

Análisis de las investigaciones sobre *Metarhizium anisopliae* en los últimos 40 años

Francisco Hernández-Rosas¹
Luis Andrés García-Pacheco¹
Katia Angélica Figueroa-Rodríguez^{1§}
Benjamín Figueroa-Sandoval²
Josafhat Salinas Ruiz¹
Dora Ma. Sangerman-Jarquín³
Edna Liliana Díaz-Sánchez¹

¹Colegio de Postgraduados-Campus Córdoba. Programa de Innovación Agroalimentaria Sustentable. Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. CP. 94953. (fhrosas@colpos.mx; garcia.andres@colpos.mx; diaz.edna@colpos.mx; salinas@colpos.mx). ²Programa de Innovación en el Manejo de Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados-Campus San Luis. Calle de Iturbide 73, Salinas de Hidalgo, SLP. CP. 78622. (benjamin@colpos.mx). ³Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Textcoco km 13.5, Coatlinchán, Textcoco, Estado de México, México. CP. 56250. (sangerman.dora@inifap.gob.mx).

§Autora para correspondencia: fkatia@colpos.mx.

Resumen

El control biológico se utiliza para la regulación de poblaciones de insectos plaga y evitar la inducción de resistencia de los insectos por el uso excesivo de agroquímicos, así como solventar problemas de residuos para la producción orgánica de alimentos. Existen más de 750 especies de hongos entomopatógenos que pueden utilizarse para el control biológico de plagas, siendo *Metarhizium anisopliae*, uno de los más utilizados a nivel comercial. La presente revisión tuvo por objetivo determinar los temas más relevantes con respecto a investigaciones concernientes a *M. anisopliae* durante el período de 1976 a 2018. Se realizó una revisión en el metabuscador Scopus[®], utilizando como palabra clave *Metarhizium anisopliae* solo en título para octubre 9, 2018. Se identificaron las principales revistas, países e instituciones que han publicado sobre el tema. Los datos se analizaron utilizando el software VOSviewer[®] bajo el principio de co-ocurrencia de términos. Los resultados muestran que este microorganismo ha sido ampliamente estudiado a nivel internacional, especialmente en el período de 2008 a 2014. Las investigaciones se concentran en tres clústeres: producción-actividad, *Beauveria bassiana* y termitas. Se concluye que este microorganismo sigue analizándose desde una perspectiva comercial y debido a que los agentes de control biológico tienden a ser locales, sus investigaciones continuarán para concentrarse en el desarrollo y caracterización a nivel molecular de cepas locales (nativas) con potencial comercial.

Palabras clave: *Beauveria bassiana*, control biológico, entomopatógenos, plagas, termitas.

Recibido: febrero de 2019

Aceptado: abril de 2019

Introducción

El uso excesivo de productos químicos en los cultivos agrícolas es un problema, ya que algunos insectos han desarrollado resistencia a estos (Lezama-Gutiérrez *et al.*, 2012). Por lo tanto, se ha vuelto necesario buscar medios alternativos para el control biológico de plagas para poder minimizar el uso de estos químicos (Mirhaghparast *et al.*, 2013). El control biológico provee herramientas adicionales para el manejo de plagas que permite romper los ciclos de resistencia de los insectos, así como solventar problemas de residuos para la producción de alimentos orgánicos (Fravel, 2005). Existen más de 750 especies de hongos entomopatógenos diseminados en el medio ambiente que provocan infecciones fungosas a ciertos insectos, las cuales pueden regular hasta en 80% sus poblaciones (Lobo *et al.*, 2016). Dentro de los géneros más importantes están: *Metarhizium*, *Beauveria*, *Aschersonia*, *Entomophthora*, *Zoophthora*, *Hirsutella*, *Fusarium* y *Verticillium* (Acuña-Jiménez *et al.*, 2015).

En este contexto *Metarhizium anisopliae* es un hongo filamentoso caracterizado y utilizado para el control de plagas, además el uso de sus enzimas es empleado como catalizador biológico en el sector industrial (Alonso-Díaz *et al.*, 2007). Es una de las especies más comunes que se han encontrado, estudiado y utilizado en todo el mundo principalmente como agente de control biológico (ACB) (Curran *et al.*, 1994). Este hongo se ha aplicado con éxito desde la década de 1970 en Brasil para controlar plagas en caña de azúcar (Rangel *et al.*, 2006). *M. anisopliae* también se ha utilizado como agente de control biológico o ACB de plagas de diversos insectos: termitas (Isoptera), langostas (*Locusta migratoria* L.), salivazos (*Aeneolamia* spp. F., *Prosapia* spp. F., *Nilaparvata lugens* Stål), escarabajos (*Adoryphorus couloni* B., *Antitrogus parvulus* Britton, *Aphodius tasmaniae* Hope, *Oryctes rhinocerus* L.), gusano barrenador (*Diatraea saccharalis* F.) y para el control de los mosquitos vectores de la malaria, incluyendo sus estados larvales (Buti *et al.*, 1994).

Las investigaciones sobre el uso de microorganismos para el control biológico de plagas en la agricultura, se encuentra presente en la literatura científica desde los años setenta, siendo un tema ampliamente explorado desde diversas líneas del conocimiento (Camargo *et al.*, 2016); no obstante, a la fecha no existe una revisión holística que permita comprender en qué se han focalizado las investigaciones relativas a este hongo. El objetivo de esta revisión fue determinar los temas más relevantes con respecto a investigaciones concernientes a *M. anisopliae* durante el período de 1976 a 2018.

Materiales y métodos

Las publicaciones analizadas se obtuvieron con el metabuscador Scopus® Elsevier (www.scopus.com) para el periodo de 1976 a 2018 (octubre 9). Inicialmente se utilizó la palabra *Metarhizium*, sólo en el título, lo que generó 1 708 documentos. Se encontraron publicaciones con respecto a diversas especies del género *Metarhizium* como: *M. anisopliae* (1 272 publicaciones), *M. acridum* (107), *M. robertsii* (173), *M. brunneum* (121), *M. rileyi* (16), *M. majus* (7), *M. guizhouhense* (6), *M. pingshaense* (6), la especie *M. anisopliae* fue la más estudiada, por la cual se retuvieron o utilizaron sólo las publicaciones de *M. anisopliae* para el análisis. Del total de documentos analizados 1 216 fueron artículos, ocupando 95.6% del total. Otros documentos fueron: capítulos de libros (7), revisiones (14), artículos en prensa (4), documentos de conferencia

(14), cartas (2), notas (3), encuestas (3) y *erratum* (9). Con estos datos se elaboró un análisis bibliométrico utilizándose los términos de las palabras clave, títulos y resúmenes de las publicaciones para mostrar sólo los elementos conectados entre sí.

Análisis de los resultados

Para el análisis se utilizó el software VOSviewer® (Centre for Science and Technology Studies, 2018). Se hizo un análisis de co-ocurrencia de palabras clave y términos académicos en los títulos y resúmenes de las publicaciones, el método fue el de normalización-fuerza de asociación (FA), resolución de 1.00, escala de visualización al 100%, peso TLS, tamaño de variación de etiqueta de 50% y de ancho del núcleo de 30%. Se estableció el método de conteo completo, con un número de registros de cada término ≥ 10 , y un tamaño mínimo de clúster de 15 (van Eck y Waltman, 2010). Con los términos retenidos se creó el mapa para la visualización de la red, aquellos términos con mayor frecuencia se presentan en burbujas más grandes, los términos irrelevantes fueron eliminados (Heersmink *et al.*, 2011).

Resultados

El número de publicaciones donde se abordan aspectos relacionados con *M. anisopliae* es abundante, a continuación, se analizan los indicadores bibliométricos referentes a este microorganismo.

Análisis del desempeño

La distribución de las publicaciones referentes a este tema de investigación se presenta en la Figura 1. El número de publicaciones sobre este tema inicia en 1976 manteniendo un crecimiento irregular, para el año de 1998 alcanza su primer pico en el año 2008, año en el que se presenta el mayor número de publicaciones (75), seguido por 2014 (74). Posterior a 2015, el número de publicaciones se ha ido reduciendo. Del total de documentos, 1 121 han sido citados acumulando un total de 24 504 citas. Hay 24 artículos que tienen más de 100 citas, 93 tienen entre 50 y 90 citas y 623 artículos tienen menos de 10 citas.

En lo que respecta a los países, se observa que Brasil es el país con mayor número de contribuciones (241). El segundo lugar lo tiene Estados Unidos de América con 228 publicaciones, seguido por el Reino Unido (139), China (97) e India (82). En América Latina, México destaca con 54 publicaciones, seguido por Colombia con 22 y Argentina con 10 publicaciones. Las contribuciones provienen de autores de 160 instituciones: 29 brasileñas, 21 estadounidenses, 16 pertenecientes al Reino Unido, 13 chinas y 11 mexicanas. Dentro de las 11 instituciones mexicanas se encuentran, Universidad del Estado de Colima (12), UNAM (9), la Universidad de Guanajuato (8), el Colegio de Postgraduados (6) y la Universidad Autónoma de Yucatán (4).

En el Cuadro 1 se presentan las 10 revistas con mayor número de publicaciones, ordenadas por país e institución. Las cinco revistas con mayor número de publicaciones son: Journal of Invertebrate Pathology, Biocontrol Science and Technology, Mycological Research, Biological Control y Biocontrol. Destacan revistas con énfasis en entomología, patología y micología, así como control biológico.

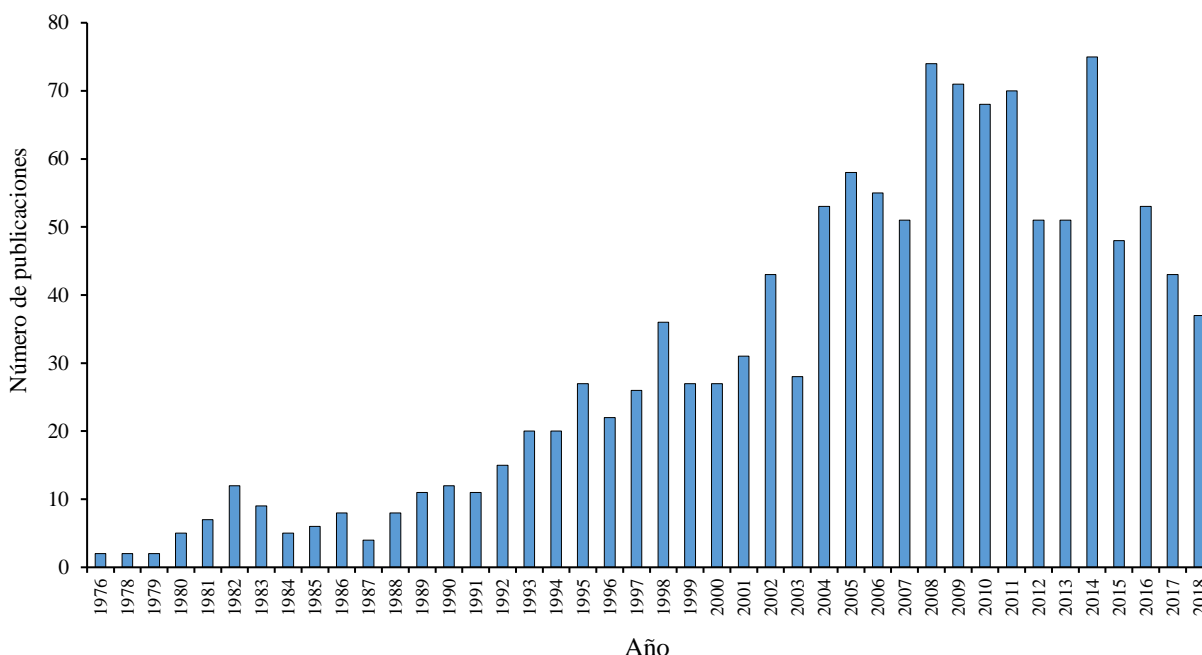


Figura 1. Distribución de publicaciones sobre *M. anisopliae* por año de 1976 a 2018 (9 de octubre de 2018).

Cuadro 1. Análisis del desempeño: instituto, país y revista.

Rank	Instituto	Pub.	País	Pub.	Revista	Pub.
1	International Centre of Insect Physiology and Ecology Nairobi	55	Brasil	241	Journal of Invertebrate Pathology	127
2	Universidade Federal do Rio Grande do Sul	47	Estados Unidos	228	Biocontrol Science and Technology	70
3	Universidade de Sao Paulo - USP	43	Reino Unido	139	Mycological Research	37
4	University of Bath	42	China	97	Biological Control	35
5	Cornell University	41	India	82	Biocontrol	21
6	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria-Embrapa	39	Australia	57	Journal of Economic Entomology	21
7	Boyce Thompson Institute for Plant Research	35	Kenia	55	Veterinary Parasitology	21
8	Swansea University	29	México	54	FEMS Microbiology Letters	20
9	University of Maryland	28	Canadá	46	Neotropical Entomology	19
10	Universidade Federal de Goias	28	Irán	33	Journal of Applied Entomology	16

En el Cuadro 2, se presentan los 10 artículos más citados. Estos artículos nos permiten rescatar los tópicos con mayor relevancia en esta área del conocimiento, como son: Secuenciación genómica, control biológico, grupos genéticos de hongos *Beauveria bassiana*, combinaciones de micoinsecticidas, patogenicidad, entre otros temas.

Cuadro 2. Los 10 artículos más citados sobre control y *M. anisopliae*.

Rank	Autores	Título	Año	Revista	Citas
1	Gao, Q.; Jin, K.; Ying, S.-H.; Zhang, Y.; Xiao, G., Shang, Y.; Duan, Z.; Hu, X.; Xie, X.-Q.; Zhou, G. and Peng, G.	Genome sequencing and comparative transcriptomics of the model entomopathogenic fungi <i>Metarhizium anisopliae</i> and <i>M. acridum</i>	2011	PLoS Genetics	307
2	Bischoff, J. F.; Rehner, S. A. and Humber, R. A.	A multilocus phylogeny of the <i>Metarhizium anisopliae</i> lineage	2009	Mycologia	264
3	Meyling, N. V. and Eilenberg, J.	Ecology of the entomopathogenic fungi <i>Beauveria bassiana</i> and <i>Metarhizium anisopliae</i> in temperate agroecosystems: Potential for conservation biological control	2007	Biological Control	200
4	Zimmermann, G.	Review on safety of the entomopathogenic fungus <i>Metarhizium anisopliae</i>	2007	Biocontrol Science and Technology	186
5	Hu, G. and St. Leger, R. J.	Field studies using a recombinant mycoinsecticide (<i>Metarhizium anisopliae</i>) reveal that it is rhizosphere competent	2002	Applied and Environmental Microbiology	169
6	Wang, C. and St. Leger, R. J.	A collagenous protective coat enables <i>Metarhizium anisopliae</i> to evade insect immune responses	2006	Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	152
7	Bidochka, M. J.; Kamp, A. M.; Lavender, T. M.; Dekoning, J. and De Croos, J. N. A.	Habitat association in two genetic groups of the insect-pathogenic fungus <i>Metarhizium anisopliae</i> : Uncovering cryptic species?	2001	Applied and Environmental Microbiology	148
8	Leger, R. J. St.; Charnley, A. K. and Cooper, R. M.	Characterization of cuticle-degrading proteases produced by the entomopathogen <i>Metarhizium anisopliae</i>	1987	Archives of Biochemistry and Biophysics	147
9	Kershaw, M. J.; Moorhouse, E.R.; Bateman, R.; Reynolds, S. E.; Charnley, A. K.;	The Role of destruxins in the pathogenicity of <i>Metarhizium anisopliae</i> for three species of insect	1999	Journal of Invertebrate Pathology	142
10	St. Leger, R. J.; Frank, D. C.; Roberts, D. W. and Staples, R. C.	Molecular cloning and regulatory analysis of the cuticle degrading protease structural gene from the entomopathogenic fungus <i>Metarhizium anisopliae</i>	1992	European Journal of Biochemistry	142

Mapeo de la ciencia

Se realizó un análisis de co-ocurrencia de términos, este provee una visión general de las tendencias de las investigaciones al reflejar los tópicos abordados. Los resultados establecen 649 términos, de los cuales se conservaron aquellos con co-ocurrencias mayores a 10, eliminándose términos genéricos relacionados con el proceso de investigación, se retuvieron 389 términos, organizados en 3 clusters con 27 104 relaciones. En la Figura 2, se observan los tres clusters: uno referente a la actividad/producción de *Metarhizium anisopliae* (clúster verde), otro referente a la relación e interacción con *Beauveria bassiana* (clúster rojo) y un tercero relacionado con termitas (clúster azul).

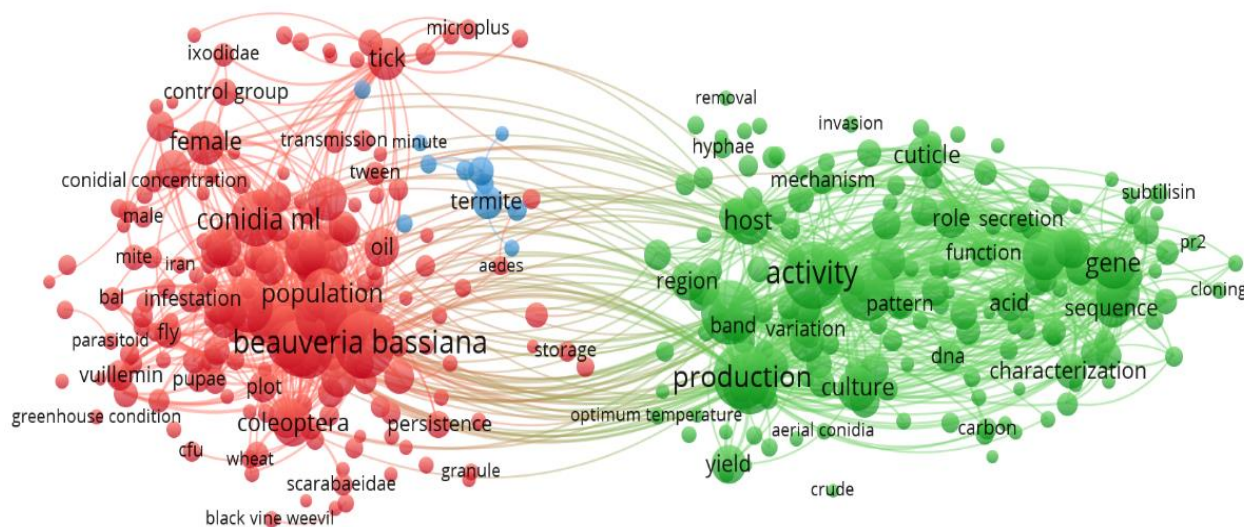


Figura 2. Visualización de la red de co-ocurrencias utilizando el programa VOSviewer®.

Discusión

Este estudio versó sobre métodos bibliométricos para conocer el comportamiento de las publicaciones científicas relativas a *M. anisopliae*. Basados en estos resultados, los tres clústeres relativos a este microorganismo se discutirán de manera independiente a continuación.

Producción-actividad

Los insecticidas químicos se han utilizado comúnmente para controlar plagas agrícolas, termitas y vectores biológicos, como mosquitos y garrapatas, estos productos químicos han generado efectos nocivos al medio ambiente y resistencia en plagas y vectores. Debido a la cada vez mayor preocupación pública, se ha incrementado la investigación sobre alternativas, especialmente agentes de control biológico como son los hongos y bacterias entomopatógenas, para su control (Aw y Hue, 2017). El uso de estos hongos ha evolucionado hasta convertirse en productos de uso comercial (bioinsecticidas), por lo que variables como la producción de los conidios, esporulación y virulencia (Zhang *et al.*, 2018), son estratégicos en las investigaciones que se enfocan en evaluar medios de cultivo o métodos de reproducción o propagación de esporas o conidios de *M. anisopliae* (Shah *et al.*, 2005).

La actividad microbiana se refiere a los cambios que se expresan en la actividad de los microorganismos, en el caso de *M. anisopliae*, las investigaciones han incluido la actividad biológica de este microorganismo cuando se combina con aceites esenciales (Rosas-García *et al.*, 2018), el análisis de la actividad enzimática de proteasas obtenidas a partir de *M. anisopliae* (St Leger *et al.*, 1999; Shah *et al.*, 2005), su actividad antifúngica y fúngica (Wang *et al.*, 2005), insecticida (Charnley, 1991) y biológica sobre diversas plagas como son el gusano blanco (*Premnotrypes vorax* Hustache) (Villamil *et al.*, 2016), la araña roja (*Tetranychus evansi* Baker & Pritchard) (Azandémè-Hounmalon *et al.*, 2018), la polilla de la papa (*Phthorimaea operculella* Zeller) (Khorrami *et al.*, 2018), o la rizosfera (Meyling y Eilenberg, 2007), solo por mencionar algunos ejemplos.

Otra sub-área de investigación de relevancia para este microorganismo es el aspecto molecular. Diversas investigaciones han analizado el rol de varias enzimas (Dextrinas, MaNAG1, MaNAG2, MaNAG3 y MaNAG4) durante el ciclo de vida del *Metarhizium anisopliae* (de Oliveira *et al.*, 2018), caracterizado las ribonucleasas tóxicas de este microorganismo como insecticidas potenciales contra ribosomas para el control de vectores de enfermedades (Olombrada *et al.*, 2017), así como la función de algunos genes sobre la adaptación al ambiente de este microorganismo (Zeng *et al.*, 2018) y en su nivel de virulencia (Santos *et al.*, 2017).

Beauveria bassiana

B. bassiana es un hongo entomopatógeno (Abdu-Allah *et al.*, 2015). Su modo de acción es por contacto (Alcalá-Gómez *et al.*, 2017), contaminando la microflora de la cutícula del insecto, germinando la espora sobre el insecto plaga y la hifa se introduce al integumento (tejido que forma la pared externa de la cutícula del cuerpo de los insectos) e ingresar al hemocele y después propagarse mediante la hemolinfa por todo el insecto, causando su muerte por las toxinas (por toxemia) que este mismo secreta (Petlamul y Prasertsan, 2012). Presenta una gran diversidad genética y por lo regular se desarrolla en hábitats agrícolas (Bidochka *et al.*, 1998; Rustiguel *et al.*, 2018). Algunas de las plagas que controla son: Mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum* Westwood), trips (*Thrips* spp), gallina ciega (*Phyllophaga* spp. Bates), rosquilla negra (*Spodoptera littoralis* Boisduval), entre otras (Polanczyk *et al.*, 2010; Mirhaghparast *et al.*, 2013), así como plagas de artrópodos en la producción avícola (de Oliveira *et al.*, 2014). Actualmente se utiliza como producto comercial de control biológico en combinación con *M. anisopliae*.

B. bassiana y *M. anisopliae* se combinan debido a las estrategias que cada uno sigue, ambos su modo de acción es de contacto, solo que el primero tiene una estrategia tóxica mediante oosporeinas e invade al hospedero mientras que el segundo tiene una estrategia de crecimiento con la formación de apresorios e invasión del hospedero, esto hace que el efecto para el control biológico de plagas sea mayor (Rustiguel *et al.*, 2018). Aunque en otros estudios se han enfocado en establecer cuál de estos dos hongos tiene mejor efecto fungicida (Barbosa *et al.*, 2018), así como sus combinaciones con algunos insecticidas (Rivero-Borja *et al.*, 2018), con diversos compuestos químicos, como el timol, y métodos de aplicación (Sinia y Guzman-Novoa, 2018), para el control de plagas. En general, los temas de investigación versan sobre formulaciones, mortalidad y virulencia (Oliveira *et al.*, 2018), bioensayos en laboratorio, evaluación en campo, y su evaluación para el control de diversas plagas.

Termitas

Las termitas (*Coptotermes curvignathus* (Holmgren) Isoptera:Rhinotermitidae; *Coptotermes heimi*) son una amenaza para las plantas y los cultivos agrícolas, aunque son excelentes descomponedores de madera muerta y otras fuentes de celulosa, se convierten en un grave problema cuando atacan viviendas y cultivos (Hussain *et al.*, 2011). Debido a las pérdidas significativas en los cultivos anuales y perennes y daños, se han adoptado diferentes métodos de control como control físico, químico y biológico (Wright *et al.*, 2005). El control químico ha sido un método exitoso para prevenir el ataque de termitas, pero los métodos biológicos resultan alternativas adecuadas (Verma *et al.*, 2009), especialmente cuando se busca reducir el uso de químicos que dañen el ambiente y a la salud humana (Yii *et al.*, 2016).

M. anisopliae y *B. bassiana* infectan positivamente a las termitas (Rath, 2000), al invadir a su huésped a través del integumento y causar la muerte por agotamiento de los metabolitos del huésped, debido a una destrucción de tejidos vitales o una combinación de ambos (Wang y Powell, 2004). Una investigación previa encontró que *M. anisopliae* causa un porcentaje de entre 71-84% de infecciones en termitas después de 15 días de tratamiento (Kin *et al.*, 2017). Otros estudios se han enfocado en temas como: La tasa de mortalidad según diferentes concentraciones de conidios por ml (Samsuddin *et al.*, 2015; Riaz *et al.*, 2017; Keppanan *et al.*, 2018), su compatibilidad con algunos pesticidas (Yii *et al.*, 2016) o su efecto en otras especies cuando se utiliza para el control de termitas (Abonyo *et al.*, 2016).

Conclusiones

El presente trabajo tuvo como objetivo determinar los temas más relevantes con respecto a investigaciones concernientes a *M. anisopliae* durante el período de 1976 a 2018, para lo cual se realizó una revisión bibliométrica del concepto *Metarhizium anisopliae*. Aunado a establecer los países y los institutos más influyentes en el tema. Se realizó el análisis de co-ocurrencia de términos y la discusión sobre los términos más importantes dentro de los artículos más citados. Derivado de este análisis se obtienen algunas conclusiones importantes como es que el tema ha sido relevante para la comunidad científica, con períodos más intensos en la productividad científica que otros (2004-2014). El país con mayor número de publicaciones es Brasil y México ocupa el 8vo lugar a nivel mundial en cuanto al número de publicaciones. La investigación pudo agruparse en aquella dedicada exclusivamente a *M. anisopliae*, aquella donde este hongo se combina con otro (*B. bassiana*) y el uso de *M. anisopliae* para el control de termitas. Finalmente, debe observarse que este tema en particular demuestra el avance de la investigación de ciencia básica a la ciencia aplicada y finalmente al desarrollo de soluciones tecnológicas. Las contribuciones futuras sobre este hongo versarán sobre el descubrimiento de nuevas especies y cepas que tengan potencial comercial con un énfasis en la ingeniería genética y la biotecnología.

Literatura citada

- Abdu-Allah, G. M.; Abou-Ghadir, N. M. F.; Nasser, M. A. K. and Metwaly, M. R. 2015. Comparative efficiency of the fungi, *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae* and the natural product spinosad, using three economic coleopterous stored grain insects. *Int. Med. J.* 25(3):715-720.

- Abonyo, E. A.; Maniania, N. K.; Warui, C. M.; Kokwaro, E. D.; Palmer, T. M.; Doak, D. F. and Brody, A. K. 2016. Effects of entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* on non-target ants associated with *Odontotermes* spp. (Isoptera: Termitidae) termite mounds in Kenya. *Int. J. Trop. Insect. Sci.* 36(3):128-134.
- Acuña-Jiménez, M.; Rosas-García, N. M.; López-Meyer, M.; Saínez-Hernández, J. C.; Mundo-Ocampo, M. and García-Gutiérrez, C. 2015. Pathogenicity of microencapsulated insecticide from *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* against tobacco budworm, *Heliothis virescens* (Fabricius). *Southwest Entomol.* 40(3):531-538.
- Alcalá-Gómez, J.; Cruz-Vázquez, C.; Fernández-Ruvalcaba, M.; Ángel-Sahagún, C.; Vitela-Mendoza, I. and Ramos-Parra, M. 2017. Virulence of *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana* isolates and the effects of fungal infection on the reproduction potential of *Rhipicephalus microplus* engorged females. *Biocontrol Sci. Technol.* 27(8):931-939.
- Alonso-Díaz, M. A.; García, L.; Galindo-Velasco, E.; Lezama-Gutierrez, R.; Angel-Sahagún, C. A.; Rodríguez-Vivas, R. I. and Fragoso-Sánchez, H. 2007. Evaluation of *Metarhizium anisopliae* (Hyphomycetes) for the control of *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) on naturally infested cattle in the Mexican tropics. *Vet. Parasitol.* 147(3-4):336-340.
- Aw, K. M. S. and Hue, S. M. 2017. Mode of infection of metarhizium spp. Fungus and their potential as biological control agents. *J. Fungi.* 3(2).
- Azandémè Hounmalon, G. Y.; Maniania, N. K.; Niassy, S.; Fellous, S.; Kreiter, S.; Delétré, E.; Fiaboe, K. K. M. and Martin, T. 2018. Performance of *Metarhizium anisopliae*-treated foam in combination with *Phytoseiulus longipes* Evans against *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard (Acari: Tetranychidae). *Pest. Manag. Sci.* 74(12):2835-2841.
- Barbosa, T. D. S.; De Andrade, D. J.; Polanczyk, R. A. and Duarte, R. T. 2018. Susceptibility of *Tetranychus ogmophallos* (Acari: Tetranychidae) to *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae*. *Fla Entomol.* 101(2):249-253.
- Bidochka, M. J.; Kamp, A. M.; Lavender, T. M.; Dekoning, J. and De Croos, J. N. A. 2001. Habitat association in two genetic groups of the insect-pathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*: Uncovering cryptic species? *Appl. Environ. Microbiol.* 67(3):1335-1342.
- Bidochka, M. J.; Kasperski, J. E. and Wild, G. A. M. 1998. Occurrence of the entomopathogenic fungi *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana* in soils from temperate and near-northern habitats. *Canadian J. Bot.* 76(7):1198-1204.
- Bischoff, J. F.; Rehner, S. A. and Humber, R. A. 2009. A multilocus phylogeny of the *Metarhizium anisopliae* lineage. *Mycologia.* 101(4):512-530.
- Buti, T. M.; Ibrahim, L.; Ball, B. V. and Clark, S. J. 1994. Pathogenicity of the entomogenous fungi *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana* against crucifer pests and the honey bee. *Bio. Sci. Technol.* 4(2):207-214.
- Camargo, M. G.; Nogueira, M. R. S.; Marciano, A. F.; Perinotto, W. M. S.; Coutinho-Rodrigues, C. J. B.; Scott, F. B.; Angelo, I. C.; Prata, M. C. A. and Bittencourt, V. R. E. P. 2016. *Metarhizium anisopliae* for controlling *Rhipicephalus microplus* ticks under field conditions. *Vet. Parasitol.* 223:38-42.
- Curran, J.; Driver, F.; Ballard, J. W. O. and Milner, R. J. 1994. Phylogeny of *Metarhizium*: analysis of ribosomal DNA sequence data. *Mycol. Res.* 98(5):547-552.
- Charnley, A. K. 1991. Microbial pathogens and insect pest control. *Lett. Appl. Microbiol.* 12(5):149-157.
- de Oliveira, D. G. P.; Alves, L. F. A. and Sosa-Gómez, D. R. 2014. Advances and perspectives of the use of the entomopathogenic fungi *B. bassiana* and *M. anisopliae* for the control of arthropod pests in poultry production. *Rev. Brasileira Cienc. Avícola.* 16(1):1-12.

- de Oliveira, E. S.; Junges, Â.; Sbaraini, N.; Andreis, F. C.; Thompson, C. E.; Staats, C. C. and Schrank, A. 2018. Molecular evolution and transcriptional profile of GH3 and GH20 β -n-acetylglucosaminidases in the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*. Genet. Mol. Biol. 41(4):843-857.
- Fravel, D. R. 2005. Commercialization and implementation of biocontrol. Annu. Rev. Phytopathol. 43:337-359.
- Gao, Q.; Jin, K.; Ying, S. H.; Zhang, Y.; Xiao, G.; Shang, Y.; Duan, Z.; Hu, X.; Xie, X. Q. and Zhou, G. 2011. Genome sequencing and comparative transcriptomics of the model entomopathogenic fungi *Metarhizium anisopliae* and *M. acridum*. PLoS Genet. 7(1).
- Heersmink, R.; van den Hoven, J.; van Eck, N. J. and van Berg, J. d. 2011. Bibliometric mapping of computer and information ethics. Ethics Inf. Technol. 13(3):241-249.
- Hu, G. and St. Leger, R. J. 2002. Field studies using a recombinant mycoinsecticide (*Metarhizium anisopliae*) reveal that it is rhizosphere competent. Appl. Environ. Microbiol. 68(12):6383-6387.
- Hussain, A.; Ahmed, S. and Shahid, M. 2011. Laboratory and field evaluation of *Metarhizium anisopliae* var. *anisopliae* for controlling subterranean termites. Neotrop Entomol. 40(2):244-250.
- Keppanan, R.; Sivaperumal, S.; Ramos Aguila, L. C.; Hussain, M.; Bamisile, B. S.; Dash, C. K. and Wang, L. 2018. Isolation and characterization of *Metarhizium anisopliae* TK29 and its mycoinsecticide effects against subterranean termite *Coptotermes formosanus*. Microb. Pathog. 123:52-59.
- Kershaw, M. J.; Moorhouse, E. R.; Bateman, R.; Reynolds, S. E. and Charnley, A. K. 1999. The Role of destruxins in the pathogenicity of *Metarhizium anisopliae* for three species of insect. J. Invertebr Pathol. 74(3):213-223.
- Khorrami, F.; Mehrkhou, F.; Mahmoudian, M. and Ghosta, Y. 2018. Pathogenicity of three different entomopathogenic fungi, *Metarhizium anisopliae* IRAN 2252, *Nomuraea rileyi* IRAN 1020C and *Paecilomyces tenuipes* IRAN 1026C against the potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* Zeller (Lepidoptera: Gelechiidae). Potato Res. 61(4):297-308.
- Kin, P. K.; Moslim, R.; Azmi, W. A.; Kamarudin, N. and Ali, S. R. A. 2017. Genetic variation of entomopathogenic fungi, *Metarhizium anisopliae* and *Isaria amoenerosea* and their pathogenicity against subterranean termite, *Coptotermes curvignathus*. J. Oil Palm. Res. 29(1):35-46.
- Leger, R. J. S.; Charnley, A. K. and Cooper, R. M. 1987. Characterization of cuticle-degrading proteases produced by the entomopathogen *Metarhizium anisopliae*. Arch. Biochem. Biophys. 253(1):221-232.
- Lezama-Gutiérrez, R.; Molina-Ochoa, J.; Chávez-Flores, O.; Ángel-Sahagún, C. A.; Skoda, S. R.; Reyes-Martínez, G.; Barba-Reynoso, M.; Rebolledo-Domínguez, O.; Ruíz-Aguilar, G. M. L. and Foster, J. E. 2012. Use of the entomopathogenic fungi *Metarhizium anisopliae*, *Cordyceps bassiana* and *Isaria fumosorosea* to control *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) in persian lime under field conditions. Int. J. Trop. Insect. Sci. 32(1):39-44.
- Lobo, L. S.; Rodrigues, J. and Luz, C. 2016. Effectiveness of *Metarhizium anisopliae* formulations against dengue vectors under laboratory and field conditions. Bio. Sci. Technol. 26(3):386-401.
- Meyling, N. V. and Eilenberg, J. 2007. Ecology of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* in temperate agroecosystems: potential for conservation biological control. Biol. Control. 43(2):145-155.

- Mirhaghparast, S. K.; Zibae, A. and Hajizadeh, J. 2013. Effects of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* on cellular immunity and intermediary metabolism of *Spodoptera littoralis* Boisduval (Lepidoptera: Noctuidae). *Invertebrate Survival J.* 10:110-119.
- Oliveira, D. G. P. D.; Lopes, R. B.; Rezende, J. M. and Delalibera, I. 2018. Increased tolerance of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* conidia to high temperature provided by oil-based formulations. *J. Invertebr. Pathol.* 151:151-157.
- Olombrada, M.; Medina, P.; Budia, F.; Gavilanes, J. G.; Martínez-Del-Pozo, A. and García-Ortega, L. 2017. Characterization of a new toxin from the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*: The ribotoxin anisoplin. *Biol. Chem.* 398(1):135-142.
- Petlamul, W. and Prasertsan, P. 2012. Evaluation of strains of *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana* against *Spodoptera litura* on the basis of their virulence, germination rate, conidia production, radial growth and enzyme activity. *Mycobiology.* 40(2):111-116.
- Polanczyk, R. A.; Pratisoli, D.; Dalvi, L. P.; Grecco, E. D. and Franco, C. R. 2010. Effect of *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuillemin and *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorokin on the biological parameters of *Trichogramma atopovirilia* Oatman & Platner (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Cienc. Agrotecnol.* 34(6):1412-1416.
- Rangel, D. E. N.; Anderson, A. J. and Roberts, D. W. 2006. Growth of *Metarhizium anisopliae* on non-preferred carbon sources yields conidia with increased UV-B tolerance. *J. Invertebr. Pathol.* 93(2):127-134.
- Rath, A. C. 2000. The use of entomopathogenic fungi for control of termites. *Biocontrol Sci. Technol.* 10(5):563-581.
- Riaz, A.; Rasib, K. Z. and Raza, S. 2017. Effect of *Metarhizium anisopliae* on different group size of *Coptotermes heimi*. *Annu. Res. Rev. Biol.* 14(1).
- Rivero-Borja, M.; Guzmán-Franco, A. W.; Rodríguez-Leyva, E.; Santillán-Ortega, C. and Pérez-Panduro, A. 2018. Interaction of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* with chlorpyrifos ethyl and spinosad in *Spodoptera frugiperda* larvae. *Pest. Manage. Sci.* 74(9):2047-2052.
- Rosas-García, N. M. and Alba-Moreno, I. M.; Villegas-Mendoza, J. M. y Mireles-Martínez, M. 2018. Biological activity of *Metarhizium anisopliae* strains and essential oils alone and in combination against *Diaphorina citri*. *Southwest Entomol.* 43(3):617-624.
- Rustiguel, C. B.; Fernández-Bravo, M.; Guimarães, L. H. S. and Moraga, E. Q. 2018. Different strategies to kill the host presented by *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana*. *Can. J. Microbiol.* 64(3):191-200.
- Samsuddin, A. S.; Sajap, A. S. and Mohamed, R. 2015. *Metarhizium anisopliae* of peninsular Malaysia origin poses high pathogenicity toward *Coptotermes curvignathus*, a major wood and tree pest. *Malaysian Forester.* 78(1-2):41-48.
- Santos, V.; Mascarin, G. M.; da Silva-Lopes, M.; Alves, M. C. D. F.; Rezende, J. M.; Gatti, M. S. V.; Dunlap, C. A. and Delalibera-Júnior, Í. 2017. Identification of double-stranded RNA viruses in Brazilian strains of *Metarhizium anisopliae* and their effects on fungal biology and virulence. *Plant. Gene.* 11:49-58.
- Shah, F. A.; Wang, C. S. and Butt, T. M. 2005. Nutrition influences growth and virulence of the insect-pathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*. *FEMS Microbiol Lett.* 251(2):259-266.
- Sinia, A. and Guzman-Novoa, E. 2018. Evaluation of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* GHA and *Metarhizium anisopliae* UAMH 9198 alone or in combination with thymol for the control of *Varroa destructor* in honey bee (*Apis mellifera*) colonies. *J. Apic. Res.* 57(2):308-316.

- St Leger, R. J.; Nelson, J. O. and Screen, S. E. 1999. The entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* alters ambient pH, allowing extracellular protease production and activity. *Microbiology*. 145(10):2691-2699.
- St. Leger, R. J.; Frank, D. C.; Roberts, D. W. and Staples, R. C. 1992. Molecular cloning and regulatory analysis of the cuticle-degrading-protease structural gene from the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*. *Eur. J. Biochem.* 204(3):991-1001.
- van Eck, N. J. and Waltman, L. 2010. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*. 84(2):523-538.
- Verma, M.; Sharma, S. and Prasad, R. 2009. Biological alternatives for termite control: a review. *Int Biodeterior Biodegrad.* 63(8):959-972.
- Villamil, C. J. and Martínez, O. J. and Pinzón, E. 2016. Actividad biológica de hongos entomopatógenos sobre *Premnotrypes vorax* Hustache (Coleoptera: Curculionidae). *Rev. Cienc. Agríc.* 33(1):34-42.
- Wang, C.; Hu, G. and St. Leger, R. J. 2005. Differential gene expression by *Metarhizium anisopliae* growing in root exudate and host (*Manduca sexta*) cuticle or hemolymph reveals mechanisms of physiological adaptation. *Fungal. Genet. Biol.* 42(8):704-718.
- Wang, C. and Powell, J. E. 2004. Cellulose bait improves the effectiveness of *Metarhizium anisopliae* as a microbial control of termites (Isoptera: Rhinotermitidae). *Biol Control.* 30(2):523-529.
- Wang, C. and St. Leger, R. J. 2006. A collagenous protective coat enables *Metarhizium anisopliae* to evade insect immune responses. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 103(17):6647-6652.
- Wright, M. S.; Raina, A. K. and Lax, A. R. 2005. A strain of the fungus *Metarhizium anisopliae* for controlling subterranean termites. *J. Econ. Entomol.* 98(5):1451-1458.
- Yii, J. E.; Bong, C. F. J.; King, J. H. P. and Kadir, J. 2016. Synergism of entomopathogenic fungus, *Metarhizium anisopliae* incorporated with fipronil against oil palm pest subterranean termite, *Coptotermes curvignathus*. *Plant. Protect. Sci.* 52(1):35-44.
- Zeng, G.; Zhang, P.; Zhang, Q.; Zhao, H.; Li, Z.; Zhang, X.; Wang, C.; Yin, W. B. and Fang, W. 2018. Duplication of a Pks gene cluster and subsequent functional diversification facilitate environmental adaptation in *Metarhizium* species. *PLoS Genet.* 14(6).
- Zhang, X. C.; Li, X. X.; Gong, Y. W.; Li, Y. R.; Zhang, K. L.; Huang, Y. H. and Zhang, F. 2018. Isolation, identification, and virulence of a new *Metarhizium anisopliae* strain on the German Cockroach. *J. Econ. Entomol.* 111(6):2611-2616.
- Zimmermann, G. 2007. Review on safety of the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*. *Biocontrol Sci. Technol.* 17(9):879-920.