SITUACIÓN ACTUAL DE LA MANCHA FOLIAR DEL TRIGO CAUSADA POR *Zymoseptoria tritici* EN MÉXICO

CURRENT STATUS OF THE SEPTORIA TRITICI BLOTCH OF WHEAT CAUSED BY *Zymoseptoria tritici* IN MEXICO

Mariel del Rosario Sánchez-Vidaña[1], Ana María Hernández-Anguiano[1]*, María de Jesús Yáñez-Morales[1], Xinyao He[2] y Pawan Kumar-Singh[2]

[1]Colegio de Postgraduados, *Campus* Montecillo, Posgrado de Fitosanidad, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. [2] Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, El Batán, Texcoco, Estado de México, México.

**Autora de correspondencia* (ahernandez@colpos.mx)

RESUMEN

La mancha foliar causada por *Zymoseptoria tritici* es una enfermedad que ocasiona pérdidas económicas importantes en las zonas trigueras del mundo. Cambios en las prácticas culturales como la labranza mínima, aunadas al uso irracional de fungicidas y a la gran plasticidad genética y capacidad reproductiva del hongo son responsables, en parte, del desarrollo de nuevas epifitias por esta enfermedad. Para su manejo se requiere de la implementación de diversas estrategias, como la rotación de cultivos y la remoción de residuos de cosecha; sin embargo, el uso de variedades resistentes es clave para incrementar la productividad del trigo (*Triticum aestivum* L.). México cuenta con algunas variedades comerciales de trigo harinero moderadamente resistentes. El objetivo de esta revisión fue conocer la situación actual de la mancha foliar, para identificar líneas futuras de investigación que coadyuven al manejo de la enfermedad en el país.

Palabras clave: *Triticum aestivum* L., manejo de la enfermedad, septoriosis, tizón foliar.

SUMMARY

Septoria tritici blotch, caused by *Zymoseptoria tritici*, is a disease that bring about important economic losses where wheat is grown around the world. Changes in cultural practices, such as minimum tillage, the irrational use of fungicides and the great genetic plasticity and reproductive capacity of the fungus are responsible, in part, for the development of new epiphytotics caused by this disease. Implementation of diverse strategies, such as crop rotation and crop debris removal are required for its management; however, the use of resistant varieties is the key to increase wheat productivity. Mexico has some commercial bread wheat varieties, which are moderately resistant to Septoria tritici blotch. The aim of this review was to discuss about the current status of Septoria tritici blotch in Mexico, to identify lines of research that will contribute to the management of the disease in the country.

Index words: *Triticum aestivum* L., disease control, Septoria tritici blotch, Leaf blotch.

INTRODUCCIÓN

En México, el trigo se encuentra entre los cultivos básicos que forman parte de la dieta alimentaria. En 2019 la producción nacional estimada fue de 3.2 millones de toneladas obtenidas en una superficie sembrada de 598,233 ha. Destacan los estados de Baja California, Guanajuato, Michoacán, Sinaloa y Sonora como los de mayor producción en condiciones de riego (ciclo otoño-invierno) y Guanajuato, Estado de México, Oaxaca, Puebla y Tlaxcala en condiciones de temporal (ciclo primavera-verano) (SIAP, 2019). Del total de la producción, 40 % corresponde a trigo harinero (*Triticum aestivum*) y 60 % a trigo cristalino (*T. durum*). Sin embargo, en las últimas décadas la superficie sembrada se ha reducido en más de 50 %, generando un déficit de trigo harinero y la importación del 75 % del volumen requerido para satisfacer la demanda nacional, estimada entre 6 y 7 millones de toneladas (SAGARPA, 2017).

Aunado a lo anterior, diferentes enfermedades amenazan la producción de trigo, entre las que destaca la mancha foliar del trigo (septoriosis o tizón foliar) por *Zymoseptoria tritici* (Mirdita *et al*., 2015), la cual puede ser devastadora en las regiones productoras de este cultivo (Villaseñor-Mir *et al*., 2018). En la Figura 1 se ilustran las regiones productoras de trigo y la distribución de la mancha foliar en México. En trigo de temporal se han registrado pérdidas de 7 a 30 % cuando las condiciones son favorables para el desarrollo de la enfermedad. El clima templado subhúmedo (precipitación de 650 mm y temperatura de 14 a 22 °C) favorece el desarrollo de infecciones naturales en la región productora del bajío (Guanajuato, Jalisco y Michoacán) y en los valles altos de México (Hidalgo, Estado de México y Tlaxcala) (Santa-Rosa *et al*., 2016; Villaseñor-Mir *et al*., 2018). Sin embargo, la mancha foliar también se ha presentado en zonas con clima semiseco semicálido y cálido subhúmedo del país (Santa-Rosa *et al*., 2016), lo que alerta sobre la adaptación biológica de *Z. tritici* a diferentes ambientes y del riesgo potencial que representa la enfermedad en esas regiones, donde es común la producción del trigo en monocultivo.

Recibido: 6 de Marzo de 2020
Aceptado: 17 de Mato de 2020

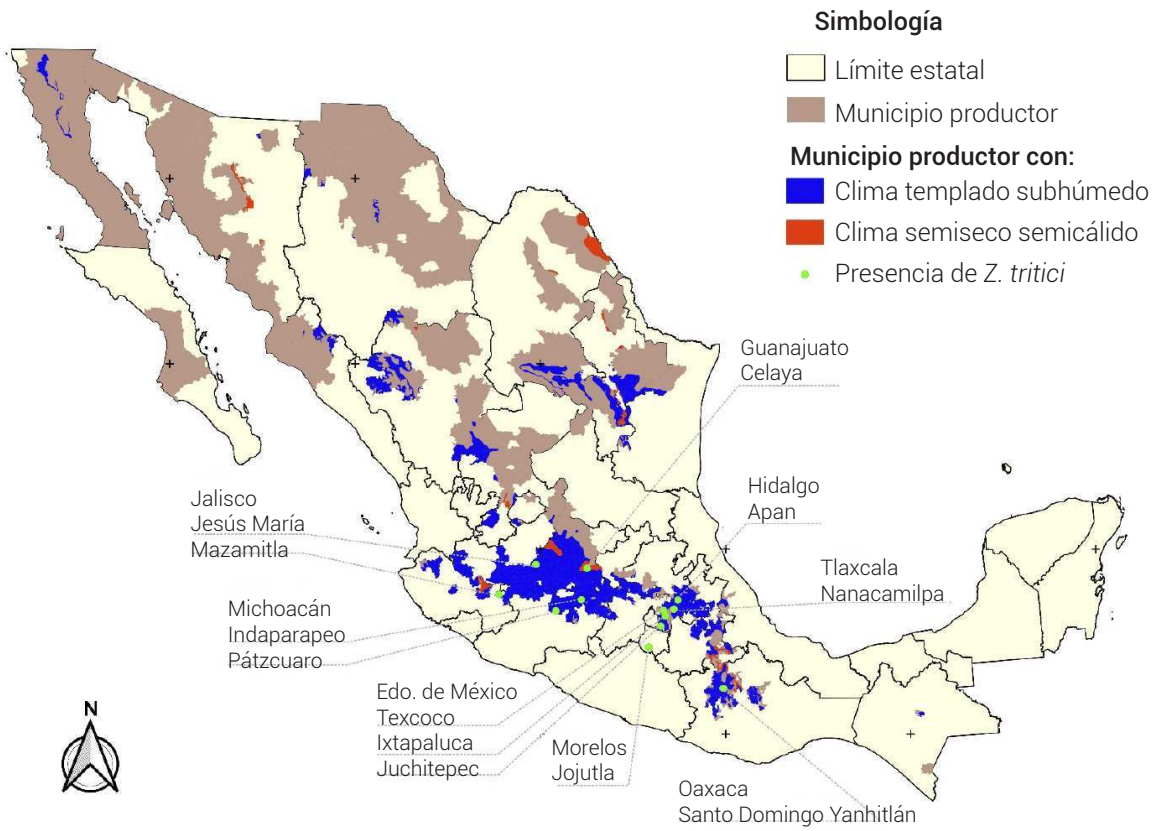


Figura 1. Mapa de las regiones productoras de trigo y distribución de *Zymoseptoria tritici* en México (INEGI, 2008; INEGI, 2018).

Aspersiones foliares de fungicidas, aunque efectivas, no han prevenido por completo el desarrollo de la mancha foliar; esto en parte, debido a la variabilidad genética de *Z. tritici* y a su capacidad de adaptación biológica a la presión selectiva de fungicidas (Heick *et al*., 2017b). Esto ha motivado la búsqueda de diversas fuentes genéticas para el desarrollo de variedades resistentes a la enfermedad, a través de proyectos de colaboración entre el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), la Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), el Colegio de Postgraduados y la Universidad Autónoma Chapingo (UACh) (Piñera-Chavez *et al*., 2017), entre otras instituciones de investigación agrícola nacional. Por lo anterior, el objetivo de esta revisión es conocer la situación actual de la mancha foliar, para identificar líneas futuras de investigación que coadyuven al manejo de la enfermedad, de acuerdo con la condición que presenta en México.

SÍNTOMAS DE LA ENFERMEDAD

La mancha foliar afecta principalmente las hojas inferiores de las plantas sobre las cuales aparecen pequeñas lesiones cloróticas que se expanden formando lesiones irregulares a lo largo de las nervaduras. Con el tiempo, estas lesiones se transforman en manchas necróticas estrechas y alargadas. Si la humedad relativa (HR) es mayor a 50 %, la temperatura es de 10 a 20 °C y sin manejo de la enfermedad, el hongo puede atacar la hoja bandera y las glumas de la espiga afectando el llenado de grano (Castro *et al*., 2015; Simón *et al*., 2005). Las glumas infectadas desarrollan manchas café obscuro a púrpura y los granos se arrugan. Al final del ciclo de cultivo, en las manchas necróticas de las hojas se desarrollan estructuras de reproducción que se diferencian solo por la morfología de las esporas contenidas en ellas y la ausencia (picnidios) o presencia (seudotecios) de ascas bitunicadas (Keon *et al*., 2007; Ponomarenko *et al*., 2011) (Figura 2).

AGENTE CAUSAL Y EPIDEMIOLOGÍA DE LA ENFERMEDAD

El hongo *Z. tritici* presenta crecimiento biotrófico durante los primeros días después de la infección (de 2 a 12 días) y crecimiento necrotrófico conforme avanza la infección (Ponomarenko *et al*., 2011). Al inicio, las hifas crecen en la superficie de la hoja, penetran a través de estomas

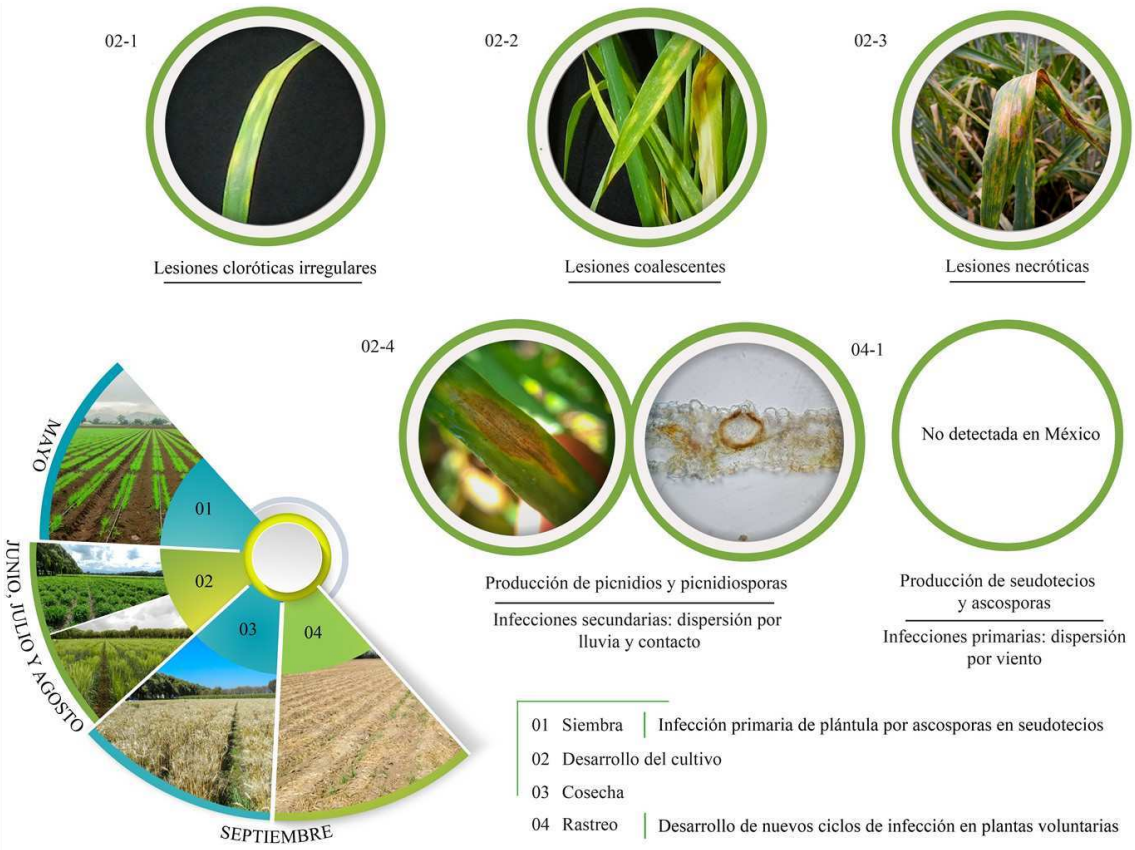


Figura 2. Ciclo primavera-verano del cultivo de trigo y ciclo de la mancha foliar, en Toluca, México. De 02-1 a 02-3, desarrollo de síntomas en hoja. Producción de estructuras: 02-4 fase asexual y 04-1 fase sexual de *Zymoseptoria tritici*.

y colonizan el mesófilo alimentándose del tejido vía apoplasto; posteriormente se manifiestan los síntomas de la enfermedad y las estructuras de reproducción del hongo se desarrollan en el tejido necrótico de la hoja, para dar lugar al desarrollo de nuevos ciclos de infección (Keon *et al*., 2007; Rudd *et al*., 2015).

En campo, los hospedantes secundarios (pastos), plantas voluntarias (trigo que sobrevive entre períodos de cultivo), residuos de cosecha y rastrojo de trigo infectado son fuente importante de inóculo primario entre cada ciclo de cultivo (Fones y Gurr, 2015). Se considera que la semilla tiene poca importancia en la transmisión de la mancha foliar debido a que el aislamiento del hongo presenta baja frecuencia en ésta (Suffert *et al*., 2011). Durante el proceso epidemiológico de la enfermedad, las ascosporas producidas en seudotecios ocasionan las infecciones primarias en el trigo recién sembrado y los conidios generados en los picnidios provocan las infecciones secundarias en el dosel de la planta.

Zymoseptoria tritici produce macroconidios de cuatro a ocho células alargadas y microconidios de una célula, desarrolladas lateralmente por gemación en hifas o en los macroconidios (Rudd *et al*., 2015). La viabilidad y la capacidad de germinación de estos conidios están limitadas por la HR y la temperatura. En residuos de cosecha, la viabilidad de las esporas es por 150 (Wenham, 1959) ó 50 días a 35 y 55 % de HR, respectivamente. En hojas infectadas naturalmente y conservadas entre 5 y 15 °C la capacidad de germinación de las esporas es de 60 días, pero ésta se pierde entre 15 y 30 °C (Hilu y Bevee, 1957). Lo anterior es relevante para el manejo de la enfermedad en campo y para el uso de material vegetal infectado como fuente de inóculo.

Otros factores, como la labranza reducida (agricultura de conservación), el establecimiento de monocultivos y la producción comercial con variedades susceptibles, también constituyen un riesgo para un posible desarrollo de epidemias por la mancha foliar (Bankina *et al*., 2018). La agricultura de conservación se ha implementado en el cultivo de trigo para facilitar el reciclaje de fosfato, contribuir al uso eficiente de nitrógeno y mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Busari *et al*., 2015). Sin embargo, el rastrojo y los residuos de cosecha

constituyen una fuente considerable de inóculo para el siguiente ciclo de cultivo, esto en condiciones favorables y si el inoculo primario está presente (Mcdonald y Mundt, 2016).

MANEJO DE LA ENFERMEDAD

Entre las estrategias de manejo de la mancha foliar en trigo se encuentran las prácticas culturales, la aplicación de aspersiones foliares de fungicidas, el control biológico con especies de *Trichoderma* y *Bacillus*, así como el uso de variedades resistentes.

Prácticas culturales. En condiciones favorables para el desarrollo de la enfermedad, la rotación de cultivos (de 3 a 5 años) (Eyal *et al*., 1987) con soya (*Glycine max* L. Merr) (Krupinsky, 1999), colza (*Brassica napus* L.), canola (*Brassica napus* var. *napus*), chícharo (*Pisum sativum* L.) (Bailey *et al*., 2001) y lino (*Linum usitatissimum* L.) ha sido eficaz para disminuir su incidencia (Suffert *et al*., 2011). En sistemas convencionales, la destrucción y eliminación de plantas voluntarias, de paja y rastrojo infestado por incineración o enterramiento (a 22 ó 23 cm de profundidad) han reducido la severidad de la enfermedad en condiciones semiáridas (Bankina *et al*., 2015; Suffert *et al*., 2011). Mientras que, en sistemas de agricultura de conservación, la siembra de cultivos de cobertera con trébol (*Trifolium* spp.) y chícharo ha contribuido a reducir la dispersión del inóculo primario *in situ*, al funcionar como trampas de esporas producidas en el rastrojo infestado (Mcdonald y Mundt, 2016). Otras prácticas con relativa efectividad son la siembra tardía, la aplicación limitada de nitrógeno y el uso de mezclas de variedades de trigo (Berraies *et al*., 2013).

Control químico. La aplicación foliar de fungicidas preventivos (mancozeb) y con modo de acción específicos (benomil, propiconazol, tebuconazol y triadimefon) han reducido la severidad de la mancha foliar y la producción de esporas en el tejido vegetal, así como el efecto negativo de la enfermedad en el rendimiento de variedades susceptibles, en condiciones de alta presión de inóculo (Heick *et al*., 2017a). En las siembras de temporal en los valles altos de México es común la aplicación foliar con Folicur® (tebuconazol, 0.5 L ha^{-1}) o de Sportak® (procloraz, 1 L ha^{-1}) durante la floración, para prevenir y controlar la enfermedad e incrementar la productividad de grano en las variedades tolerantes Gema C2004, Juchi F2000 y Tlaxcala F2000 (Santa-Rosa *et al*., 2016; Villaseñor-Mir *et al*., 2012). Pero los altos costos de las aplicaciones, aunado al potencial de desarrollo de resistencia de *Z. tritici,* por el uso irracional de fungicidas en campo, han limitado su implementación en el manejo de la enfermedad (Estep *et al*., 2015). Solamente en el año 2015 en Europa se destinó el 70 % de los recursos [€1 x 10^{12} ($17.6 x 10^{12})] para el control químico de la mancha foliar del trigo (Torriani *et al*., 2015).

Control biológico. En sistemas de agricultura de conservación, la aplicación de agentes de control biológico o sus productos (biofungicidas), en el cultivo o rastrojo, ha sido efectiva en el control de la mancha foliar. La aplicación de la cepa MKB135 de *Bacillus megaterium* redujo hasta 80 % la severidad de la enfermedad en plántula y planta adulta (Kildea *et al*., 2008). Efecto similar se ha registrado con la aplicación foliar y el tratamiento a la semilla con *Trichoderma harzianum* y *T. koningii,* con reducción de 40 y 70 % de la incidencia y severidad, respectivamente (Perelló *et al*., 2009). Los polipéptidos micosubtilina, surfactina y fengicina, producidos por *B. subtilis*, han mostrado potencial para controlar a *Z. tritici*, debido a que activan mecanismos de defensa de la planta (Mejri *et al*., 2017). Con la aplicación de agentes biológicos o biofungicidas se pretende proteger tanto al cultivo como al ambiente, al reducir los niveles de residuos de los fungicidas aplicados.

Control genético. Los métodos anteriores por sí solos no previenen por completo el desarrollo de epidemias por *Z. tritici*, lo que ha motivado la búsqueda de fuentes genéticas de resistencia a la mancha foliar. En trigo se pueden encontrar dos tipos de resistencia: la monogénica (raza específica, vertical o cualitativa) y la poligénica (raza no específica, horizontal, cuantitativa o parcial) (Dreisigacker *et al*., 2015). Sin embargo, se ha observado que la resistencia cualitativa a *Z. tritici* es débil, compleja, de protección limitada e influenciada por el ambiente en etapas tempranas de la infección (Orton *et al*., 2017). En la última década se identificaron y caracterizaron 22 genes de resistencia *Stb* en diversas variedades y líneas de trigo resistentes, pero con efectividad contra pocos aislados virulentos del hongo (Brown *et al*., 2015). Solo los genes *Stb6* y *Stb19* controlan a los aislados más virulentos: al aislado holandés IPO323 y a los aislados australianos WAI332, WAI251 y WAI161 de *Z. tritici*, respectivamente (Kema *et al*., 2018; Yang *et al*., 2018). En contraste, la resistencia cuantitativa brinda mayor protección al cultivo al estar controlada por varios genes o *loci* de rasgo cuantitativo (QTL, por sus siglas en inglés) distribuidos en el genoma de la planta. Aunque estos genes o *loci* tienen poco efecto individual, su acción génica combinada es dominante, parcialmente dominante, epistática, recesiva, aditiva y no aditiva (Chartrain *et al*., 2009). Actualmente se han detectado 167 QTL en 19 poblaciones de mapeo biparentales y siete polimorfismos de un solo nucléotido (SNP, por sus siglas en inglés) en más de 500 variedades de trigo de primavera, los cuales contienen regiones genómicas que controlan la necrosis, el desarrollo de picnidios y el

progreso de la enfermedad (Brown *et al*., 2015).

En México, instituciones nacionales de investigación agrícola como el Colegio de Postgraduados, INIFAP, SADER y la UACh, entre otras, en colaboración con el CIMMYT, han establecido proyectos para desarrollar variedades de trigo con resistencia a diversas enfermedades bióticas. Durante las últimas tres décadas, estas instituciones han liberado más de 10 variedades comerciales de trigo harinero para siembra de temporal con resistencia a la mancha foliar por *Z. tritici*, además a roya de la hoja (*Puccinia triticina* f. sp. *tritici*), roya amarilla (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*), roya del tallo (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*) y roña de la espiga (*Fusarium graminearum*). Estas variedades, entre las que destacan Rebeca F2000 y Valles F2015 por su nivel de resistencia moderada a la mancha foliar (Cuadro 1), contienen genes *Yr* y *Lr* que confieren resistencia para roya amarilla y de la hoja, respectivamente, así como genes menores para tolerancia a *Z. tritici*. Se tiene la hipótesis de que esos genes menores pudieran estar asociados, ligados o cercanos a las regiones genómicas donde se encuentran los genes *Stb* o QTL. Se estima que el 45 % de las líneas resistentes o tolerantes a *Z. tritici* contienen el gen *Yr18* y el 27 % los genes *Yr30* y *Lr34* (Cuadro 1).

Actualmente, el CIMMYT cuenta con un total de 1,092 líneas avanzadas que presentan buena resistencia, no solamente a las royas y roña mencionadas, sino también a la mancha foliar por *Z. tritici*. Por sus características de calidad de grano, estas líneas tienen alta posibilidad de ser liberadas después de un período de entre seis y ocho años de investigación. Para esto se requerirá la colaboración de las instituciones nacionales de investigación agrícola, así como la de productores de semilla y productores cooperantes (Piñera-Chavez *et al*., 2017). Con el uso de variedades resistentes se incrementa la productividad del trigo al reducir el inóculo secundario, retrasar la infección primaria y limitar la reproducción sexual del hongo (Arraiano *et al*., 2009; Berraies *et al*., 2014).

Cuadro 1. Nivel de resistencia a *Zymoseptoria tritici* en variedades de trigo reportadas para regiones de temporal en México.

Resistencia / Variedad	Altura (cm) / madurez (días)	Genes que controlan resistencia	Referencia
Moderadamente resistente			
Rebeca F2000	97, tardía (153)	*Yr18*† y tres genes menores de efecto aditivo para tolerancia a *Septoria* sp.	Rodríguez-Contreras *et al*., 2010 Santa-Rosa *et al*., 2016
Valles F2015	Porte alto, tardía (114)	*Yr18*, *Yr29*, *Yr30*, *Lr*††*10*, *Lr17*, *Lr23* y genes complementarios *Lr27+Lr31*	Villaseñor *et al*., 2018
Moderadamente susceptible			
Altiplano F2007	90, tardía (153)	*Yr29*, *Yr30* y *Lr46*	Villaseñor *et al*., 2018
Batán F96	89, tardía (122)	dnr¶	Rodríguez-Contreras *et al*., 2010
Juchi F2000	93, tardía (127)	*Yr18*, *Lr34* y tres genes menores de efecto aditivo para tolerancia mayor a *Septoria* sp.	Santa-Rosa *et al*., 2016
Nana F2007	84, precoz (85)	*Yr18*, *Yr30*, *Lr34* y un gen de efecto aditivo	Villaseñor *et al*., 2018
Romoga F96	86, tardía (123)	dnr	Rodríguez-Contreras *et al*., 2008
Temporalera M87	103, tardía (127)	dnr	Rodríguez-Contreras *et al*., 2008
Náhuatl	95, tardía (122)	dnr	Villaseñor *et al*., 2018
Tlaxcala F2000	89, tardía (124)	*Yr18*, *Lr34* y tres genes menores de efecto aditivo para tolerancia a *Septoria* sp.	Villaseñor *et al*., 2018 Santa-Rosa *et al*., 2016

†gen de resistencia a roya amarilla; ††gen de resistencia a roya de la hoja; ¶dato no reportado.

FACTORES QUE DETERMINAN LA RESISTENCIA

El estado fenológico y los genes que determinan altura de planta, precocidad (días a espigamiento) y fotoperiodo, se han asociado con los genes que confieren resistencia a la mancha foliar en trigo.

Se ha observado que las plántulas expresan mayor resistencia a la enfermedad que las plantas adultas. Si bien, la resistencia en ambos casos está controlada por regiones genómicas similares, en plántula se expresa mayormente la resistencia cualitativa y en planta adulta la cuantitativa (Gerard *et al*., 2017).

En general, en las plantas de genotipos altos (119 cm de altura promedio) se presenta menor severidad de la enfermedad que en las de genotipos bajos (64 cm de altura promedio); es decir, a mayor altura de planta menor desarrollo de necrosis (Gerard *et al*., 2017; Kollers *et al*., 2013).

Variedades con floración tardía (aproximadamente 126 días a espigamiento) desarrollan menor severidad de la enfermedad (Arraiano *et al*., 2009; Kollers *et al*., 2013). En algunos genotipos, las regiones genómicas asociadas con resistencia a *Z. tritici* se encuentran en posiciones similares a la de marcadores relacionados con días a espigamiento (Gerard *et al*., 2017); sin embargo, ambas líneas, tardías y precoces, resisten la enfermedad, lo que se atribuye a un fenómeno de escape. En la práctica, las líneas tardías no se seleccionan, ya que el establecimiento de un cultivo de ciclo largo afectaría la siembra oportuna del próximo, en zonas con problema de helada o de calor (Arraiano y Brown, 2017).

Se ha observado también que la dirección y la calidad de la luz afectan el desarrollo de síntomas durante el proceso de infección por *Z. tritici*. En plantas crecidas bajo sombra se desarrollaron síntomas de la enfermedad entre los 7 y 13 días después de la inoculación y las mantenidas bajo iluminación entre los 13 y 17 días (Keon *et al*., 2007).

Adicional a los factores anteriores, es importante considerar que *Z. tritici* es un hongo que desarrolla poblaciones con gran diversidad genética (Berraies *et al*., 2013) y plasticidad evolutiva en su genoma, lo que le permite superar condiciones adversas durante el desarrollo del cultivo (Goodwin *et al*., 2011). La alta capacidad del hongo de producir esporas (300 conidios por picniodio y 200 ascosporas por seudotecio) favorece la aparición de nuevas cepas con potencial de especialización fisiológica y la pérdida de resistencia de las variedades de trigo (Fones y Gurr, 2015; Orton *et al*., 2017).

CONCLUSIONES

Cambios en las prácticas culturales como la labranza mínima, aunadas al uso irracional de fungicidas y a la gran plasticidad genética y capacidad reproductiva de *Z. tritici* son responsables, en parte, del desarrollo de epidemias por la mancha foliar. Para el manejo de esta enfermedad se requiere de la implementación de diversas estrategias, entre las que se encuentran la rotación de cultivos, la remoción de residuos de cosecha y el uso de variedades resistentes, para hacer frente a los cambios rápidos en la conformación genética del hongo. México cuenta con algunas variedades comerciales de trigo harinero con resistencia moderada a la mancha foliar, pero se requieren nuevas variedades de trigo con mayor resistencia a esta enfermedad como parte de la estrategia para cubrir la demanda nacional de trigo harinero.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT, por la beca 1166041 otorgada para los estudios de doctorado de la primera autora. A Diana Lorena Sánchez Vidaña, por el apoyo para la elaboración del mapa de distribución. A Jesús Ignacio Sánchez Reyes, por proporcionar una fotografía para la elaboración del ciclo biológico del agente causal de la mancha foliar.

BIBLIOGRAFIA

Arraiano L. S. and J. K. M. Brown (2017) Sources of resistance and susceptibility to Septoria tritici blotch of wheat. *Molecular Plant Pathology* 8:276-292, https://doi.org/10.1111/mpp.12482

Arraiano L. S., N. Balaam, P. M. Fenwick, C. Chapman, D. Feuerhelm, P. Howell, ...and J. K. M. Brown (2009) Contributions of disease resistance and escape to the control of Septoria tritici blotch of wheat. *Plant Pathology* 58:910-922, https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02118.x

Bailey K. L., B. D. Gossen, G. P. Lafond, P. R. Watson and D. A. Derksen (2001) Effect of tillage and crop rotation on root and foliar diseases of wheat and pea in Saskatchewan from 1991 to 1998: Univariate and multivariate analyses. *Canadian Journal of Plant Science* 81:789-803, https://doi.org/10.4141/P00-152

Bankina B., A. Ruža, L. Paura and I. Priekule (2015) The effects of soil tillage and crop rotation on the development of winter wheat leaf diseases. *Zemdirbyste-Agriculture* 102:67-72, https://doi.org/10.13080/z-a.2015.102.008

Bankina B., G. Bimšteine, I. Arhipova, J. Kaņeps and T. Stanka (2018) Importance of agronomic practice on the control of wheat leaf diseases. *Agriculture* 8:56, https://doi.org/10.3390/agriculture8040056

Berraies S., K. Ammar, M. S. Gharbi, A. Yahyaoui and S. Rezgui (2014) Quantitative inheritance of resistance to Septoria tritici blotch in durum wheat in Tunisia. *Chilean Journal of Agricultural Research* 74:35-40, https://doi.org/10.4067/S0718-58392014000100006

Berraies S., M. S. Gharbi, F. Belzile, A. Yahyaoui, M. R. Hajlaoui, M. Trifi, ... and S. Rezgui (2013) High genetic diversity of *Mycospaherella graminicola* (*Zymoseptoria tritici*) from a single wheat field in Tunisia as revealed by SSR markers. *African Journal of Biotechnology* 12:1344-1349, https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/128419/117967

Brown J. K. M., L. Chartrain, P. Lasserre-Zuber and C. Saintenac (2015) Genetics of resistance to *Zymoseptoria tritici* and applications to wheat breeding. *Fungal Genetics and Biology* 79:33-41, https://doi.org/10.1016/j.fgb.2015.04.017

Busari M. A., S. S. Kukal, A. Kaur, R. Bhatt and A. A. Dulazi (2015) Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment.

International Soil and Water Conservation Research 3:119-129, https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002

Castro A. C., S. I. Golik y M. R. Simón (2015) Efecto de la mancha de la hoja sobre la duración del área foliar verde, dinámica del N, rendimiento y calidad de trigo. *FAVE - Sección Ciencias Agrarias* 14:1-16, http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1666-77192015000200004

Chartrain L., P. Sourdille, M. Bernard and J. K. M. Brown (2009) Identification and location of *Stb9*, a gene for resistance to Septoria tritici blotch in wheat cultivars Courtot and Tonic. *Plant Pathology* 58:547-555, https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2008.02013.x

Dreisigacker S., X. Wang, C. B. A. Martinez, R. Jing and P. K. Singh (2015) Adult-plant resistance to Septoria tritici blotch in hexaploid spring wheat. *Theoretical and Applied Genetics* 128:2317-2329, https://doi.org/10.1007/s00122-015-2587-9

Estep L. K., S. F. F. Torriani, M. Zala, N. P. Anderson, M. D. Flowers, B. A. Mcdonald, … and P. C. Brunner (2015) Emergence and early evolution of fungicide resistance in North American populations of *Zymoseptoria tritici*. *Plant Pathology* 64:961-971, https://doi.org/10.1111/ppa.12314

Eyal Z., A. L. Scharen, J. M. Prescott and van M. Ginkel (1987) The Septoria Diseases of Wheat: Concepts and Methods of Disease Management. CIMMYT. México, D.F. 46 p.

Fones H. and S. Gurr (2015) The impact of Septoria tritici blotch disease on wheat: an EU perspective. *Fungal Genetics and Biology* 79:3-7, https://doi.org/10.1016/j.fgb.2015.04.004

Gerard G. S., A. Börner, U. Lohwasser and M. R. Simón (2017) Genome-wide association mapping of genetic factors controlling Septoria tritici blotch resistance and their associations with plant height and heading date in wheat. *Euphytica* 213:27, https://doi.org/10.1007/s10681-016-1820-1

Goodwin S. B., S. Ben M'Barek, B. Dhillon, A. H. J. Wittenberg, C. F. Crane, J. K. Hane,… and G. H. J. Kema (2011) Finished genome of the fungal wheat pathogen *Mycosphaerella graminicola* reveals dispensome structure, chromosome plasticity, and stealth pathogenesis. *PLoS Genetics* 7:e1002070, https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1002070

Heick T. M., A. F. Justesen and L. N. Jørgensen (2017a) Anti-resistance strategies for fungicides against wheat pathogen *Zymoseptoria tritici* with focus on DMI fungicides. *Crop Protection* 99:108-117, https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.05.009

Heick T. M., A. F. Justesen and L. N. Jørgensen (2017b) Resistance of wheat pathogen *Zymoseptoria tritici* to DMI and QoI fungicides in the Nordic-Baltic region - a status. *European Journal of Plant Pathology* 149: 669-682, https://doi.org/10.1007/s10658-017-1224-7

Hilu H. M. and W. M. Bevee (1957) Inoculation, oversummering and suscept pathogen relationship of *Septoria tritici* on *Triticum* species. *Phytopathology* 47:474-480, https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19581100103

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2008) Conjunto de datos vectoriales escala 1:1000000. Unidades Climáticas. Estados Unidos Mexicanos. http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/climatologia/ (febrero 2019).

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2018) Marco geoestadístico. Estados Unidos Mexicanos. https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/mg/ (febrero 2019).

Kema G. H. J., A. M. Gohari, L. Aouini, H. A. Y. Gibriel, S. B. Ware, F. van den Bosch,… and K. Kanyuka (2018) Stress and sexual reproduction affect the dynamics of the wheat pathogen effector *AvrStb6* and strobilurin resistance. *Nature Genetics* 50:375-380, https://doi.org/10.1038/s41588-018-0052-9

Keon J., J. Antoniw, R. Carzaniga, S. Deller, J. L. Ward, J. M. Baker, … and J. J. Rudd (2007) Transcriptional adaptation of *Mycosphaerella graminicola* to programmed cell death (PCD) of its susceptible wheat host. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 20:178-193, https://doi.org/10.1094/MPMI-20-2-0178

Kildea S., V. Ransbotyn, M. R. Khan, B. Fagan, G. Leonard, E. Mullins and F. M. Doohan (2008) *Bacillus megaterium* shows potential for the biocontrol of Septoria tritici blotch of wheat. *Biological Control* 47:37-45, https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.07.001

Kollers S., B. Rodemann, J. Ling, V. Korzun, E. Ebmeyer, O. Argillier, … and M. S. Röder (2013) Genetic architecture of resistance to Septoria tritici blotch (*Mycosphaerella graminicola*) in European winter wheat. *Molecular Breeding* 32:411-423, https://doi.org/10.1007/s11032-013-9880-6

Krupinsky J. M. (1999) Influence of cultural practices on *Septoria/Stagonospora* diseases. *In*: *Septoria* and *Stagonospora* Diseases of Cereals: A Compilation of Global Research. M. van Ginkel and J. Krupinsky (eds.). CIMMYT. Mexico, D.F. pp:105-110.

Mcdonald B. A. and C. C. Mundt (2016) How knowledge of pathogen population biology informs management of Septoria tritici blotch. *Phytopathology* 106:948-9, https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-16-0131-RVW

Mejri S., A. Siah, F. Coutte, M. Magnin-Robert, B. Randoux, B. Tisserant, …and P. Halama (2017) Biocontrol of the wheat pathogen *Zymoseptoria tritici* using cyclic lipopeptides from *Bacillus subtilis*. *Environmental Science and Pollution Research* 25:29822-29833, https://doi.org/10.1007/s11356-017-9241-9

Mirdita V., G. Liu, Y. Zhao, T. Miedaner, C. F. H. Longin, M. Gowda, … and J. C. Reif (2015) Genetic architecture is more complex for resistance to Septoria tritici blotch than to Fusarium head blight in Central European winter wheat. *BMCGenomics* 16:430, https://doi.org/10.1186/s12864-015-1628-8

Orton E. S., J. J. Rudd and J. K. M. Brown (2017) Early molecular signatures of responses of wheat to *Zymoseptoria tritici* in compatible and incompatible interactions. *Plant Pathology* 66:450-459, https://doi.org/10.1111/ppa.12633

Perelló A. E., M. V. Moreno, C. Mónaco, M. R. Simón and C. Cordo (2009) Biological control of Septoria tritici blotch on wheat by *Trichoderma* spp. under field conditions in Argentina. *BioControl* 54:113-122, https://doi.org/10.1007/s10526-008-9159-8

Piñera-Chavez F. J., E. Autrique, J. L. Valenzuela-Antelo, P. K. Singh, C. Guzman, X. He, …and R. P. Singh (2017) Strategic research for developing improved wheat germplasm for Mexico. *In*: Proceedings of the 3rd International Trigo (Wheat) Yield Potential Workshop. M. Reynolds, G. Molero and A. McNab (eds.). CIMMYT. Cd. Obregón, Sonora. pp. 42-54.

Ponomarenko A., S. B. Goodwin and G. H. J. Kema (2011) Septoria tritici blotch (STB) of wheat. *Plant Health Instructor*, http://www.totoagriculture.org/PDFs/PlantDiseasesPests/1747.pdf

Rodríguez-Contreras M. E., H. E. Villaseñor-Mir, G. S. Leyva-Mir, J. Huerta-Espino, J. S. Sandoval-Islas y H. M. de los Santos-Posadas (2008) Efecto de *Septoria tritici* en el rendimiento de trigo de temporal en ambientes lluviosos de los Valles Altos Centrales de México. *Agrociencia* 42:435-442, http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952008000400006

Rodríguez-Contreras M. E., S. G. Leyva-Mir, H. E. Villaseñor-Mir, J. Huerta-Espino, J. S. Sandoval-Islas y H. M. de los Santos-Posadas (2010) Relación de altura y competencia de plantas con incidencia y dispersión de *Septoria tritici* en trigo de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1:347-357, http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342010000300006&script=sci_arttext&tlng=pt

Rudd J. J., K. Kanyuka, K. Hassani-Pak, M. Derbyshire, A. Andongabo, J. Devonshire,… and M. Courbot (2015) Transcriptome and metabolite profiling of the infection cycle of *Zymoseptoria tritici* on wheat reveals a biphasic interaction with plant immunity involving differential pathogen chromosomal contributions and a variation on the hemibiotrophic lifest. *Plant Physiology* 167:1158-1185, https://doi.org/10.1104/pp.114.255927

SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2017) Trigo grano cristalino y harinero mexicano. Planeación agrícola nacional 2017-2030. Ciudad de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256434/B_sico-Trigo_Cristalino_y_Harinero.pdf

Santa-Rosa H. R., E. Espitia-Rangel, E. Martínez-Cruz, H. E. Villaseñor-Mir, J. Huerta-Espino y L. A. Mariscal-Amaro (2016) Productividad y calidad industrial de trigos harineros en relación a enfermedades. *Agrociencia* 50:1027-1039, http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952016000801027&script=sci_arttext

SIAP, Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera (2019) Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx (junio 2019).

Simón M. R., A. E. Perelló, C. A. Cordo, S. Larrán, P. E. L. van der Putten and P. C. Struik (2005) Association between Septoria tritici blotch, plant height, and heading date in wheat. *Agronomy Journal* 97:1072-1081, https://doi.org/10.2134/agronj2004.0126

Suffert F., I. Sache and C. Lannou (2011) Early stages of Septoria tritici blotch epidemics of winter wheat: build-up, overseasoning, and release of primary inoculum. *Plant Pathology* 60:166-177, https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02369.x

Torriani S. F. F., J. P. E. Melichar, C. Mills, N. Pain, H. Sierotzki and M. Courbot (2015) *Zymoseptoria tritici*: A major threat to wheat production, integrated approaches to control. *Fungal Genetics and Biology* 79:8-12, https://doi.org/10.1016/j.fgb.2015.04.010

Villaseñor-Mir H. E., J. Huerta-Espino, R. Hortelano S. R., E. Martínez-Cruz, E. Espitia-Rangel, E. Solís-Moya, … y M. F. Rodríguez-García (2018) Valles F2015: nueva variedad de trigo para siembras de temporal en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9:1315-1321. https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.1592

Villaseñor-Mir H. E., R. Hortelano S. R., E. Martínez-Cruz, L. A. Mariscal-Amaro, S. G. Leyva-Mir y J. Huerta-Espino (2012) Control químico de las enfermedades: una alternativa para la producción de trigo de temporal en Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:595-600, http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342012000300014&script=sci_arttext&tlng=en

Wenham H. T. (1959) Studies on Septoria leaf blotch disease of wheat (*Triticum aestivum* L.) caused by *Septoria tritici* Desm. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 2:208-213, https://doi.org/10.1080/00288233.1959.10420304

Yang N., M. C. McDonald, P. S. Solomon and A. W. Milgate (2018) Genetic mapping of *Stb19*, a new resistance gene to *Zymoseptoria tritici* in wheat. *Theoretical and Applied Genetics* 131:2765-2773, https://doi.org/10.1007/s00122-018-3189-0