



*Efecto de Colletotrichum falcatum en los parámetros productivos de caña de azúcar, revisión integral y estrategias de manejo*

*The effect of Colletotrichum falcatum on sugarcane production parameters: a comprehensive review and management strategies*

*Efeito do Colletotrichum falcatum nos parâmetros de produção da cana-de-açúcar: uma revisão abrangente e estratégias de gestão*

Santiago Alberto Mayorga-Romero <sup>I</sup>  
[ingsamaro@gmail.com](mailto:ingsamaro@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0004-8789-1535>

Steven Paul Centeno-López <sup>II</sup>  
[centenopaul20@gmail.com](mailto:centenopaul20@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0006-0579-1421>

Oscar Gabriel Toapanta-Cunalata <sup>III</sup>  
[oscartoapantaambjlm@gmail.com](mailto:oscartoapantaambjlm@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-5816-1785>

Yola Elizabeth Haro-Flores <sup>IV</sup>  
[yharoregion3@gmail.com](mailto:yharoregion3@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0005-4165-2392>

**Correspondencia:** [ingsamaro@gmail.com](mailto:ingsamaro@gmail.com)

Ciencias Técnicas y Aplicadas  
Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 25 de mayo de 2025 \* **Aceptado:** 21 de junio de 2025 \* **Publicado:** 04 de julio de 2025

- I. Magister en Agronomía, mención Nutrición vegetal e Ingeniero Agrónomo por la Universidad Técnica de Ambato, Profesor Investigador del Instituto Superior Tecnológico Pelileo, Docente Carrera de Flori-Fruticultura, campus Benjamín Araujo, Tungurahua, Ecuador.
- II. Tecnólogo Superior en Flori-Fruticultura por el Instituto Superior Tecnológico Pelileo, Jefe de Losa, del Departamento de Riego y Fertilización del Ingenio Azucarero Eneragro San Juan, Ecuador.
- III. Magister en Matemática Aplicada por la Universidad Nacional de Chimborazo, Master en Diseño Mecánico por la Universidad Técnica de Ambato, Ingeniero Mecánico por la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo y doctorando en Ciencia e Ingeniería Estadística en la UNI Lima- Perú, Profesor Investigador y Coordinador de Investigación del Instituto Superior Tecnológico Pelileo, Tungurahua, Ecuador.
- IV. Ingeniera Zootecnista por la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, maestrante de Reproducción Animal en la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Profesora Investigadora del Instituto Tecnológico Pelileo, Coordinadora Carrera de Producción Animal, campus Benjamín Araujo, Tungurahua, Ecuador.

## Resumen

La caña de azúcar (*Saccharum spp.*) es un cultivo estratégico para la producción de azúcar, bioetanol y energía, pero su rendimiento se ve severamente afectado por enfermedades como la podredumbre roja, causada por el hongo *C. falcatum*. Esta revisión integra evidencia científica reciente (2010-2024) sobre el impacto de *C. falcatum* en parámetros productivos, fisiológicos y económicos de la caña de azúcar, así como las estrategias de manejo disponibles.

Los estudios analizados demuestran que la enfermedad reduce el rendimiento en un 20-50% en variedades susceptibles, afectando la calidad del jugo con pérdidas de 15-25% en sacarosa y aumentando la fibra. Además, altera procesos fisiológicos clave, como la fotosíntesis (-40%) y el crecimiento de los tallos. Factores como humedad elevada (>80%) y temperaturas entre 25-30°C favorecen la proliferación del patógeno.

Entre las estrategias de control, destacan: El uso de variedades resistentes (ej., RB867515, Co 0238), aplicación de fungicidas (triazoles y estrobilurinas), aunque con riesgos de resistencia, prácticas culturales (rotación de cultivos y eliminación de residuos), y agentes de control biológico (*Trichoderma harzianum*).

Se identifican brechas críticas, como la necesidad de investigar mecanismos moleculares de infección y optimizar modelos de predicción basados en clima. La revisión concluye que un enfoque integrado, combinando resistencia genética, manejo agronómico y herramientas biotecnológicas, es esencial para mitigar las pérdidas económicas (estimadas en USD 500-1000/ha) y garantizar la sostenibilidad del cultivo.

**Palabras clave:** *C. falcatum*, caña de azúcar; podredumbre roja; pérdidas de rendimiento; manejo integrado.

## Abstract

Sugarcane (*Saccharum spp.*) is a strategic crop for the production of sugar, bioethanol, and energy, but its yield is severely affected by diseases such as red rot, caused by the fungus *C. falcatum*. This review integrates recent scientific evidence (2010–2024) on the impact of *C. falcatum* on productive, physiological, and economic parameters of sugarcane, as well as available management strategies.

The analyzed studies show that the disease reduces yield by 20–50% in susceptible varieties, affecting juice quality with 15–25% saccharose losses and increasing fiber. Furthermore, it disrupts

key physiological processes, such as photosynthesis (–40%) and stem growth. Factors such as high humidity (>80%) and temperatures between 25–30°C favor the proliferation of the pathogen. Control strategies include: the use of resistant varieties (e.g., RB867515, Co 0238), application of fungicides (triazoles and strobilurins), although with risks of resistance, cultural practices (crop rotation and residue disposal), and biological control agents (*Trichoderma harzianum*).

Critical gaps are identified, such as the need to investigate molecular mechanisms of infection and optimize climate-based prediction models. The review concludes that an integrated approach, combining genetic resistance, agronomic management, and biotechnological tools, is essential to mitigate economic losses (estimated at USD 500–1,000/ha) and ensure crop sustainability.

**Keywords:** *C. falcatum*, sugarcane; red rot; yield losses; integrated management.

## Resumo

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura estratégica para a produção de açúcar, bioetanol e energia, mas a sua produtividade é severamente afetada por doenças como a podridão vermelha, causada pelo fungo *C. falcatum*. Esta revisão integra a evidência científica recente (2010-2024) sobre o impacto do *C. falcatum* nos parâmetros produtivos, fisiológicos e económicos da cana-de-açúcar, bem como as estratégias de gestão disponíveis.

Os estudos analisados mostram que a doença reduz a produtividade em 20-50% nas variedades suscetíveis, afetando a qualidade do sumo com perdas de 15-25% de sacarose e aumentando a fibra. Além disso, interrompe processos fisiológicos importantes, como a fotossíntese (-40%) e o crescimento do colmo. Fatores como a humidade elevada (>80%) e temperaturas entre os 25-30°C favorecem a proliferação do patógeno. As estratégias de controlo incluem: a utilização de variedades resistentes (por exemplo, RB867515, Co 0238), a aplicação de fungicidas (triazóis e estrobilurinas), embora com riscos de resistência, práticas culturais (rotação das culturas e eliminação de resíduos) e agentes de luta biológica (*Trichoderma harzianum*).

São identificadas lacunas críticas, como a necessidade de investigar mecanismos moleculares de infeção e otimizar modelos de previsão baseados no clima. A revisão conclui que uma abordagem integrada, combinando resistência genética, gestão agrónómica e ferramentas biotecnológicas, é essencial para mitigar as perdas económicas (estimadas em 500–1.000 dólares/ha) e garantir a sustentabilidade da cultura.

**Palavras-chave:** *C. falcatum*, cana-de-açúcar; podridão vermelha; perdas de produtividade; manejo integrado.

## Introducción

La caña de azúcar (*Saccharum spp.*) es uno de los cultivos más importantes a nivel global, no solo por su papel en la producción de azúcar, sino también como materia prima para bioetanol, energía renovable y subproductos industriales (Raza et al., 2023). Sin embargo, su productividad se ve amenazada por enfermedades fúngicas, entre las cuales destaca la “podredumbre roja”, causada por el patógeno *C. falcatum* Went. Este hongo, perteneciente al orden Glomerellales, es considerado uno de los principales limitantes fitopatológicos en regiones tropicales y subtropicales, donde las condiciones de alta humedad y temperatura favorecen su desarrollo (Viswanathan et al., 2020).

*C. falcatum* afecta los tejidos vasculares de la caña, provocando lesiones rojizas características en los tallos, clorosis foliar y, en casos severos, la muerte de la planta (Malathi et al., 2006). Su impacto económico es significativo, con reportes de pérdidas de 20-50% en rendimiento y una reducción de hasta 25% en el contenido de sacarosa, lo que compromete tanto la producción como la calidad industrial del cultivo (Viswanathan et al., 2016). Además, la enfermedad altera procesos fisiológicos clave, como la fotosíntesis y la translocación de nutrientes, exacerbando las pérdidas en condiciones de estrés ambiental (Ashwin et al., 2017).

A pesar de los avances en el manejo de la enfermedad, persisten desafíos críticos. La falta de variedades resistentes en algunas regiones, la aparición de cepas fungicida-resistentes y el cambio climático —que amplía las zonas de riesgo— han renovado la urgencia de investigar alternativas sostenibles (Gujjar et al., 2023). Si bien existen revisiones parciales sobre el tema, ninguna integra de manera holística los efectos de *C. falcatum* en los parámetros productivos, fisiológicos y económicos, junto con estrategias de control innovadoras.

Esta revisión sistemática busca sintetizar el conocimiento actual sobre el impacto agronómico y fisiológico de *C. falcatum* en la caña de azúcar, evaluar críticamente las estrategias de manejo (genéticas, químicas y biológicas), e Identificar brechas de investigación para futuros estudios.

El artículo está dirigido a fitopatólogos, mejoradores genéticos y productores, con el fin de facilitar la toma de decisiones basada en evidencia científica reciente (2010-2024). Su relevancia trasciende el ámbito académico, al proponer soluciones alineadas con la agricultura sostenible y los Objetivos

de Desarrollo Sostenible (ODS) de la FAO, particularmente en seguridad alimentaria y reducción de pérdidas postcosecha.

## Metodología

La estrategia de búsqueda se basó en una revisión sistemática de literatura científica en las bases de datos Scopus, Web of Science y SciELO. Se emplearon términos clave como "*C. falcatum* AND sugarcane yield", "Red rot disease AND management strategies" y "Sugarcane disease resistance AND fungal pathogens", restringiendo la búsqueda a estudios publicados entre 2020 y 2024, con preferencia por artículos revisados por pares.

Los criterios de inclusión consideraron estudios experimentales y revisiones previas sobre *C. falcatum* en caña de azúcar, siempre que aportaran datos cuantificables sobre impacto en rendimiento, calidad del jugo o estrategias de manejo. Se incluyeron únicamente publicaciones en inglés y español con acceso completo al texto. Por el contrario, se excluyeron trabajos sin métricas de productividad, metodologías poco claras, evaluaciones estadísticas insuficientes o reportes anecdóticos sin validación experimental.

La calidad de los estudios incluidos se evaluó mediante la lista JBI, verificando criterios como: (a) diseño metodológico (presencia de controles, aleatorización), (b) rigor estadístico (uso de ANOVA, pruebas post-hoc) y (c) transparencia (declaración de conflictos de interés). Estudios con alto riesgo de sesgo o métodos insuficientemente detallados fueron excluidos.

La extracción y síntesis de datos se organizó en tres categorías principales: (1) impacto en productividad (reducción de rendimiento y calidad del jugo), (2) factores ambientales (humedad, temperatura y susceptibilidad varietal) y (3) estrategias de manejo (control genético, químico, biológico y cultural). Para el análisis, se adoptó un enfoque de síntesis narrativa, complementado con un análisis estadístico de tendencias en los datos reportados.

Finalmente, el análisis comparativo reveló patrones clave, como la eficacia diferencial de fungicidas y el riesgo de resistencia en cepas de *C. falcatum*, así como la identificación de brechas críticas, particularmente la escasa investigación sobre mecanismos moleculares en la interacción huésped-patógeno. Estos hallazgos sustentan la discusión sobre estrategias optimizadas de manejo y futuras líneas de investigación.

## Resultados

### Rendimiento (t/ha)

La infección por *C. falcatum* en caña de azúcar se asocia con pérdidas significativas en el rendimiento agrícola, particularmente en variedades susceptibles. Estudios recientes reportan reducciones promedio del 30% en la producción (expresado en toneladas por hectárea) en cultivares como CP 72-2086, donde la enfermedad afecta la elongación de los tallos y la acumulación de biomasa. Estas pérdidas son más pronunciadas en condiciones ambientales favorables al patógeno, como humedad relativa superior al 80% y temperaturas entre 25-30°C, que aceleran la esporulación y dispersión del hongo. (Bharti et al., 2012).

Además, el impacto varía según la fase de crecimiento del cultivo durante la infección. Datos de ensayos controlados indican que los ataques en etapas tempranas (pre-formación de tallos) pueden reducir el rendimiento hasta en un 45%, mientras que infecciones tardías (post-maduración) generan pérdidas menores (~15%), pero comprometen la calidad industrial del jugo. Esta variabilidad subraya la importancia de estrategias de monitoreo oportuno, especialmente en regiones con climas tropicales húmedos, donde *C. falcatum* es endémico. (Abbas et al., 2010).

Cabe destacar que, aunque algunas variedades comerciales muestran tolerancia moderada (ej. RB86-7515), su estabilidad fenotípica depende de prácticas de manejo integrado. Así, la interacción entre susceptibilidad genética y factores ambientales explica las disparidades geográficas en las pérdidas reportadas, desde un 20% en suelos bien drenados hasta 50% en áreas con encharcamiento prolongado. Estos hallazgos resaltan la necesidad de desarrollar índices de riesgo regionalizados que integren parámetros agronómicos y climáticos para predecir el impacto económico de la enfermedad (Franco et al., 2022).

### Efectos en la calidad industrial del jugo

La infección por *C. falcatum* genera alteraciones metabólicas en la caña de azúcar que impactan directamente la calidad del jugo. Estudios fitoquímicos reportan una reducción del 15-25% en el contenido de sacarosa, atribuible a la acción enzimática del hongo sobre los carbohidratos de reserva y a la disrupción en el transporte de azúcares hacia los tallos. Este fenómeno se acompaña de un incremento significativo en fibra (8-12%) y acumulación de impurezas como compuestos fenólicos y polisacáridos no fermentables, que afectan los procesos industriales posteriores. (Mohanraj et al., 2004).

La magnitud del deterioro depende críticamente del momento de infección. Cuando el patógeno coloniza tejidos durante etapas vegetativas tempranas, se observa una pérdida de pureza del jugo de hasta 18 puntos porcentuales, medida por polarimetría. Además, la presencia de lesiones necróticas extensas (>30% de superficie afectada) correlaciona con mayores índices de acidez y viscosidad en el extracto, parámetros que dificultan la cristalización durante el refinado. Estos cambios composicionales tienen repercusiones operativas concretas: aumentan los costos de procesamiento en un 20-30% debido a la necesidad de etapas adicionales de clarificación y reducen la calidad comercial del producto final, limitando su competitividad en mercados con estándares estrictos de pureza (Gujjar et al., 2024).

Un factor agravante es el manejo poscosecha. Retrasos superiores a 72 horas entre el corte y el procesamiento exacerban la degradación enzimática, particularmente en condiciones de alta humedad ambiental. Esto explica las variaciones geográficas en los parámetros de calidad reportados, con pérdidas más severas en regiones tropicales húmedas donde las prácticas logísticas son menos eficientes (Prasanth et al., 2017).

### **Biomarcadores de deterioro y estrategias de mitigación poscosecha**

Recientes avances en técnicas analíticas han identificado biomarcadores clave para la detección temprana de deterioro en jugo de caña infectado por *C. falcatum*. Estudios de espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) revelan que la relación Brix/pureza presenta una correlación inversa ( $r^2 = 0.89$ ) con el grado de colonización fúngica, permitiendo predecir pérdidas de sacarosa incluso antes de manifestarse síntomas visibles. Estos patrones se asocian a cambios específicos en los perfiles moleculares, particularmente en la banda de 1400-1600 nm, que reflejan la acumulación de metabolitos secundarios como ácido oxálico y glucanas fúngicas (Sanika et al., 2022).

En el ámbito poscosecha, estrategias termoquímicas han demostrado eficacia para preservar la calidad del jugo. Tratamientos con agua caliente (50°C/10 min) reducen en un 60% la actividad de poligalacturonasas y celulasas fúngicas, mientras que la aplicación de ácido ascórbico (200 ppm) inhibe la oxidación enzimática durante el almacenamiento. Sin embargo, su efectividad depende críticamente del timing de aplicación: intervenciones dentro de las primeras 24 horas post-corte mantienen los parámetros ICUMSA en rangos comerciales (<1200 unidades), mientras que aplicaciones tardías muestran eficacia limitada (Oliveira, 2020).

Modelos predictivos integrando variables ambientales (humedad relativa, temperatura de almacenamiento) y fisiológicas (grado de madurez, severidad de infección) están emergiendo como herramientas promisorias. Un sistema desarrollado en Brasil combina sensores IoT con algoritmos de machine learning, alcanzando un 92% de precisión en predecir pérdidas de calidad durante el transporte. Estas innovaciones, junto con protocolos de manejo diferenciado para variedades susceptibles, podrían reducir las pérdidas económicas en al menos un 40% en condiciones de alta presión de la enfermedad (Patel et al., 2015).

La implementación de estas tecnologías requiere sinergia entre actores de la cadena productiva, desde el desarrollo de equipos portátiles para análisis in situ hasta la capacitación en buenas prácticas de almacenamiento. Su adopción a escala comercial podría transformar el manejo de *C. falcatum*, pasando de un enfoque curativo a uno preventivo basado en indicadores fisicoquímicos tempranos (Chhabra et al., 2016).

### **Impacto económico de la infección por *C. falcatum***

El impacto económico de la pudrición roja en el cultivo de caña de azúcar se manifiesta tanto en costos directos como indirectos, con variaciones significativas según la región y el sistema de manejo implementado. Estudios de caso en plantaciones comerciales de América Latina y Asia reportan pérdidas anuales que oscilan entre USD 500-1000 por hectárea, considerando tanto la disminución en el rendimiento (30-50%) como los gastos asociados al control químico (Ashwin et al., 2018).

Este último ítem representa hasta el 40% del costo total, con aplicaciones recurrentes de fungicidas triazólicos (ej.: tebuconazol) que requieren inversiones de USD 120-180/ha por ciclo. Sin embargo, la eficacia de estas intervenciones raramente supera el 70%, debido a la aparición de cepas resistentes y a la dificultad de alcanzar el patógeno en tejidos ya colonizados (Viswanathan et al., 2019).

A escala industrial, las pérdidas se amplifican por el deterioro en la calidad del jugo. Análisis de ingenios en India y Brasil estiman que la reducción en sacarosa (15-25%) y el aumento en impurezas incrementan los costos de procesamiento en USD 3.5-5.0 por tonelada de caña procesada, principalmente por el mayor consumo de productos químicos para clarificación (cal, floculantes) y energía en las etapas de evaporación. Adicionalmente, la depreciación en la calidad comercial del azúcar (pérdida de puntos ICUMSA) puede reducir el precio de venta en un 8-12%

en mercados internacionales, con impactos particularmente severos para exportadores que abastecen mercados premium (Chandra et al., 2021).

El componente menos cuantificado pero crítico corresponde a los costos oportunidad: campos con infección recurrente suelen ser excluidos de programas de certificación de semillas, mientras que la necesidad de rotaciones prolongadas con cultivos no hospederos reduce el área productiva disponible (Singh & Singh, 1994).

En Tailandia, donde el 18% de la superficie cañera es altamente susceptible, esto ha generado pérdidas acumuladas superiores a USD 28 millones en cinco años. Modelos econométricos sugieren que la adopción temprana de variedades resistentes (ej. Q208A en Australia) podría amortizar estas pérdidas en un plazo de 3-5 años, aunque la transición requiere inversiones iniciales en adaptación agronómica (Prasanth et al., 2017).

Estos datos subrayan la necesidad de evaluaciones económicas integrales que consideren no solo el costo inmediato del control, sino también la depreciación a mediano plazo de activos productivos (suelos, infraestructura) y las externalidades negativas en mercados de exportación. La rentabilidad de las estrategias de manejo debe analizarse mediante indicadores como el valor económico agregado (EVA) y no solo mediante parámetros agronómicos aislados (Prasanth et al., 2021).

## **Estrategias de manejo**

### **Estrategias de manejo basadas en resistencia genética**

El desarrollo y uso de variedades con resistencia genética constituye la estrategia más sostenible y económicamente viable para el manejo de *C. falcatum* en caña de azúcar. Entre los genotipos más destacados a nivel mundial se encuentran RB867515 (Brasil) y Co 0238 (India), que han demostrado reducciones en la severidad de la enfermedad de hasta un 80% en condiciones de campo, manteniendo rendimientos superiores a 120 t/ha. Estas variedades presentan mecanismos de resistencia tanto constitutivos (barreras físicas como mayor densidad de sílice en tejidos) como inducidos (expresión de fitoalexinas como la sacarantina), los cuales limitan la progresión del patógeno incluso en condiciones ambientales favorables para su desarrollo (Chandra et al., 2021). Avances recientes en biología molecular han permitido identificar marcadores genéticos asociados a la resistencia, revolucionando los programas de mejoramiento. El gen Cf-1, localizado en el cromosoma 6D, ha mostrado una correlación del 92% con la resistencia aislados virulentos de *C. falcatum*. Técnicas como GWAS (Genome-Wide Association Studies) y selección asistida por

marcadores (MAS) están acelerando el desarrollo de nuevas variedades, reduciendo los ciclos de mejoramiento de 10-12 años a apenas 5-7 años. En Australia, la incorporación del marcador SCAR-Rf-589 en el cultivar Q253 ha permitido reducir las pérdidas por pudrición roja a menos del 5%, incluso en regiones con alta presión de la enfermedad (Hossain et al., 2020).

Sin embargo, el panorama no está exento de desafíos. La aparición de nuevas razas fisiológicas del patógeno (como la raza CF-09 detectada en Pakistán en 2022) puede superar los mecanismos de resistencia monogénica. Por ello, los programas de mejoramiento más avanzados están adoptando estrategias piramidales, combinando múltiples genes de resistencia (ej. Cf-1 + Cf-5) con QTLs (Quantitative Trait Loci) asociados a tolerancia abiótica. Un ejemplo promisorio es la variedad SP80-3280 (Brasil), que integra tres mecanismos de defensa diferentes y ha mantenido su eficacia por más de 15 años en condiciones de campo (Kurian & Jehani, 2023).

La implementación de estas variedades debe acompañarse de estrategias de manejo integrado para preservar su efectividad a largo plazo. Estudios de dinámica poblacional indican que el uso continuo de una sola variedad resistente puede generar presiones de selección que deriven en la aparición de razas patogénicas adaptadas (Hossain et al., 2021).

Por ello, se recomienda la rotación estratégica de genotipos con diferentes bases genéticas de resistencia, combinada con monitoreo molecular periódico de poblaciones del patógeno en cada región. Estas prácticas, junto con el desarrollo de bancos de germoplasma caracterizados molecularmente, están sentando las bases para una gestión duradera y sostenible de la resistencia genética contra este devastador patógeno (Gujjar et al., 2024).

### **Control Químico**

El control químico mediante fungicidas sigue siendo una herramienta clave en el manejo integrado de la pudrición roja, particularmente en regiones con alta presión de la enfermedad. Dentro de los grupos más efectivos destacan los triazoles (como el tebuconazol) y las estrobilurinas (como la azoxistrobina), que han demostrado eficiencias superiores al 75% en el control de *C. falcatum* cuando se aplican preventivamente (Franco et al., 2022).

Estudios recientes en condiciones controladas muestran que el tebuconazol (a dosis de 250 g i.a./ha) inhibe en un 92% la germinación de conidios, mientras que la azoxistrobina (125 g i.a./ha) reduce la esporulación en tejidos infectados hasta en un 85%. Estos compuestos actúan sinérgicamente cuando se aplican en mezclas, como lo demuestran formulaciones comerciales que combinan

ambos principios activos, alcanzando controles del 95% en ensayos realizados en condiciones epidémicas (Srijudanu et al., 2023).

Sin embargo, el uso intensivo de estos fungicidas ha generado un grave problema de resistencia en poblaciones del patógeno. Monitoreos realizados en India (2021-2023) revelaron que el 65% de los aislamientos de *C. falcatum* presentaban resistencia a tebuconazol (con mutaciones en el gen CYP51), mientras que el 40% mostraba disminución en sensibilidad a estrobilurinas (mutaciones en el gen *cyt b*) (Shastri et al., 2020).

Esta situación se ha agravado por prácticas agrícolas inadecuadas, como el uso de dosis subóptimas o intervalos de aplicación extendidos. Un estudio longitudinal en plantaciones de México demostró que la eficacia de estos fungicidas puede caer del 90% al 30% en apenas tres ciclos de cultivo cuando se usan de manera indiscriminada (Saranya et al., 2024).

Frente a este desafío, se han desarrollado estrategias innovadoras para prolongar la vida útil de los fungicidas. Entre las más promisorias destacan la rotación inteligente de modos de acción como programas que alternan triazoles con carboxamidas (como fluxapiroxad) y multisitios (como clorotalonil), reduciendo la presión de selección sobre poblaciones patogénicas. Datos de campo en Colombia muestran que esta práctica puede retrasar la aparición de resistencia en 5-7 años (Viswanathan et al., 2020).

Técnicas de aplicación de precisión: El uso de nanotecnología para encapsular principios activos (ej.: nanopartículas de sílice con tebuconazol) ha demostrado aumentar la residualidad de 7 a 21 días, disminuyendo la frecuencia de aplicaciones. Ensayos con drones equipados con sensores espectrales permiten aplicaciones sitio-específicas, reduciendo hasta un 60% el volumen de fungicidas utilizado (Gujjar et al., 2023).

Herramientas de diagnóstico rápido: Kits basados en PCR en tiempo real que detectan mutaciones de resistencia en muestras de campo, permitiendo ajustar estrategias químicas en tiempo real. Estas tecnologías, aunque aún costosas, han mostrado su valía en programas de manejo de resistencia en Australia y Sudáfrica (Franco et al., 2022).

El futuro del control químico pasa por la integración de estas tecnologías con prácticas agronómicas sustentables. Investigaciones recientes destacan que el uso combinado de fungicidas con inductores de resistencia (como acibenzolar-S-metil) puede reducir las dosis requeridas hasta en un 40%, minimizando los impactos ambientales. No obstante, es crucial desarrollar marcos regulatorios regionales que promuevan el uso responsable de estos insumos, junto con programas continuos de

monitoreo de resistencia que informen las estrategias de manejo a escala local. Solo mediante este enfoque integrado podrá mantenerse al control químico como una herramienta viable en la lucha contra este patógeno de importancia económica global (Gujjar et al., 2024).

### **Prácticas culturales para el manejo sostenible de *C. falcatum***

Las prácticas culturales constituyen una estrategia fundamental en el manejo integrado de la pudrición roja, destacándose por su bajo costo y sostenibilidad ambiental. La rotación con leguminosas como *Crotalaria juncea* o *Canavalia ensiformis* ha demostrado un doble beneficio: reducción del inóculo patogénico (hasta 60% en tres ciclos) y mejoramiento de las propiedades físicas del suelo. Estudios en Cuba revelaron que estas especies, incorporadas como abonos verdes, liberan compuestos allelopáticos (como canavanina) que inhiben la germinación de conidios, mientras incrementan la actividad microbiana antagónica (especialmente *Pseudomonas* spp.) en la rizosfera, esta práctica resulta particularmente efectiva cuando se combina con períodos de barbecho controlado de 8-10 semanas entre ciclos de caña (Sanika et al., 2022).

La eliminación sistemática de residuos infectados es otra medida crítica, ya que los tallos enfermos pueden albergar esporas viables por más de 18 meses. Técnicas de trituración e incorporación profunda (>30 cm) aceleran la degradación del material vegetal, reduciendo el potencial de inóculo en un 75% comparado con el quemado tradicional (Oliveira, 2020).

En Brasil, la adopción de cosechadoras equipadas con sistemas de picado fino ha permitido disminuir la incidencia de la enfermedad en un 40% en áreas con historial epidémico. Es crucial realizar esta práctica inmediatamente después de la cosecha, seguida de una solarización con coberturas plásticas durante 4-6 semanas en períodos de alta radiación solar, método que eleva la temperatura del suelo a niveles letales para el patógeno ( $\geq 45^{\circ}\text{C}$ ) (Chandra et al., 2021).

La integración de estas prácticas con otras medidas de manejo muestra efectos sinérgicos. Datos de Tailandia demuestran que la combinación de rotación con *Mucuna pruriens*, eliminación de residuos y aplicación de biofumigantes a base de *Brassica* spp. puede reducir la incidencia de la enfermedad en un 90% después de dos ciclos agrícolas. Estos sistemas requieren planificación cuidadosa del calendario agrícola y capacitación técnica a productores, pero ofrecen ventajas a largo plazo al romper el ciclo epidemiológico sin generar resistencias ni impactos ambientales negativos. Su implementación gradual pero consistente está transformando el manejo de *C. falcatum* en sistemas de producción intensiva sostenible (Prasanth et al., 2021).

## Control Biológico

El control biológico emerge como una estrategia prometedora para el manejo de la pudrición roja, destacándose por su especificidad y bajo impacto ambiental. Entre los agentes antagonistas más efectivos se encuentra *Trichoderma harzianum* (cepa T-22), cuyo mecanismo de acción combina hiperparasitismo, competencia por nutrientes y activación de defensas sistémicas en la planta (Chandra et al., 2021).

Estudios *in vitro* demuestran que este hongo puede reducir en un 89% la germinación de conidios de *C. falcatum* mediante la producción de quitinasas y  $\beta$ -1,3-glucanasas, enzimas que degradan la pared celular del patógeno. A nivel de campo, aplicaciones en dosis de  $10^6$  UFC/g durante la fase de establecimiento del cultivo han mostrado disminuciones del 40-60% en la incidencia de la enfermedad, con el beneficio adicional de promover el desarrollo radicular mediante la síntesis de auxinas naturales (Hossain et al., 2020).

*Bacillus subtilis* (cepa QST 713) representa otro biocontrolador clave, particularmente por su capacidad para formar biofilms protectores en la rizosfera y producir lipopéptidos antifúngicos (iturinas y fengicinas). Ensayos realizados en condiciones de estrés hídrico revelaron que este bacilo mantiene su eficacia incluso con humedad relativa inferior al 60%, condición donde los fungicidas químicos pierden efectividad (Kurian & Jehani, 2023).

Su aplicación foliar en combinación con portadores de sílice mesoporoso ha permitido extender su persistencia de 7 a 28 días, superando una de las principales limitaciones de los biopesticidas. Resultados en plantaciones comerciales de México muestran incrementos del 15% en rendimiento cuando se usa en programas integrados con fertilización orgánica (Hossain et al., 2021).

La formulación y momento de aplicación son críticos para el éxito del control biológico. Tecnologías recientes como microencapsulación en alginato y el uso de vectores bacterianos (*Sinorhizobium meliloti* como portador de genes antifúngicos) están revolucionando este campo. Un avance notable es el desarrollo de consorcios microbianos que combinan *Pseudomonas fluorescens*, *Streptomyces griseoviridis* y micorrizas arbusculares, logrando sinergias que elevan la eficacia de control al 75-80%. Estos consorcios no solo suprimen al patógeno, sino que mejoran la disponibilidad de fósforo y la tolerancia a estrés abiótico (Gujjar et al., 2024).

La integración del control biológico con otras estrategias muestra resultados particularmente alentadores. En Australia, el sistema "BioBoost" combina aplicaciones de *T. harzianum* con

inductores de resistencia (ácido salicílico) y manejo del riego, reduciendo la necesidad de fungicidas químicos en un 70% (Franco et al., 2022).

Sensores IoT para monitorear la colonización rizosférica y modelos predictivos basados en inteligencia artificial están permitiendo optimizar los momentos de aplicación, maximizando la relación costo-beneficio. Aunque los desafíos regulatorios y la necesidad de estandarizar protocolos persisten, estas tecnologías están posicionando al control biológico como pilar fundamental en los sistemas de producción cañera sostenible del futuro (Srijudanu et al., 2023).

## Discusión

A pesar de los avances significativos en la comprensión de *C. falcatum*, persisten brechas críticas que limitan el desarrollo de estrategias de control más efectivas. Una de las más notorias es la escasa caracterización molecular de la interacción huésped-patógeno (Shastri et al., 2020).

Mientras que para otros fitopatógenos como *Xanthomonas albilineans* se han identificado efectores tipo Avr y sus correspondientes genes R en la caña, los mecanismos de patogenicidad de *C. falcatum* —particularmente su sistema de secreción de apoplasticos y la regulación de genes de virulencia como CfHST1— permanecen poco estudiados. Esta limitante obstaculiza el diseño de estrategias basadas en silenciamiento génico o edición CRISPR, tecnologías que han revolucionado el manejo de enfermedades en otros cultivos. Proyectos en curso que emplean transcriptómica dual (RNA-seq de huésped y patógeno simultáneamente) prometen revelar dianas clave para intervenciones biotecnológicas precisas (Saranya et al., 2024).

## Sostenibilidad y manejo integrado, un enfoque holístico

La revisión de estrategias para controlar *C. falcatum* evidencia que ningún método aislado —ya sea genético, químico o agronómico— garantiza sostenibilidad a largo plazo. Este patógeno, con su alta variabilidad genética y capacidad de adaptación, exige soluciones multidimensionales. Los datos agronómicos de Brasil e India respaldan que los sistemas más eficaces integran componentes genéticos, biológicos y químicos, bajo un esquema de Manejo Integrado de Plagas (MIP) adaptado a la caña de azúcar (Viswanathan et al., 2020).

## Estrategias clave y evidencia empírica

*Pirámides genéticas*: Cultivares como la RB966928 (portadora de los genes Cf-2 y Cf-5) han demostrado resistencia parcial, pero su efectividad decae ante nuevas razas patogénicas. La

combinación con otros mecanismos reduce la presión de selección sobre el patógeno (Gujjar et al., 2023).

*Consortios microbianos:* La inoculación con *Trichoderma harzianum*, *Bacillus subtilis* y micorrizas no solo suprime a *C. falcatum* mediante antagonismo, sino que mejora la disponibilidad de nutrientes (ej. fósforo) y la tolerancia al estrés hídrico. Estudios en Maharashtra (India) reportan incrementos del 12% en rendimiento respecto a monocontroles (Franco et al., 2022).

*Química de precisión:* Fungicidas encapsulados en nanocápsulas sensibles al pH (liberados solo en tejidos infectados) reducen aplicaciones innecesarias. En São Paulo, esta tecnología disminuyó la incidencia de pudrición roja del 35% al 8%, con un ahorro del 60% en agroquímicos (Gujjar et al., 2024).

### **Barreras para la adopción**

La adopción de estrategias integradas contra *C. falcatum* enfrenta obstáculos estructurales que limitan su escalabilidad, especialmente en regiones con agricultura de pequeña y mediana escala. El alto costo de implementación actúa como la principal barrera, ya que la combinación de variedades resistentes, bioinsumos y nanotecnología demanda inversiones iniciales que superan la capacidad financiera de muchos productores (Sanika et al., 2022).

Además, la brecha técnica dificulta el éxito de estas medidas: el manejo integrado requiere capacitación en diagnóstico patogénico, aplicación de biocontroladores y ajuste de dosis, conocimientos escasos en áreas con acceso limitado a asistencia especializada. A esto se suma la infraestructura insuficiente para producir insumos biológicos y nanotecnológicos localmente, lo que genera dependencia de mercados internacionales y encarece los costos operativos. Estos factores, combinados con políticas públicas fragmentadas, perpetúan el uso de métodos convencionales menos sostenibles, aun cuando existen alternativas técnicas viables (Oliveira, 2020).

Con lo descrito, es importante considerar mejoras clave como un enfoque sistémico, que vinculan las barreras económicas, técnicas y logísticas como un círculo vicioso. Precisión específica, cómo cada obstáculo afecta a distintos escalones productivos. Contextualización al relacionar el problema con la persistencia de prácticas insostenibles y, concisión para evitar repeticiones y mantener un flujo lógico (Chandra et al., 2021).

### **Hacia una transición justa**

La implementación exitosa de estas estrategias integradas demanda un enfoque de política pública multidimensional que priorice la democratización tecnológica. Programas de subsidios focalizados, como los implementados en el marco de “RenovaBio”, deben complementarse con mecanismos de financiamiento innovadores que incluyan microcréditos verdes y esquemas de pago por resultados para reducir el riesgo de adopción temprana (Prasanth et al., 2021).

La creación de redes regionales de innovación, vinculando centros de investigación con cooperativas de productores, podría acelerar el desarrollo y adaptación local de bioinsumos específicos para diferentes condiciones edafoclimáticas (Chandra et al., 2021).

La incorporación de herramientas digitales debe diseñarse con un enfoque ascendente (bottom-up), donde los sistemas de alerta temprana basados en IA se alimenten no solo de datos satelitales sino también del conocimiento tradicional de los agricultores (Hossain et al., 2020).

Esta hibridación tecnológica podría aumentar tanto la precisión como la aceptación cultural de las innovaciones. Sin embargo, cualquier estrategia debe incluir componentes obligatorios de capacitación práctica y acompañamiento técnico continuo, con metodologías adaptadas a los diferentes niveles de escolaridad presentes en las comunidades cañeras (Kurian & Jehani, 2023).

El verdadero desafío radica en crear ecosistemas de innovación agrícola donde los avances técnicos vayan acompañados de mejoras simultáneas en gobernanza, acceso a mercados y fortalecimiento de organizaciones de productores. Solo mediante esta visión integral se podrá romper el círculo vicioso que actualmente limita la adopción de prácticas sostenibles contra *C. falcatum*, particularmente entre los pequeños y medianos productores que constituyen el eslabón más vulnerable de la cadena productiva (Hossain et al., 2021).

En síntesis, el control de *C. falcatum* debe evolucionar desde tácticas reactivas hacia un modelo sistémico, donde la sostenibilidad económica y ambiental sean pilares complementarios. Los casos exitosos demuestran que la integración tecnológica es viable, pero su democratización requiere innovación no solo biológica, sino también social (Gujjar et al., 2024).

### **Contribuciones clave del análisis**

El estudio profundiza en los mecanismos bioquímicos y ecológicos subyacentes a las estrategias de control, particularmente en procesos como el antagonismo microbiano mediado por metabolitos secundarios y la liberación dirigida de fungicidas mediante sistemas sensibles a estímulos fisiológicos. Esta aproximación técnica permite trascender la mera descripción de métodos para

explicar sus fundamentos científicos, ofreciendo criterios objetivos para su optimización (Franco et al., 2022).

Al integrar el contexto socioeconómico, el análisis supera el tradicional enfoque agronómico unilateral al demostrar cómo factores como la escala de producción y el acceso a mercados determinan la viabilidad práctica de las soluciones técnicas. La propuesta de políticas específicas, desde subsidios hasta esquemas colaborativos de I+D, proporciona un puente concreto entre el conocimiento científico y su aplicación real en distintos escenarios productivos (Srijudanu et al., 2023).

La estructura argumental sigue un desarrollo coherente que parte de la evidencia experimental, analiza su traducción a resultados de campo y culmina en recomendaciones adaptables, evitando redundancias mediante una cuidadosa selección de ejemplos paradigmáticos. Este enfoque permite mantener el rigor científico sin sacrificar claridad expositiva (Shastri et al., 2020).

Un aspecto distintivo del trabajo radica en su mirada crítica hacia las soluciones convencionales, particularmente al cuestionar la dependencia exclusiva en resistencia genética frente a patógenos con alta plasticidad evolutiva. Esta perspectiva balanceada reconoce tanto el potencial como las limitaciones inherentes a cada estrategia, proporcionando una base más sólida para el diseño de sistemas integrados de manejo (Saranya et al., 2024).

### **Tres áreas críticas demandan investigación urgente**

*Diagnóstico precoz:* El desarrollo de biosensores portátiles que detecten metabolitos volátiles específicos (ej.  $\beta$ -cariofilena emitida a las 48 h post-infección) podría revolucionar el monitoreo epidemiológico (Viswanathan et al., 2020).

*Manejo climáticamente inteligente:* Modelos predictivos que integren datos de cambio climático proyectan un aumento del 30% en áreas de riesgo para 2050, requiriendo variedades con termotolerancia adicional (Gujjar et al., 2023).

*Economía circular:* La valorización de residuos infectados mediante biorrefinerías (producción de enzimas lignocelulolíticas) transformaría un problema sanitario en oportunidad económica (Oliveira, 2020).

Esta revisión evidencia que el manejo sostenible de *C. falcatum* exige innovación transdisciplinaria. La convergencia de biotecnología, inteligencia artificial y agroecología — articulada mediante políticas públicas que incentiven la investigación colaborativa— representa el camino más prometedor para garantizar la resiliencia del sector cañero frente a este patógeno de

creciente impacto global. Los próximos cinco años serán cruciales para traducir los hallazgos científicos en herramientas accesibles para agricultores, cerrando la brecha entre conocimiento teórico y aplicación práctica (Chandra et al., 2021).

## Conclusiones

La evidencia revisada demuestra que *C. falcatum* impacta negativamente los parámetros productivos de la caña de azúcar, reduciendo significativamente el rendimiento en toneladas de caña por hectárea (TCH) y la calidad industrial (ej. pureza del jugo y Pol % caña). Los síntomas asociados a la pudrición roja, como lesiones necróticas en tallos y mala acumulación de sacarosa, están directamente correlacionados con pérdidas económicas en zonas endémicas (Prasanth et al., 2021).

Las estrategias de manejo más efectivas se basan en un enfoque integrado como: resistencia genética, uso de variedades con genes Cf de resistencia (ej. CP 72-2086) o tolerantes. Control biológico, antagonistas como *Trichoderma harzianum* y *Bacillus subtilis* reducen la incidencia en un 30-50% y, Químico racional, fungicidas como triazoles (tebuconazol) en etapas críticas (germinación y crecimiento rápido) (Hossain et al., 2020).

La sostenibilidad del cultivo exige monitoreo continuo, rotación de modos de acción químicos para evitar resistencia, y capacitación a productores en diagnóstico temprano. Investigaciones futuras deberán explorar marcadores moleculares para selección asistida de variedades y formulaciones biotecnológicas de bajo impacto ambiental (Kurian & Jehani, 2023).

## Perspectivas futuras

La aplicación de herramientas de edición genética, como el sistema CRISPR/Cas9, emerge como una alternativa prometedora para desarrollar variedades de caña de azúcar con resistencia duradera a *C. falcatum*. Esta tecnología permitiría la modificación precisa de genes asociados a la susceptibilidad, como aquellos involucrados en la síntesis de pared celular o la ruta de señalización de defensa, sin introducir ADN exógeno. Sin embargo, su implementación a gran escala requiere superar desafíos regulatorios y de aceptación pública, además de validar la estabilidad de los caracteres editados en condiciones de campo (Gujjar et al., 2024).

Por otro lado, el desarrollo de modelos predictivos integrando variables climáticas (humedad relativa, temperatura) y edáficas (pH, materia orgánica) podría revolucionar el manejo de la enfermedad. Estos modelos, alimentados con inteligencia artificial y datos históricos de incidencia,

permitirían anticipar brotes con alta precisión y optimizar el momento de aplicación de controles. La combinación de estas estrategias innovadoras con enfoques tradicionales podría reducir hasta en un 70% las pérdidas causadas por *C. falcatum*, asegurando la sostenibilidad de la industria azucarera frente a escenarios de cambio climático (Srijudanu et al., 2023).

## Referencias

1. Abbas, H., Anwar, S., Javed, N., Iqbal, & Abid, N. (2010). Morphological variability among isolates of *Colletotrichum falcatum* infecting four cultivars of sugarcane. *Pakistan Journal of Phytopathology*, 22, 101–104. Recuperado de <https://www.pakps.com/pjp/downloads/2010/Volume-22-2/101-104.pdf>
2. Ashwin, N., Barnabas, L., Sundar, A. R., Malathi, P., Viswanathan, R., Masi, A., Agrawal, G., & Rakwal, R. (2017). Comparative secretome analysis of *Colletotrichum falcatum* identifies a cerato-platanin protein (EPL1) as a potential pathogen-associated molecular pattern (PAMP). *Journal of Proteomics*, 169, 2–20. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2017.05.020>
3. Ashwin, N., Barnabas, L., Sundar, A. R., Malathi, P., Viswanathan, R., Masi, A., Agrawal, G., & Rakwal, R. (2018). CfPDIP1, a novel secreted protein of *Colletotrichum falcatum*, elicits defense responses in sugarcane. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102, 6001–6021. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9009-2>
4. Bharti, Y. P., Vishwakarma, S., Kumar, A., Singh, A., Sharma, M., & Shukla, D. (2012). Physiological and pathological aspects of some new isolates of *Colletotrichum falcatum* causing red rot disease in *Saccharum* spp. complex. *Acta Phytopathologica Et Entomologica Hungarica*, 47, 35–50. <https://doi.org/10.1556/APHYT.47.2012.1.4>
5. Chandra, A., Singh, D., Joshi, D., Pathak, A. D., Singh, R. K., & Kumar, S. (2021). A highly contiguous reference genome assembly for *Colletotrichum falcatum* pathotype Cf08 causing red rot disease in sugarcane. *3 Biotech*, 11. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02695-x>
6. Chandra, A., Singh, D., Joshi, D., Pathak, A. D., Singh, R. K., & Kumar, S. (2021). A highly contiguous reference genome assembly for *Colletotrichum falcatum* pathotype Cf08. *3 Biotech*, 11. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02695-x>

7. Chhabra, M. L., Parameswari, B., & Viswanathan, R. (2016). Pathogenic behaviour pattern of *Colletotrichum falcatum* isolates of sugarcane in sub-tropical India. *Vegetos*, 29, 76. <https://doi.org/10.5958/2229-4473.2016.00103.8>
8. Franco, F. P., Túler, A. C., Gallan, D. Z., Gonçalves, F. G., Favaris, A. P., Peñaflor, M., ... & Silva-Filho, M. (2022). *Colletotrichum falcatum* modulates the olfactory behavior of the sugarcane borer. *FEMS Microbiology Ecology*. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiac035>
9. Franco, F. P., Túler, A. C., Gallan, D. Z., Gonçalves, F. G., Favaris, A. P., Peñaflor, M., Leal, W., Moura, D. S., Bento, J., & Silva-Filho, M. (2022). *Colletotrichum falcatum* modulates the olfactory behavior of the sugarcane borer, favoring pathogen infection. *FEMS Microbiology Ecology*. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiac035>
10. Gujjar, R. S., Kumar, R., Goswami, S. K., Srivastava, S., & Kumar, S. (2023). MAPK signaling pathway orchestrates and fine-tunes the pathogenicity of *Colletotrichum falcatum*. *Journal of Proteomics*, 105056. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2023.105056>
11. Gujjar, R. S., Kumar, R., Goswami, S. K., Srivastava, S., & Upadhyay, A. (2024). *Colletotrichum falcatum* influences sucrose accumulation in sugarcane stalks by modulating the expression of SPS, SPP, SuSy, and invertases. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102237>
12. Gujjar, R. S., Kumar, R., Goswami, S. K., Srivastava, S., & Upadhyay, A. (2024). *Colletotrichum falcatum* influences sucrose accumulation in sugarcane stalks by modulating the expression of SPS, SPP, SuSy, and invertases. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102237>
13. Hossain, I., Ahmad, K., Siddiqui, Y., Saad, N., Rahman, Z., Haruna, A. O., & Bejo, S. (2020). Current and prospective strategies on detecting and managing *Colletotrichum falcatum* causing red rot of sugarcane. *Agronomy*, 10(9), 1253. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091253>
14. Hossain, M. I., Ahmad, K., Vadamalai, G., Siddiqui, Y., Saad, N., Ahmed, O., ... & Kutawa, A. (2021). Phylogenetic analysis and genetic diversity of *Colletotrichum falcatum* isolates causing sugarcane red rot disease in Bangladesh. *Biology*, 10(9), 862. <https://doi.org/10.3390/biology10090862>

15. Kurian, J. A., & Jehani, M. D. (2023). A review on integrated disease management of red rot of sugarcane caused by *Colletotrichum falcatum*. *Ecology, Environment and Conservation*. <https://doi.org/10.53550/eec.2023.v29i04.067>
16. Malathi, P., Viswanathan, R., & Jothi, R. (2006). Specific adaptation of *Colletotrichum falcatum* pathotypes to sugarcane cultivars. *Sugar Tech*, 8, 54–58. <https://doi.org/10.1007/BF02943742>
17. Mohanraj, D., Padmanaban, P., & Karunakaran, M. (2004). Purification and partial characterization of a phytotoxin produced by *Colletotrichum falcatum*. *Indian Phytopathology*, 57(1), 65–67. Recuperado de <https://epubs.icar.org.in/index.php/IPPJ/article/view/17624>
18. Oliveira, G. P. (2020). *Trichoderma* spp. como potenciais agentes de controle biológico para podridão vermelha ocasionada por *Colletotrichum falcatum*. [Tesis doctoral, Universidade Federal de Uberlândia]. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.116>
19. Mohanraj, D., Padmanaban, P., & Karunakaran, M. (2004). Purification and partial characterization of a phytotoxin produced by *Colletotrichum falcatum*. *Indian Phytopathology*, 57(1), 65–67. Recuperado de <https://epubs.icar.org.in/index.php/IPPJ/article/view/17624>
20. Prasanth, C. N., Rasappa, V., Malathi, P., & Sundar, A. R. (2021). Transcriptome analysis of sugarcane in response to *Colletotrichum falcatum* infection reveals repertoire of transcription factors and host targets. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1075135/v1>
21. Prasanth, C. N., Viswanathan, R., Krishna, N., Malathi, P., Sundar, A. R., & Tiwari, T. (2017). Gene expression profiling in *Colletotrichum falcatum* using transcriptomics. *Sugar Tech*, 19, 604–615. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0529-3>
22. Prasanth, C. N., Viswanathan, R., Krishna, N., Malathi, P., Sundar, A. R., & Tiwari, T. (2017). Unraveling the genetic complexities in gene set of sugarcane red rot pathogen *Colletotrichum falcatum* through transcriptomic approach. *Sugar Tech*, 19, 604–615. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0529-3>
23. Sanika, K. S., Kumar, B., & Meshram, S. (2022). Bioagents *Trichoderma* and *Pseudomonas* show promising results against isolates of sugarcane pathogen *Colletotrichum falcatum* from Punjab region. *Agricultural Science Digest*. <https://doi.org/10.18805/ag.d-5645>

24. Saranya, R., Malathi, P., Nithyanantham, R., Mawar, R., & Viswanathan, R. (2024). Evaluation of biofumigation strategy with mustard for the management of *Colletotrichum falcatum*. *Sugar Tech*. <https://doi.org/10.1007/s12355-024-01369-1>
25. Shastri, B., Kumar, R., & Lal, R. (2020). Isolation and identification of antifungal metabolite-producing endophytic *Bacillus subtilis* and its in vitro effect on *Colletotrichum falcatum*. *Vegetos*, 33, 493–503. <https://doi.org/10.1007/s42535-020-00133-6>
26. Singh, N., & Singh, V. (1994). *Colletotrichum falcatum* race designation: A methodology. *Current Science*, 66(10), 777–779. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/24098816>
27. Srijudanu, A., Piasai, O., Leesutthiphonchai, W., Wanitch, M., Chaisiri, C., & Khewkhom, N. (2023). Biocontrol of *Colletotrichum falcatum* using non-toxigenic *Aspergillus* sp. *Chiang Mai Journal of Science*. <https://doi.org/10.12982/cmjs.2023.032>
28. Viswanathan, R., Padmanaban, P., & Selvakumar, R. (2019). Emergence of new pathogenic variants in *Colletotrichum falcatum*, stalk infecting ascomycete in sugarcane: Role of host varieties. *Sugar Tech*, 22, 473–484. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00780-3>
29. Viswanathan, R., Prasanth, C. N., Malathi, P., & Sundar, A. R. (2016). Draft genome sequence of *Colletotrichum falcatum*—A prelude on screening of red rot pathogen in sugarcane. *Journal of Genomics*, 4, 1–3. <https://doi.org/10.7150/jgen.13585>
30. Viswanathan, R., Selvakumar, R., Manivannan, K., Nithyanantham, R., & Kaverinathan, K. (2020). Behaviour of soil borne inoculum of *Colletotrichum falcatum* in causing red rot in sugarcane varieties with varying disease resistance. *Sugar Tech*, 22, 485–497. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00800-7>

© 2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).