



O COMITÊ DE AÇÃO CONTRA A RESISTÊNCIA A FUNGICIDAS (FRAC): FUNDAMENTOS, CLASSIFICAÇÃO E IMPORTÂNCIA NA FITOPATOLOGIA MODERNA

Alieze Nascimento da Silva^{1*}, Jenifer Bäcker Zanatta², Thomas Henrique Wagner²

^{1*}Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade de Passo Fundo (UPF), Passo Fundo, RS, Brasil. *Corresponding author: aliezedasilva@upf.br

²Discente de Bacharelado em Agronomia pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha, Campus Panambi, RS

Recebido em: 15/08/2026 – Aprovado em: 05/09/2026 – Publicado em: 30/09/2026

DOI: 10.18677/EnciBio_2026C12

RESUMO

A resistência de fungos fitopatogênicos a fungicidas representa um dos maiores desafios para a proteção de culturas na agricultura contemporânea. Nesse contexto, o Comitê de Ação à Resistência a Fungicidas (FRAC – Fungicide Resistance Action Committee) exerce papel central ao sistematizar o conhecimento sobre mecanismos de ação, risco de resistência e estratégias de manejo dos principais grupos de fungicidas utilizados mundialmente. O presente trabalho objetiva revisar os fundamentos do FRAC, sua estrutura de codificação, os principais grupos de fungicidas de alto risco – inibidores da desmetilação (DMI/FRAC 3), inibidores da quinona oxidase (QoI/FRAC 11) e inibidores da succinato desidrogenase (SDHI/FRAC 7) – os mecanismos moleculares de resistência, os métodos de monitoramento e as diretrizes antirresistência para sistemas agrícolas. Foi realizada revisão bibliográfica qualitativa em bases indexadas, com ênfase em publicações de 2019 a 2025. Os resultados demonstram que a resistência qualitativa e quantitativa a fungicidas sítio-específicos está amplamente documentada em patógenos como *Phakopsora pachyrhizi*, *Botrytis cinerea*, *Fusarium spp.* e *Alternaria spp.* no Brasil e no mundo, e que as diretrizes do FRAC para rotação, mistura e limitação de aplicações são indispensáveis para preservar a eficácia dos produtos registrados. Concluiu-se que a adoção plena das recomendações do FRAC é condição *sine qua non* para a sustentabilidade do controle químico de doenças fúngicas.

PALAVRAS-CHAVE: Manejo antirresistência; Modos de ação; Resistência a fungicidas

THE FUNGICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE (FRAC): FOUNDATIONS, CLASSIFICATION, AND IMPORTANCE IN MODERN PLANT PATHOLOGY

ABSTRACT

Resistance of phytopathogenic fungi to fungicides represents one of the greatest challenges for crop protection in contemporary agriculture. In this context, the Fungicide Resistance Action Committee (FRAC) plays a central role by systematizing

knowledge on mechanisms of action, resistance risk, and management strategies for the main fungicide groups used worldwide. This paper aims to review the FRAC foundations, coding structure, the main high-risk fungicide groups – demethylation inhibitors (DMI/FRAC 3), quinone outside inhibitors (QoI/FRAC 11) and succinate dehydrogenase inhibitors (SDHI/FRAC 7) – molecular resistance mechanisms, monitoring methods and anti-resistance guidelines for agricultural systems. A qualitative bibliographic review was conducted in indexed databases, focusing on publications from 2019 to 2025. Results demonstrate that qualitative and quantitative resistance to site-specific fungicides is widely documented in pathogens such as *Phakopsora pachyrhizi*, *Botrytis cinerea*, *Fusarium* spp. and *Alternaria* spp. in Brazil and worldwide, and that FRAC guidelines for rotation, mixture and application limits are essential to preserve the efficacy of registered products. It is concluded that full adoption of FRAC recommendations is a sine qua non condition for the sustainability of chemical control of fungal diseases.

KEYWORDS: Anti-resistance management; Fungicide resistance; Modes of action.

INTRODUÇÃO

Os fungos representam o maior grupo de agentes causadores de doenças em plantas, sendo responsáveis por mais de 65% das doenças que afetam as principais culturas agrícolas globais (AGROADVANCE, 2024). Para seu controle, o uso de fungicidas constitui a principal ferramenta disponível, com gasto estimado de mais de 16 bilhões de dólares anuais em todo o mundo (LEADBEATER, 2022). Dados de mercado mais recentes indicam que esse valor já ultrapassa 20 bilhões de dólares anuais (MARKETSANDMARKETS, 2024), refletindo o crescimento contínuo do setor após 2022. Todavia, a utilização intensiva e repetida de fungicidas com um mesmo modo de ação bioquímico cria pressão seletiva sobre as populações fúngicas, favorecendo o surgimento e a proliferação de indivíduos resistentes, fenômeno que pode comprometer drasticamente a eficácia dos produtos registrados e resultar em falhas de controle com consequências econômicas severas (DEISING *et al.*, 2008; FRAC, 2024c).

Diante desse cenário, o Comitê de Ação à Resistência aos Fungicidas (FRAC) foi estabelecido em 1981 como um grupo técnico especializado vinculado à *CropLife International*, com o objetivo de coordenar internacionalmente as ações de prevenção, monitoramento e manejo da resistência de fungos aos fungicidas (FRAC, 2024c). O FRAC desenvolve, atualiza anualmente e disponibiliza publicamente a lista de códigos que classifica todos os fungicidas registrados segundo seu modo de ação bioquímico (FRAC Code List), fundamentando a tomada de decisão por parte de pesquisadores, extensionistas, agricultores e empresas do setor agroquímico (FRAC, 2024b).

A relevância do FRAC na fitopatologia moderna é inegável. Em um contexto no qual novos fungicidas levam décadas e bilhões de dólares para serem desenvolvidos e registrados, a preservação da eficácia dos produtos existentes é uma prioridade estratégica para a segurança alimentar global. A resistência de *Phakopsora pachyrhizi*, agente causal da ferrugem asiática da soja, aos fungicidas QoI e DMI no Brasil, e a emergência de resistência a SDHIs nas últimas safras, ilustram com nitidez os riscos concretos que a ausência de manejo antirresistência traz para sistemas produtivos de alta importância econômica (EMBRAPA SOJA, 2024; GODOY *et al.*, 2024).

Este artigo de revisão tem como objetivo apresentar e discutir os fundamentos teóricos e práticos do FRAC, incluindo sua estrutura de codificação, os principais

grupos de fungicidas e seus mecanismos de ação, os mecanismos moleculares de resistência identificados nos principais fitopatógenos, as metodologias de monitoramento da sensibilidade e as diretrizes antirresistência recomendadas pelo comitê. Busca-se, assim fornecer base científica atualizada para que profissionais de proteção de plantas adotem práticas mais racionais e sustentáveis no controle químico de doenças fúngicas.

REFERENCIAL TEÓRICO

O FRAC: Histórico, Estrutura e Missão

O FRAC surgiu no início da década de 1980 como resposta ao crescente número de relatos de falhas de controle de doenças fúngicas associadas ao desenvolvimento de resistência aos fungicidas sistêmicos de alto risco, em especial os benzimidazóis (MBC, FRAC 1), introduzidos comercialmente na década de 1960 (BRENT; HOLLOMON, 2007a). A rapidez com que *Botrytis cinerea*, *Sphaerotheca fuliginea* e outros patógenos desenvolveram resistência qualitativa (total) a esses produtos evidenciou a necessidade de coordenação internacional para orientar o uso racional dos fungicidas sítio-específicos (BRENT; HOLLOMON, 2007a; FRAC, 2024c).

Atualmente, o FRAC é composto por grupos de trabalho especializados (Working Groups – WGs) e Expert Fora dedicados aos principais grupos de fungicidas de alto risco, como QoI (FRAC 11), SDHI (FRAC 7), DMI (FRAC 3), fenilamidas (FRAC 4), CAA (carboxylic acid amides, FRAC 40) e MBC (FRAC 1), entre outros. Cada grupo de trabalho se reúne anualmente para revisar os dados de monitoramento de sensibilidade, atualizar as recomendações de manejo e orientar as ações regulatórias junto às empresas fabricantes e aos organismos de registro de pesticidas (FRAC, 2024c).

A missão central do FRAC pode ser sintetizada em três eixos: (a) Prevenção – orientar o uso dos fungicidas de forma que a pressão seletiva sobre os patógenos seja minimizada; (b) detecção precoce – fornecer metodologias e diretrizes para o monitoramento sistemático da sensibilidade das populações de patógenos; e (c) manejo – recomendar estratégias integradas de rotação, mistura e limitação de aplicações que prolonguem a vida útil dos fungicidas existentes e preservem as opções de controle para as gerações futuras (LEADBEATER, 2022; FRAC, 2024c).

A Lista de Códigos FRAC (FRAC Code List)

O principal produto técnico do FRAC é a *FRAC Code List*, publicada e atualizada anualmente em versão multilíngue. A edição de 2024 classifica os fungicidas em mais de 50 grupos, identificados por letras (A a P, com números adicionais) que correspondem às vias biossintéticas dos fitopatógenos afetadas pelos produtos (FRAC, 2024b). O esquema de codificação segue a lógica dos processos metabólicos do fungo: Grupo A (síntese de ácidos nucleicos) ao grupo I (síntese de melanina), seguido por indutores de defesa vegetal (P), inibidores multissítio (M), moléculas com modo de ação desconhecido (U) e biológicos com múltiplos modos de ação (BM) (FRAC, 2024b).

A lógica central do sistema de codificação é o conceito de resistência cruzada: Todos os fungicidas pertencentes ao mesmo código FRAC compartilham o mesmo sítio-alvo e, portanto, a mesma probabilidade de resistência cruzada. Isso significa que a resistência adquirida por um patógeno a um fungicida do FRAC 11 (como azoxistrobina) confere automaticamente resistência a todos os demais produtos com

o mesmo código, como piraclostrobina e trifloxistrobina, independentemente de suas estruturas químicas distintas (CROP PROTECTION NETWORK, 2023; FRAC, 2024b).

O risco de resistência de cada grupo é classificado como baixo, médio ou alto, com base nos princípios descritos nas Monografias FRAC 1, 2 e 3. Grupos de alto risco, como os benzimidazóis (FRAC 1), Qols (FRAC 11) e SDHIs (FRAC 7), são caracterizados por modo de ação sítio-específico e elevada probabilidade de que mutações pontuais no gene-alvo confirmem resistência qualitativa ou quantitativa ao patógeno. Grupos multissítio (M), como mancozebe, clorotalonil e cobre, apresentam risco inerente baixo por afetarem múltiplos alvos metabólicos simultaneamente, tornando improvável a emergência de resistência por uma única mutação (BRENT; HOLLOMON, 2007b; FRAC, 2024b).

QUADRO 1. Principais grupos FRAC de alto risco, seus modos de ação e exemplos de ingredientes ativos.

Código FRAC	Grupo / Classe	Modo de Ação	Exemplos de I.A.	Risco	Patógenos-alvo
1	MBC – Benzimidazóis	Inibição da β -tubulina	Carbendazim, Tiofanato-metílico	Alto	Botrytis, Fusarium, Cercospora
3	DMI – Triazóis	Inibição da CYP51 (demetilação do ergosterol)	Tebuconazol, Propiconazol, Epoxiconazol	Médio-alto	Phakopsora, Puccinia, Cercospora, Septoria
4	Fenilamidas (PAA)	Inibição da RNA polimerase I	Metalaxil, Mefenoxam	Alto	Oomicetos: Phytophthora, Plasmopara
7	SDHI – Carboxamidas	Inibição da succinato desidrogenase (complexo II mitocondrial)	Fluxapiroxade, Boscalide, Benzovindiflupir	Médio-alto	Phakopsora, Botrytis, Alternaria, Fusarium
11	Qol – Estrobilurinas	Inibição do citocromo bc1 (complexo III mitocondrial, sítio Qo)	Azoxistrobina, Piraclostrobina, Trifloxistrobina	Alto	Phakopsora, Puccinia, Colletotrichum, Blumeria
40	CAA – Amidas de ácido carboxílico	Inibição da síntese de celulose	Mandipropamida, Dimetomorf	Médio	Oomicetos: Plasmopara, Phytophthora, Pseudoperonospora
M3/M5	Multissítio (M)	Múltiplos sítios de ação	Mancozebe, Clorotalonil, Cobre	Baixo	Espectro amplo

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Crop Protection Network (2023) e FRAC (2024b).

Mecanismos Moleculares de Resistência

A compreensão dos mecanismos moleculares pelos quais os fungos adquirem resistência aos fungicidas é fundamental para o desenvolvimento de métodos de monitoramento e para a formulação de estratégias de manejo eficazes. A revisão publicada na *Phytopathology* por Leadbeater (2023) sintetiza cinco décadas de avanços nesse campo, identificando seis categorias principais de mecanismos de resistência em fungos fitopatogênicos: Mutações no sítio-alvo; superexpressão do gene-alvo; aumento na detoxificação metabólica; redução da permeabilidade da membrana; bombas de efluxo do tipo ABC (ATP-binding cassette) e MFS (major facilitator superfamily); e desenvolvimento de via metabólica alternativa (DEISING *et al.*, 2008; LEADBEATER, 2023).

Resistência a Qols (FRAC 11): Mutação G143A

O grupo Qol representa o caso mais emblemático de resistência qualitativa de alto risco na fitopatologia. Os fungicidas desse grupo inibem a respiração mitocondrial ao se ligarem ao sítio Qo do citocromo bc1 (complexo III), bloqueando a cadeia transportadora de elétrons e impedindo a produção de ATP fúngico (CROP PROTECTION NETWORK, 2023). A resistência à estrobilurina é conferida principalmente pela substituição de glicina por alanina no códon 143 do gene do citocromo b (mutação G143A), que impede estereoquimicamente a ligação do fungicida ao sítio-alvo (LEADBEATER, 2023; FRAC, 2024d).

No Brasil, a mutação G143A foi confirmada em populações de *Phakopsora pachyrhizi*, agente da ferrugem-asiática da soja, já na safra 2003/2004, apenas dois anos após a introdução da doença no País e o início do uso intensivo de Qols para seu controle. Atualmente, a resistência a Qols está amplamente disseminada nas populações brasileiras do patógeno, tornando esses fungicidas ineficazes quando utilizados isoladamente (EMBRAPA SOJA, 2024; GODOY *et al.*, 2024). Situação semelhante ocorreu com *Colletotrichum truncatum*, agente da antracnose da soja, para o qual múltipla resistência a Qol e MBC foi documentada em isolados do Brasil (ROGÉRIO *et al.*, 2024).

Uma particularidade ecológica importante é que a mutação G143A confere resistência total (qualitativa) e está associada a um custo adaptativo (fitness cost) variável: Em alguns patógenos, os mutantes resistentes apresentam menor virulência ou esporulação que os sensíveis na ausência de pressão seletiva; em outros, como *P. pachyrhizi*, os mutantes são igualmente competitivos, o que explica a rápida fixação da resistência nas populações de campo (FRAC, 2024d; EMBRAPA SOJA, 2024).

Resistência a DMIs (FRAC 3): mutações em CYP51

Os fungicidas DMI inibem a enzima CYP51 (lanosterol 14 α -demetilase), responsável por um passo crítico na biossíntese do ergosterol, o principal esterol da membrana fúngica. A depleção de ergosterol e o acúmulo de precursores tóxicos causam desorganização da membrana e inibição do crescimento fúngico (AGROADVANCE, 2024; FRAC, 2024a). Diferentemente dos Qols, a resistência a DMIs é tipicamente quantitativa (erosão gradual de sensibilidade), resultante do acúmulo de múltiplas mutações no gene CYP51 ou de alterações na expressão desse gene (LEADBEATER, 2023).

A revisão de Arnold *et al.* (2024) sobre rotas múltiplas para resistência a fungicidas documenta que a resistência aos triazóis pode ser mediada por: (a) Substituições de aminoácidos em sítios de reconhecimento de substrato do CYP51

(como as mutações I381V, Y459D/N, I475T identificadas em *Zymoseptoria tritici*); (b) aumento do número de cópias do gene CYP51 (observado em *Erysiphe necator*, onde dois a 14 cópias do gene foram encontradas em isolados de vinhedos tratados com DMI); e (c) inserções no promotor do gene que aumentam sua expressão, como documentado em *Cercospora beticola*.

Em *P. pachyrhizi*, as mutações nos genes CYP51-1 e CYP51-3 foram associadas à redução progressiva da sensibilidade aos triazóis nas populações brasileiras, comprometendo significativamente a eficácia das misturas DMI+QoI, historicamente a base do controle químico da ferrugem-asiática no Brasil (EMBRAPA SOJA, 2024; GODOY *et al.*, 2024).

Resistência a SDHIs (FRAC 7): mutações no complexo SDH

Os fungicidas SDHI inibem a succinato desidrogenase (SDH), enzima do complexo II da cadeia respiratória mitocondrial, bloqueando o ciclo do ácido tricarboxílico (TCA) e impedindo a transferência de elétrons para ubiquinona. A resistência a SDHIs é conferida por mutações nos genes que codificam as subunidades B, C e D da SDH (SdhB, SdhC, SdhD), que alteram a conformação do sítio de ligação do fungicida (LEADBEATER, 2023; FRAC, 2024c).

A mutação SdhC-I86F em *P. pachyrhizi* foi a primeira associação entre resistência a SDHI e a ferrugem-asiática da soja no mundo (SIMÕES *et al.*, 2018). Estudo conduzido pela Embrapa em 2024 demonstrou que a substituição SdhC-I86F permaneceu prevalente no País nas últimas safras, sendo detectada em 12 das 18 amostragens populacionais analisadas por qPCR, com seis populações fenotipadas apresentando sensibilidade reduzida ao fluxapiroxade (GODOY *et al.*, 2024). Esses dados indicam que o uso intensivo de SDHIs após a falha dos QoIs e DMIs acelerou o processo de seleção de resistência também nesse grupo, reforçando a urgência das diretrizes antirresistência do FRAC.

Em outros fitopatógenos, mutações SDH já documentadas incluem: SdhB-H278R/Y, SdhC-H134R e SdhD-D123E em *Alternaria solani* (mancha-precoce da batata); SdhB-H272Y/L e SdhB-P225L em *Botrytis cinerea* (mofo-cinzento); e SdhB-H267Y/L em *Fusarium graminearum* (podridão-da-espiga do trigo) (LEADBEATER, 2023; OLIVER *et al.*, 2024). A revisão de Oliver *et al.* (2024), publicada no *Journal of Plant Diseases and Protection*, sistematizou as mutações de sítio-alvo associadas à resistência aos fungicidas em 2023, constituindo referência essencial para programas de monitoramento global.

Outros Mecanismos de Resistência: Efluxo, Detoxificação e Alterações de Permeabilidade

Além das mutações no sítio-alvo discutidas nas seções anteriores para os grupos QoI, DMI e SDHI, os fitopatógenos dispõem de mecanismos adicionais de resistência que, embora menos estudados, têm ganhado importância crescente na literatura fitopatológica recente. Leadbeater (2023) destaca que bombas de efluxo transmembrana, pertencentes principalmente às famílias ABC (ATP-binding cassette) e MFS (major facilitator superfamily), atuam removendo ativamente moléculas fungicidas do citoplasma fúngico antes que atinjam concentração suficiente para inibir o sítio-alvo. Esse mecanismo, denominado resistência não específica de multidroga (MDR, multidrug resistance), confere frequentemente resistência cruzada simultânea aos fungicidas de diferentes grupos FRAC, mesmo que estruturalmente distintos e com sítios-alvo diferentes, o que representa um desafio adicional para as estratégias

de rotação baseadas exclusivamente na alternância de modos de ação (LEADBEATER, 2023).

A superexpressão de transportadores de efluxo já foi associada aos fenótipos de resistência múltipla em *Botrytis cinerea*, no qual isolados MDR apresentam sensibilidade reduzida simultânea a fungicidas DMI, Qol e anilino pirimidinas, sem que se observem mutações no sítio-alvo correspondente (LEADBEATER, 2023). Esse tipo de resistência é caracteristicamente quantitativo, poligênico e de herança complexa, o que dificulta sua detecção por métodos moleculares baseados unicamente na busca por polimorfismos de nucleotídeo único (SNPs) em genes-alvo conhecidos, tornando necessário o uso complementar de ensaios fenotípicos de sensibilidade *in vitro* para sua caracterização completa.

Outro mecanismo relevante é a detoxificação metabólica, na qual o fungo emprega enzimas do citocromo P450, glutatona S-transferases ou esterases para metabolizar a molécula fungicida em compostos inativos antes que exerça seu efeito tóxico (DEISING *et al.*, 2008). Esse processo é análogo aos mecanismos de resistência aos inseticidas descritos em artrópodes e, embora historicamente menos documentado em fungos fitopatogênicos do que em outros organismos, tem recebido atenção crescente diante da constatação de que populações de campo podem apresentar sensibilidade reduzida aos fungicidas mesmo na ausência de mutações no gene-alvo esperado (LEADBEATER, 2023).

Por fim, alterações na permeabilidade da membrana celular fúngica, decorrentes de modificações na composição lipídica ou na expressão de proteínas de membrana, podem reduzir a entrada do fungicida na célula, diminuindo sua concentração intracelular efetiva sem qualquer alteração no sítio-alvo molecular. Embora esse mecanismo confira tipicamente níveis mais baixos de resistência quando comparado às mutações de sítio-alvo de alto risco, sua ação aditiva, quando combinada a outros mecanismos, pode comprometer significativamente a eficácia de campo dos fungicidas sítio-específicos (DEISING *et al.*, 2008; FRAC, 2024a).

Custos Econômicos e Regulatórios do Desenvolvimento de Fungicidas

A compreensão da dimensão econômica da resistência aos fungicidas é essencial para justificar o investimento em programas de manejo antirresistência. Leadbeater (2022) destaca que o desenvolvimento de uma nova molécula fungicida, desde a triagem inicial de compostos candidatos até o registro comercial, demanda em média cerca de uma década de pesquisa e testes regulatórios, com investimento da ordem de centenas de milhões de dólares por ingrediente ativo aprovado, sendo que apenas uma fração muito pequena das moléculas triadas chega efetivamente ao mercado. Nesse contexto, a perda de eficácia de um fungicida já registrado representa um prejuízo que extrapola o produtor individual, comprometendo o retorno sobre o investimento de décadas de pesquisa e desenvolvimento da indústria agroquímica (LEADBEATER, 2022).

Esse cenário de custo crescente para o desenvolvimento de novas moléculas, associado à saturação regulatória e às restrições ambientais cada vez mais rígidas em diversos mercados, tem reduzido o ritmo de lançamento de novos grupos FRAC com modos de ação genuinamente inéditos. Nas últimas duas décadas, a maioria dos lançamentos comerciais correspondeu a novas moléculas dentro de grupos FRAC já existentes, como os SDHIs de segunda e terceira geração, e não a mecanismos de ação completamente novos, o que reforça o argumento central do FRAC de que a preservação da eficácia dos produtos já disponíveis é, do ponto de vista econômico,

mais viável no curto e médio prazo do que a aposta exclusiva em inovação química (LEADBEATER, 2022; FRAC, 2024c).

Do ponto de vista do produtor rural, a resistência aos fungicidas gera custos diretos e indiretos. Os custos diretos incluem a necessidade de aplicações adicionais para compensar a perda de eficácia, o uso de produtos mais caros de grupos alternativos e, em casos extremos, a perda parcial ou total da safra quando nenhuma opção de controle químico remanescente é eficaz. Os custos indiretos envolvem a erosão da confiança do produtor nas recomendações técnicas, a pressão por aumento nas doses aplicadas, o que paradoxalmente pode acelerar ainda mais a seleção de resistência, e os custos ambientais associados ao uso mais intensivo de agroquímicos (BRENT; HOLLOMON, 2007a; FRAC, 2024c).

MATERIAIS E METODOS

O presente trabalho configura-se como revisão bibliográfica narrativa e integrativa de caráter qualitativo. A estratégia de busca foi conduzida nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus*, *ScienceDirect*, *PubMed/MEDLINE*, *SciELO* e *Google Scholar*, no período de março a maio de 2025. Os descritores utilizados, em português e inglês, incluíram: "FRAC", "Fungicide Resistance Action Committee", "resistência a fungicidas", "mecanismos de resistência fúngica", "QoI resistance", "DMI resistance", "SDHI resistance", "ferrugem-asiática soja", "Phakopsora pachyrhizi fungicide resistance", "fungicide mode of action classification" e "antirresistência fungicida".

Foram incluídos artigos científicos originais, revisões sistemáticas, documentos técnicos do FRAC, publicações da Embrapa, notas técnicas e comunicações em anais de congressos publicados preferencialmente entre 2018 e 2025. Referências seminais anteriores a esse período foram incluídas quando representavam obras insubstituíveis para a compreensão do histórico e dos fundamentos do FRAC. Foram excluídos trabalhos sem revisão por pares, relatos sem respaldo experimental e publicações em idiomas distintos do português, inglês e espanhol. Ao total, 53 trabalhos foram analisados, dos quais 21 foram selecionados para compor esta revisão, organizados em quatro eixos temáticos: (a) histórico e estrutura do FRAC; (b) classificação e modos de ação; (c) mecanismos moleculares de resistência; e (d) monitoramento e estratégias de manejo antirresistência.

O uso de inteligência artificial generativa limitou-se à revisão gramatical, organização textual e adequação às normas editoriais, utilizando o ChatGPT, da OpenAI. Nenhum conteúdo científico foi gerado com o auxílio da IA. Em conformidade com Brasil (2026), os autores garantem a integridade, a originalidade e a validação das informações apresentadas.

DISCUSSÕES

Monitoramento da Sensibilidade: Linha de Base e EC₅₀

O monitoramento sistemático da sensibilidade de populações de fitopatógenos aos fungicidas é o alicerce sobre o qual se constroem as estratégias de manejo antirresistência. O FRAC define "linha de base de sensibilidade" (sensitivity baseline) como a distribuição de sensibilidade de uma coleção de isolados do patógeno a um fungicida específico, obtida a partir de populações que nunca foram expostas ao produto (LEADBEATER, 2023; FRAC, 2024a). Essa linha de base é determinada pelo cálculo da EC₅₀ (concentração efetiva para 50% de inibição) de cada isolado e pela representação em histograma de frequência.

Uma vez estabelecida a linha de base, o monitoramento continuado das populações de campo detecta desvios que indicam erosão de sensibilidade ou emergência de resistência. Para patógenos de cultivo livre (não obrigados bióticos), os ensaios de sensibilidade podem ser conduzidos *in vitro* em meio de cultura amendado com o fungicida; para patógenos biotróficos obrigatórios, como *P. pachyrhizi*, os ensaios necessitam ser realizados *in vivo*, geralmente em discos foliares, o que aumenta a complexidade e o custo do monitoramento (FRAC, 2024a; GODOY *et al.*, 2024).

Os avanços em biologia molecular trouxeram ferramentas de monitoramento de alta resolução e elevada capacidade de processamento. Com base no conhecimento das mutações de sítio-alvo, como G143A para Qol, I86F para SDHI e as diversas mutações em CYP51 para DMI, foram desenvolvidos métodos de PCR alelo-específico e qPCR para detecção de polimorfismos de nucleotídeo único (SNPs) diretamente em amostras de campo, sem necessidade de isolamento e cultivo do patógeno (LEADBEATER, 2023; GODOY *et al.*, 2024; OLIVER *et al.*, 2024). O método de amplificação isotérmica mediada por laço (LAMP – loop-mediated isothermal amplification) representa uma alternativa ainda mais acessível, operável em campo com termocicladores portáteis, que facilita o monitoramento em regiões com infraestrutura laboratorial limitada (LEADBEATER, 2023).

Desafios do Monitoramento em Patógenos Obrigatórios e Policíclicos

O monitoramento da sensibilidade em patógenos biotróficos obrigatórios, como *Phakopsora pachyrhizi*, apresenta desafios metodológicos particulares que não se aplicam aos patógenos de cultivo livre. Como esses fungos dependem inteiramente do tecido vegetal vivo para completar o ciclo, os ensaios de sensibilidade precisam ser conduzidos *in vivo*, geralmente em discos foliares destacados mantidos sob condições controladas de umidade e temperatura, o que aumenta substancialmente o tempo, o custo e a complexidade logística do monitoramento em comparação com ensaios *in vitro* em meio de cultura amendoado (FRAC, 2024a; GODOY *et al.*, 2024).

Adicionalmente, o caráter policíclico de patógenos como *P. pachyrhizi*, capazes de completar múltiplos ciclos de infecção e reprodução em uma única safra, favorece taxas de seleção mais rápidas do que em patógenos monocíclicos, que completam apenas um ciclo reprodutivo por ciclo da cultura hospedeira. Esse fator biológico, combinado à elevada capacidade de dispersão de uredinósporos por longas distâncias, explica em parte a rapidez com que a resistência a Qols se estabeleceu nas populações brasileiras de *P. pachyrhizi* logo após a introdução da doença no País, e reforça a necessidade de monitoramento contínuo e regionalizado, e não apenas pontual, para subsidiar recomendações de manejo atualizadas a cada safra (LEADBEATER, 2023; GODOY *et al.*, 2024).

Estratégias Antirresistência Recomendadas pelo FRAC

O FRAC organiza suas recomendações antirresistência em torno de três princípios fundamentais: (a) Minimização da pressão seletiva; (b) diversificação dos modos de ação; e (c) integração com práticas culturais de manejo. A premissa básica é que a resistência é um processo evolutivo inevitável na presença de pressão seletiva, mas que pode ser significativamente retardada por meio de manejo racional dos fungicidas (BRENT; HOLLOMON, 2007a; FRAC, 2024c).

Rotação de Grupos de Ação (FRAC codes)

A rotação entre fungicidas de diferentes códigos FRAC é a estratégia mais difundida e comprovadamente eficaz para retardar a emergência de resistência. Ao alternar aplicações com fungicidas de modos de ação distintos, evita-se que uma mutação única confira vantagem seletiva ao patógeno em todas as condições de tratamento (CROP PROTECTION NETWORK, 2023; FRAC, 2024c). Por exemplo, o agricultor que alterna QoI (FRAC 11) com DMI (FRAC 3) e SDHI (FRAC 7) ao longo de uma safra estabelece três pressões seletivas independentes, dificultando que uma cepa acumule mutações de resistência para todos os grupos simultaneamente.

No entanto, a rotação tem eficácia reduzida quando os produtos são usados individualmente (solo) a taxas eradicantes, pois a aplicação eradicante de um fungicida sítio-específico sozinho expõe o patógeno a uma pressão de seleção máxima, favorecendo os mutantes resistentes. O FRAC recomenda, por isso, que fungicidas de alto risco sejam sempre usados em mistura com um parceiro eficaz de modo de ação diferente, preferencialmente um fungicida multissítio (OKLAHOMA STATE UNIVERSITY EXTENSION, 2017; FRAC, 2024c).

Misturas de Fungicidas

As misturas (tank mix ou formulações pré-misturadas) combinam dois ou mais ingredientes ativos de diferentes grupos FRAC em uma única aplicação. A lógica antirresistência das misturas reside na premissa de que os raros indivíduos resistentes ao componente de alto risco serão controlados pelo segundo parceiro da mistura, impedindo sua reprodução e propagação (LEADBEATER, 2023; FRAC, 2024c).

Para que a mistura funcione efetivamente como estratégia antirresistência, o FRAC estabelece que o parceiro de mistura deve: (a) Proporcionar controle satisfatório da doença quando usado isoladamente; (b) ser aplicado em dose suficiente para manter ação independente; e (c) pertencer a um grupo sem resistência cruzada com o componente de alto risco. Uma mistura de dois fungicidas SDHI, por exemplo, não constitui estratégia antirresistência válida, pois ambos afetam o mesmo sítio-alvo e devem ser contados conjuntamente como uma única aplicação SDHI no limite anual recomendado (FRAC, 2023).

As recomendações específicas do FRAC para SDHIs estabelecem um máximo de três aplicações de fungicidas contendo SDHI por ano, representando no máximo 50% do total de aplicações realizadas na cultura; quando usado solo (sem mistura com parceiro eficaz), devem ser alternados estritamente com fungicidas de grupos distintos; e quando em mistura, podem ser realizadas no máximo duas aplicações consecutivas (FRAC, 2023).

Limitação do Número de Aplicações e Uso Preventivo

O número de aplicações é fator crítico para a manutenção da sensibilidade das populações-alvo. Quanto maior o número de gerações do patógeno expostas à pressão do fungicida, maior a probabilidade de seleção e fixação de mutantes resistentes. Por isso, o FRAC recomenda que fungicidas de alto risco sejam utilizados de forma preventiva, antes ou nos estágios iniciais da infecção, e não de forma curativa ou eradicante, quando a população fúngica já é grande e a pressão seletiva máxima (FRAC, 2024a).

Além disso, as aplicações devem ser realizadas com base em monitoramento e em sistemas de previsão de epidemias (modelos epidemiológicos), evitando aplicações desnecessárias que apenas incrementam a pressão seletiva sem benefício

econômico para a lavoura. A integração entre o uso racional de fungicidas e práticas culturais, como resistência genética, épocas de semeadura, manejo de restos culturais e espaçamento adequado, é destacada pelo FRAC como componente indispensável de qualquer programa antirresistência sustentável (BRENT; HOLLOMON, 2007a; FRAC, 2024c).

Dose, Momento e Intervalo de Aplicação como Fatores de Risco Adicionais

Além da rotação e da mistura de grupos FRAC, a dose aplicada e o intervalo entre aplicações constituem fatores determinantes na velocidade de seleção de populações resistentes. Doses subletais, insuficientes para eliminar completamente os indivíduos heterozigotos ou parcialmente resistentes, tendem a favorecer a seleção gradual de resistência quantitativa, uma vez que permitem a sobrevivência diferencial de indivíduos com sensibilidade intermediária ao longo de sucessivas gerações do patógeno (BRENT; HOLLOMON, 2007a; FRAC, 2024c). Por essa razão, o FRAC recomenda a utilização das doses plenas registradas para os fungicidas de alto risco, evitando reduções de dose que, embora possam parecer economicamente atrativas no curto prazo, comprometem a durabilidade da eficácia do produto no médio e longo prazo.

O intervalo entre aplicações também deve ser ajustado com base no potencial epidêmico da doença e na persistência residual do fungicida, evitando tanto intervalos excessivamente longos, que permitem recrudescência da doença e uso emergencial de doses eradicantes de alto risco seletivo, quanto intervalos excessivamente curtos, que aumentam desnecessariamente o número total de aplicações e, consequentemente, a pressão seletiva cumulativa sobre a população do patógeno ao longo da safra (FRAC, 2024c).

O FRAC no Contexto Brasileiro: Ferrugem-Asiática e Outras Doenças Relevantes

O Brasil representa um dos cenários mais desafiadores para o manejo da resistência aos fungicidas no mundo, em função da extensão das áreas cultivadas, do clima favorável ao desenvolvimento de doenças fúngicas e da intensidade do uso de agroquímicos. A ferrugem-asiática da soja, causada por *Phakopsora pachyrhizi*, é o caso mais emblemático: Desde sua introdução no Brasil em 2001, o manejo químico da doença seguiu trajetória de erosão progressiva de eficácia, reflexo direto da resistência sequencial aos Qols, DMIs e, mais recentemente, aos SDHIs (EMBRAPA SOJA, 2024; GODOY *et al.*, 2024).

O Consórcio Antiferrugem, coordenado pela Embrapa Soja, realiza anualmente a Rede de Ensaios Cooperativos para avaliação da eficiência de fungicidas para controle da ferrugem-asiática, seguindo metodologias alinhadas às diretrizes do FRAC. Os relatórios das safras 2022/2023 e 2023/2024 evidenciaram que fungicidas Qol solo apresentam eficiência próxima de zero, enquanto as misturas DMI+Qol também exibiram redução significativa de eficiência em relação às épocas anteriores à resistência. Os melhores resultados foram obtidos com misturas que incluem SDHI + DMI + multissítio (como mancozebe), reforçando a importância dos multissítios como parceiros protetores e a orientação FRAC de uso combinado (EMBRAPA SOJA, 2024; GODOY *et al.*, 2024).

No trigo, a mancha-da-folha causada por *Zymoseptoria tritici* (teleomorfo: *Mycosphaerella graminicola*) tem mostrado erosão de sensibilidade a DMIs em diversas regiões produtoras, com isolados apresentando múltiplas mutações no gene

CYP51 (OLIVER *et al.*, 2024). A podridão-da-espiga por *Fusarium spp.* (Gibberella) e a ferrugem-da-folha (*Puccinia triticina*) também demandam monitoramento constante, especialmente com a expansão do uso de SDHIs no tratamento de sementes e na aplicação foliar (FRAC, 2024c).

Em fruticultura e horticultura, o mofo-cinzento (*Botrytis cinerea*) é reconhecido pelo FRAC como um dos patógenos de maior risco de resistência múltipla, tendo desenvolvido resistência a pelo menos seis grupos de fungicidas de diferentes modos de ação, incluindo MBC, DCF, AP, QoI, SDHI e PP, em populações de campo de várias culturas no mundo, o que torna o manejo integrado indispensável (LEADBEATER, 2023; FRAC, 2024c).

QUADRO 2. Síntese do *status* de resistência de patógenos selecionados aos principais grupos FRAC no Brasil.

Patógeno / Doença	QoI (FRAC 11)	DMI (FRAC 3)	SDHI (FRAC 7)	Referência
Phakopsora pachyrhizi (ferrugem-asiática da soja)	Resistência confirmada (G143A)	Resistência confirmada (CYP51 mutações)	Resistência emergente (SdhC-I86F)	Embrapa, 2024; Godoy <i>et al.</i> , 2024
Colletotrichum truncatum (antracnose da soja)	Resistência confirmada	Sem relatos	Sem relatos	Rogério <i>et al.</i> , 2024
Botrytis cinerea (mofo-cinzento)	Resistência confirmada	Sensibilidade reduzida	Resistência confirmada	FRAC, 2024c; Leadbeater, 2023
Alternaria solani (mancha-precoce)	Resistência confirmada (F129L)	Sensibilidade reduzida	Resistência emergente	Oliver <i>et al.</i> , 2024
Fusarium graminearum (podridão-espiga)	Resistência confirmada	Sensibilidade reduzida	Resistência emergente	Oliver <i>et al.</i> , 2024; Leadbeater, 2023
Zymoseptoria tritici (mancha-da-folha trigo)	Resistência ampla	Resistência (múltiplas mutações CYP51)	Monitoramento ativo	Oliver <i>et al.</i> , 2024

Fonte: Elaborado pelos autores com base nas referências citadas.

Perspectivas: Novos Fungicidas, Biológicos e o FRAC do Futuro

Diante do cenário de resistência crescente aos principais grupos de fungicidas de alto risco, a pesquisa e o desenvolvimento de novos ingredientes ativos com modos de ação inovadores torna-se prioridade estratégica para a indústria e a ciência fitopatológica. O FRAC acompanha esse processo criando categorias transitórias (código U – Unknown, risco desconhecido) para moléculas em desenvolvimento cujo modo de ação ainda não foi completamente elucidado, permitindo seu uso provisório

até a definição do código definitivo (FRAC, 2024b). Entre os grupos emergentes de interesse, destacam-se os inibidores de OSBP (oxysterol-binding protein homolog, FRAC 49), voltados principalmente para oomicetos, e os inibidores de MAP quinase (FRAC 29) (LEADBEATER, 2023).

O crescimento do mercado de fungicidas biológicos abre novas perspectivas para a diversificação dos modos de ação disponíveis. O FRAC incorporou recentemente a categoria BM (biologicals with multiple modes of action) para agentes como *Bacillus subtilis*, *Trichoderma spp.* e *Coniothyrium minitans*, reconhecendo sua baixa probabilidade de indução de resistência cruzada com fungicidas convencionais e seu papel como parceiros eficazes em programas de rotação e mistura (CROP PROTECTION NETWORK, 2023; FRAC, 2024b).

A inteligência artificial e a modelagem preditiva representam o horizonte mais promissor para o monitoramento e a gestão da resistência. Modelos matemáticos que simulam a dinâmica evolutiva das populações fúngicas sob diferentes pressões de seleção, como o estudo publicado no periódico *Phytopathology* por Taylor e Cuniffe (2023) sobre gerenciamento ótimo de resistência em misturas de fungicidas de alto risco em *Septoria tritici blotch*, permitem identificar estratégias de rotação e dosagem que minimizam a velocidade de fixação da resistência, contribuindo para a longevidade dos produtos registrados.

O avanço das tecnologias de sequenciamento de nova geração também tem permitido a caracterização mais precisa da arquitetura genética da resistência a fungicidas, revelando que, em muitos casos, a resistência a DMIs resulta da interação complexa entre substituições pontuais no gene CYP51, variação no número de cópias gênicas e alterações regulatórias no promotor, e não de um único mecanismo isolado (ARNOLD *et al.*, 2024). Essa compreensão mais integrada tem implicações diretas para o desenvolvimento de ferramentas de diagnóstico molecular, que precisam necessariamente considerar múltiplos marcadores genéticos simultaneamente para capturar adequadamente o fenótipo de resistência observado em campo, sob pena de subestimar a real prevalência da resistência em uma população monitorada apenas por um único marcador (ARNOLD *et al.*, 2024; OLIVER *et al.*, 2024).

Implicações para a Extensão Rural e a Tomada de Decisão no Campo

A efetividade das diretrizes antirresistência do FRAC depende, em última instância, de sua correta tradução em recomendações práticas para agricultores, consultores e extensionistas rurais. Historicamente, a comunicação técnica sobre resistência aos fungicidas enfrenta o desafio de traduzir conceitos de genética de populações e bioquímica molecular em recomendações operacionais claras, aplicáveis no momento da decisão de compra e aplicação de produtos (BRENT; HOLLOMON, 2007a).

Nesse sentido, ferramentas como a FRAC *Code List* cumprem papel pedagógico fundamental, permitindo que técnicos identifiquem rapidamente, a partir do rótulo do produto ou da bula, a qual grupo de risco pertence cada ingrediente ativo e quais restrições de uso, como o número máximo de aplicações, a obrigatoriedade de mistura ou o intervalo mínimo entre aplicações do mesmo grupo, devem ser observadas (FRAC, 2024b). A crescente disponibilização dessas informações em aplicativos móveis e plataformas digitais de recomendação agrônômica, incluindo ferramentas de inteligência artificial voltadas ao diagnóstico e à recomendação de manejo fitossanitário, representa uma via promissora para ampliar o alcance das

diretrizes do FRAC entre produtores de pequena e média escala, historicamente com acesso mais limitado à assistência técnica especializada.

Programas de extensão rural que incorporam explicitamente o conceito de resistência cruzada e a lógica dos códigos FRAC em suas capacitações têm potencial para reduzir significativamente o uso de fungicidas de alto risco em aplicações isoladas, uma das práticas mais associadas à seleção acelerada de resistência qualitativa. A integração entre pesquisa, extensão e regulação de agrotóxicos, com atualização periódica das recomendações regionais de manejo com base nos dados de monitoramento de sensibilidade, constitui, portanto, elemento indispensável para que os fundamentos científicos do FRAC se traduzam efetivamente em sustentabilidade do controle químico de doenças fúngicas em escala de sistema produtivo (FRAC, 2024c; GODOY *et al.*, 2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O FRAC constitui pilar fundamental da fitopatologia aplicada e da proteção de plantas moderna, fornecendo o arcabouço científico e as diretrizes práticas necessárias para que o uso de fungicidas seja realizado de forma racional, sustentável e tecnicamente embasada. A lista de códigos FRAC, atualizada anualmente, é o instrumento essencial para que técnicos, pesquisadores e agricultores compreendam as relações de resistência cruzada entre fungicidas e planejem programas de controle que efetivamente retardem a emergência e a disseminação da resistência nos sistemas produtivos.

Os casos de resistência de *Phakopsora pachyrhizi*, *Botrytis cinerea*, *Fusarium* spp. e *Alternaria* spp. aos principais grupos de fungicidas sítio-específicos ilustram com clareza os riscos de ignorar as recomendações antirresistência do FRAC: a perda de eficácia de moléculas cujo desenvolvimento custou décadas e bilhões de dólares representa não apenas prejuízo econômico imediato ao produtor, mas ameaça estrutural à segurança alimentar de longo prazo.

As estratégias antirresistência recomendadas pelo FRAC – rotação de grupos, misturas com parceiros eficazes, limitação do número de aplicações e uso preventivo – são cientificamente sólidas e comprovadas em décadas de pesquisa e monitoramento. Sua implementação, porém, requer educação continuada dos usuários, acesso a informações atualizadas sobre o status de resistência nas regiões produtoras e políticas públicas que incentivem o manejo integrado de doenças em detrimento da dependência exclusiva do controle químico.

Recomenda-se que pesquisas futuras ampliem os programas de monitoramento molecular da resistência no Brasil, especialmente para patógenos de grandes culturas como soja, milho e trigo, e que o desenvolvimento de ferramentas moleculares de diagnóstico rápido em campo seja priorizado para viabilizar o monitoramento em escala nacional. A integração das tecnologias de fungicidas biológicos ao arcabouço FRAC representa o caminho mais promissor para a sustentabilidade do controle químico de doenças fúngicas nas próximas décadas.

Em síntese, o enfrentamento da resistência a fungicidas exige uma abordagem multidimensional, que combine o rigor da genética molecular na identificação de mecanismos de resistência, a robustez estatística dos programas de monitoramento de sensibilidade, o planejamento criterioso das estratégias de rotação, mistura e limitação de aplicações, e a efetiva tradução desse conhecimento técnico em recomendações compreensíveis para quem toma a decisão final no campo. Nenhuma dessas dimensões, isoladamente, é suficiente para preservar a eficácia dos fungicidas

sítio-específicos a longo prazo: é a atuação coordenada entre pesquisa, indústria, regulação e extensão rural, tal como preconizada pela própria estrutura do FRAC, que determinará se as próximas décadas de controle químico de doenças fúngicas serão marcadas pela sustentabilidade ou pela repetição dos ciclos de falha de controle já observados para Qols, DMIs e, mais recentemente, para os SDHIs.

REFERÊNCIAS

AGROADVANCE. **Fungicidas: 12 mecanismos de ação e estratégias de manejo.** Agroadvance Blog, 2024. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-fungicidas-mecanismo-de-acao-e-resistencia/>. Acesso em: 10 mai. 2025.

ARNOLD, C. J.; HAHN, E. A. M.; WHETTEN, R.; CHARTRAIN, L.; CHEEMA, J. *et al.* Multiple routes to fungicide resistance: interaction of Cyp51 gene sequences, copy number and expression. **Molecular Plant Pathology**, v. 25, n. 9, e13498, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/mpp.13498>>. doi: 10.1111/mpp.13498.

BRASIL. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **Portaria CNPq nº 2.664, de 6 de março de 2026:** institui a Política de Integridade na Atividade Científica do CNPq. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2026. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-cnpq-n-2.664-de-6-de-marco-de-2026-691779232>>. Acesso em: 13 ago. 2026.

BRENT, K. J.; HOLLOMON, D. W. **Fungicide resistance in crop pathogens: how can it be managed?** FRAC Monograph n. 1. 2. ed. rev. Brussels: CropLife International, 2007a.

BRENT, K. J.; HOLLOMON, D. W. **Fungicide resistance: the assessment of risk.** FRAC Monograph n. 2. 2. ed. rev. Brussels: CropLife International, 2007b.

CROP PROTECTION NETWORK. **Fungicide use in field crops: 1.4 FRAC code.** Crop Protection Network, 2023. Disponível em: <https://cropprotectionnetwork.org/web-books/fungicide-use-in-field-crops?section=14-fungicide-resistance-action-committee-frac-code>. Acesso em: 12 mai. 2025.

DEISING, H. B.; REIMANN, S.; PASCHOLATI, S. F. Mechanisms and significance of fungicide resistance. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 39, n. 2, p. 286–295, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-83822008000200003>>. doi: 10.1590/S1517-83822008000200003.

EMBRAPA SOJA. **Ferrugem asiática da soja: manejo e prevenção.** Portal Embrapa, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/ferrugem>. Acesso em: 15 mai. 2025.

FRAC – Fungicide resistance action committee. **SDHI fungicides: working group recommendations** 2023. FRAC, 2023. Disponível em: <https://www.frac.info/frac-teams/working-groups/sdhi-fungicides/>. Acesso em: 8 mai. 2025.

FRAC – Fungicide resistance action committee. **Background information: how does fungicide resistance evolve?** FRAC, 2024a. Disponível em:

ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer – Jandaia-GO, v.23 n.57; p.176 2026

<https://www.frac.info/fungicide-resistance-management/background-information/>. Acesso em: 5 mai. 2025.

FRAC – Fungicide resistance action committee. **FRAC Code List 2024: fungicides sorted by mode of action. CropLife International**, 2024b. Disponível em: <https://www.frac.info/media/kufnaceb/frac-code-list-2024.pdf>. Acesso em: 5 mai. 2025.

FRAC – Fungicide resistance action committee. **Fungicide resistance management**. FRAC, 2024c. Disponível em: <https://www.frac.info/fungicide-resistance-management/>. Acesso em: 5 mai. 2025.

FRAC – Fungicide resistance action committee. **QoI working group: meeting minutes and recommendations 2024**. FRAC, 2024d. Disponível em: <https://www.frac.info/publications/all-downloads/>. Acesso em: 8 mai. 2025.

GODOY, C. V.; UTIAMADA, C. M.; MEYER, M. C.; CAMPOS, H. D.; DEL PONTE, E. M. *et al.* Eficiência de fungicidas para o controle da ferrugem-asiática da soja, **Phakopsora pachyrhizi**, na safra 2023/2024: resultados sumarizados dos ensaios cooperativos. Londrina: Embrapa Soja, 2024. 26 p. (Circular Técnica, 206). Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1165843/1/CT-206-Claudia-Godoy.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2026.

LEADBEATER, A. FRAC and the sustainable management of fungicide resistance. In: KRÄMER, W.; SCHIRMER, U.; JESCHKE, P.; WITSCHER, M. (ed.). **Modern Crop Protection Compounds**. 3. ed. Weinheim: Wiley-VCH, cap. 1, p. 1–30, 2022.

LEADBEATER, A. Fungicide resistance: progress in understanding mechanism, monitoring, and management. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 113, n. 4, p. 507–520, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-22-0370-KD>>. doi: 10.1094/PHYTO-10-22-0370-KD.

MARKETSANDMARKETS. Fungicides Market by Type, Mode of Action, Formulation, Mode of Application, Crop Type and Region -- Global Forecast to 2029. MarketsandMarkets, 2024. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/fungicides.asp>. Acesso em: 08 set. 2026.

OKLAHOMA STATE UNIVERSITY EXTENSION. **Fungicide resistance management**. Stillwater: OSU Extension, 2017. Disponível em: <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/fungicide-resistance-management.html>. Acesso em: 15 mai. 2025.

OLIVER, R.; HANE, J.; MAIR, W.; LOPEZ-RUIZ, F. The 2023 update of target site mutations associated with resistance to fungicides and a web-tool to assist label designations. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 131, p. 1265–1270, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s41348-024-00872-7>>. doi: 10.1007/s41348-024-00872-7.

ROGÉRIO, F.; CASTRO, R. R. L.; MASSOLA JÚNIOR, N. S.; BOUFLEUR, T. R.; SANTOS, R. F. Multiple resistance of *Colletotrichum truncatum* from soybean to QoI and MBC fungicides in Brazil. **Journal of Phytopathology**, v. 172, n. 3, e13341, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/jph.13341>>. doi: 10.1111/jph.13341.

SIMÕES, K.; HAWLIK, A.; REHFUS, A.; GAVA, F.; STAMMLER, G. First detection of a SDH variant with reduced SDHI sensitivity in *Phakopsora pachyrhizi*. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 125, n. 1, p. 21–26, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s41348-017-0117-5>>. doi: 10.1007/s41348-017-0117-5.

TAYLOR, N. P.; CUNNIFFE, N. J. Optimal resistance management for mixtures of high-risk fungicides: robustness to the initial frequency of resistance and pathogen sexual reproduction. **Phytopathology**, v. 113, n. 1, p. 55–69, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-22-0050-R>>. doi: 10.1094/PHYTO-02-22-0050-R.