



INSTITUTO CALLEN
DE EDUCAÇÃO CIENTÍFICA

**INVISTA NA SUA
FORMAÇÃO CIENTÍFICA**

Formação científica e desenvolvimento acadêmico

APOSTILA DIDÁTICA

Resistência Genética a Doenças e Pragas

Estratégias de melhoramento e bases da interação planta-patógeno

Série: Genética e Melhoramento de Plantas

Francisco Carlos da Silva
Instituto Callen de Educação Científica

1ª edição

Ji-Paraná – RO

APOSTILA DIDÁTICA

Resistência Genética a Doenças e Pragas
Estratégias de melhoramento e bases da interação planta-patógeno

Francisco Carlos da Silva
Instituto Callen de Educação Científica

Ji-Paraná – RO
2026

© 2026 – Francisco Carlos da Silva

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida ou transmitida por qualquer meio ou processo sem autorização do autor.

Autor

Francisco Carlos da Silva

Diagramação

Instituto Callen de Educação Científica

Instituição

Instituto Callen de Educação Científica

ISBN: 978-65-02-00069-4

Ji-Paraná – RO
Brasil
2026

Sumário

	Apresentação.....	5
1	Importância da resistência genética na agricultura moderna.....	7
2	Interação planta–patógeno e o modelo gene-a-gene.....	8
3	Coevolução, variabilidade do patógeno e quebra de resistência.....	10
4	Fontes de variabilidade genética para resistência.....	11
5	Introgressão gênica, retrocruzamento e arrasto gênico.....	12
6	Resistência qualitativa e quantitativa: fundamentos e implicações.....	14
7	Estratégias de seleção: fenotipagem, piramidização e ferramentas moleculares....	16
8	Resistência durável, manejo integrado e aplicações modernas.....	17
9	Síntese final.....	19
10	Exercícios objetivos comentados.....	19
11	Atividade de fixação – avaliação formative.....	20
12	Referências básicas.....	20

Apresentação

O melhoramento para resistência a doenças e pragas constitui uma das áreas mais estratégicas do melhoramento genético vegetal contemporâneo. Em sistemas agrícolas intensivos, as perdas provocadas por fungos, bactérias, vírus, nematoides, insetos e outros organismos fitófagos comprometem produtividade, qualidade do produto, estabilidade de rendimento e sustentabilidade econômica da produção. Nesse contexto, a resistência genética deixa de ser apenas um atributo desejável e passa a representar um componente central da segurança alimentar, da redução do uso de agroquímicos e da construção de sistemas agrícolas mais resilientes.

A importância desse tema torna-se ainda maior quando se considera que a interação entre planta e agente agressor é dinâmica e evolutiva. A introdução de uma cultivar resistente pode reduzir drasticamente a severidade de uma doença em determinado momento; contudo, o próprio sucesso dessa cultivar pode aumentar a pressão de seleção sobre a população do patógeno, favorecendo o aparecimento de raças ou biótipos capazes de superar os genes de resistência utilizados. Dessa forma, o melhorista não trabalha apenas com herança mendeliana ou com técnicas de cruzamento, mas com uma verdadeira disputa evolutiva entre o genótipo da planta e a capacidade adaptativa do agente biótico.

Esta apostila foi organizada para aprofundar os fundamentos genéticos, evolutivos e metodológicos do melhoramento para resistência a doenças e pragas. O conteúdo integra conceitos clássicos, como resistência qualitativa e quantitativa, modelo gene-a-gene, retrocruzamento e introgressão gênica, com abordagens modernas, como seleção assistida por marcadores, mapeamento de QTLs, genômica aplicada, piramidização de genes de resistência e uso de edição gênica. Ao longo do texto, busca-se articular teoria genética, aplicação agronômica e raciocínio estratégico, de modo que o estudante compreenda não apenas o que é resistência genética, mas como ela é prospectada, transferida, combinada, validada e mantida em programas reais de melhoramento.

Além da fundamentação teórica, a apostila também apresenta sínteses conceituais, quadros comparativos, exercícios comentados e uma atividade formativa aplicada. O objetivo é oferecer um material didático robusto, útil tanto para a revisão conceitual quanto para a preparação de aulas, estudos dirigidos e análises de situações-problema em melhoramento vegetal.

Objetivos de aprendizagem

Ao final desta unidade, o estudante deverá ser capaz de:	
✓	Diferenciar resistência qualitativa e quantitativa, relacionando suas bases genéticas e implicações agronômicas.
✓	Explicar o modelo gene-a-gene e a dinâmica de coevolução entre planta e patógeno/praga.
✓	Aplicar os conceitos de introgressão gênica e retrocruzamento à incorporação de genes de resistência.
✓	Analisar o arrasto gênico, a quebra de resistência e as estratégias para redução desses riscos.
✓	Integrar seleção convencional, MAS, QTLs, genômica e piramidização de genes em programas de melhoramento.
✓	Avaliar criticamente estratégias para obtenção de resistência durável em diferentes sistemas reprodutivos.

Visão geral das estratégias de resistência

Eixo conceitual	Lógica biológica	Estratégia de melhoramento	Ponto crítico
Resistência qualitativa	Gene(s) maior(es) com reconhecimento específico	Retrocruzamento, introgressão e piramidização	Maior risco de quebra por adaptação do patógeno
Resistência quantitativa	Múltiplos genes/QTLs de pequeno efeito	Seleção recorrente, MAS, seleção genômica e recombinação	Expressão parcial e dependência de boa fenotipagem
Fontes de resistência	Germoplasma, parentes silvestres, landraces e mutações	Triagem, cruzamentos dirigidos e recuperação do fundo elite	Arrasto gênico e dificuldade de transferência
Durabilidade	Uso estratégico dos genes no tempo e no espaço	Combinação genética + manejo integrado	Pressão de seleção favorece variantes virulentas

1. Importância da resistência genética na agricultura moderna

O melhoramento para resistência a doenças e pragas é uma resposta genética a um dos maiores fatores de instabilidade da agricultura. Em praticamente todas as cadeias produtivas, os agentes bióticos reduzem a eficiência do sistema ao comprometer estabelecimento da lavoura, vigor vegetativo, área fotossintética, enchimento de grãos, qualidade industrial e longevidade da planta. Em muitos casos, a resistência genética é mais econômica e previsível do que o controle químico isolado, especialmente quando se consideram custos crescentes de defensivos, surgimento de resistência a moléculas químicas, exigências regulatórias e impactos ambientais.

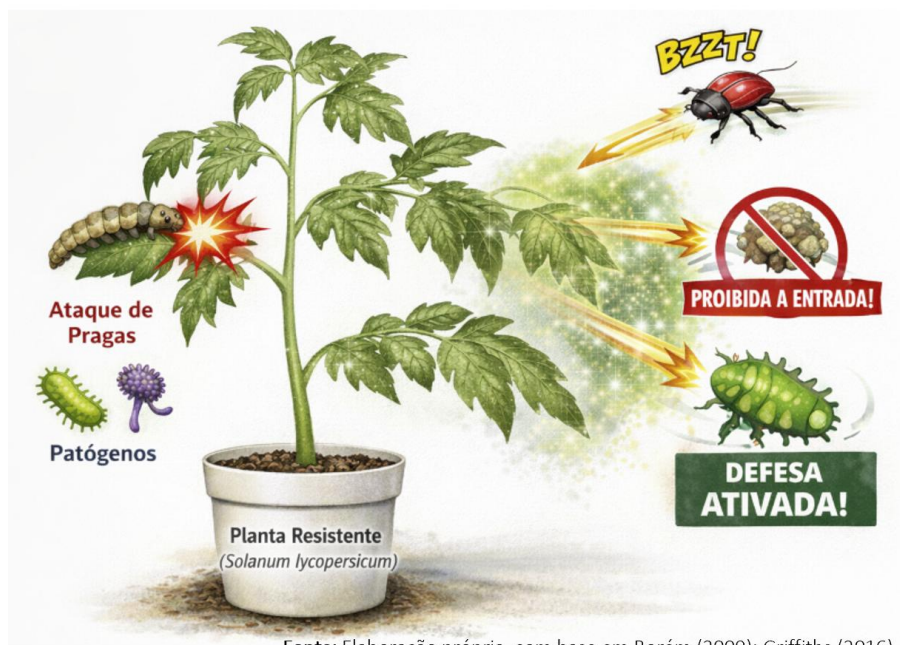


Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).

Do ponto de vista agrônomo, a resistência genética não significa necessariamente eliminar o patógeno do agroecossistema. Em termos funcionais, uma planta resistente é aquela capaz de impedir ou reduzir infecção, colonização, reprodução do patógeno ou intensidade do dano causado pela praga. Isso pode ocorrer por barreiras morfológicas, compostos químicos constitutivos, respostas induzidas, reconhecimento molecular ou redução da aptidão do agressor sobre o hospedeiro. O objetivo do melhorista é incorporar essas respostas a genótipos agronomicamente competitivos, criando cultivares mais estáveis ao longo de safras e ambientes.

Além da dimensão produtiva, a resistência genética é um componente da agricultura sustentável. Cultivares resistentes tendem a reduzir número de aplicações químicas, exposição ocupacional, resíduos em alimentos e contaminação ambiental. Em sistemas de

manejo integrado, a resistência genética atua como tecnologia preventiva e estrutural, ou seja, um recurso incorporado à semente que acompanha a planta durante todo o ciclo. Por isso, ela deve ser compreendida como um investimento de longo prazo em resiliência produtiva.



Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).

2. Interação planta–patógeno e o modelo gene-a-gene

A base conceitual clássica do melhoramento para resistência está na interação entre genes da planta e genes do agente agressor. O modelo gene-a-gene, associado aos trabalhos de Flor, propõe que para determinado gene de resistência na planta existe, em muitos sistemas, um gene correspondente de avirulência no patógeno. Quando esse reconhecimento específico ocorre, uma cascata de defesa é ativada, limitando o estabelecimento da doença. Essa lógica explica por que determinadas cultivares são resistentes apenas a algumas raças de um mesmo patógeno.

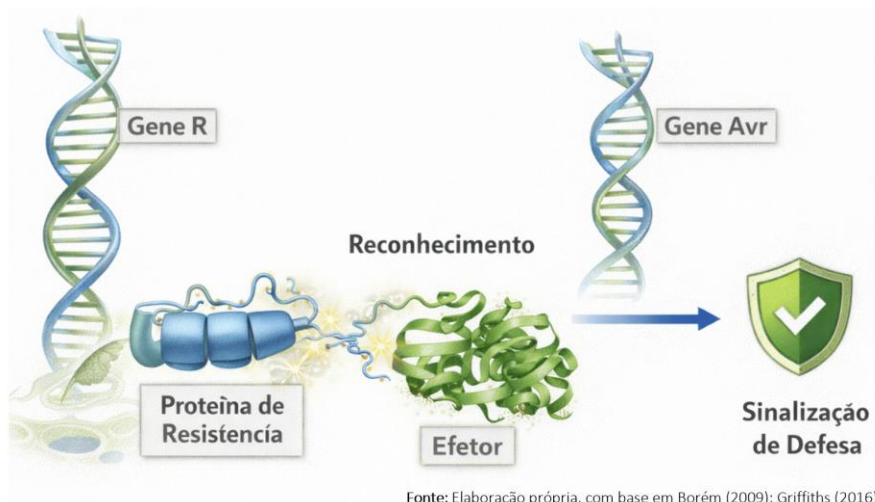
O reconhecimento gene-a-gene mostra que a resistência qualitativa é, em grande parte, um fenômeno relacional e não absoluto. O mesmo gene R pode ser extremamente eficiente frente a uma raça avirulenta e completamente ineficaz diante de uma raça virulenta. Assim, a eficácia do genótipo vegetal depende da composição genética da população do patógeno presente no ambiente. Essa dependência é central para o raciocínio do melhorista,

pois significa que a resistência não pode ser avaliada apenas em termos de presença de um gene, mas em relação à variabilidade biológica do agente agressor.



Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).

Em nível evolutivo, esse sistema estabelece uma corrida armamentista contínua. Ao introduzir cultivares resistentes em larga escala, o agricultor exerce pressão seletiva sobre o patógeno, favorecendo indivíduos capazes de escapar do reconhecimento. Consequentemente, a compreensão do modelo gene-a-gene deve ser articulada com o conceito de coevolução e com a necessidade de estratégias mais duráveis, que reduzam a probabilidade de ruptura rápida da resistência.

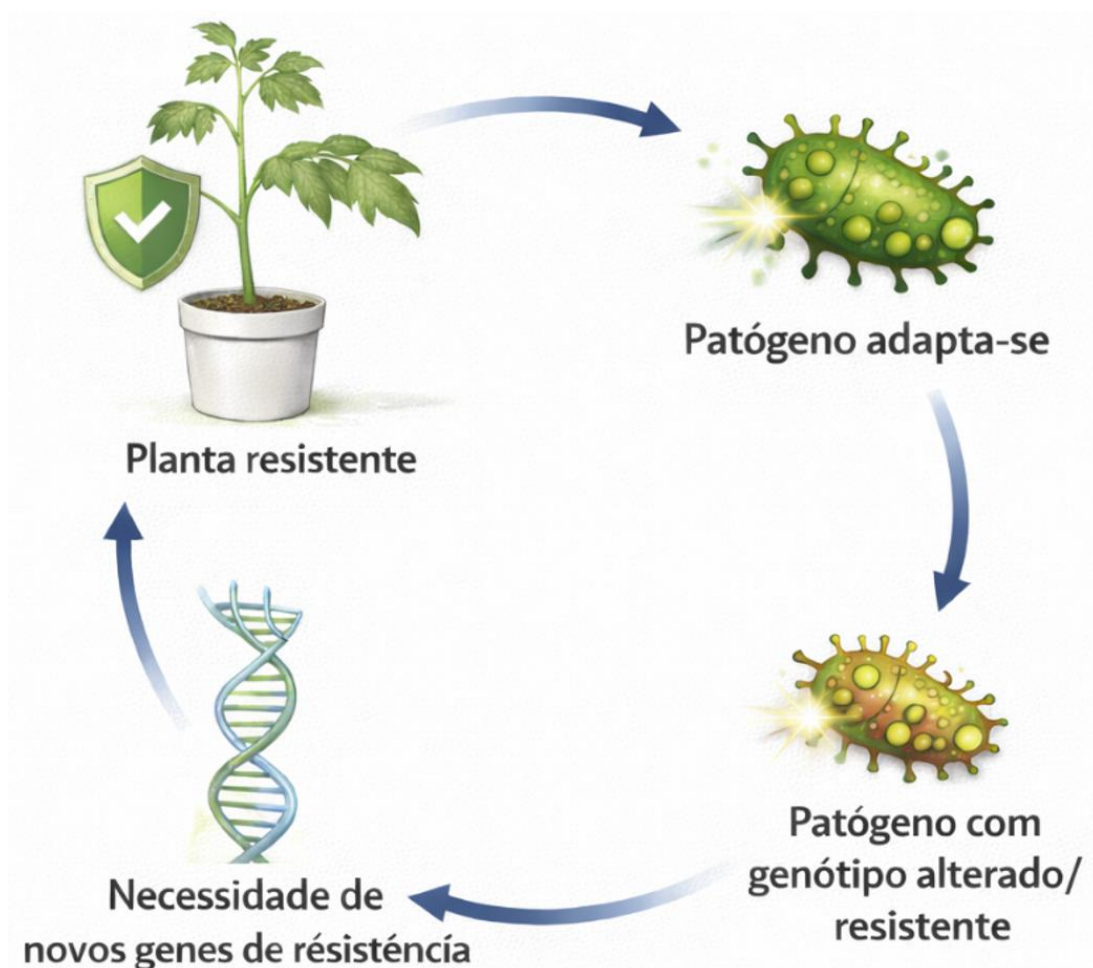


Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).

3. Coevolução, variabilidade do patógeno e quebra de resistência

A dinâmica entre planta e patógeno não é estática. Fungos, bactérias, vírus, nematoides e insetos-praga apresentam mecanismos de geração de variabilidade, como mutação, recombinação, reprodução rápida, fluxo gênico e forte multiplicação populacional. Isso permite que novas raças fisiológicas, biótipos ou variantes virulentas surjam e se tornem frequentes quando a paisagem agrícola passa a ser dominada por um único perfil de resistência.

A chamada quebra de resistência ocorre quando uma cultivar inicialmente eficiente passa a apresentar suscetibilidade após algumas safras. Esse processo não significa que a planta perdeu seus genes de resistência; significa que a população do patógeno mudou. Em outras palavras, o uso repetido de um mesmo gene R em grandes áreas seleciona precisamente os indivíduos do patógeno capazes de superar esse gene. O fenômeno é, portanto, uma consequência previsível da evolução sob pressão de seleção.



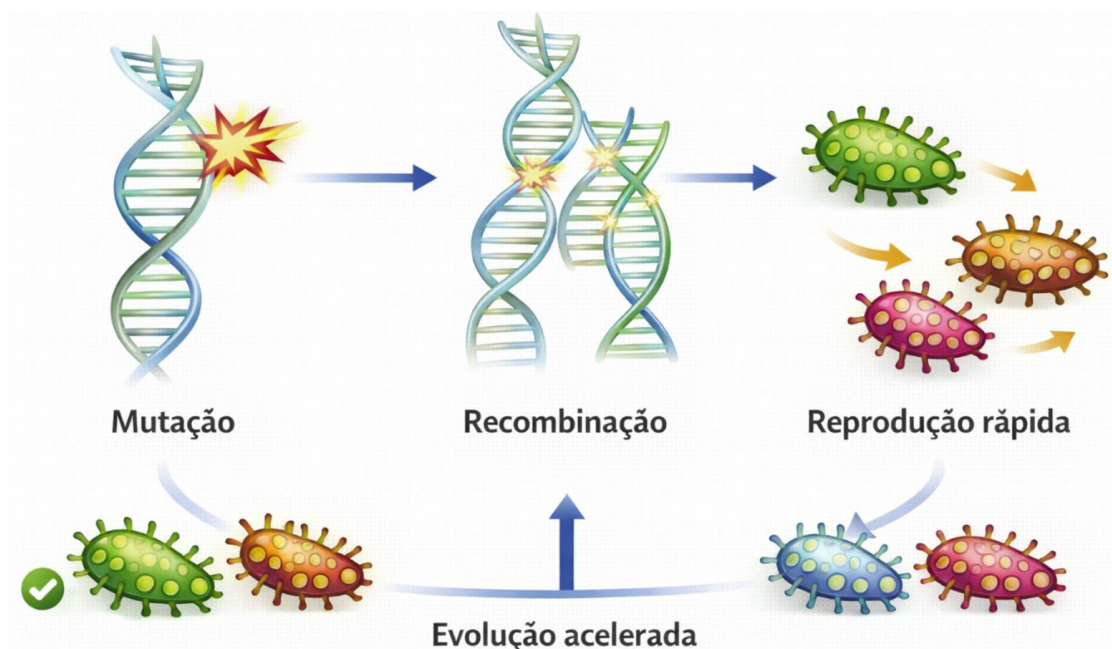
Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).

Esse ponto tem enorme relevância prática: o melhoramento para resistência não pode ser planejado como mera transferência de um gene favorável. É necessário projetar o comportamento do sistema ao longo do tempo. A variabilidade do patógeno, a escala espacial de uso da cultivar, a frequência de raças virulentas e a integração com o manejo agrônomo determinam se uma resistência será durável ou apenas temporária.

4. Fontes de variabilidade genética para resistência

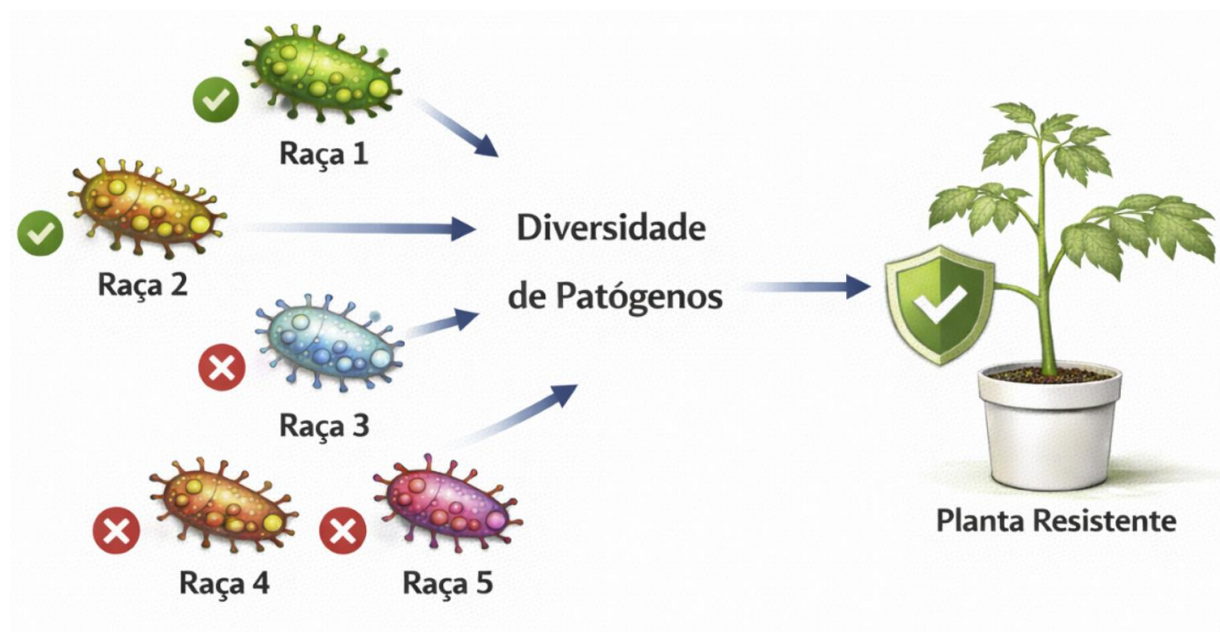
O primeiro passo de um programa de resistência é a identificação de fontes gênicas adequadas. Essas fontes podem estar em bancos de germoplasma, variedades locais, linhagens experimentais, materiais exóticos, parentes silvestres e mutações espontâneas ou induzidas. Em muitos casos, os centros de origem e diversificação da cultura concentram alelos de resistência que coevoluíram com populações locais de patógenos, tornando-se recursos estratégicos para o melhoramento.

A prospecção dessas fontes exige triagem criteriosa, conhecida como screening. Nessa etapa, o sucesso depende de inoculação ou infestação padronizada, identificação das raças presentes, escolha de ambientes de seleção e utilização de escalas confiáveis de severidade ou dano. Uma triagem mal padronizada pode levar a falsos resistentes ou falsos suscetíveis. Por isso, o trabalho do melhorista precisa ser integrado ao da fitopatologia, da entomologia e, em alguns casos, da nematologia.



Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).

Os parentes silvestres representam fontes valiosas de genes de resistência e de combinações gênicas raramente presentes em cultivares comerciais. Contudo, sua utilização traz desafios adicionais, como baixa adaptação agronômica, incompatibilidades de cruzamento e transferência simultânea de regiões cromossômicas indesejáveis. Ainda assim, eles seguem sendo insumos essenciais para ampliar a base genética de resistência.



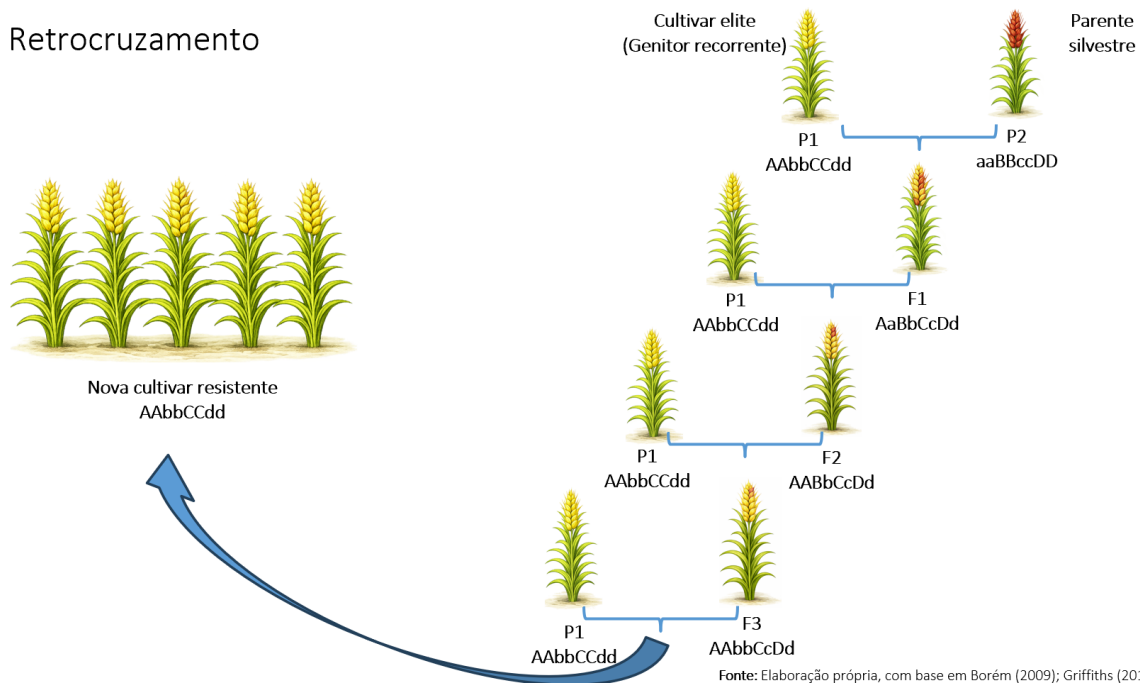
Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).

5. Introgressão gênica, retrocruzamento e arrasto gênico

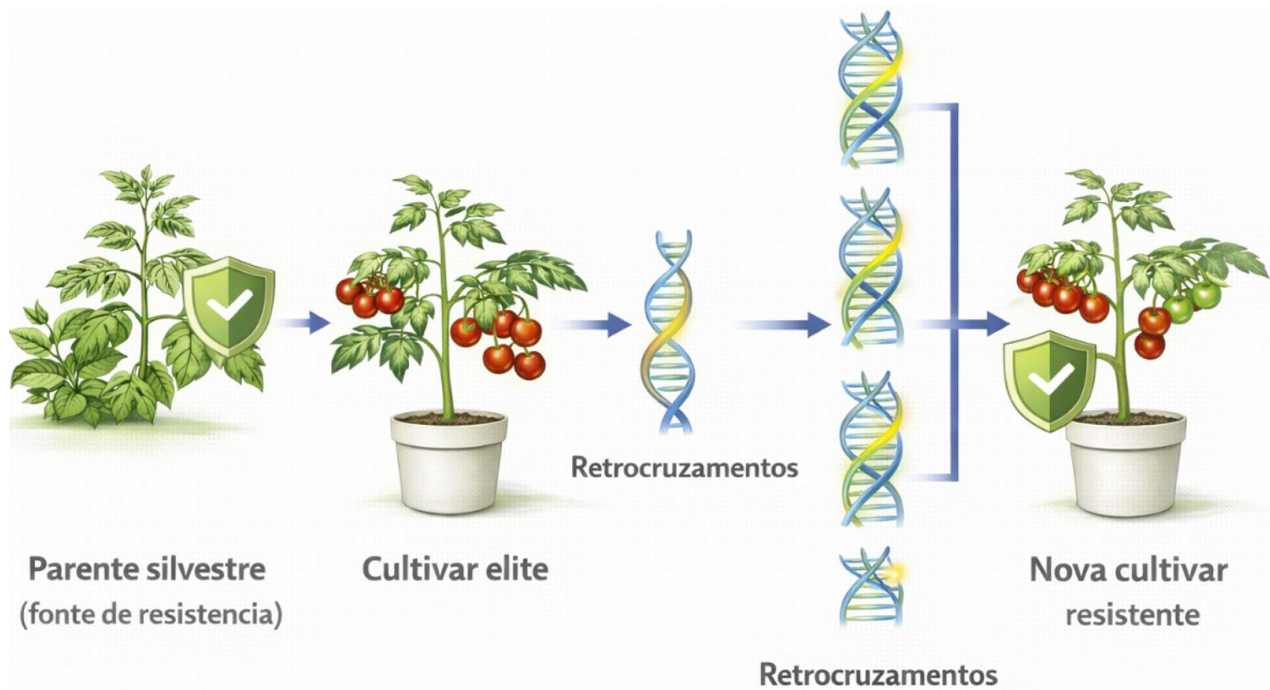
Quando uma fonte de resistência está em um material agronomicamente inferior, o desafio passa a ser transferir o gene alvo para uma cultivar elite mantendo o máximo do fundo genético original. O método clássico para isso é o retrocruzamento. Nele, o melhorista cruza o genitor elite com o doador de resistência e, nas gerações seguintes, volta a cruzar os descendentes portadores do gene com o genitor elite recorrente. A cada ciclo, seleciona-se o gene de resistência e aumenta-se a proporção do genoma elite recuperado.

Essa lógica é extremamente útil para resistência qualitativa monogênica ou oligogênica, especialmente em espécies autógamas. Entretanto, o retrocruzamento não transfere apenas o gene de interesse; ele tende a carregar junto um segmento cromossômico do doador. Esse fenômeno é conhecido como arrasto gênico ou linkage drag. Em termos práticos, pode significar a incorporação simultânea de alelos indesejáveis ligados ao gene de resistência, como menor produtividade, pior qualidade ou atraso no ciclo.

Retrocruzamento

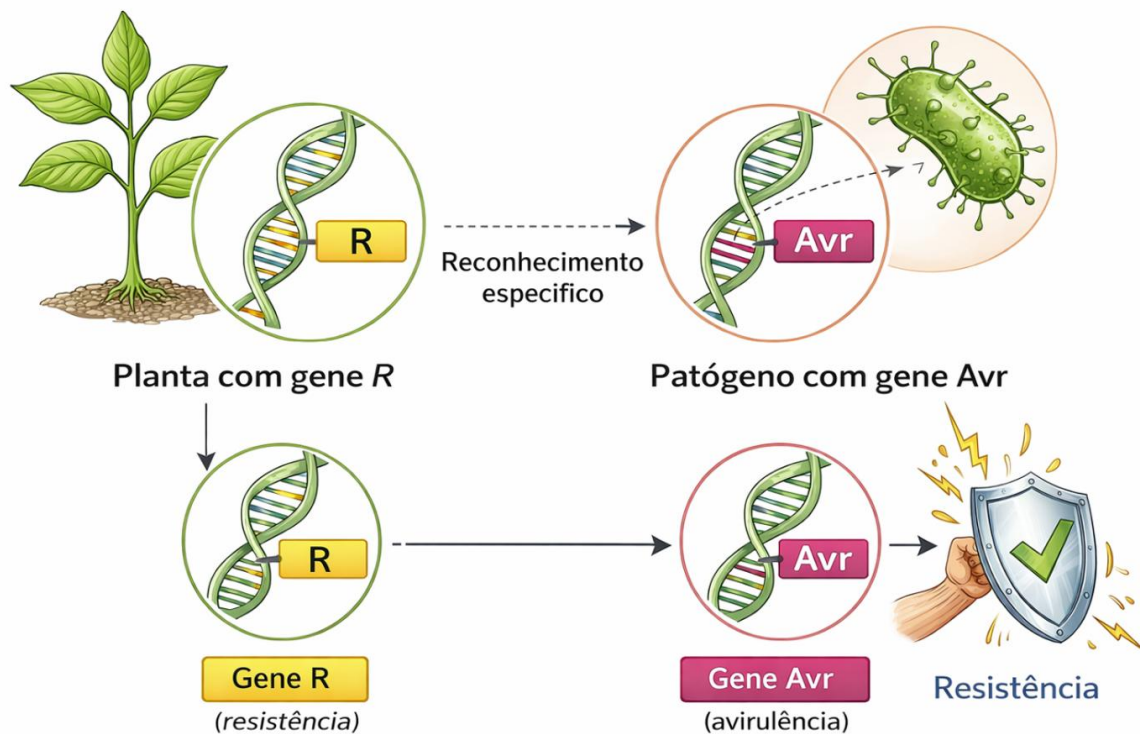


Para reduzir esse problema, o programa depende de recombinação e seleção ao longo dos ciclos. O uso de marcadores moleculares torna essa etapa mais eficiente, pois permite selecionar indivíduos que mantêm o gene R, mas já apresentam segmento introgressado menor, aumentando a recuperação do perfil elite. Assim, a introgressão bem-sucedida exige equilíbrio entre sanidade genética e desempenho agrônômico.

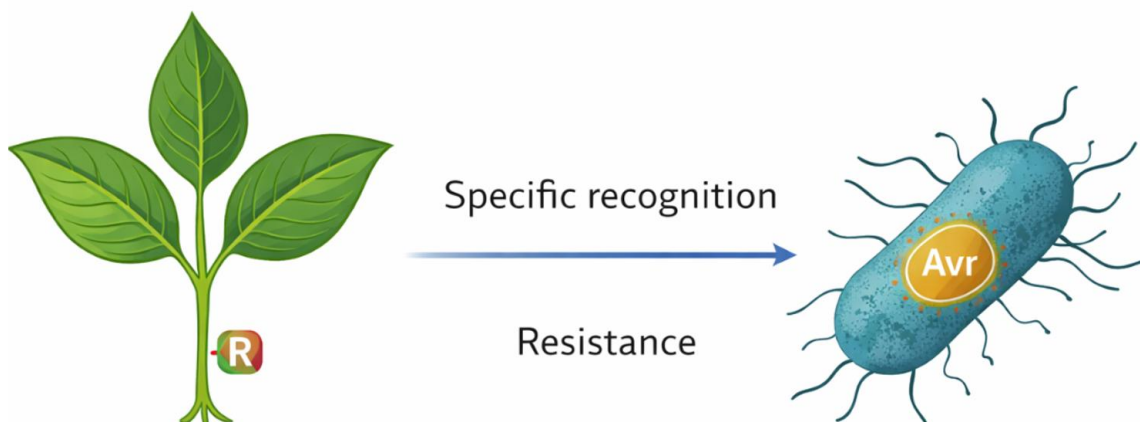


6. Resistência qualitativa e quantitativa: fundamentos e implicações

A resistência qualitativa, frequentemente chamada de vertical, é tipicamente controlada por um ou poucos genes de grande efeito. Seu principal atributo é a alta eficiência fenotípica: muitas vezes a planta se apresenta claramente resistente ou suscetível. Essa resistência é particularmente valiosa quando se deseja resposta rápida, forte e fácil de selecionar. Em contrapartida, por ser muito específica, tende a exercer pressão seletiva intensa sobre o patógeno e, portanto, está mais sujeita à ruptura evolutiva.

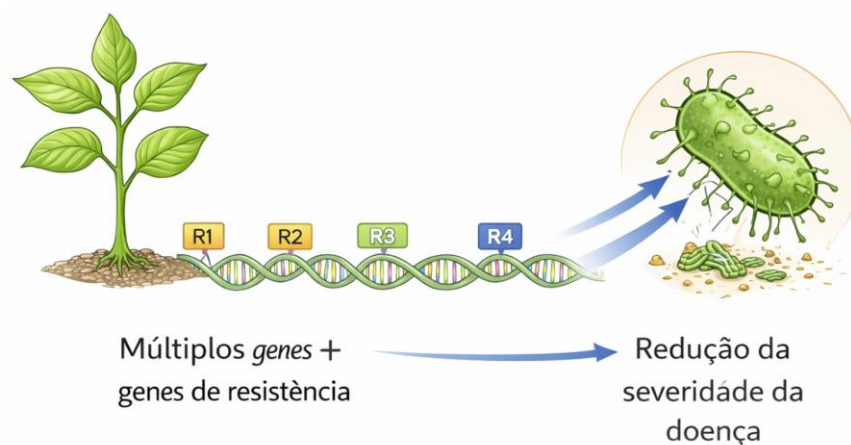


Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).



Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).

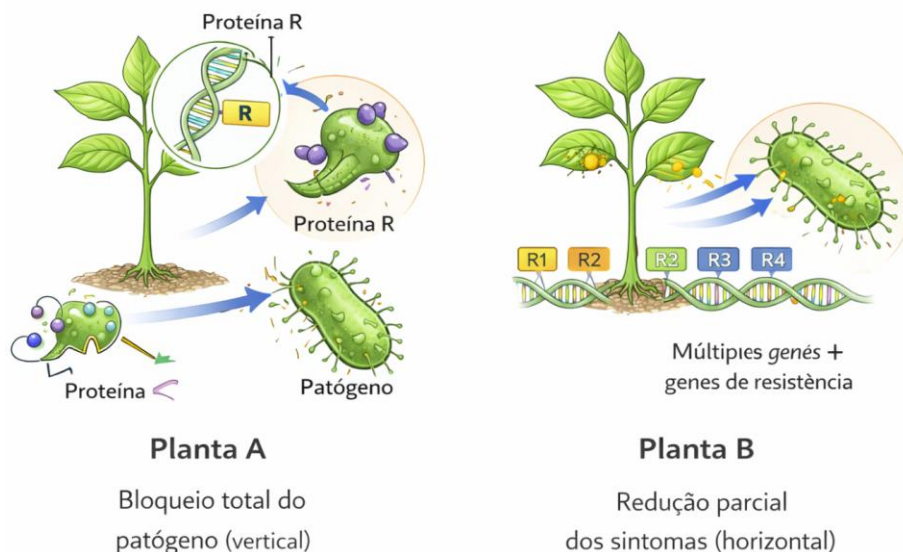
A resistência quantitativa, também chamada horizontal, resulta da ação conjunta de múltiplos genes ou QTLs, cada um contribuindo parcialmente para reduzir intensidade da doença ou dano da praga. Esse tipo de resistência raramente impede completamente a infecção; contudo, reduz a taxa de progresso epidêmico, a reprodução do patógeno e a perda econômica. Como o controle é distribuído em vários loci, a adaptação do patógeno costuma ser mais lenta, o que torna essa resistência mais durável.



Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).

Na prática, os programas modernos frequentemente tentam combinar esses dois modelos. Genes maiores podem oferecer proteção imediata, enquanto a base quantitativa acrescenta estabilidade temporal. O desafio é decidir quando priorizar eficácia de curto prazo e quando priorizar durabilidade. Essa escolha depende da cultura, do sistema reprodutivo, da biologia do patógeno e da disponibilidade de ferramentas de seleção.

Resistência vertical versus horizontal

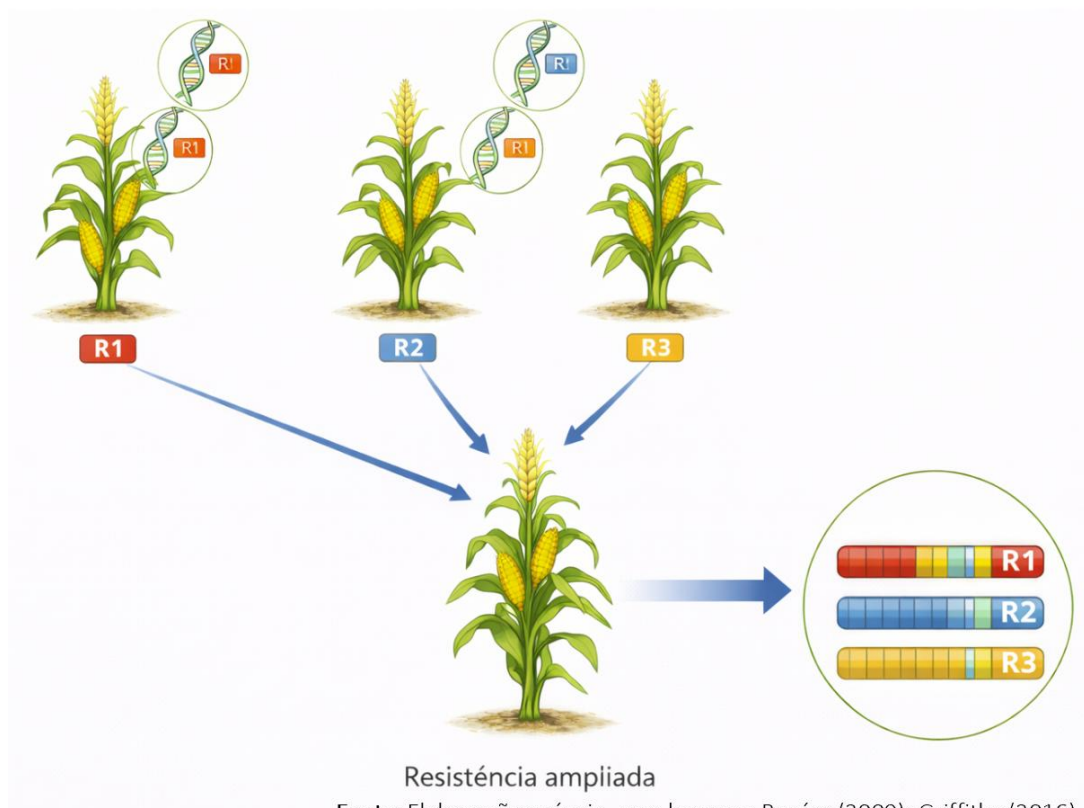


Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).

7. Estratégias de seleção: fenotipagem, piramidização e ferramentas moleculares

A seleção convencional para resistência continua sendo indispensável. Avaliar genótipos sob pressão natural ou artificial de doença/praga permite verificar se a resistência funciona em condições reais de campo. Inoculação artificial, quando bem conduzida, aumenta a comparabilidade entre parcelas ao padronizar a pressão do patógeno. Ensaios multiambientais são fundamentais para separar resistência verdadeira de respostas fortemente dependentes do ambiente.

Entretanto, a fenotipagem isolada tem limitações, especialmente na piramidização de genes. Quando dois ou mais genes de resistência produzem respostas fenotípicas semelhantes, é difícil saber quantos genes estão presentes apenas observando sintomas. É nesse ponto que a seleção assistida por marcadores se torna estratégica. Com marcadores ligados a genes R ou QTLs de resistência, o melhorista pode selecionar indivíduos portadores dos alelos desejáveis ainda em estágios precoces e mesmo na ausência da doença.



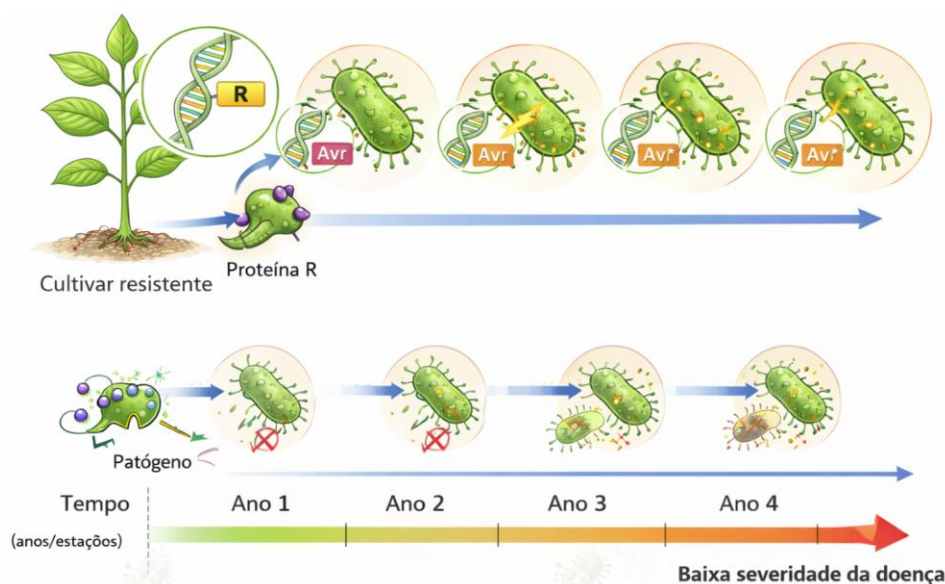
Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).

Além da MAS, o mapeamento de QTLs e a genômica ampliaram a capacidade de trabalhar resistência quantitativa. Caracteres controlados por muitos loci de pequeno efeito, antes difíceis de manejar, passaram a ser abordados com maior precisão. Em situações mais complexas, a seleção genômica pode ser mais vantajosa do que a MAS clássica, pois utiliza marcadores distribuídos por todo o genoma para prever o valor genético global de resistência.

8. Resistência durável, manejo integrado e aplicações modernas

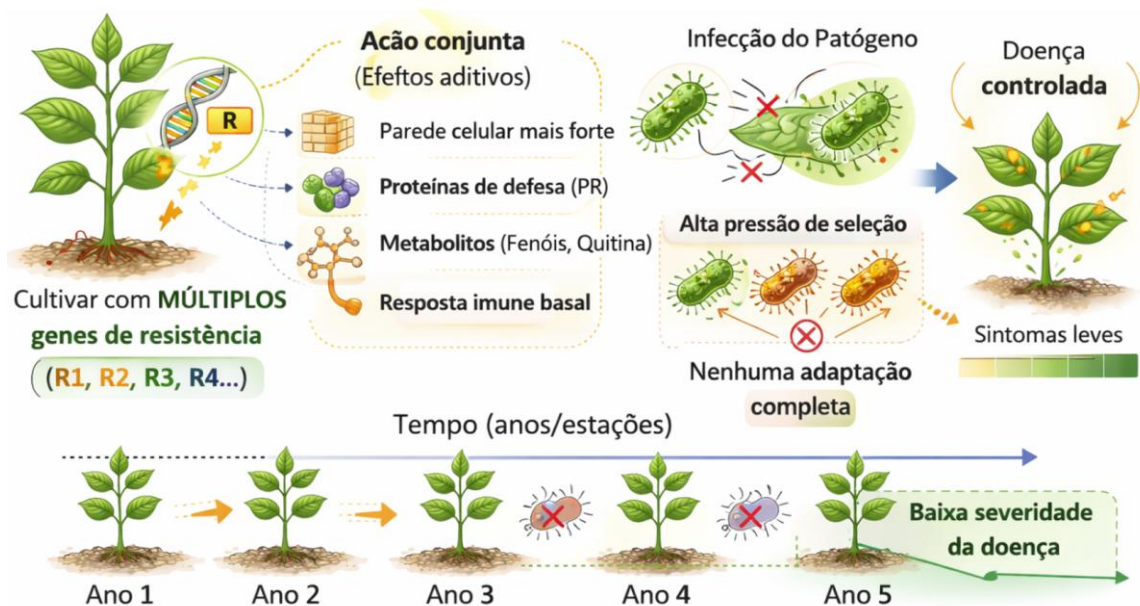
A durabilidade da resistência depende de como os genes são usados no tempo e no espaço. A piramidização de genes R é uma das estratégias mais importantes, pois combina diferentes genes de resistência em um mesmo genótipo, reduzindo a probabilidade de superação simultânea por parte do patógeno. Entretanto, mesmo a piramidização não é solução absoluta. Se a pressão de seleção permanecer alta e homogênea, o patógeno continuará evoluindo.

Por isso, a resistência genética deve ser integrada ao manejo integrado de pragas e doenças. Rotação de cultivares, mistura varietal, diversificação genética em escala de paisagem, rotação de culturas, controle biológico e uso racional de defensivos são medidas que reduzem a velocidade de seleção de raças virulentas. Em outras palavras, a durabilidade não depende apenas da genética da cultivar, mas da ecologia do sistema agrícola em que ela é utilizada.

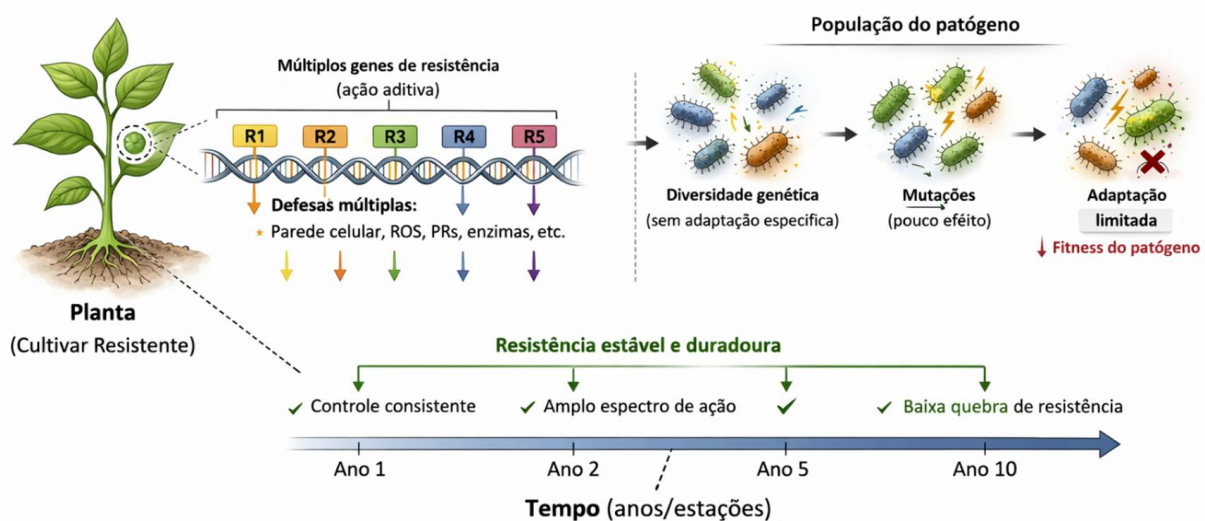


Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).

Do ponto de vista das tecnologias modernas, a transgenia permitiu incorporar genes de resistência de fontes distantes, como os genes Bt em milho e algodão. Mais recentemente, a edição gênica por CRISPR ampliou as possibilidades ao permitir inativar genes de suscetibilidade ou modular vias de defesa com maior precisão. Mesmo assim, qualquer estratégia avançada deve ser validada em termos de produtividade, possíveis efeitos pleiotrópicos e interação genótipo × ambiente, mantendo sempre o foco em resistência funcional e sustentabilidade agrônômica.



Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).



Fonte: Elaboração própria, com base em Borém (2009); Griffiths (2016).

9. Síntese final

O melhoramento para resistência a doenças e pragas exige integrar genética, evolução e agronomia. Resistência não é apenas um gene favorável: é uma relação dinâmica entre o genótipo da planta, a variabilidade do agente agressor e o sistema de manejo em que a cultivar será utilizada.

Do ponto de vista metodológico, a escolha entre resistência qualitativa e quantitativa, o uso de retrocruzamento, a incorporação de genes por introgressão, a redução do arrasto gênico e a combinação entre seleção convencional e molecular devem ser planejados de acordo com o tipo de caráter, a biologia do patógeno e o sistema reprodutivo da espécie.

Em síntese, a resistência durável resulta menos de soluções únicas e mais de estratégias combinadas: diversidade genética, piramidização, fenotipagem bem conduzida, ferramentas moleculares e integração com manejo integrado.

10. Exercícios objetivos comentados

1. A rápida quebra de resistência qualitativa em área extensa ocorre principalmente pela forte pressão de seleção sobre o patógeno, favorecendo raças virulentas.

Comentário: genes R de grande efeito podem ser extremamente eficientes no curto prazo, mas o uso repetido em larga escala acelera a seleção de variantes capazes de escapar do reconhecimento.

2. A resistência quantitativa tende a ser mais estável porque é condicionada por múltiplos genes/QTLs de pequeno efeito.

Comentário: por distribuir a defesa em vários loci, a adaptação do patógeno costuma ser mais lenta do que em resistências monogênicas altamente específicas.

3. No retrocruzamento, a estratégia central é recuperar o genoma do cultivar elite enquanto se mantém o gene de resistência do doador.

Comentário: essa lógica faz do retrocruzamento o método clássico de introgressão de genes R em cultivares adaptadas.

4. Na piramidização, marcadores moleculares são decisivos porque permitem identificar indivíduos portadores simultâneos de vários genes de resistência.

Comentário: a fenotipagem isolada muitas vezes não distingue quantos genes estão presentes quando as respostas fenotípicas são semelhantes.

5. A integração entre resistência genética e manejo integrado é essencial para prolongar a vida útil das cultivares resistentes.

Comentário: rotação de cultivares, misturas varietais e diversificação genética reduzem a velocidade de seleção de raças virulentas.

11. Atividade de fixação – avaliação formativa

Situação aplicada: um programa de melhoramento identificou um gene de resistência (R1) em um parente silvestre de soja contra determinada doença fúngica. Após a introgressão via retrocruzamentos sucessivos, a nova cultivar apresentou resistência eficiente nos primeiros anos de cultivo. Entretanto, após algumas safras, surgiram novas raças do patógeno capazes de superar o gene R1, resultando em quebra de resistência.

Com base nos fundamentos desta apostila, responda:

- a) Classifique o tipo de resistência inicialmente utilizada e justifique geneticamente.
- b) Explique o modelo gene-a-gene envolvido nessa interação.
- c) Descreva como o retrocruzamento foi empregado para introgressar o gene R1 no fundo genético elite.
- d) Analise por que ocorreu a quebra de resistência sob perspectiva evolutiva.
- e) Proponha uma estratégia de melhoramento para aumentar a durabilidade da resistência.
- f) Relacione a estratégia proposta ao sistema reprodutivo da espécie.

12. Referências básicas

1. ALLARD, R. W. Princípios do melhoramento genético das plantas. Rio de Janeiro: Edgard Blücher/USAID, 1971.
2. BORÉM, A. Melhoramento de plantas. 5. ed. Viçosa: UFV, 2009.
3. BUENO, L. C. S.; MENDES, A. N. G.; CARVALHO, S. P. Melhoramento genético de plantas: princípios e procedimentos. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006.
4. GRIFFITHS, A. J. F. et al. Introdução à genética. 11. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2016.
5. RAMALHO, M. A. P. Genética na agropecuária. 4. ed. Lavras: UFLA, 2008.