

Manejo integrado del mal de Panamá [*Fusarium oxysporum* Schlechtend.: Fr. sp. *cubense* (E.F. SM.) W.C. Snyder & H.N. Hansen]: una revisión

Integrated management of Panama disease [*Fusarium oxysporum* Schlechtend.: Fr. f. sp. *cubense* (E.F. SM.) W.C. Snyder & H.N. Hansen]: a review

Silvia Patricia López-Zapata¹; Jairo Castaño-Zapata²

¹Agrónoma, c.M.Sc. Fitopatología. Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Manizales, Colombia; e-mail: sipaloza@yahoo.es; <https://orcid.org/000-0001-6834-6794>

²Ing. Agrónomo, Ph.D. Universidad de Caldas, Departamento de Producción Agropecuaria, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Manizales, Colombia; e-mail: jairo.castano_z@ucaldas.edu.co; <https://orcid.org/000-0002-3070-3343>

Como citar: López-Zapata, S.P.; Castaño-Zapata, J. 2019. Manejo integrado del mal de Panamá [*Fusarium oxysporum* Schlechtend.: Fr. sp. *cubense* (E.F. SM.) W.C. Snyder & H.N. Hansen]: una revisión. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 22(2):e1240. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1240>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Recibido: Septiembre 30 de 2018

Aceptado: Junio 17 de 2019

RESUMEN

El banano es un frutal muy importante, a nivel mundial y en Colombia es el tercer producto de exportación. Una de las enfermedades limitantes del cultivo es el mal de Panamá, ocasionado por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. La enfermedad es considerada devastadora, por las pérdidas que ocasionó en Gros Michel, obligando al reemplazo de este cultivar por Cavendish, el cual, está siendo amenazado por la raza tropical 4 del hongo que, aunque aún no se encuentra en el país, representa una amenaza mundial. El manejo de la enfermedad, se ha basado en la exclusión del patógeno, evitando el ingreso a áreas sanas y usando variedades resistentes, pero la naturaleza del patógeno ha demostrado que estas medidas no son suficientes y que es necesario considerar otras estrategias. El Manejo Integrado de Enfermedades MIE, en su filosofía, busca conjugar opciones en pro del cultivo para garantizar, además de la sanidad, altos rendimientos e inocuidad. Esta revisión compila información de los resultados de investigación, obtenidos mediante el uso de diferentes medidas y que sean factibles de incluirse

dentro de un programa de manejo integrado del mal de Panamá, enmarcándolas dentro del modelo logístico propuesto por Van der Plank y enfatizando en la necesidad de realizar más investigación, para obtener materiales resistentes y llevar a cabo evaluaciones en el campo, que demuestren, de manera más efectiva, la viabilidad de las prácticas propuestas.

Palabras clave: hongo; raza 4; banano; musáceas: epidemiología.

ABSTRACT

Banana is a very important fruit worldwide and in Colombia it is the third export product. One of the diseases limiting the crop is the Panama disease caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. The disease is considered devastating because of the losses it caused in Gros Michel, forcing the replacement of this cultivar by Cavendish, which is being threatened by the tropical race 4 of the fungus, which although not yet found in the country, represents a global threat. The management of the disease has been based on the

exclusion of the pathogen, avoiding entry into healthy areas and using resistant varieties, but the nature of the pathogen has shown that these measures are not enough and that other strategies need to be considered. The Integrated Management of Diseases, MIE, in its philosophy seeks to combine options in favor of the crop to guarantee besides the health, high yields and innocuousness. This review compiles information on the research results obtained through the use of different measures and feasible to be included in an integrated management program of the Panama disease, framing them within the logistic model proposed by Van der Plank and emphasizing the need to conduct more research to obtain resistant materials and carry out evaluations in the field that more effectively demonstrate the feasibility of the proposed practices.

Keywords: fungus; race 4; banana; Musaceae; epidemiology.

INTRODUCCIÓN

El banano es considerado el cuarto alimento más consumido en el mundo después del arroz, el trigo y el maíz (Akila *et al.* 2011; Siddhesh *et al.* 2015). Muchos de los cultivares son híbridos naturales, seleccionados por los primeros agricultores y, actualmente, los bananos comestibles provienen de dos especies diploides *Musa acuminata* (AA) y *M. balbisiana* (BB) (Perrier *et al.* 2011). Se conocen más de 50 subgrupos, pero solo Gros Michel y Cavendish, producen la mayor cantidad de fruta, siendo Cavendish el más importante (Ploetz, 2015b). En América Latina y el Caribe, se concentra cerca del 28% de la producción mundial (*M. acuminata* AA), con tres de los diez productores y exportadores más importantes en el mundo (Dita *et al.* 2013).

Dentro de las enfermedades limitantes del cultivo está el mal de Panamá, causado por *Fusarium oxysporum* Schlechtend. f. sp. *cubense* (E.F. Smith) W. C. Snyder & H. N. Hansen, siendo una de las más destructivas en banano (Akila *et al.* 2011; Belgrove *et al.* 2011; Ploetz, 2015b), por la epidemia que causó la raza 1 en América Central, a mitad del siglo XX, en “Gros Michel” (Nel *et al.* 2007), obligando al cambio por cultivares resistentes del tipo Cavendish (Buddenhagen, 2009). Los bananos pertenecientes a Cavendish tienen nuevamente amenazada la producción y la sostenibilidad, debido a su susceptibilidad, a una nueva variante del hongo, denominada raza tropical 4 (RT4) (Meldrum *et al.* 2013a; Ploetz, 2015a), hecho que debió preverse, considerando lo sucedido con Gros Michel y el riesgo de tener extensos monocultivos con clones estrechamente relacionados con la genética.

F. oxysporum hace parte de la comunidad de hongos del suelo y es considerado como componente natural de la rizosfera de las plantas; todas las cepas de la especie son saprófitas y pueden sobrevivir sobre materia orgánica; sin embargo, algunas son fitopatógenas y penetran las raíces del hospedante, induciendo marchitamientos vasculares (Fravel *et al.* 2003); posee, además, gran especificidad patógeno-hospedante (Ploetz, 2006), que ha llevado a la identificación de alrededor de 150 formas especiales y razas fisiológicas (Gordon, 2017), como *F. oxysporum* f. sp. *cubense* (Ploetz, 2015b), *F. oxysporum*

f. sp. *lycopersici* (Marín-Serna *et al.* 2014) y *F. solani* f. sp. *passiflorae* (Ángel-García *et al.* 2018).

F. oxysporum f. sp. *cubense* (*Foc*), originario del Sudeste de Asia, está presente en todas las zonas productoras (Nel *et al.* 2007). Es un microorganismo genética y patogénicamente diverso, del cual, se han identificado cuatro razas: la raza 1, afecta a Gros Michel y Manzano (AAB); la raza 2, ataca a los cultivares ABB, conocidos como Guineo, Cuadrado, Topocho y Chatos; la raza 3, a heliconias (*Heliconia* L.) y la raza 4, a cultivares susceptibles a las razas 1, 2 y del tipo Cavendish (Hennessy *et al.* 2005; Ploetz, 2015b). Dentro de la raza 4, se ha identificado la raza tropical (RT4) y la subtropical (ST4), ambas pertenecientes a diferentes grupos de compatibilidad vegetativa; la primera, causa enfermedad en trópicos y subtropicos y, la segunda, solo en el subtrópico (Belgrove *et al.* 2011). Esta nueva variante del patógeno tiene la capacidad de infectar no solo a los bananos tipo Cavendish sino también al plátano (Shirani & Sijun, 2018).

Aunque no existen reportes de la recombinación sexual para *Foc*, este es un patógeno altamente variable, que utiliza otros mecanismos, como mutación, elementos transponibles en el genoma, anastomosis hifal, flujo de genes y selección (Costa *et al.* 2014), que dificultan su manejo y ponen de manifiesto la gravedad de sus ataques que sobrepasan, en tiempo y en espacio, la capacidad humana de desarrollar variedades resistentes o tolerantes.

Externamente, *Foc* produce dos tipos de síntomas: síndrome de la hoja verde y síndrome de la hoja amarilla. En el primero, las hojas permanecen verdes hasta que el peciolo se dobla y colapsa; en el segundo, el más común, los bordes de las hojas adultas se tornan amarillas y se dividen longitudinalmente, avanzando, de manera gradual, hacia las hojas jóvenes (Pérez *et al.* 2014) (Figura 1a). En genotipos susceptibles, las esporas del hongo germinan estimuladas por compuestos orgánicos, que son liberados por las raíces del hospedante; la penetración la realiza directamente por la cofia de la raíz, con la ayuda de enzimas degradativas o mediante el crecimiento intercelular, momento a partir del cual procede la colonización, desde el ápice de la raíz (Gordon, 2017). Una vez el hongo avanza por el tejido vascular, causa una decoloración que se extiende hacia el pseudotallo (Ploetz, 2006; Pérez *et al.* 2014) (Figura 1b). Los síntomas son más evidentes entre 5 y 6 meses después de la siembra, caracterizados por la muerte de las plantas y pérdidas en el rendimiento (Ploetz, 2006; Akila *et al.* 2011; Sun *et al.* 2011).

El patógeno, en medio de cultivo, produce micelio de color blanco con fondo rojizo (Figura 1c), que se acentúa con el tiempo (Figura 1d), produciendo microconidios, con forma elíptica, oval o de riñón, usualmente, sin septos (Figura 2a); macroconidios, con forma de hoz y tres septos (Figura 2b) y clamidosporas (Figura 2c), con paredes lisas o ásperas, formadas individualmente, en pares o en cadenas (Leslie & Summerell, 2006; Pérez *et al.* 2014; Siddhesh *et al.* 2015). Las clamidosporas pueden sobrevivir por más de 30 años en ausencia de hospedante principal (Ploetz, 2006), pero el hongo, igualmente, tiene la capacidad de infectar arvenses (Ploetz, 2015b), musáceas silvestres (*Musa* spp.) y heliconias (*Heliconia* spp.) (Pérez *et al.* 2014).

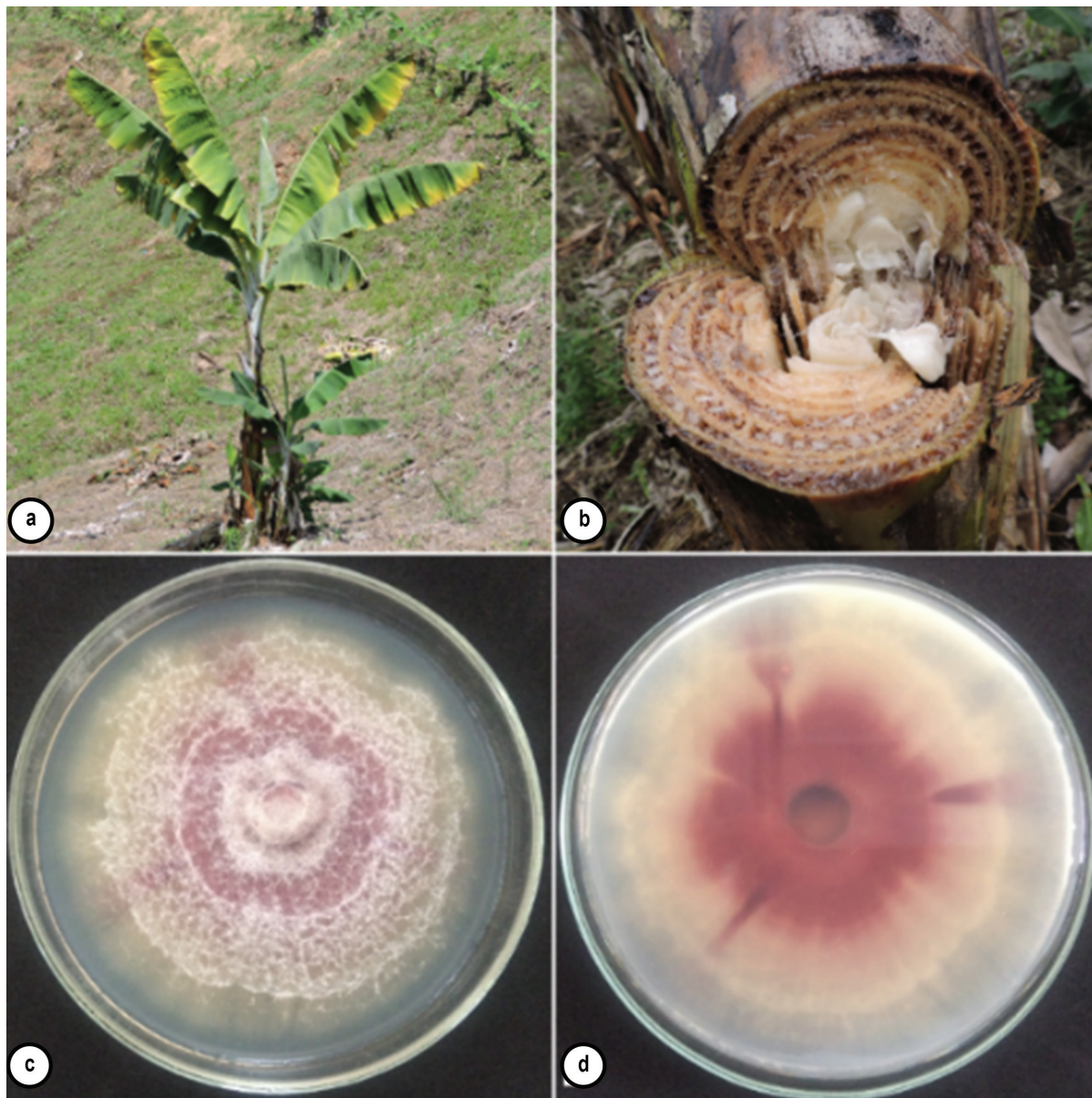


Figura 1. a. Síntomas externos del mal de Panamá; b. Necrosamiento de los haces vasculares; c-d. Crecimiento característico de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* en medio PDA.

En Colombia, *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* se detectó en rizomas e inflorescencias de Heliconias (Alarcón, 2007) y *Fusarium* spp., en pseudotallos, pedicelos, inflorescencias y rizomas de las variedades Salmón, Orange, Kawachi y Edge of night (López & Castaño-Zapata, 2012).

La dispersión de los patógenos habitantes del suelo, como *Foc*, es usualmente a cortas distancias, excepto por el movimiento de plantas contaminadas que, además, permiten la introducción de nuevos alelos entre las poblaciones existentes, ocasionando grandes cambios en su estructura genética (Costa *et al.* 2014). En este caso, se ha documentado que la diseminación del hongo en las plantaciones se hace a través de suelo, agua, herramientas, equipos

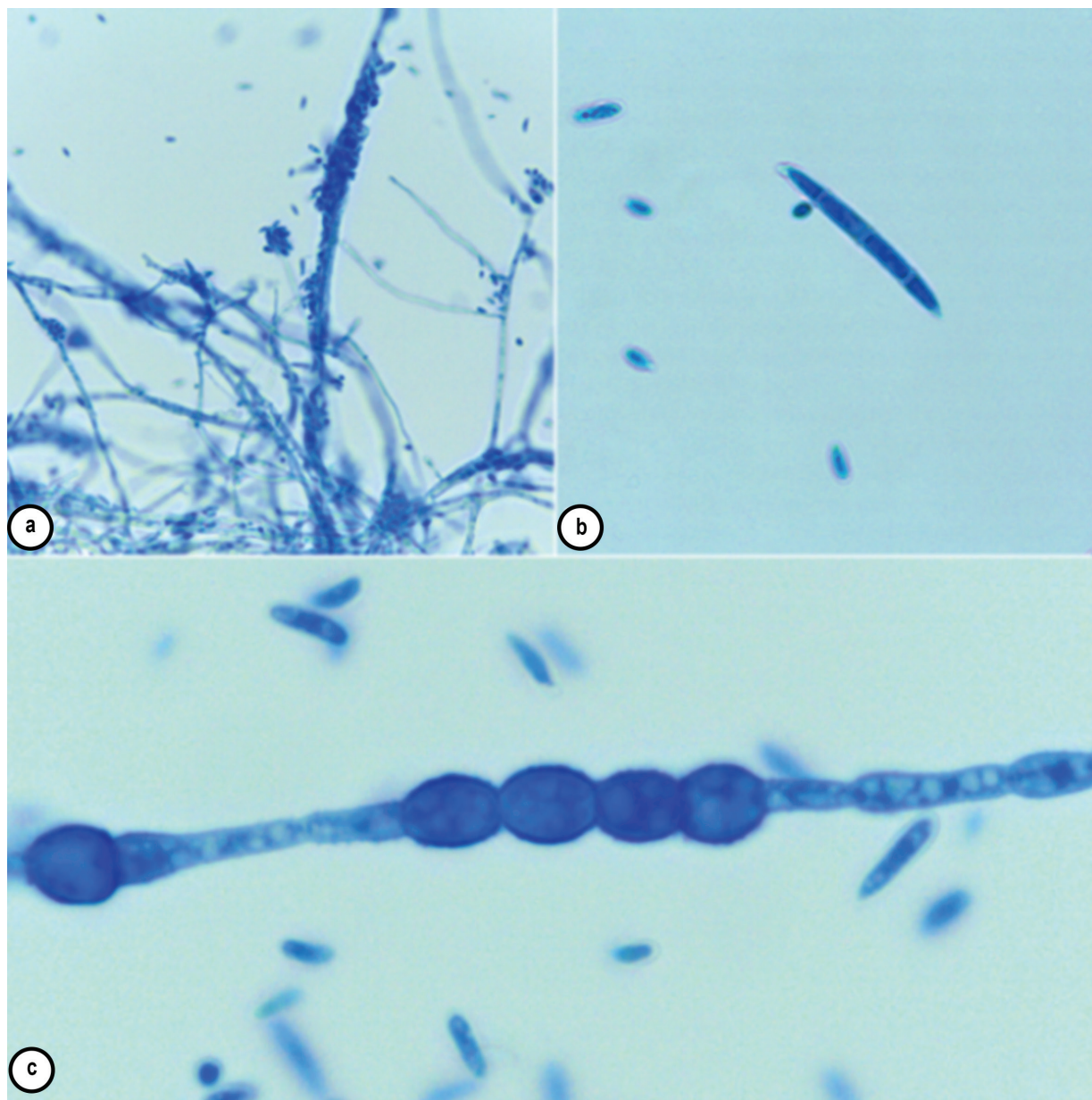


Figura 2. Estructuras reproductivas del hongo. a. Microconidios; b. Macroconidio; c. Clamidosporas en cadena.

agrícolas, ropa, botas, material de siembra (Ploetz, 2015a), por el picudo negro (*Cosmopolites sordidus* Germar) (Meldrum *et al.* 2013a) y por nematodos fitoparásitos, como *Radopholus similis* (Cobb) Thorne (Pérez *et al.* 2014). Otras prácticas que pueden contribuir con la adaptación y la dispersión de este hongo son los agroecosistemas modernos, donde la producción bananera se caracteriza por el uso intensivo de prácticas de manejo, como riego, variedades resistentes y prácticas culturales (Costa *et al.* 2014).

El mal de Panamá es una enfermedad monocíclica, típica de marchitez vascular, en la que, por efecto del hongo y las respuestas del hospedante, se produce la oclusión de los vasos del xilema, impidiendo el transporte de agua y de nutrientes (Akila *et al.* 2011; Pérez *et al.* 2014). Algunas de las prácticas para el manejo de la enfermedad son preventivas, como la aplicación de fumigantes al suelo (Fravel *et al.* 2003), siembras en campos libres del patógeno y el empleo de semilla sana (Ploetz, 2015a).

Debido a la dificultad de controlar el hongo por su sistemicidad y como respuesta a las preocupaciones que surgen del uso inadecuado y excesivo de los productos químicos, es necesario establecer una alerta ante la inminente llegada al país de la RT4, enfatizando en la prevención, mediante la implementación de alternativas de manejo integrado (MIE), cuyos principios básicos son: exclusión o erradicación del patógeno, escape de la infección, desarrollo y uso de la resistencia genética, protección de las plantas y reducción de la incidencia de la enfermedad (Castaño-Zapata, 1994; Jiménez & Jiménez, 2011), conceptos que pueden ser aplicados, mediante la utilización conjunta de las estrategias disponibles, reduciendo los efectos adversos del patógeno sobre un cultivo, sin disminuir la calidad y el rendimiento.

Para el mal de Panamá, se ha estimado la exclusión, como la estrategia más efectiva (Pérez, 2015), pero considerando el desconocimiento de aspectos biológicos del patógeno y ecológicos de la enfermedad, en lo que respecta a la interacción Cavendish - *F. oxysporum* f. sp. *cubense* RT4, la mejor opción es el uso de variedades resistentes (Ploetz, 2015a) que, combinadas con otras prácticas, conllevan a la aplicación del concepto de MIE, estrechamente ligado al modelo logístico de James Edward Van der Plank (1963). Este, cuantifica la tasa de desarrollo de una enfermedad (r) y caracteriza su progreso, mediante la obtención de valores de enfermedad (X) e inóculo inicial (X_0), en un espacio de tiempo (t), variables que se expresan mediante la ecuación $X = X_0 e^{rt}$, siendo e = la constante universal equivalente a 2,7182.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una búsqueda de información, a través Internet, enfatizando en las bases de datos científicas, como Dialnet, Scielo, Science direct, Scopus, Google académico y Jstor, donde se obtuvo la información relevante del tema, publicada durante 30 años, por medio de más de 80 artículos científicos, tanto en español como en inglés, con las palabras clave *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza tropical 4, Fusarium wilt, Fusariose, Plantains, Bioactive compounds, banana production.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El control de patógenos habitantes del suelo es complejo, más aún, cuando producen estructuras de resistencia, como sucede con *Fusarium* y aunque se han desarrollado diferentes prácticas para su manejo, incluido el control químico con fungicidas sistémicos, la naturaleza de estos productos es una amenaza, por el aumento de la resistencia del patógeno. Se ha indicado, que el manejo para todas las razas, incluida la RT4, sea similar a las empleadas para *Ralstonia solanacearum* (Smith), las cuales, están enfocadas, principalmente, a disminuir el inóculo inicial (X_0), y consideran aspectos, como la delimitación de áreas de acceso, aplicación de fumigantes, eliminación de plantas enfermas y rotación con especies no hospedantes (Pérez *et al.* 2014).

Control legal. La cuarentena, cuyo efecto epidemiológico es sobre X_0 , es una medida todavía viable en Colombia y complementa el “Plan Nacional de Foc RT4”, para mantener el patógeno en la categoría de plaga cuarentenaria ausente. Este mecanismo constituye una primera e importante barrera, porque, una vez el patógeno se ha introducido en un cultivo, su erradicación es imposible (Ploetz, 2015b), ya que los esfuerzos para contener la enfermedad en los países donde está presente, a través de la cuarentena inter o intra nacional, no han sido efectivos, como ha sido evidente por la diseminación del hongo entre continentes, países y regiones (Dale *et al.* 2017).

En todo caso, las medidas a establecer deben ser coordinadas y en cooperación con los entes directamente involucrados, como son productores, importadores y exportadores; la vigilancia constante es fundamental para la detección temprana de focos de la enfermedad, mediante el flujo de información continuo, en cooperación con las instituciones gubernamentales involucradas, con el asesoramiento de especialistas en micología, para la identificación correcta del patógeno y la raza presente, sumado a la investigación requerida, para mejorar o desarrollar técnicas más eficientes para la detección oportuna del hongo.

De igual manera, el material de propagación, sitios donde se produce, el tránsito de material infectado y las personas provenientes de países donde el patógeno está presente, deben ser estrictamente controlados, para facilitar el establecimiento de estrategias de manejo de la enfermedad y la implementación de medidas cuarentenarias, ante una potencial llegada de la RT4 al país.

Resistencia. La naturaleza de la enfermedad reduce las formas de manejo; usualmente, la siembra de materiales susceptibles debe provenir de semilla sana y sembrarse en suelos libres del patógeno (Ploetz, 2015a), prácticas que afectan el inóculo inicial (X_0). Aun así, el uso de materiales resistentes es la estrategia más efectiva para el manejo de la enfermedad (Fravel *et al.* 2003; Costa *et al.* 2014; Ploetz, 2015a); estos materiales, dependiendo de su naturaleza y los genes involucrados, tienen un efecto epidemiológico sobre el inóculo inicial (X_0), si la resistencia es monogénica o sobre la tasa de desarrollo de la enfermedad (r), si es poligénica (Castaño-Zapata, 2002).

Infortunadamente, los programas de mejoramiento genético no han logrado producir materiales con iguales o mejores características de productividad y de calidad que satisfagan las exigencias del mercado, en aspectos como la calidad de la fruta (Molina *et al.* 2011; Wang *et al.* 2013), pero es posible que estos materiales tengan aceptación en lugares donde las condiciones de pos-cosecha y la tolerancia a diferentes sabores no sean relevantes (Ploetz, 2015a) o donde el cambio no represente un riesgo para la economía nacional y regional, como ocurre en la región de Urabá – Antioquia, Colombia, en donde el impacto económico y social sería de grandes proporciones.

La Fundación Hondureña de Investigación Agrícola, FHIA, desarrolló materiales de banano resistentes a *F. oxysporum* f. sp. *cubense* RT4 (Aguilar, 2013); incluyeron, también, híbridos resistentes a la raza 1 y subtropical 4 y otros con mayor resistencia que el cultivar Gros Michel (Smith *et al.* 2014). De igual manera, en Asia se han logrado nuevas líneas altamente resistentes a *Foc* RT4, con rendimientos y calidad comparables a las variedades comerciales (Molina *et al.* 2011; Molina *et al.* 2016; Dale *et al.* 2017), en donde varios genotipos de parientes silvestres de banano han mostrado diferentes niveles de resistencia a la raza 4 del hongo (Li *et al.* 2014; Zuo *et al.* 2018).

En subespecies de *M. acuminata*, como *burmannica*, *microcarpa* y *siamea*, se han encontrado alelos con resistencia a *Foc* R1; en la subsp. *Malaccensis*, a las razas 1 y 4 (Shirani & Sijun, 2018) y en *M. basjoo* y *M. itinerans*, alta resistencia a *Foc* TR4; aunque por la riqueza genética que se encuentra en los materiales silvestres y la cual puede ser objeto de variación en el grado de resistencia, se requieren selecciones cuidadosas (Li *et al.* 2014).

Control cultural. Para evitar la dispersión de la raza 4, se ha recomendado la eliminación de un anillo simple o doble alrededor de las plantas enfermas (Meldrum *et al.* 2013a). Esta práctica, comúnmente usada para el manejo de la enfermedad, tiene efecto epidemiológico en la reducción del inóculo inicial (X_0), además de evitar la diseminación del patógeno hacia áreas libres, pero necesita complementarse con otras estrategias para ampliar su efectividad, debido a que, conociendo la naturaleza del patógeno y la enfermedad, no garantiza por sí sola un método de control efectivo.

La rotación de cultivos, que igualmente reduce el inóculo inicial (X_0), tiene limitaciones por la capacidad del hongo para sobrevivir por largo tiempo, mediante clamidosporas, aún en ausencia del hospedante principal; no obstante, otras estrategias, como la siembra intercalada o rotación con especies no hospedantes del hongo, como yuca (*Manihot esculenta* Crantz) (Buddenhagen, 2009), puerro chino (*Allium tuberosum* Rottler ex Spreng.) (Huang *et al.* 2012; Zhang *et al.* 2013b) y piña [*Ananas comosus* (L.) Merr.] (Wang *et al.* 2015), reducen la incidencia de la enfermedad; del mismo modo, el uso de cubierta vegetal al suelo y alrededor de la base de las plantas, disminuye la incidencia de *Foc* (X_0), alargando el periodo de desarrollo de los síntomas de la enfermedad (r) (Pattison *et al.* 2014).

Otras prácticas que tienen efecto sobre el inóculo inicial (X_0) son el uso de desinfectantes de superficie sobre botas, herramientas

y maquinaria (Nel *et al.* 2007). Está confirmada la efectividad del cloruro de polimetilamonio (Sporekill®), sobre *Foc*, después de 30 segundos de exposición (Meldrum *et al.* 2013b); la esterilización del suelo con calor, colocando cascarilla de arroz en los sitios donde se han observado plantas enfermas (Ploetz, 2015a) o el aislamiento de sitios afectados con láminas de aluminio o zinc, para luego quemarlos, incluyendo los rizomas de las plantas afectadas (Pérez *et al.* 2014).

La solarización del suelo es un tratamiento efectivo y representa una alternativa ante la ausencia de estrategias seguras para el control de patógenos; su efecto está en la reducción del inóculo inicial (X_0) y se puede mejorar en combinación con un fumigante al suelo, aunque estos últimos son poco efectivos, debido al ciclo del cultivo (Herbert & Marx, 1990); sin embargo, Hermanto *et al.* (2012) demostraron que en un suelo infectado con *Foc* RT4, sometido únicamente al tratamiento físico, la aparición de la enfermedad se retrasó más tiempo que rotando con maíz durante dos siembras consecutivas y barbecho durante 10 meses.

El manejo de arvenses, se debe considerar dentro de un programa de MIE, ya que actúan como hospedantes alternos del hongo, afectando el inóculo inicial (X_0) y la tasa de desarrollo (r), al ser portadoras endofíticas del hongo y contribuyendo a la acumulación de inóculo, especialmente gramíneas (Pérez, 2015; Deltour *et al.* 2017). Especies de la familia *Asteraceae*, como el rabo de buey [*Cyanthium cinereum* (L.) H.Ros], de la cual, se ha aislado la raza 4, merece atención (Hennessy *et al.* 2005).

Otro efecto del control cultural es la reducción de la tasa de desarrollo de la enfermedad (r). Al respecto, se reporta que es posible disminuir la germinación de los conidios, con la aplicación de fuentes de calcio (Ca) y de hierro (Fe), la modificación de la temperatura del suelo, el contenido de agua y pH (Peng *et al.* 1999) y se puede evitar la penetración del hongo, a través de las raíces, mediante fertilización a base de amonio (NH_4), como se ha demostrado *in vitro* y en cultivos hidropónicos (Zhang *et al.* 2013a).

Control biológico. Debido al uso inadecuado de fungicidas y la capacidad del patógeno de adquirir resistencia a estos, el control biológico toma vigencia en los programas de MIE (Fravel *et al.* 2003) y su efecto se refleja sobre el inóculo inicial (X_0) y la tasa de desarrollo de la enfermedad (r). La literatura científica indica a los suelos portadores de aislamientos no patogénicos de *Fusarium* spp. o pertenecientes a otra forma especial, actuando como supresivos a cepas patogénicas (Amir & Alabouvette, 1993), estableciendo competencia por carbono (Fravel *et al.* 2003), nutrientes, sitios de infección o inducción de resistencia sistémica (Forsyth *et al.* 2006); efectos similares a los inducidos por bacterias promotoras del crecimiento vegetal (Lian *et al.* 2008; Fishal *et al.* 2010) y cepas no patogénicas de *Bacillus* y *Pseudomonas* (Saravanan *et al.* 2003; Lian *et al.* 2008; Thangavelu & Jayanthi, 2009; Fishal *et al.* 2010). De igual manera, los compuestos volátiles de hongos endófitos aislados de *Musa* spp. han mostrado un efecto inhibitorio altamente significativo sobre *Foc* R4 (Ting *et al.* 2010).

Respecto a la resistencia inducida y aunque se conocen efectos de activación enzimática por el metil jasmonato sobre plántulas de banano inoculadas con *Foc* RT4 (Sun *et al.* 2011), aún se considera que no están bien dilucidados los mecanismos, por los cuales, el jasmonato contribuye en la reducción de la enfermedad (Shirani & Sijun, 2018). En el mismo sentido, el ácido salicílico ha demostrado tener un papel importante en inducir resistencia en plantas de banano a *Foc* RT4 (Wang *et al.* 2014) y en plantas de Cavendish inoculadas con *Foc* R1; se ha observado, la acumulación endógena de esta última hormona vegetal y la activación de la expresión génica de la misma, mejorando la resistencia a *Foc* RT4 (Wu *et al.* 2013).

Referente a otros microorganismos, se ha documentado que *B. subtilis* inhibe el crecimiento micelial, coloniza los tejidos de la planta, disminuye la decoloración vascular y la incidencia de la enfermedad (Sun *et al.* 2011); asimismo, Wang *et al.* (2013) comprobaron que la combinación de *B. amyloliquefaciens* W19 y compuestos orgánicos, además de disminuir la incidencia de la marchitez, proporcionan nutrientes a las plantas de banano, resultados que se interpretan, desde el punto de vista epidemiológico, como una reducción en la tasa de desarrollo (r) del mal de Panamá, efecto que también ha sido demostrado con las bacterias biocontroladoras y biofertilizantes *Burkholderia* sp. y *Herbaspirillum* sp. (Weber *et al.* 2007); Gamma-proteobacterias (Köberl *et al.* 2017); con el hongo micorrízico arbuscular *Gigaspora margarita* (Borges *et al.* 2007); con *Trichoderma harzianum* y *Glomus mosseae* (Mohandas *et al.* 2010).

Estudios que muestran efecto sobre el inoculo inicial (X_0) y que involucren el uso de organismos vivos, reportan a *Serratia marcescens* como inductora de producción de enzimas involucradas en la defensa de las plantas de banano, suprimiendo la incidencia de la enfermedad (Ting *et al.* 2010) y *Streptomyces griseus* afectando el desarrollo de *Foc* R4, al inducir la generación de hifas distorsionadas y protuberantes, inhibiendo la formación de esporas y degradando la pared celular del hongo (Zacky & Ting, 2013).

Getha & Vikineswary (2002) demostraron que *Streptomyces violaceusniger* G10 inhibe el crecimiento micelial, distorsiona, induce ramificación excesiva, causa lisis en los extremos de las hifas e impide la germinación de los conidios; efectos similares a los observados por Thangavelu & Gopi (2015), con las bacterias endofíticas *Pseudomonas putida*, *Achromobacter* sp., *Rhizobium* sp., *Ochromobacterium* sp. y *Bacillus flexus* Tvpr1, que inhiben la germinación de los conidios y el crecimiento micelial del hongo; igualmente, se ha demostrado que el quitosano inhibe el crecimiento micelial, esporulación y germinación del hongo (Al-hetar *et al.* 2011).

Es obvio el efecto de los microorganismos benéficos sobre las cepas patógenas, pero también es claro que cada uno de los resultados deben ser validados bajo las condiciones propias del cultivo, donde se identifiquen los organismos endófitos o rizosféricos y que, potencialmente, causen los mismos efectos reportados; además, existe el desafío de producirlos masivamente, considerando que son organismos vivos, que pueden cambiar su biología bajo condiciones adversas, de modo que, para garantizar su efectividad y su patogenicidad, se requiere de muchos años de investigación.

Control químico. Los fungicidas químicos afectan directamente la tasa de desarrollo de la enfermedad (r) y han sido la estrategia más ampliamente usada para el control de enfermedades, por la facilidad en su uso, la consecución y por la rapidez con que se observan los resultados, pero no es nueva la preocupación que causa el uso inadecuado e indiscriminado que se les ha dado, sobre aspectos, como la salud humana, la vida silvestre y el ambiente, esto agregado a las mutaciones y la resistencia que ha adquirido el hongo a los fungicidas (Ramu *et al.* 2016) y sus efectos genotóxicos, sobre algunas especies de plantas (Dane & Dalgic, 2005).

Aunque Lakshmanan *et al.* (1987) demostraron que el fungicida carbendazim al 2%, inyectado en los rizomas de banano es eficiente, el resultado puede no ser el mismo en otros países, lo que pone de manifiesto la imposibilidad, en muchos casos, de la aplicabilidad explícita de los resultados, que están en ocasiones condicionados a particularidades del clima, de la cepa patógena o a las variedades cultivadas. Otros estudios realizados por Nel *et al.* (2007), concluyeron que procloraz, propiconazole, benomil y los fungicidas inhibidores de la demetilación, además de reducir la incidencia de la enfermedad y el crecimiento del hongo, aumentan los rendimientos del cultivo.

Fungicidas botánicos. Extractos de plantas medicinales, como pimienta común (*Piper betle* L.) (Gnanasekaran *et al.* 2015) y neem (*Azadirachta indica* A. Juss.), tienen actividad antifúngica sobre *F. oxysporum* f. sp. *cubense* (Mengane & Kamble, 2014); asimismo, los aceites esenciales de clavos [*Eugenia aromatica* (L.) Baill. y *Syzygium aromaticum* (L.) Merr. & L.M.Perry (L.)], de canela (*Cinnamomum zeylanicum* Blume.), de hojas de Zimmu (*Allium cepa* L. x *Allium sativum* L.) y de puerro chino [*Allium ampeloprasum* var. *porrum* (L.) Gay] tienen efecto inhibitorio sobre el crecimiento micelial y germinación de conidios, incluyendo a la raza 4 (Monteiro *et al.* 2013; Gopi & Thangavelu, 2014; Zuo *et al.* 2015; Villa *et al.* 2015; Juniawan *et al.* 2016).

Transformación genética. Este mecanismo parece ser el más eficiente y promisorio para mejorar la resistencia o tolerancia a enfermedades de plantas (Shirani & Sijun, 2018); para ello, se han empleado diferentes técnicas, como el bombardeo de partículas o transformación de genes intervenidos por *Agrobacterium tumefaciens* (Ghag *et al.* 2014; Subramanyam *et al.* 2011), el uso de parámetros bioquímicos (Subramaniam *et al.* 2006) y la proteómica, con la cual, se han logrado identificar la expresión de proteínas reguladoras, luego de inoculaciones con *Foc* RT4 (Li *et al.* 2013).

Estas investigaciones aún siguen siendo exploratorias y no se han probado bajo condiciones de campo. En este último caso, existen algunos reportes con resultados promisorios (Pei *et al.* 2005), como los obtenidos por Dale *et al.* (2017), quienes probaron en campo qué materiales transgénicos de Cavendish mostraron resistencia a *Foc* RT4, conservándose libres de la enfermedad por un periodo de tres años; sin embargo, no se sabe de materiales de este tipo comercialmente disponibles (Shirani & Sijun, 2018).

Prácticas de manejo integrado

No son muy comunes los estudios donde se combinen diferentes estrategias de manejo del mal de Panamá; no obstante, se destacan resultados importantes, como el de Akila *et al.* (2011), con la mezcla de extractos metanólicos de hojas de trompeta del diablo (*Datura metel* L.), con cepas de *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus subtilis*, cuya combinación tiene un efecto sinérgico sobre la reducción de la incidencia de la enfermedad; lo mismo que la incorporación al suelo de residuos de maíz o de arroz en combinación con la inundación o saturación de agua, que inactivan a *F. oxysporum* f. sp. *cubense* (Wen *et al.* 2015). Asimismo, la aplicación conjunta de fertilizantes, a base de compost maduro y *Bacillus amyloliquefaciens* NJN-6, con efecto supresivo del mal de Panamá (Shen *et al.* 2013), efectos similares a los obtenidos con la mezcla de estiércol de cerdo y *Bacillus subtilis* N11, (Zhang *et al.* 2014a) o *Bacillus amyloliquefaciens* W19 (Wang *et al.* 2016).

Otra alternativa es la suplementación de la fertilización con silicio (Si), solo o con cáscaras de macadamia y cepas no patógenicas del hongo, para disminuir la incidencia del mal de Panamá (Kidane & Laing, 2010; Fortunato *et al.* 2012), resultado que también se

ha obtenido con la integración de un agente de biocontrol, como las bacterias promotoras de crecimiento vegetal y una enmienda orgánica, como lo demostraron Zhang *et al.* (2014b), al mezclar compost con *Paenibacillus polymyxa* SQR-21, *Trichoderma harzianum* T37, *Bacillus amyloliquefaciens* N6 y *Bacillus subtilis* N11.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La identificación de métodos y de microorganismos que provean diferentes niveles de control de *F. oxysporum* f. sp. *cubense*, se requieren para afrontar los ataques del hongo. La efectividad de las prácticas mencionadas en esta revisión (Tabla 1), representa un desafío para productores, fitopatólogos y fitomejoradores; por consiguiente, la tendencia de los estudios *in vitro* e *in situ*, aunque de gran relevancia, se deben validar bajo condiciones de campo, a través del tiempo y espacio, concordantes con las características de los materiales comerciales; considerando la larga supervivencia del hongo en el suelo, la susceptibilidad de los cultivares de banano y la ausencia de la integración de medidas efectivas para su control, quedando claro que el desarrollo de genotipos con resistencia genética, preferiblemente poligénica, es la prioridad inmediata para afrontar a este patógeno.

Tabla 1. Efecto epidemiológico de las principales prácticas de manejo del mal de Panamá, causado *F. oxysporum* f. sp. *cubense*.

PRÁCTICA	EFFECTO EPIDEMIOLÓGICO
Cuarentena	X _o
Destrucción de plantas enfermas	X _o
Rotación de cultivos	X _o
Siembras intercaladas	X _o
Desinfestación de herramientas, botas y maquinaria	X _o
Esterilización del suelo con calor	X _o
Solarización	X _o
Fumigación del suelo	X _o
Aplicación de fungicidas químicos y biológicos	X _o -r
Aplicación de bacterias promotoras de crecimiento + enmiendas orgánicas	r
Adición de microelementos al suelo	r
Regulación del contenido de agua en el suelo	r
Modificación del pH del suelo	r
Fertilización nitrogenada	r
Aplicación de cepas no patógenicas + residuos orgánicos	r
Resistencia genética	X _o -r
Manejo de arvenses	X _o -r
Aplicación de microorganismos (hongos, bacterias)	X _o -r

X_o = Inóculo inicial

X_o-r = Inóculo inicial y tasa de desarrollo de la enfermedad

Considerando que las poblaciones de *Foc* entre regiones pueden variar, se requiere caracterizar la diversidad genética del hongo entre cultivares y entre regiones del país, con lo cual, se beneficiarán los programas de fitomejoramiento, al tener un conocimiento más amplio de su biología.

La coordinación y la cooperación entre instituciones gubernamentales y de investigación es primordial, para establecer los protocolos necesarios para una oportuna y correcta detección del hongo, incluyendo, a la raza presente.

Conflicto de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

REFERENCIAS

- AGUILAR, J. 2013. Improvement of Cavendish banana cultivars through conventional breeding. *Acta Horticulturae*. 986:205-208. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.986.21>
- AKILA, R.; RAJENDRAN, L.; HARISH, S.; SAVEETHA, K.; RAGUCHANDER, T.; SAMIYAPPAN, R. 2011. Combined application of botanical formulations and biocontrol agents for the management of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (FOC) causing Fusarium wilt in banana. *Biological Control*. 57(3):175-183. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.02.010>
- AL-HETAR, M.Y.; ZAINAL, M.A.; SARIAH, M.; WONG, M.Y. 2011. Antifungal activity of Chitosan against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *J. Applied Polymer Science*, 120(4):2434-2439. <https://doi.org/10.1002/app.33455>
- ALARCÓN, J.J. 2007. Enfermedades en la producción de Heliconias en los departamentos de Caldas, Risaralda y Quindío. *Agronomía*. 15(1):45-61.
- AMIR, H.; ALABOUVETTE, C. 1993. Involvement of soil abiotic factors in the mechanisms of soil suppressiveness to Fusarium wilts. *Soil Biology and Biochemistry* (United Kingdom). 25(2):157-164. <https://doi.org/10.1016/0038-07179390022-4>
- ÁNGEL-GARCÍA, C.; ROBLEDO-BURITICÁ, J.; CASTAÑO-ZAPATA, J. 2018. Comparación de métodos de inoculación de *Fusarium solani* f. sp. *passiflorae* en plántulas de maracuyá (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*). *Rev. U.D.C.A. Act. & Div. Cient.* 21(1):23-31. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n1.2018.659>
- BELGROVE, A.; STEINBERG, C.; VILJOEN, A., 2011. Evaluation of nonpathogenic *Fusarium oxysporum* and *Pseudomonas fluorescens* for Panama disease control. *Plant Disease* (USA). 95(8):951-959. <http://doi.org/10.1094/PDIS-06-10-0409>
- BORGES, A.; VILAR, A.; MATOS, A.; DA SILVA, F. 2007. Redução do mal-do-panamá em bananeira-maçã por inoculação de fungo micorrízico arbuscular. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 42(1):35-41. <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007000100005>
- BUDDENHAGEN, I. 2009. Understanding strain diversity in *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* and history of introduction of “Tropical Race 4” to better manage banana production. *Acta Horticulturae*. 828:193-204. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.828.19>
- CASTAÑO-ZAPATA, J. 1994. Principios básicos de fitopatología. Editorial Zamorano Academic Press (Honduras). 518p.
- CASTAÑO-ZAPATA, J. 2002. Principios básicos de fitoepidemiología. Editorial Universidad de Caldas (Colombia). 396p.
- COSTA, S.N.; BRAGANCA, C.A.D.; RIBEIRO, L.R.; AMORIM, E.P.; OLIVEIRA, S.A.S.; DITA, M.A.; LARANJEIRA, M.M.; HADDAD, F. 2014. Genetic structure of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* in different regions from Brazil. *Plant Pathology*, 64(1):1-11. <https://doi.org/10.1111/ppa.12242>
- DALE, J.L.; JAMES, A.; PAUL, J.Y.; KHANNA, H.; SMITH, M.; PERAZA-ECHEVERRIA, S.; GARCÍA-BASTIDAS, F.; KEMA, G.; WATERHOUSE, P.; MENGENSEN, K.; HARDING, R. 2017. Transgenic Cavendish bananas with resistance to Fusarium wilt tropical race 4. *Nature Communications* (United Kingdom). 8(1):1496. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01670-6>
- DANE, F.; DALGIC, O. 2005. The effects of fungicide benomyl (benlate) on growth and mitosis in onion (*Allium cepa* L.) root apical meristem. *Acta Biológica Hungarica*, 56(1):119-128. <https://doi.org/10.1556/ABiol.56.2005.1-2.12>
- DELTOUR, P.; FRANÇA, S.; PEREIRA, O.; CARDOSO, I.; DE NEVE, S.; DEBODE, J.; HÖFTE, M. 2017. Disease suppressiveness to Fusarium wilt of banana in an agroforestry system: Influence of soil characteristics and plant community. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 239:173-181. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.018>
- DITA, M.; GARMING, H.; VAN DEN BERGH, I.; STAVER, C.; LESCOT, T. 2013. Banana in Latin American and the Caribbean: Current state challenges and perspectives. *Acta Horticulturae*. 986(986):365-380. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.986.39>

17. FISHAL, E.; MEON, S.; YUN, W. 2010. Induction of tolerance to Fusarium wilt and defense-related mechanisms in the plantlets of susceptible Berangan banana pre-inoculated with *Pseudomonas* sp. (UPMP3) and *Burkholderia* sp. (UPMB3). *Agricultural Science in China*. 9(8):1140-1149. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(09\)60201-7](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60201-7)
18. FORSYTH, L.; SMITH, L.; AITKEN, E. 2006. Identification and characterization of non-pathogenic *Fusarium oxysporum* capable of increasing and decreasing Fusarium wilt severity. *Mycological Research*. 110(8):929-935. <https://doi.org/10.1016/j.mycres.2006.03.008>
19. FORTUNATO, A.; RODRIGUES, F.; BARONI, J.; SOARES, G.; RODRIGUEZ, M.; PEREIRA, O. 2012. Silicon suppresses Fusarium wilt development in banana plants. *J. Phytopathology (United Kingdom)*. 160(11-12):667-674. <https://doi.org/10.1111/jph.12005>
20. FRAVEL, D.; OLIVAIN, C.; ALABOUVETTE, C. 2003. *Fusarium oxysporum* and its biocontrol. *New phytologist (United Kingdom)*. 157:493-502. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00700.x>
21. GETHA, K.; VIKINESWARY, S. 2002. Antagonistic effects of *Streptomyces violaceusniger* strain G10 on *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 4: indirect evidence for the role of antibiosis in the antagonistic process. *J. Industrial Microbiology and Biotechnology (Germany)*. 28(6):303-310. <https://doi.org/10.1038/sj/jim/7000247>
22. GHAG, S.B.; SHEKHAWAT, U.K.S.; GANAPATHI, T.R. 2014. Transgenic banana plants expressing a *Stellaria media* defensin gene (*Sm-AMP-D1*) demonstrate improved resistance to *Fusarium oxysporum*. *Plant Cell Tiss. and Organ Cult.*, 119(2):247-255. <https://doi.org/10.1007/s11240-014-0529-x>
23. GNANASEKARAN, P.; SALIQUE, M.; PANNEERSELVAM, A.; UMAMAGHESWARI, K. 2015. *In vitro* biological control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* by using some Indian medicinal plants. *Internal J. Current Res. and Academic Review (India)*. 3(11):107-116.
24. GOPI, M.; THANGAVELU, R. 2014. Suppression of Fusarium wilt disease of banana by Zimmu (*Allium cepa* L. x *Allium sativum* L.) leaf extract. *African J. Microbiology Res.* 8(31):2904-2915. <https://doi.org/10.5897/AJMR2014.6810>
25. GORDON, T.R. 2017. *Fusarium oxysporum* and the Fusarium wilt syndrome. *Ann. Rev. Phytopathology*. 55:23-39. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080615-095919>
26. HENNESSY, C.; WALDUCK, G.; DALY, A.; PADOVAN, A., 2005. Weed hosts of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in northern Australia. *Australasian Plant Pathology*. 34(1):115-117. <https://doi.org/10.1071/AP04091>
27. HERBERT, J.; MARX, D. 1990. Short-term control of Panama disease of bananas in South Africa. *Phytophylactica (South Africa)*. 22(3):339-340.
28. HERMANTO, C.; DJATNIKA, E.I.; EMILDA, D.; MUJIMAN, S. 2012. Pre-planting treatments for management of banana Fusarium wilt. *ARPN J. Agricultural and Biological Science (USA)*. 7(4):260-265.
29. HUANG, Y.H.; WANG, R.C.; LI, C.H.; ZUO, C.W.; WEI, Y.R.; ZHANG, L.; YI, G.J. 2012. Control of Fusarium wilt in banana with Chinese leek. *European Journal of Plant Pathology / European Foundation for Plant Pathology*: 134(1):87-95. <http://doi.org/10.1007/s10658-012-0024-3>
30. JIMÉNEZ, R.; JIMÉNEZ, M. 2011. Integrated management of Fusarium wilt diseases. In: Alves-Santos, F.M; Diez, J.J. (Eds). *Control of Fusarium Diseases, Chapter: Chapter 7. Integrated Management of Fusarium Wilt Diseases*. Research Signpost. p.177-215. Disponible desde Internet en: https://www.researchgate.net/publication/249009577_Integrated_Management_of_Fusarium_Wilt_Diseases (con acceso 30/06/2018).
31. JUNIAWAN; ROCHDJATUN, I.; DJAUHARI, S.; HIMAWAN, T. 2016. Inhibition test of clove leaf oils to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *IOSR J. Agriculture and Veterinary Science*. 9(4):1-7. <http://doi.org/10.9790/2380-0904010107>
32. KIDANE, E.G.; LAING, M.D. 2010. Integrated control of Fusarium wilt of banana (*Musa* spp.). *Acta Horticulturae (Belgium)*. 879:315-321. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.879.32>
33. KÖBERL, M.; DITA, M.; MARTINUZ, A.; STAYER, C.; BERG, G. 2017. Members of Gammaproteobacteria as indicator species of healthy banana plants on Fusarium wilt-infested fields in Central America. *Scientific Reports*. 7: 45318. <https://doi.org/10.1038/srep45318>
34. LAKSHMANAN, P.; SELVARAJ, P.; MOHAN, S. 1987. Efficacy of different methods for the control of Panama disease. *Tropical Pest Management (United Kingdom)*. 33(4):373-374. <http://dx.doi.org/10.1080/09670878709371187>
35. LESLIE, J.; SUMMERELL, B. 2006. *The Fusarium laboratory manual*. Blackwell Publishing. Iowa, USA. 387p.
36. LI, X.; BAI, T.; LI, Y.; RUAN, X.; LI, H. 2013. Proteomic analysis of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4- inoculated response to Fusarium wilts in the

- banana root cells. Proteome Science. 11:41. <https://doi.org/10.1186/1477-5956-11-41>
37. LI, W.; DITA, M.; WU, W.; HU, G.; XIE, J.; GE, X. 2014. Resistance sources to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in banana wild relatives. Plant Pathology. 64(5):1061-1067. <https://doi.org/10.1111/ppa.12340>
 38. LIAN, J.; WANG, Z.; ZHOU, S. 2008. Response of endophytic bacterial communities in banana tissue culture plantlets to *Fusarium* wilt pathogen infection. J. General and Applied Microbiology (Japan). 54(2):83-92. <https://doi.org/10.2323/jgam.54.83>
 39. LÓPEZ, N.; CASTAÑO-ZAPATA, J. 2012. Characterization of phytopathogenic fungi, bacteria, nematodes and viruses in four commercial varieties of Heliconia (*Heliconia* sp.). Rev. Facultad Nacional de Agronomía Medellín. 65(2):6697-6710.
 40. MARÍN-SERNA, S.M.; GONZÁLEZ-GUZMÁN, J.J.; CASTAÑO-ZAPATA, J.; CEBALLOS-AGUIRRE, N. 2014. Respuesta de quince introducciones de tomate tipo cereza (*Solanum* spp.) a la marchitez vascular (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* Snyder & Hansen). Agronomía. 22(2):48-50.
 41. MELDRUM, R.A.; DALY, A.M.; TRAN-NGUYEN, L.T.T.; AITKEN, E.A.B. 2013a. ¿Are banana weevil borers a vector in spreading *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in banana plantations? Australasian Plant Pathology. 42:543-549. <https://doi.org/10.1007/s13313-013-0214-2>
 42. MELDRUM, R.A.; DALY, A.M.; TRAN-NGUYEN, L.T.T.; AITKEN, E.A.B. 2013b. The effect of surface sterilants on spore germination of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4. Crop Protection. 54:194-198. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.08.014>
 43. MENGANE, S.; KAMBLE, S. 2014. Bioefficacy of plant extracts on *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* causing panama wilt of banana. IJPBS (India). 4(3):24-27.
 44. MOHANDAS, S.; MANJULA, R.; RAWAL, R.D.; LAKSHMIKANTHA, H.C.; CHAKRABORTY, S.; RAMACHANDRA, Y.L. 2010. Evaluation of arbuscular mycorrhiza and other biocontrol agents in managing *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* infection in banana cv. Neypoovan. Biocontrol Science and Technology (United Kingdom). 20(2):165-181. <https://doi.org/10.1080/09583150903438439>
 45. MOLINA, A.B.; FABREGAR, E.G.; RAMILLETE, E.G.; SINOHIN, V.O.; VILJOEN, A. 2011. Field resistance of selected banana cultivars against tropical race 4 of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* in the Philippines. Phytopathology (United States). 101:S122. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16107.23844>
 46. MOLINA, A.; SINOHIN, V.; FABREGAR, E.; RAMILLETE, E.B.; LOAYAN, M.; CHAO, C. 2016. Field resistance of Cavendish somaclonal variants and local banana cultivars to tropical race 4 of *Fusarium* wilt in the Philippines. Acta Horticulturae 1114:227-230. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1114.31>
 47. MONTEIRO, F.; FERREIRA, L.; SILVA, J.; PACHECO, L.; SOUZA, P. 2013. Influence of plant extracts and essential oils against Panama disease (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*) in banana seedlings. J. Agricultural Science (Canadá). 5(4):63-74. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v5n4p63>
 48. NEL, B.; STEINBERG, C.; LABUSCHAGNE, N.; VILJOEN, A. 2007. Evaluation of fungicides and sterilants for potential application in the management of *Fusarium* wilt of banana. Crop Protection (United Kingdom). 26(4):697-705. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.06.008>
 49. PATTISON, A.B.; WRIGHT, C.L.; KUKULIES, T.L.; MOLINA, A.B. 2014. Ground cover management alters development of *Fusarium* wilt symptoms in Ducasse bananas. Australasian Plant Pathology. 43(4):465-476. <https://doi.org/10.1007/s13313-014-0296-5>
 50. PEI, X.W.; CHEN, S.K.; WEN, R.M.; YE, S.; HUANG, J.Q.; ZHANG, Y.Q.; WANG, B.S.; WANG, Z.X.; JIA, S.R. 2005. Creation of transgenic bananas expressing human lysozyme gene for Panama wilt resistance. J. Int. Plant Biol. 47(8):971-997. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2005.00141.x>
 51. PENG, H.X.; SIVASITHAMPARAM, K.; TURNER, D.W. 1999. Chlamydospore germination and *Fusarium* wilt of banana plantlets in suppressive and conducive soils are affected by physical and chemical factors. Soil Biology and Biochemistry (United Kingdom). 31(10):1363-1374. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00045-0)
 52. PÉREZ, L.; DITA, M.; MARTINEZ, E. 2014. Prevention and diagnostic of *Fusarium* wilt (Panama disease) of banana caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 (TR4). Proc. Regional Workshop on the Diagnosis of *Fusarium* Wilt (Panama disease) caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4: Mitigating the Threat and Preventing its Spread in the Caribbean, St. Augustine, Trinidad and Tobago. FAO, Rome, Italy. 74p. Disponible desde Internet en: http://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/Pests_Pesticides/caribbeantr4/13ManualFusarium.pdf (acceso 30/06/2018).
 53. PÉREZ, L. 2015. Las mejores prácticas para la prevención de la raza 4 tropical de la marchitez por *Fusarium* y otras

- enfermedades exóticas en fincas bananeras. Fitosanidad. 19(3):243-250.
54. PERRIER, X.; DE LANGHE, E.; DONOHUE, M.; LENTFER, C.; VRYDAGHS, L.; BAKRY, F.; CARREEL, F.; HIPPOLYTE, I.; HORRY, J.P.; JENNY, C.; LEBOT, V.; RISTERUCCI, A.M.; TOMKPE, K.; DOUTRELEPONT, H.; BALL, T.; MANWARING, J.; DE MARET, P.; DENHAM, T. 2011. Multidisciplinary perspectives on banana (*Musa* spp.) domestication. Proc. Nal Acad. Sciences (USA). 108(28):11311-11318. <https://doi.org/10.1073/pnas.1102001108>
 55. PLOETZ, R.C. 2006. Fusarium wilt of banana is caused by several pathogens referred to as *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. Phytopathology (USA). 96(6):653-656. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0653>
 56. PLOETZ, R.C. 2015a. Management of Fusarium wilt of banana: A review with special reference to tropical race 4. Crop Protection (United Kingdom). 73:7-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2015.01.007>
 57. PLOETZ, R.C. 2015b. Fusarium wilt of banana. Phytopathology (USA) 105(12):1512-1521. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-15-0101-RVW>
 58. RAMU, V.; VENKATARANGAIAH, K.; KRISHNAPPA, P.; SHIMOGA RAJANNA, S.K.; DEEPLANAİK, N.; CHANDRA PAL, A.; KINI, K.R. 2016. Identification of biomarkers for resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* infection and *in Silico* studies in *Musa paradisiaca* cultivar Puttabale through proteomic approach. Proteomes. 4(1):9. <https://doi.org/10.3390/proteomes4010009>
 59. SARAVANAN, T.; MUTHUSAMY, M.; MARIMUTHU, T. 2003. Development of integrated approach to manage the Fusarium wilt of banana. Crop Protection (United Kingdom). 22(9):1117-1123. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(03\)00146-7](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(03)00146-7)
 60. SHEN, Z.; ZHONG, S.; WANG, Y.; WANG, B.; MEI, X.; LI, R.; RUAN, Y.; SHEN, Q. 2013. Induced soil microbial suppression of banana Fusarium wilt disease using compost and biofertilizers to improve yield and quality. European J. Soil Biology. 57:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2013.03.006>
 61. SHIRANI, S.; SIJUN, Z. 2018. Banana Fusarium wilt (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*) control and resistance, in the context of developing wilt-resistant bananas within sustainable production systems. Horticultural Plant Journal. 4(5):208-218. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2018.08.001>
 62. SIDDHESH, B.; UPENDRA, K.; THUMBALLI, R. 2015. Fusarium wilt of banana: biology, epidemiology and management. Internal J. Pest Management. 61(3):250-263. <https://doi.org/10.1080/09670874.2015.1043972>
 63. SMITH, M.; LANGDON, P.; PEGG, K.; DANIELLS, J. 2014. Growth, yield and Fusarium wilt resistance of six FHIA tetraploid bananas (*Musa* spp.) grown in the Australian subtropics. Scientia Horticulturae. 170:176-181. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.02.029>
 64. SUBRAMANIAM, S.; MAZIAH, M.; SARIAH, M.; PUAD, M.P.; XAVIER, R. 2006. Bioassay method for testing Fusarium wilt disease tolerance in transgenic banana. Scientia Horticulturae. 108(4):378-389. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.02.028>
 65. SUBRAMANYAM, K.; SUBRAMANYAM, K.; SAILAJA, K.V.; SRINIVASULU, M.; LAKSHMIDEVI, K. 2011. Highly efficient *Agrobacterium* mediated transformation of banana cv. Rasthali (AAB) via sonication and vacuum infiltration. Plant Cell Rep. 30(3):425-436. <http://dx.doi.org/10.1007/s00299-010-0996-4>
 66. SUN, B.; PENG, M.; WANG, Y.G.; ZHAO, P.J.; XIA, Q.Y. 2011. Isolation and characterization of antagonistic bacteria against Fusarium wilt and induction of defense related enzymes in banana. African J. Microbiology Res. 5(5):509-515. <https://doi.org/10.5897/AJMR10.607>
 67. THANGAVELU, R.; JAYANTHI, A. 2009. A RFLP analysis of rDNA-ITS regions of native non-pathogenic *Fusarium oxysporum* isolates and their field evaluation for the suppression of Fusarium wilt disease of banana. Australasian Plant Pathology. 38(13):13-21. <https://doi.org/10.1071/AP08071>
 68. THANGAVELU, R.; GOPI, M. 2015. Field suppression of Fusarium wilt disease in banana by the combined application of native endophytic and rhizospheric bacterial isolates possessing multiple functions. Phytopathologia Mediterranea (Italy) 54(2):241-252. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-15160
 69. TING, A.S.Y.; MEON, S.; KADIR, J.; RADU, S.; SINGH, G. 2010. Induction of host defense enzymes by the endophytic bacterium *Serratia marcescens*, in banana plantlets. Internal J. Pest Management (United Kingdom). 56(2):183-188. <https://doi.org/10.1080/09670870903324198>
 70. TING, A.S.Y.; MAH, S.W.; TEE, C.S. 2010. Identification of volatile metabolites from fungal endophytes with biocontrol potential towards *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* Race 4. American J. Agricultural and Biological Sciences. 5(2): 177-182. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2010.177.182>
 71. VAN DER PLANK, J.E. 1963. Plant diseases: epidemics and control. Academic Press. New York. 349p.

72. VILLA, A.; PÉREZ, R.; MORALES, H.; BASURTO, M.; SOTO, J.; MARTÍNEZ, E. 2015. Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. *Acta Agronómica*. 64(2):194-205. <https://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n2.43358>
73. WANG, B.; YUAN, J.; ZHANG, F.; SHEN, Z.; ZHANG, F.; LI, R.; RUAN, Y.; SHEN, Q. 2013. Effects of novel bioorganic fertilizer produced by *Bacillus amyloliquefaciens* W19 on antagonism of *Fusarium* wilt of banana. *Biology and Fertility Soils (Germany)*. 49(4):435-446. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0739-5>
74. WANG, Z.; JIA, C.; LI, J.; HUANG, S.; XU, B.; JIN, Z. 2014. Activation of salicylic acid metabolism and signal transduction can enhance resistance to *Fusarium* wilt in banana (*Musa acuminata* L. AAA group, cv. Cavendish). *Funct. Integr. Genomics*. 15:47-62. <https://doi.org/10.1007/s10142-014-0402-3>
75. WANG, B.; LI, R.; RUAN, Y.; OU, Y.; ZHAO, Y.; QIRONG, S. 2015. Pineapple-banana rotation reduced the amount of *Fusarium oxysporum* more than maize-banana rotation mainly through modulating fungal communities. *Soil Biology & Biochemistry*. 86:77-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.02.021>
76. WANG, B.; SHEN, Z.; ZHANG, F.; RAZA, W.; YUAN, J.; HUANG, R.; RUAN, Y.; LI, R.; SHEN, Q. 2016. *Bacillus amyloliquefaciens* strain W19 can promote growth and yield and suppress *Fusarium* wilt in banana under greenhouse and field conditions. *Pedosphere*. 26(5):733-744. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60083-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60083-2)
77. WEBER, O.B.; MUNIZ, C.R.; VITOR, A.O.; FREIRE, F.C.; OLIVEIRA, V.M. 2007. Interaction of endophytic diazotrophic bacteria and *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* on plantlets of banana 'Maça.'. *Plant and Soil (Netherlands)*. 298(1):47-56. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9335-0>
78. WEN, T.; HUANG, X.; ZHANG, J.; ZHU, T.; MENG, L.; CAI, Z. 2015. Effects of water regime, crop residues, and application rates on control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *J. Environmental Sciences*. 31:30-37. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.11.007>
79. WU, Y.; YI, G.; PENG, X.; HUANG, B.; LIU, E.; ZHANG, J. 2013. Systemic acquired resistance in Cavendish banana induced by infection with an incompatible strain of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *J. Plant Physiol*. 170:1039-1046. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.02.011>
80. ZACKY, F.A.; TING, A.S.Y. 2013. Investigating the bioactivity of cells and cell-free extracts of *Streptomyces griseus* towards *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 4. *Biological Control (United States)*. 66(3):204-208. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.06.001>
81. ZHANG, M.; ZHANG, M.; CHEN, P.; RUAN, Y.; ZHU, Y.; SHEN, Q. 2013a. Influence of nitrate/ammonium ratio on the plant growth of banana and related wilt disease development. *J. Plant Nutrition and Fertilizer (China)*. 19(5):1241-1247. <https://doi.org/10.11674/zwyf.2013.0525>
82. ZHANG, H.; MALLIK, A.; ZENG, R.S.J. 2013b. Control of Panama disease of banana by rotating and intercropping with Chinese chive (*Allium tuberosum* Rottler): Role of plant volatiles. *Chemical Ecology*. 39(2):243-252. <https://doi.org/10.1007/s10886-013-0243-x>
83. ZHANG, N.; WU, K.; HE, X.; LI, S.; ZHANG, Z.; SHEN, B.; YANG, X.; ZHANG, R.; HUANG, Q.; SHEN, Q. 2014a. A new bioorganic fertilizer can effectively control banana wilt by strong colonization with *Bacillus subtilis* N11. *Plant and Soil*. 344(1-2):87-97. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0729-7>
84. ZHANG, N.; HE, X.; ZHANG, J.; RAZA, W.; YANG, X.; RUAN, Y.; SHEN, Q.; HUANG, Q. 2014b. Suppression of *Fusarium* wilt of banana with application of bio-organic fertilizers. *Pedosphere*. 24(5):613-624. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60047-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60047-3)
85. ZUO, C.; LI, C.; LI, B.; WEI, Y.; HU, C.; YANG, Q.; YANG, J.; SHENG, O.; KUANG, R.; DENG, G.; KUMAR, R.; YI, G. 2015. The toxic mechanism and bioactive components of Chinese leek root exudates acting against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4. *European J. Plant Pathology*. 143(3):447-460. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0697-5>
86. ZUO, C.; DENG, G.; LI, B.; HUO, H.; LI, CH.; HU, CH.; KUANG, R.; YANG, Q.; DONG, T.; SHENG, O.; YI, G. 2018. Germplasm screening of *Musa* spp. for resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 (FOC TR4). *European J. Plant Pathology*. 151(3):723-734. <https://doi.org/10.1007/s10658-017-1406-3>