

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**  
**BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

**ANA CLARA ALVES MARTINS**

**INDUÇÃO DE POLIPLOIDES EM LEGUMINOSAS FORRAGEIRAS: UMA  
REVISÃO DOS ÚLTIMOS 25 ANOS**

Juiz de Fora - MG

Janeiro/2026

ANA CLARA ALVES MARTINS

**INDUÇÃO DE POLIPLOIDES EM LEGUMINOSAS FORRAGEIRAS: UMA  
REVISÃO DOS ÚLTIMOS 25 ANOS**

Trabalho apresentado a Universidade Federal de  
Juiz de Fora como requisito para a conclusão do  
curso de Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Saulo Marçal de Sousa.

Juiz de Fora – MG

Janeiro/2026

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Alves Martins, Ana Clara.

Indução de Poliploides em Leguminosas Forrageiras: Uma Revisão dos Últimos 25 Anos / Ana Clara Alves Martins. -- 2026. 23 p.

Orientador: Saulo Marçal de Sousa

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Biológicas, 2026.

1. Colchicina. 2. Fabaceae. 3. Genoma. 4. Melhoramento genético. 5. Poliploidia sintética. I. Marçal de Sousa, Saulo , orient. II. Título.

Ana Clara Alves Martins

## Indução de Poliploides em Leguminosas Forrageiras: Uma Revisão dos Últimos 25 Anos

Dissertação apresentada ao Curso de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas

Aprovada em 20 de Janeiro de 2026

### BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



**SAULO MARÇAL DE SOUSA**

Data: 21/01/2026 13:04:08-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Saulo Marçal de Sousa - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente



**ARYANE CAMPOS REIS**

Data: 21/01/2026 15:57:07-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dra. Aryane Campos Reis

Rede Santa Catarina

Documento assinado digitalmente



**JULIANA TATIARA DA COSTA SIQUEIRA**

Data: 21/01/2026 14:02:59-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

MSc. Juliana Tatiara da Costa Siqueira

Universidade Federal de Juiz de Fora

# Indução de Poliploides em Leguminosas Forrageiras: Uma Revisão

## dos Últimos 25 Anos

Ana Clara Alves Martins<sup>1</sup>

Saulo Marçal de Sousa<sup>2</sup>

### RESUMO

A indução à poliploidia representa uma estratégia promissora e benéfica aplicada ao melhoramento genético de espécies forrageiras em Fabaceae. A técnica biotecnológica, ao utilizar agentes antimitóticos como a colchicina, a orizalina e a trifluralina, demonstra alta aplicabilidade em duplicar o material genético vegetal. Como resultado se observa o aumento da produtividade, tolerância a estresses e valor nutricional de leguminosas, haja vista a utilização proveitosa desses vegetais como fonte nutritiva para a alimentação da fauna herbívora. Entre os últimos 25 anos, ao que se baseia o presente estudo, a colchicina se apresenta como o agente mais eficaz para a duplicação de espécies de Fabaceae, através de aplicações distintas e promissoras observadas nos gêneros *Arachis*, *Cyamopsis*, *Glycyrrhiza*, *Medicago*, *Stylosanthes*, *Trifolium*, *Trigonella* e *Vicia*, e em cerca de 9 estudos encontrados na literatura. A confirmação da poliploidia induzida é realizada com o auxílio de ferramentas que geram resultados através da análise genômica, por equipamentos como o citômetro de fluxo e, em raras ocasiões, o espectrofotômetro. Os efeitos acometidos após a duplicação incluem impactos na morfologia, fisiologia e anatomia dos vegetais poliploides, bem como as implicações genômicas decorrentes da poliploidização. Os resultados demonstram alterações morfológicas como “efeito gigas”, alterações anatômicas foliares quanto ao tamanho dos estômatos, maior biomassa, melhor adaptabilidade a condições adversas e um maior potencial ao melhoramento nutricional das plantas. Entretanto, existem lacunas no conhecimento aprofundado quanto às implicações genômicas e respostas a fatores estressantes em forrageiras leguminosas, as quais apresentam grande potencial para futuras pesquisas. Nesse sentido, a indução à poliploidia é uma ferramenta da biotecnologia com ampla aplicabilidade para o melhoramento de espécies forrageiras em Fabaceae, capaz de possibilitar uma maior produtividade e resiliência, alinhadas às demandas em sustentabilidade e aos desafios ecológicos globais presentes na atualidade.

**Palavras-chave:** Colchicina; Estresse abiótico; Fabaceae; Genoma; Melhoramento genético; Poliploidia sintética.

### ABSTRACT

The induction of polyploidy represents a promising and beneficial strategy applied to the genetic improvement of forage species in the Fabaceae family. This biotechnological technique, by utilizing antimitotic agents such as colchicine, oryzalin, and trifluralin, demonstrates high applicability in doubling plant genetic material. As a result, there is an observed increase in productivity, stress tolerance, and the nutritional value of legumes, given the advantageous use

---

<sup>1</sup> Discente. Laboratório de Genética e Biotecnologia. Departamento de Biologia. Universidade Federal de Juiz de Fora. E-mail: anaclara.martins@estudante.ufjf.br

<sup>2</sup> Docente. Laboratório de Genética e Biotecnologia. Departamento de Biologia. Universidade Federal de Juiz de Fora. E-mail: saulo.marcal@ufjf.br

of these plants as a nutrient source for herbivorous fauna. Over the last 25 years, the period on which this study is based, colchicine has emerged as the most effective agent for doubling Fabaceae species through distinct and promising applications observed in the genera *Arachis*, *Cyamopsis*, *Glycyrrhiza*, *Medicago*, *Stylosanthes*, *Trifolium*, *Trigonella*, and *Vicia*, appearing in approximately nine studies found in the literature. The confirmation of induced polyploidy is performed with the aid of tools that generate results through genomic analysis, using equipment such as flow cytometers and, on rare occasions, spectrophotometers. The effects occurring after duplication include impacts on the morphology, physiology, and anatomy of polyploid plants, as well as genomic implications resulting from polyploidization. Results demonstrate morphological alterations such as the 'gigas effect,' leaf anatomical changes regarding stomatal size, increased biomass, better adaptability to adverse conditions, and a greater potential for the nutritional improvement of plants. However, gaps remain in the in-depth knowledge regarding genomic implications and responses to stressors in forage legumes, which present great potential for future research. In this sense, the induction of polyploidy is a biotechnological tool with wide applicability for the improvement of forage species in Fabaceae, capable of enabling greater productivity and resilience aligned with current sustainability demands and global ecological challenges.

**Keywords:** Abiotic stress; Colchicine; Fabaceae; Genome; Plant breeding; Synthetic polyploidy

## 1 INTRODUÇÃO

Plantas forrageiras são caracterizadas por sua potencial aplicação em coberturas de proteção ao solo, além de ser uma fonte essencial na alimentação de herbívoros (Ziech et al., 2015). Há uma gama de espécies de forrageiras pertencentes às famílias Poaceae (gramíneas) e Fabaceae (leguminosas). As gramíneas, ainda hoje, são muito aproveitadas como uma opção de forrageamento para diversos animais, como ruminantes e mesmo insetos, tendo um significativo potencial de adaptabilidade em áreas tropicais e de alagamento temporário (Dias-Filho, 2021). Ao que diz respeito sobre a evolução e ocorrência de poliploides naturais em Fabaceae, sabe-se que a história evolutiva dessas leguminosas culminou em uma duplicação total genômica, o que conferiu vantagens adaptativas garantindo sua sobrevivência próximo à extinção do Cretáceo-Paleogeno (K-Pg) (Koenen et al., 2021). Nesse sentido, as leguminosas, do ponto de vista fisiológico, apresentam benefícios que excedem às qualidades presentes em Poaceae, como uma alta adaptabilidade à diferentes solos e climas (Dias-Filho, 2021).

A família Fabaceae é subdividida em três subfamílias: Papilionoideae, Caesalpinioideae e Mimosoideae, e compreende um grande número de espécies e espécimes no grupo das dicotiledôneas (Biondo et al., 2005). Contudo, todas as espécies submetidas à poliploidização citadas no presente estudo pertencem à subfamília Papilionoideae, também chamada de Faboideae (Tabela 2). Devido à grande extensão de Fabaceae o número básico é, ainda atualmente, investigado a partir das subfamílias. Em Papilionoideae o mais comum encontrado para o número básico e de  $x = 8$  (Wojciechowski et al., 2004); Caesalpinioideae o número predominante é de  $x = 14$  (Biondo et al., 2005); e em Mimosoideae o número frequentemente encontrado é de  $x = 13$  (Matías et al., 2014). As espécies pertencentes à Fabaceae são amplamente conhecidas pela associação simbiótica à bactéria *Rhizobium*, tornando a fixação de nitrogênio uma característica marcante e de vasto interesse presente nas forrageiras leguminosas, auxiliando na recuperação de áreas degradadas, além de ser um atributo marcante para o aumento de proteínas presentes na espécie vegetal, tornando as leguminosas mais atrativas para a sua utilização em forragens (Moreti et al., 2006).

A indução à poliploidia em células vegetais é uma ferramenta que permite aplicações práticas em diferentes culturas como: alimentícias, de plantas medicinais e aromáticas, espécies ornamentais ou florestais e cultura de forrageiras, tendo em vista sua vultuosa eficiência em gerar vantajosos impactos fenotípicos e fisiológicos, vigor no aumento da biomassa, além de grande tolerância a fatores estressantes, entre outros, sendo características extremamente proveitosas ao cultivo desses indivíduos (Pereira et al., 2012). A produção de indivíduos poliploides pode se dar de maneiras diferentes como na formação de um híbrido, em que há combinação de genomas de espécies diferentes, gerando os denominados alopoliploides, ou pela duplicação do genoma de uma única espécie, denominando-os autopoliploides (Begna, 2024; Nawalkar et al., 2023; Vieira et al., 2024). Quanto aos alopoliploides foi realizada por Capomaccio e colaboradores (2010) a poliploidização sexual através do cruzamento entre duas células germinativas  $2n$ : *Medicago sativa* subsp. *Falcata* gameta feminino  $2n$  e *M. sativa* subsp. *coerulea* gameta masculino  $2n$ , já reconhecidas pela literatura na produção de gametas  $2n$  devido a falhas durante as divisões dos mesmos, o que resultou em um indivíduo  $4x = 32$  (poliploide) fértil. Nessa perspectiva, a indução à poliploidia pode ser um instrumento valioso para o impulso do melhoramento genético de espécies forrageiras, capaz de auxiliar em uma maior produtividade que caminha em conjunto com a sustentabilidade (Vieira et al., 2024).

Há uma notável descrição na literatura quanto à indução de indivíduos poliploides em espécies presentes em Poaceae, dada sua ampla utilização em muitas culturas, como os cereais, importantes para a alimentação humana, mas principalmente para o melhoramento de forrageiras presentes no grupo, em razão à sua vasta aplicabilidade e viabilidade em se propagar (Cheng et al., 2022), tendo sido amplamente desenvolvidas em cultivares poliploides

comerciais e de fácil acesso (Rauf et al., 2021). Embora a descrição de duplicações em espécies de Fabaceae e Poaceae caminhem de forma conjunta (Tabela 1), lacunas no conhecimento quanto a empregabilidade de leguminosas e seus benefícios precisam ser preenchidas. Considerando sua alta aplicabilidade na regeneração de solos degradados, além de um cultivo baixo em insumos, se faz necessário compreender melhor técnicas e aplicações de melhoramento em leguminosas forrageiras, a fim de auxiliar futuras pesquisas que corroborem em uma melhor compreensão e evolução em ferramentas que aprimorem a utilização de técnicas que aproveitem as características aperfeiçoadas através da duplicação gênica.

Pelo aspecto que visa a conservação da natureza, no atual cenário ecológico, a adição de novas áreas destinadas a pastagens se faz como uma opção não viável. Nesse sentido, técnicas de melhoramento vegetal para espécies leguminosas forrageiras vêm sendo um alvo importante de pesquisas, na busca de ampliar os benefícios de Fabaceae, capazes de gerar uma maior produtividade sem que seja necessário ampliar o espaço de plantação (Valle et al., 2009). Além disso, a utilização de técnicas biotecnológicas se faz fundamental quanto à resistência à diferentes fatores bióticos e/ou abióticos, como pragas ou estresse climático, mantendo a forragem mais vigorosa, ainda que haja adversidades (Pereira et al., 2012). Portanto, o presente estudo busca revisar em um período de 25 anos, até o presente ponto, técnicas em duplicações genéticas e seus impactos em espécies forrageiras pertencentes à Fabaceae, com o objetivo de explorar uma maior produtividade em diversos aspectos vegetais, os quais serão abordados em diante, além de uma visão de perspectiva para pesquisas consequentes.

## **2 INDUÇÃO À POLILOIDIA COM AGENTES ANTIMITÓTICOS**

A obtenção de indivíduos poliploides artificiais pode ocorrer de diferentes formas através da utilização de diversos compostos que atuam como agentes denominados antimitóticos, dentre eles, os mais comuns a serem utilizados são a colchicina, orizalina e a trifuralina, os quais atuam durante a divisão celular, inibindo a função das fibras do fuso (Vichiato et al., 2014). Esses compostos, atuam bloqueando a dinâmica de polimerização dos microtúbulos, paralisando o processo de segregação dos cromossomos, dessa forma, por não ocorrer a citocinese, a célula passa a conter o dobro de material genético, por exemplo, o que faz com que o ciclo consequente se inicie com seu número cromossômico duplicado (Pereira et al., 2012) (Figura 1). Atualmente, pesquisas buscam aprimorar os métodos de indução e obtenção de poliploides através de técnicas diversas, como a utilização de choque térmico, ou mesmo a produção de ambientes que sejam estressantes, os quais podem ser capazes de induzir poliploides, ainda que de forma transitória (Zhang et al., 2023). Nesse sentido, foi demonstrado em outras famílias vegetais que a exposição de botões florais à altas temperaturas é capaz de gerar grãos de pólen  $2n$ , o que pode explicar eventos naturais de poliploidia através do choque térmico (Pécix et al., 2011). Devido à toxicidade dependente à concentração do agente atimitótico utilizado, diferentes formas de obtenção de espécimes vegetais duplicadas devem ser testadas, a fim de reduzir tal taxa de fitotoxicidade, a taxa de mortalidade, ou mesmo a produção de indivíduos mixoploides, sendo uma característica muito presente, com células com diferentes ploidias em um mesmo tecido, após o tratamento para a obtenção de poliploides induzidos.

**Tabela 1.** Registros de duplicação induzida em Poaceae e Fabaceae nos últimos 25 anos

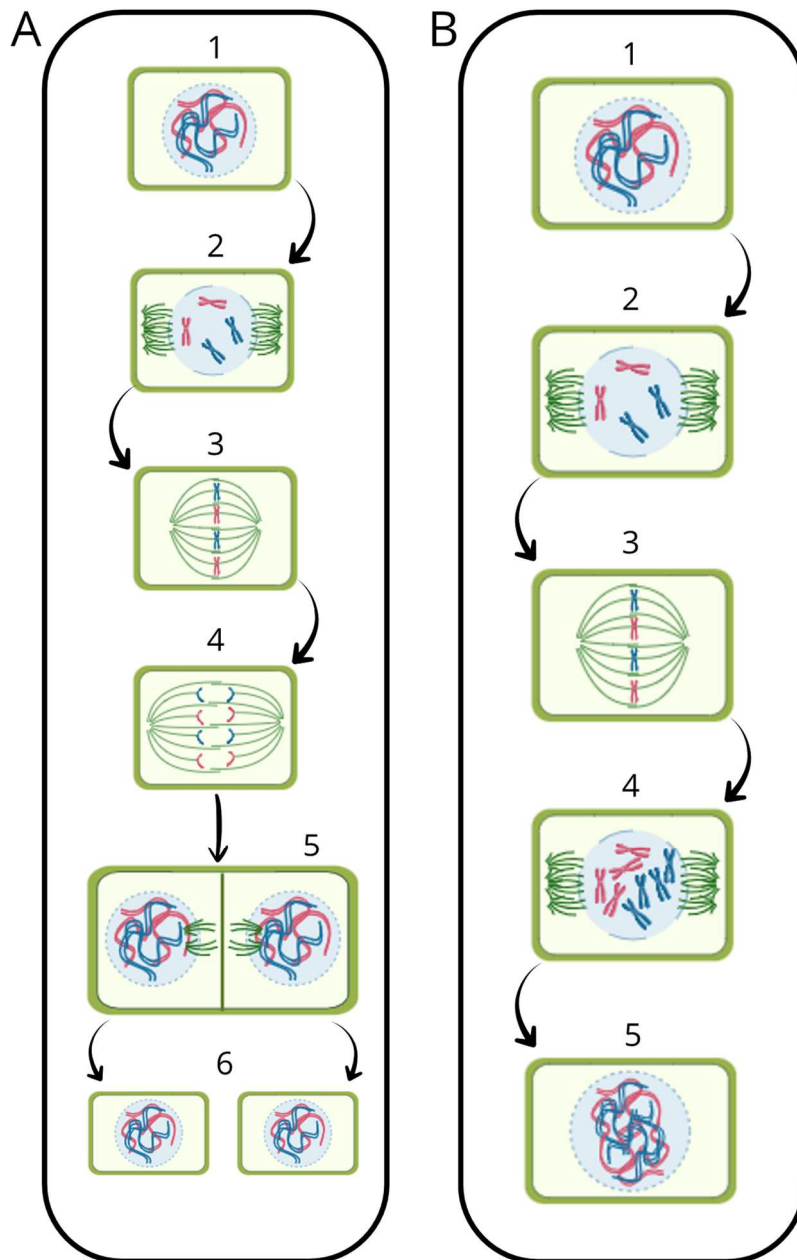
Família	Subfamília	Espécie	Referência
Poaceae	Panicoideae	<i>Pennisetum purpureum e Pennisetum glaucum</i>	(Campos et al., 2009)
		<i>Brachiaria ruziziensis</i>	(Ishigaki et al., 2009)
		<i>Brachiaria ruziziensis</i>	(Timbó et al., 2014)
		<i>Brachiaria adecumbens</i>	(Simioni et al., 2011)
		<i>Miscanthus × giganteus</i>	(YU et al., 2009)
		<i>Miscanthus species</i>	(Głowacka et al., 2010)
		<i>Sorghum bicolor</i>	(Ardabili et al., 2015)
		<i>Sorghum bicolor</i>	(Poosamart et al., 2015)
		<i>Panicum virgatum</i> L.	(Yoon et al., 2017)
	Pooideae	<i>Lolium multiflorum</i>	(Pereira et al., 2014)
Fabaceae	Faboideae/Papilionoideae	<i>Vicia faba</i> L.	(Joshi; Verma, 2004)
		<i>Cyamopsis tetragonoloba</i>	(Singh; Kumar, 2024)
		<i>Glycyrrhiza glabra</i>	(Moghbel et al., 2015)
		<i>Trifolium alexandrinum</i> L.	(Pathak et al., 2015)
		<i>Arachis cardenasii, A. correntina e A. diogeni</i>	(Suppa et al., 2024)
		<i>Stylosanthes guianensis</i>	(Wu et al., 2015)
		<i>Trigonella foenum-graecum</i>	(Marzougui et al., 2011)
		<i>Trifolium alexandrinum</i> L.	(El-Naby et al., 2012)
		<i>Medicago truncatula</i>	(Innes et al., 2021)

A colchicina é um agente antimitótico muito utilizado na indução e obtenção de poliploides em espécies de Fabaceae (Tabela 2), com uma vasta descrição na literatura em testes protocolares para diferentes espécies vegetais, dessa maneira, o agente antimitótico pode ser aplicado de formas diversas. Um modelo *in vitro* que pode ser replicado e regulado para diferentes espécies de leguminosas foi satisfatório na produção de poliploides induzidos de *Glycyrrhiza glabra*, através da inoculação de sementes, escarificadas e esterilizadas, em Meio MS (Murashige; Skoog, 1962) líquido, suplementado com colchicina a 0,05% por 24h e mantidos em um agitador orbital 100 rpm (Moghbel et al., 2015). *Glycyrrhiza glabra* originalmente, não é considerada uma planta utilizada em forragens, entretanto, sua utilização como aditivo alimentar, adicionado a frações de rações ou mesmo à água, pode trazer seus benefícios medicinais, complementando a forragem com propriedades anti-inflamatórias, antioxidantes e estimuladoras ao sistema digestivo do animal. Para além da cultura *in vitro* existem formas não estéreis capazes de serem utilizadas, como no tratamento de sementes pré

embebidas de *Vicia faba* L. por imersão em uma solução de colchicina a 0,005% por 8h, com eficácia de 50% de indução à poliploidia (Joshi; Verma, 2004). Outra forma bem sucedida na aplicação da colchicina se deu em acessos de *Cyamopsis tetragonoloba*, através do tratamento com o auxílio de algodões, embebidos em uma solução à 0,2% por 36h, os quais foram posicionados entre os cotilédones emergentes das sementes germinadas anteriormente, capaz de produzir 12,5% de poliploides (Singh; Kumar, 2024). Em *Stylosanthes guianensis* foi feito um tratamento parecido à *C. tetragonoloba*, entretanto, os algodões foram substituídos por gotas aplicadas sobre as gemas apicais de soluções de colchicina a 0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, e 0.25% por 24, 48 e 72h, em que a maior porcentagem na obtenção de tetraploides foi a 0,20% a 48h (Wu et al., 2015).

Experimentos que visam analisar as variáveis de concentração e tempo em diferentes tipos de acessos de forrageiras se fazem essenciais, pois são capazes de definir um protocolo adequado para cada espécie, além de gerar análises sobre os níveis de toxicidade na utilização da colchicina de maneira individualizada à espécie e ao modelo de explante (Tabela 2). Para o desenvolvimento de tetraploides em linhagens de *Trifolium alexandrinum* L. foram testados 6 tratamentos em diferentes tipos de tecidos, em concentrações variadas e tempos em tratamento para uma análise mais detalhada de qual protocolo seria mais eficiente na produção de indivíduos tetraploides. Dentre os 6 tratamentos o que se destacou de forma mais eficiente consistiu na imersão de brotos invertidos em uma solução de colchicina à 0,1% durante 24h, tendo uma taxa, aproximada, de 6,25% de sucesso na linhagem Penta-1 e 5,71% na linhagem Wardan, de acordo com o total de indivíduos tratados, podendo ser consideradas altas taxas de indução de poliploides se levada em conta a taxa de sobrevivência em cada uma das linhagens apresentadas, haja vista que Penta-1 apresentou cerca de 28,21% de sobrevivência, e Wardan cerca de 22,03% (Pathak et al., 2015). Suppa e colaboradores (2024) realizaram testes para a obtenção de autotetraploides de três espécies de amendoim selvagem *Arachis cardenasii*, *A. correntina* e *A. diogeni* por intervenção de tratamentos com ágar sólido em três testes distintos. O primeiro tratamento consistiu na suplementação do ágar sólido com colchicina a 10 ou 30 mM, orizalina a 0,1 ou 0,3 mM, ou trifuralina a 0,1 ou 0,3 mM, em plântulas recém germinadas, por 72h. Para o segundo e terceiro tratamento as sementes foram pré-tratadas com ácido giberélico (100 ppm) por 72h, o que auxiliaria no crescimento e desenvolvimento posterior da planta, e em seguida foram tratadas com ágar sólido suplementado com colchicina 5mM ou orizalina a 0,1 mM, 0,3 mM ou 0,5 mM. Para o quarto tratamento sementes das espécies de leguminosa foram pré-tratadas da mesma maneira com ácido giberélico, para posterior tratamento por imersão em uma solução aquosa contendo colchicina 5 Mm por 6h ou orizalina 0,5 mM por 6, 12 ou 24h. Ao final do experimento o tratamento mais promissor foi em imersão de sementes em colchicina, com uma maior taxa de conversão em tetraploides, cerca de 30% entre as três espécies. A demonstração de exemplos práticos e viáveis na empregabilidade de antimitóticos, em sua grande maioria sendo utilizada a colchicina no tratamento de duplicação de diversas leguminosas forrageiras, é crucial para o esclarecimento da técnica como uma ferramenta de sucesso na obtenção de poliploides em espécies de Fabaceae.

**Figura 1** – (A) Célula em mitose regular; (B) Célula em mitose interrompida e duplicação do material genético. **A:** 1 – Células inicial  $2n$  em Interfase; 2 – Prófase; 3 – Metáfase; 4 – Anáfase; 5 – Telófase; 6 – Fim do processo mitótico, 2 células  $2x$ . **B:** 1 – Células inicial  $2n$  em Interfase; 2 – Prófase; 3 – Metáfase; 4 – Bloqueio da dinâmica de polimerização dos microtúbulos e paralisação do processo de segregação dos cromossomos; 5 – Ausência de citocinese e fim do processo mitótico, 1 célula  $4x$ .



Fonte: Criado com BioRender pela autora

### 3 MÉTODOS DE ANÁLISES GENÉTICAS NA IDENTIFICAÇÃO DE POLIPLÓIDES

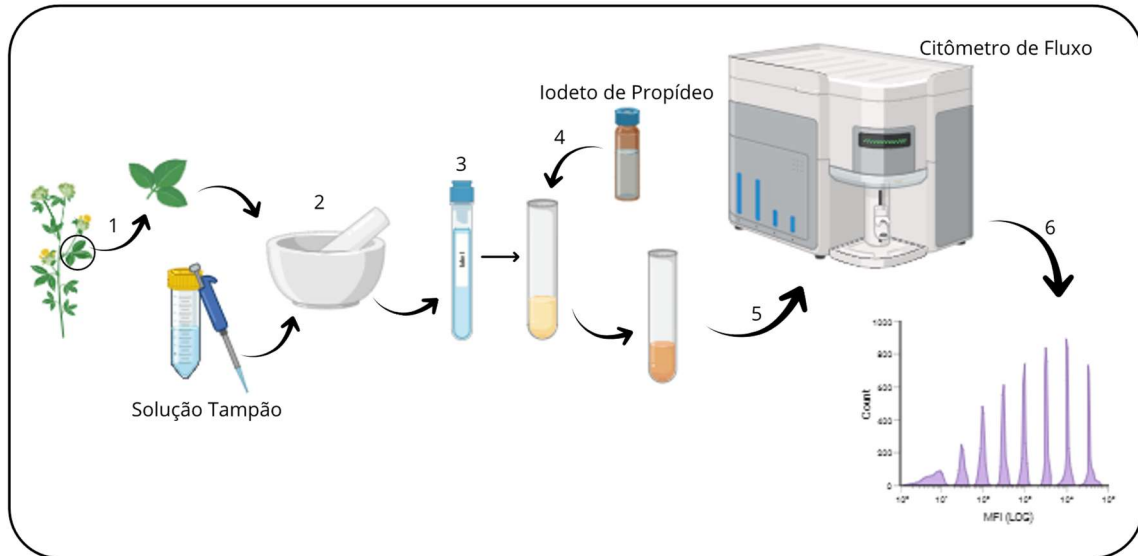
O principal efeito esperado da indução à poliploidia é a duplicação do material genético devido à ação dos agentes antimitóticos. Nesse sentido, as técnicas e aparelhos utilizados para a análise de eficiência dos experimentos são uma etapa importante que auxiliam na precisão dos resultados.

A forma mais bem empregada, eficiente e rápida na obtenção dos resultados, quanto à efetividade da poliploidização, se dá no uso das análises feitas através do aparelho denominado Citômetro de Fluxo, conectado a um computador. Para a obtenção de resultados as amostras devem ser processadas através da técnica de maceração com o auxílio de uma solução tampão, filtradas e, posteriormente coradas com um reagente que seja hábil à ligação ao DNA, como Iodeto de Propídeo, por exemplo, e em seguida levadas para leitura no equipamento (Figura 2), onde um laser irá excitar o reagente incorporado à amostra e, assim, é medida a intensidade da fluorescência emitida pelo reagente, sendo equivalente à quantidade de DNA da amostra (Doležel et al., 2007). Dessa maneira, através da citometria, é possível obter de maneira mais prática a quantidade DNA de uma amostra ao comparar com amostras padrões, em que já se sabe a quantidade de picogramas (pg) presentes, realizando a leitura dos picos gerados no computador pelo aparelho, utilizado, por exemplo, como método diagnóstico para obter os resultados das duplicações em *Trifolium alexandrinum* L. (Pathak et al., 2015).

Um método muito utilizado por sua acessibilidade é a produção de lâminas microscópicas que qualificam a observação direta dos cromossomos, através de técnicas citogenéticas já descritas na literatura, por meio de análises de células em divisão por mitose ou meiose, em meristemas radiculares ou anteras de botões florais, respectivamente, como foi utilizado nas observações meióticas pós indução à poliploidia em *Vicia faba* L. (Joshi; Verma, 2004). A observação dos resultados por lâminas auxilia nas análises comportamentais dos cromossomos em etapas importantes dos processos meióticos e/ou mitóticos. Os meristemas/anteras são coletados e mantidos em imersão em um composto, como a 8-hidroxiquinolina (8-HQ), o qual atua como agente antimitótico, bloqueando a polimerização completa das fibras do fuso, promovendo a interrupção da divisão celular durante a metáfase, como uma das etapas principais. Após esse processo, as estruturas vegetais são mantida em uma estufa, adicionadas em uma lâmina microscópica à uma enzima que seja capaz de digerir a parede celular, e em seguidas processadas para que o material seja espalhado por toda a lâmina microscópica, possibilitando a observação dos cromossomos ao microscópio óptico, favorecendo a contagem dos mesmos, análises de irregularidades nos pareamentos, etc. (Fuchs-Ferraz et al., 2014) (Figura 3).

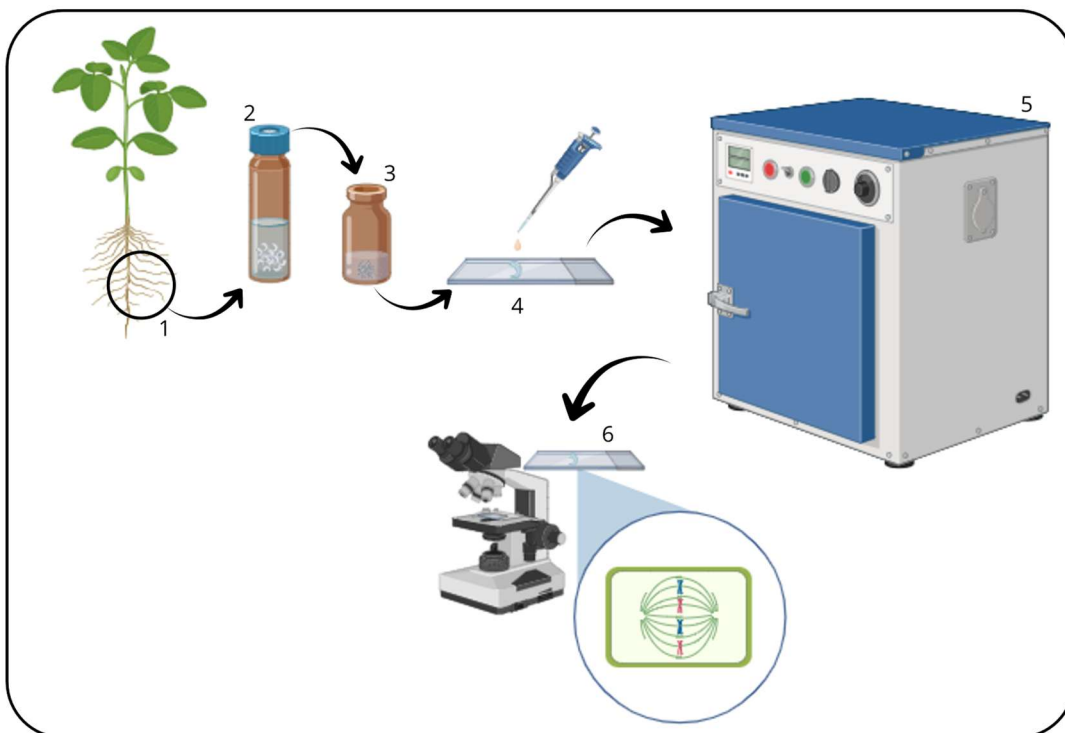
Outra forma, pouco utilizada, com potencial aproveitamento nas análises de duplicação se dá através do aparelho espectrofotômetro, o qual converte a absorção da luz ultravioleta, emitida em um comprimento de onda de 260nm, em um dado quantitativo de concentração de DNA (Bruijns et al., 2022), como descrito nas verificações feitas para acessos de *Glycyrrhiza glabra* (Moghbel et al., 2015). Contudo, é considerada uma técnica imprecisa, pois a luz emitida pode ser absorvida por diferentes moléculas, como proteínas e RNA, por exemplo, o que resulta em uma quantificação estimada e não exata (Bruijns et al., 2022).

**Figura 2** - Processamento de amostras para leitura em citometria de fluxo. **1** – Coleta de folhas; **2** – Adição da folha e solução tampão para maceração do material; **3** – Filtragem da amostra; **4** – Adição de Iodeto de Propídeo; **5** – Leitura da amostra no Citômetro de Fluxo; **6** – Leitura comparativa de picogramas.



Fonte: Criado com BioRender pela autora

**Figura 3** - Produção de lâminas para análises cromossômicas. **1** – Coleta de meristema radicular; **2** – Fixação dos cromossomos em Carnoy; **3** – Imersão em 8-HQ; **4** – Adição de enzima para a digestão da parede celular; **5** – Lâmina mantida em estufa; **6** – Processamento e observação dos cromossomos ao microscópio óptico.



Fonte: Criado com BioRender pela autora

**Tabela 2.** Indução à poliploidia e métodos de análise

Espécie	Tratamento	Ploidia/Mixoploides		Análise	Referência
		Pré	Pós		
<i>Vicia faba</i> L.	Colchicina; 0,005% por 8h; Sementes embebidas	2x = 12 Presença de mixoploides	4x = 24	Lâminas cromossômicas	(Joshi; Verma, 2004)
<i>Cyamopsis tetragonoloba</i>	Colchicina; 0,2% por 36h; Algodão sobre o cotilédone	2x = 14 Presença de mixoploides	4x = 28	Lâminas cromossômicas	(Singh; Kumar, 2024)
<i>Glycyrrhiza glabra</i>	Colchicina; 0,05% por 24h; Inoculação de sementes in vitro		–	Lâminas cromossômicas; Espectrofotometria; Citometria de fluxo	(Moghbel et al., 2015)
<i>Trifolium alexandrinum</i> L.	Colchicina; 0,1% por 24h; Imersão de brotos	2x = 16	4x = 32	Citometria de fluxo	(Pathak et al., 2015)
<i>Arachis cardenasii</i> , <i>A. correntina</i> e <i>A. diogeni</i>	Colchicina; 5 mM por 6h; Sementes embebidas	2x = 20 Presença de mixoploides	4x = 40	Citometria de fluxo	(Suppa et al., 2024)
<i>Stylosanthes guianensis</i>	Colchicina; 0,20% por 48h; Gotas sobre o meristema apical	2x = 20	4x = 40	Lâminas cromossômicas	(Wu et al., 2015)
<i>Trigonella foenum-graeum</i>	Colchicina; 0,5% por 72h; Algodão sobre o meristema apical	2x = 16 Presença de mixoploides	4x = 32	Lâminas cromossômicas	(Marzougui et al., 2011)
<i>Trifolium alexandrinum</i> L.	Colchicina; 0,1% a cada 3h por um dia; Gotas sobre o meristema apical	2x = 16 Presença de mixoploides	4x = 32	Lâminas cromossômicas	(El-Naby et al., 2012)
<i>Medicago truncatula</i>	Colchicina; 0,07% por 6h; Imersão invertida de brotos com papel filtro em tubo de ensaio	2x = 16	4x = 32	Lâminas cromossômicas	(Innes et al., 2021)

#### 4 EFEITOS MORFOLÓGICOS E ANATÔMICOS

Poliploides induzidos são caracterizados de forma morfológica por gerarem, na maioria das vezes, o que se denomina efeito “gigas”, sendo uma condição em que os órgãos e estruturas da planta se apresentam maiores, como em flores e folhas, ou mais espessos, como em caules, sendo demonstrado em vários estudos de indução à poliploidia em forrageiras publicados até o presente estudo (Wu et al., 2015; Pathak et al., 2015; Joshi; Verma, 2004; De Jesus et al., 2016; Singh; Kumar, 2024). Inicialmente, devido à anterior ação de agentes antimetabólicos utilizados, o crescimento vegetativo se dá de forma lenta, uma vez que com o material genético duplicado, as células terão uma maior demanda de tempo e energia para se dividirem com os genomas maiores (Doyle; Coate, 2019). Foi descrito em *Vicia faba* L., uma média de 40 dias a mais para atingirem sua floração, além de apresentarem um caule mais espesso e folhas maiores, tanto em comprimento quanto em largura, em comparação aos indivíduos diploides do grupo controle (Joshi; Verma, 2004). Tais características, como crescimento lento, aumento da área foliar, por exemplo, são amplamente utilizadas como uma forma de pré diagnosticar a indução confirmada de poliploides, quando presentes, as quais podem ser comprovadas posteriormente de diversas maneiras, através de métodos de análises citados anteriormente, considerando que o efeito “gigas” pode se apresentar após a duplicação genômica de espécimes vegetais (De Jesus et al., 2016).

Além de efeitos morfológicos, análises anatômicas são essenciais no auxílio do diagnóstico de efeitos da duplicação em espécies vegetais. Em poliploides induzidos de *Cyamopsis tetragonoloba*, as análises anatômicas identificaram que os estômatos e suas células acessórias se apresentaram bem maiores, gerando um aumento quantitativo de cloroplastos por estômatos, por consequência, apresentando folhas com uma coloração em um verde mais escuro (Singh; Kumar, 2024). Entretanto, ao apresentar um considerável crescimento em tamanho dessas estruturas, é perceptível que há uma diminuição em densidade estomática, como observado após a duplicação de *Stylosanthes guianensis* (Wu et al., 2015), sendo o aumento da taxa fotossintética uma consequência não comprovada apenas através de análises anatômicas estomáticas após a duplicação de uma espécie vegetal, haja vista que não há descrição na literatura se tal alteração pode ocorrer como uma forma de compensação em consequência à redução da densidade estomática. Ademais, a indução à poliploidia é capaz de aumentar significativamente a atividade de produção terpenos, em plantas com grande interesse na produção de óleos essenciais, além de atuarem na produção de componentes secundários essenciais para as plantas, como hormônios vegetais e pigmentos fotossintéticos, por exemplo, assim como a potencialização na produção de compostos fenólicos (Madani et al., 2021). Entretanto, análises comparativas quanto às alterações nos efeitos fisiológicos de leguminosas forrageiras duplicadas artificialmente ainda carecem de pesquisas e resultados descritos na literatura.

Ainda após a duplicação de *Cyamopsis tetragonoloba* foram observadas diferenças morfológicas significativas como folhas deformadas, uma flor com duas pétalas fundidas, além de um aumento na quantidade de tricomas na superfície foliar, o que passou a atribuir às folhas e caule uma textura glabra (Singh; Kumar, 2024), sendo essas características que podem dificultar, de certo modo, a identificação taxonômica da espécie vegetal. Nesse sentido, há uma vasta alteração morfológica em diversos órgãos de plantas que passam pelo processo de duplicação através da utilização de agentes antimetabólicos, como folhas, frutos e flores maiores, caules mais espessos, ou mesmo um aumento na quantidade de folíolos, o que auxilia em uma maior cobertura de área foliar, assim como o aumento em tamanho desses folíolos, como citado anteriormente (Tabela 3). Em *Trifolium alexandrinum* L. foi investigada a constância de indivíduos pentafoliolados ou multifoliolados após a indução à poliploidia, tendo em vista casos isolados de ocorrência da característica. Portanto, aos tetraploides induzidos conferiu-se uma

expressão mais constante na presença de 5 ou mais folíolos em uma única folha, além de características como bordas serrilhadas nos folíolos, folhas e caule mais espessos, e abundância na presença de tricomas, características não observadas nas plantas diploides (Pathak et al., 2015). Nessa perspectiva, alterações morfológicas, principalmente modificações nas peças florais, podem transformar as relações ecológicas entre as espécies vegetais e seus polinizadores, considerando que podem continuar atraindo os mesmos “antigos” polinizadores, além da possibilidade de atração de novos polinizadores (Nuismer; Thompson, 2001), sendo oportuno para um considerável aumento na variabilidade genética da espécie em questão.

**Tabela 3.** Alterações morfológicas e o efeito gigas

Espécie	Alterações Morfológicas Observadas	Referência
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	Aumento significativo no tamanho das sementes, flores e grãos de pólen; Folhas mais largas, verdes e espessas.	(Marzougui et al., 2011)
<i>Vicia faba L.</i>	Maior número de ramos e folíolos; Aumento no tamanho dos estômatos e das sementes.	(Joshi; Verma, 2004)
<i>Arachis cardenasii, A. correntina e A. diogoi</i>	Aumento na área foliar e espessura das folhas.	(Suppa et al., 2024)
<i>Stylosanthes guianensis</i>	Folhas e folíolos maiores; Aumento no diâmetro do caule e no tamanho das flores.	(Wu et al., 2015)
<i>Cyamopsis tetragonoloba</i>	Aumento no tamanho das células guarda dos estômatos e folíolos maiores.	(Singh; Kumar, 2024)
<i>Trifolium alexandrinum L.</i>	Maior biomassa foliar; Folhas com coloração verde-escura mais intensa e pecíolos mais espessos.	(El-Naby et al., 2012)

## 5 IMPACTOS GENÔMICOS E ESTABILIDADE MEIÓTICA EM POLIPLOIDES INDUZIDOS

A indução à poliploidia é capaz de impactar diretamente no genoma e na expressão gênica, os quais podem apresentar alterações devido à instabilidade meiótica em espécies vegetais geneticamente duplicadas. Contudo, tal ferramenta tem alta aplicabilidade no aumento de variabilidade genética, através das diversas possibilidades de recombinações (Sánchez, 2014). Acordado com análises feitas quanto à citologia de células-mãe do grão de pólen (CMPs), em *Vicia faba L.* foi analisado um perfil diferente de divisão em indivíduos induzidos à poliploidia, em comparação ao comportamento apresentado por indivíduos diploides. Os indivíduos 2x apresentavam um média de 17 quiasmas com cerca de 52% de terminalização, sendo essa uma alta frequência de recombinação, além de manifestarem bivalência e um pareamento do tipo anel, demonstrando uma meiose regular, com 100% de fertilidade polínica. Em comparação, os indivíduos 4x desenvolveram irregularidades no pareamento,

demonstrando em maior parte quadrivalência, com uma variação de 0 a 6 por célula, e em menor parte bivalência, com uma variação de 0 a 12 por célula. Além disso, foi observada multipolaridade na telófase em cerca de 20% dos indivíduos poliploides induzidos, o que indica anormalidades devido à duplicação do material genético podendo levar à formação de micronúcleos ou, na grande maioria dos casos, grãos de pólen inviáveis (Joshi; Verma, 2004). Ademais, é descrito na literatura a formação de CMPs através da citomixia. Esse processo ocorre por meio de canais citomíticos que, por possuírem diâmetro superior aos plasmodesmos, permitem a passagem de grandes estruturas, como cromossomos, por exemplo, entre células vizinhas. Tal fenômeno, já observado em algumas espécies de leguminosas forrageiras, resulta na não redução de gametas, capaz de gerar indivíduos triploides ou poliploides. Embora isso amplie a variabilidade genética, também pode acarretar esterilidade parcial ou baixa viabilidade polínica (Pierre; Sousa, 2011).

Sabe-se que, em sua grande maioria, poliploides induzidos tendem a apresentar certa instabilidade meiótica, como demonstrado anteriormente, a qual pode se regularizar após um certo tempo, ou mesmo nas gerações seguintes, capaz de conferir estabilidade genômica e meiótica a posteriori, as quais podem estar diretamente relacionadas à retenção diferencial de genes, em que uma seleção aleatória pode reter, modificar ou perder genes, auxiliando em um equilíbrio para os poliploides induzidos (Schifino-Wittmann, 2004). Nesse contexto, eventos de duplicação gênica total e em tandem são demonstrados e associados à uma melhora na expansão gênica de famílias, além de apresentarem certas vantagens evolutivas e adaptativas, como foi observado em espécies do gênero *Ormosia*, em que houve uma expansão à produção de certos metabólitos, os quais foram essenciais na adaptabilidade desses indivíduos em condições adversas (Liu et al., 2023). Como uma base de equiparação, o sequenciamento de genomas pode ser uma ferramenta muito útil para fins comparativos. Li e colaboradores (2023) realizaram o sequenciamento de *Cercis chinensis*, uma Fabaceae diploide, com o intuito de analisar a evolução do gene, entretanto, os resultados da montagem do genoma podem ser essenciais na utilização do mesmo como um genoma referencial na identificação de padrões de duplicação em poliploides induzidos, além da observação de retenções diferenciais, auxiliando na identificação de origem de novos genes, quanto à estrutura genômica e expressão gênica.

Um efeito muito comum apresentado em poliploides induzidos se dá no advento de indivíduos mixoploides, como foi observado após a duplicação de *Trigonella foenum graecum* L. na ocorrência de ramos em um mesmo indivíduo com diferentes níveis de ploidia, uma condição que se dá devido a uma distribuição não homogênea do antimitótico utilizado, por não atingir todas as células de maneira uniforme, independente da técnica empregada na aplicação do agente (Marzougui et al., 2011). Entretanto, é necessário que haja acompanhamento regular desses indivíduos para análise e seleção de ramos ou sementes que apresentem a ploidia desejada, para que a propagação seja realizada de forma produtiva. Considerando que tal mosaicismos pode ocorrer em diferentes órgãos de um mesmo indivíduo, como citado anteriormente, ou em um mesmo tecido, o monitoramento deve se manter constante a fim de apurar a estabilidade cromossômica, tendo em vista que tal característica pode implicar em infertilidade e instabilidade gênica (Frank; Chitwood, 2016).

Enfrentando o advento da grande taxa de infertilidade apresentada inicialmente pelos indivíduos diretamente duplicados, surgem outras maneiras para a obtenção de poliploides com uma maior taxa de fertilidade polínica, como na produção de um aloploiploide, por exemplo, citado anteriormente, através do cruzamento entre *Medicago sativa* subsp. *Falcata* e *M. sativa* subsp. *coerulea* demonstrado por Capomaccio e colaboradores (2010). Ainda que o cruzamento tenha resultado em um aloploiploide, foi observado um maior índice de fertilidade e uma floração precoce, apesar das alterações cromossômicas, as quais são previstas em poliploides induzidos, como discutido anteriormente, podendo demonstrar uma ferramenta bem empregada para a redução de adversidades quanto à infertilidade, em casos de permanência da

característica (Capomaccio et al., 2010). Em sua grande maioria, os poliploides podem passar por um processo de rearranjo total genômico, através da consolidação de uma meiose estável, devido à restauração da segregação ordenada e ao balanço transcricional, o que gera um grande aproveitamento e a plena expressão de características positivas, como o alto grau de resistência, apresentado por indivíduos poliploides (Baduel et al., 2018).

## 6 POLIPLOIDIA E O MELHORAMENTO NUTRICIONAL PARA O ANIMAL

A indução à poliploidia gera, em sua grande maioria, uma ampliação da expressão fenotípica da planta, como no aumento da área foliar, seja através de uma maior quantidade de folíolos ou através das mesmas características sob o efeito “gigas”, gerando um significativo aumento em biomassa, importantes pela capacidade de reduzir a área destinada a pastagens, por exemplo (Pathak et al., 2015). Entretanto, se observada pelo aspecto anatômico e/ou fisiológico, a indução à formação de forrageiras poliploides pode influenciar diretamente no valor nutricional apresentado pela espécie vegetal em questão, através de uma ampliação na produção de proteínas presentes, o que se observa como uma característica benéfica. Atualmente, na literatura, existem protocolos que buscam aumentar o benefício nutricional de forrageiras, que apresentem boa palatabilidade, através de diferentes técnicas em melhoramento genético vegetal. Escaray e colaboradores (2014) realizaram cruzamentos manuais entre *Lotus tenuis* e *L. corniculatus* para a obtenção de um híbrido que mantivesse as características de interesse, como o aumento dos níveis de proteínas em órgãos comestíveis através do acúmulo de proantocianidinas (PAs) nas folhas de F1 e da progênie, sendo uma importante característica, capaz de reduzir a taxa de fermentação, consequentemente reduzindo a taxa de timpanismo e produção do gás metano por ruminantes, além da produção de rizomas herdada nas gerações posteriores, o que auxilia em uma facilitada propagação do híbrido, apresentando uma ferramenta valiosa e simples, capaz de auxiliar em um aumento nutricional para a dieta de herbívoros, além de aumentar a variabilidade genética para o gênero *Lotus*. Ainda que não tenha sido empregada nenhuma técnica que buscasse a duplicação do material genético das espécies em questão, a poliploidia aplicada ao híbrido, posteriormente, é uma ferramenta valiosa para restaurar o pareamento e a fertilidade, além de promover a heterozigose fixada e a estabilidade genômica, o que pode permitir que a nova linhagem tenha as qualidades já presentes aprimoradas (Soltis; Soltis, 2009).

Pesquisas demonstram uma crescente capacidade de alteração no perfil metabólico das plantas induzidas à poliploidia, com um aumento do seu valor nutritivo e mesmo sua competência na produção de compostos bioativos, podendo haver um considerável crescimento no conteúdo de proteínas, açúcares e carboidratos presentes nas folhas, ou mesmo uma importante ampliação na composição de pigmentos fotossintéticos, como o aumento em teores de clorofila (Mangena, 2023). De modo geral, características fenotípicas aprimoradas através da duplicação genômica são bem visadas por expandirem a quantidade de biomassa da planta, o que pode ser devido ao aumento da área foliar, capaz de gerar uma maior cobertura de dossel por consequência, sendo essas características observadas após a duplicação de *Medicago truncatula*, além de exprimir características já observadas em um triploide natural *Medicago scutellata*, o qual foi utilizado como um comparativo. Os tetraploides induzidos em *M. truncatula* apresentaram resultados de uma diminuição quantitativa em nódulos, o que demonstrou uma baixa eficiência no processo de fixação de nitrogênio (Innes et al., 2021). Entretanto, Forrester e Ashman (2018) descreveu que em diversas espécies fixadoras de nitrogênio, a função se torna mais eficiente, devido a alterações em tamanho e quantidade de nódulos, além da possibilidade de hospedarem rizóbios mais eficazes, o que pode garantir uma maior concentração de flavonoides e um aumento no teor de proteínas, sendo um resultado

importante, através do ponto de vista do melhoramento vegetal, para o futuro do cultivo de leguminosas forrageiras.

A literatura sugere que a indução à poliploidia é capaz de otimizar o metabolismo primário e secundário. Essas mudanças devem-se a uma maior atividade enzimática e a ajustes fisiológicos que aperfeiçoam o metabolismo vegetal, além da competência em modificar a expressão de genes, os quais são capazes de modular vias de biossíntese (Dhawan; Lavania, 1996). O considerável aumento na produção de alcaloides já é observado em diversas espécies e famílias vegetais fora de Fabaceae, sendo um composto nitrogenado utilizado como matéria-prima para a produção de aminoácidos (Madani et al., 2021). Nesse sentido, com as evidências de uma maior taxa na fixação de nitrogênio em leguminosas poliploides citadas anteriormente, faz-se uma ponte em que espécies forrageiras em Fabaceae induzidas à poliploidia apresentem uma taxa ainda maior na produção de alcaloides, levando a uma maior taxa na composição de proteínas, dessas espécies vegetais passadas pelo melhoramento através da duplicação genética. Entretanto, ainda não existem comprovações de que o aumento na produção de alcaloides e proteínas esteja relacionado à maior taxa de fixação de nitrogênio em Fabaceae, abrindo uma lacuna a ser preenchida através de futuras pesquisas que busquem evidenciar tal correlação.

## **7 POLIPLOIDIA E ESTRESSE AMBIENTAL**

Nos últimos 25 anos, têm se sucedido um crescente investimento em pesquisas voltadas à análise sobre os efeitos decorrentes a situações de estresse em espécimes vegetais (Karagüzel, 2025; Zhang et al., 2023). Situações validadas como estresse podem se dividir em estresse abiótico, o qual se caracteriza por eventos externos ambientais e físicos, como alterações em temperatura, salinidade e escassez hídrica, por exemplo (Zhang et al., 2023); e estresse biótico, sugerido pela intercorrência de outros organismos, como fungos, bactérias, animais ou mesmo outras plantas, sendo esses fatores antecessores à ocorrência de mudanças metabólicas, fisiológicas, genéticas, anatômicas, etc., as quais as plantas se submetem em busca de adaptabilidade que promova sua sobrevivência (Koziara-Ciupa; Trojak-Goluch, 2025). Ao considerar as atuais mudanças ambientais e climáticas, se faz de grande interesse observar o comportamento de plantas poliploides em condições de estresse, acima de tudo abiótico, em um comparativo às plantas diploides. Nesse mesmo sentido, existem evidências na literatura que comprovam formas em que a poliploidia pode se expressar após um período estressante, em que fatores como variações de temperatura e estresse hídrico, ou mesmo exposições a poluidores ambientais e herbicidas, expressem a formação de canais citomitóticos, como citado anteriormente (Pierre; De Sousa, 2011).

Indivíduos poliploides são comumente encontrados entre espécimes vegetais, considerado um fenômeno que ocorre naturalmente, principalmente entre as plantas, por apresentarem alta plasticidade. Foi observado por Yona e colaboradores (2012) que algumas aneuploidias, em um ou mais conjuntos cromossômicos, podem surgir como uma ferramenta à tolerância ao estresse abrupto, uma condição transitória, mas eficiente para tolerar condições extremas, como adaptabilidade à altas temperaturas, por exemplo. Entretanto, ao considerar plantas euploides, em que todos os seus conjuntos cromossômicos são igualmente alterados, em poliploides induzidos, por exemplo, há um vasto conhecimento já descrito na literatura de uma maior resistência à diferentes tipos de estresse em comparação a indivíduos diploides (Koziara-Ciupa; Trojak-Goluch, 2025; Li et al., 2024). A indução à poliploidia é uma ferramenta do melhoramento genético capaz de gerar alterações em diferentes órgãos e estruturas de uma planta, como já discutido anteriormente, capaz de promover uma menor perda de água, por exemplo, através do espessamento de folhas e cutículas, o que permite uma maior resistência à seca, e evita a perda de água (Koziara-Ciupa; Trojak-Goluch, 2025). Por apresentarem maior quantidade de material genético, há uma maior expressão de genes de

defesa, além de novas especializações gênicas, as quais podem ser essenciais para responder a condições de estresse específicas, bem como uma maior diversidade de genes que tenham maior reconhecimento por diferentes fatores bióticos, como patógenos, por exemplo, ou mesmo uma expressão elevada de genes que apresentem maior resistência à fatores abióticos (Koziara-Ciupa; Trojak-Goluch, 2025; Li et al., 2024). Em conjunto, as alterações morfológicas, anatômicas e fisiológicas são um adicional muito eficiente à resistência ao estresse, como a presença de folhas e caules mais espessos e um maior teor de clorofila, auxiliando na regulação térmica, bem como maior retenção de água e alta eficiência em osmorregulação, além de alterações metabólicas que atuam conjuntamente para que haja uma maior resistência, o que garante mais do que apenas a sobrevivência dos indivíduos, mas também sua permanência adaptada ao novo ambiente (Koziara-Ciupa; Trojak-Goluch, 2025).

No que diz respeito a estresse salino, por exemplo, há uma expectativa de que os solos destinados ao cultivo, estarão significativamente comprometidos em uma média de menos de 30 anos (Pi et al., 2015). Nesse sentido a aplicabilidade no cultivo de poliploides se faz essencial, tendo em vista diversas comprovações em haver uma melhor adaptabilidade dos indivíduos duplicados em comparação a indivíduos diploides, em que são demonstradas uma regulação osmótica aprimorada, hábil a reduzir o potencial hídrico, evitar a desidratação do indivíduo, além de uma redução na atividade de espécies reativas à oxigênio (ROS), capaz de proteger as células contra o estresse oxidativo, e uma maior eficácia no transporte de íons tóxicos, através de vacúolos especializados, evitando a citotoxicidade (Mangena; Mushadu, 2023). Ainda devido às expectativas ao futuro agrícola quanto aos efeitos das alterações climáticas que vêm afetando o mundo todo, a indução à poliploidia pode ser empregada como uma ferramenta essencial em casos de privação de recursos hídricos, o qual pode levar a estresses em deficiência de água, tendo em vista a maior produtividade em razão aos efeitos morfológicos gerados pela duplicação de espécimes vegetais, que se apresenta como uma saída viável na redução em competitividade por recursos em casos extremos de escassez (Peer et al., 2021). A combinação de estresse hídrico e estresse térmico afetam conspicuamente a produtividade nutricional de plantas presentes em Fabaceae, representada por uma redução no rendimento de sementes de forma quantitativa e qualitativa, entretanto, tal caracterização pode ser afirmada apenas para indivíduos diploides, haja vista a lacuna de informações sobre os efeitos em leguminosas poliploides (Mangena; Mushadu, 2023). Nesse sentido, faz-se necessário reiterar a urgência em amplificar pesquisas que visam a análise de forma mais precisa aos efeitos de condições estressantes na adaptabilidade, funções metabólicas e produtividade de espécies forrageiras em Fabaceae, haja visto a baixa descrição na literatura sobre os efeitos do estresse em espécies presentes na família, buscando auxiliar positivamente novos programas em duplicação de leguminosas, através de uma aplicabilidade mais precisa e eficaz, ao considerar o atual contexto de instabilidade climática.

## **8 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A indução à poliploidia demonstra-se uma ferramenta valiosa no melhoramento vegetal de espécies de leguminosas forrageiras. Tal metodologia confere diversas vantagens agronômicas, as quais podem ser amplamente exploradas, otimizando funções metabólicas, quantidade de biomassa, tecidos e órgãos maiores, além de uma ampla adaptabilidade a condições adversas, como estresses abióticos que, no caso de leguminosas, são potencialmente valiosas para a possibilidade de um maior aumento em teor de proteínas. Além disso, com os avanços nas pesquisas, espera-se que haja maiores investimentos para a expansão em estudos para a área, haja visto o grande potencial alcançado ao longo de diversas pesquisas realizadas nos últimos 25 anos, buscando alcançar o balanceamento entre a alta produtividade e a sustentabilidade, resilientes às mudanças climáticas.

## REFERÊNCIAS

ARDABILI, Giti Sotoudeh; ZAKARIA, Rasool Asghari; ZARE, Nasser. In vitro induction of polyploidy in *Sorghum bicolor* L. *Cytologia*, v. 80, n. 4, p. 495–503, 1 dez. 2015.

BADUEL, Pierre *et al.* The “Polyploid Hop”: Shifting challenges and opportunities over the evolutionary lifespan of genome duplications. *Frontiers in Ecology and Evolution* Frontiers Media S.A., , 20 ago. 2018.

BEGNA, Temesgen. Genetic Consequence of Polyploidy in Plant Breeding. [www.arcjournals.org](http://www.arcjournals.org) International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences, v. 10, n. 2, p. 2454–6224, 2024.

BIONDO, Elaine; MIOTTO, Sílvia Teresinha Sffoggia; SCHIFINO-WITTMANN, Maria Teresa. Citogenética de espécies arbóreas da subfamília Caesalpinoideae – Leguminosae do Sul do Brasil. *Ciência Florestal*, v. 15, p. 241–248, 2005.

BRUIJNS, Brigitte *et al.* Performance of Spectrophotometric and Fluorometric DNA Quantification Methods. *Analytica*, v. 3, n. 3, p. 371–384, 1 set. 2022.

CAMPOS, J. M. S. *et al.* Short Communication In vitro induction of hexaploid plants from triploid hybrids of *Pennisetum purpureum* and *Pennisetum glaucum* The Authors Journal compilation Ó. [S.l.]: Blackwell Verlag, 2009. Disponível em: <[www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)>.

CAPOMACCIO, Stefano; VERONESI, Fabio; ROSELLINI, Daniele. Polyploidization and Gene Expression in *Medicago sativa*. *In: Sustainable use of Genetic Diversity in Forage and Turf Breeding.* [S.l.]: Springer Netherlands, 2010. p. 397–401.

CHENG, Acga *et al.* A Reappraisal of Polyploidy Events in Grasses (Poaceae) in a Rapidly Changing World. *Biology* MDPI, , 1 maio 2022.

DE JESUS, Manuela Ramos da Silva *et al.* Pré-seleção de poliploides por métodos foliares em acessos de bananeira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 12, p. 1957–1963, 2016.

DHAWAN, O. E.; LAVANIA, U. C. Enhancing the productivity of secondary metabolites via induced polyploidy: a review *Euphytica*. [S.l.: S.n.].

DOLEŽEL, Jaroslav; GREILHUBER, Johann; SUDA, Jan. Estimation of nuclear DNA content in plants using flow cytometry. *Nature Protocols*, v. 2, n. 9, p. 2233–2244, set. 2007.

DOYLE, Jeff J.; COATE, Jeremy E. Polyploidy, the nucleotype, and novelty: The impact of genome doubling on the biology of the cell. *International Journal of Plant Sciences* University of Chicago Press, , 1 jan. 2019.

EL-NABY, Zeinab Mohamed Abd *et al.* Colchicine Induction of Polyploidy in Egyptian clover Genotypes. *Egyptian Clover Genotypes J Am Sci*, v. 8, n. 10, p. 1545–1003, 2012.

ESCARAY, Francisco J. *et al.* Lotus tenuis x L. corniculatus interspecific hybridization as a means to breed bloat-safe pastures and gain insight into the genetic control of proanthocyanidin biosynthesis in legumes. *BMC Plant Biology*, v. 14, n. 1, 3 fev. 2014.

FORRESTER, Nicole J.; ASHMAN, Tia Lynn. The direct effects of plant polyploidy on the legume-rhizobia mutualism. *Annals of Botany* Oxford University Press, , 12 fev. 2018.

FRANK, Margaret H.; CHITWOOD, Daniel H. Plant chimeras: The good, the bad, and the ‘Bizzaria’. *Developmental Biology* Academic Press Inc., , 1 nov. 2016.

FUCHS-FERRAZ, Maria Cecília Perantoni; DE SOUSA, Saulo Marçal; VICCINI, Lyderson Facio. Chromosome number in meiotic stage cells and pollen viability of *Vanhouttea hilariana* Chautems, *Vanhouttea brueggeri* Chautems and an interespecific hybrid (Gesneriaceae). [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/262794898>>.

GŁOWACKA, K.; JEZOWSKI, S.; KACZMAREK, Z. In vitro induction of polyploidy by colchicine treatment of shoots and preliminary characterisation of induced polyploids in two *Miscanthus* species. *Industrial Crops and Products*, v. 32, n. 2, p. 88–96, set. 2010.

INNES, Lauren A. *et al.* The effect of ploidy number on vigor, productivity, and potential adaptation to climate change in annual *Medicago* species. *Crop Science*, v. 61, n. 1, p. 89–103, 1 jan. 2021.

ISHIGAKI, Genki *et al.* Induction of tetraploid ruzigrass (*Brachiaria ruziziensis*) plants by colchicine treatment of in vitro multiple-shoot clumps and seedlings. *Grassland Science*, v. 55, n. 3, p. 164–170, 2009.

JOSHI, Prashant; VERMA, Rakesh C. High Frequency Production of Colchicine Induced Autotetraploids in Faba Bean (*Vicia faba* L.). [*S.l.: S.n.*].

KARAGÜZEL, Ümmü Özgül. Blossoms amid drought: a bibliometric mapping of research on drought stress in ornamental plants (1995–2025). *Frontiers in Plant Science* *Frontiers Media SA*, , 2025.

KOENEN, Erik J. M. *et al.* The Origin of the Legumes is a Complex Paleopolyploid Phylogenomic Tangle Closely Associated with the Cretaceous-Paleogene (K-Pg) Mass Extinction Event. *Systematic Biology*, v. 70, n. 3, p. 508–526, 1 maio 2021.

KOZIARA-CIUPA, Marta; TROJAK-GOLUCH, Anna. The Effect of Polyploidisation on the Physiological Parameters, Biochemical Profile, and Tolerance to Abiotic and Biotic Stresses of Plants. *Agronomy* *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, , 1 ago. 2025.

LI, Jinglong *et al.* The nearly complete assembly of the *Cercis chinensis* genome and Fabaceae phylogenomic studies provide insights into new gene evolution. *Plant Communications*, v. 4, n. 1, 9 jan. 2023.

LI, Xiaoying *et al.* Polyploidization: A Biological Force That Enhances Stress Resistance. *International Journal of Molecular Sciences* *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, , 1 fev. 2024.

LIU, Pan Pan *et al.* Genome Assemblies of Two *Ormosia* Species: Gene Duplication Related to Their Evolutionary Adaptation. *Agronomy*, v. 13, n. 7, 1 jul. 2023.

MADANI, Hadi *et al.* Effect of Polyploidy Induction on Natural Metabolite Production in Medicinal Plants. v. 11, p. 899, 2021.

MANGENA, Phetole. Impact of Polyploidy Induction for Salinity Stress Mitigation in Soybean (*Glycine max* L. Merrill). PlantsMDPI, , 1 mar. 2023.

MANGENA, Phetole; MUSHADU, Pirtunia Nyadzani. Colchicine-Induced Polyploidy in Leguminous Crops Enhances Morpho-Physiological Characteristics for Drought Stress Tolerance. LifeMultidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 out. 2023.

MARZOUGUI, Nidhal *et al.* Polyploidy induction of Tunisian *Trigonella foenumgraecum* L. populations. African Journal of Biotechnology, v. 10, n. 43, p. 8570–8577, 2011.

MATÍAS, Morales *et al.* Karyotype studies in *Mimosa* (Mimosoideae, Leguminosae) from Southern South America and ecological and taxonomic relationships. Caryologia, v. 64, n. 2, p. 203–214, 2014.

MOGHBEL, Nahid; BORUJENI, Maasoumeh Khalili; BERNARD, Françoise. Colchicine effect on the DNA content and stomata size of *Glycyrrhiza glabra* var. *glandulifera* and *Carthamus tinctorius* L. cultured in vitro. Journal of Genetic Engineering and Biotechnology, v. 13, n. 1, p. 1–6, 1 jun. 2015.

MURASHIGE, Toshio; SKOOG, Folke. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. Physiologia Plantarum, v. 15, n. 3, p. 473–497, 1962.

NAWALKAR, Poonam; KUMAR VERMA, Sunil. Polyploidy breeding in forage crops: A review. International Journal of Statistics and Applied Mathematics, v. 8, n. 5, p. 1139–1145, 2023.

PATHAK, Shalini *et al.* Multifoliate leaf formation in induced tetraploids of *Trifolium alexandrinum* L. Cytologia, v. 80, n. 1, p. 59–66, 2015.

PÉCRIX, Yann *et al.* Polyploidization mechanisms: Temperature environment can induce diploid gamete formation in *Rosa* sp. *Journal of Experimental Botany*, v. 62, n. 10, p. 3587–3597, jun. 2011.

PEREIRA, Roselaine Cristina *et al.* Duplicação cromossômica de gramíneas forrageiras: uma alternativa para programas de melhoramento genético. 2012a.

PEREIRA, Roselaine Cristina *et al.* Duplicação cromossômica de gramíneas forrageiras: uma alternativa para programas de melhoramento genético. 2012b.

PEREIRA, Roselaine Cristina *et al.* Duplicação cromossômica em *Lolium multiflorum* Lam. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* Brazilian Society of Plant Breeding, , 2014.

PI, Erxu *et al.* Mechanisms of soybean roots' tolerances to salinity revealed by proteomic and phosphoproteomic comparisons between two cultivars. [*S.l.*]: MCP Papers in Press, 2015.

PIERRE, Patrícia Maria Oliveira; DE SOUSA, Saulo Marçal. *Citomixia em plantas: causas, mecanismos e consequências*. 2011.

POOSAMART, Worames; SINIRI, Naris; SIMIA, Sakunkan. Effects of Colchicine Concentration Level and Soaking Period to Induce Polyploid Mutation on Five Forage Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) Cultivars. *J. Mahanakorn Vet. Med.*, v. 10, n. 2, p. 99–110, 2015.

RAUF, Saeed *et al.* Scope of Whole Genome Duplication in Forages: A Plant Breeder Perspective. , 6 jan. 2021. Disponível em:  
<<https://www.preprints.org/manuscript/202101.0110/v1>>

SCHIFINO-WITTMANN, Maria T. Poliploidia e seu impacto na origem e evolução das plantas silvestres e cultivadas. *R. bras. Agrociência*, v. v.10, n. 2, p. 151–157, 2004.

SIMIONI, Carine; BORGES DO VALLE, Cacilda. Meiotic analysis in induced tetraploids of *Brachiaria decumbens* Stapf *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. [*S.l.*: *S.n.*].

SINGH, Shefali; KUMAR, Girjesh. Report of genomic doubling in *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub. (Fabaceae): salient features and effects. *Caryologia*, v. 77, n. 3, p. 63–71, 2024.

SOLTIS, Pamela S.; SOLTIS, Douglas E. The role of hybridization in plant speciation. *Annual Review of Plant Biology*, v. 60, p. 561–588, jun. 2009.

SUPPA, Robert W. *et al.* Autotetraploid Induction of Three A-Genome Wild Peanut Species, *Arachis cardenasii*, *A. correntina*, and *A. diogoi*. *Genes*, v. 15, n. 3, 1 mar. 2024.

TIMBÓ, Ana Luiza Oliveira *et al.* Obtaining tetraploid plants of ruzigrass (*Brachiaria ruziziensis*). *Revista Brasileira de Zootecnia*, 2014.

VALLE, Cacilda Borges do; JANK, Liana; RESENDE, Rosangela Maria Simeão. O melhoramento de forrageiras tropicais no Brasil. 2009.

VAN DE PEER, Yves *et al.* Polyploidy: an evolutionary and ecological force in stressful times. *Plant Cell* Oxford University Press, , 1 jan. 2021.

VICHIATO, MiVia Rosa De Medeiros *et al.* Efeitos morfológicos da poliplodia induzida em *dendrobium nobile* lindl. (orchidaceae). *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 14, n. 3, p. 154–159, 2014.

VIEIRA, Manoela Colpes *et al.* Polyploidy: Perspectives and practical applications for genetic improvement. *In: Agricultural and Biological Sciences: Foundations and Applications*. [S.l.]: Seven Editora, 2024.

WOJCIECHOWSKI, Martin F.; LAVIN, Matt; SANDERSON, Michael J. A phylogeny of legumes (Leguminosae) based on analysis of the plastid *matk* gene resolves many well-supported subclades within the Family. *American Journal of Botany*. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<http://www.treebase.org/>>.

WU, F. H. *et al.* Induction and identification of *Stylosanthes guianensis* tetraploids. *Genetics and Molecular Research*, v. 14, n. 4, p. 12692–12698, 19 out. 2015.

YONA, Avihu H. *et al.* Chromosomal duplication is a transient evolutionary solution to stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 109, n. 51, p. 21010–21015, 18 dez. 2012.

YOON, Sangwoong *et al.* Generation of Octaploid Switchgrass by Seedling Treatment with Mitotic Inhibitors. *Bioenergy Research*, v. 10, n. 2, p. 344–352, 1 jun. 2017.

YU, CHANG YEON *et al.* Chromosome doubling of the bioenergy crop, *Miscanthus × giganteus*. *GCB Bioenergy*, v. 1, n. 6, p. 404–412, dez. 2009.

ZHANG, Han *et al.* Crucial Abiotic Stress Regulatory Network of NF-Y Transcription Factor in Plants. *International Journal of Molecular Sciences* Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 mar. 2023a.

ZHANG, Rui *et al.* Research on Salt Stress in Rice from 2000 to 2021: A Bibliometric Analysis. *Sustainability (Switzerland)* MDPI, , 1 mar. 2023b.

ZIECH, Ana Regina Dahlem *et al.* Proteção do solo por plantas de cobertura de ciclo hibernar na região Sul do Brasil. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 50, n. 5, p. 374–382, 2015.