

Control biorracional de hongos del género *Fusarium*

Biorational control of fungi of the genus *Fusarium*

Liceth Yuliana Bonelo Chavarro¹, Ligia Consuelo Sánchez Leal²

Recibido: 17 de mayo de 2020

Aceptado: 30 de mayo de 2020

Resumen

Los hongos del género *Fusarium* se encuentran distribuidos de manera universal debido a su capacidad para crecer en gran número de sustratos y a su eficaz mecanismo de dispersión; son de gran importancia a nivel agrícola y económico por los problemas fitosanitarios que ocasiona y las pérdidas de producción, que generalmente pueden llegar hasta el 100%. Investigadores y productores han trabajado conjuntamente para tratar de contrarrestar su impacto, en la búsqueda de soluciones diferentes a los químicos, por cuanto el nivel de resistencia que producen cada vez es más alto. El control biorracional que está referido al manejo inteligente de plagas, utiliza diferentes herramientas disponibles de manera efectiva y compatible entre sí, buscando reducir el impacto ambiental y en consecuencia sobre el ser humano. Los productos que se emplean para este control son aquellos de origen natural, biológicos o de síntesis química que tengan mínimo impacto ambiental.

Palabras claves: *Fusarium*, Control biorracional, impacto ambiental.

1. Estudiante. Programa de Bacteriología y Laboratorio Clínico, Facultad Ciencias de la Salud. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7163-2433>

2 Profesora de Planta, Programa de Bacteriología y Laboratorio Clínico, Facultad Ciencias de la Salud. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7796-1326>

Correo electrónico: lconsuelosanchez@unicolmayor.edu.co

Abstract

The fungi of the genus *Fusarium* are universally distributed due to their ability to grow in a large number of substrates and their efficient dispersal mechanism; They are of great importance at the agricultural and economic level due to the phytosanitary problems that it causes and the production losses, which can generally reach up to 100%. Researchers and producers have worked together to try to counteract its impact, in the search for different solutions to chemicals, since the level of resistance they produce is increasingly higher. Biorational control that refers to the intelligent management of pests, uses different tools available in an effective and compatible way, seeking to reduce the environmental impact and consequently on the human being. The products used for this control are those of natural, biological or chemical synthesis origin that have minimal environmental impact.

Keywords: *Fusarium*, Biorational control, environmental impact.

Introducción

El control biorracional es un término que abarca estrategias inteligentes que demuestren ser compatibles y efectivas para minimizar los riesgos para la salud humana y el ambiente. El control biológico como parte del control biorracional, hace referencia al uso de diferentes organismos (o los compuestos o extractos obtenidos de ellos) que solos o en combinación son capaces de disminuir los efectos deletéreos que causa una población patógena sobre el crecimiento y productividad de un cultivo. Esta estrategia de manejo de fitopatógenos depende en gran medida de las interacciones

que ocurren entre la planta, el patógeno, el organismo biocontrolador y el ambiente, en el cual se desarrolla tal interacción (1). Se han estudiado microorganismos benéficos, especies de hongos, bacterias y sus metabolitos derivados de microorganismos, así como aceites esenciales vegetales y métodos de biología molecular (2).

Los hongos son un grupo de organismos eucariotas, heterótrofos, que son muy cambiantes, los cuales ocupan diferentes hábitats en la naturaleza. Menos del 10% de las 100.000 especies de hongos que se conocen, son saprofitos estrictos con gran capacidad de invadir plantas. Gran parte de cultivos de importancia económica

son susceptibles a enfermedades por parte de estos saprofitos (3).

A continuación, se presenta una revisión bibliográfica que incluye la descripción general de *Fusarium* incluidos los daños a nivel agrícola que produce y la respuesta de defensa por parte de las plantas, además, su presencia en cultivos agrícolas de Colombia y las diferentes estrategias biorracionales que se utilizan actualmente para disminuir la incidencia de enfermedades por hongos del género *Fusarium* en diferentes variedades de plantas.

Descripción general de *Fusarium*

Fusarium es un hongo Fitopatógeno agresivo que pertenece a la División: Ascomycota, Clase: Sordariomycetes, Orden: Hipocreales y Familia: Nectriaceae. Este hongo filamentoso puede afectar a cualquier cultivo, ya que tiene una amplia gama de huéspedes que incluye, entre otros, cereales, árboles frutales, hortalizas, plantas ornamentales y medicinales. Se calcula que 90% de las variedades vegetales de importancia económica son atacadas por este hongo. El género *Fusarium* incluye especies patógenas de plantas que son devastadoras. *Fusarium graminearum* y *F. oxysporum* son dos especies que se incluyeron en la lista de los 10 principales agentes patóge-

nos fúngicos considerados importantes en términos de impacto científico y económico en algunos países (3,4).

Las especies de *Fusarium* se caracterizan por exhibir una alta plasticidad morfológica. Entre los rasgos morfológicos útiles, pero no suficientes para su identificación incluyen las características generales de la colonia (forma, color y presencia de pigmentos difusibles), forma y desarrollo de clamidosporas, presencia o ausencia de esporodoquias y conidios de diferentes tamaños, macro y microconidios. Por lo tanto, se requieren medios y métodos de cultivo estandarizados junto con datos moleculares multilocus para el reconocimiento por especie (5).

Gracias a sus características, *Fusarium* por lo general se encuentra en el suelo e invade las raíces jóvenes, debido a las heridas que le ocasionan diferentes insectos, los nemátodos y los instrumentos del trabajo agrícola. En el momento de finalizar el ciclo de la enfermedad, *Fusarium* forma sus esporas sobre el tejido muerto y de allí se difunden fácilmente a corta distancia, por las aguas superficiales y las herramientas contaminadas; a mayor distancia, se transportan a través de plántulas con suelo infectado (6).

Esta patogenicidad en plantas está mediada por la ejecución de diversos mecanismos que incluyen la producción de micotoxinas, colonización en el interior de la planta, afección del sistema vascular y obstrucción del flujo de agua, que lo convierten en el principal agente causal de la denominada "marchitez vascular" y "pudrición de la raíz" (7).

Entre las principales enfermedades causadas por hongos del género *Fusarium* se encuentran: marchitez del tomate (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol)); marchitez del frijol (*Fusarium oxysporum* f. sp. *phaseoli*); marchitez de la arveja (*Fusarium oxysporum* f.sp. pisi); marchitez del clavel (*Fusarium oxysporum* f. sp. *Dianthi*); marchitez del crisantemo (*Fusarium oxysporum* f.sp. *chrysanthemi*), el tizón del trigo (*F. graminearum*), el marchitamiento del algodón (*Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum*), la enfermedad del plátano de Panamá (*F. oxysporum* f. sp. *cubense*), se establece como una de las enfermedades vegetales de mayor importancia porque ha causado grandes pérdidas a nivel económico a los cultivadores e incluso ha tratado de terminar radicalmente con el cultivo (7,8,9). La enfermedad que produce en la familia de pasifloras se denomina "secadera", debido a los síntomas que produce. En Colombia, como en otros países productores, esta enfermedad si bien tiene el mismo sistema

de ingreso a la planta, el problema se manifiesta en el aspecto y tamaño del fruto, e incluso en la marchitez de parte o toda la planta (10).

Las toxinas de *Fusarium* son los contaminantes naturales más numerosos de las dietas que presentan cereales y otros granos y generalmente, se encuentran implicados en numerosas intoxicaciones en mamíferos, incluyendo el hombre. Las fumonisinas son una clase de micotoxinas cancerígenas que se transmiten por medio de los alimentos, informes de actividad toxica de cepas aisladas de diferentes productos presentaron distintos niveles de toxicidad para animales experimentales (11).

Las fumonisinas generalmente se dividen en 4 grupos, A, B, C y G, siendo las fumonisinas de tipo B las más tóxicas. *Fusarium* B1 representa 70%, y *Fusarium* B2, B3 representan aproximadamente 10–20% del contenido total de fumonisina. El consumo de *Fusarium* B1 presenta un alto grado de toxicidad para los animales y humanos ocasionando daños en la salud. *Fusarium* B1, se considera como cancerígeno, está relacionado con defectos del tubo neural en humanos. Los tejidos expuestos a *Fusarium* B1 en plantas se tornan hipersensibles con características moleculares y morfológicas exclusivas como la inducción de genes de defensa, la condensación

de cromatina y la producción de especies reactivas de oxígeno (11).

El Deoxinivalenol (DON) es una micotoxina que la produce en su mayoría patógenos como *Fusarium graminearum* y *F. culmorum*. Diferentes condiciones ambientales afectan el desarrollo de hongos, además el daño a los cereales y la acumulación de toxinas, entre ellas se encuentra la temperatura, la actividad de agua, el pH y la composición de nutrientes (13).

Con relación a la respuesta de las plantas frente a este patógeno, en un estudio realizado con varios hongos, concluyen que es necesaria la identificación de genes básicos de patogenicidad que codifican para componentes esenciales de las vías involucradas para las señales exógenas o endógenas, proteínas RAS (pequeñas GTPasas) los componentes de señalización de proteína G y sus vías descendentes, diversos complejos proteínicos y las cascadas de señales de transducción que son reguladores para el desarrollo del hongo y su virulencia (12).

Fusarium en Colombia

Colombia es un país privilegiado por su ubicación geográfica, diversidad de climas, culturas, flora, fauna y fuentes hídricas, entre otros.

Estas fortalezas han hecho que la agricultura sea una fuente de ingresos importantes para sus habitantes. Cereales, hortalizas, ornamentales, maderables y frutales, entre otros, se han visto afectados por fitopatógenos de importancia a nivel mundial.

El género *Fusarium* se ha reportado en algunas especies de orquídeas como patógeno, es el caso del género de orquídeas *Cymbidium*, que le causa pudrición de la raíz. También *Fusarium* se ha reportado como endófito de raíces en otras especies de orquídeas. Son reconocidos por su tipo característico de conidios, y esporas de forma lunada, por lo general de 3 a 5 septos (14).

A nivel mundial el banano ha sido una fruta importante y en Colombia es el tercer producto de exportación. Dentro de las enfermedades limitantes del cultivo se encuentra el mal de panamá, ocasionado por *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cubense*. es una enfermedad que ocasionó en la variedad Gros Michel grandes pérdidas, obligando al reemplazo por Cavendish, que está siendo amenazado por la raza tropical 4 del hongo que ya se encuentra en la Guajira, Urabá y Magdalena. El manejo de la enfermedad se basa en la exclusión del patógeno, evitando el ingreso del mismo a áreas sanas y usando variedades resistentes, pero estas medidas no han

sido suficientes y es necesario implementar nuevas estrategias, todo esto se debe a la naturaleza del patógeno (15).

La producción de cebolla junca o de cebolla de rama *Allium fistulosum* en Colombia, ocupa una de las áreas de mayor siembra dentro de las hortalizas. La pudrición basal de la cebolla de rama ocasionada por *Fusarium* spp. es considerada la enfermedad más limitante en el cultivo. Los síntomas iniciales de plantas afectadas, muestran en las hojas coloraciones amarillas, que se van tornando necróticas, especialmente en la punta, hasta alcanzar toda la hoja para, por último, marchitarse. En las raíces, se presentan coloraciones café oscuras, transparentes, adquiriendo una forma plana y hueca (16).

La producción de pasifloras, especialmente maracuyá y gulupa en Colombia es importante y se encuentra en los primeros puestos a nivel mundial gracias a las propiedades organolépticas y nutritivas que poseen las diferentes variedades. Esta producción se ve interrumpida por inconvenientes fitosanitarios producidos por diferentes microorganismos, entre ellos hongos saprófitos, endófitos o patogénicos del género *Fusarium*, los cuales ocasionar síntomas de marchitez y amarillamiento de las hojas, además secamiento de

las ramas, fuerte defoliación e incluso la muerte de la planta (17).

Control Biorracional

Control biológico con microorganismos frente a hongos del género *Fusarium* como parte del control Biorracional

El control biológico de las enfermedades en las plantas tiene como objetivo disminuir las poblaciones de patógenos utilizando otros organismos. Este control hace parte de un proceso Biorracional en donde se incluye también la aplicación de productos naturales y compuestos químicos extraídos de plantas y organismos vivos o modificados o productos genéticos. Aislar bacterias presentes en la filósfera o rizófora de plantas de interés es una manera de encontrar diferentes agentes de biocontrol. Estas bacterias son capaces de producir compuestos antibióticos difusibles o emitir compuestos volátiles (COV) con actividad antifúngica (18).

Los hongos endófitos son capaces de producir Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) que se conocen como bioplaguicidas, dichos compuestos poseen potentes propiedades antimicrobianas. Los alcoholes, monoterpenos, ácidos carboxílicos orgánicos,

ésteres y cetonas son los COVs más comunes (19).

Para disminuir el crecimiento de *Fusarium kuroshium*, causante de la muerte de la planta se utilizó compuestos difusibles y COVs secretados por tres aislamientos bacterianos, que fueron obtenidos de la rizosfera de aguacate pertenecientes al género *Bacillus*. Además según este estudio demostró que se redujo el crecimiento de *F. kuroshium* hasta en un 48.48% mediante la secreción de compuestos difusibles (20).

Los agentes de biocontrol pueden ser medidas efectivas para los patógenos fúngicos, ya que se pueden multiplicar por sí mismos, otorgar resistencia a través de diferentes métodos, tener baja toxicidad, son de gran utilidad para las plantas y pueden usarse de acuerdo con las prácticas de agricultura orgánica. Los agentes con un buen control se encuentran en casi todos los suelos en número y variedad alta, por lo que utilizar estrategias de bioaumentación, en principio no causa cambios perjudiciales evidentes en la microbiota o la bioquímica del suelo. (21)

La actividad de biocontrol de los microorganismos que ejercen antagonismo cuando se presenta un ataque por un patógeno en plantas, se correlaciona positivamente con los

contenidos de amonio, nitrato, boro, magnesio soluble y hierro del suelo, pero el pH del suelo y el contenido de fósforo disponible puede ser un problema para su desarrollo y actividad. Las propiedades químicas del suelo también pueden afectar indirectamente la expresión de enfermedades transmitidas por el suelo, al influir en el comportamiento de la comunidad microbiana en este ambiente natural. Por esta razón, es necesario implementar estrategias que incluyan las condiciones óptimas del suelo para beneficiar los microorganismos con capacidad de biocontrol y que no favorezcan al patógeno *Fusarium* (22).

Existen varios estudios donde se ha demostrado la reducción de enfermedades causadas por hongos del género *Fusarium*. Uno de ellos, ha demostrado la efectividad de *Pseudomonas fluorescens*, *Pantoea agglomerans*, *Bacillus sp.* (23)

El uso de rizobacterias promotoras de crecimiento, son beneficiosas para el tratamiento de la enfermedad de raíz en el tomate. Estos microorganismos aumentan el crecimiento de las plantas y anulan enfermedades de diversas etiologías, ya sea por mecanismos directos o indirectos. Pero, un inconveniente en el uso de rizobacterias es su rendimiento en campo, a menudo deficiente, debido a que no se adapta al suelo don-

de se aplica y al pastoreo que altera la red alimentaria del suelo. En este contexto, el biocontrol del marchitamiento por *Fusarium* mediante el uso de rizobacterias nativas con propiedades antagónicas llegaría a orientar el manejo de la enfermedad potencialmente novedoso y atractivo (24).

Las especies del género *Bacillus* son más abundantes entre las bacterias asociadas a las plantas y pueden representar una parte importante (36%) de la población bacteriana del suelo. Estos microorganismos cumplen dos funciones: mostrar antagonismo contra el patógeno de la planta y exhibir propiedades promotoras del crecimiento de la planta que podrían ser muy ventajosas para seleccionar el mejor agente de control biológico posible, actuando como solubilizadores de fosfato, fijadores de nitrógeno o como sideróforos. (25,26)

La acción biocontroladora de *Bacillus brevis* y *Bacillus subtilis* está regida por la producción de metabolitos antibióticos con la capacidad de actuar sobre microorganismos de diferentes etiologías; la antibiosis. Los péptidos que produce y que tienen esta acción son variados y representan un grupo no muy heterogéneo entre sí de metabolitos activos que afectan directamente a algunos fitopatógenos como *Fusarium oxysporum*. (27)

Bacillus subtilis, ha demostrado ser un importante agente biológico con efecto biocontrolador. Son productos de una amplia gama de péptidos y metabolitos de secundarios. Los más reconocidos son la surfactina, fengicina, iturina A, B, y C, micosubtilinas, y bacilomicinas, biosurfactantes activos de membrana con potentes actividades antimicrobianas. (28)

El género *Pseudomonas* posee propiedades de biocontrol debido a su metabolismo adaptativo y su capacidad para producir compuestos antifúngicos. Ejemplos de metabolitos antifúngicos y secundarios producidos por *Pseudomonas* spp. incluyen fenazinas, 2,4-diacetilforoglucinol, pyoluteorin, pirrolnitrina, lipopéptidos cíclicos, sideróforos, los compuestos volátiles, enzimas hidrolíticas, entre otros (29). Colonizan la raíz y evitan el establecimiento de microorganismos patógenos empleando mecanismos de biocontrol tanto directos como indirectos. La competencia por los nutrientes es un mecanismo indirecto de biocontrol que exhibe *Pseudomonas fluorescentes* (30).

Serratia marcescens, un bacilo Gram negativo que pertenece a la familia *Enterobacteriaceae*, está bien estudiado como potencial agente de biocontrol. La bacteria antagonista *S. marcescens* B2 suprimió el crecimiento in vitro de *Botrytis* spp. y el crecimiento micelial

del patógeno del tizón de la vaina del arroz *Rhizoctonia solani* AG-1 IA. Por ende, *S. marcescens* GG5 impide el crecimiento de *F. oxysporum* y *Rhizopus nigricans* (31).

Varias especies del género *Trichoderma* son reconocidas como agentes de biocontrol de muchos patógenos de cultivos, incluidas las especies de *Fusarium*. Dependiendo de la especie, *Trichoderma* pueden emplear uno o varias actividades de antagonismo, como la producción de toxinas (quitinasas), micoparasitismo (interrupción física del crecimiento de hifas patógenas: enrollamiento, penetración, disolución del citoplasma), inducción de una respuesta de defensa del huésped o éxito en monopolizar los nutrientes y el espacio de la rizosfera. Los mecanismos de biocontrol de *Trichoderma* spp. incluyen antibiosis, micoparasitismo, competencia por nutrientes y posibles reducción de la infección y resistencia sistémica inducida en plantas. (32)

Estrategias de manejo con otros organismos vivos: microalgas, biomasa de plantas y aceites esenciales

Con relación al uso de plantas que tienen capacidad fungicida, se encuentra *Brassica* spp., una col que ha sido uti-

lizada como abono verde de cultivos y que se ha asociado con la reducción de muchos patógenos. Esta variedad vegetal se usa como biofumigantes debido a la facilidad que presentan para producir compuestos de azufre llamados glucosinolatos, que naturalmente carecen de actividad biológica. En presencia de agua y de la enzima mirosinasa endógena, los glucosinolatos se hidrolizan con la producción de diferentes productos de descomposición, en su mayoría isotiocianatos, cuanuros orgánicos, oxazolidintiones y tiocianato. Sustancias responsables de ocasionar efectos supresores sobre patógenos transmitidos por el suelo, este fenómeno se conoce como "biofumigación". Se ha destacado el uso potencial de la familia Brassicaceae y el proceso de biofumigación relacionado para controlar numerosos patógenos de plantas, incluyendo algunas especies del género *Fusarium* (33)

Por otra parte, microalgas y cianobacterias, son un grupo diverso ubicado taxonómicamente como procariotas y eucariotas que, además de su uso potencial como fuente de energía, pueden producir una amplia variedad de productos comercialmente interesantes, como lípidos, aceites, azúcares, compuestos fenólicos, carotenoides y otros bioactivos funcionales (34).

La cianobacteria *Spirulina* sp. y la microalga *Nannochloropsis* sp. producen una cantidad sostenible de biomasa y, además, pueden desarrollarse en condiciones adversas. Se caracterizan por su alta capacidad para acumular pigmentos carotenoides (astaxantina y β -caroteno), extractos fenólicos (predominantemente clorogénicos, gálicos, protocatechuicos e hidroxibenzoicos). Adicionalmente, tienen un efecto inhibitorio contra el complejo de especies *Fusarium graminearum* a una concentración de 40 $\mu\text{g mL}^{-1}$, lo que demuestra que, incluso en pequeñas cantidades pueden inhibir el crecimiento de *F. graminearum* de manera eficiente (34).

De los compuestos químicos más conocidos por presentar efectos beneficiosos extraídos de las plantas son los Aceites Esenciales (AE), estos se definen como aceites volátiles que presentan componentes aromáticos fuertes, proporcionando olor, sabor y aroma característico a una planta aromática. Los compuestos de AE se sintetizan y almacenan en estructuras secretoras complejas, cavidades secretoras y conductos de resina, están presentes como gotas de líquido en las hojas, tallo, flores y frutos, corteza o raíces de plantas. Las principales fuentes vegetales para estos compuestos incluyen, entre otros, anís, canela, clavo, hinojo, por citar algunos (35,36).

Químicamente, son líquidos hidrofóbicos volátiles concentrados extraídos de diferentes partes de las plantas aromáticas. Su acción puede ser como fungicidas, antimicrobianos e insecticidas. Además, algunos aceites esenciales tienen la capacidad de combinarse con otros AE o los agentes de biocontrol, convirtiéndose así en candidatos potenciales para combatir las enfermedades de marchitez por *Fusarium* en condiciones de campo (36).

Los AE son obtenidos de hojas, cortezas, tallos, semillas, raíces, flores, brotes y frutos que pertenecen especialmente a familias como *Alliaceae*, *Lamiaceae*, *Pinaceae*, *Apiaceae*, *Rutaceae* y *Lauraceae*; son mezclas de más de 20 grupos de compuestos químicos, como terpenos, alcoholes, ácidos, ésteres, epóxidos, aldehídos, cetonas, aminas y sulfuros. Diferentes factores influyen en su composición, entre estas se incluyen las especies y parte de la planta, la región geográfica, el método de agricultura y el método de extracción (37).

En uno de los estudios, se encontró que la mayoría de los AE activos evaluados revelaron un alto contenido de compuestos fenólicos, mientras que los AE menos bioactivos mostraron un alto contenido de monoterpeno de hidrocarburos (38).

Los aceites esenciales inhiben los patógenos principalmente debido a su efecto directo sobre la germinación de esporas y el crecimiento micelial al alterar el metabolismo celular de los microorganismos. Su aplicación no tiene riesgo para la salud humana. (39).

Se ha documentado la actividad antifúngica del aceite de tomillo, del aceite de clavo y de aceite de romero. En uno de los estudios, se demostró que gracias a los aceites esenciales se redujeron tanto el crecimiento micelial y la germinación conidial de *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*, además limitado la severidad de marchitamiento del tomate por *Fusarium* en condiciones controladas. El aceite de tomillo y eugenol seguido de aceite de clavo presentaron el mayor potencial de inhibición en el crecimiento del micelio (40).

Para el control de *Fusarium proliferatum*, el aceite esencial de Tomillo (*T. vulgaris*) mostró la mejor eficacia, seguido del aceite de Eneldo (*A. graveolens*). Sin embargo, no se pudo obtener una alta eficacia similar de Tomillo (*T. vulgaris*) contra *F. verticillioides*. Por lo tanto, el aceite esencial de menta de maíz (*M. arvensis*) fue declarado como mejor para inhibir el crecimiento de hongos. También se observó una actividad inhibidora del crecimiento suficientemente alta, con los aceites

esenciales de tomillo (*A. graveolens*) y menta verde (*M. spicata*) (41).

Estrategia biorracional complementaria utilizando RNAi para el silenciamiento de genes

El ARN de interferencia (ARNi) es un mecanismo conservado desencadenado por ARN bicatenario (ds), que media la resistencia a los ácidos nucleicos exógenos, regula la expresión de genes que codifican proteínas en el nivel transcripcional y postranscripcional y preserva la estabilidad del genoma mediante el silenciamiento del transposón. RNAi generalmente funciona en la defensa del genoma de virus y elementos transponibles en eucariotas, incluidos los hongos (42,43).

Los eucariotas regulan los niveles de expresión de genes usando una variedad de mecanismos. Uno de estos mecanismos reguladores se llama interferencia de ARN. (44).

Se han identificado diferentes tipos de moléculas de sRNA que regulan la expresión génica durante muchos procesos biológicos, desde el crecimiento y el desarrollo hasta la defensa contra el estrés biótico y abiótico. Los tipos más importantes y mejor entendidos son los peque-

ños ARN interferentes (siRNA), los ARN asociados a Piwi (piRNA) y los microRNA (miRNA). Los ARNip son particularmente importantes para prevenir la infección viral, los ARNip son esenciales para el desarrollo de las células germinales y las funciones de los miARN en la degradación del ARN mensajero (ARNm) o la represión de su traducción en plantas y animales (45).

Una herramienta para el análisis funcional de genes eucariotas es el silenciamiento génico mediado por ARN o ARN de interferencia mediante la expresión de transcripciones formadoras de horquillas, y se usa actualmente como una manera confiable de dilucidar la función génica de especies animales y vegetales. Se ha demostrado recientemente que las plantas pueden defenderse de *F. graminearum* mediante el silenciamiento génico inducido por el huésped (HIGS) y por el silenciamiento génico inducido por pulverización (SIGS). Sin embargo, la amplia aplicación de HIGS ha sido limitada, por la falta de transformabilidad de varios cultivos, la inestabilidad genética y la cuestión de la aceptación transgénica presentada por el público (46,47).

Los genes de patogenicidad de los hongos son de gran interés, debido a que serían posibles objetivos de fungicidas para el control de la enferme-

dad. Estos genes de patogenicidad se definen necesarios para el desarrollo de la enfermedad, pero no indispensables para que el patógeno complete su ciclo de vida in vitro. Varios genes candidatos de patogenicidad de *Fusarium* spp. se han descubierto mediante el análisis de secuencias genómicas y transcriptomas, y se ha determinado su papel en la patogenicidad fúngica (48).

La aplicabilidad de RNAi en el control de enfermedades de las plantas depende de identificar un gen candidato adecuado del patógeno diana que es vital para su crecimiento y la patogenicidad (49).

El mejoramiento por resistencia es un enfoque prometedor para contrarrestar el tizón foliar de *Fusarium* (FHB) y se ha empleado con éxito en otros cultivos como el trigo. El mejoramiento por resistencia se emplea comúnmente utilizando secuencias de ADN correlacionadas con la tolerancia. Por lo tanto, encontrar marcadores de reproducción en avena para la resistencia a FHB, podría mejorar la salud humana y del ganado y reducir los costos de manejo de la enfermedad. Un enfoque proteogenómico para el descubrimiento de biomarcadores, abre nuevas posibilidades para investigar rasgos complejos, y el empleo de una referencia basada en transcriptoma nos permite

comprender variaciones específicas de la variedad (50).

Conclusiones

Los principales controles biorracionales expuestos en este artículo contra *Fusarium* fueron: 1) Control biológico con microorganismos, ya sea con hongos (*Trichoderma* sp) o bacterias (*Pseudomonas fluorescens*, *Pantoea agglomerans*, *Bacillus* sp.) ya que se ha demostrado que tienen muchas actividades como producción de enzimas, metabolitos secundarios y otras acciones físicas efectivas para su control. 2) Aceites esenciales que se obtienen de diferentes plantas, cuyo poder fungicida consiste en inhibir la germinación de esporas y el crecimiento micelial, al alterar el metabolismo celular del patógeno. 3) Herramientas moleculares utilizando RNA de interferencia para identificar un gen esencial del patógeno importante en el crecimiento y su patogenicidad.

El control biorracional es una alternativa inteligente y efectiva para el control de enfermedades, particularmente las que produce el hongo del género *Fusarium*, porque causan poco o ningún efecto nocivo para el ser humano y el ambiente, elimina por completo el uso de insecticidas

y evita que haya infecciones con plagas secundarias.

Es importante generar programas de capacitación a los agricultores en los cuales se les presenten las ventajas y limitaciones de un control biorracional y los efectos benéficos a corto, mediano y largo plazo.

Referencias

1. Vinchira D., & Moreno, N. Control biológico: Camino a la agricultura moderna. (2019). Revista Colombiana de Biotecnología, 21(1), 2-5. Available from: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n1.80860>
2. Acosta C. Control biorracional de plagas en cultivos, con equilibrio biológico. My Press. México (2018). Available from: <https://www.mypress.mx/tecnologia/biorracionales-que-son-y-beneficios-ambientales-3628>
3. Sharma, M., Guleria, S., Singh, K. et al. Mycovirus associated hypovirulence, a potential method for biological control of *Fusarium* species. *VirusDis.* 29, 134–140 (2018). Available from: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s13337-018-0438-4>
4. Maryani N, Sandoval-Denis M, Lombard L, Crous PW, Kema GHJ. New endemic *Fusa-*

- rium species hitch-hiking with pathogenic *Fusarium* strains causing Panama disease in small-holder banana plots in Indonesia. *Persoonia*. (2019); 43: 48–69. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7085855/>
5. Orbati, M., Arzanlou, M., Sandoval-Denis, M. et al. Multigene phylogeny reveals new fungicolous species in the *Fusarium tricinctum* species complex and novel hosts in the genus *Fusarium* from Iran. *Mycol Progress* 18, 119–133 (2019). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s11557-018-1422-5>
 6. Leiva L, Manejo de problemas fitosanitarios del cultivo de gulupa (*Passiflora edulis* Sims.) medidas para temporada invernal. Instituto Colombiano Agropecuario ICA (2011). 00.09.43.12.C. Available from: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/2262/44992_60739.pdf?sequence=1&isAllowed=y
 7. Castañeda E., Sánchez L., Evaluación del crecimiento de cuatro especies del género *Bacillus* sp., primer paso para entender su efecto biocontrolador sobre *Fusarium* sp. *NOVA*. 2016; 13 (26): 53-65 Available from: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S179424702016000200006&lng=en&nrm=iso&tlng=es
 8. Srivastava S., Kadooka C., Uchida J., *Fusarium* species as pathogen on orchids, (2018), Vol 207, Pages 188-195. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0944501317307218>
 9. Srinivasas C., Devi N., Murthy K., *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* causal agent of vascular wilt disease of tomato: Biology to diversity– A review. [Internet]. *Scincdirect.com* (2019), Vol 26, Pages 1315-1324. Available from: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S1319562X19301007>
 10. Ortiz M, Hoyos L. Description of the symptomatology associated with fusariosis and its comparison with other diseases for the purple passion fruit (*Passiflora edulis* Sims.) in the Sumapaz region (Colombia). [Internet]. *Scielo.org.co*. 2012. Available from: <http://www.scielo.org.co/pdf/rcch/v6n1/v6n1a11.pdf>
 11. Deepa N., Sreenivasa Y., Molecular methods and key genes targeted for the detection of fumonisin producing *Fusarium verticillioides* – An updated review. [Internet]. *Scincdirect.com* (2019). Vol 32. Available from: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S2212429218306801>
 12. Villa A., Perez R., Morales H., Basurto M., Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. [Internet]. *Scielo.org.co*. (2014) Available from: <http://www.scielo.org.co/pdf/acag/>

- v64n2/v64n2a11.pdf
13. Femenias A., Gatus F., Ramos A, Sanchisa V., Marín S. Use of hyperspectral imaging as a tool for *Fusarium* and deoxynivalenol risk management in cereals: A review. [Internet]. Scindirect.com (2020). Vol 108. Available from: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S0956713519304086>
 14. Cordoba Diaz J., Gerlach G., Otero T. Hongos endófitos de *Stanhopea tricornis* (Orchidaceae) en Colombia. Sociedad Colombiana de orquideología (2015). Available from: http://revista.sco.org.co/index.php/orquideologia/article/view/88/pdf_83
 15. Lopez S., Castaño J. Manejo integrado del mal de Panamá *Fusarium oxysporum* Schlechtend.: Fr. sp. cubense (E.F. SM.) W.C. Snyder & H.N. Hansen: una revisión. Vol 22 n° 2. [Internet]. Scielo.org.co. 2019 Available from: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262019000200011
 16. Betancourth Garcia, C., Salazar González, C., Lagos Mora, L., Díaz Rodríguez, V., & Mora Chaves, S. (2020). Caracterización de *Fusarium* spp. asociado con la pudrición basal de la cebolla de rama. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 23(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n1.2020.1471>
 17. Henao E., Hernández C., Salazar C., Velasco M., Gómez E. Identificación molecular de aislamientos de *Fusarium* asociados a maracuyá en el Valle del Cauca, Colombia. Agron. Mesoam vol.29 n.1 San Pedro Jan./Apr. 2018. Available from: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212018000100056
 18. Báez-Vallejoa N., Camarena D., Monribot-Villanueva J. Forest tree associated bacteria for potential biological control of *Fusarium solani* and of *Fusarium kuroshium*, causal agent of *Fusarium* dieback. [Internet]. Scindirect.com (2020). Vol 235. Available from: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S0944501319309218>
 19. Medina-Romero, Y.M., Roque-Flores, G. & Macías-Rubalcava, M.L. Volatile organic compounds from endophytic fungi as innovative postharvest control of *Fusarium oxysporum* in cherry tomato fruits. Appl Microbiol Biotechnol 101, 8209–8222 (2017). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s00253-017-8542-8>
 20. Guevara-Avenidaño, E., Bravo-Castillo, K.R., Monribot-Villanueva, J.L. et al. Diffusible and volatile organic compounds produced by avocado rhizobacteria exhibit antifungal effects against *Fusarium kuroshium*. Braz J Microbiol (2020). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s42770-020-00249-6>
 21. Bunbury-Blanchette A., Walker A., Trichoderma species show biocontrol potential

- in dual culture and greenhouse bioassays against *Fusarium* basal rot of onion. [Internet]. Scindirect.com (2019). Vol 130 Pages 127-135. Available from: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S1049964418305334>
22. Meng, T., Wang, Q., Abbasi, P. et al. Deciphering differences in the chemical and microbial characteristics of healthy and *Fusarium* wilt-infected watermelon rhizosphere soils. *Appl Microbiol Biotechnol* 103, 1497–1509 (2019). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s00253-018-9564-6>
23. Naing, K.W., Nguyen, X.H., Anees, M. et al. Biocontrol of *Fusarium* wilt disease in tomato by *Paenibacillus ehimensis* KWN38. *World J Microbiol Biotechnol* 31, 165–174 (2015). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s11274-014-1771-4>
24. Gowtham H., Hariprasad P., Chandra S., Niranjana S. Application of rhizobacteria antagonistic to *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* for the management of *Fusarium* wilt in tomato. Vol 2 (2016), Pages 72-74. Available from: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S2452219816300477#>
25. Jangira M. Pathaka R., Sharma S., Sharma S. Biocontrol mechanisms of *Bacillus* sp., isolated from tomato rhizosphere, against *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici*. [Internet]. Scindirect.com (2018). Vol 123 Pages 60-70. Available from: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S1049964418301221>
26. Corrales Ramírez LC, Sánchez Leal LC, Cuervo Andrade PhD JL, Joya JA, Márquez K. Efecto Biocontrolador de '*Bacillus*' spp., Frente a '*Fusarium*' sp., Bajo Condiciones de Invernadero en Plantas de Tomillo ('*Thymus Vulgaris* L'). [Internet] Nova. Junio 2012 Available from: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/nova/article/view/518>
27. Layton C, Maldonado E, Monroy L, Corrales Ramírez MSC LC, Sánchez Leal MSC LC. *Bacillus* spp.; perspectiva de su efecto biocontrolador mediante antibiosis en cultivos afectados por fitopatógenos. [Internet] Nova. 15 de diciembre de 2011. Available from: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/nova/article/view/501>
28. Ariza Y., Sánchez L. Determinación de metabolitos secundarios a partir de *Bacillus subtilis* con efecto biocontrolador sobre *Fusarium* sp. Nova - Publicación Científica en Ciencias Biomédicas - Issn: 1794-2470 - Vol. 10 No. 18 Julio - Diciembre de 2012: 135 – 250. Available from: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S179424702012000200002
29. Arya, N., Rana, A., Rajwar, A. et al. Biocontrol Efficacy of Siderophore Producing Indigenous *Pseudomonas* Strains Against *Fusarium* Wilt in Tomato. *Natl. Acad. Sci.*

- Lett. 41, 133–136 (2018). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s40009-018-0630-5>
30. Islam, M.A., Nain, Z., Alam, M.K. et al. In vitro study of biocontrol potential of rhizospheric *Pseudomonas aeruginosa* against *Fusarium oxysporum* cucumerinum f. sp.. Egypt J Biol Pest Control 28, 90 (2018). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1186/s41938-018-0097-1>
31. Guo Z., Zhang X., Wu J., Yu J. In vitro inhibitory effect of the bacterium *Serratia marcescens* on *Fusarium proliferatum* growth and fumonisins production. 2020. Vol 143. Available fom: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S1049964419306206>
32. Tzu Li Y., Hwang S., Huang Y. Effects of *Trichoderma asperellum* on nutrient uptake and *Fusarium* wilt of tomato. [Internet]. Scindirect.com (2018). Vol 110 Pages 275-282. Available from: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S0261219417300868>
33. Campanella V., Mandalá C., Angileri V., Meceli C. Management of common root rot and *Fusarium* foot rot of wheat using *Brassica carinata* break crop green manure. 2020 Vol 130. Available from: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S0261219419304193>
34. Scaglioni, P.T., Pagnussatt, F.A., Lemos, A.C. et al. *Nannochloropsis* sp. and *Spirulina* sp. as a Source of Antifungal Compounds to Mitigate Contamination by *Fusarium graminearum* Species Complex. Curr Microbiol 76, 930–938 (2019). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s00284-019-01663-2>
35. Zabka M., Pavela R. Review Chapter: *Fusarium* Genus and Essential Oils. Natural Antimicrobial Agents. Sustainable Development and Biodiversity. (2018) vol 19. Springer, Cham. Available from: https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2425/chapter/10.1007/978-3-319-67045-4_5
36. Sharma A., Rajendran S., Srivastava A., Sharma S., Antifungal activities of selected essential oils against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* 1322, with emphasis on *Syzygium aromaticum* essential oil. (2017) Vol. 123 Pages 308-313. Available from: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S1389172316303097>
37. Perczak, A., Gwiazdowska, D., Marchwińska, K. et al. Antifungal activity of selected essential oils against *Fusarium culmorum* and *F. graminearum* and their secondary metabolites in wheat seeds. Arch Microbiol 201, 1085–1097 (2019). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s00203-019-01673-5>
38. Pizzolitto R., Jacquat A., Usseglio V., Achimón F. Quantitative-structure-activity relationship study to predict the antifungal activity of essential oils against *Fusarium*

- verticillioides. [Internet]. Scindirect.com (2020). Vol 108. Available from: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S0956713519304256>
39. Vilaplana R., Pérez K., Valencia S. Essential oils as an alternative postharvest treatment to control fusariosis, caused by *Fusarium verticillioides*, in fresh pineapples (*Ananas comosus*) [Internet]. Scindirect.com (2018). Vol 238 Pages 255-263. Available from: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S0304423818303017>
40. La Torre, A., Caradonia, F., Matere, A. et al. Using plant essential oils to control *Fusarium* wilt in tomato plants. *Eur J Plant Pathol* 144, 487–496 (2016). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s10658-015-0789-2>
41. Kumar, P., Mishra, S., Kumar, A. et al. Antifungal efficacy of plant essential oils against stored grain fungi of *Fusarium* spp. *J Food Sci Technol* 53, 3725–3734 (2016). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s13197-016-2347-0>
42. Gaffar F., Imani J., Karlovsky P., Koch A. Different Components of the RNA Interference Machinery Are Required for Conidiation, Ascosporeogenesis, Virulence, Deoxynivalenol Production, and Fungal Inhibition by Exogenous Double-Stranded RNA in the Head Blight Pathogen *Fusarium graminearum*. PMID: PMC6764512 (2019) Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6764512/>
43. Son H, Park AR, Lim JY, Shin C, Lee YW (2017) Genome-wide exonic small interference RNA-mediated gene silencing regulates sexual reproduction in the homothallic fungus *Fusarium graminearum*. *PLoS Genet* 13 (2): e1006595. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1006595>
44. Johnson, E.T., Proctor, R.H., Dunlap, C.A. et al. Reducing production of fumonisin mycotoxins in *Fusarium verticillioides* by RNA interference. *Mycotoxin Res* 34, 29–37 (2018). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s12550-017-0296-8>
45. Kharbikar, L.L., Shanware, A.S., Saharan, M.S. et al. *Fusarium graminearum* microRNA-like RNAs and their interactions with wheat genome: a much-needed study. *Indian Phytopathology* 72, 565–573 (2019). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s42360-019-00139-4>
46. Shanmugam, V., Sharma, V., Bharti, P. et al. RNAi induced silencing of pathogenicity genes of *Fusarium* spp. for vascular wilt management in tomato. *Ann Microbiol* 67, 359–369 (2017). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s13213-017-1265-3>
47. Song X., Gu K., Duan X. A myosin5 dsRNA that reduces the fungicide resistance and pathogenicity of *Fusarium asiaticum*. (2018), Vol 150, Pag 1-9. Available from:

<https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S0048357518301172>

48. Bharti, P., Jyoti, P., Kapoor, P. et al. Host-Induced Silencing of Pathogenicity Genes Enhances Resistance to *Fusarium oxysporum* Wilt in Tomato. *Mol Biotechnol* 59, 343–352 (2017). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s12033-017-0022-y>
49. Singh, N., Mukherjee, S.K. & Rajam, M.V. Silencing of the Ornithine Decarboxylase Gene of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* by Host-Induced RNAi Confers Resistance to *Fusarium* Wilt in Tomato. *Plant Mol Biol Rep* (2020). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s11105-020-01205-2>
50. Willforss J. S.Leonova J.Tillander E.Andreasson S.Marttila O.Olsson A.Chawade F.Levander. Interactive proteogenomic exploration of response to *Fusarium* head blight in oat varieties with different resistance. (2020) Vol 218. <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S1874391920300567>