

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DO TRIÂNGULO MINEIRO – *CAMPUS* UBERABA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**MATHEUS HENRIQUE FERREIRA**

**A INTEGRAÇÃO DE ZINCO, TRIPTOFANO E AUXINA AUMENTAM A  
PRODUTIVIDADE DA SOJA**

**Uberaba- MG  
2025**

**MATHEUS HENRIQUE FERREIRA**

**A INTEGRAÇÃO DE ZINCO, TRIPTOFANO E AUXINA AUMENTAM A  
PRODUTIVIDADE DA SOJA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro, para conclusão e obtenção do Título de Mestre em Produção Vegetal.

Linha de Pesquisa: Nutrição e fisiologia vegetal

Orientador: Prof. Dr. Hamilton César de Oliveira Charlo

**Uberaba- MG  
2025**

Ficha Catalográfica elaborada pelo Setor de Referência do IFTM –  
*Campus Uberaba*

F413i Ferreira, Matheus Henrique.  
A integração de zinco, triptofano e auxina aumentam a produtividade da soja / Matheus Henrique Ferreira. –. 2025.  
50 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Hamilton César de Oliveira Charlo  
Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Instituto Federal do Triângulo Mineiro – *Campus Uberaba*, 2025.

1. *Glycine max*. 2. Raízes. 3. Nutrição. 4. Produção. I. Charlo, Hamilton César de Oliveira. II. Título.

CDD- 633.34



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TRIÂNGULO MINEIRO

---

*MATHEUS HENRIQUE FERREIRA*

**“A INTEGRAÇÃO DE ZINCO, TRIPTOFANO E AUXINA AUMENTAM A PRODUTIVIDADE DA SOJA”**

**FOLHA DE APROVAÇÃO DEFESA DISSERTAÇÃO**

Data da aprovação: 29/04/2025

**MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA:**

**Presidente**

**Prof. Dr. Hamilton César de Oliveira Charlo**

IFTM Campus Uberaba

**Membro Titular**

**Prof. Dr. Édimo Fernando Alves Moreira**

IFTM Campus Uberaba

**Membro Titular**

**Dr<sup>ª</sup>. Maria Izabel Costa de Novaes**

UBY AGROQUÍMICA S.A

**Local:** Sala 11 (Sala de reuniões do Bloco Administrativo) IFTM Campus Uberaba

HAMILTON CÉSAR DE OLIVEIRA CHARLO  
PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO



Documento assinado eletronicamente por HAMILTON CÉSAR DE OLIVEIRA CHARLO, PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO, em 29/04/2025, às 10:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

EDIMO FERNANDO ALVES MOREIRA  
PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO



Documento assinado eletronicamente por EDIMO FERNANDO ALVES MOREIRA, PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO, em 29/04/2025, às 10:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

MARIA IZABEL COSTA DE NOVAES  
MEMBRO EXTERNO DE BANCA DE QUALIFICAÇÃO E DEFESA DE MESTRADO E DOUTORADO



Documento assinado eletronicamente por MARIA IZABEL COSTA DE NOVAES, MEMBRO EXTERNO DE BANCA DE QUALIFICAÇÃO E DEFESA DE MESTRADO E DOUTORADO, em 29/04/2025, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://iftm.edu.br/autenticacao/> informando o código verificador **F63FFA0** e o código CRC **56F5DBEF**.

Referência: NUP: 23200.005775/2025-87

DOCS nº 0000713059

À minha esposa, Laís, que esteve sempre ao meu lado, apoiando e suportando para que isto se tornasse realidade. Aos meus filhos que foram mais do que inspiração para seguir buscando conhecimento. Dedico este título.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu amor, Laís, por todo apoio e permitir realizar este e tantos outros sonhos. Sem você nada seria possível.

Aos meus filhos, João Antônio e Ana Helena, que são minha inspiração diária para evoluir e ser sempre uma melhor pessoa.

Aos meus familiares, por sempre apoiar e suportar minhas decisões.

Ao meu amigo, professor e orientador, Prof. Dr. Hamilton César de Oliveira Charlo, pela orientação, pelos ensinamentos e por todo apoio prestado nesse período, não somente como orientador, mas especialmente como amigo. Sem seu apoio, isto não seria possível. Muito obrigado!

Ao amigo, Prof. Dr. Édimo Fernando Alves Moreira, pela amizade, pelos ensinamentos e pelo apoio com as análises estatísticas.

Ao IFTM – Campus Uberaba, por toda a estrutura fornecida para a realização deste trabalho. Ao corpo docente do Mestrado Profissional em Produção Vegetal do IFTM – Campus Uberaba, pelos ensinamentos e experiências compartilhadas ao longo do curso.

Aos técnicos e servidores do IFTM – Campus Uberaba, que tornaram possível a realização do curso.

Aos meus amigos Vitor Gabriel, Lucas, André e Gabriel pelo apoio nas avaliações dos experimentos. O auxílio de vocês foi fundamental.

Aos amigos formados durante o curso de pós-graduação.

Ao grupo UbyAgro, por permitir realizar o experimento dentro de sua área de pesquisa e suportar em todos os recursos necessários para esta condução.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, muito obrigado.

A todos vocês, o meu muito obrigado!

## RESUMO

O desenvolvimento radicular adequado é fundamental para alcançar elevadas produtividades, dada sua relação direta com a absorção de água e nutrientes pelas culturas. Assim, nutrientes, aminoácidos e hormônios promotores do desenvolvimento de raízes são importantes nesse processo produtivo. Dentre os nutrientes, o zinco destaca-se por ativar enzimas que atuam na síntese de proteínas e carboidratos, além de ser importante para a produção de auxinas. Da mesma forma, o triptofano desempenha papel crucial na síntese de auxinas. As auxinas, por sua vez, influenciam o crescimento radicular e o desenvolvimento das raízes secundárias, responsáveis pela absorção de água e nutrientes. O presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação isolada e combinada de zinco, triptofano e auxina sobre o desenvolvimento radicular, fisiologia e produção da cultura da soja. O experimento foi conduzido em Uberaba, MG, na safra 2023-2024, em blocos completos casualizados, com oito tratamentos e oito repetições. Os tratamentos testados incluíram aplicações isoladas ou em combinações de zinco ( $4,2 \text{ g ha}^{-1}$ ), auxina ( $0,004 \text{ g ha}^{-1}$ ) e triptofano. Nas combinações, as quantidades de zinco e auxina foram fixas, variando-se apenas a concentração de triptofano, de  $1$  a  $8 \text{ g ha}^{-1}$  ( $1, 2, 4$  e  $8 \text{ g ha}^{-1}$ ). Todos os tratamentos foram aplicados via tratamento de sementes. Foram avaliados parâmetros de desenvolvimento, fisiológicos e produtivos, com destaque para comprimento radicular, matéria seca da raiz, fluorescência da fotossíntese, os componentes de produção e produtividade. Foi observada diferença significativa no parâmetro matéria seca da raiz, em que todos os tratamentos foram superiores à testemunha. Também foi observada diferença em parâmetros produtivos, nos quais o tratamento com aplicação isolada de AIA e aqueles com combinações de Zn, AIA e TRP (de  $1$  a  $4 \text{ g ha}^{-1}$ ) proporcionaram maior produtividade. Dentre estes tratamentos com resultados superiores, destaca-se o tratamento com a aplicação combinada de zinco, auxina e a menor concentração de triptofano ( $1 \text{ g ha}^{-1}$ ), tratamento este que teve aumento de produtividade superior a 6% em comparação com o segundo tratamento mais produtivo e aumento de 25% em relação à testemunha. Conclui-se que a interação entre zinco, triptofano e auxina favorece a produtividade da soja. Doses elevadas de triptofano, no entanto, podem ser prejudiciais.

Palavras-chave: *Glycine max*; raízes; nutrição; produção.

## ABSTRACT

Proper root development is essential for achieving high crop yields, given its direct relationship with water and nutrient uptake by plants. Therefore, nutrients, amino acids, and hormones that promote root development play an important role in this productive process. Among the nutrients, Zn stands out for activating enzymes involved in the synthesis of proteins and carbohydrates, as well as being important for AIA production. Similarly, TRP plays a crucial role in the synthesis of the same growth hormone, which in turn influences root elongation and the development of secondary roots responsible for water and nutrient absorption. This study aimed to evaluate the effects of the isolated and combined application of Zn, TRP, and AIA on root development, physiology, and soybean yield. The experiment was conducted in Uberaba, MG, during the 2023–2024 growing season, using a randomized block design with eight treatments and eight replications. The tested treatments included isolated or combined applications of Zn ( $4.2 \text{ g ha}^{-1}$ ), AIA ( $0.004 \text{ g ha}^{-1}$ ), and TRP. In the combined treatments, Zn and AIA concentrations were fixed, while TRP concentrations varied from 1 to  $8 \text{ g ha}^{-1}$  (1, 2, 4, and  $8 \text{ g ha}^{-1}$ ). All treatments were applied via seed treatment. Developmental, physiological, and productive parameters were evaluated, with emphasis on root length, root dry matter, photosynthetic fluorescence, and yield. The results indicated that yield was higher in treatments with isolated AIA application and in treatments combining Zn, AIA, and TRP at concentrations from 1 to  $4 \text{ g ha}^{-1}$ . Among these more productive treatments, the combination of Zn, AIA, and the lowest TRP concentration ( $1 \text{ g ha}^{-1}$ ) stood out, showing a yield increase of over 6% compared to the second most productive treatment, and a 25% increase compared to the control. It was concluded that the interaction between Zn, TRP, and AIA enhanced soybean yield, while higher doses of TRP may be detrimental. Thus, the application of  $4.2 \text{ g ha}^{-1}$  of Zn,  $0.004 \text{ g ha}^{-1}$  of AIA, and  $1 \text{ g ha}^{-1}$  of TRP is recommended.

Keywords: *Glycine max*; roots; nutrition; production.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1-Estrutura da enzima CuZn-SOD (Superóxido dismutase) e suas ligações com os aminoácidos histidina (His) e aspartato (Asp)..... 16
- Figura 2- Biossíntese de AIA, serotonina e melatonina a partir do TRP regulada pelas enzimas TRP descarboxilase, aromática L-aminoácido descarboxilase (AADC), triptamina 5 hidroxilase (TRP 5H), triptamina deaminase, serotonina-N-acetil transferase e hidroxindol Ometil transferase..... 199
- Figura 3- Estrutura química das AIAs vegetais.....222
- Figura 4- Ilustração das principais rotas de biossínteses das AIAs na planta, principalmente ácido indol-3-acético, produzido naturalmente pelas plantas. Legenda: ANT, antranilato; DAO, Dioxigenase para Oxidação de AIA; GH3, Gretchen Hagen3; AIA ou AIA, ácido indol-3-acético; IAM, indol-3-acetamida; IAN, indol-3-acetonitrilo; IAox, indol-3-acetaldoxima; IAR3, AIA-Alanine Resistant3; IBA, ácido indol-3-butírico; IGs, glucosinolatos de indol; IGP, fosfato de indol-3-glicerol; ILLs, ILR1-LIKE; ILR1, AIA-Leucina Resistente1; INS, indol sintase; IPyA, ácido indol-3-pirúvico; MeAIA, ácido metil indol-3-acético; oxAIA, ácido 2-oxindol-3-acético; PILS, curtidas com PIN; PIN, formado por PIN; TAA1, TRP Aminotransferase de Arabidopsis 1; TARs, proteínas relacionadas a TAA1, aminotransferases de TRP; TSA / TSB, subunidade A / B da TRP sintase; UGTs, glicosiltransferases de uridina-difosfato; VAS1, reversão de SAV3 fenótipo 1; WAT1, As Paredes São Finas1; YUC, YUCCA, monooxigenases contendo flavina.. .....244
- Figura 5- Parâmetros climáticos observados durante a condução do experimento (precipitação, temperatura e umidade relativa do ar) dos meses de novembro/2023 e dezembro/2023 (a) e janeiro/2024 e fevereiro/2024 (b)..... 27
- Figura 6- Teor (mg/Kg) de Zn encontrado nas folhas submetidas à análise laboratorial..... 35
- Figura 7- Parâmetros da curva OJIP de folhas recém maduras de soja avaliadas no estágio fenológico R3. .... 36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tratamentos utilizados e suas respectivas concentrações. ....	28
Tabela 2- Resultado da análise de solo da área de condução do experimento, nas profundidades de 0 – 20 cm (a) e 20 – 40 cm (b). Análise coletada via trado holandês no ano de 2023 ..... 29	29
Tabela 3- Aplicações realizadas durante a condução do ensaio, destacando-se o momento de aplicação, ativo utilizado, concentração de ativo e o alvo de destinação do produto utilizado. ....	31
Tabela 4- Média dos parâmetros de comprimento radicular (CR, em cm), massa da raiz seca (MRS, em g pl-1) e teor de clorofila Falker (TC, índice Falker). ....	34
Tabela 5- Média dos parâmetros obtidos de número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), Massa de mil grãos (MMG) e resultados de produtividade ..... 38	38

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
<b>2.1</b>	<b>A importância da soja na agricultura global e os desafios para o aumento da produtividade</b> .....	14
<b>2.2</b>	<b>Zn na nutrição de plantas</b> .....	15
<b>2.3</b>	<b>Os reguladores vegetais e sua ação na construção de plantas</b> .....	17
<b>2.4</b>	<b>TRP como precursor da biossíntese de AIA</b> .....	17
<b>2.4.1</b>	<i>Papel do TRP no desenvolvimento vegetal e tolerância ao estresse</i> .....	19
<b>2.5</b>	<b>AIA em plantas de soja</b> .....	21
<b>2.5.1</b>	<i>Regulação da AIA no desenvolvimento vegetal</i> .....	22
<b>2.5.2</b>	<i>Biossíntese, rotas metabólicas e transporte da AIA</i> .....	22
<b>2.5.3</b>	<i>Compartimentalização celular, regulação genética e transporte da AIA</i> .....	24
<b>2.5.4</b>	<i>Influência da AIA no crescimento e desenvolvimento da soja</i> .....	25
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	27
<b>3.1</b>	<b>Caracterização da área de estudo</b> .....	27
<b>3.2</b>	<b>Delineamento experimental e tratamentos</b> .....	27
<b>3.3</b>	<b>Preparo da área e implantação do ensaio</b> .....	29
<b>3.4</b>	<b>Condução do experimento</b> .....	30
<b>3.5</b>	<b>Avaliações</b> .....	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	34
<b>4.1</b>	<b>Parâmetros de desenvolvimento</b> .....	34
<b>4.2</b>	<b>Parâmetros fisiológicos</b> .....	36
<b>4.3</b>	<b>Parâmetros produtivos</b> .....	37
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	41
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	42

## 1 INTRODUÇÃO

Para que as culturas possam alcançar elevados patamares produtivos, é fundamental um bom desenvolvimento de raízes desde o início do ciclo, visto que o sistema radicular é o principal responsável pela absorção de água e nutrientes. Além disso, as raízes também podem ser usadas pela planta como órgão de reserva (Frankenberger *et al.*, 1990). Nas plantas, são encontradas raízes primárias, secundárias e terciárias. As raízes primárias originam as raízes secundárias e terciárias, que são as principais responsáveis pela absorção de água e nutrientes.

Na cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill), raízes bem desenvolvidas são necessárias para que a planta suporte adversidades hídricas e consiga absorver nutrientes em camadas mais profundas do solo. Nesse contexto, nutrientes e hormônios que proporcionem melhor surgimento e desenvolvimento das raízes secundárias e terciárias são de extrema importância.

Um balanço nutricional e hormonal adequado é importante para se atingir altas produtividades (Marschner, 2012). Quando um nutriente está em baixa disponibilidade, a planta regulará a produtividade por ele. Da mesma forma, os hormônios vegetais também são fundamentais para o desenvolvimento das plantas (Lehninger *et al.*, 1995). Na fisiologia vegetal, cada nutriente e hormônio tem importante função dentro do ciclo das plantas. Alguns nutrientes, aminoácidos e hormônios são especificamente importantes para uma boa formação do sistema radicular (Taiz; Zeiger, 2017). Dentre estes, destacam-se o zinco (Zn), o triptofano (TRP) e as auxinas (AIA).

O Zn é o nutriente responsável pela ativação de enzimas envolvidas na síntese de proteínas e carboidratos na planta (Hafeez *et al.*, 2013; Vallee; Auld, 1990). Também está relacionado à produção de TRP, aminoácido essencial para a produção de AIA na planta, através da enzima TRP descarboxilase (Casanova-Sáez; Voss, 2019; Kang *et al.*, 2007b; El-Bassiouny *et al.*, 2016). Por sua vez, as AIAs são hormônios vegetais ligados ao crescimento da planta, principalmente ao crescimento radicular (Lehninger *et al.*, 1995). As auxinas são metabolizadas no meristema apical das plantas e são fundamentais para o desenvolvimento e crescimento vegetal (Pelagio-Flores *et al.*, 2011; Koshiba *et al.*, 1993). Dessa forma, existe uma importante relação entre Zn, TRP e AIA no metabolismo vegetal, garantindo maiores produtividades por participarem diretamente de processos fundamentais (Taiz; Zeiger, 2017).

Todavia, ainda são necessários estudos que avaliem os efeitos isolados e integrados de estratégias nutricionais e bioestimulantes sobre o desenvolvimento de plantas de soja, em especial aquelas a partir de aplicações foliares de fertilizantes à base de TRP e AIAs. A hipótese

deste estudo é que a interação entre Zn, TRP e AIAs proporcione aumento do desenvolvimento radicular da cultura da soja, melhorias na estrutura da planta e aumento de produtividade.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da aplicação isolada e combinada de Zn, TRP e AIA sobre o desenvolvimento radicular, fisiologia e produção da cultura da soja.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A importância da soja na agricultura global e os desafios para o aumento da produtividade

A soja destaca-se como uma das culturas agrícolas mais relevantes em escala global, por ser uma fonte estratégica de proteína vegetal e óleo. É amplamente utilizada na alimentação humana, na formulação de rações animais e em diversos setores industriais (Jiang *et al.*, 2020a; Hartman *et al.*, 2011). Devido a essa versatilidade, o grão tornou-se uma das principais commodities do agronegócio internacional, movimentando milhões de toneladas anualmente entre exportações e importações (Jiang *et al.*, 2020b).

No cenário brasileiro, dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020) indicam que, em 2022/2023, a área cultivada com soja alcançou 43,4 milhões de hectares, com uma produção de 154,6 milhões de toneladas (USDA, 2023). Para a safra 2020/2021, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024) projetou um novo recorde, com estimativa de 131 milhões de toneladas. Essa tendência de crescimento se manteve nas safras subsequentes, sendo que, de acordo com o relatório de março de 2024 da CONAB, a produção brasileira de soja atingiu 155 milhões de toneladas, consolidando o país como o maior produtor mundial da leguminosa, superando os Estados Unidos em volume total.

Esse desempenho produtivo é favorecido não apenas pela expansão da área cultivada, mas também por fatores conjunturais, como a valorização cambial, a crescente demanda internacional — especialmente por parte da China — e os impactos das tensões geopolíticas entre grandes potências agrícolas (como EUA e China), além das consequências da pandemia de COVID-19 sobre cadeias logísticas e abastecimento global de alimentos. Nesse contexto, o Brasil tem se beneficiado de um cenário de alta liquidez e preços favoráveis para a soja no mercado internacional (USDA, 2023).

Apesar do avanço na produção total, o rendimento por unidade de área da soja não apresentou o mesmo dinamismo observado em outras culturas, como arroz, trigo e milho. Liu *et al.* (2020) argumentam que os incrementos observados nas últimas décadas derivam, em grande medida, do aumento da área plantada, e não necessariamente de ganhos expressivos em produtividade. Os autores referem-se à chamada "revolução verde" — caracterizada por inovações tecnológicas e genéticas que elevaram a produtividade de culturas gramíneas — e observam que tais avanços não se refletiram com a mesma intensidade na soja.

Entre os principais entraves para a elevação do rendimento médio da soja, destaca-se a limitação imposta por sua morfologia e arquitetura de planta. Diferentemente das gramíneas,

que possuem inflorescências terminais adaptadas ao adensamento de cultivo, a soja requer maior espaçamento devido à sua arquitetura ramificada. Nesse sentido, o melhoramento genético voltado à obtenção de cultivares com arquitetura ideal- caracterizada por plantas de altura otimizada, entrenós mais curtos e numerosos, menor número de ramos laterais, moderada quantidade de vagens por nó, maior proporção de vagens com quatro sementes e peso de cem sementes intermediário - tem sido apontado como um caminho promissor para intensificar o uso dos recursos produtivos (Liu *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2022).

O desenvolvimento de genótipos mais eficientes em termos de arquitetura e resposta a insumos, aliado ao uso racional de fertilizantes, práticas sustentáveis de manejo e tecnologias de precisão, constituem uma estratégia essencial para a superação a longo prazo dos limites atuais de produtividade (Jiang *et al.*, 2020a; Hartman *et al.*, 2011). Porém, deve-se atentar a mudanças climáticas severas e os estresses que podem causar. A redução desses estresses deve ser vista como estratégia imediata para aumento de produtividade (Rohr *et al.*, 2023).

## **2.2 Zn na nutrição de plantas**

O Zn (Zn) é um metal de transição que ocupa a vigésima terceira colocação entre os mais abundantes do planeta Terra (Hussai *et al.*, 2022). Em plantas, esse elemento químico é o segundo em maior concentração após o ferro e representa as seis classes de enzimas. O local em que o Zn se liga estruturalmente nas enzimas permite o enovelamento ideal da proteína como é o caso do álcool desidro-genase e quinases. Nesse processo, o Zn liga-se a quatro átomos ou moléculas como é o caso da cisteína, aspartato e glutamato e, algumas vezes, a molécula de água (Marschner, 2012).

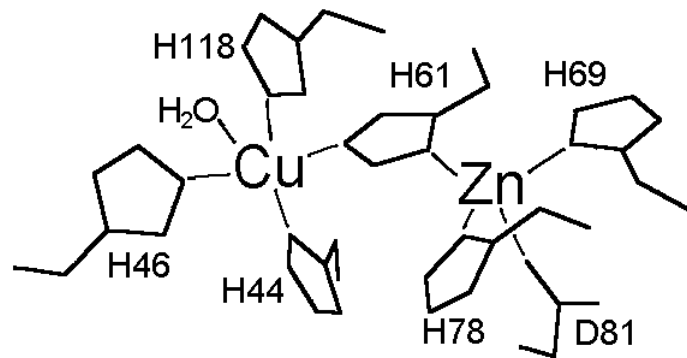
Nas enzimas em que o Zn é requerido, quatro tipos de ligações são identificados: (i) catalítica; (ii) estrutural; (iii) cocatalítica e (iv) interface com a proteína. A partir dessas ligações, a atividade biológica das enzimas é induzida (Sousa *et al.*, 2009).

O Zn também é requerido para a síntese de TRP, aminoácido precursor das AIAs. Neste caso em enzimas relacionadas à replicação do DNA, o Zn encontra-se coordenado com dois resíduos de cisteína, uma histidina e uma molécula de água, sendo que o Zn estrutural está ligado a quatro resíduos de cisteína. A proporção de aminoácidos ligados ao Zn se dá por: 28% histidina, 23% cisteína, 10% aspartato, 11% glutamato, 15% água e 10% outros aminoácidos (Rohr, 2023).

Como já relatado, o Zn é cofator de diversas enzimas. Dentre elas, a anidrase carbônica, responsável por realizar a hidratação da molécula de CO<sub>2</sub> e apresenta um único átomo de Zn

em sua composição química (Vallee; Auld, 1990). Também é cofator, junto com o Cobre, da Superóxido dismutase (SOD) (Figura 1), responsável por transformar os oxigênios tóxicos em não-tóxicos para as plantas (Broadley *et al.*, 2007).

Figura 1- Estrutura da enzima CuZn-SOD (Superóxido dismutase) e suas ligações com os aminoácidos histidina (His) e aspartato (Asp).



Fonte: Adaptado de Miller (2004).

O Zn é necessário para manter a integridade da membrana celular. A ligação em grupos fosfolipídicos e sulfidril de constituintes da membrana ou complexos de forma tetraédrica com resíduos de cisteína de cadeia de polipeptídios protege a membrana lipídica de proteínas contra estresse oxidativo. A presença de Zn como constituinte da enzima SOD também permite o controle da formação de radicais livres como é o caso do O<sub>2</sub> (radical superóxido) (Hafeez *et al.*, 2013).

Quando a planta apresenta deficiência de Zn, a produção de radicais de superóxido é incrementada induzindo posteriormente a formação de OH<sup>•</sup>. Esse radical aumenta o processo de oxidação que inclui a peroxidação lipídica e a degradação oxidativa das AIAs. Assim, a baixa concentração de Zn em plantas pode causar a inibição da síntese de AIAs, devido à sua ação na ativação da enzima TRP sintase e aumento da degradação de AIAs (Marshner, 2012).

Os sintomas mais característicos de deficiência de Zn são a diminuição do crescimento em altura com crescimento em roseta, resultado da redução do crescimento internodal. Apresenta clorose em folhas velhas, lembrando folhas queimadas pelo sol, devido à capacidade de produzir AIAs (Hafeez *et al.*, 2013).

### **2.3 Os reguladores vegetais e sua ação na construção de plantas**

Os biorreguladores vegetais constituem compostos orgânicos capazes de modular processos morfofisiológicos nas plantas, mesmo quando presentes em concentrações extremamente baixas. Atualmente, são classificados em cinco principais grupos: AIA, giberelinas, citocininas, inibidores e retardadores de crescimento (Ácido abscísico (ABA)), e etileno (Porfírio *et al.*, 2016). Esses biorreguladores, de origem natural ou sintética, podem ser aplicados diretamente em sementes, folhas e frutos com o objetivo de induzir alterações em processos fisiológicos e/ou estruturais. Essas alterações podem promover incrementos na produtividade, melhoria na qualidade de produtos agrícolas e otimização das práticas de manejo, como a colheita.

A aplicação exógena de biorreguladores possibilita a manipulação de diversos eventos fisiológicos, incluindo germinação, enraizamento, indução floral, frutificação e senescência. A eficiência desses compostos depende de sua absorção pelos tecidos vegetais, podendo ser administrados via sementes, solo ou pulverização foliar (Wang *et al.*, 2015).

Os fitormônios, principais agentes ativos dos biorreguladores, atuam em concentrações micromolares ou submicromolares. A resposta fisiológica induzida por esses hormônios depende de três elementos fundamentais: (a) a presença de níveis hormonais adequados nas células-alvo; (b) a existência de mecanismos celulares capazes de reconhecer e internalizar os sinais hormonais — processo mediado por proteínas receptoras localizadas na membrana plasmática, as quais possuem estrutura tridimensional específica para reconhecimento e ligação aos hormônios; e (c) a ativação de vias de sinalização intracelular por meio das proteínas receptoras, promovendo alterações metabólicas que resultam na amplificação e transdução do sinal hormonal (Taiz; Zeiger, 2017).

Os reguladores vegetais atuam em diversos processos na planta, provocando alterações físicas, químicas e metabólicas. A ação inicial dos hormônios vegetais ocorre na membrana plasmática, onde se localizam as proteínas receptoras responsáveis pelo reconhecimento e ativação das vias de sinalização intracelular.

### **2.4 TRP como precursor da biossíntese de AIA**

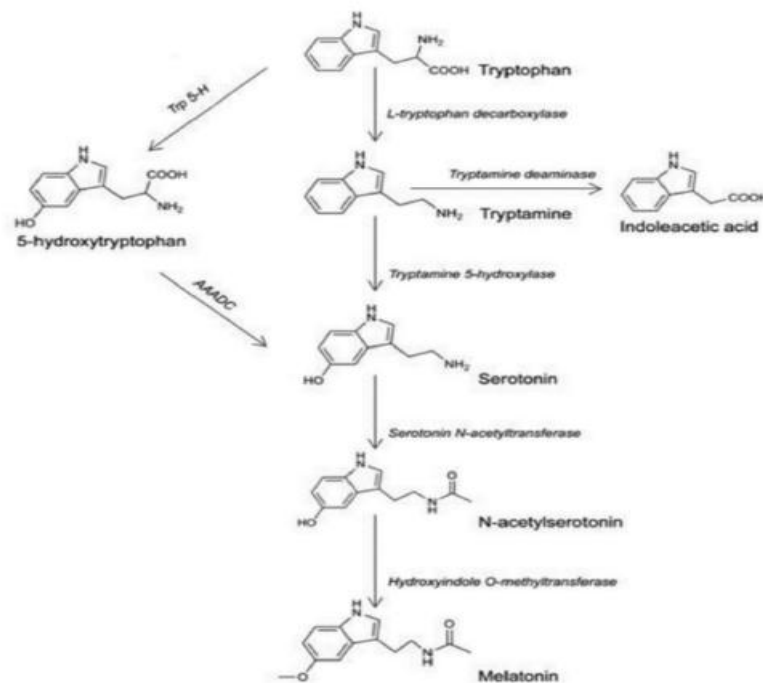
O aminoácido TRP (TRP) é reconhecido como o principal precursor das rotas biossintéticas do ácido indol-3-acético (AIA), a principal AIA natural em plantas (Taiz; Zeiger,

2017). Sua síntese ocorre por meio de uma via metabólica compartilhada inicialmente com os aminoácidos aromáticos fenilalanina e tirosina. Estudos pioneiros conduzidos por Bergmann, Grosse e Ruppel (1970), ao analisarem a dinâmica da serotonina em sementes de *Juglans regia*, demonstraram que o fornecimento exógeno de TRP em cotilédones isolados em meio de cultura resultou em aumento da biossíntese de AIA e serotonina, evidenciando o papel central do TRP como precursor de diversas moléculas bioativas, incluindo também a melatonina.

Mukherjee (2018) ressalta a importância fisiológica do TRP ao destacar sua participação na via de degradação que resulta na formação de AIA. Ainda segundo o autor, a AIA, em sinergia com outros fitormônios, influencia positivamente o funcionamento das proteínas transportadoras PIN (essenciais para a regulação da protrusão da radícula). Além disso, a interação entre AIA e ácido jasmônico tem sido associada à modulação da arquitetura radicular e à indução de mecanismos de tolerância a estresses abióticos (como a deficiência hídrica) e bióticos (como infecções fúngicas e ataque de insetos) (Mukherjee, 2018; Wan *et al.*, 2018).

Atualmente, com base em estudos genéticos e bioquímicos, duas rotas principais para a biossíntese do AIA a partir do TRP são propostas em plantas (Figura 4), conforme descrito por Zhao *et al.* (2018). Tais vias incluem tanto rotas dependentes do TRP quanto alternativas independentes, o que evidencia a plasticidade metabólica das plantas na produção desse fitormônio essencial. Isso demonstra que o TRP não está relacionado apenas a Síntese de AIA (Figura 2) mas também, outros compostos importantes para as plantas, como outros aminoácidos (Figura 4).

Figura 2- Biossíntese de AIA, serotonina e melatonina a partir do TRP regulada pelas enzimas TRP descarboxilase, aromática L-aminoácido descarboxilase (AADC), triptamina 5 hidroxilase (TRP 5H), triptamina deaminase, serotonina-N-acetil transferase e hidroxindol Ometil transferase.



Fonte: Zhao *et al.*, 2018.

Adicionalmente, Sherwin (1970) identificou, em hipocótilos de pepino (*Cucumis sativus*), a atividade da enzima TRP descarboxilase, responsável pela conversão de TRP em triptamina na presença de piridoxal-5'-fosfato, sob pH neutro. Posteriormente, foi verificado que a triptamina sofre hidroxilação pela enzima triptamina-5-hidroxilase, formando assim o AIA, o que contribuiu para elucidar a rota biossintética da AIA a partir do TRP (Grosse; Karisch; Schröder, 1983)

#### 2.4.1 Papel do TRP no desenvolvimento vegetal e tolerância ao estresse

A elucidação das vias biossintéticas da AIA a partir do TRP (TRP) desencadeou uma série de estudos voltados à compreensão do papel fisiológico desse aminoácido no desenvolvimento vegetal. Kang *et al.* (2007a), ao caracterizarem a enzima triptamina 5-hidroxilase em plantas de arroz (*Oryza sativa*), observaram que sua atividade é mais pronunciada nas raízes, sendo intensificada pela presença de triptamina e inibida por concentrações elevadas de TRP. Em continuidade, Kang *et al.* (2007b) caracterizaram a enzima TRP descarboxilase na mesma espécie, identificando um alto valor de Km, o que sugere uma

elevada afinidade da enzima por seu substrato. Já Kang *et al.* (2009), ao superexpressarem a TRP descarboxilase e induzirem a senescência foliar, verificaram acúmulo de TRP nas folhas senescentes, o que resultou no retardo da senescência, corroborando com resultados obtidos anteriormente por Huang e Kao (1992).

No contexto do estresse abiótico, Abdel-Monem *et al.* (2016) realizaram um estudo pioneiro utilizando TRP para mitigar os efeitos da salinidade em girassóis (*Helianthus annuus*), cultivados sob diferentes concentrações de NaCl. Os resultados indicaram incrementos significativos em crescimento, produção de sementes e rendimento de óleo, associados ao aumento nos níveis de AIA, pigmentos fotossintéticos, carboidratos e proteínas. Esses efeitos foram atribuídos à melhoria da absorção hídrica via modulação do sistema radicular. Da mesma forma, Cabrini *et al.* (2019) verificaram que a aplicação exógena de TRP em plantas de milho (*Zea mays*), associada ao fungo *Torulaspora globosa*, promoveu a germinação, o crescimento e a ativação de sistemas antioxidantes e mecanismos osmorregulatórios. Em cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), Rodrigues *et al.* (2016) observaram que o TRP é utilizado por bactérias endofíticas do gênero *Gluconacetobacter* para a biossíntese de AIA, beneficiando diretamente o crescimento vegetal.

A atuação do TRP como biorregulador também tem sido associada à melhoria do desempenho vegetal frente a maiores desenvolvimentos radiculares, promovendo maior vigor, tolerância e eficiência metabólica (Srivastava *et al.*, 2016). Essa molécula participa de rotas sinalizadoras que incrementam a expressão de genes relacionados à formação de radículas (Tan *et al.*, 2012; Szafranska *et al.*, 2012; Vlot *et al.*, 2009). Em culturas como mirtilo e maçã, a aplicação de TRP tem mostrado efeitos positivos no rendimento e na qualidade dos frutos (Milic *et al.*, 2018; Rehman *et al.*, 2018). Zhang *et al.* (2014) reforçam que níveis adequados de TRP aumentam a resistência vegetal a diversos tipos de estresses e produção de raízes secundárias e terciárias. Tan *et al.* (2013) sugerem que altos níveis de TRP, produzidos por cloroplastos e mitocôndrias, contribuem para a manutenção das funções fisiológicas e defesa contra danos oxidativos.

O TRP é uma molécula presente em praticamente todas as espécies vegetais estudadas e demonstra alta permeabilidade nos compartimentos intracelulares, exercendo ação direta sobre a formação de AIA, o que promove este maior desenvolvimento radicular (Erland *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2017; Arnao; Hernandez-Ruiz, 2019). Estudos relatam a promoção do enraizamento primário e secundário, aumento da germinação e maior peso de plantas em

diversas espécies quando submetidas à aplicação exógena de TRP (Chen *et al.*, 2009; Hernández-Ruiz *et al.*, 2015; Sarrou *et al.*, 2014; Xiao *et al.*, 2019).

Adicionalmente, Chen *et al.* (2020) observaram que o pré-tratamento de sementes de algodão com TRP aumentou a concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e MDA, indicando estresse oxidativo leve e induzindo respostas bioquímicas favoráveis, como o aumento de açúcares, proteínas e prolina. TRP também demonstrou ação protetora contra estresses como salinidade, calor excessivo e agentes químicos, regulando enzimas antioxidantes como superóxido dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) e glutatona peroxidase (GSH-Px) (Gitto *et al.*, 2001; Xiao *et al.*, 2019). Ahammed *et al.* (2019) observaram aumento de até 90% na atividade da SOD em plantas tratadas com TRP sob altas temperaturas.

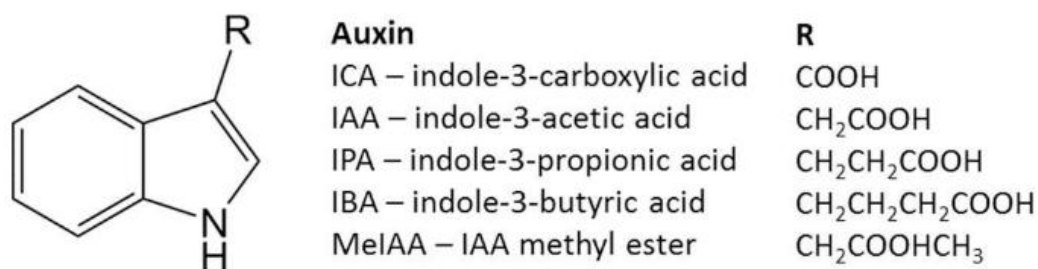
Na cultura da soja, Wei *et al.* (2014) demonstraram que o TRP ativa genes relacionados à divisão celular, fotossíntese, metabolismo de carboidratos, biossíntese de ácidos graxos e senescência foliar, reiterando seu papel multifuncional. Embora a literatura destaque a associação do TRP com moléculas como AIA, melatonina, giberelinas e ácido jasmônico, ainda há lacunas importantes no entendimento do papel autônomo do TRP nas plantas. Estudos integrados e conduzidos sob condições naturais de cultivo são necessários para esclarecer se o TRP atua como um mensageiro direto ou um modulador indireto de vias metabólicas primárias e secundárias, bem como sua real contribuição nos processos fisiológicos vegetais, de forma independente ou em associação com outros compostos bioativos.

## 2.5 AIA em plantas de soja

A AIA é considerada o principal hormônio vegetal de baixo peso molecular do ponto de vista fisiológico, desempenhando um papel fundamental na regulação do crescimento e desenvolvimento das plantas (Porfírio *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2015). Quimicamente, as AIAs correspondem a compostos do tipo ácido indólico, que apresentam variações estruturais em suas cadeias laterais (Porfírio *et al.*, 2016), conforme representado na Figura 1.

O ácido indol-3-acético (AIA) destaca-se como a principal AIA natural, sendo também a mais amplamente descrita na literatura científica. Além do AIA, outras AIAs já foram identificadas, incluindo o ácido indolcarboxílico (ICA), o ácido indol-3-propiónico (IPA), o ácido indol-3-butírico (IBA) e o metil-éster do ácido indol-3-acético (Me-AIA), todas relatadas por Porfírio *et al.* (2016).

Figura 3- Estrutura química das AIAs vegetais



Fonte: Porfírio *et al.* (2016).

### 2.5.1 Regulação da AIA no desenvolvimento vegetal

A AIA é reconhecida como o principal fitormônio envolvido na regulação do desenvolvimento vegetal, atuando em processos fundamentais como a morfogênese e as respostas adaptativas às condições ambientais. Conforme discutido por Casanova-Sáez e Voss (2019), a ação da AIA ocorre de forma dose-dependente, o que exige uma regulação extremamente precisa de sua concentração em níveis celulares, teciduais e organográficos.

Diversos mecanismos foram evolutivamente selecionados pelas plantas para manter a homeostase hormonal e promover a redistribuição espacial da AIA. Além disso, tecidos distintos apresentam diferentes graus de sensibilidade à AIA, o que influencia diretamente a intensidade e a especificidade da resposta fisiológica, incluindo os processos de percepção e sinalização (Casanova-Sáez, Voss, 2019).

Porfírio *et al.* (2016), em revisão de literatura, destacam a utilização da AIA em técnicas de propagação vegetal e em outros processos associados à morfofisiologia das plantas. Complementando essa perspectiva, Casanova-Sáez e Voss (2019) enfatizam que a concentração intracelular de AIA atua como fator determinante para a ativação de respostas específicas, como divisão celular, alongamento e diferenciação.

Na cultura da soja, Jiang *et al.* (2020b) investigaram as variações na concentração de AIA durante o desenvolvimento do caule e observaram que esse fitormônio regula diretamente a divisão e o alongamento celular. Tais processos, mediados pela concentração local de AIA, moldam a arquitetura da planta, sendo responsáveis por características agronômicas importantes, como a altura das plantas e a resistência ao acamamento, as quais estão diretamente relacionadas à formação e ao comprimento dos entrenós.

### 2.5.2 *Biossíntese, rotas metabólicas e transporte da AIA*

A biossíntese de AIA ocorre predominantemente nos primórdios foliares e em folhas jovens (Jiang *et al.*, 2020b). No entanto, outros tecidos, tanto da parte aérea quanto da raiz, também apresentam capacidade biossintética (Casanova-Sáez; Voss, 2019). O desenvolvimento vegetal depende de um ajuste preciso dos gradientes locais de AIA, que são controlados por mecanismos coordenados de síntese, transporte, conjugação e degradação. Tais mecanismos são frequentemente autorregulados pela própria AIA, o que contribui para a elevada complexidade dos sistemas de regulação hormonal (Casanova-Sáez; Voss, 2019).

Somente nas últimas décadas, após cerca de 70 anos da descoberta da AIA, as principais rotas biossintéticas e catabólicas do AIA, a principal AIA natural, foram elucidadas. Wang *et al.* (2015) descrevem duas rotas principais de biossíntese do AIA: (i) a via dependente de TRP (TRP) e (ii) a via independente de TRP. Na via dependente de TRP, diversos derivados desse aminoácido atuam como precursores do AIA, incluindo o ácido indol-pirúvico (IPyA), a indol acetaldoxima (IAOx) e a indol acetamida (IAM) (Casanova-Sáez; Voss, 2019).

Estudos mais recentes, como o de Jiang *et al.* (2020a), indicam vias adicionais para a biossíntese do AIA, a partir de: (i) triptamina; (ii) indol-3-acetonitrila (IAN); e (iii) IPyA. Dentre essas rotas, apenas a via do IPyA foi completamente elucidada até o momento. Esses autores também identificaram três outras vias metabólicas do TRP que competem com a biossíntese de AIA, contribuindo para a regulação da disponibilidade de substrato e manutenção da homeostase hormonal.

As enzimas envolvidas na síntese do AIA são, geralmente, codificadas por grandes famílias gênicas, o que dificulta a identificação e caracterização específica das vias individuais (Casanova-Sáez; Voss, 2019). Apesar desses desafios, avanços significativos têm sido alcançados, revelando como as plantas utilizam essa complexidade metabólica para modular de forma precisa a produção local de AIA, ajustando o desenvolvimento às condições ambientais e fisiológicas.

A Figura 2, adaptada de Casanova-Sáez e Voss (2019), ilustra as principais rotas de biossíntese da AIA. No esquema, o AIA e seus metabólitos relacionados são destacados em preto; as enzimas catalisadoras das reações estão indicadas em roxo; as vias bem caracterizadas são representadas por setas contínuas; as rotas ainda não completamente elucidadas, são indicadas por setas tracejadas; e os transportadores de membrana associados ao processo estão representados por cilindros coloridos.



A manutenção dos gradientes de AIA é rigidamente controlada pelo metabolismo vegetal, sendo regulada por uma complexa rede de vias metabólicas paralelas que integram processos de síntese, transporte, armazenamento, sinalização e inativação do AIA. Essas rotas são influenciadas por fatores tanto genéticos quanto ambientais, evidenciando a complexidade da regulação hormonal nas plantas. Conforme representado na Figura 2, tais rotas ainda apresentam lacunas significativas de conhecimento e permanecem como objeto de intensa investigação científica (Casanova-Sáez; Voss, 2019).

Alterações fisiológicas e respostas a estímulos ambientais podem provocar modificações rápidas nos níveis endógenos de AIA. Como estratégia adaptativa, as plantas mantêm mecanismos altamente sensíveis de detecção e resposta ao AIA, permitindo o monitoramento constante de suas concentrações nos tecidos. Um dos aspectos mais intrigantes da biologia vegetal é o fato de o próprio AIA participar da regulação de sua percepção, transporte e metabolismo, interagindo ainda com outros fitormônios. A compreensão de como esses mecanismos são coordenados permanece como uma importante lacuna na fisiologia vegetal (Casanova-Sáez; Voss, 2019).

No contexto da regulação genética, estudos conduzidos por Jiang *et al.* (2020a) em plântulas de soja demonstraram que a expressão dos genes GmYUCs e GmTAA1a é induzida em condições de sombreamento, promovendo o aumento na produção de AIA. Esses genes estão associados à via de biossíntese da AIA, sendo ativados direta ou indiretamente por diferentes AIAs e seus derivados conjugados (Jiang *et al.*, 2020b). Além disso, Xu, Hagen e Guilfoyle (1997) identificaram que genes da família SAUR (Small AIA-Up RNA) são rapidamente expressos em resposta à aplicação exógena de AIA em soja, sendo sua transcrição detectada poucas horas após a exposição ao hormônio.

Após sua síntese, a AIA é transportada de maneira ativa, polarizada e majoritariamente em sentido basípeto, característica essencial para a formação de gradientes funcionais nos tecidos. Apesar de ser uma molécula fotofóbica, o AIA também pode se mover entre células adjacentes por difusão, através dos plasmodesmos, contribuindo para sua redistribuição local (Gao *et al.*, 2020).

#### **2.5.4 Influência da AIA no crescimento e desenvolvimento da Soja**

As auxinas são fitormônios essenciais que regulam diversos processos fisiológicos nas plantas, incluindo a soja. Elas desempenham papéis cruciais no crescimento celular,

diferenciação tecidual e na arquitetura da planta, influenciando diretamente a produtividade e o desenvolvimento da cultura (Jiang *et al.*, 2020a).

A principal auxina natural, o AIA, é sintetizada predominantemente nos meristemas apicais e nas folhas jovens. Ela promove o alongamento celular e a divisão celular nos meristemas apicais e no câmbio vascular, além de induzir a diferenciação de tecidos vasculares. Essas funções são fundamentais para o crescimento em altura e o desenvolvimento do sistema radicular da soja (Jiang *et al.*, 2020b).

Um aspecto notável da ação das auxinas é a dominância apical, fenômeno em que o crescimento da gema apical inibe o desenvolvimento das gemas laterais (Taiz; Zeiger, 2017). Esse mecanismo é mediado pela auxina, que ao ser transportada da gema apical para as regiões inferiores da planta, suprime o crescimento lateral. A quebra dessa dominância, pode estimular a formação de ramos laterais, aumentando o número de flores e vagens, e, conseqüentemente, a produtividade da soja (Zhao, 2018).

As auxinas também interagem com outros hormônios vegetais, como as citocininas. Enquanto as auxinas inibem o crescimento das gemas laterais, as citocininas promovem esse crescimento. O equilíbrio entre esses hormônios é crucial para a arquitetura da planta. Em situações de quebra da dominância apical, a redução nos níveis de auxina pode levar a um aumento na concentração de citocininas favorecendo a ramificação e potencializando a produtividade (Taiz; Zeiger, 2017).

Além das auxinas naturais, auxinas sintéticas, como o ácido naftalenoacético (ANA) e o ácido indolbutírico (AIB), têm sido utilizadas para manipular o desenvolvimento da soja. Estudos demonstram que a aplicação dessas auxinas pode influenciar positivamente o crescimento das sementes e o acúmulo de proteínas de reserva, especialmente quando combinadas com outros hormônios como as giberelinas e as citocininas (Jiang *et al.*, 2020a; Casanova-Sáez; Voss, 2019).

A aplicação de reguladores de crescimento contendo auxinas também tem mostrado efeitos benéficos na produtividade da soja. Por exemplo, o uso de produtos que combinam auxinas, citocininas e giberelinas pode aumentar o rendimento de grãos e alterar a composição química das sementes, favorecendo o teor de proteínas (Sudadi; Suryono, 2015).

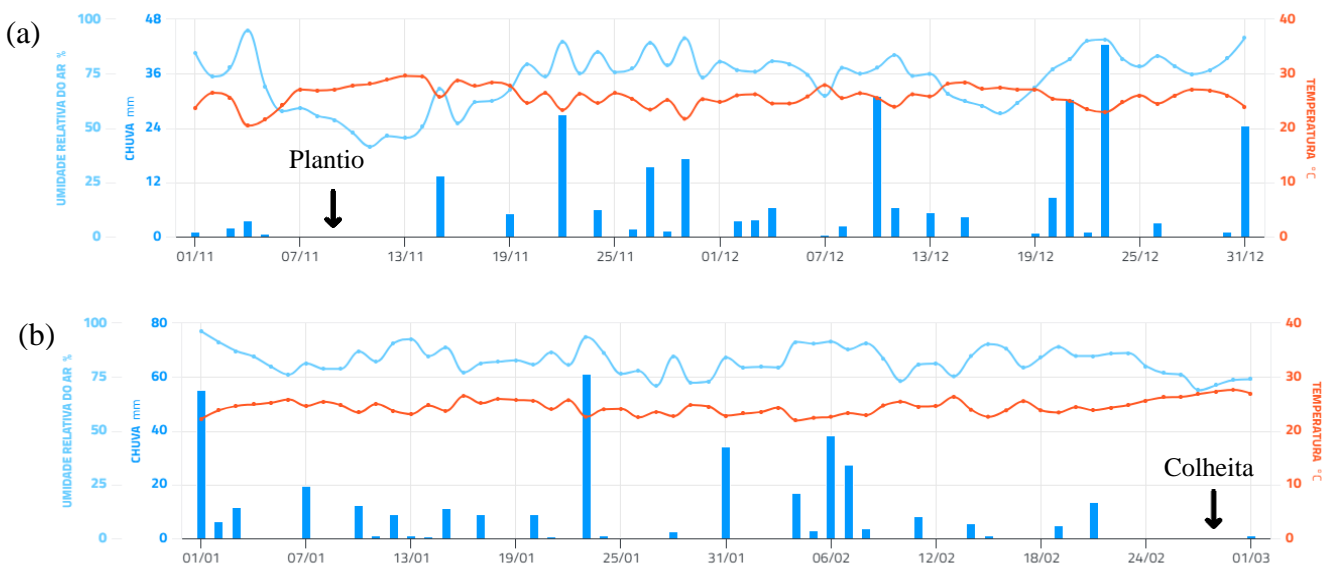
Em resumo, as auxinas desempenham papéis multifacetados no desenvolvimento da soja, influenciando desde o crescimento inicial até a formação de estruturas reprodutivas. A compreensão detalhada de suas funções e interações com outros hormônios é essencial para o manejo eficiente da cultura, visando maximizar a produtividade e a qualidade dos grãos.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido na Estação de Pesquisas da UBYAGRO, localizada no município de Uberaba, MG, no ano agrícola de 2023-2024. O local se caracteriza por apresentar um solo do tipo LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (Oliveira, 2007), em altitude de 762 metros; 19° 43' de latitude Sul e 47° 57' de longitude Oeste de Greenwich. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico com inverno seco (Aw) (Köppen, 2018). Os parâmetros climáticos durante a condução do experimento foram coletados com o auxílio de estação meteorológica (Figura 5).

Figura 5- Parâmetros climáticos observados durante a condução do experimento (precipitação, temperatura e umidade relativa do ar) dos meses de novembro/2023 e dezembro/2023 (a) e janeiro/2024 e fevereiro/2024 (b).



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

#### 3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados (DBC), com oito tratamentos e oito repetições. Os tratamentos constaram da aplicação de diferentes bioestimulantes experimentais, a base de Zn, TRP e AIA de forma isolada ou combinada, conforme descrito na Tabela 1. Cada parcela experimental foi constituída de seis linhas

espaçadas de 50 cm por 5 m de comprimento, perfazendo uma área total de três x cinco = 15 m<sup>2</sup>. Portanto, a área total do experimento foi de 960 m<sup>2</sup>.

As doses de Zn e AIA utilizadas neste estudo foram baseadas em informações observadas na literatura. De modo geral, o zinco é aplicado em concentrações entre 50 e 200 g ha<sup>-1</sup> (Montanha *et al.*, 2020; Broadley, 2007; Rohr *et al.*, 2023), TRP é aplicado em doses de até 20 g ha<sup>-1</sup> (Sudadi *et al.*, 2015) e AIA é aplicada de 0,003 a 0,004 g ha<sup>-1</sup> (Sudadi *et al.*, 2015). Foi realizado um ajuste para apenas estimular a planta a utilizá-lo na produção de TRP, já que os dois podem ser antagônicos e, em altas concentrações de Zn, a planta poderá utilizá-lo na produção de outros compostos (Malta *et al.*, 2002).

As concentrações de Zn e de AIA, quando presentes nos tratamentos, foram fixas, com 42 g.L<sup>-1</sup> de Zn e 0,04 g.L<sup>-1</sup> de AIA do produto (Tabela 1). Já as concentrações de TRP, variaram de 10 a 80 g.L<sup>-1</sup> do produto. Assim, utilizando-se 100 ml do produto por hectare, as aplicações foram de 4,2 g ha<sup>-1</sup> de Zn, 0,004 g ha<sup>-1</sup> de AIA e variando de 1 a 8 g de TRP por hectare (Tabela 1).

Para cada tratamento foi desenvolvido um produto com as devidas concentrações (Tabela 1). Cada tratamento foi aplicado ao equivalente em 100 ml por hectare nas sementes. Foi pesado, inicialmente, um quilograma de sementes e tratadas então com 2,5 ml de cada tratamento. Quando as sementes estavam secas, foi iniciado o plantio.

Os produtos utilizados nos tratamentos foram desenvolvidos em laboratório com as respectivas concentrações dispostas na tabela 1. Como fontes, foram utilizados Sulfato de Zinco, Triptofano isolado e ácido indol-3-acético isolado.

Tabela 1- Tratamentos utilizados e suas respectivas concentrações.

Tratamentos	Concentrações do ativo (g L <sup>-1</sup> )	Quantidade por hectare
Testemunha (sem aplicação)	-	-
Zn	42 g	4,2 g
TRP	20 g	2 g
AIA	0,04 g	0,004 g
Zn + TRP + AIA	42g + 10g + 0,04g	4,2g + 1g + 0,004g
Zn + TRP + AIA	42g + 20g + 0,04g	4,2g + 2g + 0,004g
Zn + TRP + AIA	42g + 40g + 0,04g	4,2g + 4g + 0,004g
Zn + TRP + AIA	42g + 80g + 0,04g	4,2g + 8g + 0,004g

Zn: Zn; TRP: TRP; AIA: Ácido índol acético.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

### 3.3 Preparo da área e implantação do ensaio

Os parâmetros químicos do solo estavam adequados para o cultivo de soja, de acordo com os resultados da análise de solo realizada previamente à instalação do experimento (São Paulo, 2022).

Tabela 2- Resultado da análise de solo da área de condução do experimento, nas profundidades de 0 – 20 cm (a) e 20 – 40 cm (b). Análise coletada via trado holandês no ano de 2023.

(a)	pH (CaCl <sub>2</sub> )	P (mg/dm <sup>3</sup> )	K (cmolc/dm <sup>3</sup> )	Ca (mmolc/dm <sup>3</sup> )	Mg (mmolc/dm <sup>3</sup> )	Al (mmolc/dm <sup>3</sup> )	H+Al (mmolc/dm <sup>3</sup> )	SB (mmolc/dm <sup>3</sup> )	T (mmolc/dm <sup>3</sup> )	
	6,3	16	0,62	23,1	7	N/D	16	30,71	46,71	
	V (%)	MO (g/dm <sup>3</sup> )	Zn (mg/dm <sup>3</sup> )	Fe (mg/dm <sup>3</sup> )	Mn (mg/dm <sup>3</sup> )	Cu (mg/dm <sup>3</sup> )	B (mg/dm <sup>3</sup> )	S (mg/dm <sup>3</sup> )	Areia (%)	Silte (%)
65,75	21	0,7	21	1,74	0,5	<0,12	8,1	62,1	26,9	11
(b)	pH (CaCl <sub>2</sub> )	P (mg/dm <sup>3</sup> )	K (cmolc/dm <sup>3</sup> )	Ca (mmolc/dm <sup>3</sup> )	Mg (mmolc/dm <sup>3</sup> )	Al (mmolc/dm <sup>3</sup> )	H+Al (mmolc/dm <sup>3</sup> )	SB (mmolc/dm <sup>3</sup> )	T (mmolc/dm <sup>3</sup> )	
	6,2	14,8	1,68	22,4	5,8	N/D	13	29,9	42,9	
	V (%)	MO (g/dm <sup>3</sup> )	Zn (mg/dm <sup>3</sup> )	Fe (mg/dm <sup>3</sup> )	Mn (mg/dm <sup>3</sup> )	Cu (mg/dm <sup>3</sup> )	B (mg/dm <sup>3</sup> )	S (mg/dm <sup>3</sup> )	Areia (%)	Silte (%)
69,7	16,4	0,8	14,5	0,92	0,6	<0,12	7,2	20,8	52,7	26,5

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Para preparo da área, realizaram-se duas gradagens com grades médias. Em seguida, implementou-se *Brachiaria 29rizantha*, por meio de semeadura a lanço com 6 kg de sementes por hectare. A espécie preparou a área com palhada para proteção do solo.

Aos 75 dias após a semeadura da *Brachiaria* e 30 dias de antecedência ao plantio da soja, a área foi dessecada com glifosato (1800 g ia há<sup>-1</sup>). Foi utilizada plantadora de plantio direto TATU para distribuição da adubação fosfatada e marcação das linhas de plantio. Em todas as parcelas foram utilizados 667 kg há<sup>-1</sup> de superfosfato simples (21% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) para disponibilizar a quantidade 140 kg há<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (São Paulo, 2022).

O plantio foi realizado em quinze de novembro de 2023, com o auxílio da plantadora manual LF550 PRO. A cultivar de soja utilizada foi a BMX FOCO 74177 RSF IPRO, instalada na densidade de 10 cm entre plantas e 50 cm entre linhas de plantio (10 plantas por metro), correspondendo a população com um total de 200 mil plantas por hectare.

Também foram aplicados, em todas as parcelas, 200 kg há<sup>-1</sup> de KCl (60% de K<sub>2</sub>O), com uma aplicação de 100 kg há<sup>-1</sup> em V3 e outra aplicação de 100 kg há<sup>-1</sup> em V5. As aplicações correspondem a uma adubação total de 120 kg há<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (São Paulo, 2022).

As sementes foram inoculadas com 250 gramas de *Bradyrhizobium* por hectare (recomendado pelo fabricante), tendo em vista ser uma área com histórico de 3 anos de plantio de soja com inoculação da bactéria. Como apenas a inoculação suportaria a necessidade de nitrogênio da planta, a adubação nitrogenada foi dispensada.

### **3.4 Condução do experimento**

Durante o experimento, foram realizadas seis aplicações voltadas ao manejo da cultura (Tabela 3), abrangendo o controle de plantas daninhas, pragas e doenças. As aplicações seguiram as recomendações técnicas dos fornecedores dos defensivos utilizados e foram realizadas com base no monitoramento contínuo da área experimental.

Tabela 3- Aplicações realizadas durante a condução do ensaio, destacando-se o momento de aplicação, ativo utilizado, concentração de ativo e o alvo de destinação do produto utilizado.

Aplicação	Fenologia	Produtos aplicados	Alvo de controle
Pré-plantio	-	Glifosato (1800 g ia há <sup>-1</sup> ) + Cletodim (144 g ia há <sup>-1</sup> ) + haloxifope-p-metilico (73,8 g ia há <sup>-1</sup> ) + Carfentrazone (40 g ia há <sup>-1</sup> ) e pós-plantio de S-metalocloro (1034 g ia há <sup>-1</sup> ) + fomesafem (226 g ia há <sup>-1</sup> ) + Clomazone (800 g ia há <sup>-1</sup> )	Plantas daninhas: <i>Digitaria insularis</i> , <i>Brachiaria 31rizantha</i> , <i>Amaranthus viridis</i> , <i>Commelina benghalensis</i> , <i>Zea mays</i> .
Primeira vegetativo	V4	Cletodim (144 g ia há <sup>-1</sup> ) + haloxifop (73,8 g ia há <sup>-1</sup> ) + Propiconazol (37,5 g ia há <sup>-1</sup> ) + Difenconazol (37,5 g ia há <sup>-1</sup> ) + Acetamiprido (75 g ia há <sup>-1</sup> ) + Bifentrina (75 g ia há <sup>-1</sup> ) + 500 g ia há <sup>-1</sup> de Mn25RR (1% de K2O; 16,5% de S; 0,5% de B; 0,5% de Cu; 25% de Mn; 3,6% de Zn)	Plantas daninhas: <i>Digitaria insularis</i> ; Doenças: <i>Corynespora cassicola</i> , <i>Cercospora kikuchii</i> ; Pragas: <i>Diabrotica speciosa</i>
Segunda vegetativo	V6	Benzovindiflupir (37,5 g ia há <sup>-1</sup> ) + Protiocoazol (75 g ia há <sup>-1</sup> ) + Lambda-cialotrina (26,5 g ia há <sup>-1</sup> ) + Tiametoxan (35,25 g ia há <sup>-1</sup> ), <i>Beauveria bassiana</i> , metomil (215 g ia há <sup>-1</sup> )	Doenças: <i>C. cassicola</i> , <i>C. kikuchii</i> . Pragas: <i>D. speciosa</i> , <i>Bemisia tabaci</i> , <i>Spodoptera frugiperda</i> , <i>Spodoptera eridania</i> .
Primeira reprodutivo	R2	Epoconazol (50 g ia há <sup>-1</sup> ) + Fluxaproxade (50 g ia há <sup>-1</sup> ) + Fosfito de cobre (15% H <sub>3</sub> PO <sub>3</sub> ; 2% Cu) + Piraclostrobina (81 g ia há <sup>-1</sup> ), Isocicloseram (25 g ia há <sup>-1</sup> ) + Lambda-cialotrina (37,5 g ia há <sup>-1</sup> ) + Profenofós (520 g ia há <sup>-1</sup> ) + Cipermetrina (52 g ia há <sup>-1</sup> ).	Doenças: <i>Phakopsora pachyrhizi</i> , <i>C. kikuchii</i> . Pragas: <i>D. speciosa</i> , <i>Frankliniella occidentalis</i> , <i>B. tabaci</i> , <i>S. frugiperda</i> , <i>S. eridania</i> , <i>Euschistus heros</i> .
Segunda reprodutivo	R4	Difenconazol (125 g ia há <sup>-1</sup> ) + Ciproconazol (75 g ia há <sup>-1</sup> ) + Isocicloseram (25 g ia há <sup>-1</sup> ) + Lambda-cialotrina (37,5 g ia há <sup>-1</sup> ) + Acefato (970 g ia há <sup>-1</sup> ) + 1000 g ia há <sup>-1</sup> de Peso + (28% de K2O; 3% de Mg; 13,6 de S; 4% de B)	Doenças: <i>P. pachyrhizi</i> , <i>C. kikuchii</i> . Pragas: <i>E. heros</i>
Terceira reprodutivo	R5.3	Acetamiprido (75 g ia há <sup>-1</sup> ) + Bifentrina (75 g ia há <sup>-1</sup> ) + Acefato (970 g ia há <sup>-1</sup> )	Praga: <i>E. heros</i>

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025

### 3.5 Avaliações

Para se avaliar os efeitos dos tratamentos, foram avaliados parâmetros de desenvolvimento, fisiológicos, nutricionais e agrônômicos, conforme descritos a seguir. Em 4 de dezembro de 2023, aos 19 dias após a semeadura, quando as plantas estavam no estágio fenológico V3, ou seja, com 3 folhas desenvolvidas, foram avaliados comprimento de raiz (CR) e matéria da raiz seca (MRS).

Para se avaliar o comprimento (cm planta<sup>-1</sup>) de raiz, 10 plantas da área útil de cada unidade experimental foram coletadas aleatoriamente, com o auxílio de uma pá. O comprimento das raízes tomado pela distância do coleto da planta até a extremidade da raiz pivotante. A média do comprimento das raízes das 10 plantas foi considerada como valor de CR da unidade experimental, sendo mensurados com o auxílio de uma fita métrica (Vanzolini *et al.*, 2007).

Em seguida, para a determinação da MRS, todo o sistema radicular das mesmas plantas coletadas foi destacado. Foram lavados para se retirar o excesso de solo e impurezas e colocados em sacos de papel identificados e posteriormente, colocados em estufa com ventilação forçada de ar, a 65 °C, por 72h, sendo que ao final do processo realizou-se a aferição da massa de material seco. Da mesma forma, a média da MRS das 10 plantas foi considerada como valor de CR da unidade experimental.

Aos 52 dias após a semeadura, avaliou-se o teor de clorofila a (TC). Foi determinado por medida indireta, através do índice de clorofila Falker, por meio de 20 leituras por parcela, na folha diagnóstico da cultura (na terceira folha, contadas a partir do último nó, em R1). A avaliação foi realizada no período das 11h00min às 15h00min, utilizando-se o Clorofilog modelo CFL1030 da Falker (Falker, 2008).

Na mesma data da avaliação do teor de clorofila, coletaram-se as folhas diagnósticas (terceira folha, contadas a partir do ápice da planta) das mesmas 20 folhas da avaliação de TC por unidade experimental para diagnose do seu estado nutricional (Silva, 2009). Essas folhas foram identificadas e levadas ao laboratório especializado em análise foliar para coleta dos resultados (Rocha, 2013).

Aos 63 dias após a semeadura, quando as plantas estavam no estágio fenológico de R3 (quando as plantas se encontravam com início de formação de vagens nos 4 últimos nós reprodutivos), foram avaliados os parâmetros fisiológicos da cultura. Determinou-se então, a fluorescência transiente OJIP da clorofila *a*, por meio do Fluorômetro FP100, entre 0h00min e 3h00min, para que as plantas estivessem adaptadas ao escuro. Foram avaliadas a fluorescência

inicial ( $F_o$ ), fluorescência variável ( $F_v$ ), fluorescência máxima ( $F_m$ ), rendimento quântico máximo ( $F_v/F_m$ ), fluxo de absorção/centro de reação ( $ABS/RC$ ), fluxo de energia capturada/centro de reação ( $Tro/RC$ ), energia dissipada por centro de reação ativo ( $Dio/RC$ ) e fluxo de transporte de elétrons por centro de reação ( $ET0/RC$ ). As leituras foram realizadas nas folhas recém maduras (terceira folha, contadas a partir do ápice das plantas) em 10 plantas por parcela da área útil (McGuire, 1992). As leituras foram realizadas em R3 no centro do terceiro trifólio (contados a partir do ápice da planta) em 10 plantas por parcela.

Aos 108 dias após a semeadura, quando a cultura estava em ponto de colheita, deu-se início às avaliações de desempenho agrônômico. Para as avaliações agrônômicas, foram mensurados o número de vagens por planta (NVP); número de grãos por vagem (NGV); produtividade (PROD) e massa de mil grãos (MMG).

O NVP e NGV foram obtidos através da contagem manual de todas as vagens e de grãos por vagem de 10 plantas da área útil de cada unidade experimental. O rendimento de grãos foi determinado através da colheita da área útil ( $6,9 \text{ m}^2$ ), de cada unidade experimental, sendo, portanto, desconsideradas bordaduras de 0,5 m em cada extremidade da parcela.

Após a colheita, foi obtida a massa de grãos de cada unidade experimental, realizando-se o cálculo da produtividade por hectare, em  $\text{t há}^{-1}$ , corrigida à umidade de 14%. Em seguida, para a determinação da massa de mil grãos (MMG), adotaram-se os procedimentos básicos exigidos para a obtenção de amostras, métodos de avaliação, interpretação e indicação de resultados de análise de lotes de sementes para a produção e o comércio, conforme a Regra de Análises de Sementes (Brasil, 2009). Assim, a MMG foi obtida pela contagem de 100 grãos, em 8 repetições, sendo posteriormente transformada para massa de 1000 grãos.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, pelo teste F, a 5% de probabilidade. Quando constatados efeitos significativos dos tratamentos, procedeu-se com a análise de agrupamento de médias pelo teste de Scott-Knott. A ferramenta utilizada para as análises dos dados foi o software R Studio (R Core Team, 2019).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor interpretação, os resultados foram avaliados segundo os parâmetros: desenvolvimento, fisiológicos e produtivos.

### 4.1 Parâmetros de desenvolvimento

Para os parâmetros de desenvolvimento das plantas não foram observadas diferenças significativas nos resultados de comprimento radicular, matéria da raiz seca e teor de clorofila entre os tratamentos estudados (Tabela 4).

Tabela 4- Média dos parâmetros de comprimento radicular (CR, em cm), massa da raiz seca (MRS, em g pl<sup>-1</sup>) e teor de clorofila Falker (TC, índice Falker).

Tratamentos	CR (cm)	MRS (g pl <sup>-1</sup> )	TC (índice Falker)	NS:
Testemunha	19,05	3,647 b	39,39	
Zn	20,03	4,606 a	39,83	
TRP	19,88	4,356 a	40,79	
AIA	21,16	4,429 a	40,98	
Zn + TRP (1g) + AIA	21,07	4,270 a	41,20	
Zn + TRP (2g) + AIA	20,45	4,726 a	41,21	
Zn + TRP (4 g) + AIA	21,12	4,888 a	41,48	
Zn + TRP (8g) + AIA	19,37	4,351 a	41,44	
F trat.	1,29 <sup>ns</sup>	0,028 *	2,15 <sup>ns</sup>	
CV (%)	12,28	18,64	4,74	

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Nota: Não significativo. \*: Significativo ao nível de 5% de confiabilidade. \*\*: Significativo ao nível de 1% de confiabilidade. Médias seguidas de letras diferentes na vertical diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de significância, pelo teste de Skott Knott. Zn: Zn; TRP: TRP; AIA: Ácido indol acético.

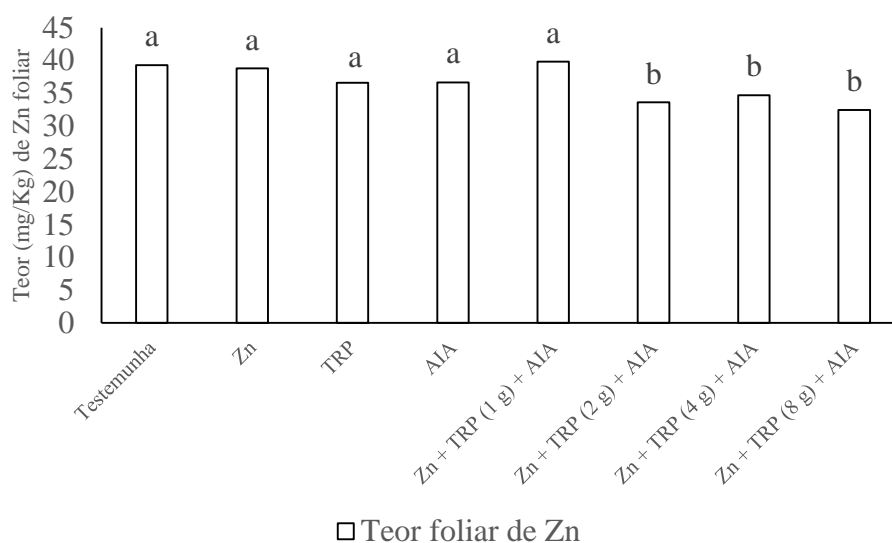
Para os parâmetros de desenvolvimento foi observada diferença significativa apenas na variável MRS. Todos os tratamentos apresentaram maior massa da raiz seca, quando comparados a testemunha (Tabela 4). Para o CR e o TC, não foram detectados efeitos significativos dos tratamentos por meio da análise realizada.

Os resultados de desenvolvimento das plantas nos tratamentos com aplicação de Zn, TRP e AIA, isolados ou combinados, foram positivos, indicando um efeito benéfico sobre o crescimento radicular. Estudos indicam que o Zn contribui para a formação e construção de diversos componentes na planta, sendo cofator da enzima anidrase carbônica e atuando na síntese de carboidratos (Palmer; Guerinot, 2009; Moreira *et al.*, 2018). O Zn tem destaque na formação do aminoácido TRP. Este tem papel fundamental no enraizamento da planta (El-Bassiouny *et al.*, 2016). Assim como o AIA, hormônio de crescimento que participa ativamente do desenvolvimento de raízes nas plantas (Taiz; Zeiger, 2017). O resultado demonstra esse maior desenvolvimento radicular, onde um maior volume transmite maior MRS.

Todavia, mesmo com condições de desenvolvimento adequadas, pequenos incrementos no desenvolvimento das raízes podem ser positivos para as plantas (Glass, 2002). De acordo com Jacomassi *et al.*, 2022 e Colombi *et al.*, 2018, para cada 1 centímetro de crescimento em profundidade do sistema radicular a planta consegue absorver até 1 milímetro de água por dia.

Além disso, observou-se também diferença significativa no teor de Zn foliar encontrado nos tratamentos (Figura 6).

Figura 6 – Teor (mg/Kg) de Zn encontrado nas folhas submetidas à análise laboratorial.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Menores valores de teores de Zn foram observados nos tratamentos com as maiores concentrações de TRP aplicadas (Tabela 6). Segundo os autores Salami Au e Kenefick, 1970 e Domingo *et al.*, 1992 em milho e rabanete, cultivados em hidroponia, foram observadas altas concentrações de Trp em plantas deficientes em Zn. Os autores concluíram que o Zn é requerido no metabolismo do Trp à auxina, via triptamina, amina biogênica, formadas a partir da

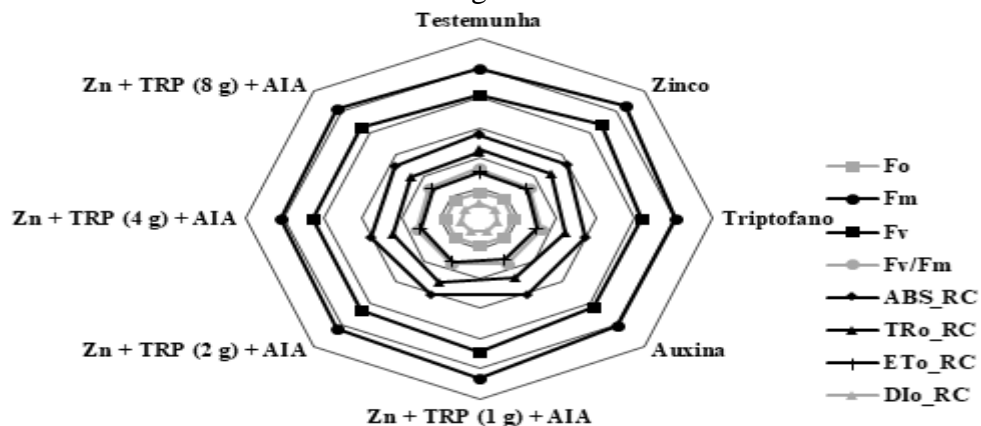
descarboxilação do Trp. Assim, com uma dose elevada de TRP, a concentração de Zn na planta reduz.

#### 4.2 Parâmetros fisiológicos

Não foram detectados efeitos dos tratamentos para nenhum dos parâmetros avaliados por meio da curva OJIP de emissão de fluorescência transiente (Figura 6). Os resultados obtidos no parâmetro  $F_v/F_m$  de todos os tratamentos esteve acima de 0,8, indicando que as plantas não estavam sob estresse.

A fluorescência é uma forma da energia ser dissipada nos cloroplastos após a excitação dos elétrons nas moléculas receptoras (Bussotti *et al.*, 2007). Primeiramente, ocorre a absorção de energia eletromagnética, com um comprimento de onda menor do que o emitido durante a fluorescência. A conversão da energia luminosa em energia química não é um processo totalmente eficiente, já que nem todos os elétrons excitados são transferidos para os aceptores primários do fotossistema (Baker, 2008). Esses elétrons retornam aos seus estados originais, e a dissipação de energia acontece na forma de calor ou fluorescência, que é a emissão de radiação na faixa visível (como vermelho e vermelho distante) (Bussotti *et al.*, 2007). Esse tipo de avaliação está entre as técnicas disponíveis para avaliar possíveis níveis de *Stress* relacionados a fotossíntese, sendo um método prático e de rápidos resultados (Bussotti *et al.*, 2007).

Figura 7- Parâmetros da curva OJIP de folhas recém maduras de soja avaliadas no estágio fenológico R3.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Os autores Lobo *et al.*, 2021 observaram variações nos parâmetros de fluorescência transiente, porém, quando as plantas haviam passado por *stress* hídrico severo durante seu desenvolvimento. Esse *stress* causa grande alteração na eficiência do fotossistema, o que

implica na diferença observada pelos autores. Segundo os autores Silva *et al.*, 2018, a toxidez de altas concentrações de selênio em feijão-caupi também pode alterar significativamente a fluorescência do fotossistema. Munirah *et al.*, 2015, também encontraram diferença significativa quanto a fluorescência da clorofila em plantas de milho, submetidas a diferentes dosagens de Zn.

### 4.3 Parâmetros produtivos

Houve diferença significativa entre os tratamentos em produtividade (Tabela 7). As maiores produtividades foram observadas nos tratamentos com a aplicação isolada de AIA, Zn + TRP (1g) + AIA e Zn + TRP (4g) + AIA. No tratamento com a maior dose de TRP avaliada, verificou-se diminuição da produtividade (Tabela 7).

No presente estudo, as maiores produtividades observadas em alguns tratamentos, pode ser explicada pelo maior número de vagens por planta, grãos por vagens e massa de mil grãos simultaneamente nestes tratamentos (Tabelas 6 e 7). Esses aspectos contribuem consideravelmente para o aumento de produção na cultura. Dalchiavon; Carvalho, 2012 consideraram que os componentes de produtividade NVP, NGV e MMG tem total relação com a produtividade da cultura, o que permite a interpretação de que crescimentos numéricos nos devidos componentes contribuem para um bom aumento produtivo para a cultura.

Foi observada diferença significativa na massa de mil grãos (MMG). As maiores médias foram observadas com a aplicação isolada de AIA e com a aplicação do produto com Zn + TRP (1g) + AIA, em relação aos demais tratamentos testados (Tabela 7). A massa de mil grãos afeta diretamente a produtividade da cultura da soja (Dalchiavon; Carvalho, 2012). Segundo os autores Guimarães *et al.*, 2012, o momento de aplicação de herbicidas para dessecação afeta diretamente na massa de cem sementes, que, conseqüentemente, afeta numericamente a produtividade da cultura. Isso demonstra que o peso dos grãos é um importante componente de produtividade.

Para os resultados de número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV) foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos avaliados (Tabela 7). Houve maior NVP nos tratamentos de aplicação isolada de Zn e AIA e aplicação combinada de Zn + TRP (1g) + AIA. Também se observou diferença significativa em NGV, os tratamentos de aplicação isolada de TRP e AIA e aplicação combinada de Zn + TRP (1g) + AIA estimularam as plantas para um maior número de grãos por vagem. Os autores Bertolin *et al.*, 2010,

encontraram diferença significativa no número de vagens por plantas de soja, submetidas a aplicações de bioestimulantes via foliar. No referido estudo, o aumento no número de vagens por plantas, refletiu em aumento de produtividade da cultura, segundo os autores.

Tabela 5- Média dos parâmetros obtidos de número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), Massa de mil grãos (MMG) e resultados de produtividade.

Tratamentos	NVP (vagens pl <sup>-1</sup> )	NGV	Produtividade (kg há <sup>-1</sup> )	MMG (g)
Testemunha	36,06 b	2,79 b	4.635,6 c	146,19 b
Zn	43,11 a	2,56 b	5.156,4 b	149,01 b
TRP	40,23 b	2,84 a	5.035,2 b	149,91 b
AIA	42,80 a	2,84 a	5.452,8 a	150,28 a
Zn + TRP (1g) + AIA	45,30 a	3,07 a	5.816,4 a	156,35 a
Zn + TRP (2g) + AIA	39,35 b	2,67 b	5.413,2 a	148,42 b
Zn + TRP (4g) + AIA	39,58 b	2,27 b	5.333,4 a	137,71 c
Zn + TRP (8g) + AIA	38,96 b	2,75 b	4.764,0 c	132,34 c
F	0,041 *	0,003 **	9,03 *	18,07 *
CV (%)	15,11	13,04	9,49	5,94

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Nota: NS: Não significativo. \*: Significativo ao nível de 5% de confiabilidade. \*\*: Significativo ao nível de 1% de confiabilidade. Médias seguidas de letras diferentes na vertical diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de significância, pelo teste de Skott Knott. Zn: Zn; TRP: TRP; AIA: Ácido indol acético.

O tratamento Zn + TRP (1 g) + AIA foi o que apresentou a maior produtividade entre todos os avaliados. Houve um aumento de 6,6% (363,6 kg) na produtividade da soja em relação ao segundo tratamento mais produtivo (AIA isolado) (Tabela 7). Além disso, esse mesmo tratamento proporcionou um incremento de 25,47% (1180,8 Kg) na produtividade da soja quando comparado à testemunha.

Com base nos resultados do presente estudo, sugere-se que a aplicação conjunta de Zn (Zn), TRP (TRP) e AIAs (especialmente o ácido indolacético – AIA) desencadeie uma série de respostas bioquímicas e fisiológicas que otimizam o metabolismo vegetal, promovendo maior eficiência no uso de recursos e no desenvolvimento da cultura da soja.

Pelo fato de o Zn atuar como cofator enzimático e regulador hormonal, visto que atua como cofator de mais de 300 enzimas, esse elemento pode ter influenciado em várias vias metabólicas, influenciando no aumento da produtividade observado. Dentre estas vias,

destacam-se: 1- ativação da RNA polimerase, fundamental para a transcrição gênica; 2- participação na síntese de proteínas, por estabilizar ribossomos; 3- papel chave na síntese de TRP, pois ativa a enzima TRP sintetase; 4- estímulo à síntese endógena de AIAs a partir do TRP, estimulando o desenvolvimento das plantas, o que pode estar relacionado aos efeitos de diluição observados; 5- proteção contra o estresse oxidativo, por ativar enzimas como a superóxido dismutase (SOD); e, 6- aumentando a permeabilidade das membranas celulares e a integridade estrutural dos cloroplastos, potencializando a fotossíntese.

Além disso, destaca-se que os resultados observados da aplicação conjunta estão associados aos efeitos de desenvolvimento promovidos pela síntese de auxinas, visto que bons resultados também foram observados quando da aplicação de apenas AIA. Ou seja, a aplicação de AIA foi suficiente para melhorar o desempenho da cultura. Todavia, efeitos foram potencializados quando da aplicação conjunta de Zn, TRP e AIA.

Sabe-se que o TRP é precursor da AIA (Ácido Indolacético – AIA). Este é um aminoácido aromático, sintetizado pela via do ácido chiquímico. Nas plantas, ele é o principal precursor da biossíntese de AIAs, especialmente do AIA. Essa conversão ocorre por diversas vias, sendo a mais comum:  $\text{TRP} \rightarrow \text{Indol-3-piruvato} \rightarrow \text{AIA}$ . Esta via depende de enzimas como a TRP aminotransferase e a indol-3-piruvato descarboxilase, cuja atividade é positivamente regulada pela presença de Zn, criando uma relação bioquímica direta entre Zn e TRP na produção de auxina.

Entende-se que o fornecimento exógeno de TRP aumenta a disponibilidade do substrato para essas vias, promovendo uma produção aumentada de AIA de forma endógena e controlada pela própria planta.

Acredita-se que o aumento de produtividade em relação à testemunha em alguns tratamentos esteja associado ao maior desenvolvimento das plantas, devido à aplicação e/ou indução da produção de AIA (AIA), promovendo melhor modulação do Crescimento e diferenciação celular.

As auxinas são hormônios vegetais reguladores do crescimento, com ação em múltiplos níveis, que incluem: 1- estimulação do alongamento celular (via ativação da bomba de prótons  $\text{H}^+$  e afrouxamento da parede celular – Teoria do Crescimento Ácido); 2- Indução da divisão celular em tecidos meristemáticos (em sinergia com citocininas); 3- ativação da expressão de genes relacionados ao crescimento radicular e vascular; 4- estímulo à formação de raízes laterais e adventícias, ainda que pequenos aumentos, conforme observado no presente estudo, aumentando a absorção de água e nutrientes; 5- possível modulação do fototropismo e

gravitropismo, otimizando a arquitetura da planta. Assim, sugere-se que a aplicação exógena de AIA, associada ao aumento da síntese via TRP e Zn, potencializa a regulação hormonal interna da planta, gerando respostas fisiológicas que favorecem o crescimento vigoroso e equilibrado da cultura da soja, dentro do limite de certas concentrações, uma vez que a maior dose de TRP aplicada resultou em efeito negativo.

Os resultados da concentração de Zn foliar e de aumento de produção, sugerem que, do ponto de vista bioquímico e fisiológico, a aplicação combinada de Zn, TRP e AIA potencializa vias metabólicas essenciais, estimula a produção endógena de fitohormônios (ainda que não foram mensuradas neste estudo) e melhora a resposta da planta a estímulos ambientais. Em consequência, há um desenvolvimento mais eficiente e produtivo da soja, com impacto direto sobre a performance agrônômica e o rendimento da cultura.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou que a interação entre o Zn, AIA e TRP, nas doses de TRP de 1 a 4 g ha<sup>-1</sup>, foi positiva para aumentar a produtividade da cultura da soja. Para as condições do presente estudo, a aplicação isolada de AIA e a combinada de Zn + TRP (1g) + AIA proporcionaram as maiores produtividades.

## REFERÊNCIAS

- ABDEL-MONEM, A. A.; EL-BASSIOUNY, H. M. S. Role of TRP or Prozac (5-hydroxytryptamine) on some Osmolytes and Antioxidant defense system of Sunflower cultivars grown in Saline soil. **International Journal of ChemTech Research**, Giza – Egypt, v. 9, n. 6, p. 1-14, 2016. Disponível em: [https://www.sphinxesai.com/2016/ch\\_vol9\\_no6/1/\(107-120\)V9N6CT.pdf](https://www.sphinxesai.com/2016/ch_vol9_no6/1/(107-120)V9N6CT.pdf). Acesso em: 20 maio 2025.
- AHAMMED, G. J. *et al.* Endogenous melatonin deficiency aggravates high temperature-induced oxidative stress in *Solanum lycopersicum* L. **Environmental and Experimental Botany**, Luoyang, China, v. 161, p. 303-311, 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/325702921\\_Endogenous\\_melatonin\\_deficiency\\_aggravates\\_high\\_temperature-induced\\_oxidative\\_stress\\_in\\_Solanum\\_lycopersicum\\_L](https://www.researchgate.net/publication/325702921_Endogenous_melatonin_deficiency_aggravates_high_temperature-induced_oxidative_stress_in_Solanum_lycopersicum_L). Acesso em: 20 maio 2025.
- ARNAO, M.B.; HERNANDEZ-RUIZ, J. Melatonin and reactive oxygen and nitrogen species: a model for the plant redox network. **Melatonin Research**, [S.l.], v. 2, n. 3, p. 152-168, 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/335570049\\_Melatonin\\_and\\_reactive\\_oxygen\\_and\\_nitrogen\\_species\\_a\\_model\\_for\\_the\\_plant\\_redox\\_network](https://www.researchgate.net/publication/335570049_Melatonin_and_reactive_oxygen_and_nitrogen_species_a_model_for_the_plant_redox_network). Acesso em: 20 maio 2025.
- BAKER, N. R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. **Annual Review of Plant Biology**, Bethesda, MD, v. 59, p. 89-113, 2008. Bethesda, MD. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18444897/>. Acesso em: 20 maio 2025.
- BERGMANN, L.; GROSSE, W.; RUPPEL, H. G. The formation of serotonin in *Juglans regia* L. **Planta**, Bethesda, MD, v. 94, n. 1, p. 47-59, 1970. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24496816/>. Acesso em: 20 maio 2025.
- BERTOLIN, D. C., de SÁ, M. E., ARF, O., JÚNIOR, E. F., COLOMBO, A. S., CARVALHO, F. L. B. M. Aumento da produtividade de soja com a aplicação de bioestimulantes. **Fitotecnia**, Bragantia, v. 69, n. 2, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-8705201000020001>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/Pq3LJZyT43zwynhCKy7WrXb/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 20 maio 2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399 p.
- BROADLEY, M. R. WHITE. P, J. JOHN. HAMMOND, J. P. ZELKO, I. LUX, A. Zn in plants. **New Phytologist**, Reino Unido, v. 173, p. 677-702, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>. Disponível em: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>. Acesso em: 20 maio 2025.
- BUSSOTTI, F. STRASSER, R. J. SCHAUB, M. Photosynthetic behavior of woody species under high ozone exposure probed with the JIP-test: a review. **Environmental Pollution**, [S.l.], v. 147, n. 3, p. 430-437, jun. 2007. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749106005331>. Acesso em: 20 maio 2025.

CABRINI, P. G.; SALA, F. C.; MAGRI, M. M. R. *Torulaspota globosa*: levedura rizosférica promotora de crescimento de alface para produção de mudas e em campo. **Research. Hortic. Bras.**, [S.l.], v. 37, n. 3, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-053620190303>.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/hb/a/MBcfZcXwsPzgRhPyVST8Xft/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 20 maio 2025.

CASANOVA-SÁEZ, R.; VOSS, U. Auxin metabolism controls developmental decisions in Land Plants. **Trends in Plant Science**, [S.l.], v. 24, n. 8, p. 741–754, 2019. DOI: 10.1016/j.tplants.2019.05.006. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31230894/>. Acesso em: 20 maio 2025.

CHEN, L.; LIU, L.; LU, B.; MA, T.; JIANG, D.; LI, J.; ZHANG, K.; SUN, H.; ZHANG, Y.; BAI, Z.; LI, C. Exogenous melatonin promotes seed germination and osmotic regulation under salt stress in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Plos One**, São Francisco, Califórnia, v.15, n.1, p.e0228241, 2020. Disponível em:

<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0228241>. Acesso em: 20 maio 2025.

CHEN, Q.; QI W.; REITER, R. J.; WEI, W.; WANG, B. Exogenously applied melatonin stimulates root growth and raises endogenous indoleacetic acid in roots of etiolated seedlings of *Brassica juncea*. **Journal Plant Physiology**, São Francisco, Califórnia, v. 166, p. 324–328, 2009. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18706737/>. Acesso em: 20 maio 2025.

COLOMBI, T. TORRES, L. C. WALTER, A. KELLER, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Science of The Total Environment**, São Francisco, Califórnia, v. 626, p. 1026-1035, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29898511/>. Acesso em: 20 maio 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). CONAB mantém estimativa de 166 milhões de toneladas para soja brasileira. 2024. Disponível em: <https://ocj.com/2024/12/conab-maintains-estimate-of-166-million-tons-for-brazilian-soybeans/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M de P. Correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 541-552, abr. 2012. DOI: 10.5433/1679-0359.2012v33n2p541. Disponível em: [file:///C:/Users/Iftm/Downloads/jlgarcia,+Gerente+da+revista,+11\\_6441%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Iftm/Downloads/jlgarcia,+Gerente+da+revista,+11_6441%20(1).pdf). Acesso em: 16 abr. 2005.

DOMINGO, A.; NAGATOMO, Y.; TAMAI, M.; TAKAKI, H. Free TRP and indolacetic acid in Zn-deficient radish shoots. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 38, p. 261-267, 1992.

EL-BASSIOUNY, H. M. S.; ABDEL-MONEM, A. A. Role of TRP or Prozac (5-hydroxytryptamine) on some Osmolytes and Antioxidant defense system of Sunflower

cultivars grown in Saline soil. **International Journal of ChemTech Research**, Egito, v. 9, n. 6, p. 106-120, 2016. Disponível em: [https://www.sphinxesai.com/2016/ch\\_vol9\\_no6/1/\(107-120\)V9N6CT.pdf](https://www.sphinxesai.com/2016/ch_vol9_no6/1/(107-120)V9N6CT.pdf). Acesso em: 16 abr. 2025.

ERLAND, L. A. E.; SAXENA, P. K. Beyond a neurotransmitter: the role of serotonin in plants. **Neurotransmitter**, [S.l.], v. 4, 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/317264534\\_Beyond\\_a\\_neurotransmitter\\_the\\_role\\_of\\_serotonin\\_in\\_plants](https://www.researchgate.net/publication/317264534_Beyond_a_neurotransmitter_the_role_of_serotonin_in_plants). Acesso em: 20 maio 2025.

FALKER, Automação agrícola. **Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG/CFL 1030)**. Porto Alegre: [s.n.], 2008. 33 p. Disponível em: [http://www.falker.com.br/produto\\_download.php?id=4](http://www.falker.com.br/produto_download.php?id=4). Acesso em: 20 maio 2025.

FRANKENBERGER, W. T.; CHANG, A. C.; ARSHAD, M. Responses of *Raphanus sativus* to AIA precursor, L-TRP applied to soil. **Plant and Soil**, [S.l.], v. 129, p. 235-241, 1990. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaador.html?task=detalhes&id=W1540625543>. Acesso em: 20 maio 2025.

GAO, C.; LIU, X.; STORME, N.; JENSEN, K.; XU, Q.; YANG, J.; LIU, X.; CHEN, S.; MARTENS, H. J.; SCHULZ, A.; LIESCHE, J. Directionality of Plasmodesmata-Mediated Transport in Arabidopsis Leaves Supports AIA Channeling. **Current Biology**, [S. l.], v. 30, n. 10, p. 1970-1977.e4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.03.014>. Disponível em: [https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822\(20\)30352-3?\\_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0960982220303523%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(20)30352-3?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0960982220303523%3Fshowall%3Dtrue). Acesso em: 20 maio 2025.

GITTO, E.; TAN D. X.; REITER, R. J.; KARBOWNIK, M.; MANCHESTER, L. C.; CUZZOCREA, S.; FULIA, F.; BARBERI, I. Individual and synergistic antioxidative actions of melatonin: studies with vitamin E, vitamin C, glutathione and desferrioxamine (desferoxamine) in rat liver homogenates. **Journal of Pharmacy and Pharmacology**, Londres, v. 53, p. 1393– 401, 2001. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11697548/>. Acesso em: 20 maio 2025.

GLASS, A. D. M. Nutrient absorption by plant roots: regulation of uptake to match plant demand. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (ed.). **Plant roots: the hidden half**. 3. ed. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 571-586.

GUIMARÃES, V. F.; HOLLMANN, M.J.; FIOREZE, S.L.; ECHER, M.M.; RODRIGUES-COSTA, A.C.P.; ANDREOTTI, M. Produtividade e qualidade de sementes de soja em função de estádios de dessecação e herbicidas. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 30, n. 3, p. 567-573, 2012.

HAFEEZ, B.; KHANIF, Y. M.; SALEEM, M. Role of Zn in plant nutrition: a review. **Journal of Experimental Agriculture International**, [S.l.], v. 3, p. 374-391, 2013. Disponível em: <https://journaljeai.com/index.php/JEAI/article/view/978>. Acesso em: 20 maio 2025.

HARTMAN, G. L.; WEST, E. D.; HERMAN, T. K. Crops that feed the world 2. Soybean—worldwide production, use, and constraints caused by pathogens and pests. **Food Security**, [S.l.], v. 3, n. 1, p. 5–17, 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/226001957\\_Crops\\_that\\_feed\\_the\\_World\\_2\\_Soybean-worldwide\\_production\\_use\\_and\\_constraints\\_caused\\_by\\_pathogens\\_and\\_pests](https://www.researchgate.net/publication/226001957_Crops_that_feed_the_World_2_Soybean-worldwide_production_use_and_constraints_caused_by_pathogens_and_pests). Acesso em: 20 maio 2025.

HERNÁNDEZ, I. G.; GOMEZ, F. J. V.; CERUTTI, S.; ARANA, M. V.; SILVA, M. F. Melatonin in *Arabidopsis thaliana* acts as plant growth regulator at low concentrations and preserves seed viability at high concentrations. **Plant physiology and Biochemistry**, São Paulo, v. 94, p. 191-196, 2015. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26113158/>. Acesso em: 20 maio 2025.

HUANG, Y.; KAO, C. H. Calcium in the regulation of corn leaf senescence by light. **Botanical Bulletin of Academia Sinica**, Taiwan, v. 33, n. 2, p. 161-165, 1992. Disponível em: <https://ejournal.sinica.edu.tw/bbas/content/1992/2/bot332-07.pdf>. Acesso em: 20 maio 2025.

JACOMASSI, L. M. *et al.* A seaweed extract-based biostimulant mitigates drought stress in sugarcane. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v. 13, p. 865291, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.865291. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.865291/full>. Acesso em: 20 maio 2025.

JIANG, H. *et al.* Gibberellins modulate shade-induced soybean hypocotyl elongation downstream of the mutual promotion of AIA and brassinosteroids. **Plant Physiology and Biochemistry**, São Paulo, v. 150, p. 209–221, 2020a. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.02.042. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0981942820300966>. Acesso em: 20 maio 2025.

JIANG, Z. *et al.* Concentration difference of AIA involved in stem development in soybean. **Journal of Integrative Agriculture**, Pequim, China, v. 19, n. 4, p. 953–964, 2020b. DOI: 10.1016/S2095-3119(19)62676-6. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095311919626766>. Acesso em: 20 maio 2025.

KANG, K. *et al.* Characterization of tryptamine 5-hydroxylase and serotonin synthesis in rice plants. **Plant Cell Reports**, [S.l.], v. 26, n. 11, p. 2009-2015, 2007a. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17639402/>. Acesso em: 20 maio 2025.

KANG, K. *et al.* Senescence-induced serotonin biosynthesis and its role in delaying senescence in rice leaves. **Plant Physiology**, [S.l.], v. 150, n. 3, p. 1380-1393, 2009. Disponível em: <https://academic.oup.com/plphys/article/150/3/1380/6107922>. Acesso em: 20 maio 2025.

KANG, S. *et al.* Characterization of rice TRP decarboxylases and their direct involvement in serotonin biosynthesis in transgenic rice. **Planta**, [S.l.], v. 227, n. 1, p. 263-272, 2007b. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17763868/>. Acesso em: 20 maio 2025.

KIM, J-H.; SCABOO, A.; PANTALONE, V.; LI, Z.; BILYEU, K. Utilization of Plant Architecture Genes in Soybean to Positively Regulate Yield. **Frontiers in Plant Science**,

[S.l.], v. 13, 2022. Disponível em:

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.891587/full>. Acesso em: 14 abr. 2025.

KÖPPEN, G. **Classificação climática de Köppen**. Disponível em:

[https://portais.ufg.br/up/68/o/Classificação Climática Koppen.pdf](https://portais.ufg.br/up/68/o/Classificação_Climática_Koppen.pdf). Acesso em: 02 abr. 2024.

KOSHIBA, T.; MATSUYAMA, H. An in vitro system of indole-3-acetic acid formation from TRP in maize (*Zea mays*) coleoptile extracts. **Plant Physiology**, São Paulo, v. 102, n. 4, p. 1319-1324, 1993. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12231908/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LEHNINGER, A. L.; NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de Bioquímica**. 2. ed. São Paulo: Sarvier, 1995. 839 p.

LIU, Y.; ZHANG, M.; FENG, F.; TIAN, Z. Toward a “Green Revolution” for Soybean.

**Molecular Plant**, Xangai, China, v. 13, n. 5, p. 688–697, 2020. Disponível em:

[https://www.cell.com/molecular-plant/pdf/S1674-2052\(20\)30064-2.pdf](https://www.cell.com/molecular-plant/pdf/S1674-2052(20)30064-2.pdf). Acesso em: 14 abr. 2025.

MALTA, M. R. *et al.* Efeito da aplicação de zinco via foliar na síntese de triptofano, aminoácidos e proteínas solúveis em mudas de cafeeiro. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, [S.l.], v. 14, n. 1, p. 1–6, 2002. Disponível em:

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1677-04202002000100004](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1677-04202002000100004). Acesso em: 20 maio 2025.

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012. 651 p.

MILIC, B. *et al.* Bioregulators can improve fruit size, yield and plant growth of northern highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). **Scientia Horticulturae**, [S.l.] v. 235, p. 214-220, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423818301663>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MILLER, A. F. Superoxide dismutases: active sites that save, but a protein that kills. **Curr Opin Chem Biol.**, [S.l.], v. 8, n. 2, p. 162-8, 2004. DOI: 10.1016/j.cbpa.2004.02.011.

Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15062777/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MONTANHA, G. S.; RODRIGUES, E. S.; MARQUES, J. P. R.; ALMEIDA, E. de;

COLZATO, M.; CARVALHO, H. W. P. de. Zn nanocoated seeds: an alternative to boost soybean seed germination and seedling development. **SN Applied Sciences**, [S.l.], v. 2, n. 5, 2020. DOI: [doi.org/10.1007/s42452-020-2630-6](https://doi.org/10.1007/s42452-020-2630-6). Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-2630-6>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MOREIRA, A.; MORAES, L. A.; DOS REIS, A. R. The molecular genetics of Zn uptake and utilization efficiency in crop plants. **Plant micronutrient use efficiency**, São Paulo, v. 1, p. 87–108, 2018. DOI: 10.1016/B978-0-12-812104-7.00006-X. 2018. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/entities/publication/efcfb3da-34e4-482f-a1ed-e498a233fb85>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MUKHERJEE, SOUMYA *et al.* Salt stress-induced seedling growth inhibition coincides with differential distribution of serotonin and melatonin in sunflower seedling roots and cotyledons. **Physiologia plantarum**, [S.l.], v. 152, n. 4, p. 714-728, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24799301/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MUNIRAH, N.; KHAIRI, M.; NOZULAI, M.; AND JAHAN, M. The effects of Zn application on physiology and production of corn plants. **Aust. J. Basic Appl. Sci.**, Amman, Jordânia, v. 9, n. 2, p. 362–367, 2015. Disponível em: <https://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2015/February/362-367.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

OLIVEIRA, F. L. de *et al.* Características físicas de um Latossolo Vermelho Distroférico sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 439-448, 2007.

PALMER, C. M.; GUERINOT, M. L. Facing the challenges of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. **Nat Chem Biol.**, New York, NY, v. 5, n. 5, p. 333-40, maio, 2009. DOI: 10.1038/nchembio.166. 2009. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19377460/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

PELAGIO-FLORES, R.; CASTRO, R. O.; BRAVO, A. M.; RODRIGUEZ, L. M.; BUCIO, J. L. Serotonin, a TRP-derived signal conserved in plants and animals, regulates root system architecture probably acting as a natural AIA inhibitor in *Arabidopsis thaliana*. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v. 52, n. 3, p. 490-508, 2011.

PORFÍRIO, S.; SILVA, M. D. R. G. D.; PEIXE, A.; CABRITA, Maria J.; AZADI, P. Current analytical methods for plant AIA quantification - review. **Analytica Chimica Acta**, [S. l.], v. 902, p. 8–21, 2016. DOI: 10.1016/j.aca.2015.10.035. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26703249/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

R CORE TEAM. **R. A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2019. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=2631126>. Acesso em: 15 abr. 2025.

REHMAN, M. U. *et al.* Effect of some plant bioregulators on fruit yield and quality characteristics of apple cv. Red Delicious. **International Journal of Minor Fruits, Medicinal and Aromatic Plants**, West Bengal, India, v. 4, n. 1, p. 33-39, 2018. Disponível em: [https://www.ijmfmap.in/pdf\\_vol4\\_1/vol\\_4\\_1\\_6.pdf](https://www.ijmfmap.in/pdf_vol4_1/vol_4_1_6.pdf). Acesso em: 15 abr. 2025.

ROCHA, D. M. **Índice de clorofila no desenvolvimento de soja e milho e sua correlação com atributos químicos e físicos do solo e produtividade**. Cascavel, PR: UNIOESTE, 2013.

RODRIGUES, E. P.; SOARES, C. D. P.; GALVÃO, P. G.; IMADA, E. L.; SIMÕES-ARAÚJO, J. L.; ROUWS, L. F. M.; OLIVEIRA, A. L. M. DE; VIDAL, M. S.; BALDANI, J. I. Identification of Genes Involved in Indole-3-Acetic Acid Biosynthesis by *Gluconacetobacter diazotrophicus* PAL5 Strain Using Transposon Mutagenesis. **Frontiers in Microbiology**, Reino Unido, v. 7, p. 1572, 2016. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2016.01572/full>. Acesso em: 14 abr. 2025.

ROHR, L. A.; FRANÇA-SILVA, F.; CORRÊA, C. G.; de CARVALHO, H. W. P.; GOMES-JUNIOR, F. G. Soybean seeds treated with Zn evaluated by X-ray micro-fluorescence spectroscopy. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 80, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0131>. Disponível em:  
<https://www.scielo.br/j/sa/a/6nPCFb9VV88GmTJpx6yK9Hh/?lang=en>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SALAMI, AU; KENEFICK DG. Stimulation of growth in Zn-deficient corn seedlings by the addition of TRP. **Crop Sci.**, Madison, v. 10, p. 291-294, 1970.

SÃO PAULO (ESTADO). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. **Boletim 100**: recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria de Agricultura e Abastecimento, 2022.

SARROU, E.; THERIOS, I.; DIMASSI-THERIOU, K. Melatonin and other factors that promote rooting and sprouting of shoot cuttings in *Punica granatum* cv. Wonderful. Turkish. **Journal of Botany**, Austrália, v. 38, p. 293–301, 2014. Disponível em:  
<https://journals.tubitak.gov.tr/botany/vol38/iss2/9/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SHERWIN, J. E. A TRP decarboxylase from cucumber seedlings. **Plant and cell physiology**, Oxford, v. 11, n. 6, p. 865-872, 1970.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2009. Disponível em:  
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/330496/1/Manual-de-analises-quimicas-de-solos-plantas-e-fertilizantes-ed02-reimpressao-2014.pdf>. 2009. Acesso em: 20 maio 2025.

SILVA, V. M.; BOLETA, E.H.M.; LANZA, M.G.D.B.; LAVRES, J.; MARTINS, J.T.; SANTOS, E.F.; SANTOS, F. L. M. D.. PUTTI, F.F.; FURLANI JUNIOR, E.; WHITE, P.J.; BROADLEY, M.R.; CARVALHO, H.W. P. D.; A. R. D. Physiological, biochemical, and ultrastructural characterization of selenium toxicity in cowpea plants. **Environ. Exp. Bot.**, v. 150, p. 172–182, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.020>. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098847218304131?via%3Dihub>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SOUSA, S. F.; LOPES, A. B.; FERNANDES, P. A.; RAMOS, M. J. The Zn proteome: a tale of stability and functionality. **Dalton transactions**, [S.l.], v. 14, n. 38, p. 7946-7956, 2009. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2009/dt/b904404c>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SRIVASTAVA, A. K. *et al.* Plant bioregulators for sustainable agriculture: integrating redox signaling as a possible unifying mechanism. In: **Advances in agronomy**. Cambridge, EUA: Academic Press, 2016. p. 237-278.

SUDADI, S.; SURYONO, S. Exogenous application of TRP and indole acetic acid (IAA) to induce root nodule formation and increase soybean yield in acid, neutral and alkaline soil. **Agrivita**, Indonésia, v. 37, n. 1, p. 37–44. 2015. DOI: <https://doi.org/10.17503/agrivita-2015-37-1-p037-044>. Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/276838467\\_Exogenous\\_application\\_of\\_tryptophan\\_and\\_indole\\_acetic\\_acid\\_IAA\\_to\\_induce\\_root\\_nodule\\_formation\\_and\\_increase\\_soybean\\_yield\\_in\\_acid\\_neutral\\_and\\_alkaline\\_soil](https://www.researchgate.net/publication/276838467_Exogenous_application_of_tryptophan_and_indole_acetic_acid_IAA_to_induce_root_nodule_formation_and_increase_soybean_yield_in_acid_neutral_and_alkaline_soil). Acesso em: 14 abr. 2025.

SZAFRANSKA, K.; GLINSKA, S.; JANAS, K. M. Changes in the nature of phenolic deposits after re-warming as a result of melatonin pre-sowing treatment of *Vigna radiata*

seeds. **Journal of Plant Physiology**, [S.l.], v. 169, p. 34–40, 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22056070/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TAN, D.X. *et al.* Functional roles of melatonin in plants and perspectives in nutritional and agricultural science. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 63, p. 577–597, 2012. Disponível em: <https://academic.oup.com/jxb/article/63/2/577/497468>. Acesso em: 14 abr. 2025.

USDA Foreign Agricultural Service (FAS). **Brazil**: oilseeds and products update. Brasília, DF: [s.n.], 2023. Disponível em: [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Oil seeds%20and%20Products%20Update\\_Brasilia\\_Brazil\\_BR2023-0014](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Oil%20seeds%20and%20Products%20Update_Brasilia_Brazil_BR2023-0014). Acesso em: 14 abr. 2025.

VALLEE, B.L.; AULD, D.S. Zn coordination, function, and structure of Zn enzymes and other proteins. **Biochemistry**, [S.l.], v. 29, p. 5647-5659, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1021/bi00476a001>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/bi00476a001>. Acesso em: 16 abr. 2025.

VALOR da produção agropecuária atinge R\$361 bilhões em 2019 e bate novo recorde. 2020. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

VANZOLINI, S.; ARAKI, C. A. D. S; SILVA, A. C. T. M. D.; NAKAGAWA, J. Teste de comprimento de plântula na avaliação da qualidade fisiológica de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, [S.l.], v. 29, n. 2, 90–96, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbs/a/JfjDnYhDgMxVV7bJGds8fQb/?lang=pt>. Acesso em: 16 abr. 2025.

VLOT, A.C.; DEMPSEY, D.M.A.; KLESSIG, D.F. Salicylic acid, a multifaceted hormone to combat disease. **Ann. Rev. Phytopathology**, Palo Alto, Califórnia, v. 47, p. 177-206, 2009. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19400653/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

WAN *et al.* Involvement of reactive oxygen species and AIA in serotonin-induced inhibition of primary root elongation. **Journal of plant physiology**, [S.l.], v. 229, p. 89-99, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30055520/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

WANG, B.; CHU, J.; YU, T.; XU, Q.; SUN, X.; YUAN, J.; XIONG, G.; WANG, G.; WANG, Y.; LI, J. TRP-independent AIA biosynthesis contributes to early embryogenesis in Arabidopsis. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [S. l.], v. 112, n. 15, p. 4821–4826, 2015. DOI: 10.1073/pnas.1503998112. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1503998112>. Acesso em: 15 abr. 2025.

WANG, Y.; REITER, R. J.; CHAN, Z. Phytomelatonin: a universal abiotic stress regulator. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 69, n. 5, p. 963-974, 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29281056/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

WEI, W. *et al.* Melatonin enhances plant growth and abiotic stress tolerance in soybean plants. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 66, n. 3, p. 695-707, 2014. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25297548/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

XIAO, S. *et al.* Exogenous melatonin accelerates seed germination in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **PloS One**, São Francisco, Califórnia, v. 14, n. 6, p. e0216575, 2019. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0216575>. Acesso em: 15 abr. 2025.

XU, Nanfei; HAGEN, Gretchen; GUILFOYLE, Tom. Multiple AIA response modules in the soybean SAUR 15A promoter. **Plant Science**, [S. l.], v. 126, n. 2, p. 193–201, 1997.

ZHANG, N. *et al.* The RNA-seq approach to discriminate gene expression profiles in response to melatonin on cucumber lateral root formation. **Journal of Pineal Research**, [S. l.], v. 56, n. 1, p. 39–50, 2014. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24102657/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

ZHAO, Y. AIA biosynthesis: a simple two-step pathway converts TRP to indole-3-acetic acid in plants. **Molecular Plant**, Xangai, China, v. 11, n. 4, p. 584–586. 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22155950/>. Acesso em: 15 abr. 2025.