parede celular. Em seguida, a redução no pH apoplástico provoca a alongação celular, aumentando a atividade de enzimas que atuam no afrouxamento das células (FOLONI, 2016). Uma vez que as moléculas de herbicidas se deslocam com os açúcares para os sítios onde são necessários nos vegetais, os primeiros sintomas visuais da ação do 2,4-D são a inibição do crescimento dos tecidos jovens. Como exemplo, pode-se citar as plantas eudicotiledôneas que, quando afetadas pelo 2,4-D, apresentam desenvolvimento marcado por folhas malformadas, caules ou pecíolos adensados e retorcidos, além de frutos mal-formados e sem sementes (FOLONI, 2016).

As subdoses de 2,4-D provocam efeito contrário ao estresse, que é o estímulo do crescimento. Em baixas concentrações esse herbicida promove efeitos fisiológicos e bioquímicos similares aos do ácido indolacético (AIA), principal auxina natural presente nas plantas. Contudo, os efeitos do 2,4-D são mais intensos e duráveis, devido à elevada estabilidade de sua molécula, promovendo aumento constante de hidrogênio na parede celular, que por sua vez promove a formação do ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), responsável pela produção do etileno que participa do controle da expansão celular, causando o crescimento das estruturas vegetativas (VANNESTE; FRIML, 2009; GROSSMANN, 2010).

Em experimento realizado por Américo *et al.* (2016), os autores observaram produtividade de 1.965 kg ha<sup>-1</sup> na cultura do algodoeiro, utilizando o 2,4-D, na subdose de 1,90 g e. a. ha<sup>-1</sup>, constatando, ainda, que doses acima já induziam o efeito herbicida do produto comercial. No algodão em caroço, a dose máxima de 1,75 g e.a ha<sup>-1</sup> de 2,4-D determinou produtividade equivalente a 2.021,15 kg ha<sup>-1</sup> (AMÉRICO *et al.*, 2016). Resultados semelhantes, com o uso do 2,4-D, foram encontrados por Aguilar *et al.* (2021), que verificaram incremento na produtividade do algodoeiro, passando de 1.724 kg ha<sup>-1</sup> para 1.915 kg ha<sup>-1</sup> na dose hormética de 1,8 g e. a. ha<sup>-1</sup>.

Studying simulated drift in seven doses of 2,4-D herbicide, which ranged from 1.67 to 134.00 g a.e. ha<sup>-1</sup>, Tavares *et al.* (2017) found that at low doses, the product caused mild temporary intoxication in seedlings of the pequi (*Caryocar brasiliense*), the plants recovering 15 days after application. This resulted in a hormetic effect at the reduced dose of 6.70 g h<sup>-1</sup>, with increments in the leaf area, specific leaf area and leaf area ratio of the plants.

In a study of the pineapple, Barreto (2020) found apparent visual phytotoxicity with symptoms characteristic of auxin herbicides, especially the purplish colouration of the leaf blade and the presence of leaf epinasty. The latter symptom is caused by the stimulating activity of the ATPase proton pump, which moves H<sup>+</sup> protons out of the cell, modifying the pH around the cell membrane and promoting the activity of certain enzymes that are responsible for the production of ACC. This in turn is responsible for the production of ethylene, which promotes loosening of the cell wall, and which, together with the processes of cell-elongation caused by the herbicide molecule itself, causes the leaves to curve (epinasty) (VANNESTE; FRIML, 2009; GROSSMANN, 2010). Along the same lines, Maia *et al.* (2012), studying the application of subdoses of glyphosate and 2,4-D, found that the 'Pérola' pineapple is not very tolerant to these herbicides. Tavares *et al.* (2017) found an 18.44% reduction in plant growth, mainly due to the herbicide affecting the leaf area.

The growth of the plants, the increase in leaf area, and the increased sugar levels were seen in several species, such as eucalyptus, pine, maize, soya, rye, barley and sugar cane subjected to different subdoses of the herbicides oxyfluorfen, glyphosate, terbacil, simazine and MSMA (DUKE *et al.*, 2006). According to Silva *et al.* (2012), the hormetic effect can be studied in cropping systems in general.

The effect of subdoses of herbicides on plants can be considered an adaptive response, characterised by a biphasic dose-response curve, which induces different compensatory biological processes, followed break in homeostasis resulting in an adaptive response of the organism to the applied product. However, the mechanisms of action of hormesis are still little known (CALABRESE; BALDWIN, 2002).

Estudando à deriva simulada de sete doses do herbicida 2,4-D, que variaram de 1,67 até 134,00 g e. a. ha<sup>-1</sup>, Tavares *et al.* (2017) verificaram que em doses baixas o produto causou intoxicações leves e temporárias em mudas de pequi, ocorrendo recuperação das plantas 15 dias após a aplicação, efeito hormesis nas doses reduzidas de 6,70 g h<sup>-1</sup>, com incrementos nas variáveis área foliar, área foliar específica e razão de área foliar das plantas.

Em abacaxizeiro, Barreto (2020) verificou fitointoxicação visual aparente no abacaxizeiro e sintomas característicos dos herbicidas auxínicos, principalmente pela coloração arroxeadada do limbo foliar e pela presença de folhas com epinastia. Este último sintoma é ocasionado devido ao estímulo da atividade da bomba de prótons da ATPase, que movimenta os prótons H<sup>+</sup> para fora da célula. Esse movimento de H<sup>+</sup> para fora da célula modifica o pH ao redor da membrana celular, o que promove a atividade de certas enzimas, que são responsáveis pela produção do ACC, que por sua vez é responsável pela produção de etileno, que promove um afrouxamento da parede celular, aliado aos processos de alongação celular causado pela própria molécula do herbicida e que ocasiona dobramento da folha (epinastia) (VANNESTE; FRIML, 2009; GROSSMANN, 2010). Ainda nessa linha, Maia *et al.* (2012), estudando aplicação de subdoses de glyphosate e 2,4-D, verificaram que o abacaxizeiro cv. Pérola é pouco tolerante a esses herbicidas. Tavares *et al.* (2017) verificaram redução de 18,44% no crescimento das plantas, promovida, principalmente, pelo herbicida ter afetado a área foliar.

O crescimento da planta, aumento da área foliar e o aumento dos níveis de açúcares foram verificados em diversas espécies como eucalipto, pinheiro, milho, soja, centeio, cevada e cana-de-açúcar, quando submetidas a diferentes subdoses dos herbicidas, oxifluorfen, glyphosate, terbacil, simazine e MSMA (DUKE *et al.*, 2006). Segundo Silva *et al.* (2012), o efeito hormesis pode ser adotado como estudo nos sistemas de cultivo em geral.

Os efeitos das subdoses de herbicidas nas plantas podem ser considerados uma resposta adaptativa, caracterizada por uma curva bifásica de dose-resposta, que induz diferentes processos biológicos compensatórios, seguidos de quebra na homeostase resultando em uma resposta adaptativa dos organismos ao produto aplicado. Entretanto, os mecanismos de ação da hormese ainda são pouco conhecidos (CALABRESE; BALDWIN, 2002).

The most limiting factor on the medium and large-scale implementation of herbicides that have the capacity for provoking the hormesis effect is the close proximity of the maximum dose of the herbicide that favours a given species and the dose that causes its inhibition. Besides this minimum margin, field conditions cannot be completely standardised, as they depend on the soil and climate, as well as the various physiological characteristics of the plants (SILVA; MENDES, 2021).

Research on the hormetic efficiency of herbicides usually include concentrations that are very close to the commercial dose. However, it is known that the hormesis effect can occur at very low doses. Therefore, to study the hormetic response caused by herbicides, it is necessary to consider a wide range of concentrations, up to 100 times less than those used commercially (BRITO *et al.*, 2018).

A failure to understand the consequences on plants, or their biochemical and physiological mechanisms, in relation to applied subdoses of herbicides, as well as the unpredictability of any potential hormesis effect, has limited or even prevented the use of herbicide subdoses to maximise the productive potential of crops.

Currently, due to the increase in research on herbicides that can act as growth promoters and improve plant productivity, the principles of hormesis have been increasingly discussed. Despite this, it is important to continue to conduct studies to evaluate the possible effects of subdoses of herbicides that have a hormetic effect, considering the diversity of herbicides available on the market and the variety of crops of agricultural interest that have not yet been studied for this purpose.

## CONCLUSIONS

The use of sublethal doses of such herbicides as 2,4-D and glyphosate, have shown excellent results in stimulating the performance of various agricultural crops, underlining the applicability of the hormetic use of herbicides in addition to their use in weed control.

O fator mais limitante para a implementação, em média e larga escala, de herbicidas que têm a capacidade de provocar o efeito hormesis é a proximidade entre a dose máxima do herbicida que favoreça determinada espécie e a dose que causa a sua inibição. Além dessa margem mínima, as condições de campo não podem ser completamente padronizadas, dependendo, assim, das condições de solo e clima, bem como de várias características fisiológicas das plantas (SILVA; MENDES, 2021).

Pesquisas sobre a eficiência hormética de herbicidas normalmente admitem concentrações muito próximas à dose comercial. No entanto, sabe-se que o efeito hormesis pode ocorrer em doses muito baixas. Dessa forma, para estudar a resposta hormética causada pelos herbicidas, é necessário levar em consideração amplos intervalos de concentrações, até 100 vezes menores do que as doses comerciais utilizadas (BRITO *et al.*, 2018).

A ausência de compreensão das consequências e dos mecanismos bioquímicos e fisiológicos das plantas em relação às subdoses de herbicidas aplicados, bem como a imprevisibilidade do potencial efeito hormesis, tem limitado ou até mesmo impedido a utilização de subdoses de herbicidas para maximizar o potencial produtivo das culturas.

Atualmente, devido ao aumento das pesquisas sobre herbicidas que podem atuar como promotores de crescimento e melhorar a produtividade das plantas, os princípios da hormesis têm sido mais discutidos. Apesar disso, é importante continuar realizando estudos para avaliar os possíveis efeitos das subdoses de herbicidas que causam o efeito hormesis, considerando a diversidade de herbicidas disponíveis no mercado e a variedade de culturas de interesse agrícola que ainda não foram estudadas com esse intuito.

## CONCLUSÕES

A utilização de doses subletais de herbicidas, como o 2,4-D e o glyphosate, têm demonstrado ótimos resultados ao estimular o desempenho de várias culturas agrícolas, apoiando a aplicabilidade do uso hormético de herbicidas, além do controle de plantas daninhas.

Stimuli occur both morphologically and physiologically in the different response pathways of plants under the hormetic effect of herbicides, the variability in the biological response patterns being attributed either to the mechanism of action of the herbicide or to an adaptive response by the plant. In support of these observations, the hormetic effect of herbicides is little known, and responses can differ for the same range of herbicide subdoses due to the high variability of the factors involved in determining the applied doses.

The proximity threshold between the effect which results in a beneficial stimulus and the toxic effect of the herbicide can preclude the use of subdoses of the herbicide to promote stimuli that are beneficial to plant growth and development. It is therefore crucial that more in-depth research be carried out to explore the potential of different chemical groups of herbicides in a way that is both more precise and applicable, with the aim of estimating the ranges of sublethal doses that would promote a homeostatic response in plants of agricultural interest.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) for the scholarships granted to the authors G. F. Barreto, T. S. Castro, and S. da S. Maia. The Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Os estímulos em diferentes vias de respostas nas plantas, sob efeito hormesis dos herbicidas, ocorrem tanto nos aspectos morfológicos quanto fisiológicos, sendo a variabilidade nos padrões de respostas biológicas atribuídas ao mecanismo de ação do herbicida ou a uma resposta adaptativa da planta. Em apoio a essas observações, o efeito hormesis dos herbicidas é pouco conhecido, e as respostas divergem sob efeito de uma mesma faixa de subdose do herbicida e em função da alta variabilidade de fatores envolvidos na determinação das doses utilizadas.

O limiar de proximidade entre o efeito que causa estímulo benéfico e o efeito de toxicidade do herbicida pode inviabilizar a utilização de subdoses de herbicidas, a fim de promover estímulos benéficos de crescimento e desenvolvimento das plantas. Portanto, é crucial realizar pesquisas mais aprofundadas, para explorar o potencial dos diferentes grupos químicos de herbicidas de maneira mais precisa e aplicável, visando estimar faixas de dose subletais que promovam uma resposta homeostática às plantas de interesse agrícola.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento em forma de concessão da bolsa para os autores: G. F. Barreto; T. S. Castro; S. da S. Maia. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## CITED SCIENTIFIC LITERATURE

- AGOSTINI, L. P.; DETTOGNI, R. S.; REIS, R. S. dos; STUR, E.; SANTOS, E. V.W. dos; VENTORIM, D. P.; GARCIA, F. M.; CARDOSO, R. C.; GRACELI, J. B.; LOURO, I. D. Effects of glyphosate exposure on human health: Insights from epidemiological and in vitro studies. **Science of The Total Environment**, v. 705, p. 135808, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135808>
- AGUILAR, J. V.; LAPAZ, A. de M.; SANCHES, C. V.; YOSHIDA, C. H. P.; CAMARGOS, L. S. de; FURLANI-JÚNIOR, E. Application of 2,4-D hormetic dose associated with the supply of nitrogen and nickel on cotton plants. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 56, n. 9, p. 852-859, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/03601234.2021.1966280>
- AMARANTE JUNIOR, O. P. de; SANTOS, T. C. R. dos; BRITO, N. M.; RIBEIRO, M. L. Glyphosate: propriedades, toxicidade, usos e legislação. **Química Nova**, v. 25, n. 4, p. 589-593, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000400014>
- AMÉRICO, G. H. P.; FURLANI JÚNIOR, E.; AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P.; SANTOS, D. M. A. dos. Desenvolvimento e produtividade do algodoeiro em função da aplicação de subdoses de ácido diclorofenoxiacético e cloreto de mepiquat. **Revista de Agricultura**, v. 91, n. 2, p. 117-129, 2016. DOI: <https://doi.org/10.37856/bja.v91i2.212>
- ARALDI, R.; SILVA, F. M. L.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Florescimento em cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 40, n. 3, p. 694-702, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000033>
- BARRETO, G. F. Hormesis de herbicidas no desenvolvimento do abacaxizeiro. 2020, 55f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Culturas) - Universidade Federal de Roraima, Boa Vista.
- BELZ, R. G.; DUKE, S. O. Herbicides and plant hormesis. **Pest Management Science**, v. 70, n. 5, p. 698-707, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.3726>
- BELZ, R. G.; FAROOQ, M. B.; WAGNER, J. Does selective hormesis impact herbicide resistance evolution in weeds? ACCase-resistant populations of *Alopecurus myosuroides* Huds. as a case study. **Pest Management Science**, v. 74, n. 8, p. 1880-1891, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.4890>
- BELZ, R. G.; PIEPHO, H. P. Modeling Effective Dosages in Hormetic Dose-Response Studies. **PLoS ONE**, v. 7, n. 3, p. e33432, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033432>
- BELZ, R. G.; PIEPHO, H. P. Statistical modeling of the hormetic dose zone and the toxic potency completes the quantitative description of hormetic dose responses. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 34, n. 5, p. 1169-1177, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.2857>
- BENBROOK, C. M. Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. **Environmental Sciences Europe**, v. 28, n. 3, p. 1-15, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0070-0>
- BERRY III, R.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, G. A dose of experimental hormesis: When mild stress protects and improves animal performance. **Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology**, v. 242, p. 110658, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2020.110658>
- BOUDET, A. M.; GRAZIANA, A.; RANJEVA, R. Recent advances in the regulation of the prearomatic pathway. In: VAN SUMERE, C. F.; LEA, P. J. Annual proceedings of the Phytochemical Society of Europe, Eds. Oxford: Clarendon Press, 1985, v. 25, p. 135-159.
- BRAIN, P.; COUSENS, R. An equation to describe dose responses where there is stimulation of growth at low doses. **Weed Research**, v. 29, n. 2, p. 93-96, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1989.tb00845.x>
- BRITO, I. P.; TROPALDI, L.; CARBONARI, C.A.; VELINI, E. D. Hormetic effects of glyphosate on plants. **Pest Management Science**, v. 74, n. 5, p. 1064-1070, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.4523>

- BRITO, I.P.; TROPALDI, L.; CARBONARI, C.A.; VELINI, E.D. Hormetic effects of glyphosate on plants. **Pest Management Science**, v. 74, n. 5, p. 1064-1070, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.4523>
- CALABRESE, E. J.; BALDWIN, L. A. Defining hormesis. **Human & Experimental Toxicology**, v. 21, n. 2, p. 91-97, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1191/0960327102ht217oa>
- CALABRESE, E. J.; BLAIN, R. B. The hormesis database: the occurrence of hormetic dose responses in the toxicological literature. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 61, n. 1, p. 73-81, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2011.06.003>
- CANTOS, E.; ESPIN, J. C.; FERNANDEZ, M. J.; OLIVA, J.; TOMAS-BARBERAN, F. A. Postharvest UV-C-irradiated grapes as a potential source for producing stilbene-enriched red wines. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, p. 1208-1214, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf020939z>
- CARVALHO, L. B.; ALVES, P. L. C. A.; STEPHEN O. DUKE, S. O. Hormesiss with glyphosate depends on coffee growth stage. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 85, n. 2, p. 813-82, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652013005000027>
- CATUNDA, M. G.; FREITAS, S. P.; OLIVEIRA, J. G.; SILVA, C. M. M. Efeitos de herbicidas na atividade fotossintética e no crescimento de abacaxi (*Ananas comosus*). **Planta Daninha**, v. 23, n. 1, p. 115-121, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582005000100014>
- CEDERGREEN, N.; OLESEN, C. F. Can glyphosate stimulate photosynthesis? **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 96, n. 3, p. 140-148, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2009.11.002>
- CEDERGREEN, N.; RITZ, C.; STREIBIG, J. C. Improved empirical models describing hormesis. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 24, n. 12, p. 3166- 3172, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1897/05-014r.1>
- CEDERGREEN, N.; STREIBIG, J. C.; KUDSK, P.; MATHIASSEN, S. K.; DUKE, S. O. The occurrence of hormesis in plants and algae. **Dose-Response**, v. 5, n. 2, p. 150-162, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2203/dose-response.06-008.Cedergreen>
- CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; BRANDÃO FILHO, J. U. T.; CALLEGARI, O.; PAGLIARI, P. H.; ARANTES, J. G. Z. de. Efeito de subdoses de 2,4-D na produtividade de fumo e suscetibilidade da cultura em função de seu estágio de desenvolvimento. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 30-34, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000200005>
- DAYAN, F. E.; BARKER, A.; BOUGH, R.; ORTIZ, M.; TAKANO, H.; DUKE, S. O. Herbicide Mechanisms of Action and Resistance. In: Moo-Young, M. *Comprehensive biotechnology*. 1. ed. Waterloo, Canada: Elsevier, 2019, v. 4, Cap. 4, p. 36-48.
- DUKE, S.; POWLES, S. B. Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. **Pest Management Science**, v. 64, n. 4, p. 319-325, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.1518>
- DUKE, S.O.; CEDERGREEN, N.; VELINI, E.D.; BELZ, R.G. Hormesis: Is it an important factor in herbicide use and allelopathy? **Outlooks on Pest Management**, v. 17, p. 29-33, 2006.
- EL-SHAHAWY, F. A.; SHARARA, F. A. A. Hormesis influence of glyphosate in between increasing growth, yield and controlling weeds in faba bean. **Journal of American Science**, v. 7, n. 2, p. 139-144, 2011.
- ERKAN, M.; WANG, S. Y.; WANG, C. Y. Effect of UV treatment on antioxidant capacity, antioxidant enzyme activity and decay in strawberry fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 48, n. 2, p. 163-171, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.09.028>
- FOLONI, L. L. O herbicida 2,4-D: Uma visão geral. 1ª ed. Ribeirão Preto, Brasil: Labcom Total, 2016. 252p.
- GALLI, A. J. B. A molécula glyphosate e a agricultura brasileira. In: VELINI, E.D.; MESCHEDÉ, D.K.; CARBONARI, C.A.; TRINDADE, M.L.B. *Glyphosate*. 1 ed. Botucatu: FEPAF, 2010. Cap.2, p.17-20.
- GIESY, J. P.; DOBSON, S.; SOLOMON, K. R. Ecotoxicological risk assessment for Roundup herbicide. In: Ware, G. W. *Reviews of Environmental Contamination Toxicology*. 1 ed. New York: Springer Science+Business Media, 2000, Cap.2, v. 167, p. 35- 120.



- GROSSMANN, K. Auxin herbicides: current status of mechanism and mode of action. **Pest Management Science**, v. 66, n. 2, p. 113-120, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.1860>
- HASLAM, E. Shikimic acid: metabolism and metabolites. 1. ed. Chichester: John Wiley. 1993. 392p.
- HRAC. Mode of Action Classification. Disponível em: [https://hracglobal.com/files/HRAC\\_MOA\\_Poster\\_January\\_6\\_2022.pdf](https://hracglobal.com/files/HRAC_MOA_Poster_January_6_2022.pdf). Acesso 22/03/2023
- ISLAM, F.; FAROOQ, M. A.; GILL, R. A.; WANG, J.; CHONG YANG, C.; ALI, B.; WANG, G.; ZHOU, W. 2, 4-D attenuates salinity-induced toxicity by mediating anatomical changes, antioxidant capacity and cation transporters in the roots of rice cultivars. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-23, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09708-x>
- JAGADEESH, S. L.; CHARLES, M. T.; GARIEPY, Y.; GOYETTE, B.; RAGHAVAN, G. S. V.; VIGNEAULT, C. Influence of postharvest uv-c hormesis on the bioactive components of tomato during post-treatment handling. **Food and Bioprocess Technology**, v. 4, p. 1463-1472, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0259-y>
- KOVALCHUK, I.; FILKOWSKI, J.; SMITH, K.; KOVALCHUK, O. Reactive oxygen species stimulate homologous recombination in plants. **Plant, Cell & Environment**, v. 26, n. 9, p. 1531-1939, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01076.x>
- MACHADO, F. L.; FERREIRA, L. R.; SANTOS, L. D. T.; FERREIRA, F. A.; VIANA, R. G.; MACHADO, M. S.; FREITAS, F. C. L. Eficiência fotossintética e uso da água em 59 plantas de eucalipto pulverizadas com glyphosate. **Planta Daninha**, v. 28, n. 2, p. 319-327, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582010000200011>
- MAIA, L. C. B.; MAIA, V. M.; LIMA, M. M. H.; ASPIAZÚ, I.; PEGORARO, R. F. Growth, production and quality of pineapple in response to herbicide use. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 3, p. 799-805, 2012. DOI: [10.1590/S0100-29452012000300020](https://doi.org/10.1590/S0100-29452012000300020)
- MARQUES, K. D. M.; MOREIRA, W. C. L.; SILVA, J. F.; MOREIRA, J. G. V.; MELHORANÇA FILHO, A. L. Efeito hormético de glyphosate no crescimento inicial de mudas de paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Agrarian**, v. 13, n. 47, p. 9-16, 2020. DOI: <https://doi.org/10.30612/agrarian.v13i47.8074>
- MODEL, N. S.; FAVRETO, R.; RODRIGUES, A. E. C. Efeito de tratamentos de controle de plantas daninhas sobre produtividade, sanidade e qualidade de abacaxi. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 16, n. 1 e 2, p. 51-58, 2010. Disponível em: <http://revistapag.agricultura.rs.gov.br/ojs/index.php/revistapag/article/view/171/144>. Acesso 22/03/2023.
- MORAES, C. P.; BRITO, I. P. F. S.; TROPALDI, L.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D. Hormetic effect of glyphosate on *Urochloa decumbens* plants. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 55, n. 4, p. 376-381, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/03601234.2019.1705114>
- MOUSDALE, D. M.; COGGINS, J. R. Amino acid synthesis. In: KIRKWOOD, R. C. Target sites for herbicide action. 1. ed. New York: Springer Science+Business Média, LLC, 1991. Cap.2, p.29-56.
- NASCIMENTO, E. R. do; YAMASHITA, O. M. Desenvolvimento inicial de olerícolas cultivadas em solos contaminados com resíduos de 2,4-d + picloram. Semina: **Ciências Agrárias**, v. 30, n. 1, p. 47-54, 2009. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2009v30n1p47>
- RABELLO, W. S.; MONNERAT, P. H.; CAMPANHARO, M.; ESPINDULA, M. C.; RIBEIRO, G. Crescimento e absorção de fósforo do feijoeiro comum -Xodó sob efeito de subdoses de glyphosate. **Revista Brasileira de Herbicida**, v. 11, n. 2, p. 204-212, 2012. DOI: <https://doi.org/10.7824/rbh.v11i2.149>
- REIS, F. C. dos; MENDES, K. F.; BACCIN, L.; TAKESHITA, V.; TORNISIELO, V. L.; VICTÓRIA FILHO, R. Seletividade, hormesis e fisiologia dos herbicidas nas plantas. In: VICTORIA FILHO, R.; TORNISIELO, V.L.; MENDES, K. F.; BACCIN, L. C.; TAKESHITA, V. Matologia: estudos sobre plantas daninhas. 1. ed. Jaboticabal, SP: Fábrica da Palavra; 2021, Cap. 9, p. 295-323. Disponível em: (Pdf) Seletividade, Hormesis E Fisiologia Dos Herbicidas Nas Plantas (Researchgate.Net) Acesso 22/03/2023
- REIS, M. R.; SILVA, A. A.; GUIMARÃES, A. A.; COSTA, M. D.; MASSENSINI, A. M.; FERREIRA, E. A. Ação de herbicidas sobre microrganismos solubilizadores de fosfato inorgânico em solo rizosférico de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 26, n. 2, p. 333-341, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582008000200009>

- ROCHA, P. R. R.; BARRETO, G. F.; AUGUSTI, M. L. Herbicidologia. In: Almeida, E.I.B.; Ferrão, G. da E. Fundamentos em biologia e manejo de plantas daninhas. 1. ed. São Luís, MA: EDUFMA, 2022. Cap.7, p. 95-117.
- SÁ, F. V. S.; BRITO, M. E. B.; MELO, A. S.; ANTÔNIO NETO, P.; FERNANDES, P. D.; FERREIRA, I. B. Produção de mudas de mamoeiro irrigadas com água salina. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 10, p. 1047-1054, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001000004>
- SAGAN, L. A. Radiation hormesis: evidence for radiation stimulation and speculation regarding mechanisms. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 37, n. 2, p. 313-317, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/1359-0197\(91\)90148-U](https://doi.org/10.1016/1359-0197(91)90148-U)
- SILVA, F. M. L.; DUKE, S. O.; DAYAN, F. E.; VELINI, E. D. Low doses of glyphosate change the responses of soybean to subsequent glyphosate treatments. **Weed Research**, v. 56, n. 2, p. 124-136, 2016a. DOI: <https://doi.org/10.1111/wre.12189>
- SILVA, J. C.; ANTONIO, G.; GERLACH, X.; FERREIRA, R. A.; RODRIGUES, A. O. Influência de doses reduzidas e épocas de aplicação sobre o efeito hormético de glyphosate em feijoeiro. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 115, n. 2, p.191-199, 2016b. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5832634.pdf>. Acesso 22/03/2023
- SILVA, J. C.; GERLACH, G.; A.; X.; KURYIAMA, C. S.; RODRIGUES, R. A. F. Efeito hormese de glyphosate em feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 3, p. 295-302, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-40632012000300008>
- SILVA, J. R. O.; MENDES, K. F.M. Hormesis à herbicidas: vantagens e desvantagens na produção agrícola. **Boletim informativo: Manejo Integrado de Plantas Daninhas**, n. 14, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/352296148>. Acesso 22/03/2023.
- SILVA, M. A.; ARAGÃO, N. C.; BARBOSA, M. A.; JERONIMO, E. M.; CARLIN, S. D. Efeito hormético de glyphosate no desenvolvimento Inicial de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 68, n. 4, p. 973-978, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000400017>
- SILVA, R. A.; MATSUMOTO, S. N.; OLIVEIRA, L. S.; BRITO, C. L. L.; COSTA, A. A. Interferência de subdoses de glyphosate nas trocas gasosas em picão-preto e trapoeraba. **Global Science and Technology**, v. 8, n. 1, p. 31-39, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/283860187>. Acesso 22/03/2023.
- SILVA, R. A.; MATSUMOTO, S. N.; SANTOS, L. J.; OLIVEIRA, L. S.; OLIVEIRA, M. N. de. Development of beggar-ticks (*Bidens pilosa*) in response to the application of low doses of glyphosate. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 7, n. 1, p.63-69, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5935/PAeT.V7.N1.07>
- SONG, Y. Insight into the mode of action of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) as an herbicide. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 56, n. 2, p. 106-13, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/jipb.12131>
- SOUSA, S. F. G.; SILVA, P. R. A.; BENEZ, S. H. Avaliação da cultura do milho submetida à hormesis. **Energia na Agricultura**, v. 29, n. 2, p.128-134, 2014. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2014v29n2p128-134>
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal. 5 ed. Porto Alegre, PR: Edition, Artmed, 2013. 918p.
- TAVARES, C.J., PEREIRA, L.S., ARAÚJO, A.C.F., MARTINS, D.A., JAKELAITIS, A. Crescimento inicial de plantas de pequi após aplicação de 2,4-D. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 89, p. 81-87, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.89.1280>
- VANNESTE, S.; FRIML, J. Auxin: a trigger for change in plant development. **Cell**, v. 136, n. 6, p. 1005-1016, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2009.03.001>
- VELINI, E. D.; ALVES, E.; GODOY, M. C.; MESCHEDÉ, D. K.; SOUZA, R. T.; DUKE, S. O. Glyphosate applied at low doses can stimulate plant growth. **Pest Management Science**, v.64, n. 4, p. 489-496, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.1562>
- VELINI, E. D.; TRINDADE, M.; BARBERIS, L.; DUKE, S. Growth Regulation and Other Secondary Effects of Herbicides. **Weed Science**, v. 58, n. 3, p. 351-354, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1614/WS-D-09-00028.1>

WILLIAMS, G. M.; KROES, R.; MUNRO, I. C. Safety evaluation and risk assessment of the herbicide Roundup® and its active ingredient, glyphosate, for humans. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 31, n. 2, p. 117-65, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1006/rtp.1999.1371>

YANNICCARI, M.; TAMBUSI, E.; ISTILART, C.; CASTRO, A M. Glyphosate effects on gas exchange and chlorophyll fluorescence responses of two *Lolium perenne* L. biotypes with differential herbicide sensitivity. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 57, p. 210-217, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.05.027>

ZOBIOLE, L. H. S.; KREMER, R. J.; OLIVEIRA Junior. R. S.; CONSTANTIN, J. Glyphosate effects on photosynthesis, nutrient accumulation, and nodulation in glyphosate-resistant soybean. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, n. 2, p. 319-330. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201000434>