



BACHARELADO EM AGRONOMIA

RELATO DE ESTÁGIO: VALIDAÇÃO AGRONÔMICA DA APLICAÇÃO FOLIAR DO BION+Complex® NA CULTURA DA SOJA DURANTE ATIVIDADES DE DESENVOLVIMENTO TÉCNICO DE MERCADO

VINÍCIUS FERREIRA SOUZA

RIO VERDE

Junho, 2026

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO -
CAMPUS RIO VERDE
BACHARELADO EM AGRONOMIA**

**RELATO DE ESTÁGIO: VALIDAÇÃO AGRONÔMICA DA APLICAÇÃO FOLIAR
DO BION+Complex® NA CULTURA DA SOJA DURANTE ATIVIDADES DE
DESENVOLVIMENTO TÉCNICO DE MERCADO.**

VINÍCIUS FERREIRA SOUZA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde,
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Carlos Ribeiro Rodrigues

RIO VERDE
Junho, 2026

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S729v Souza, Vinícius Ferreira
Validação agronômica da aplicação foliar do BION+Complex®
na cultura da soja durante atividades de desenvolvimento técnico
de mercado / Vinícius Ferreira Souza. Rio Verde 2026.
58f. il.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues.
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220024 -
Bacharelado em Agronomia - Integral - Rio Verde (Campus Rio
Verde).
I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- ☐ Tese (doutorado)
☐ Dissertação (mestrado)
☐ Monografia (especialização)
☒ TCC (graduação)

- ☐ Artigo científico
☐ Capítulo de livro
☐ Livro
☐ Trabalho apresentado em evento

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
 VINICIUS FERREIRA SOUZA
Data: 10/07/2026 15:03:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Local

/ /

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente

 CARLOS RIBEIRO RODRIGUES
Data: 10/07/2026 19:31:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Regulamento de Trabalho de Curso (TC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos **seis** dias do mês de **julho** de dois mil e vinte e **seis**, às **14:30** horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: **Prof. Carlos Ribeiro Rodrigues** (orientador), **D.Sc. Eng.a Agrônoma Tatiana Michlovská Rodrigues** (membro externo) , **M.Sc. Eng.a Química Maria Emília Antunes de Rezende** (membro externo) e **D.Sc. Eng.a Agrícola Rodes Angelo Batista da Silva** (membro interno) para examinar o Trabalho de Curso (TC) intitulado “**Validação Agronômica da Aplicação Foliar do Bion+Complex na cultura da soja**” de **Vinícius Ferreira Souza**, estudante do curso de **Bacharelado em Agronomia** do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº **2022102200240291**. A palavra foi concedida ao(à) estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** do(a) estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.

Rio Verde, **06 de julho** de 2026.

**Carlos Ribeiro
Rodrigues**

Orientador(a)

MARIA EMILIA
ANTUNES DE
REZENDE:3157473468
7

Digitally signed by MARIA
EMILIA ANTUNES DE
REZENDE:31574734687
Date: 2026.07.06 16:59:29
-03'00'

Maria Emília Antunes de Rezende

Membro da Banca Examinadora

Rodes Angelo Batista da Silva

Membro da Banca Examinadora

Membro da Banca Examinadora

**Pablo da Costa
Gontijo**

Mediador de TC

Observação:

Para o caso de REAPRESENTAÇÃO, tem-se no trecho final da Ata a seguinte redação:

“Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **REAPRESENTAÇÃO** do TC. Desta forma, o estudante deve realizar correções e adequações no trabalho e apresentá-lo novamente em até **X X** dias, contados a partir de hoje (**XX/XX/XXX**). Nesta nova oportunidade, após avaliação da banca examinadora, o estudante poderá ser APROVADO ou REPROVADO, não havendo possibilidade de outra reapresentação. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.”

Para o caso de REPROVAÇÃO, tem-se no trecho final da Ata a seguinte redação:

“Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **REPROVAÇÃO** do(a) estudante. Desta forma, o estudante deverá realizar o desenvolvimento e defesa de novo TC no próximo semestre. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.”

Documento assinado eletronicamente por:

- **Carlos Ribeiro Rodrigues, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 06/07/2026 16:12:30.
- **Rodes Angelo Batista da Silva, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO - VISITANTE**, em 06/07/2026 16:13:35.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/07/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 838115
Código de Autenticação: 77377034f8



AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder saúde, força, sabedoria e perseverança para superar os desafios encontrados ao longo desta caminhada, guiando meus passos e tornando possível a concretização deste trabalho.

Ao Instituto Federal Goiano (IF Goiano), expresso minha sincera gratidão pela formação acadêmica proporcionada, pela excelência do ensino, pela infraestrutura oferecida e por todas as oportunidades de crescimento pessoal e profissional durante minha graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues, agradeço pela confiança, dedicação, disponibilidade e valiosas orientações, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para meu crescimento como profissional.

À Sra. Maria Emília Antunes de Rezende, proprietária da empresa Biocarbo, manifesto meu profundo agradecimento pela oportunidade concedida durante o estágio, pela confiança depositada em meu trabalho, pelo apoio e pelos conhecimentos compartilhados, que contribuíram significativamente para minha formação acadêmica e profissional.

Ao grupo Life Soil, deixo meu reconhecimento pelo acolhimento, pela parceria, pelo companheirismo e por todo o suporte oferecido durante a realização das atividades, tornando essa experiência ainda mais enriquecedora.

Aos meus colegas e amigos, agradeço pela amizade, incentivo, troca de conhecimentos e pelos momentos compartilhados ao longo da graduação. A convivência com cada um de vocês tornou essa jornada mais leve e significativa.

Por fim, mas não menos importante, à minha família, expresso minha mais profunda gratidão por todo o amor, apoio, incentivo, compreensão e confiança depositados em mim durante toda a minha trajetória acadêmica. Vocês foram meu alicerce nos momentos de dificuldade e minha maior motivação para seguir em frente. Esta conquista também pertence a vocês.

RESUMO

O uso de bioestimulantes derivados de extrato pirolenhoso tem se destacado como alternativa sustentável para incrementar a produtividade agrícola sem ampliar a dependência de insumos químicos sintéticos. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação foliar do bioativador comercial BION+Complex® (Biocarbo®), obtido do extrato pirolenhoso concentrado da carbonização de biomassa de eucalipto, sobre características vegetativas, componentes de rendimento e produtividade da soja (*Glycine max*) em condições comerciais de cultivo. O estudo foi conduzido durante a safra 2025/2026 em 16 áreas comerciais distribuídas em municípios goianos do Cerrado brasileiro, totalizando 900 hectares monitorados, com delineamento pareado (tratamento versus testemunha) e aplicações foliares na dose de 1,0 L ha⁻¹ nos estádios V3–V4, R1–R2 e R3–R5. Os dados foram submetidos a análises de correlação, componentes principais, agrupamento hierárquico, teste pareado, regressão múltipla stepwise e modelo linear misto. O BION+Complex® promoveu incremento médio de 4,69 sc ha⁻¹ na produtividade de grãos (teste t pareado, $p < 0,0001$; d de Cohen = 1,61), efeito confirmado mesmo após controle da variabilidade genotípica por modelo misto ($p = 0,003$). Observou-se também aumento médio de 11,58 vagens por planta, embora esse efeito tenha se mostrado dependente do contexto genotípico e ambiental. O peso de mil grãos não apresentou resposta estatisticamente significativa. Conclui-se que o BION+Complex® constitui ferramenta tecnológica promissora para a sojicultura do Cerrado goiano, cuja recomendação técnica deve considerar as condições ambientais e o perfil genotípico da cultivar como moduladores da magnitude da resposta.

Palavras-chave: Extrato pirolenhoso. Bioestimulante vegetal. *Glycine max*. Desenvolvimento técnico de mercado. Produtividade agrícola.

ABSTRACT

The use of biostimulants derived from pyroligneous extract has emerged as a sustainable alternative to enhance agricultural productivity without increasing dependence on synthetic chemical inputs. This study aimed to evaluate the effect of foliar application of the commercial bioactivator BION+Complex® (Biocarbo®), obtained from concentrated pyroligneous extract derived from controlled carbonization of eucalyptus biomass, on vegetative traits, yield components, and productivity of soybean (*Glycine max*) under commercial cultivation conditions. The study was conducted during the 2025/2026 growing season across 16 commercial fields located in municipalities of the Brazilian Cerrado in the state of Goiás, totaling 900 monitored hectares, using a paired design (treatment versus control) with foliar applications at a dose of 1.0 L ha⁻¹ at growth stages V3–V4, R1–R2, and R3–R5. Data were subjected to correlation analysis, principal component analysis, hierarchical clustering, paired tests, stepwise multiple regression, and linear mixed models. BION+Complex® promoted an average increase of 4.69 sc ha⁻¹ in grain yield (paired t-test, $p < 0.0001$; Cohen's $d = 1.61$), an effect confirmed even after controlling for genotypic variability through a mixed model ($p = 0.003$). An average increase of 11.58 pods per plant was also observed, although this effect proved dependent on genotypic and environmental context. Thousand-grain weight showed no statistically significant response. It is concluded that BION+Complex® represents a promising technological tool for soybean production in the Goiás Cerrado, whose technical recommendation should take into account environmental conditions and cultivar genotypic profile as modulators of response magnitude.

Keywords: Pyroligneous extract. Plant biostimulant. *Glycine max*. Market technical development. Agricultural productivity.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 Bioinsumos na Agricultura.....	10
2.1.1 Conceito e Classificação	10
2.1.2 Importância Agronômica.....	10
2.1.3 Agricultura Sustentável	10
2.1.4 Tendências Atuais e Perspectivas.....	10
2.2 Extrato Pirolenhoso	10
2.2.1 Definição	11
2.2.2 Processo de Obtenção.....	11
2.2.3 Composição Química	11
2.2.4 Propriedades Físico-Químicas Relacionadas ao Uso Agrícola	11
2.3 Mecanismos Fisiológicos de Ação do Extrato Pirolenhoso nas Plantas	12
2.3.1 Bioestimulação & Metabolismo Vegetal	12
2.3.2 Crescimento & Desenvolvimento	12
2.3.3 Atividade Antioxidante & Respostas ao Estresse Abiótico e Biótico	12
2.3.4 Desenvolvimento Radicular & Eficiência Nutricional.....	12
2.3.5 Regulação Fisiológica & Bioquímica.....	12
2.4 Aplicação Foliar de Bioinsumos & Extratos Vegetais	12
2.4.1 Absorção Foliar & Translocação.....	12
2.4.2 Fatores que Influenciam a Eficiência	13
2.4.3 Respostas Fisiológicas Decorrentes da Aplicação Foliar	13
2.5 Indução de Resistência & Bioestimulação Vegetal.....	13
2.5.1 Resistência Sistêmica Induzida & Ativação Bioquímica Defensiva	13
2.5.2 Enzimas Antioxidantes & Metabólitos Defensivos.....	13
2.5.3 Efeitos sobre Crescimento & Desenvolvimento Vegetal	13
2.6 Efeitos Agronômicos do Extrato Pirolenhoso	13
2.7 Uso do Extrato Pirolenhoso na Soja & Outras Culturas Agrícolas	14
2.8 Desenvolvimento Técnico de Mercado & Validação Agronômica.....	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 Áreas experimentais e caracterização do estudo	16
3.2 Caracterização do produto avaliado e posicionamento técnico.....	16
3.3 Análise dos dados.....	18
3.3.1 Obtenção do Dados	18
3.3.2 Análise Multivariada	20
3.3.3 Análise de Dados Pareados	20
3.3.3.1 Teste pareado.....	21
3.3.3.2 Regressão múltipla stepwise.	21

3.3.3.3 Modelo linear misto.	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1. Dados coletados e análise de correlação	22
4.2 Análise Multivariada: Componentes Principais e Agrupamento Hierárquico	28
4.3. Efeito do BION+Complex® sobre os Componentes de Produção da Soja e sua Interação com Condições Ambientais e Características das Cultivares.....	33
4.3.1 O BION+Complex® teve efeito sobre os componentes de produção da soja?	34
4.3.2 Correlação entre os índices de resposta ao BION+Complex® e as variáveis ambientais, genotípicas e de manejo	35
4.3.3 Análise Multivariada: ACP e Agrupamento Hierárquico dos Índices de Resposta ao BION+Complex®	38
4.3.4 Síntese: o BION+Complex® foliar teve efeito e em quais condições esse efeito foi maximizado?	42
4.3.5 Confirmação Estatística do Efeito: Teste Pareado, Regressão Múltipla e Modelo Misto	44
4.4 Registro Fotográfico Comparativo entre Tratamentos	47
4.5 Considerações finais.....	49
5 CONCLUSÕES.....	52
6. REFERÊNCIAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a agricultura mundial enfrenta desafios crescentes para aumentar a produtividade de forma sustentável diante do crescimento populacional, das mudanças climáticas e da pressão por práticas ambientalmente responsáveis. O modelo convencional, baseado no uso intensivo de insumos químicos, ampliou a produção de alimentos, mas tem sido associado a impactos negativos sobre solo, água e biodiversidade, além de favorecer a resistência de pragas e doenças (Di Sario et al., 2025; Fedeli et al., 2022a; Khoulati et al., 2025; Leifeld; Walz, 2025; Rouphael; Colla, 2018, 2020). Nesse contexto, torna-se imperativa a busca por tecnologias que promovam eficiência produtiva e resiliência das plantas sem comprometer os recursos naturais ou a saúde humana.

A transição para sistemas mais sustentáveis passa pela adoção de bioinsumos, produtos biológicos derivados de microrganismos, extratos vegetais ou resíduos orgânicos que otimizam o desempenho das culturas e reduzem a dependência de agroquímicos sintéticos (Brito-Lopez et al., 2025; Di Sario et al., 2025; Hamid et al., 2021; Johnson; Joel; Puthur, 2023; Khoulati et al., 2025; Rouphael; Colla, 2018, 2020). Eles estimulam processos fisiológicos, melhoram a absorção e o uso de nutrientes, induzem tolerância a estresses bióticos e abióticos e favorecem o microbioma do solo (Akley et al., 2023; Di Sario et al., 2025; Hamid et al., 2021; Johnson; Joel; Puthur, 2023; Rouphael; Colla, 2018), destacando-se entre eles os bioestimulantes vegetais, voltados a promover o crescimento, aumentar a produtividade e conferir maior resiliência às adversidades ambientais (Akley et al., 2023; Di Sario et al., 2025; Rouphael; Colla, 2018).

Dentre os bioestimulantes emergentes está o extrato pirolenhoso (EP), também conhecido como pyroligneous extract ou wood vinegar, obtido pela condensação dos vapores da pirólise controlada de biomassa lignocelulósica. Sua composição química complexa reúne ácidos orgânicos, compostos fenólicos e outros metabólitos bioativos, com propriedades antioxidantes, antimicrobianas e reguladoras do crescimento vegetal e do pH (Iacomino et al., 2024; Kumar et al., 2024; Mungkunkamchao et al., 2013; Ouattara et al., 2023; Theapparatt; Chandumpai; Faroongsarng, 2018). O bioaditivo avaliado neste trabalho, o BION+Complex® (Biocarbo®), é um produto comercial obtido do extrato pirolenhoso concentrado da carbonização controlada de biomassa de eucalipto (*Eucalyptus* spp.), com formulação mais complexa que o EP bruto: pH em torno de 3,5, densidade entre 1,03 e 1,05 g cm⁻³ e teor de carbono orgânico total (COT) de 4 a 6%. Por reunir compostos adicionais à matriz original, não deve ser interpretado como sinônimo do extrato pirolenhoso convencional, embora compartilhe parte de seus mecanismos de ação bioestimulante.

A aplicação foliar do EP tem sido amplamente estudada: relatam-se efeitos positivos sobre o desenvolvimento vegetativo, com aumento da biomassa aérea e radicular e estímulo à germinação e ao vigor inicial das plântulas (Fedeli et al., 2022b; Shetty et al., 2025; Wang et al., 2019; Zhu et al., 2021), atuando na modulação de rotas metabólicas ligadas à síntese hormonal (auxinas, giberelinas), à atividade enzimática antioxidante (superóxido dismutase, catalase) e à expressão gênica de defesa (Amnan et al., 2023; Wang et al., 2019; Zhu et al., 2021). Relatam-se ainda incremento de área foliar, maior número de ramos ou frutos por planta e melhoria na qualidade dos produtos colhidos (Fedeli et al., 2022b; Wang et al., 2019), além

de indução de resistência sistêmica a estresses bióticos (fungos, bactérias) e abióticos (seca, salinidade), com redução de danos oxidativos via ativação do sistema antioxidante endógeno (Amnan et al., 2023; Wang et al., 2019; Zhu et al., 2021).

No âmbito agrônomo prático, o EP já foi validado em hortaliças (alface, tomateiro), aumentando a biomassa comercializável e melhorando parâmetros qualitativos dos frutos (Fedeli et al., 2022b; Wang et al., 2019); em leguminosas (feijão-caupi, grão-de-bico), elevando rendimento e teor proteico das sementes (Akley et al., 2023; Carril et al., 2023); e em cereais (arroz, trigo), aumentando a produtividade sob salinidade e déficit hídrico, por fortalecer os mecanismos de tolerância ao estresse (Wang et al., 2019; Zhu et al., 2021). Esses efeitos dependem da dose: concentrações adequadas promovem bioestimulação, enquanto doses elevadas podem causar fitotoxicidade ou efeito herbicida (Iacomino et al., 2024; Leifeld; Walz, 2025).

Na soja (*Glycine max*), ainda há menos estudos que em outras culturas, mas os resultados preliminares são promissores. Nas Filipinas, diferentes concentrações de EP não alteraram o crescimento vegetativo, mas aumentaram estatisticamente a produtividade final dos grãos frente ao controle (Travero; Mihara, 2016). Ensaios com bioestimulantes comerciais à base de pyroligneous acid também mostraram aumento no número de folhas, maior tamanho foliar e elevação expressiva no rendimento em condições reais de campo (Noel; Schueller; Ferrieri, 2024), sugerindo que o EP é alternativa viável para a soja em sistemas sustentáveis.

A validação dessas tecnologias exige experimentação sob condições comerciais reais, já que o Desenvolvimento Técnico de Mercado (DTM) gera informações confiáveis sobre o desempenho agrônomo de produtos biológicos em larga escala, subsidiando decisões de produtores e empresas e permitindo avaliar ganhos produtivos, segurança ambiental e ocupacional e viabilidade econômica dos bioinsumos (Fedeli et al., 2022b).

Apesar do crescente interesse científico por extratos pirolenhosos na agricultura, ainda são escassas as informações obtidas sob condições comerciais de cultivo da soja, sobretudo no Cerrado brasileiro. Grande parte dos estudos foi conduzida em condições controladas ou em culturas distintas, com compreensão limitada sobre a consistência das respostas agrônomicas entre ambientes e sistemas de manejo. A elevada variabilidade química dos extratos pirolenhosos, somada às diferenças edafoclimáticas das regiões produtoras, reforça a necessidade de validações em escala comercial que subsidiem recomendações seguras e cientificamente fundamentadas.

Partiu-se da hipótese de que a aplicação foliar do extrato pirolenhoso promove modificações fisiológicas capazes de estimular o crescimento vegetativo, aumentar a eficiência metabólica das plantas e favorecer a formação e manutenção de estruturas reprodutivas, refletindo em incrementos nos componentes de rendimento e na produtividade da soja. Hipotetiza-se ainda que os efeitos bioestimulantes e indutores de resistência dos compostos fenólicos e ácidos orgânicos do extrato contribuam para maior estabilidade fisiológica das plantas ao longo do ciclo produtivo, resultando em respostas agrônomicas positivas sob condições reais de cultivo.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação foliar do bioativador BION+Complex® sobre características vegetativas, componentes de rendimento e produtividade da cultura da soja em áreas comerciais de produção localizadas no Cerrado brasileiro.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Bioinsumos na Agricultura

2.1.1 Conceito e Classificação

Bioinsumos são produtos, processos ou tecnologias de origem animal, vegetal ou microbiana que promovem efeitos benéficos à produção agrícola, e podem atuar como biofertilizantes, bioestimulantes ou agentes de biocontrole (Santos et al., 2023; Souza; Castilho; Macedo, 2022; Vermelho et al., 2026). No Brasil, a legislação classifica bioinsumos em três grandes categorias: biofertilizantes (extratos), bioestimulantes (agentes promotores de crescimento e biocontrole) e inoculantes (micro-organismos vivos) (Souza; Castilho; Macedo, 2022; Vermelho et al., 2026). O Programa Nacional de Bioinsumos, criado em 2020, impulsionou a adoção desses insumos no país (Santos et al., 2023; Xavier; Rodrigues, 2024).

2.1.2 Importância Agronômica

A utilização de bioinsumos contribui para a redução do uso de fertilizantes e defensivos químicos, o que promove maior sustentabilidade e competitividade ao setor agrícola brasileiro (Hernandez et al., 2024; Santos; Nogueira; Hungria, 2021; Vermelho et al., 2026). Inoculantes microbianos, por exemplo, são responsáveis por cerca de 90% do nitrogênio fixado na soja brasileira (Vermelho et al., 2026). Além disso, bioinsumos podem induzir tolerância a estresses abióticos e bióticos e melhorar o aproveitamento de nutrientes pelas plantas (Hernandez et al., 2024; Santos; Nogueira; Hungria, 2021).

2.1.3 Agricultura Sustentável

O uso crescente de bioinsumos está alinhado com os princípios da agricultura sustentável, pois reduz impactos ambientais negativos associados ao manejo convencional e favorece a saúde do solo e dos ecossistemas agrícolas (Leite et al., 2022; Santos et al., 2023; Souza; Castilho; Macedo, 2022). A produção on-farm tem ganhado destaque, mas exige atenção quanto à qualidade e segurança dos produtos gerados (Xavier; Rodrigues, 2024).

2.1.4 Tendências Atuais e Perspectivas

O Brasil lidera mundialmente o uso e desenvolvimento de bioinsumos, com avanços regulatórios e tecnológicos que favorecem sua expansão (Santos et al., 2023; Vermelho et al., 2026). Entre os desafios estão o controle de qualidade, regulamentação específica para produção on-farm e ampliação da oferta para diferentes culturas (Santos et al., 2023; Xavier; Rodrigues, 2024). A tendência é o aumento da integração dos bioinsumos em sistemas produtivos sustentáveis.

2.2 Extrato Pirolenhoso

2.2.1 Definição

O extrato pirolenhoso (EP), também conhecido como ácido pirolenhoso ou wood vinegar, é um líquido aquoso obtido pela condensação dos vapores liberados durante a pirólise lenta da biomassa lignocelulósica (madeira, resíduos agrícolas) sob baixa disponibilidade de oxigênio (Ouattara et al., 2023; Pimenta et al., 2018; Theapparat; Chandumpai; Faroongsarng, 2018).

2.2.2 Processo de Obtenção

A produção do EP envolve o aquecimento controlado da biomassa entre 200°C e 450°C em ambiente com pouco oxigênio; os gases formados são condensados em três frações: alcatrão (fundo), óleo leve (topo) e EP (fase aquosa superior) após decantação prolongada (Aguirre et al., 2020; Pimenta et al., 2018; Theapparat; Chandumpai; Faroongsarng, 2018).

2.2.3 Composição Química

O EP é composto majoritariamente por água (80–90%) e por diversos compostos orgânicos solúveis, entre eles ácidos orgânicos (principalmente acético), fenóis (guaiacol, cresóis), aldeídos, cetonas, álcoois, furanoides, ésteres e outros metabólitos bioativos (Aguirre et al., 2020; Pimenta et al., 2018; Theapparat; Chandumpai; Faroongsarng, 2018; Yang et al., 2016).

Compostos Fenólicos

Os fenóis representam uma fração importante do EP, guaiacol, cresóis, syringol, o que confere propriedades antioxidantes e antimicrobianas relevantes para uso agrícola (Pimenta et al., 2018; Yang et al., 2016).

Ácidos Orgânicos

O ácido acético é o principal componente orgânico (~30–70 mg/mL), seguido por outros ácidos carboxílicos que contribuem para o pH ácido do produto final (pH entre 2–4) (Pimenta et al., 2018; Theapparat; Chandumpai; Faroongsarng, 2018).

Aldeídos, Cetonas, Álcoois & Outros Metabólitos

Aldeídos como furfural; cetonas como hidroxiacetona; álcoois; furanoides; piranos; ésteres; além de pequenas quantidades de compostos nitrogenados compõem o perfil químico diversificado do EP (Aguirre et al., 2020).

2.2.4 Propriedades Físico-Químicas Relacionadas ao Uso Agrícola

O EP apresenta pH ácido (2–4), densidade próxima à água (~1 g/mL), alta solubilidade em água devido à presença majoritária deste solvente e odor característico defumado devido

aos fenóis voláteis (Pimenta et al., 2018; Theapparath; Chandumpai; Faroongsarng, 2018). Sua composição química confere propriedades antioxidantes, antimicrobianas e capacidade reguladora do crescimento vegetal (Jindo et al., 2022; Yang et al., 2016).

2.3 Mecanismos Fisiológicos de Ação do Extrato Pirolenhoso nas Plantas

2.3.1 Bioestimulação & Metabolismo Vegetal

O EP atua como bioestimulante ao promover a germinação, o vigor inicial das plântulas e o desenvolvimento vegetativo por meio da modulação hormonal (auxinas, citocininas e giberelinas) e ativação metabólica geral das plantas (Leifeld; Walz, 2025; Lu et al., 2019; Shetty et al., 2025). Compostos fenólicos podem mimetizar fitormônios ou modular vias metabólicas secundárias.

2.3.2 Crescimento & Desenvolvimento

Estudos relatam aumento no crescimento radicular e parte aérea após aplicação foliar ou via solo do EP em diversas culturas, efeito atribuído à estimulação hormonal endógena associada aos compostos presentes no extrato (Leifeld; Walz, 2025; Lu et al., 2019; Shetty et al., 2025).

2.3.3 Atividade Antioxidante & Respostas ao Estresse Abiótico e Biótico

O EP eleva a atividade das enzimas antioxidantes SOD (superóxido dismutase), CAT (catalase) e POD (peroxidase), o que reduz danos oxidativos sob estresse salino e déficit hídrico e baixas temperaturas (Amnan et al., 2023; Wang et al., 2019; Zhang et al., 2025b; Zhu et al., 2024). Também há relatos sobre indução da síntese de osmoprotetores como prolina, sacarose e proteínas solúveis sob estresse abiótico e biótico.

2.3.4 Desenvolvimento Radicular & Eficiência Nutricional

A aplicação do EP estimula o desenvolvimento radicular profundo e ramificado, o que aumenta absorção hídrica e nutricional, além de favorecer a translocação foliar-radicular dos nutrientes essenciais Ca^{2+} , K^+ , Fe^{2+} , P e N (Zhang et al., 2025b; Jindo et al., 2022).

2.3.5 Regulação Fisiológica & Bioquímica

O EP regula vias fisiológicas relacionadas à fotossíntese (clorofila), metabolismo secundário (fenilpropanoides e flavonoides), síntese proteica e enzimática, o que resulta em maior eficiência metabólica global das plantas tratadas (Ofoe et al., 2022; Zhu et al., 2024).

2.4 Aplicação Foliar de Bioinsumos & Extratos Vegetais

2.4.1 Absorção Foliar & Translocação

A absorção foliar depende da interação entre as características físico-químicas do extrato aplicado (polaridade e tamanho molecular, pH e surfactantes naturais) com as barreiras cuticulares, estomáticas e tricomas das folhas (Avellan et al., 2021; Hu et al., 2020; Li et al., 2019). Após absorção via cutícula, tricomas e estômatos ocorre translocação sistêmica pelo floema e xilema até órgãos-alvo.

2.4.2 Fatores que Influenciam a Eficiência

Eficiência depende da formulação e diluição adequada do extrato pirolenhoso; condições ambientais no momento da aplicação; morfologia foliar e cuticular; presença de surfactantes e adjuvantes naturais no próprio extrato; tempo e período fenológico da cultura-alvo; além das características anatômicas específicas das folhas tratadas (Avellan et al., 2021; Li et al., 2019).

2.4.3 Respostas Fisiológicas Decorrentes da Aplicação Foliar

As respostas incluem aumento na taxa fotossintética inicial seguida por regulação adaptativa (“eustresse” fisiológico); incremento nos teores foliares e nutricionais; ativação enzimática antioxidante; modulação hormonal endógena; estímulo ao crescimento vegetativo e reprodutivo sem causar danos estruturais às folhas tratadas quando aplicadas doses adequadas (Desideri et al., 2026).

2.5 Indução de Resistência & Bioestimulação Vegetal

2.5.1 Resistência Sistêmica Induzida & Ativação Bioquímica Defensiva

Compostos fenólicos e orgânicos presentes no EP podem atuar como elicitores que ativam a resistência sistêmica induzida via rotas dependentes e independentes dos hormônios salicílico, jasmônico e etileno, o que leva à expressão gênica defensiva sistêmica contra patógenos, insetos e pragas agrícolas (Rabari et al., 2023; Yu et al., 2022; Zhang et al., 2025a).

2.5.2 Enzimas Antioxidantes & Metabólitos Defensivos

A aplicação do EP aumenta as atividades enzimáticas antioxidantes SOD, CAT, POD e APX nas folhas e raízes, o que reduz peroxidação lipídica, malondialdeído e MDA, além de estimular síntese secundária fenólica, flavonoide e metabólitos defensivos específicos conforme relatado em tomateiro, trigo, culturas oleaginosas, chickpea, cotton, pandanus e amaryllifolius (Amnan et al., 2023; Yang et al., 2024; Zhu et al., 2024).

2.5.3 Efeitos sobre Crescimento & Desenvolvimento Vegetal

Além dos efeitos protetores contra estresses bióticos e abióticos há incremento direto no crescimento vegetativo e reprodutivo devido à ativação metabólica geral promovida pelo extrato pirolenhoso (Leifeld; Walz, 2025; Shetty et al., 2025)

2.6 Efeitos Agronômicos do Extrato Pirolenhoso

Evidências científicas apontam que a aplicação foliar ou via solo do EP pode impactar positivamente variáveis agronômicas-chave:

- **Arquitetura das Plantas / Estrutura / Desenvolvimento Vegetativo:** Incremento na biomassa aérea e radicular (Akley et al., 2023), aumento na área foliar (Fedeli et al., 2022b), maior número, ramos e nós (Rondón-Estrada et al., 2024).
- **Florescimento / Formação e Retenção Estruturas Reprodutivas: Estímulo ao florescimento precoce, formação e retenção eficiente das estruturas reprodutivas** (Ofoe et al., 2022).
- **Número Ramos, Nós e Vagens:** Estudos mostram aumento significativo nessas variáveis após aplicações adequadas (Rondón-Estrada et al., 2024).
- **Peso Mil Grãos / Componentes Produtividade:** Incremento no peso médio dos grãos e sementes, maior número, vagens e planta (Fedeli et al., 2022a), aumento expressivo nos componentes primários e secundários da produtividade.
- **Produtividade Final:** Revisões meta-analíticas indicam aumentos médios globais entre +21% a +31% na produtividade vegetal sob doses ótimas ($\sim 0,5\text{--}1\%$ v/v) (Leifeld; Walz, 2025); incrementos superiores observados sob condições subótimas ou estressantes.

É fundamental ressaltar que doses excessivas ($>7\%$ v/v) podem apresentar efeito herbicida e inibitório sobre crescimento e desenvolvimento (Leifeld; Walz, 2025), o que reforça a importância da calibração técnica.

2.7 Uso do Extrato Pirolenhoso na Soja & Outras Culturas Agrícolas

Diversos estudos recentes avaliaram os efeitos agronômicos e fisiológicos do EP em leguminosas oleaginosas:

- **Principais Pesquisas Realizadas:** Embora haja escassez relativa para soja especificamente comparada a outras culturas-modelo como tomateiro, trigo, chickpea, cowpea, rapeseed e cotton (Akley et al., 2023; Fedeli et al., 2022a), resultados positivos foram reportados para incremento em nodulação, rendimento, grãos, vagens e massa mil grãos.
- **Resultados Positivos e Limitações:** Incremento significativo na biomassa aérea, radicular e número vagens, sementes e massa mil grãos foi observado em leguminosas submetidas à aplicação foliar e drenching com EP diluído ($\sim 0,25\text{--}0,5\%$ v/v) (Akley et al., 2023); limitações incluem variação composicional entre lotes, origem e processamento do extrato pirolenhoso.
- **Efeitos sobre Crescimento e Productividade:** Resultados consistentes apontam para ganhos expressivos nessas variáveis quando doses adequadas são empregadas (Leifeld; Walz, 2025).
- **Lacunas e Limitações Científicas:** Falta padronização metodológica quanto à caracterização química detalhada dos extratos utilizados nos experimentos, agronômicos e comerciais (Leifeld; Walz, 2025); poucos estudos abordam efeitos crônicos e multissafas.

- **Perspectivas Futuras:** Integração crescente nos sistemas produtivos sustentáveis e comerciais mediante validações técnicas robustas e adaptação regionalizada.

2.8 Desenvolvimento Técnico de Mercado & Validação Agronômica

O conceito DTM refere-se ao processo sistemático pelo qual novas tecnologias agrícolas são testadas, adaptadas e em áreas comerciais reais, a fim de validar sua eficiência técnica e econômica antes da ampla difusão mercadológica (Gomes et al., 2011):

- **Importância Validação Agronômica Áreas Comerciais:** Garante robustez e confiança nas recomendações técnicas repassadas aos produtores e agroindústrias.
- **Geração Informações Técnicas Produtores e Empresas:** Ensaios DTM fornecem dados práticos sobre desempenho agrônomo e econômico sob condições reais.
- **Transferência Tecnologia e Papel Engenheiro Agrônomo:** O engenheiro agrônomo atua como elo fundamental entre pesquisa, desenvolvimento e extensão rural e difusão tecnológica junto aos produtores e agroindústrias (Gomes et al., 2011).

A validação comercial permite correlacionar mecanismos fisiológicos descritos experimentalmente aos efeitos agrônomicos observados nas principais variáveis avaliadas: estrutura das plantas e número ramos, nós, vagens e massa mil grãos e produtividade final.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Áreas experimentais e caracterização do estudo

O estudo foi conduzido durante a safra agrícola 2025/2026, no período compreendido entre outubro de 2025 e abril de 2026, por meio do acompanhamento de 15 áreas comerciais de produção de soja localizadas em diferentes municípios do estado de Goiás, inseridos na região do Cerrado brasileiro (Tabela 1). Em cada área comercial, foram monitoradas duas glebas pareadas de 30 hectares (ha) cada, uma tratada e outra mantida sem a aplicação dos tratamentos (controle), em um total de 60 ha de amostragem por propriedade e uma área global de 900 ha avaliados.

A seleção das lavouras comerciais visou abranger a heterogeneidade das macrorregiões produtoras de grãos do estado, o que garante a representatividade de diferentes amplitudes de altitude, classes de solo e regimes climáticos. As cultivares de soja utilizadas, bem como os manejos fitossanitário e nutricional adotados, seguiram estritamente os critérios técnicos definidos de forma independente por cada produtor parceiro. Dessa forma, as práticas de condução das lavouras refletiram as condições reais e os sistemas de produção vigentes na região do Cerrado goiano, sem interferência de pacotes tecnológicos preestabelecidos pela pesquisa.

3.2 Caracterização do produto avaliado e posicionamento técnico

O insumo avaliado consistiu no bioativador comercial BION+Complex® (Biocarbo®), produto obtido a partir do extrato pirolenhoso concentrado resultante da carbonização controlada de biomassa de eucalipto (*Eucalyptus* spp.). O extrato pirolenhoso, também denominado *wood vinegar*, caracteriza-se por uma matriz complexa de compostos orgânicos de baixo peso molecular, majoritariamente constituída por ácidos orgânicos, compostos fenólicos, karrikinas e demais substâncias bioativas associadas à bioestimulação vegetal, proteção fitossanitária e regulação do crescimento (Iacomino et al., 2024; Ouattara et al., 2023; Shetty et al., 2025). Para fins de caracterização físico-química, o produto apresenta pH de 3,5, densidade compreendida entre 1,03 e 1,05 g cm⁻³ e teor de carbono orgânico total (COT) com variação de 4 a 6%.

O posicionamento agrônômico do bioativador visa à promoção do crescimento vegetal, à mitigação de estresses fisiológicos e ao incremento da eficiência metabólica da cultura.

TABELA 1 Dados dos locais das áreas avaliadas com respectiva localização geográfica, altitude (m), precipitação acumulada durante a condução das áreas (mm), cultivar e respectivo grupo de maturação informado por cada fabricante para as regiões em estudo e as datas de plantio e colheita.

Município-Estado	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Precipitação (mm)	Cultivar	Maturação	Data de Plantio	Data de Colheita
Rio Verde-GO ¹	17°47'23"S	50°47'54"W	687,71	1245	Guepardo	6,9	15/10/2025	12/02/2026
Rio Verde-GO ¹	17°47'23"S	50°47'54"W	687,71	1245	Raptor	7,1	12/10/2025	14/02/2026
Rio Verde-GO ¹	17°50'60"S	51°08'13"W	846,67	1245	MS-7601I2X	7,6	23/10/2025	02/03/2026
Ipameri-GO ¹	17°34'31"S	48°12'12"W	911,83	1180	FOCO IPRO	7,2	26/11/2025	31/03/2026
Ipameri-GO ¹	17°42'06"S	48°06'58"W	749,76	1180	Tormenta	7,4	18/11/2025	23/03/2026
Caiapônia-GO ²	16°44'50"S	51°39'28"W	688,1	1310	Tormenta	7,4	25/10/2025	27/02/2026
Perolândia-GO ¹	17°38'45"S	51°58'55"W	742,58	1285	Convencional	7,9	26/10/2025	05/03/2026
Rio Verde-GO ¹	17°43'46"S	50°52'34"W	708,19	1245	B72C22	7,2	19/10/2025	21/02/2026
Rio Verde-GO ¹	17°44'13"S	50°55'38"W	741,71	1245	Olimpo	8	23/10/2025	02/03/2026
Rio Verde-GO ¹	17°36'33"S	50°46'24"W	715,75	1245	Olimpo	8	26/10/2025	05/03/2026
Montes Claros de Goiás-GO ²	15°50'53"S	51°44'37"W	326,01	1360	Olimpo	8	29/10/2025	08/03/2026
Montes Claros de Goiás-GO ²	15°50'53"S	51°44'37"W	326,01	1360	Olimpo	8	07/11/2025	17/03/2026
Santo Antônio da Barra-GO ¹	17°27'22"S	50°55'09"W	796,42	1245	Olimpo	8	04/11/2025	14/03/2026
Santo Antônio da Barra-GO ²	17°23'33"S	50°38'47"W	581,98	1245	Olimpo	8	26/10/2025	05/03/2026
Quirinópolis-GO ¹	18°11'15"S	50°14'41"W	482,72	1245	Olimpo	8	17/11/2025	27/03/2026

¹Áreas com duas aplicações nos estádios R1–R2 (início do florescimento) e R3–R5 (desenvolvimento das vagens e enchimento de grãos).

²Áreas com três aplicações nos estádios V3–V4 (desenvolvimento vegetativo), R1–R2 (início do florescimento) e R3–R5 (desenvolvimento das vagens e enchimento de grãos).

As aplicações foram realizadas via foliar, conforme as recomendações técnicas do fabricante, na dose de $1,0 \text{ L ha}^{-1}$ em cada estágio, a saber: V3–V4 (desenvolvimento vegetativo), R1–R2 (início do florescimento) e R3–R5 (desenvolvimento das vagens e enchimento de grãos) da cultura da soja. Todavia, em função da logística e manejo de alguns produtores foram realizadas 3 aplicações nos estádios recomendados, ou somente duas, ambas nos dois últimos estádios recomendados (Tabela 1).

Ao longo do ciclo da cultura, foram realizadas avaliações visuais periódicas em pontos aleatórios dentro de cada área sob monitoramento. Para a amostragem, foram selecionados casualmente quatro pontos representativos por tratamento, onde se procedeu à coleta de todas as plantas contidas em um metro linear. No momento da colheita, a determinação do número de vagens por planta seguiu o mesmo critério de amostragem, e estabeleceu-se o valor médio dessa variável por ponto amostral e, subsequentemente, a média consolidada por tratamento em cada propriedade.

A avaliação da produtividade de grãos foi estimada por meio de dois métodos, a depender do nível tecnológico e dos recursos disponíveis em cada propriedade parceira: i) monitoramento eletrônico, por meio dos dados automatizados de pesagem e mapeamento de área fornecidos pelos sensores integrados das próprias colhedoras; ou ii) amostragem direta de campo, e calculou-se a produção obtida em uma área útil delimitada, cuja dimensão foi estimada pelo produto do comprimento do tiro de colheita pela largura nominal da plataforma da colhedora. Para a quantificação da massa de grãos desse segundo método, a pesagem da carga foi realizada com sapatas equipadas com células de carga (balanças de plataforma móveis) posicionadas sob os rodados dos implementos graneleiros (carretas basucas) no próprio campo. Após a colheita dos grãos foram retiradas subamostras de 4 kg dos grãos e estimada a umidade e o peso de mil grãos em três subamostras, e obteve-se o valor médio final. Em ambos os métodos, para a estimativa da produtividade de grãos e do peso de mil grãos a umidade dos foi padronizada para 13%.

3.3 Análise dos dados

3.3.1 Obtenção do Dados

Após a colheita, foram tabulados os valores médios do número de vagens por planta, peso de mil grãos (PMG, expresso em gramas) e produtividade de grãos (convertida para sacas de 60 kg ha^{-1}). Para a caracterização ambiental das áreas comerciais, foram integradas as informações de altitude (m acima do nível do mar) e as coordenadas geográficas (latitude e longitude) de cada localidade. Os dados de precipitação pluvial acumulada (mm) e de

temperatura ao longo do ciclo fitotécnico (do plantio à colheita) foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com uso das estações meteorológicas automáticas mais próximas de cada área.

Como a temperatura máxima ótima para a expressão do potencial produtivo da soja varia entre 25,0 e 26,4 °C (Choi et al., 2016), quantificou-se o número de dias, ao longo do ciclo da cultura, em que a temperatura máxima ultrapassou o limiar de 26,0 °C, bem como o número de dias consecutivos sem precipitação (veranicos).

Adicionalmente, atribuiu-se a cada cultivar uma nota de 1 a 5 referente à exigência em fertilidade do solo, conforme o catálogo técnico e o prospecto de informações disponibilizados pelos respectivos obtentores genéticos. A partir dessas mesmas fontes, foi obtido o Grupo de Maturação Relativa (GMR) de cada material.

Para avaliar o ajuste do cronograma de semeadura em relação à época recomendada, estipulou-se um índice denominado "Nota de Plantio", cujos valores variaram em uma escala discreta de -3 a +3. Para o cálculo desse índice, a janela de plantio recomendada de cada cultivar foi dividida em cinco períodos iguais (quintas): atribuiu-se nota -3 para semeaduras realizadas antes da janela recomendada; nota -2 para o primeiro quintil; nota -1 para o segundo quintil; nota 0 para o plantio efetuado estritamente no meio da janela; nota +1 para o terceiro quintil; nota +2 para o último quintil; e nota +3 para semeaduras extemporâneas, realizadas após o encerramento do período recomendado (Figura 1).

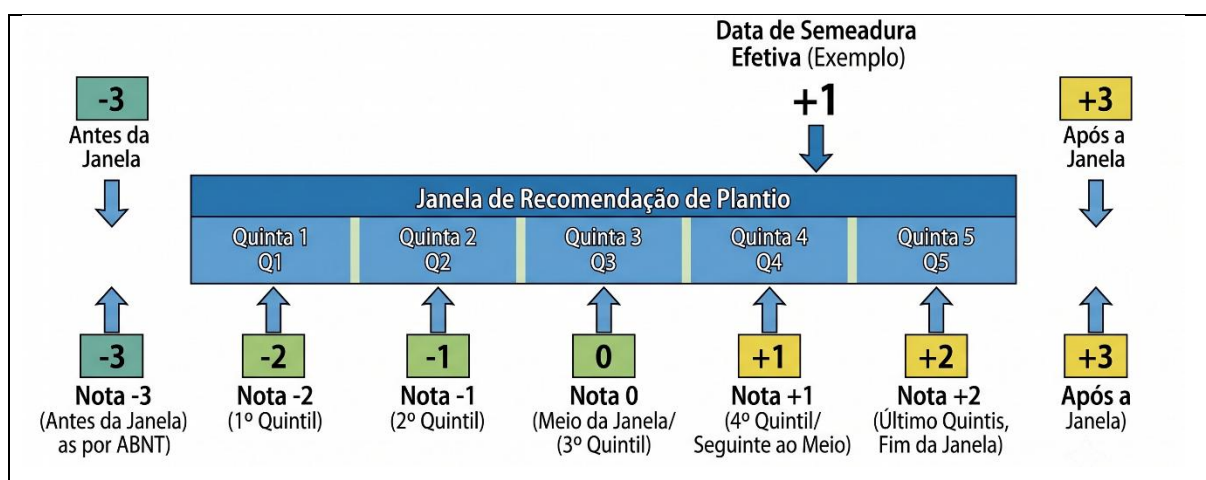


FIGURA 1 Esquema metodológico para determinação da Nota de Plantio com base na data de semeadura efetiva e na janela de recomendação técnica da cultivar.

Para avaliar simultaneamente o efeito do bioativador (BION vs. Controle) sobre o perfil produtivo e as características edafoclimáticas, e identificar as variáveis de maior peso na discriminação dos grupos, os dados foram submetidos a técnicas de análise estatística

multivariada. Inicialmente, as variáveis contínuas foram centralizadas e escalonadas (padronização por escore) para mitigar os efeitos das diferentes escalas e unidades de medida.

3.3.2 Análise Multivariada

Na sequência, realizou-se uma Análise de Componentes Principais (PCA) para a redução da dimensionalidade dos dados e identificação dos vetores de máxima variância. A retenção dos componentes principais (CPs) baseou-se no critério de Kaiser (autovalores $> 1,0$). A contribuição e a força de associação de cada variável original (produtividade, número de vagens, PMG, variáveis climáticas e notas de manejo) com os eixos retidos foram extraídas por meio das cargas fatoriais (loadings) e das contribuições percentuais.

Complementarmente, para verificar se os tratamentos diferiram entre si de forma estruturada, aplicou-se a Análise de Agrupamento Hierárquico sobre os Componentes Principais (HCPC), com a distância Euclidiana como medida de dissimilaridade e o método de Ward como critério de agregação. O número ideal de clusters foi definido matematicamente pelo critério de perda de inércia relativo.

Também foi realizada uma análise complementar, na qual as variáveis: produtividade de grãos, peso de mil grãos e número de vagens por planta foram substituídas pelas diferenças entre os valores obtidos com e sem a aplicação do BION+Complex®. Em seguida, a análise multivariada foi repetida com o objetivo de identificar em quais condições climáticas e características das cultivares ocorreram os maiores incrementos de produtividade decorrentes do uso do bioinsumo.

As análises multivariadas foram processadas no ambiente de computação científica R (R CORE TEAM, 2024), com uso das funções do pacote *FactoMineR* (Lê; Josse; Husson, 2008) para a extração matemática dos fatores e o pacote *factoextra* (Kassambara; Mundt, 2020) para a geração dos gráficos de biplot.

3.3.3 Análise de Dados Pareados

Para a análise de dados de todas as áreas foi considerado o delineamento experimental pareado, em que cada área comercial constituiu um par Testemunha e BION+Complex®. A robustez estatística das diferenças observadas nas variáveis de produção (produtividade, número de vagens por planta (NV) e peso de mil grãos (PMG)) foi avaliada por meio de três abordagens complementares, descritas: teste pareado, regressão múltiplas stepwise e modelo linear misto.

3.3.3.1 Teste pareado

Para cada variável, calculou-se a diferença pareada (BION+Complex® – Controle) entre as 16 áreas avaliadas. A normalidade das diferenças foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,05$), o que definiu a escolha entre o teste t de Student pareado, quando a hipótese de normalidade não foi rejeitada, e o teste não paramétrico de Wilcoxon (postos sinalizados), quando a normalidade foi rejeitada. O tamanho de efeito foi estimado pelo d de Cohen para diferenças pareadas, calculado como a razão entre a diferença média e o desvio-padrão das diferenças.

3.3.3.2 Regressão múltipla stepwise.

Para identificar, em conjunto, as variáveis ambientais, genotípicas e de manejo que melhor explicam a magnitude da resposta diferencial ao BION+Complex® (Δ = valor na parcela tratada – valor na testemunha, para cada variável de produção), ajustaram-se modelos de regressão linear múltipla por procedimento stepwise *forward*, com o Critério de Informação de Akaike (AIC) como critério de entrada e parada das variáveis no modelo. Foram incluídas como preditoras candidatas: altitude, precipitação acumulada no ciclo, número de dias com temperatura máxima acima de 26 °C, número de dias de veranico, grupo de maturação, exigência de fertilidade, ciclo da cultivar e nota de plantio. A qualidade de ajuste dos modelos finais foi avaliada pelo R^2 , R^2 ajustado e significância do modelo pelo teste F, e a multicolinearidade entre preditores foi verificada pelo número de condição da matriz de correlação.

3.3.3.3 Modelo linear misto.

Como parte das áreas avaliadas compartilhava a mesma cultivar (Olimpo, presente em 7 dos 16 pares), o que compromete o pressuposto de independência entre observações exigido pelo teste pareado convencional (pseudorreplificação), ajustou-se, para cada variável de produção, um modelo linear misto (LMM) com o tratamento (BION+Complex® vs. Controle) como efeito fixo e a cultivar como efeito aleatório sobre o intercepto. Os parâmetros foram estimados por máxima verossimilhança restrita (REML). A partir das variâncias estimadas para o efeito aleatório (cultivar) e para o resíduo, calculou-se o coeficiente de correlação intraclass (ICC), que representa a proporção da variância total atribuível às diferenças entre cultivares.

Todas as análises foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2024), com os pacotes *stats* (testes t, Wilcoxon e Shapiro-Wilk), *MASS* (regressão stepwise por AIC) e *lme4* e *lmerTest* (modelos lineares mistos). Adotou-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) em todos os testes, e resultados com $0,05 < p \leq 0,10$ foram interpretados como tendência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Dados coletados e análise de correlação

O presente estudo foi conduzido em sete municípios do estado de Goiás, Rio Verde, Ipameri, Caiapônia, Perolândia, Montes Claros de Goiás, Santo Antônio da Barra e Quirinópolis, em um total de 33 observações distribuídas entre dois tratamentos (BION+Complex® e Controle) e oito cultivares de soja (Guepardo, Raptor, MS-760112X, FOCO IPRO, Tormenta, Convencional, B72C22 e Olimpo). A diversidade de ambientes avaliados é expressa, sobretudo, pela amplitude altitudinal dos locais, que variou de 326 m a 912 m acima do nível do mar, o que representa ecótopos distintos dentro do Cerrado goiano (Tabela 2).

A produtividade, principal variável de interesse, oscilou entre 53,3 e 88,3 sc ha⁻¹, com média aproximada de 67,8 sc ha⁻¹, o que indica expressiva variação entre locais, cultivares e tratamentos (Tabela 2). O número de vagens por planta apresentou amplitude ainda mais acentuada, com valores entre 35,75 e 105,75 vagens, o que reflete diferenças tanto genótípicas quanto ambientais (Tabela 2). O peso de mil grãos (PMG) variou de 114,5 a 193,4 g, amplitude que é característica de genótipos com distintos potenciais de enchimento de grãos (Tabela 2).

As variáveis climáticas revelaram heterogeneidade entre os locais: a precipitação acumulada situou-se entre 1.180 e 1.360 mm, o número de dias com temperatura acima de 26°C variou de 95 a 115, e os dias de veranico (número de dias sem chuva entre semeadura e colheita) oscilaram entre 17 e 24 dias, valores representativos das condições de deficit hídrico durante o ciclo produtivo na região do Cerrado. O ciclo das cultivares avaliadas variou de 120 a 130 dias, com grupos de maturação entre 6,9 e 8,0, o que confere diversidade no período de ocupação da área e de exposição às condições meteorológicas sazonais (Tabela 3).

A fim de explorar as relações lineares entre as variáveis quantitativas coletadas, procedeu-se à análise de correlação de *Pearson*, cujos resultados estão apresentados na Figura 2. Os coeficientes de correlação são acompanhados de asteriscos indicativos de significância estatística: um asterisco (*) para $p < 0,05$ e dois asteriscos (**) para $p < 0,01$.

TABELA 2 Informações das cultivares como Ciclo de maturação (Maturação), exigência de fertilidade (Fertilidade), número de dias entre a semeadura e a colheita (Ciclo), nota de plantio dado em relação à janela de plantio e a data de semeadura (Plantio), e dados de produtividade (sacas ha⁻¹) e índices de produtividade como número de vagens por planta (NV) (vagens planta⁻¹) e peso de mil grãos (PMG) (g) de cada área avaliada sem (Controle) e com a aplicação do BION+Complex®.

Localidade – Identificação	Tratamento	Cultivar	Maturação	Fertilidade	Ciclo	Plantio	Produtividade (sacas ha ⁻¹)	NV (vagens planta ⁻¹)	PMG (g)
Rio Verde-GO – RV1	BION+Complex®	Guepardo	6,9	5	120	2	67,5	36,85	193,4
	Controle						66	38,7	193,4
Rio Verde-GO – RV2	BION+Complex®	Raptor	7,1	5	125	2	80,5	59,2	159,6
	Controle						77,5	49,05	165,9
Rio Verde-GO – RV3	BION+Complex®	MS-7601I2X	7,6	4	130	0	69,4	63	137,7
	Controle						69	51,5	121,63
Rio Verde-GO – RV4	BION+Complex®	MS-7601I2X	7,6	4	130	0	73,4	73,75	137,7
	Controle						69,4	51,5	120,6
Ipameri-GO – IP1	BION+Complex®	FOCO IPRO	7,2	5	125	-3	67,2	56,8	159
	Controle						60,6	55,3	157
Ipameri-GO – IP2	BION+Complex®	Tormenta	7,4	5	125	0	66,5	70,62	187
	Controle						56,7	61	176
Caiaipônia-GO – CP	BION+Complex®	Tormenta	7,4	5	125	2	75,2	42,8	181
	Controle						75	35,75	174
Perolândia-GO – PRL	BION+Complex®	Convencional	7,9	4	130	0	65,4	58	169,5
	Controle						60,2	40	167,2
Rio Verde-GO – RV5	BION+Complex®	B72C22	7,2	4	125	0	57,1	59,7	149,8
	Controle						54,5	56,95	149,8
Rio Verde-GO – RV6	BION+Complex®	Olimpo	8	4	130	0	71,6	73,85	148,8
	Controle						67,3	53	151
Rio Verde-GO – RV7	BION+Complex®	Olimpo	8	4	130	0	68,3	56,4	159,7
	Controle						58,3	55,2	158,2
Montes Claros de Goiás-GO – MCG1	BION+Complex®	Olimpo	8	4	130	0	68,3	103,68	147,9
	Controle						61	102,25	143,1
Montes Claros de Goiás-GO – MCG2	BION+Complex®	Olimpo	8	4	130	0	59,5	132,75	178,5
	Controle						53,3	73,62	172,4
Santo Antônio da Barra-GO – SAB1	BION+Complex®	Olimpo	8	4	130	0	70	44,9	155,8
	Controle						65	36,15	157,2
Santo Antônio da Barra-GO – SAB2	BION+Complex®	Olimpo	8	4	130	0	65,3	69,25	123,5
	Controle						59,5	63,8	128,7
Quirinópolis-GO - QR	BION+Complex®	Olimpo	8	4	130	-2	64,1	105,75	115,1
	Controle						61	98,25	114,5

TABELA 3 Caracterização geográfica e climática e operacional das áreas comerciais de soja utilizadas na validação agronômica do BION+Complex® durante a safra 2025/2026 no Cerrado goiano.

Município - Identificação	Altitude	Latitude	Longitude	Precipitação	Temperatura	Veranico
Rio Verde-GO – RV1	687,71	17,78984	50,79835	1245	102	21
Rio Verde-GO – RV2	687,71	17,78984	50,79835	1245	102	21
Rio Verde-GO – RV3	846,67	17,84998	51,13705	1245	102	21
Rio Verde-GO – RV4	846,67	17,84998	51,13705	1245	102	21
Ipameri-GO – IP1	911,83	17,57525	48,20323	1180	95	24
Ipameri-GO – IP2	749,76	17,70181	4,81E+08	1180	95	24
Caiapônia-GO – CP	688,1	16,74728	51,65773	1310	108	18
Perolândia-GO – PRL	742,58	17,64579	51,98191	1285	110	19
Rio Verde-GO – RV5	708,19	17,72946	50,8761	1245	102	21
Rio Verde-GO – RV6	741,71	17,73708	50,92732	1245	102	21
Rio Verde-GO – RV7	715,75	17,60906	50,77345	1245	102	21
Montes Claros de Goiás-GO – MCG1	326,01	15,84813	51,74352	1360	115	17
Montes Claros de Goiás-GO – MCG2	326,01	15,84813	51,74352	1360	115	17
Santo Antônio da Barra-GO – SAB1	796,42	17,45599	50,91925	1245	102	21
Santo Antônio da Barra-GO – SAB2	581,98	17,39249	50,6465	1245	102	21
Quirinópolis-GO - QR	482,72	18,18751	50,24477	1245	102	21

TABELA 4 Coeficientes de correlação de *Pearson* entre os componentes de produção (Produtividade, Número de Vagens e Peso de Mil Grãos – PMG) e variáveis ambientais, genotípicas e de manejo avaliadas em lavouras de soja no estado de Goiás.

	<i>Produtividade</i>	<i>Vagens</i>	<i>PMG</i>
Altitude (m)	0,318	-0,721**	0,037
Latitude	0,174	-0,432*	-0,248
Longitude	0,114	0,094	-0,058
Precipitação (mm)	-0,062	0,413*	0,081
Temperatura	-0,105	0,400*	0,095
Veranico	0,008	-0,329	-0,076
Maturação	-0,303	0,452**	-0,434*
Exigência Fertilidade	0,514**	-0,396*	0,280
Ciclo	-0,194	0,426*	-0,602**
Nota de Plantio	0,193	-0,167	0,360*

* Significativo a 5% de probabilidade ($p < 0,05$) pelo teste t. ** Significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$) pelo teste t.

A análise de correlação de *Pearson* entre os componentes de produção da soja, produtividade de grãos, número de vagens por planta e peso de mil grãos (PMG), e as variáveis ambientais, genotípicas e de manejo avaliadas revelou padrões distintos para cada componente, o que evidencia a complexidade multifatorial que governa o desempenho produtivo da cultura nas condições do Cerrado goiano.

Em relação à **produtividade de grãos**, a única correlação estatisticamente significativa observada foi com a exigência de fertilidade das cultivares ($r = 0,514$; $p < 0,01$). Esse resultado indica que cultivares classificadas como mais exigentes em fertilidade do solo, e, portanto, de maior potencial genético e demanda nutricional, expressaram maior rendimento nas condições avaliadas. Tal associação sugere que os ambientes de cultivo contemplados no estudo dispunham de adequada capacidade de suprimento de nutrientes, o que permite que as cultivares de maior exigência expressassem seu potencial produtivo superior. Esse resultado reforça a importância do correto manejo da fertilidade do solo como pré-requisito para a seleção de cultivares de alto desempenho, conforme preconizado pela literatura especializada (EMBRAPA, 2020; SFREDO, 2008). As demais variáveis, altitude, latitude, longitude, precipitação, temperatura, veranico, grupo de maturação, ciclo e nota de plantio, não apresentaram correlações significativas com a produtividade final, o que pode ser atribuído à natureza compensatória dos componentes de rendimento da soja: reduções em um componente

tendem a ser compensadas por aumentos em outro, o que resulta em produtividade final relativamente estável frente a variações ambientais moderadas (Board; Kahlon, 2011).

O número de vagens por planta foi o componente de produção que apresentou maior número de correlações significativas, o que evidencia sua maior sensibilidade às variações ambientais e genotípicas. A altitude foi a variável de maior influência, com correlação negativa altamente significativa ($r = -0,721$; $p < 0,01$). Esse resultado indica que, nos ambientes de maior altitude avaliados, como Ipameri (911 m), as plantas produziram consistentemente menos vagens em comparação àquelas cultivadas em locais de menor altitude, como Montes Claros de Goiás (326 m). Em altitudes mais elevadas, as temperaturas médias são geralmente mais amenas, o que pode encurtar o período reprodutivo efetivo da cultura e reduzir a taxa de fixação de flores e vagens, especialmente em cultivares adaptadas a ambientes mais quentes (Farias; Nepomuceno; Neumaier, 2007). Nessa mesma direção, a latitude apresentou correlação negativa significativa com o número de vagens ($r = -0,432$; $p < 0,05$), o que reflete que localidades geograficamente mais ao sul, sujeitas a fotoperíodos distintos, também tenderam a apresentar menor emissão de estruturas reprodutivas.

Em sentido oposto, a precipitação ($r = 0,413$; $p < 0,05$) e a temperatura, expressa como número de dias com temperatura máxima acima de 26 °C, limite superior do ótimo fisiológico para a soja, ($r = 0,400$; $p < 0,05$), correlacionaram-se positivamente com o número de vagens. Ambientes com maior disponibilidade hídrica e maior ocorrência de dias quentes estiveram associados à maior emissão de vagens, o que é coerente com o papel da água e do calor na estimulação do metabolismo reprodutivo da planta durante o florescimento (Mundstock; Thomas, 2005). Contudo, é importante ponderar que a correlação positiva com dias de temperatura acima de 26 °C não implica necessariamente um efeito benéfico do calor excessivo: esse resultado pode refletir a co-ocorrência de maior temperatura com maior precipitação nos ambientes de baixa altitude avaliados, o que configura uma correlação espúria mediada pelo ambiente. O grupo de maturação ($r = 0,452$; $p < 0,01$) e o ciclo em dias ($r = 0,426$; $p < 0,05$) também se correlacionaram positivamente com o número de vagens, o que indica que cultivares de ciclo mais longo dispõem de maior período vegetativo e reprodutivo para acumular estruturas produtivas. Por fim, a exigência de fertilidade correlacionou-se negativamente com o número de vagens ($r = -0,396$; $p < 0,05$), o que, associado ao resultado positivo para a produtividade, sugere que cultivares de maior exigência nutricional compensam o menor número de vagens com maior peso individual de grãos, uma expressão clássica da plasticidade fenotípica da soja na alocação de fotoassimilados (EGLI, 2008).

O **peso de mil grãos (PMG)** apresentou padrão de correlações distinto dos demais componentes, com predominância de associações com variáveis genotípicas. O ciclo das cultivares foi a variável de maior influência, com correlação negativa altamente significativa ($r = -0,602$; $p < 0,01$), o que indica que cultivares de ciclo mais curto tenderam a produzir grãos individuais mais pesados. Esse resultado é biologicamente consistente com o mecanismo de compensação entre componentes de rendimento: plantas com menor número de vagens e período de enchimento concentrado tendem a direcionar maior quantidade de fotoassimilados para cada grão, o que resulta em maior PMG (Mundstock; Thomas, 2005). O grupo de maturação apresentou correlação negativa significativa semelhante ($r = -0,434$; $p < 0,05$), o que reforça que cultivares de maturação precoce, e, portanto, de ciclo mais curto, expressaram maior peso de grãos nas condições avaliadas. Esses dois resultados, em conjunto com a correlação negativa entre ciclo e PMG, sugerem que a seleção de cultivares precoces pode ser uma estratégia eficaz para maximizar o PMG em ambientes do Cerrado sujeitos a restrições hídricas no final do ciclo.

A nota de plantio correlacionou-se positivamente com o PMG ($r = 0,360$; $p < 0,05$), o que indica que semeaduras realizadas na segunda metade da janela recomendada, correspondentes às notas +1 e +2, estiveram associadas a maior peso de grãos. Uma interpretação plausível é que, nessas datas, o período de enchimento de grãos coincide com condições de temperatura e radiação solar mais favoráveis ao final da estação chuvosa no Cerrado, o que otimiza a taxa de acúmulo de matéria seca nos grãos (Garcia et al., 2007). Semeaduras muito antecipadas (notas -2 e -3), por outro lado, podem expor o período de granação a condições de temperatura excessiva e maior demanda evapotranspirativa, o que compromete o enchimento. As demais variáveis ambientais, altitude, latitude, longitude, precipitação, temperatura e veranico, não apresentaram correlações significativas com o PMG, o que indica que esse componente é determinado predominantemente pelas características genotípicas das cultivares e pelo ajuste do calendário de semeadura, e mostrou-se menos responsivo às variações do ambiente físico entre os locais avaliados.

De forma integrada, os resultados da correlação de *Pearson* permitem delinear perfis de resposta distintos para cada componente de produção. A produtividade final mostrou-se relativamente insensível à maioria das variáveis avaliadas, com exceção da exigência de fertilidade, o que sugere que o rendimento da soja, nas condições do Cerrado goiano, é governado primariamente pelo potencial genético das cultivares aliado ao adequado suprimento nutricional. O número de vagens revelou-se o componente mais responsivo ao ambiente, e é fortemente modulado pela altitude, pelo regime climático dos locais e pelas características

genotípicas de ciclo e maturação. O PMG, por sua vez, emerge como o componente de maior determinação genotípica, e é mais influenciado pelo ciclo e pelo grupo de maturação das cultivares do que pelas condições ambientais dos locais. Esses achados são consistentes com o modelo de determinação hierárquica dos componentes de rendimento da soja, no qual o número de vagens constitui o componente de maior plasticidade fenotípica e o PMG representa o componente de maior estabilidade genotípica (Board; Kahlon, 2011; Egli, 2017). A compreensão dessas relações tem implicações práticas diretas para o manejo da cultura: a escolha de cultivares com alto potencial de exigência nutricional, aliada ao correto ajuste da época de semeadura dentro da janela recomendada e ao suporte adequado de fertilidade do solo, constitui a estratégia de maior potencial para a maximização do rendimento da soja nos ambientes avaliados.

4.2 Análise Multivariada: Componentes Principais e Agrupamento Hierárquico

A fim de explorar a estrutura de variação multidimensional dos dados e identificar padrões de agrupamento entre os ambientes experimentais, procedeu-se à Análise de Componentes Principais (ACP) seguida de agrupamento hierárquico pelo método de Ward, com distâncias euclidianas calculadas sobre os escores das três primeiras componentes principais. As onze variáveis quantitativas incluídas na análise: produtividade de grãos, número de vagens por planta, peso de mil grãos (PMG), altitude, precipitação, temperatura (número de dias acima de 26 °C), dias de veranico, grupo de maturação, exigência de fertilidade, ciclo e nota de plantio. Os dados das variáveis foram previamente padronizados (média zero, variância unitária) para eliminar o efeito de escala e permitir a comparação direta entre variáveis de unidades distintas.

As três primeiras componentes principais retiveram, em conjunto, **79,8%** da variância total dos dados: a primeira componente principal (CP1) explicou **46,3%**, a segunda (CP2) **22,4%** e a terceira (CP3) **11,2%** da variabilidade. Esse nível de retenção da variância é considerado satisfatório para dados agronômicos multivariados, o que indica que o espaço bidimensional das duas primeiras componentes é suficientemente representativo para a interpretação gráfica dos padrões de variação entre ambientes e variáveis (HAIR et al., 2009).

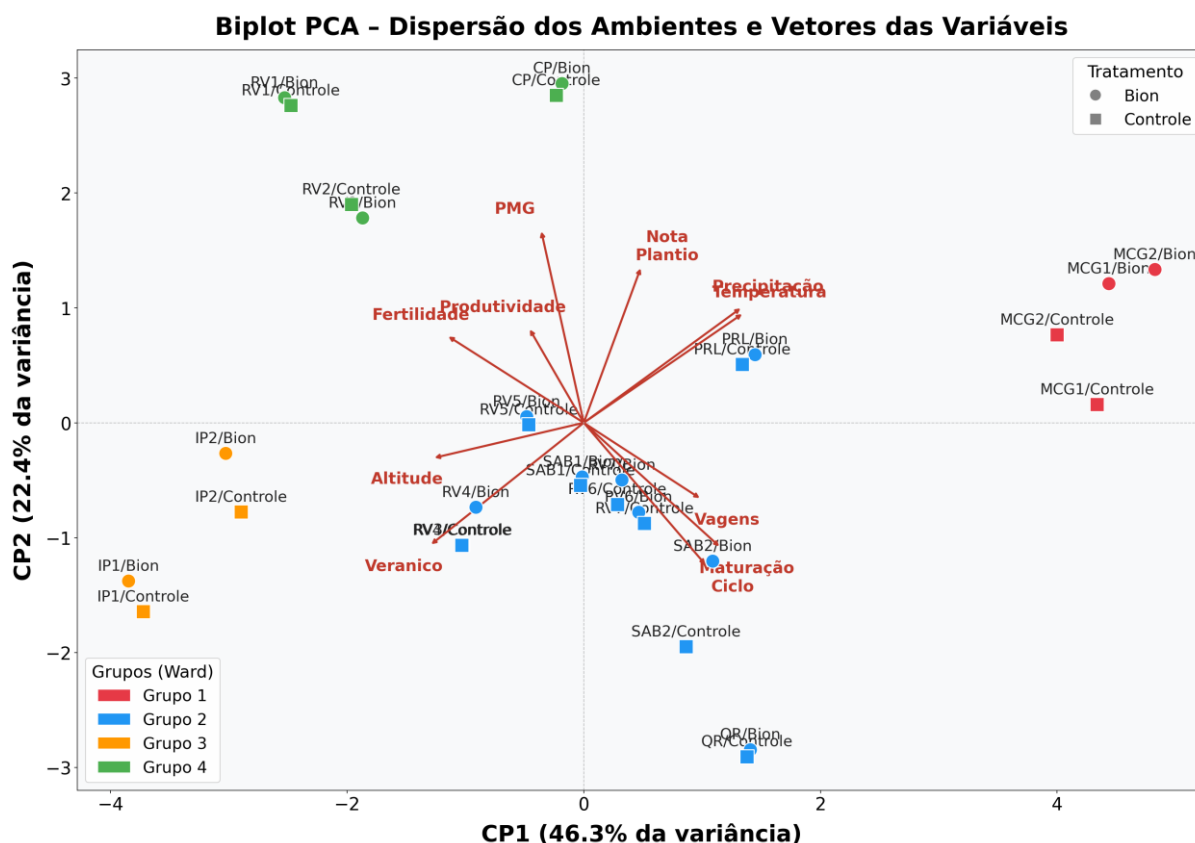


FIGURA 2 Biplot da Análise de Componentes Principais (ACP), que representa a dispersão dos 31 ambientes experimentais (círculos = tratamento BION; quadrados = Controle) e os vetores de carga das onze variáveis avaliadas em lavouras de soja no estado de Goiás. CP1: 46,3%; CP2: 22,4% da variância total.

A **Análise de Cargas Fatoriais (loadings)** é o coração da Análise de Componentes Principais (PCA). Em termos simples: enquanto a PCA projeta os seus dados em um novo espaço para facilitar a visualização, os *loadings* revelam o **peso e o sentido** que cada variável original teve para construir esse novo espaço. Se os pontos (áreas comerciais) se moveram no gráfico, os *loadings* (as setas e vetores) explicam **quem os empurrou** e para onde.

A interpretação do biplot (Figura 2) permite identificar as variáveis de maior contribuição para cada componente principal e os padrões de associação entre variáveis e ambientes. A **CP1**, que responde pela maior fração da variância, opôs ambientes de menor altitude, maior precipitação e temperatura mais elevada (posicionados à direita do eixo) àqueles de maior altitude, menor precipitação e maior número de dias de veranico (posicionados à esquerda). Os vetores de precipitação e temperatura acima do ótimo fisiológico apresentaram as maiores cargas positivas na CP1 (0,386 e 0,382, respectivamente), enquanto altitude (−0,364) e veranico (−0,372) apresentaram as maiores cargas negativas. Isso significa que o CP1 é um **Eixo Ambiental e Climático**. Ele separa os municípios chuvosos e quentes dos municípios que

sofreram com a seca (veranico). A maior contribuição da CP1 na dispersão dos dados (46,3%) sugere que a dispersão dos dados teve forte influência das características meteorológicas intrínsecas de cada localidade. Esse padrão está em consonância com o resultado da correlação de *Pearson* anteriormente descrito, que evidenciou correlação negativa altamente significativa entre altitude e número de vagens ($r = -0,721$; $p < 0,01$), e correlações positivas significativas de precipitação e temperatura com esse componente de produção ($r = 0,413$ e $0,400$; $p < 0,05$), o que demonstra que a CP1 captura, essencialmente, o gradiente climático-altitudinal dos ambientes avaliados.

A **CP2**, por sua vez, separou ambientes pela combinação de PMG e nota de plantio (cargas positivas de 0,480 e 0,388, respectivamente) em oposição ao ciclo ($-0,356$), maturação ($-0,310$) e veranico ($-0,305$). Ambientes posicionados no quadrante superior do eixo CP2 tenderam a reunir cultivares de menor ciclo, maior peso de grãos e sementes realizadas em datas mais adequadas dentro da janela recomendada, o que reflete a associação positiva entre nota de plantio e PMG ($r = 0,360$; $p < 0,05$) e a correlação negativa entre ciclo e PMG ($r = -0,602$; $p < 0,01$) identificadas na análise bivariada. A exigência de fertilidade apresentou carga positiva na CP2 (0,217), o que associa ambientes de maior PMG e melhor ajuste de sementeira às cultivares de maior exigência nutricional, o mesmo padrão detectado na correlação entre exigência de fertilidade e produtividade ($r = 0,514$; $p < 0,01$).

O agrupamento hierárquico pelo critério de Ward, aplicado sobre os escores das três primeiras componentes principais, identificou **quatro grupos** com perfis ambientais e agronômicos distintos, conforme ilustrado na Figura 3. A composição e as características médias de cada grupo são descritas a seguir.

O **Grupo 1** reuniu exclusivamente os ambientes de Montes Claros de Goiás (MCG1 e MCG2, BION e Controle), localizados na menor altitude avaliada (326 m), com maior precipitação acumulada (1.360 mm) e maior temperatura acima do ótimo fisiológico (115 dias). Esse grupo apresentou a maior média de número de vagens por planta (103 vagens), porém a menor produtividade média ($60,5 \text{ sc ha}^{-1}$) e PMG intermediário (160,5 g). Esse perfil é coerente com o mecanismo de compensação entre componentes de rendimento identificado na correlação de *Pearson*: o elevado número de vagens não se traduziu em maior produtividade, possivelmente pela limitação do PMG sob condições de maior temperatura, que pode comprometer o enchimento de grãos durante o período reprodutivo (Farias; Nepomuceno; Neumaier, 2007). A nota de plantio positiva (+1,5 em média) indica que as sementes foram realizadas na segunda metade da janela recomendada, ou seja, mais tardio.

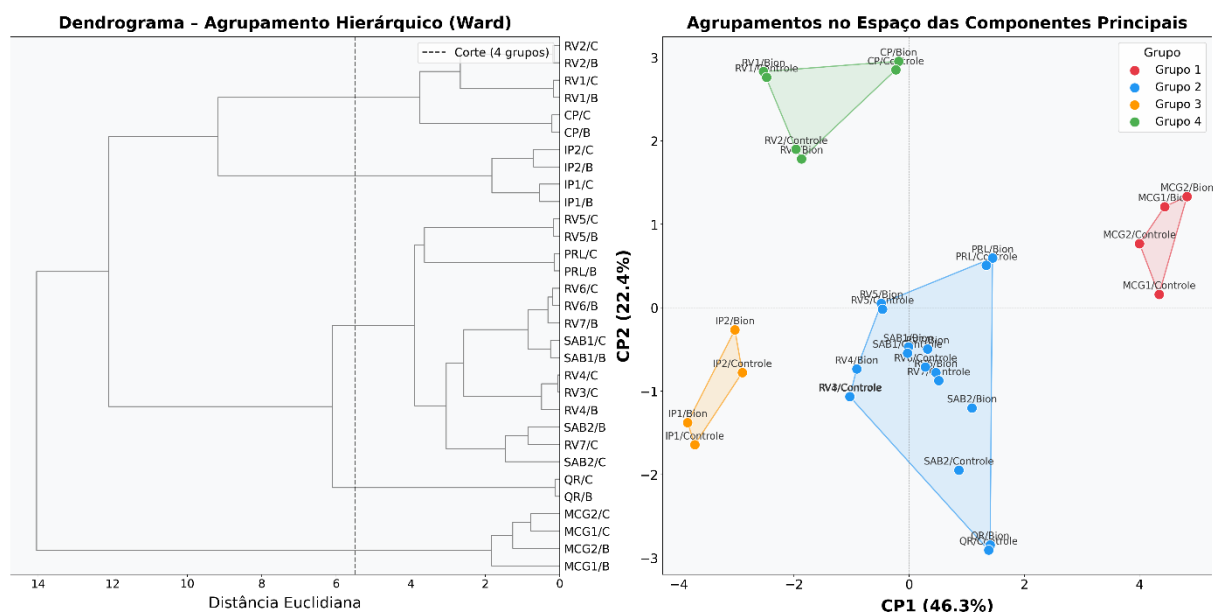


FIGURA 3 Dendrograma do agrupamento hierárquico pelo método de Ward (esquerda) e dispersão dos quatro grupos identificados no plano das duas primeiras componentes principais (direita), com indicação das envoltórias convexas de cada grupo.

O **Grupo 2** foi o mais heterogêneo e populoso, o que agrupa a maioria dos ambientes de Rio Verde (RV3 a RV7), Perolândia, Santo Antônio da Barra e Quirinópolis. Esses locais compartilham altitudes intermediárias (média de 710 m), precipitação próxima à média geral (1.250 mm) e menor temperatura acima do ótimo (102 dias). A produtividade média do grupo foi de 64,7 sc ha⁻¹, superior ao Grupo 1, com PMG médio de 142,9 g e número de vagens de 61,6 por planta. A heterogeneidade interna desse grupo reflete a amplitude de cultivares e condições de solo entre os locais, mas o denominador comum é a condição climática moderada, que favorece o equilíbrio entre os componentes de produção. Cultivares de ciclo mais longo (média de 129 dias) e nota de plantio positiva (+1,1) caracterizam esse grupo, em linha com a correlação positiva entre ciclo e número de vagens ($r = 0,426$; $p < 0,05$) observada na análise bivariada.

O **Grupo 3** reuniu os ambientes de Ipameri (IP1 e IP2, BION e Controle), localizados na maior altitude avaliada (média de 830 m) e com o menor número de dias com temperatura acima de 26 °C (95 dias), além do maior número de dias de veranico (24 dias). Apesar da alta altitude e do regime térmico mais ameno, esses ambientes apresentaram nota de plantio fortemente negativa (média de -1,5), o que indica sementeiras antecipadas em relação à janela recomendada. O PMG médio foi o segundo maior entre os grupos (169,8 g), enquanto a produtividade (62,8 sc ha⁻¹) ficou abaixo dos grupos 2 e 4. A combinação de sementeira precoce com maior número de dias de veranico pode ter imposto deficit hídrico em estádios críticos,

especialmente no florescimento e enchimento de grãos, o que penaliza a produtividade final (Mundstock; Thomas, 2005). A alta altitude desse grupo explica sua separação negativa no eixo CP1, o que confirma o papel do gradiente altitudinal como principal estruturador da variação entre os ambientes, conforme indicado pelo biplot.

O **Grupo 4** agrupou os ambientes de Rio Verde 1, Rio Verde 2 e Caiapônia (BION e Controle), que se destacaram por apresentar a **maior produtividade média** entre os grupos ($73,6 \text{ sc ha}^{-1}$) e o **maior PMG médio** ($177,9 \text{ g}$), porém o menor número de vagens por planta ($43,7$). Esse perfil é a expressão mais clara do mecanismo de compensação entre componentes de rendimento na soja: o menor número de estruturas reprodutivas foi compensado pelo elevado enchimento individual dos grãos, o que resulta em maior produtividade final. Esse grupo reuniu exclusivamente cultivares de alta exigência de fertilidade (nota 5) e ciclo mais curto (123 dias em média), dois fatores identificados na análise de correlação como associados a maior produtividade ($r = 0,514$; $p < 0,01$) e maior PMG ($r = -0,602$; $p < 0,01$ para ciclo). A nota de plantio média de $+2,0$ indica semeaduras realizadas preferencialmente no final da janela recomendada, condição que, conforme demonstrado pela correlação com PMG ($r = 0,360$; $p < 0,05$), favorece o enchimento de grãos nas condições do Cerrado goiano.

Em síntese, a análise multivariada evidenciou que a variação entre os ambientes avaliados é estruturada, primariamente, por um gradiente climático-altitudinal (CP1) que opõe locais de baixa altitude com maior calor e precipitação, favoráveis ao número de vagens, mas não necessariamente à produtividade final, a locais de maior altitude com regime térmico mais ameno. A CP2 revelou um segundo gradiente, de natureza genotípica e de manejo, que diferenciou ambientes pelo peso de grãos e adequação da data de semeadura. A integração dos resultados do agrupamento com as correlações de *Pearson* anteriormente descritas reforça que a maximização da produtividade da soja no Cerrado goiano depende de uma combinação específica de fatores: cultivares de alta exigência de fertilidade e ciclo adequado ao ambiente, semeadas dentro ou na segunda metade da janela recomendada, em ambientes com suporte nutricional adequado.

O tratamento com BION+Complex® não gerou separação consistente entre os grupos, o que indica que o efeito do indutor de resistência sobre os componentes de produção foi de menor magnitude do que os fatores ambientais e genotípicos avaliados, resultado que será aprofundado nas análises subsequentes.

4.3. Efeito do BION+Complex® sobre os Componentes de Produção da Soja e sua Interação com Condições Ambientais e Características das Cultivares

Com o objetivo de isolar e quantificar o efeito do BION+Complex® sobre a produção da soja, foram calculados índices de resposta diferencial para cada área experimental. Esses índices correspondem à diferença entre os valores observados nas parcelas tratadas com o produto e os das respectivas parcelas Controle: Δ Produtividade (sacas ha⁻¹), Δ Vagens (número de vagens por planta) e Δ PMG (g). Valores positivos indicam resposta favorável ao BION+Complex®; valores nulos ou negativos indicam ausência de efeito ou resposta desfavorável.

O BION+Complex® é um bioestimulante de origem exclusivamente biológica, obtido pela concentração e refinamento de extrato pirolenhoso, produto da condensação dos compostos voláteis liberados durante a pirólise controlada de biomassa vegetal. Sua composição caracteriza-se pela riqueza em ácidos orgânicos de cadeia curta (ácido acético, propiônico e butírico, predominantemente), compostos fenólicos de baixo peso molecular e karrikins em concentrações ultradiluídas. Esses compostos bioativos atuam por mecanismos indiretos sobre o sistema solo-planta: os ácidos orgânicos modulam o pH da rizosfera e estimulam populações microbianas benéficas; os fenóis participam de vias de sinalização hormonal vegetal; e as karrikins atuam como sinalizadores de desenvolvimento em concentrações da ordem de 10⁻⁹ a 10⁻¹² mol L⁻¹, o que estimula o crescimento radicular e a expressão de aquaporinas (Flematti et al., 2004; Nelson et al., 2012; Sivaram et al., 2022).

A variável número de aplicações refletiu três protocolos distintos de uso do BION+Complex® nas áreas avaliadas. **Uma aplicação** foi realizada exclusivamente durante o florescimento (R1-R2). **Duas aplicações** foram realizadas no início do estágio reprodutivo (R1) e no enchimento de vagens (R5-R6). **Três aplicações** foram distribuídas pelo estágio vegetativo (V4-V6), pelo florescimento (R1-R2) e pelo enchimento de grãos (R5-R6). A distinção entre esses protocolos é central para a interpretação dos resultados, pois os mecanismos de ação do BION+Complex® são temporalmente dependentes: as karrikins, por exemplo, exercem seus maiores efeitos sobre o desenvolvimento radicular quando absorvidas em estádios de crescimento ativo, como o vegetativo, ao passo que os ácidos orgânicos acumulam seus efeitos sobre a microbiota do solo de forma progressiva ao longo do ciclo (Flematti et al., 2004; Steiner et al., 2008).

4.3.1 O BION+Complex® teve efeito sobre os componentes de produção da soja?

A análise dos índices de resposta diferencial demonstra que o BION+Complex®, aplicado via foliar, exerceu **efeito positivo sobre a produtividade de grãos em todas as dezesseis áreas avaliadas**, com ganhos que variaram de +0,2 a +10,0 sc ha⁻¹ e média de +4,88 sc ha⁻¹. A universalidade do resultado positivo, sem nenhuma área com Δ Produtividade negativo em um conjunto que abrangeu sete municípios, sete cultivares distintas e três protocolos de aplicação foliar, é o primeiro e mais robusto indicador da eficácia do produto.

O mecanismo central que sustenta esse resultado reside na capacidade dos compostos bioativos do extrato pirolenhoso concentrado, ao serem absorvidos pela superfície foliar, de modular positivamente o metabolismo primário da planta: os ácidos orgânicos, ao alterarem o pH do apoplasto foliar, podem estimular a atividade das ATPases da membrana plasmática, o que favorece a expansão celular e a abertura estomática, com consequente aumento na taxa de assimilação de CO₂ e produção de fotoassimilados (Felle, 2001). Os compostos fenólicos absorvidos pelo tecido foliar, por sua vez, podem atuar como antioxidantes endógenos, o que protege o aparato fotossintético contra o estresse oxidativo e mantém a eficiência fotossintética mesmo sob condições adversas (SIDDIQUI et al., 2011). Um ganho médio de aproximadamente 5 sc ha⁻¹ representa um incremento relativo de cerca de 7,5% sobre a produtividade média das parcelas Controle, obtido exclusivamente por meio de pulverizações foliares sem qualquer adição de fertilizante ou fungicida, o que posiciona o BION+Complex® como alternativa bioestimulante de real potencial produtivo.

O índice de vagens (Δ Vagens) apresentou amplitude expressiva entre as áreas, com variação de -1,8 a +59,1 vagens por planta, com média de +11,58. Essa variabilidade indica que a resposta do número de vagens às aplicações foliares do BION+Complex® foi condicionada por fatores que modulam a receptividade fisiológica da planta ao produto, hipótese investigada nas análises subsequentes. O Δ PMG variou de -6,3 a +17,1 g, com média positiva de +3,33 g, o que indica tendência favorável ao enchimento de grãos nas parcelas tratadas. Nas áreas com Δ PMG negativo, o ganho em número de vagens ocorreu em detrimento do peso individual dos grãos, expressão do mecanismo clássico de compensação entre componentes de rendimento da soja: quando a aplicação foliar do bioestimulante favorece a fixação e retenção de maior número de vagens por planta, os fotoassimilados produzidos são distribuídos entre um número maior de drenos, o que pode reduzir o aporte individual a cada grão em enchimento (Board; Kahlon, 2011; Egli, 2017). Esse comportamento não representa

um efeito negativo do produto, mas reflete a plasticidade fisiológica da soja na alocação de recursos entre os componentes de rendimento em resposta à estimulação foliar.

TABELA 5 Índices de resposta diferencial para cada área experimental, obtidos pela diferença entre os valores observados nas parcelas tratadas com o produto e os das respectivas parcelas Controle (Δ Produtividade, Δ Vagens e Δ PMG).

Localização - Identificação	Cultivar	Δ Produtividade	Δ Vagens	Δ PMG
Rio Verde-GO - RV1	Guepardo	1,5	-1,85	0,00
Rio Verde-GO - RV2	Raptor	3,0	10,15	-6,30
Rio Verde-GO - RV3	MS-7601I2X	0,4	11,50	16,07
Rio Verde-GO - RV4	MS-7601I2X	4,0	22,25	17,10
Ipameri-GO - IP1	FOCO IPRO	6,6	1,50	2,00
Ipameri-GO - IP2	Tormenta	9,8	9,62	11,00
Caiapônia-GO - CP	Tormenta	0,2	7,05	7,00
Perolândia-GO - PRL	Olimpo	5,2	18,00	2,30
Rio Verde-GO - RV5	B72C22	2,6	2,75	0,00
Rio Verde-GO - RV6	Olimpo	4,3	20,85	-2,20
Rio Verde-GO - RV7	Olimpo	10,0	1,20	1,50
Montes Claros de Goiás-GO - MCG1	Olimpo	7,3	1,43	4,80
Montes Claros de Goiás-GO - MCG2	Olimpo	6,2	59,13	6,10
Santo Antônio da Barra-GO - SAB1	Olimpo	5,0	8,75	-1,40
Santo Antônio da Barra-GO - SAB2	Olimpo	5,8	5,45	-5,20
Quirinópolis-GO - QR	Olimpo	3,1	7,50	0,60
média geral		4,68	11,58	3,33

4.3.2 Correlação entre os índices de resposta ao BION+Complex® e as variáveis ambientais, genotípicas e de manejo

A análise de correlação de Pearson não identificou nenhuma correlação estatisticamente significativa ao nível de 5% entre os índices de resposta ao BION+Complex® foliar e as variáveis avaliadas (Tabela 6). Esse resultado, contudo, não equivale à ausência de padrões biologicamente relevantes. A análise dos coeficientes e dos valores de p revela tendências de interesse fisiológico e agrônomo, cuja ausência de significância é atribuída, em parte, ao tamanho amostral limitado ($n = 16$), insuficiente para detectar correlações de magnitude moderada com adequado poder estatístico. Optou-se por discutir as associações de maior magnitude e interpretabilidade fisiológica, com transparência sobre o nível de incerteza envolvido.

TABELA 6 Coeficientes de correlação de *Pearson* entre os índices de resposta diferencial ao BION+Complex® (Δ Produtividade, Δ Vagens e Δ PMG) e variáveis ambientais, genótípicas e de manejo avaliadas em lavouras de soja no estado de Goiás.

	Δ Produtividade	Δ Vagens	Δ PMG
Altitude (m)	-0,106	-0,284	0,314
Precipitação (mm)	-0,127	0,451	-0,070
Temperatura	-0,089	0,467	-0,078
Maturação	0,436	0,309	-0,085
Veranico	0,201	-0,417	0,074
Fertilidade	-0,150	-0,266	-0,021
Ciclo	0,312	0,369	0,107
Nota Plantio	0,029	0,140	-0,399
N. Aplicações	0,089	0,274	0,018

* Significativo a 5% ($p < 0,05$) pelo teste t. ** Significativo a 1% ($p < 0,01$). Δ = diferença entre o tratamento com BION+Complex® e o Controle. Temperatura = dias com temperatura máxima acima de 26 °C. Nota Plantio = índice de ajuste da semeadura à janela recomendada (-3 a +3) (Figura 1). N. Aplicações = número de aplicações do BION+Complex® realizadas na área.

Entre as variáveis genótípicas, o **grupo de maturação** apresentou a maior correlação com Δ Produtividade ($r = 0,436$; $p = 0,092$), o que indica tendência de maior ganho produtivo ao BION+Complex® foliar em cultivares de maturação mais tardia. Do ponto de vista fisiológico, cultivares de grupos de maturação mais tardios apresentam área foliar ativa por período mais longo e maior investimento em tecido fotossinteticamente ativo ao longo do ciclo reprodutivo. Isso implica maior superfície disponível para absorção dos compostos bioativos aplicados via foliar, especialmente as karrikins e os ácidos orgânicos, bem como janela temporal mais ampla para que esses compostos exerçam seus efeitos sobre o metabolismo fotossintético e a alocação de fotoassimilados para as vagens e grãos (Flematti et al., 2004). Adicionalmente, o período de enchimento de grãos mais longo em cultivares tardias oferece maior janela para que os compostos fenólicos absorvidos pela superfície foliar modulem as vias de sinalização hormonal que regulam a translocação de sacarose do mesófilo para o floema e, subsequentemente, para os grãos em desenvolvimento. O **ciclo** em dias reforçou essa tendência na mesma direção ($r = 0,312$; $p = 0,240$), o que corrobora a hipótese de que ciclos mais longos ampliam o tempo de ação dos compostos bioativos absorvidos foliamente.

Entre as variáveis ambientais, **temperatura** acima do ótimo fisiológico ($r = 0,467$; $p =$

0,068) e **precipitação** ($r = 0,451$; $p = 0,080$) apresentaram tendências positivas com $\Delta Vagens$. Sob a perspectiva da aplicação foliar, essas tendências têm interpretação fisiológica direta: em ambientes mais quentes e úmidos, a cutícula foliar tende a ser mais permeável e menos cerosa do que em ambientes de altitude elevada e temperatura amena, o que facilita a absorção cuticular dos compostos bioativos do BION+Complex® (Riederer; Schreiber, 2001). Além disso, maior temperatura e umidade relativa favorecem a abertura estomática, o que amplia a via de entrada dos compostos aplicados via foliar para o apoplasto e o simplasto do mesófilo foliar. As karrikinas absorvidas pelos estômatos abertos em condições de temperatura e umidade favoráveis podem interagir mais eficientemente com os receptores KAI2 presentes no tecido foliar, o que modula a expressão de genes envolvidos na fixação e retenção de flores e vagens (Nelson et al., 2012). Em sentido oposto, o **veranico** ($r = -0,417$; $p = 0,108$) apresentou tendência negativa com $\Delta Vagens$: sob déficit hídrico, os estômatos se fecham como mecanismo de defesa contra a perda de água, o que reduz simultaneamente a via estomática de absorção foliar dos compostos do BION+Complex® e, portanto, o que atenua o efeito do produto sobre a fixação de vagens. Esse mecanismo explica por que ambientes com maior número de dias de veranico tenderam a apresentar menor resposta em número de vagens às aplicações foliares do BION+Complex®. Ou seja, o BION+Complex® apresentará maior resposta em ambientes mais favoráveis.

A **nota de plantio** apresentou correlação negativa com ΔPMG ($r = -0,399$; $p = 0,126$), o que sugere que sementeiras realizadas antes ou no início da janela recomendada tenderam a apresentar maior ganho em peso de grãos com o BION+Complex® foliar. Uma interpretação fisiológica plausível é que, em sementeiras mais precoces, o enchimento de grãos ocorre em datas mais tardias do calendário, quando a temperatura começa a declinar no Cerrado. Nessa fase de granação sob temperaturas decrescentes, a aplicação foliar de ácidos orgânicos e karrikinas pode exercer papel relevante na manutenção da atividade fotossintética e na sustentação da taxa de translocação de sacarose para os grãos, em um momento em que o metabolismo da planta naturalmente desacelera em função da senescência foliar, efeito bioestimulante especialmente valorizado quando o potencial de enchimento ainda não foi completamente realizado (Flematti et al., 2004; Sivaram et al., 2022). A **fertilidade** apresentou tendência negativa com $\Delta Produtividade$ ($r = -0,150$) e $\Delta Vagens$ ($r = -0,266$), sem significância: cultivares de maior exigência nutricional, geralmente cultivadas em solos de alta fertilidade manejada, já operam próximas ao seu potencial fotossintético máximo, o que restringe o espaço para ganhos adicionais via estimulação foliar. O **número de aplicações foliares** não apresentou correlação significativa com nenhum índice ($p > 0,30$), o que indica que o efeito do produto não

é linearmente dose-dependente: o momento da pulverização em relação ao estágio fenológico da cultura e o estado fisiológico das folhas nesse momento determina a receptividade da planta ao bioestimulante foliar, mais do que a quantidade total de aplicações (SIDDIQUI et al., 2011).

4.3.3 Análise Multivariada: ACP e Agrupamento Hierárquico dos Índices de Resposta ao BION+Complex®

As análises de componentes principais (ACP) e de agrupamento hierárquico (Ward) foram empregadas para identificar padrões multidimensionais de interação entre os índices de resposta foliar ao BION+Complex® e o conjunto de variáveis ambientais e genótípicas, dado que as correlações bivariadas não revelaram associações individualmente significativas. As doze variáveis foram padronizadas antes da análise. As três primeiras componentes principais retiveram **76,3% da variância total** (CP1 = 44,5%; CP2 = 18,7%; CP3 = 13,2%) (Figura 4).

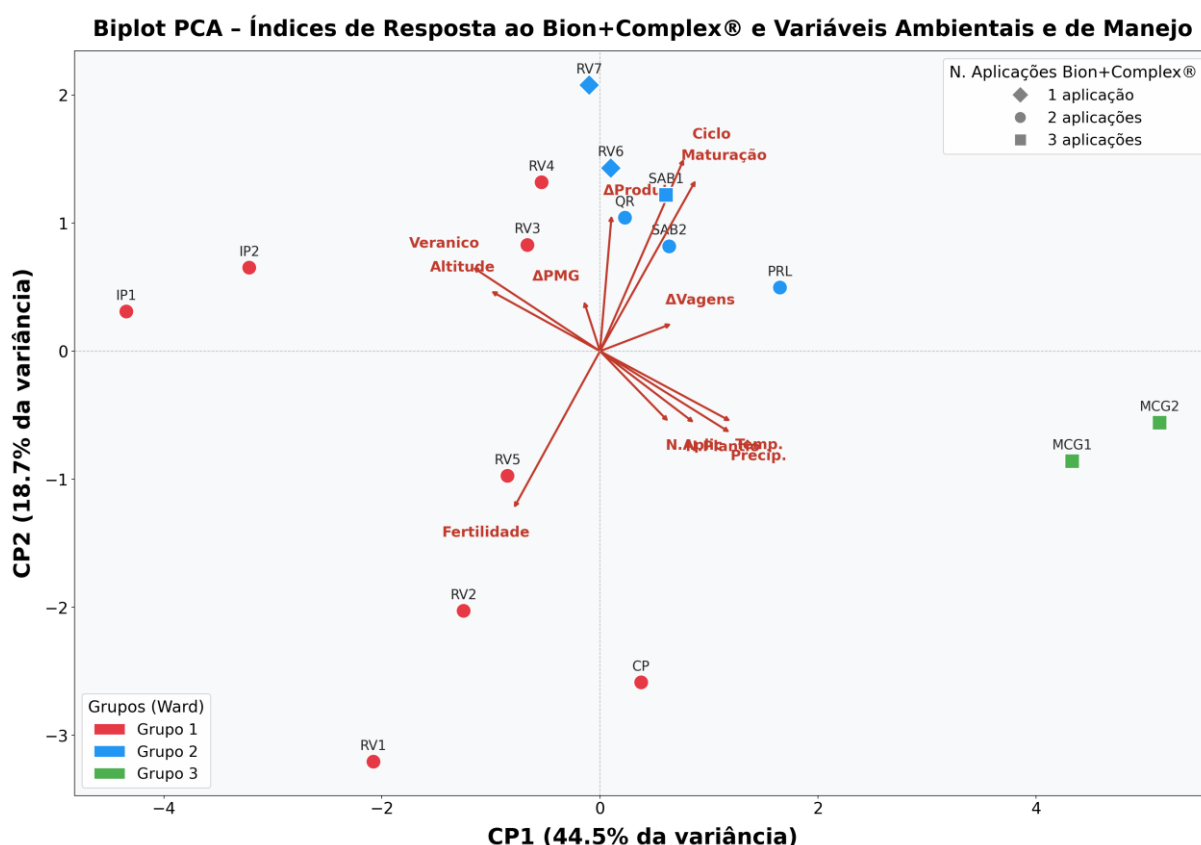


FIGURA 4 Biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) dos índices de resposta diferencial ao BION+Complex® foliar (Δ Produtividade, Δ Vagens e Δ PMG) e das variáveis ambientais, genótípicas e de manejo. O formato dos marcadores indica o número de aplicações foliares do produto (◇ = 1 aplicação; ● = 2 aplicações; ■ = 3 aplicações). As cores indicam os grupos formados pelo agrupamento hierárquico de Ward. CP1 = 44,5%; CP2 = 18,7% da variância total.

O biplot (Figura 4) evidencia dois gradientes ortogonais que estruturam a variação dos dados. A **CP1** reproduz o gradiente climático-altitudinal já descrito nas análises anteriores, temperatura (carga 0,404) e precipitação (0,401) em oposição a altitude (-0,337) e veranico (-0,393), o que separa ambientes de baixa altitude, mais quentes e úmidos (MCG1 e MCG2, à direita) dos ambientes de maior altitude e veranico (IP1 e IP2, à esquerda). Os vetores dos três índices de resposta ao BION+Complex® foliar, Δ Produtividade (carga 0,036), Δ Vagens (0,223) e Δ PMG (-0,051), apresentam baixa magnitude na CP1. Esse resultado confirma que o efeito fisiológico do BION+Complex® foliar sobre a produtividade não foi primariamente estruturado pelo gradiente climático-altitudinal, o que indica que o produto mantém consistência de resposta positiva ao longo de condições climáticas variadas, característica desejável para um bioestimulante foliar de uso regional. Contudo, o vetor de Δ Vagens, embora de baixa carga, aponta em direção ao quadrante de maior temperatura e precipitação, coerente com a hipótese de que a maior permeabilidade cuticular e a maior abertura estomática em ambientes quentes e úmidos potencializam a absorção foliar dos compostos bioativos do extrato pirolenhoso.

A **CP2** revelou o gradiente de maior relevância para a compreensão do efeito fisiológico diferencial do BION+Complex® entre as áreas. O vetor de **Δ Produtividade** (carga 0,358) alinha-se positivamente com **Maturação** (0,448) e **Ciclo** (0,505), e negativamente com **Fertilidade** (-0,412). Esse arranjo sintetiza, no plano visual do biplot, a interação entre as características fisiológicas das cultivares e a responsividade ao produto foliar: cultivares de maturação mais tardia e ciclo mais longo, com maior área foliar ativa ao longo do período reprodutivo, oferecem maior superfície de interceptação e absorção cuticular dos compostos do BION+Complex® e janela temporal mais ampla para que esses compostos exerçam seus efeitos sobre a atividade fotossintética, a sinalização hormonal e a translocação de fotoassimilados.

Em sentido oposto, cultivares de maior exigência de fertilidade, cultivadas em solos de alta fertilidade, já operam com metabolismo foliar mais próximo do potencial máximo, o que reduz o efeito marginal da estimulação via foliar. O vetor do número de aplicações (carga 0,197) aponta no mesmo hemisfério que os vetores de temperatura e precipitação na CP2, o que sugere que o aumento no número de pulverizações foliares tendeu a ser mais expressivo em ambientes com maior receptividade cuticular, embora essa tendência não seja significativa individualmente.

O padrão de distribuição dos marcadores segundo o número de aplicações foliares do BION+Complex® é particularmente informativo no biplot. Os marcadores com **uma única**

aplicação foliar ($\diamond$, RV6 e RV7, exclusivamente no florescimento) posicionam-se no quadrante de menor resposta em Δ Vagens, enquanto os marcadores de **três aplicações** ($\blacksquare$, MCG1, MCG2 e SAB1, com início no estágio vegetativo) distribuem-se em direção ao vetor de Δ Vagens. Esse padrão sugere que **o início precoce das pulverizações foliares, a partir do estágio vegetativo, potencializa a resposta em número de vagens**, possivelmente porque a exposição foliar aos compostos bioativos do extrato pirolenhoso antes do florescimento prepara o metabolismo da planta para um período reprodutivo mais eficiente: a estimulação foliar no vegetativo pode aumentar a atividade fotossintética e a produção de fotoassimilados disponíveis para a fixação de flores e vagens no período subsequente, além de pré-condicionar as vias de sinalização hormonal que regulam o aborto de estruturas reprodutivas (Flematti et al., 2004; Nelson et al., 2012).

O agrupamento hierárquico identificou **três grupos** com perfis distintos de resposta fisiológica ao BION+Complex® foliar (Figura 5).

O **Grupo 1** (RV1, RV2, RV3, RV4, IP1, IP2, CP e RV5, $n = 8$) foi constituído exclusivamente por áreas com **duas aplicações foliares** (início do reprodutivo + enchimento de vagens), em ambientes de altitude variada e maior diversidade de cultivares. A resposta média ao produto foi moderada e equilibrada: Δ Produtividade = $+3,5 \text{ sc ha}^{-1}$, Δ Vagens = $+8,0$ e Δ PMG = $+5,9 \text{ g}$, o único grupo com Δ PMG médio expressivamente positivo. Do ponto de vista fisiológico, o protocolo de duas aplicações nos estádios reprodutivos pode ter atuado de forma complementar sobre dois processos sequenciais: a aplicação em R1 estimulou a sinalização hormonal envolvida na fixação de flores e formação de vagens, enquanto a aplicação em R5-R6 favoreceu a translocação de sacarose e aminoácidos para os grãos em enchimento, o que resulta em maior PMG sem comprometer o número de vagens já fixadas. O ganho simultâneo em ambos os componentes, sem compensação negativa, é a expressão mais clara de um efeito bioestimulante foliar equilibrado sobre o metabolismo reprodutivo da soja. A inclusão de IP1 e IP2 (Ipameri, maior altitude e maior veranico) nesse grupo demonstra que, mesmo em ambientes com períodos de fechamento estomático mais frequentes, que poderiam limitar a absorção foliar, o protocolo de duas aplicações reprodutivas resultou em resposta positiva, o que indica que a via cuticular de absorção foi suficiente para garantir o efeito do produto nessas condições.

O **Grupo 2** (PRL, RV6, RV7, SAB1, SAB2 e QR, $n = 6$) apresentou a **maior resposta média em produtividade** ($+6,1 \text{ sc ha}^{-1}$) e foi o único com Δ PMG médio negativo ($-0,7 \text{ g}$), o que indica que o ganho produtivo foi sustentado principalmente pelo incremento em número de vagens ($+8,6$ em média). Esse grupo inclui as duas únicas áreas com apenas uma pulverização

foliar do BION+Complex® (RV6 e RV7, exclusivamente no florescimento, R1-R2), além de áreas com dois e três protocolos. A aplicação foliar exclusiva no florescimento, quando o produto é absorvido pelos tecidos florais e foliares jovens com alta taxa metabólica, pode ter atuado diretamente sobre os mecanismos de sinalização que regulam a abscisão de flores: os compostos fenólicos do extrato pirolenhoso, ao modularem a razão entre os ácidos salicílico e jasmônico na folha, podem interferir na produção local de etileno, o hormônio primariamente responsável pelo aborto de flores e vagens jovens, o que favorece a manutenção de maior número de estruturas reprodutivas por planta (SIDDIQUI et al., 2011). O Δ PMG negativo nesse grupo indica que, embora mais vagens tenham sido retidas, a capacidade de enchimento individual dos grãos foi limitada, o que expressa a compensação fisiológica entre número de drenos e aporte de fotoassimilados.

O **Grupo 3** (MCG1 e MCG2, $n = 2$) foi o grupo de **maior resposta em número de vagens** (Δ Vagens médio de +30,3) e produtividade diferencial expressiva (+6,8 sc ha⁻¹), com Δ PMG positivo (+2,4 g). Esses dois ambientes de Montes Claros de Goiás, menor altitude (326 m), maior precipitação (1.360 mm) e maior temperatura acima de 26 °C (115 dias), receberam **três aplicações foliares do BION+Complex®**, com a primeira realizada no estágio vegetativo. A resposta extraordinária em número de vagens nesse grupo é interpretada como o resultado de uma **interação sinérgica entre o protocolo de três pulverizações foliares com início precoce e as condições climáticas de baixa altitude, alta temperatura e maior umidade**. Do ponto de vista fisiológico, em ambientes mais quentes e úmidos a cutícula foliar é mais hidratada e menos resistente à penetração dos compostos do extrato pirolenhoso, o que favorece a absorção cuticular (Riederer; Schreiber, 2001).

Simultaneamente, a maior abertura estomática característica desses ambientes amplifica a via estomática de absorção foliar. A aplicação no estágio vegetativo, nessas condições de alta absorção foliar, pode ter resultado em maior acúmulo intracelular das karrikinas do extrato, que ao interagirem com os receptores KAI2 nos tecidos foliares modulam a expressão de genes relacionados ao crescimento celular e à divisão de células nos primórdios reprodutivos (Nelson et al., 2012). Esse condicionamento fisiológico precoce das folhas pode ter aumentado a eficiência fotossintética e a produção de fotoassimilados disponíveis para o florescimento subsequente, o que resulta na maior taxa de fixação e retenção de vagens observada nesse grupo. O fato de que Δ PMG também foi positivo indica que, nesse caso, a maior produção de fotoassimilados estimulada pelo produto foi suficiente para sustentar tanto maior número de vagens quanto maior enchimento individual de grãos, o que supera o mecanismo de compensação e demonstra o potencial máximo da estimulação foliar com o BION+Complex®

quando protocolo e ambiente são favoráveis.

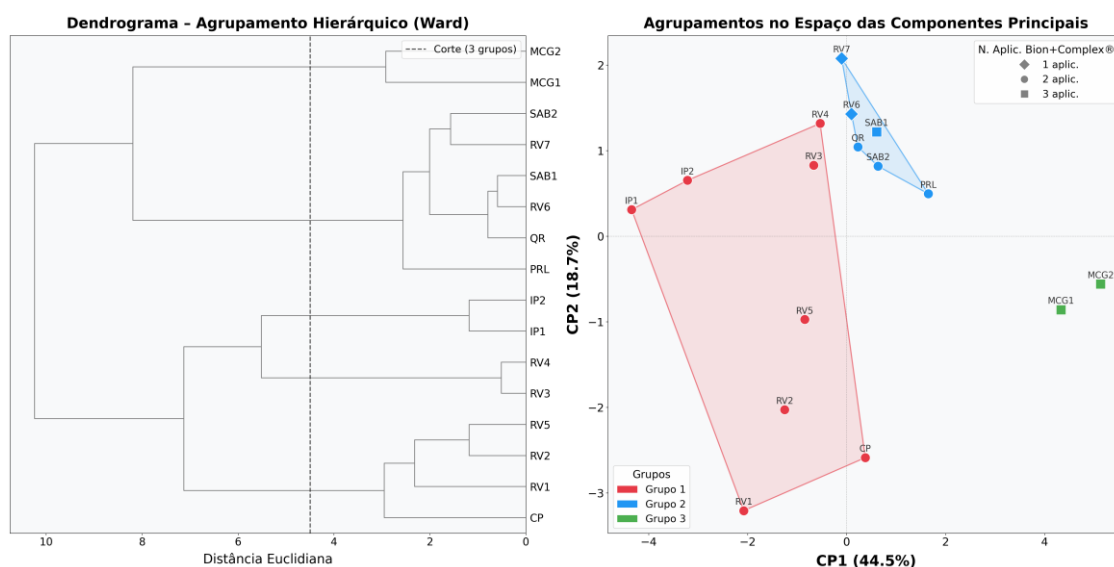


FIGURA 5 Dendrograma do agrupamento hierárquico pelo método de Ward (esquerda) e dispersão dos três grupos identificados no plano das duas primeiras componentes principais (direita), com envoltórias convexas. O formato dos marcadores indica o número de aplicações foliares do BION+Complex® (◇ = 1; ● = 2; ■ = 3 aplicações).

4.3.4 Síntese: o BION+Complex® foliar teve efeito e em quais condições esse efeito foi maximizado?

A integração dos resultados das análises de correlação, de componentes principais e de agrupamento hierárquico permite responder de forma objetiva e mecanisticamente fundamentada às questões centrais investigadas nesta seção.

Sobre o efeito do BION+Complex® foliar, o produto exerceu efeito positivo e consistente sobre a produtividade de grãos em todas as dezesseis áreas avaliadas (+4,88 sc ha⁻¹ em média; amplitude de +0,2 a +10,0 sc ha⁻¹), sem nenhum resultado negativo. A eficácia é sustentada pelos mecanismos fisiológicos diretos dos compostos bioativos do extrato pirolenhoso concentrado sobre o tecido foliar: modulação do pH apoplástico e da condutância estomática pelos ácidos orgânicos, regulação da sinalização hormonal pelos compostos fenólicos e modulação da expressão gênica fotossintética e reprodutiva pelas karrikins, todos absorvidos diretamente pela superfície foliar e translocados para os tecidos-alvo.

Sobre a interação com as condições ambientais: o efeito do BION+Complex® foliar sobre a produtividade foi consistente ao longo do gradiente climático-altitudinal avaliado, sem correlação significativa com altitude, temperatura ou precipitação isoladamente. Contudo, a tendência de maior resposta em número de vagens em ambientes mais quentes e úmidos (temperatura: $r = 0,467$, $p = 0,068$; precipitação: $r = 0,451$, $p = 0,080$) é interpretada pelo maior aproveitamento das rotas de absorção foliar, cuticular e estomática, nessas condições. A tendência negativa com veranico ($r = -0,417$, $p = 0,108$) é coerente com a redução da absorção foliar pelo fechamento estomático sob déficit hídrico. Esses padrões apontam para uma **interação entre condições climáticas e eficiência de absorção foliar do produto**, que merece investigação experimental com maior número de áreas. Ou seja, a aplicação dele como indutor de resistência tem que ocorrer antes do estresse para permitir o processo de absorção e ativação dos processos.

Sobre a interação com as características das cultivares a tendência de maior resposta produtiva em cultivares de grupo de maturação mais tardio ($r = 0,436$; $p = 0,092$) é interpretada pela maior superfície foliar ativa e pelo período reprodutivo mais longo que essas cultivares oferecem, o que amplia a janela temporal e a superfície disponível para a absorção cuticular dos compostos bioativos e para a expressão dos seus efeitos fisiológicos sobre a fotossíntese, a sinalização hormonal reprodutiva e a translocação de fotoassimilados para os grãos.

Sobre o protocolo de aplicação foliar, os resultados sugerem uma hierarquia clara. O protocolo de **três pulverizações foliares com início no estágio vegetativo** demonstrou o maior potencial de resposta em número de vagens, especialmente em ambientes de alta temperatura e precipitação, condições que maximizam a absorção foliar do produto. O condicionamento fisiológico precoce da planta, via estimulação foliar no vegetativo, aumenta a produção de fotoassimilados e pré-ativa as vias de sinalização que regulam a fixação reprodutiva antes do florescimento. O protocolo de **duas aplicações nos estádios reprodutivos** demonstrou a maior estabilidade de resposta entre ambientes, com ganhos equilibrados em vagens e PMG, o que representa a alternativa de melhor custo-benefício e maior robustez em condições diversas. A **aplicação única no florescimento** resultou na menor resposta diferencial, embora ainda positiva, possivelmente porque a estimulação foliar nesse único momento atua apenas sobre o mecanismo de fixação de flores, sem o benefício do pré-condicionamento vegetativo nem do suporte ao enchimento de grãos. O fato de o número de aplicações não ser significativo confirma que o **momento da pulverização foliar**, e a receptividade fisiológica da planta nesse momento, é determinante do efeito do BION+Complex®, mais do que a quantidade acumulada de produto aplicado.

4.3.5 Confirmação Estatística do Efeito: Teste Pareado, Regressão Múltipla e Modelo Misto

As análises anteriores demonstraram, de forma descritiva, ganhos consistentes de produtividade, número de vagens e peso de mil grãos nas parcelas tratadas com BION+Complex®. Contudo, como cada área comercial constitui um par Testemunha e BION+Complex® (delineamento pareado), a robustez estatística dessas diferenças foi formalmente avaliada por meio de três abordagens complementares: (i) teste pareado (t de Student ou Wilcoxon), (ii) regressão múltipla stepwise para identificar os determinantes ambientais e genotípicos da resposta ao produto, e (iii) modelo linear misto, que incorpora a estrutura de agrupamento por cultivar e evita a pseudorreplicação inerente à comparação de médias simples.

Teste pareado

Para cada variável de produção, a normalidade das diferenças pareadas (BION+Complex® – Controle) foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, o que define a escolha entre o teste t pareado (dados normais) e o teste de Wilcoxon (Tabela 7). A Produtividade apresentou diferenças normalmente distribuídas ($W = 0,965$; $p = 0,760$) e diferença média de $+4,69 \text{ sc ha}^{-1}$ ($DP = 2,92$), estatisticamente significativa pelo teste t pareado ($t = 6,43$; $gl = 15$; $p < 0,0001$), com tamanho de efeito grande (d de Cohen = $1,61$). O Número de Vagens não atendeu ao pressuposto de normalidade (Shapiro-Wilk $p = 0,0003$), de modo que o teste de Wilcoxon foi o mais adequado, o que confirma diferença altamente significativa ($p = 0,0002$) e reforça a robustez do ganho médio de $+11,58 \text{ vagens planta}^{-1}$. Já o PMG, embora tenha exibido diferenças normalmente distribuídas ($p = 0,221$), não atingiu significância estatística ao nível de 5% ($t = 1,97$; $p = 0,068$; Wilcoxon $p = 0,084$), permanece apenas como tendência positiva, resultado coerente com o mecanismo de compensação entre número de vagens e peso de grão já discutido na seção 4.3.1.

TABELA 7 Resultados do teste pareado (BION+Complex® vs. Controle) para os componentes de produção da soja, com verificação de normalidade das diferenças (Shapiro-Wilk) e tamanho de efeito (d de Cohen).

Variável	Diferença média $\pm$ DP	Shapiro-Wilk (p)	Teste utilizado	Estatística	p-valor	d de Cohen
Produtividade (sc ha^{-1})	$4,69 \pm 2,92$	0,760	t pareado	$t = 6,43$	$< 0,0001$	1,61
NV (vagens planta^{-1})	$11,58 \pm 14,52$	0,0003	Wilcoxon	$W = 4,00$	0,0002	0,80*
PMG (g)	$3,34 \pm 6,77$	0,221	t pareado	$t = 1,97$	0,068	0,49

*Para o NV, o d de Cohen é apresentado como referência complementar ao teste de Wilcoxon, recomendado pela ausência de normalidade das diferenças.

Regressão múltipla stepwise (seleção por AIC)

Para identificar quais variáveis ambientais, genóticas e de manejo, em conjunto, melhor explicam a magnitude da resposta ao BION+Complex®, foram ajustados modelos de regressão linear múltipla por seleção stepwise (forward), com o Critério de Informação de Akaike (AIC) como critério de parada, com altitude, precipitação, número de dias com temperatura máxima acima de 26 °C, dias de veranico, grupo de maturação, exigência de fertilidade, ciclo e nota de plantio como preditores candidatos (Tabela 8).

Para Δ Produtividade, o modelo selecionado reteve três preditores, grupo de maturação, dias de veranico e precipitação acumulada, o que explica 53,7% da variância (R^2 ajustado = 0,421) de forma estatisticamente significativa ($F = 4,64$; $p = 0,022$). Os coeficientes indicam que cultivares de ciclo mais longo (maturação, $\beta = 3,73$; $p = 0,038$), ambientes com maior número de dias de veranico ($\beta = 5,49$; $p = 0,017$) e maior precipitação acumulada ($\beta = 0,20$; $p = 0,029$) associam-se a ganhos diferenciais maiores de produtividade, o que corrobora a hipótese, já discutida na seção 4.3.3, de que o produto atua como atenuador de estresse hídrico e térmico e é potencializado por maior janela de absorção foliar em ciclos mais longos. É importante ressaltar que o número elevado de condição da matriz (Cond. No. $\approx 3,17 \times 10^5$) sinaliza colinearidade entre os preditores (esperada, dado que altitude, precipitação e veranico covariam geograficamente), de modo que os coeficientes individuais devem ser interpretados com cautela, o modelo é mais robusto como preditor conjunto do que na atribuição causal isolada a cada variável.

Para Δ Vagens, o modelo reteve apenas o número de dias com temperatura acima de 26 °C, o que explica 22,7% da variância, com significância marginal ($F = 4,10$; $p = 0,062$), resultado consistente com a correlação simples já relatada na seção 4.3.2 ($r = 0,467$; $p = 0,068$), que também não atingiu o limiar de 5%.

Para Δ PMG, nenhum modelo com poder explicativo relevante foi identificado (melhor modelo: apenas altitude, $R^2 = 0,037$; $p = 0,476$), o que reforça que a resposta do peso de grãos ao produto é pouco previsível a partir das variáveis ambientais e genóticas disponíveis, provavelmente por depender mais fortemente da dinâmica local de compensação entre vagens e grãos do que de fatores climáticos regionais.

TABELA 8 Modelos de regressão múltipla stepwise (seleção por AIC) para os índices de resposta diferencial ao BION+Complex® (Δ Produtividade, Δ Vagens e Δ PMG).

Variável resposta	Preditores selecionados	R ²	R ² ajustado	F	p do modelo
Δ Produtividade	Maturação + Veranico + Precipitação	0,537	0,421	4,64	0,022*
Δ Vagens (NV)	Dias > 26 °C	0,227	0,171	4,10	0,062
Δ PMG	Altitude	0,037	-0,032	0,54	0,476

*Significativo a 5%.

Modelo linear misto (efeito aleatório de cultivar)

Como oito das dezesseis áreas avaliadas compartilham a mesma cultivar (Olimpo, presente em 7 dos 16 pares), a comparação de médias por teste pareado pode subestimar a incerteza real associada ao efeito do tratamento, uma vez que observações da mesma cultivar não são estatisticamente independentes (pseudorreplificação). Para corrigir esse viés, ajustou-se um modelo linear misto (LMM) para cada variável de produção, com o tratamento (BION+Complex® vs. Controle) como efeito fixo e a cultivar como efeito aleatório sobre o intercepto, estimado por máxima verossimilhança restrita (REML) (Tabela 9).

Para Produtividade, o efeito do BION+Complex® permaneceu altamente significativo mesmo após o controle pela estrutura de cultivares ($\beta = 4,69$ sc ha⁻¹; EP = 1,59; p = 0,003), com 62,3% da variância total atribuível a diferenças entre cultivares (ICC = 0,623), o que confirma que o ganho de produtividade é um efeito robusto do produto, e não um artefato da distribuição desbalanceada de cultivares entre as áreas. Já para o Número de Vagens, o efeito do tratamento perdeu significância estatística no modelo misto ($\beta = 11,58$; EP = 7,19; p = 0,107), apesar de o teste de Wilcoxon pareado ter indicado forte significância (p = 0,0002). Essa discrepância ocorre porque a cultivar Olimpo, que concentra a maior parte das observações e também os maiores ganhos absolutos em vagens (inclusive o valor atípico de +59,13 vagens em MCG2), infla artificialmente a significância quando as 16 áreas são tratadas como réplicas independentes; ao reconhecer que essas observações compartilham a mesma origem genotípica, a incerteza associada à estimativa aumenta. Para o PMG, o modelo misto confirmou a ausência de efeito significativo do tratamento ($\beta = 3,34$; p = 0,537), com a maior parte da variância (58,4%) atribuível novamente à cultivar.

Em conjunto, o modelo misto qualifica de forma mais criteriosa as conclusões descritivas e do teste pareado simples: o ganho de produtividade do BION+Complex® é o resultado mais robusto e generalizável do estudo, e se mantém mesmo sob controle estatístico da variabilidade genotípica; o efeito sobre o número de vagens, embora positivo e consistente na maioria das áreas, deve ser interpretado com cautela quanto à sua generalização para

cultivares distintas de Olimpo, e é recomendável a ampliação do número de cultivares avaliadas em pesquisas futuras para separar de forma mais clara o efeito do produto do efeito genotípico.

TABELA 9 Modelo linear misto (efeito fixo: tratamento; efeito aleatório: cultivar) para os componentes de produção da soja, com decomposição da variância entre cultivares e residual.

Variável resposta	Efeito BION+Complex® ($\beta \pm$ EP)	p	Variância cultivar	Variância residual	ICC
Produtividade	4,69 $\pm$ 1,59	0,003*	33,62	20,32	0,623
NV	11,58 $\pm$ 7,19	0,107	86,09	413,88	0,172
PMG	3,34 $\pm$ 5,41	0,537	328,09	233,69	0,584

*Significativo a 5%. ICC = coeficiente de correlação intraclasse (proporção da variância total atribuível à cultivar).

4.4 Registro Fotográfico Comparativo entre Tratamentos

A fim de complementar, com evidências visuais de campo, as diferenças fenotípicas discutidas nas seções anteriores, apresentam-se a seguir registros fotográficos comparativos entre plantas das parcelas Testemunha (Controle) e BION+Complex®, coletadas em pontos amostrais das áreas experimentais.

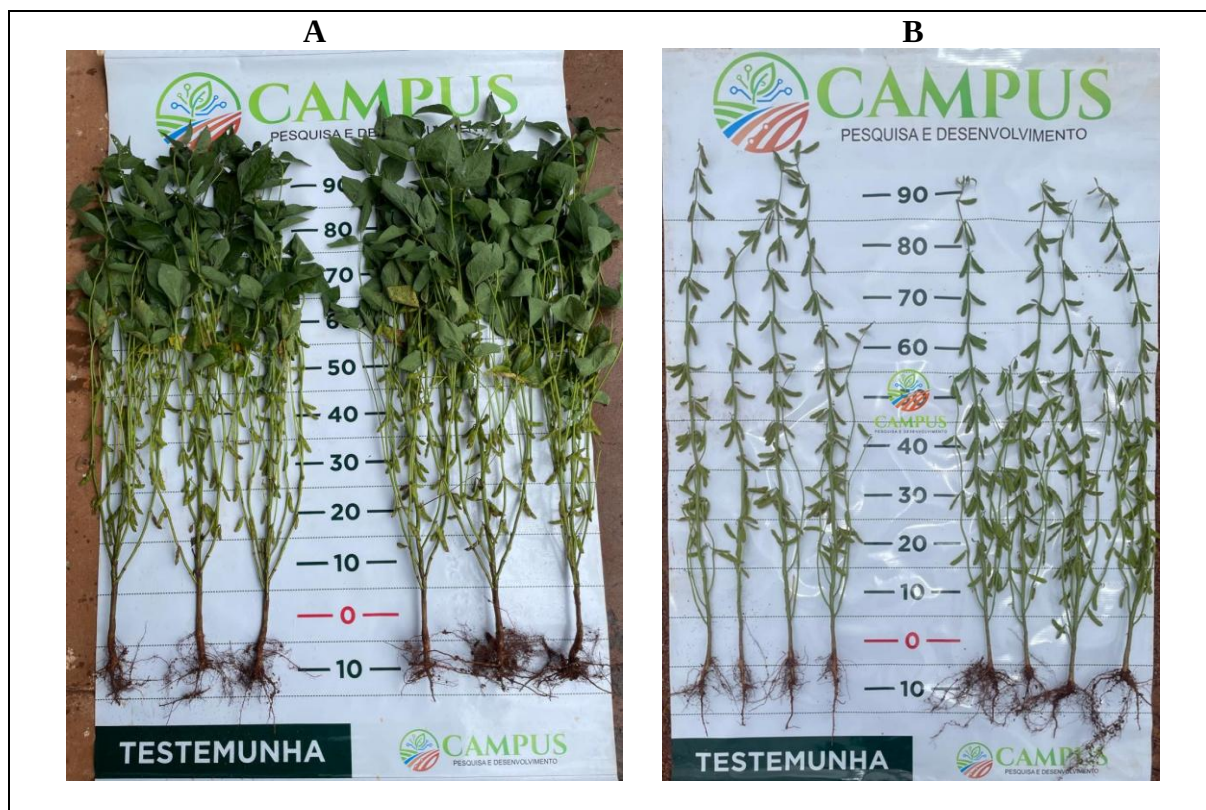


FIGURA 6 Sistema radicular de plantas de soja das parcelas Testemunha e BION+Complex®, o que evidencia maior comprimento e volume radicular nas plantas tratadas; as plantas posicionadas à esquerda em A e B correspondem ao tratamento (controle), e a direita Tratamento BION+Complex®.



FIGURA 7 Comparativo entre plantas de parcelas Testemunha (esquerda de cada par) e áreas sob aplicação do BION+Complex® (direita), o que ilustra maior número de vagens por planta e maior uniformidade nos pontos amostrais A, B, C e D.

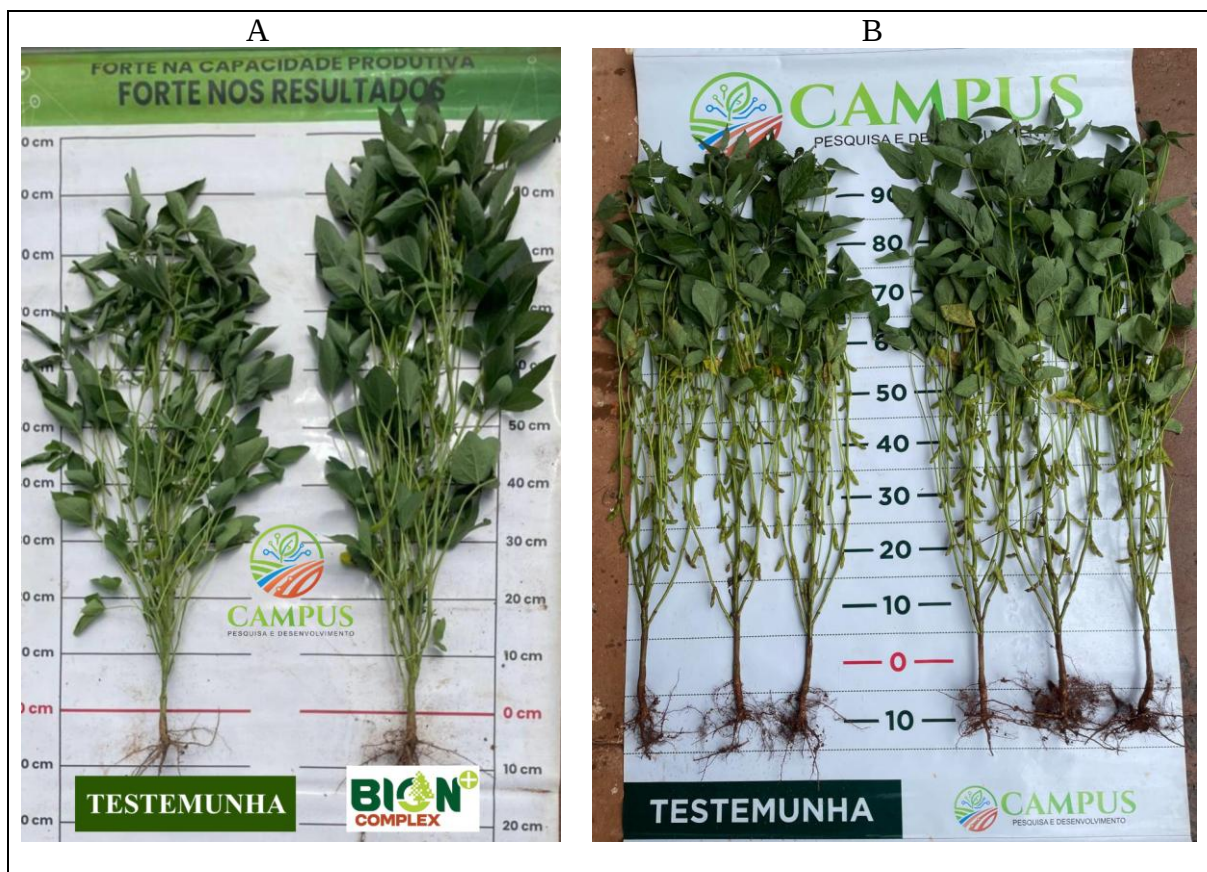


FIGURA 8 Comparativo entre plantas de parcelas Testemunha (esquerda de cada par) e áreas sob aplicação do BION+Complex® (direita) nos pontos amostrais A e B, o que evidencia maior área foliar e maior densidade de folhas nas plantas tratadas.

Em conjunto, os registros fotográficos corroboram, em nível visual, os resultados quantitativos apresentados nas seções 4.1 a 4.3, o que reforça a consistência do efeito do BION+Complex® sobre a fixação de vagens, a uniformidade do estande e a expansão da área foliar da cultura da soja.

4.5 Considerações finais

O presente estudo teve como objetivo avaliar, em condições reais de lavoura comercial no Cerrado goiano, o efeito do bioativador BION+Complex® sobre os componentes de produção da cultura da soja, o que contempla dezesseis áreas pareadas distribuídas em sete municípios, oito cultivares e três protocolos distintos de aplicação foliar. A combinação de análises descritivas, correlação de Pearson, análise multivariada (ACP e agrupamento hierárquico) e, complementarmente, de testes pareados, regressão múltipla stepwise e modelo linear misto, permitiu não apenas descrever, mas confirmar estatisticamente a magnitude e a robustez do efeito do produto.

Os resultados demonstram, de forma estatisticamente robusta, que o BION+Complex® promoveu incremento significativo da produtividade de grãos ($+4,69 \text{ sc ha}^{-1}$ em média; $p < 0,0001$), efeito que se manteve altamente significativo mesmo após controle da variabilidade genotípica pelo modelo linear misto ($p = 0,003$), o que configura o achado mais consistente e generalizável do estudo. O número de vagens por planta também respondeu positivamente ao produto ($+11,58 \text{ vagens planta}^{-1}$; $p = 0,0002$ pelo teste de Wilcoxon), porém essa significância não se sustentou integralmente quando a estrutura de cultivares foi contabilizada no modelo misto ($p = 0,107$), o que sinaliza que parte da resposta em número de vagens está condicionada à cultivar predominante nas áreas avaliadas (Olimpo) e reforça a necessidade de validações futuras com maior balanceamento de genótipos. O peso de mil grãos, por sua vez, não apresentou resposta estatisticamente significativa ao tratamento em nenhuma das abordagens ($p > 0,05$), o que é compatível com o mecanismo de compensação fisiológica entre número de vagens e peso individual de grãos amplamente descrito na cultura da soja.

A modelagem por regressão múltipla revelou que a resposta diferencial de produtividade ao BION+Complex® é maior em ambientes com maior número de dias de veranico e maior precipitação acumulada, e em cultivares de grupo de maturação mais tardio, o que sugere que o produto atua preferencialmente como mitigador de estresse hídrico e térmico e é potencializado por ciclos mais longos, que ampliam a janela de absorção foliar dos compostos bioativos. Esse modelo, embora estatisticamente significativo (R^2 ajustado = 0,421; $p = 0,022$), deve ser interpretado como exploratório dado o tamanho amostral reduzido ($n = 16$) e a colinearidade natural entre variáveis geoclimáticas, e não deve ser extrapolado como equação preditiva definitiva sem validação em conjuntos de dados independentes e de maior amplitude.

Do ponto de vista agrônomo, os resultados reforçam o potencial do extrato pirolenhoso como alternativa bioestimulante de baixo custo e fácil adoção, aplicável via pulverização foliar sem necessidade de infraestrutura adicional, o que contribui para sistemas de produção mais sustentáveis e menos dependentes de insumos sintéticos. O protocolo de três aplicações, com início no estágio vegetativo, mostrou-se associado à maior resposta em número de vagens, o que sugere que o condicionamento fisiológico precoce da planta amplia os benefícios do produto, especialmente em ambientes de maior disponibilidade hídrica e térmica.

Como limitações do estudo, destacam-se: (i) o número relativamente reduzido de áreas experimentais ($n = 16$), inerente à natureza do desenvolvimento técnico de mercado em lavouras comerciais; (ii) o desbalanceamento na representação de cultivares, com forte concentração na cultivar Olimpo; e (iii) a ausência de repetições verdadeiras dentro de cada área, o que impede

a estimativa do erro experimental no nível de parcela. Recomenda-se que estudos futuros ampliem o número de áreas e cultivares avaliadas, de modo a permitir estimativas ainda mais robustas do efeito do BION+Complex® sobre os diferentes componentes de produção da soja.

5. CONCLUSÕES

Em síntese, conclui-se que o BION+Complex® exerceu efeito positivo e estatisticamente comprovado sobre a produtividade de grãos de soja nas condições avaliadas, com evidências consistentes, ainda que mais condicionadas ao contexto genotípico e ambiental, de incremento no número de vagens por planta. O produto se apresenta, portanto, como uma ferramenta tecnológica promissora para a sojicultura do Cerrado goiano, e sua recomendação técnica deve considerar as condições ambientais e o perfil genotípico da cultivar como moduladores da magnitude da resposta.

6. REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, J. L.; BAENA, J.; MARTÍN, M. T.; NOZAL, L.; GONZÁLEZ, S.; MANJÓN, J. L.; PEINADO, M. Composition, Ageing and Herbicidal Properties of Wood Vinegar Obtained through Fast Biomass Pyrolysis. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 10, p. 2418, 2020. DOI: 10.3390/en13102418.
- AKLEY, E. K. et al. Wood Vinegar Promotes Soil Health and the Productivity of Cowpea. **Agronomy**, [s. l.], v. 13, n. 10, p. 2497, 2023. DOI: 10.3390/agronomy13102497.
- AMNAN, M. A. M.; TEO, A. F. W.; AIZAT, M. W.; KHAIDIZAR, D. F.; TAN, C. B. Foliar Application of Oil Palm Wood Vinegar Enhances Pandanus amaryllifolius Tolerance under Drought Stress. **Plants**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 785, 2023. DOI: 10.3390/plants12040785.
- AVELLAN, A.; YUN, J.; MORAIS, B. P.; CLEMENT, E. T.; RODRIGUES, S. M.; LOWRY, G. V. Critical Review: Role of Inorganic Nanoparticle Properties on Their Foliar Uptake and in Planta Translocation. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 55, n. 20, p. 13417–13431, 2021. DOI: 10.1021/acs.est.1c00178.
- BOARD, J.; KAHOLON, C. Soybean Yield Formation: What Controls It and How It Can Be Improved. *Em: Soybean Physiology and Biochemistry*. [s.l: s.n.]. DOI: 10.5772/17596.
- BRITO-LOPEZ, C.; VAN DER WIELEN, N.; BARBOSA, M.; KARLOVA, R. Plant growth-promoting microbes and microalgae-based biostimulants: sustainable strategy for agriculture and abiotic stress resilience. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, [s. l.], v. 380, n. 1927, p. 20240251, 2025. DOI: 10.1098/rstb.2024.0251.
- CARRIL, P.; BIANCHI, E.; CICCHI, C.; COPPI, A.; DAINELLI, M.; GONNELLI, C.; LOPPI, S.; PAZZAGLI, L.; COLZI, I. Effects of Wood Distillate (Pyroligneous Acid) on the Yield Parameters and Mineral Composition of Three Leguminous Crops. **Environments**, [s. l.], v. 10, n. 7, p. 126, 2023. DOI: 10.3390/environments10070126.
- CHOI, D.-H.; BAN, H.-Y.; SEO, B.-S.; LEE, K.-J.; LEE, B.-W. Phenology and Seed Yield Performance of Determinate Soybean Cultivars Grown at Elevated Temperatures in a Temperate Region. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. e0165977, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0165977.
- DESIDERI, S.; GRIFONI, L.; FEDELI, R.; LOPPI, S. One Step Forward in Understanding the Mechanism of Action of Wood Vinegar: Gas Exchange Analysis Reveals New Information. **Plants**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 262, 2026. DOI: 10.3390/plants15020262.
- DI SARIO, L.; BOERI, P.; MATUS, J. T.; PIZZIO, G. A. Plant Biostimulants to Enhance Abiotic Stress Resilience in Crops. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 1129, 2025. DOI: 10.3390/ijms26031129.
- EGLI, D. B. Yield components - regulation by the seed. *Em: Seed biology and yield of grain crops*. CABI Books[s.l: s.n.]. p. 77–118. DOI: 10.1079/9781780647708.0077.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina-PR, Embrapa Soja, 2007. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/470308>. Acesso em: 29 jun. 2026.

FEDELI, R.; VANNINI, A.; CELLETTI, S.; MARESCA, V.; MUNZI, S.; CRUZ, C.; ALEXANDROV, D.; GUARNIERI, M.; LOPPI, S. Foliar application of wood distillate boosts plant yield and nutritional parameters of chickpea. **Annals of Applied Biology**, [s. l.], v. 182, n. 1, p. 57–64, 2022. a. DOI: 10.1111/aab.12794.

FEDELI, R.; VANNINI, A.; GUARNIERI, M.; MONACI, F.; LOPPI, S. Bio-Based Solutions for Agriculture: Foliar Application of Wood Distillate Alone and in Combination with Other Plant-Derived Corroborants Results in Different Effects on Lettuce (*Lactuca Sativa* L.). **Biology**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 404, 2022. b. DOI: 10.3390/biology11030404.

FELLE, H. H. pH: Signal and Messenger in Plant Cells. **Plant Biology**, [s. l.], v. 3, n. 6, p. 577–591, 2001. DOI: 10.1055/s-2001-19372.

FLEMATTI, G. R.; GHISALBERTI, E. L.; DIXON, K. W.; TRENGOVE, R. D. A compound from smoke that promotes seed germination. **Science**, New York, N.Y., v. 305, n. 5686, p. 977, 2004. DOI: 10.1126/science.1099944.

GARCIA, A.; PÍPOLO, A. E.; LOPES, I. de O. N.; PORTUGAL, F. a. F. **Instalação da lavoura de soja: época, cultivares, espaçamento e população de plantas**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/470313>. Acesso em: 29 jun. 2026.

GOMES, J. C. C.; AQUINI, D.; GOMES, F. R. C.; JUNIOR, W. S. Da difusão de tecnologia ao desenvolvimento sustentável: trajetória da transferência de tecnologia na Embrapa clima temperado. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília-DF, v. 28, n. 1, p. 159–188, 2011.

HAMID, B. et al. Bacterial Plant Biostimulants: A Sustainable Way towards Improving Growth, Productivity, and Health of Crops. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 2856, 2021. DOI: 10.3390/su13052856.

HERNANDEZ, A. G.; SILVA, E. P.; FERREIRA, P. A. A.; LOVATO, P. M.; OLIVEIRA, G. P.; SOARES, C. R. R. S. Inoculation methods and agronomic efficiency of *Azospirillum brasilense* Strain Az39 for corn crop under different brazilian edaphoclimatic conditions. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, 2024. DOI: 10.5039/agraria.v19i1a3609.

HU, P.; AN, J.; FAULKNER, M. M.; WU, H.; LI, Z.; TIAN, X.; GIRALDO, J. P. Nanoparticle Charge and Size Control Foliar Delivery Efficiency to Plant Cells and Organelles | **ACS Nano**. [s. l.], 2020. DOI: 10.1021/acsnano.9b09178.

IACOMINO, G.; IDBELLA, M.; STAROPOLI, A.; NANNI, B.; BERTOLI, T.; VINALE, F.; BONANOMI, G. Exploring the Potential of Wood Vinegar: Chemical Composition and Biological Effects on Crops and Pests. **Agronomy**, [s. l.], 2024. DOI: 10.3390/agronomy14010114.

JINDO, K.; GORON, T. L.; KUREBITO, S.; MATSUMOTO, K.; MASUNAGA, T.; MORI, K.; MIYAKAWA, K.; NAGAO, S.; TOKUNARI, T. Sustainable Plant Growth Promotion and

Chemical Composition of Pyroligneous Acid When Applied with Biochar as a Soil Amendment. **Molecules**, [s. l.], v. 27, n. 11, p. 3397, 2022. DOI: 10.3390/molecules27113397.

JOHNSON, R.; JOEL, J. M.; PUTHUR, J. T. Biostimulants: The Futuristic Sustainable Approach for Alleviating Crop Productivity and Abiotic Stress Tolerance. **Journal of Plant Growth Regulation**, [s. l.], v. 43, n. 3, p. 659–674, 2023. DOI: 10.1007/s00344-023-11144-3.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R Package Version 1.0.7.**, 2020. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>. Acesso em: 23 set. 2024.

KHOULATI, A. et al. Harnessing biostimulants for sustainable agriculture: innovations, challenges, and future prospects. **Discover Agriculture**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 56, 2025. DOI: 10.1007/s44279-025-00177-9.

KUMAR, S. et al. Unravelling the multifarious role of wood vinegar made from waste biomass in plant growth promotion, biotic stress tolerance, and sustainable agriculture. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], 2024. DOI: 10.1016/j.jaap.2024.106851.

LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: An R package for multivariate analysis. **Journal of Statistical Software**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 1–18, 2008. DOI: 10.18637/jss.v025.i01.

LEIFELD, J.; WALZ, I. Pyroligneous Acid Effects on Crop Yield and Soil Organic Matter in Agriculture-A Review. **Agronomy**, [s. l.], 2025. DOI: 10.3390/agronomy15040927.

LEITE, R. M. C.; JARDIM, A. M. da R. F.; JÚNIOR, G. do N. A.; ALVES, C. P.; SILVA, G. I. N. Da; ROCHA, A. K. P.; SOUZA, L. S. B. De; SILVA, T. G. F. Da. Uso de biofertilizantes para intensificação sustentável da produção de palma forrageira irrigada e uso de indicadores agrometeorológicos para avaliação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 393–413, 2022. DOI: 10.26848/rbgf.v15.1.p393-413.

LI, C. et al. Absorption of foliar-applied Zn in sunflower (*Helianthus annuus*): importance of the cuticle, stomata and trichomes. **Annals of Botany**, [s. l.], v. 123, n. 1, p. 57–68, 2019. DOI: 10.1093/aob/mcy135.

LU, X.; JIANG, J.; HE, J.; SUN, K.; SUN, Y. Effect of Pyrolysis Temperature on the Characteristics of Wood Vinegar Derived from Chinese Fir Waste: A Comprehensive Study on Its Growth Regulation Performance and Mechanism. **ACS Omega**, [s. l.], v. 4, n. 21, p. 19054–19062, 2019. DOI: 10.1021/acsomega.9b02240.

MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja: Fatores que Afetam o Crescimento e o Rendimento de Grãos - Pesquisa elaborado | Docsity**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Faculdade de Agronomia - Departamento de Plantas de Lavoura. Porto Alegre, RS, 2005. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/docs/soja-fatores-que-afetam-o-crescimento-e-o-rendimento-de-graos/4760479/>. Acesso em: 30 jun. 2026.

MUNGKUNKAMCHAO, T.; KESMALA, T.; PIMRATCH, S.; TOOMSAN, B.; JOTHITYANGKOON, D. Wood vinegar and fermented bioextracts: Natural products to enhance growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 154, p. 66–72, 2013. DOI: 10.1016/j.scienta.2013.02.020.

NELSON, D. C.; FLEMATTI, G. R.; GHISALBERTI, E. L.; DIXON, K. W.; SMITH, S. M. Regulation of Seed Germination and Seedling Growth by Chemical Signals from Burning Vegetation. **Annual Review of Plant Biology**, [s. l.], v. 63, n. Volume 63, 2012, p. 107–130, 2012. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042811-105545.

NOEL, R.; SCHUELLER, M. J.; FERRIERI, R. A. Radiocarbon Flux Measurements Provide Insight into Why a Pyroligneous Acid Product Stimulates Plant Growth. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 25, n. 8, p. 4207, 2024. DOI: 10.3390/ijms25084207.

OFOE, R.; QIN, D.; GUNUPURU, L. R.; THOMAS, R. H.; ABBEY, L. Effect of Pyroligneous Acid on the Productivity and Nutritional Quality of Greenhouse Tomato. **Plants**, [s. l.], v. 11, n. 13, p. 1650, 2022. DOI: 10.3390/plants11131650.

OUATTARA, H. A. A.; NIAMKE, B. F.; AHOKE, M. E. M. F.; N'GUESSAN, J. L. L.; YAO, J.-C.; AMUSANT, N.; DUMARCAY, S. Physicochemical characterization, chemical composition and antioxidant activities of pyroligneous acids from cocktails of wood and agricultural residues from Ivory Coast. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 181, p. 106629, 2024. DOI: 10.1016/j.jaap.2024.106629.

OUATTARA, H. A. A.; NIAMKÉ, F.; YAO, J.-C.; AMUSANT, N.; GARNIER, B. Wood Vinegars: Production Processes, Properties, and Valorization. **Forest Products Journal**, [s. l.], 2023. DOI: 10.13073/fpj-d-23-00021.

PIMENTA, A. S.; FASCIOTTI, M.; MONTEIRO, T. V. C.; LIMA, K. M. G. Chemical Composition of Pyroligneous Acid Obtained from Eucalyptus GG100 Clone. **Molecules**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 426, 2018. DOI: 10.3390/molecules23020426.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 15 maio. 2024.

RABARI, A.; RUPARELIA, J.; JHA, C. K.; SAYYED, R. Z.; MITRA, D.; PRIYADARSHINI, A.; SENAPATI, A.; PANNEERSELVAM, P.; DAS MOHAPATRA, P. K. Articulating beneficial rhizobacteria-mediated plant defenses through induced systemic resistance: A review. **Pedosphere**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 556–566, 2023. DOI: 10.1016/j.pedsph.2022.10.003.

RIEDERER, M.; SCHREIBER, L. Protecting against water loss: analysis of the barrier properties of plant cuticles. **Journal of Experimental Botany**, [s. l.], v. 52, n. 363, p. 2023–2032, 2001. DOI: 10.1093/jexbot/52.363.2023.

RONDÓN-ESTRADA, L.; GÓMEZ-PADILLA, E.; GUEVARA-HERNÁNDEZ, F.; O-ARIAS, M. L.; REYES-SOSA, M.; VILTRES-RODRÍGUEZ, R. Influence of pyroligneous acid on cucumber cultivation under organoponic conditions. **Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia**, [s. l.], v. 41, n. 3, p. e244126–e244126, 2024.

ROUPHAEL, Y.; COLLA, G. Synergistic Biostimulatory Action: Designing the Next Generation of Plant Biostimulants for Sustainable Agriculture. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 9, 2018. DOI: 10.3389/fpls.2018.01655.

ROUPHAEL, Y.; COLLA, G. Toward a Sustainable Agriculture Through Plant Biostimulants: From Experimental Data to Practical Applications. **Agronomy**, [s. l.], v. 10, n. 10, p. 1461, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10101461.

SANTOS, L. de M.; MOURA, J. B. De; FILHO, L. C. L.; TEIXEIRA, M. F.; PEIXOTO, J. de C. Bioinputs: a sustainable alternative to traditional pesticide cultivation. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, [s. l.], v. 21, n. 12, p. 24777–24816, 2023. DOI: 10.55905/oelv21n12-073.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: Lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, [s. l.], v. 45, 2021. DOI: 10.36783/18069657rbcs20200128.

SHETTY, G.; MEGHANA, A.; SHETTY, M. G.; SM, B.; HG, N. Wood Vinegar: A promising agricultural input: A review. **International Journal of Agriculture Extension and Social Development**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 576–582, 2025. DOI: 10.33545/26180723.2025.v8.i5h.1962.

SIVARAM, A. K.; PANNEERSELVAN, L.; MUKUNTHAN, K.; MEGHARAJ, M. Effect of Pyroligneous Acid on the Microbial Community Composition and Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) in Soils. **Soil Systems**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 10, 2022. DOI: 10.3390/SOILSYSTEMS6010010/S1.

SOUZA, F. P. De; CASTILHO, T. P. R.; MACEDO, L. O. B. An institutional framework for Bioinputs in Brazilian agriculture based on Ecological Economics. **Sustainability in Debate**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 247–247, 2022. DOI: 10.18472/SustDeb.v13n1.2022.40820.

STEINER, C.; DAS, K. C.; GARCIA, M.; FÖRSTER, B.; ZECH, W. Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol. **Pedobiologia**, [s. l.], v. 51, n. 5–6, p. 359–366, 2008. DOI: 10.1016/J.PEDOBI.2007.08.002.

THEAPPARAT, Y.; CHANDUMPAL, A.; FAROONGSARNG, D. Physicochemistry and Utilization of Wood Vinegar from Carbonization of Tropical Biomass Waste. *Em: Tropical Forests - New Edition*. [s.l.] : IntechOpen, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.77380.

TRAVERO, J. T.; MIHARA, M. Effects of Pyroligneous Acid to Growth and Yield of Soybeans (*Glycine max*). **International Journal of Environmental and Rural Development**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 50–54, 2016. DOI: 10.32115/ijerd.7.1_50.

VERMELHO, A. B. et al. Microbial bioinputs in Brazilian agriculture. **Journal of Integrative Agriculture**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 402–423, 2026. DOI: 10.1016/j.jia.2025.09.013.

WANG, Y.; QIU, L.; SONG, Q.; WANG, S.; WANG, Y.; GE, Y. Root Proteomics Reveals the Effects of Wood Vinegar on Wheat Growth and Subsequent Tolerance to Drought Stress. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 943, 2019. DOI: 10.3390/ijms20040943.

XAVIER, V. L.; RODRIGUES, R. W. da S. **Perfil das biofábricas on farm e levantamento dos perigos biológicos potenciais na produção de bioinsumos: Vigil Sanit Debate, Rio de Janeiro, 2024, v.12: e02272| Publicado em: 20/06/2024, 2024**. DOI: 10.22239/2317-269X.02272.

YANG, J.-F.; YANG, C.-H.; LIANG, M.-T.; GAO, Z.-J.; WU, Y.-W.; CHUANG, L.-Y. Chemical Composition, Antioxidant, and Antibacterial Activity of Wood Vinegar from Litchi chinensis. **Molecules**, [s. l.], v. 21, n. 9, p. 1150, 2016. DOI: 10.3390/molecules21091150.

YANG, L.; TANG, G.; XU, W.; ZHANG, Y.; NING, S.; YU, P.; ZHU, J.; WU, Q.; YU, P. Effect of Combined Application of Wood Vinegar Solution and Biochar on Saline Soil Properties and Cotton Stress Tolerance. **Plants**, [s. l.], v. 13, n. 17, p. 2427, 2024. DOI: 10.3390/plants13172427.

YU, Y.; GUI, Y.; LI, Z.; JIANG, C.; GUO, J.; NIU, D. Induced Systemic Resistance for Improving Plant Immunity by Beneficial Microbes. **Plants**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 386, 2022. DOI: 10.3390/plants11030386.

ZHANG, P.; JACKSON, E.; LI, X.; ZHANG, Y. Salicylic acid and jasmonic acid in plant immunity. **Horticulture Research**, [s. l.], v. 12, n. 7, p. uhaf082, 2025. a. DOI: 10.1093/hr/uhaf082.

ZHANG, T.; LI, Y.; TANG, Y.; DING, Y.; RUI, Y. Recycling Agricultural Waste into Plant Protectants: Mechanisms of Wood Vinegar in Alleviating Salt Stress in *Triticum aestivum* L. **Agronomy**, [s. l.], v. 15, n. 9, p. 2078, 2025. b. DOI: 10.3390/agronomy15092078.

ZHU, K.; GU, S.; LIU, J.; LUO, T.; KHAN, Z.; ZHANG, K.; HU, L. Wood Vinegar as a Complex Growth Regulator Promotes the Growth, Yield, and Quality of Rapeseed. **Agronomy**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 510, 2021. DOI: 10.3390/agronomy11030510.

ZHU, K.; LIU, J.; LYU, A.; LUO, T.; CHEN, X.; PENG, L.; HU, L. Analysis of the Mechanism of Wood Vinegar and Butyrolactone Promoting Rapeseed Growth and Improving Low-Temperature Stress Resistance Based on Transcriptome and Metabolomics. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 25, n. 17, p. 9757, 2024. DOI: 10.3390/ijms25179757.