

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA



Reacción de Líneas Avanzadas Elite de Trigo Harinero (*Triticum aestivum* L.) a la Inoculación Artificial con *Tilletia indica* Mitra

Por:

YOHANEE MEDINA URIARTE

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO

Saltillo, Coahuila, México

Noviembre, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA

Reacción de Líneas Avanzadas Elite de Trigo Harinero (*Triticum aestivum* L.) a la Inoculación Artificial con *Tilletia indica* Mitra

Por:

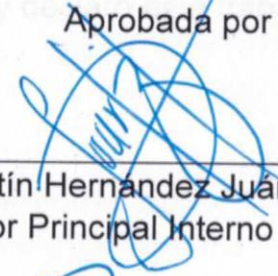
YOHANEE MEDINA URIARTE

TESIS


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO


Aprobada por el Comité de Asesoría:




Dr. Agustín Hernández Juárez
Asesor Principal Interno



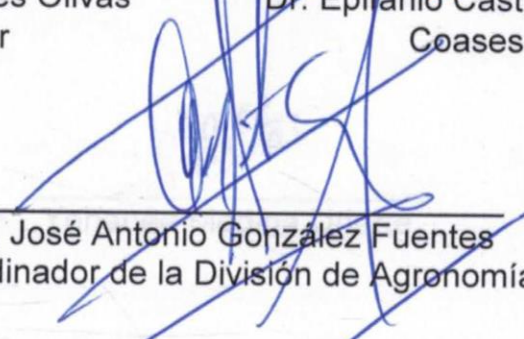
Dr. Guillermo Fuentes Dávila
Asesor Principal Externo



Dr. Alberto Flores Olivas
Coasesor



Dr. Epifanio Castro del Ángel
Coasesor



Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Noviembre, 2021



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme vivir esta oportunidad de seguir con mis estudios, y por las grandes personas que ha puesto en mi vida.

A mi Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por ser mi segunda casa, por darme la oportunidad de realizar y terminar mis estudios, por las buenas

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

A mis maestros, por las enseñanzas que me brindaron en mis estudios, por la Reproducción de fragmentos o texto sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro este trabajo es original.

Maria Guadalupe Cubedo-Roy, Diana Carolina Espinoza Valenzuela, Dulce María Montañero Becerra, Karina Velázquez Urbalajo, Miriam Rocío Quintana Valenzuela, Britany Deyanira Uribe Gómez

A mi entrenadora Claudia Aileta Gaytán García, por aceptarme en su equipo, por haberme motivado, por los buenos y malos momentos en que estubo conmigo

A la Ing. Gloria Godos Montes, por tus buenas palabras en los momentos que más necesitaba, por apoyarme por los malos momentos escucharme y estar para mí

Pasante

Al Ing. José González Navarro, por haberme motivado para salir adelante, por el apoyo que me brindó con las materias, por los consejos, por los buenos y malos momentos, mucho éxito

A mi familia, GRACIAS a mis papás Yohance Medina U. y a mi familia en general que siempre me apoyaron y me motivaron para que yo le echara todas las ganas que me daban en mis estudios, por sus palabras de amor

Yohance Medina Uriarte

A mis compañeros, que me permitieron aprender de ellos, por los consejos y los buenos momentos, por apoyarme en mis prácticas, María Margarita Torres Guzmán, Roberto Alamilla Chávez, Manuel Ulises Esquer Álvarez, Dulce Alejandra Arriaga Caballero, Manuel Enrique Mondragón Valenzuela

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme vida, salud, por darme la oportunidad de seguir con mis estudios, y por las grandes personas que ha puesto en mi vida.

A mi Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por ser mi segunda casa, por darme la oportunidad de realizar y terminar mis estudios, por las buenas amistades, por ser orgullosamente parte de la familia Buitre y pertenecer a mi Alma Terra Mater.

A mis maestros, por las enseñanzas que me brindaron en mis estudios, por los consejos, los regaños y el tiempo que compartieron con nosotros los estudiantes.

A mis Asesores: Dr. Guillermo Fuentes Dávila, Dr. Agustín Hernández Juárez, Dr. Epifanio Castro del ángel y Dr. Alberto Flores Olivas, por el apoyo que me dieron durante este trabajo de investigación, por los consejos y tiempo que me brindaron.

A mis amigos y compañeros: que han estado presente en mi vida, que me apoyan, escuchan, están cuando los necesito, por las amistades dentro y fuera de mi universidad. No terminaría de escribir cada nombre de mis amigos, pero espero que se sientan identificados, muchas gracias por confiar en mí (Maricela Antonio del Ángel, Paola Juárez Hernández, Aracely Dávila Galaviz, Jaqueline Flores Jiménez, María Guadalupe Cubedo Rey, Diana Carolina Espinoza Valenzuela, Dulce María Montaña Becerra, Karina Velázquez Urbalejo, Miriam Rocío Quintana Valenzuela, Britany Deyanira Urías Gómez).

A mi entrenadora Claudia Alicia Gaytán García, por aceptarme en su equipo, por haberme motivado, por los buenos y malos momentos en que estuvo conmigo.

A la Ing. Gloria Godos Montes, por tus buenas palabras en los momentos que más necesitaba, por apoyarme con las materias, por escucharme y estar para mí.

Al Ing. Josué González Navarro, por haberme motivado para salir adelante, por el apoyo que me brindó con las materias, por los consejos, por los buenos y malos momentos, mucho éxito.

A mi familia, GRACIAS a mis padres por el apoyo que siempre me han dado, a mi familia en general que siempre me apoyó, que estuvieron motivándome para que yo le echara todas las ganas para salir adelante, por los mensajes motivadores, por sus palabras de amor.

A mis compañeros, que me permitieron aprender de ellos, por los consejos y los buenos momentos, por apoyarme en mis prácticas: María Monserrat Torres Cruz, Roberto Alamilla Chávez, Manuel Ulises Esquer Álvarez, Dulce Alejandra Araujo Ceballos, Manuel Enrique Mondaca Valenzuela.

DEDICATORIA

A mis padres:

María Hilda Uriarte Santiesteban y Genovevo Medina Villa por el amor que me han dado, por confiar en mí, por permitirme cumplir mis sueños y metas, por los regañones para hacerme más fuerte, por cuidarme y sobre todo por darme la vida, siempre estaré agradecida con ustedes, los amo.

A mis hermanos:

Yuria Medina Uriarte, Oscar Alberto Medina Uriarte y Ana Verenice Medina Uriarte, por la paciencia, el cariño y amor que me tienen, por la confianza que me han dado para que continúe con mis sueños, por las sonrisas, los enojos y por ser mis hermanos. A mi cuñado **César Enrique Reyes Ruiz**, por su apoyo incondicional en mi estancia en la universidad, a mi cuñada **Claudia Rubí Pérez Cerna** y a mi sobrina **Emily Sarahi Medina Pérez**, por estar presente en mi vida, darle alegría y amor.

A mi familia, por la dicha de tenerlos, por darme fuerza para que siguiera adelante, por el amor que me han dado cada uno de ustedes y por sus sabias palabras y consejos.

A mi Abuela Ignacia Nereida Santisteban Rubio (†), que desde el cielo me ha cuidado, que ha sido mi inspiración y me ha dado fuerzas para salir adelante.

A Antonina Reyes Gómez, por haber sido una de las mejores personas que me pude encontrar en la universidad, gracias por ser una hermana para mí, por el apoyo, por escucharme, por los regañones y los buenos momentos que hemos pasado juntas, te quiero.

A mis amigas Yessica Esmeralda Duarte Niebla y Yarely Gissell López Andrade, por tener siempre palabras para mí, por el cariño que siempre me han demostrado y por no dejarme sola en los momentos más difíciles, por su apoyo incondicional durante toda mi vida

A la M.C María Monserrat Torres Cruz, por sus buenos consejos, por escucharme, por su buena amistad dentro y fuera del trabajo, gracias por el apoyo que me has brindado y por los buenos momentos que hemos pasado.

Al Dr. Guillermo Fuentes Dávila, por permitirme realizar mis prácticas, por confiar en mí, por el apoyo, consejos, regañones, por la paciencia que ha tenido conmigo y por darme de su tiempo para compartir conmigo sus conocimientos.

Al Dr. Agustín Hernández Juárez, por el apoyo, consejos, amistad y tiempo que me brindó durante mi carrera universitaria.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE CUADROS	vii
RESUMEN	vii
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del problema	2
Justificación	2
Objetivos	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
El trigo	4
Clasificación taxonómica	4
Fenología del cultivo	5
Descripción botánica	6
Raíz	6
Tallo	6
Hojas	6
Inflorescencia	6
Flor	6
Fruto	6
Importancia económica del trigo en México	6
Principales plagas y enfermedades del trigo en el sur de Sonora	7
Roya de la hoja	7
Roya lineal o amarilla	8
Punta negra del grano (<i>Alternaria</i> spp.)	8
Pulgón del follaje	9
Pulgón de la raíz	10
Pulgón del tallo	10
Pulgón de la espiga	11

Ácaro café de los cereales	11
Chinche apestosa	12
Gusano soldado	12
Gallina ciega	13
El carbón parcial y el agente causal (<i>Tilletia indica</i>)	13
Ubicación mundial de la enfermedad	13
Presencia de la enfermedad en México	14
Importancia económica del carbón parcial del trigo	14
Clasificación taxonómica de <i>Tilletia indica</i>	15
Ciclo de vida	15
Descripción morfológica de las teliosporas	17
Control de la enfermedad	18
Control legal	18
Control químico	19
Control genético	19
MATERIALES Y MÉTODOS	21
Ubicación del Experimento	21
Germoplasma experimental y siembra	21
Manejo agronómico del cultivo	22
Preparación de inóculo	22
Multiplicación del hongo	24
Inoculaciones	26
Cosecha y evaluación	26
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
CONCLUSIÓN	36
BIBLIOGRAFÍA	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Síntomas de carbón parcial (<i>Tilletia indica</i>) en el grano de trigo harinero (<i>Triticum aestivum</i>).	15
Figura 2. Teliosporas del hongo <i>Tilletia indica</i> .	18
Figura 3. Siembra manual de líneas avanzadas elite de trigo harinero.	21
Figura 4. Filtrado en una malla de 60 micrómetros.	22
Figura 5. Teliosporas con tubo germinativo o promicelio y mostrando esporidios primarios.	23
Figura 6. Identificación de áreas con teliosporas germinando.	24
Figura 7. Colocación del pedazo de agar-hongo en forma invertida en la tapa de la caja Petri.	25
Figura 8. Crecimiento del hongo en medio de cultivo papa-dextrosa-agar.	26
Figura 9. Inoculación de trigo con <i>Tilletia indica</i> mediante inyección en estado de embuche.	27
Figura 10. Sistema automatizado de microaspersión y malla antipájaro en el área experimental.	27
Figura 11. Porcentaje de infección con carbón parcial, de 157 líneas avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en la primera fecha de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.	28
Figura 12. Categorías de infección (%) por carbón parcial, de líneas avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en la primera fecha de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.	29
Figura 13. Porcentaje de infección con carbón parcial, de 157 líneas avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en la segunda fecha de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.	30
Figura 14. Categorías de infección (%) por carbón parcial, de líneas avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en la segunda	30

fecha de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

Figura 15. Porcentaje de infección con carbón parcial, de 157 líneas 31
avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en la tercera
fecha de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman
E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

Figura 16. Categorías de infección (%) por carbón parcial, de líneas 32
avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en la tercera
fecha de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman
E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

Figura 17. Porcentaje promedio de infección con carbón parcial, de 157 33
líneas avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en las
tres fechas de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental
Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

Figura 18. Categorías de infección (%) por carbón parcial, de líneas 34
avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en las tres
fechas de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental
Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Líneas avanzadas elite de trigo harinero que mostraron un promedio global menor a 5.0% de infección, en la inoculación artificial en las tres fechas de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México. 34

RESUMEN

El carbón parcial (*Tilletia indica* Mitra) es una enfermedad de nivel cuarentenario, que se detectó desde la década de los 1970's en la región noroeste de México, la cual afecta económicamente a los productores de trigo, por su efecto negativo en las características organolépticas de la harina, en la comercialización del grano y semilla de trigo. El objetivo de esta investigación fue identificar germoplasma experimental de trigo harinero con resistencia y/o tolerancia al carbón parcial. Se evaluaron ciento cincuenta y siete líneas elite durante el ciclo agrícola 2020-2021 en tres fechas de siembra (noviembre 28, diciembre 8 y 17, 2020), usando 8 g de semilla para un surco de 0.7 m de largo. Las inoculaciones se hicieron inyectando 1 mL de una suspensión de esporidios alantoides (10,000/ml) durante el estado de embuche en 5 espigas. Se utilizó un sistema de microaspersión para crear un ambiente húmedo que fuera favorable para el desarrollo del hongo. La cosecha y trilla se hicieron manualmente, y el conteo de granos infectados y sanos mediante inspección visual. El rango de infección en la primera fecha de siembra fue de 1.56 a 69.2% con un promedio de 29.18%, de 0.61 a 71.84% para la segunda con promedio de 29.63% y de 1.12 a 68.97% para la tercera con promedio de 27.96%. Dentro de las categorías de infección global, ninguna línea estuvo dentro del rango 0.1-2.5%, 3 líneas dentro de la categoría 2.6-5.0%, 2 dentro de 5.1-10.0%, 83 dentro de 10.1-30% y 69 con más del 30% de infección. Las líneas que presentaron los promedios más bajos de infección en las tres fechas de siembra fueron: ESTOC/7/2*KISKADEE#1/5/KAUZ*2/MNV//KAUZ/3/MILAN/4/BAV92/6/WHEAR//2*PRL/2*PASTOR con 2.89%, ND 643//2*PRL/2*PASTOR*2/3/HEILO/4/KAKURU con 4.73 y WBL1*2/BRAMBLING *2//BAVIS*2/3/KACHU#1/KIRITATI//KACHU con 4.86%. Las líneas que presentaron los porcentajes más altos de infección fueron: TUKURU//BAV92/RAYON/3/ND643 /2*WBL1/4/BORL14 con 62.68%, BORL14*3//LALBMONO1*4/PVN con 57.01% y W15.92/4/PASTOR//HXL7573/2*BAU/3/WBL1/6/VEE/MJI//2*TUI/3/2*PASTOR/4/BERKUT/5/PFAU/MILAN/7/ROBINK con 56.18%.

Palabra clave: Carbón Parcial, *Tilletia indica*, Trigo, *Triticum Aestivum*, Resistencia Genética.

INTRODUCCIÓN

El cultivo del trigo es uno de los cereales más importantes para el consumo humano, ocupando el segundo lugar de la producción mundial (FAOSTAT, 2021). La producción de trigo en México se concentra en los estados de Sonora (54.16%), Guanajuato (13.96%), Baja California (7.99%), Sinaloa (8.44%), Michoacán (6.60%), Jalisco (3.65%) y Chihuahua (2.25%) (SIAP, 2021). Este cultivo provee más nutrición que cualquier otra fuente de alimento y es la fuente más importante de carbohidratos en la mayoría de los países de las zonas templadas (Briggle y Curtis, 1987). Aunque el trigo es un excelente alimento, el grano es deficiente en algunos aminoácidos, particularmente bajo en lisina. Su almidón es fácilmente digerido ya que está constituido principalmente de proteína. El grano contiene vitaminas, grasas (lípidos) y es rico en fibras, calorías, vitamina B y E, así como también en una gran cantidad de minerales (OEIDRUS, 2002); la mayor demanda de este cereal es utilizada para elaborar harina, harina integral, sémola, cerveza y una gran variedad de productos alimenticios (SAGARPA, 2019). El trigo es afectado por distintas plagas y enfermedades causadas por bacterias, micoplasmas, hongos, nematodos, virus y viroides, que pueden ocasionar daño en el follaje, raíz, tallos, espigas y granos (Wiese, 1987), afectando el rendimiento y la calidad, y aumentando los costos por el uso de agroquímicos. El carbón parcial causado por *Tilletia indica* Mitra es una enfermedad de nivel cuarentenario la cual se detectó en el Valle del Yaqui, Sonora, México en el ciclo agrícola 1969-1970 (Durán, 1972). Esta enfermedad afecta las características organolépticas del trigo (Peña *et al.*, 1992; Sekhon *et al.*, 1980, 1981), las cuales son de suma importancia en la industria. La presencia de esta enfermedad ha ocasionado en diversos períodos pérdidas económicas para los productores, pérdida del área de siembra por las regulaciones y medidas cuarentenarias, así como la pérdida de exportación de semilla (Brennan *et al.*, 1990). El control de esta enfermedad se dificulta ya que las teliosporas son resistentes a factores físicos y químicos (Smilanick *et al.*, 1988); la aplicación de fungicidas durante el período de floración tiene una efectividad biológica importante (Salazar-Huerta *et al.*, 1997; Fuentes-Dávila *et al.*, 2005, 2016, 2018b), pero la

resistencia de las variedades de trigo constituye el mejor método de control de la enfermedad.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el sur de Sonora, México, el carbón parcial es la enfermedad principal del grano de trigo, ya que afecta sus características organolépticas (olor, sabor y color de la harina), así como la comercialización del grano y semilla causando pérdidas económicas a los productores. Brennan *et al.* (1990) reportaron un costo económico en el noroeste de México de 7.02 millones de dólares (EUA), definidos en costos directos (pérdidas en el rendimiento y calidad, restricción para exportar semilla) e indirectos (costo por mantener medidas cuarentenarias, fumigación de grano y restricciones en el uso de la semilla sana), representando el 2% del valor promedio del cultivo en las áreas afectadas; sin embargo, no se cuenta con información más reciente sobre este tema. La mejor medida de control de la enfermedad es la generación de variedades de trigo con resistencia.

JUSTIFICACIÓN

El carbón parcial causado por el hongo *T. indica* es la enfermedad más importante del grano y semilla del trigo. Esta enfermedad es endémica en el sur de Sonora y en algunas regiones del noroeste de México, lugar donde se producen grandes volúmenes del cereal, tanto para el consumo interno como para la exportación. La enfermedad ocasiona efectos económicos negativos a la cadena productora y comercial del trigo, tanto por los costos directos (pérdidas de rendimiento y calidad, y pérdidas por la restricción para exportar semilla) e indirectos (costos de las regulaciones y medidas cuarentenarias, fumigación de grano y restricción para la producción y uso de semilla). La pérdida anual ocasionada por esta enfermedad en la segunda mitad de la década de los 1980's, se estimó en 7.02 millones de dólares. La ficha técnica No. 24 elaborada por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA, 2019b), describe las características e impacto de la enfermedad en México.

Desde el descubrimiento de la enfermedad en México, se ha estado trabajando en el mejoramiento genético para resistencia, ya que es la mejor opción para combatir dicha enfermedad. Este trabajo de tesis atiende a la necesidad de identificar germoplasma experimental elite de trigo harinero con resistencia a carbón parcial; así mismo, es relevante, ya que por un lado aportaría nuevas fuentes de resistencia a la enfermedad para los programas de mejoramiento, y por otro, posibles líneas candidatas a entrar al proceso preliminar de liberación como variedades comerciales, lo cual ayudaría a superar las limitantes que representa esta enfermedad en la rentabilidad y el rendimiento del cultivo.

OBJETIVOS

General

Identificar germoplasma experimental del trigo harinero con resistencia y/o tolerancia al carbón parcial.

Específicos

Sembrar, inocular y cosechar en campo líneas experimentales avanzadas elite de trigo harinero.

Determinar el porcentaje de infección mediante inspección visual, realizando un conteo de los granos infectados y sanos

REVISION DE LITERATURA

El trigo

El trigo es un ingrediente principal para la elaboración del pan que se consume a diario por las familias en nuestro país. Se cultiva desde hace miles de años en todo el mundo, existen vestigios de su presencia en civilizaciones como Egipto y Mesopotamia (actual Irak y Siria) en el oriente medio. El trigo llegó a nuestro país gracias a los colonizadores y se ubicó como uno de los principales cereales para la alimentación en la Nueva España, junto con el maíz (SENASICA, 2019a). El trigo se originó en el medio oriente, pero a través de los siglos, su cultivo se ha extendido al resto del mundo. Se estima que hay alrededor de treinta mil variedades de trigo, pero sólo unas trescientas se cultivan para su comercialización (Scade, 1981). Trigo es el término que designa al conjunto de cereales, tanto cultivados como silvestres, que pertenecen al género *Triticum*. Son plantas anuales de la familia de las gramíneas, ampliamente cultivadas en todo el mundo. Entre los componentes del grano están el agua (humedad), las proteínas, la fibra y los carbohidratos. La calidad de la proteína le indica al industrial el tipo de proceso a realizar. Su aceptación o rechazo se rige por medio de la certificación de laboratorio con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-FITO-2001 y el análisis de proteína (OEIDRUS, 2002). El contenido de proteína del trigo es más alto que el de arroz, maíz y el del sorgo y más o menos igual al de los otros cereales. Su contenido está influenciado por la variedad de trigo, así como las condiciones ambientales y de manejo, tales como temperatura, humedad, métodos de cultivo, tipo de suelo y disponibilidad de nitrógeno (Hanson *et al.*, 1982).

Clasificación taxonómica

De acuerdo con ITIS (2021), la clasificación taxonómica del trigo es la siguiente:

Reino: Plantae

Subreino: Viridiplantae

Superdivision: Embryophyta

División: Tracheophyta

Subdivisión: Spermatophytina

Clase: Magnoliopsida

Superorden: Liliae

Subclass: Commelinidae

Orden: Poales

Familia: Poaceae

Género: *Triticum*

Especie: *aestivum*

Nombre científico: *Triticum aestivum* L.

Nombre común: trigo harinero o panadero

Fenología del cultivo

Las fases de desarrollo del trigo según la escala de Zadoks *et al.* (1974) describen lo que puede ser observado a simple vista. Esta escala tiene 10 fases principales:

Z0. Germinación

Z1. Producción de hojas en el tallo principal

Z2. Producción de macollos

Z3. Producción de nudos en el tallo principal (encañado)

Z4. Vaina engrosada

Z5. Espigado

Z6. Antesis

Z7. Estado lechoso del grano

Z8. Estado masoso del grano

Z9. Madurez

Descripción botánica (Infoagro systems, 2021)

- **Raíz:** Es una planta que suelen alcanzar más de un metro de profundidad, situándose la mayoría de ellas en los primeros 25 cm del suelo. En condiciones de temporal, la densidad de las raíces entre los 30-60 cm de profundidad es mayor, aunque bajo riego el crecimiento de las raíces es mayor, ya que corresponde a un mayor desarrollo de plantas.
- **Tallo:** es una caña hueca, cada tallo representa de cinco a seis nudos de los cuales solo tres o cuatro desarrollan hojas, debido a que los nudos inferiores son a menudo muy cortos y frecuentemente quedan debajo de la superficie del suelo. El nudo superior contiene la hoja bandera y la inflorescencia. Cada tallo produce una inflorescencia, la cual es un denso sistema de ramificación. Su altura y solidez determinan la resistencia de encamado.
- **Hojas:** son cintiformes, paralelinervias y terminadas en punta.
- **Inflorescencia:** es una espiga compuesta de un tallo central de entrenudos cortos llamados raquis, en cada uno de los nudos se asienta una espiguilla protegida por dos brácteas más o menos coriáceas o glumas en ambos lados. Cada espiguilla presenta nueve flores, de las cuales aborta la mayor parte, quedando dos, tres, cuatro y a veces hasta seis.
- **Flor:** consta de un pistilo y tres estambres, está protegida por dos brácteas verdes o glumillas, de la cual, la exterior se prolonga en una arista en los trigos barbados.
- **Fruto:** es una cariopsis con el pericarpio soldado al tegumento seminal. El endospermo contiene las sustancias de reserva, constituyendo la masa principal del grano.

Importancia económica del trigo en México

La producción mundial de trigo en el 2019 fue de 765, 769,635 millones toneladas, de acuerdo al último informe sobre oferta y demanda de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAOSTAT, 2021).

En el caso del estado de Sonora, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) publicó que en el ciclo otoño-invierno 2020-2021 se sembraron 236 mil 472.08 hectáreas, y se tuvo una producción de un millón 721 mil 608.36 toneladas con un rendimiento promedio de 7.28 toneladas por hectárea (SADER, 2021). Sonora ocupa el primer lugar en la producción de trigo en el país, al contribuir con 53% de la producción nacional. El trigo panificable se destina a la industria nacional, para la elaboración de harinas y pastas, y el trigo cristalino se utiliza para la exportación.

Por el lado del comercio internacional, los precios de mercado fluctúan entre 245 a 263 dólares por tonelada para el trigo cristalino y de 235 a 279 dólares por tonelada para el panificable, montos superiores a los que los productores han alcanzado en los últimos ciclos (SADER, 2021).

Principales plagas y enfermedades del trigo en el sur de Sonora

El cultivo de trigo es afectado por distintas enfermedades al sur del estado de Sonora, afectando la calidad y obteniendo un bajo rendimiento.

- **Roya de la hoja.** Esta es la principal enfermedad del trigo en el sur de Sonora, ya que el agente causal (*Puccinia triticina* Eriks.) puede atacar al cultivo en cualquier etapa de desarrollo de la planta, y las esporas infectivas que produce pueden ser diseminadas rápidamente a grandes distancias por el viento (Figueroa-López *et al.*, 2011). La presencia y rapidez con que se desarrolla la enfermedad, se favorecen con la humedad en forma de rocío y temperaturas entre 15 y 25°C (Roelfs *et al.*, 1992). Los primeros signos de la enfermedad se observan en las hojas como pequeños puntos de color naranja (pústulas). Dichas pústulas contienen miles de esporas (uredosporas) del hongo. En su inicio, el número de pústulas es bajo, pero si la temperatura es adecuada para el desarrollo del hongo, el número tiende a incrementarse rápidamente. Cuando esto sucede, la superficie de la hoja se puede cubrir con pústulas, tornándose luego amarilla y se seca. Las pérdidas en el rendimiento que causa la roya de la hoja son mayores en la medida que

la planta de trigo es atacada en etapas más tempranas de su desarrollo, produciendo hasta la muerte de la planta si la infección aparece durante la etapa de amacollamiento. El manejo de la enfermedad se basa en la resistencia genética de las líneas experimentales que se liberan como variedades comerciales y en la aplicación de fungicidas.

- **Roya lineal o amarilla.** Es causada por el hongo *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* Eriks. es una de las enfermedades más importantes del trigo a nivel mundial (Roelfs *et al.*, 1992; Zwer y Qualset, 1994). La temperatura mínima, óptima y máxima para la germinación de las esporas es 0, 11 y 23°C (Roelfs *et al.*, 1992). Este patógeno afecta las hojas, los tallos y las espigas, lo que trae como consecuencia un efecto adverso en el desarrollo del grano (Cox *et al.*, 1997). Las pérdidas en rendimiento pueden variar de 30 a 75% (Roelfs, 1978; Torabi y Nazari, 1998), pero en casos extremos pueden llegar al 100%. En los últimos 15 años, esta enfermedad ha causado mermas económicas en el sur de Sonora, en donde debido a su presencia los productores se han visto en la necesidad de realizar aplicaciones de fungicidas para su control.
- **Punta negra del grano (*Alternaria* spp.).** Generalmente *Alternaria alternata* (Fries) Keissler y *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoemaker son considerados como agentes primarios causantes de esta enfermedad, pero también se han registrado más de 100 especies de hongos que pueden causar esta enfermedad (Mathur y Cunfer, 1993). Se presentan en áreas con alta humedad relativa pudiendo causar infección en la semilla cuando la humedad relativa del medio ambiente es superior al 90% y el de la semilla al 20%. Durante la maduración de la semilla, la presencia de lluvia, así como la alta humedad que puede prevalecer durante los días previos a las cosechas favorece el desarrollo de la enfermedad (Prescott *et al.*, 1986; Watkins, 2013). La semilla en desarrollo expandiéndose es la más susceptible. La semilla que presenta senescencia prematura también es más propensa a desarrollar punta negra, ya que muchos de los agentes causales son saprófitos (Wiese, 1987). Aunque las espigas infectadas pueden tener una apariencia normal, en el interior de las glumas el pericarpio de los granos de

trigo en maduración se torna de color café claro a oscuro o negro, y la presencia de estas manchas se pueden ver en cualquier parte del grano; las infecciones severas causan decoloración y chupado de la semilla (Mathur y Cunfer, 1993). La punta negra es una enfermedad endémica de trigo cristalino o duro y de trigo harinero en el sur de Sonora, aunque su incidencia varía de un año a otro; esta enfermedad también afecta al triticale (Fuentes-Dávila *et al.*, 2014a).

Las principales especies de plagas que representan en el trigo en el sur de Sonora son los áfidos o pulgones de follaje (*Schizaphis graminum* R.), de la raíz (*Rhopalosiphum rufiabdominalis* S.), del tallo (*Rhopalosiphum padi* L.) y el de la espiga (*Sitobion avenae* F.), el ácaro café de los cereales, la chinche verde o apestosa (*Nezara viridula* L.), el gusano soldado (*Mythimna unipuncta* H.) y la gallina ciega (*Phyllophaga* spp. H.) (Figueroa-López *et al.*, 2011).

- **Pulgón del follaje.** Esta especie es la más importante en esta región. Mide de 1.5 a 2 mm de largo, es de color verde brillante con una banda verde azulada a lo largo del dorso. Sus antenas son cortas y negras, y se encuentran dirigidas hacia atrás. Posee cornículos negros y cortos y sus colonias generalmente se ubican en el envés de las hojas. Los mayores daños se presentan durante las primeras dos semanas de emergencia de las plántulas. Este insecto succiona la savia de la planta e inyecta toxinas, las cuales producen manchas de color naranja a café en el haz de las hojas. Cuando el ataque se presenta durante los primeros diez días de emergencia de la plántula y éste continúa por diez días más, puede ocasionar la pérdida total de la población de plantas. El control biológico natural no es suficiente ya que su principal parasitoide, la avispa *Lysiphebus* (Hymenoptera: Braconidae), requiere temperaturas de 23°C ó superiores para su buen desarrollo, condición que no se da por mucho tiempo durante las primeras etapas del desarrollo del cultivo. El control químico se recomienda en plantas de menos

de 20 días de edad, al observarse las primeras colonias, y en plantas mayores, cuando se encuentre en promedio una colonia por hoja.

- **Pulgón de la raíz.** Esta especie forma colonias subterráneas en las raíces o en la base de los tallos. Su cuerpo es globoso, de color verde oscuro en la parte frontal a café rojizo en la parte terminal, alrededor de los sifúnculos o cornículos (pequeños apéndices en forma de sifón, por los que el insecto arroja azúcares o sustancias cerosas semilíquidas, como resultado de la ingestión de mayor savia de la que tolera su cuerpo). La longitud del cuerpo de 1 a 1.6 mm. Este insecto regularmente se presenta primero que las otras especies de pulgones en la etapa inicial de desarrollo de planta, formando densas colonias que en ocasiones rebasan los 500 individuos por planta. Si esta población perdura durante más de diez días puede afectar seriamente el vigor de la planta. Plantas de 30 días de edad soportan poblaciones de hasta 100 individuos por este lapso de tiempo; sin embargo, es importante tomar medidas de control antes de que esto suceda, ya que puede debilitar mucho a la planta y disminuir el número de tallos reduciendo por tanto el rendimiento. Ya que los insecticidas sistémicos son los que normalmente se usan para el control de pulgones tienen una función ascendente (acrópetala), no se recomienda iniciar el control de esta especie en particular con aspersiones de estos productos, debido a que los insectos se localizan en su mayor parte en las raíces y en el menor número en la base del tallo donde no entrarían en contacto con los insectos. Cuando se encuentren en promedio más de 20 pulgones por planta, se recomienda aplicar 60 a 80 unidades de nitrógeno (de preferencia amoniaco anhidro), y dar el primer riego de auxilio. Éste afectaría a la población de pulgones matando gran cantidad por asfixia. Si la infestación es demasiada alta, muchos de estos insectos subirán al tallo y a las hojas más bajas de la planta, donde los insecticidas pueden entrar en contacto con ellos ejerciendo un control eficiente.
- **Pulgón del tallo.** El tamaño del cuerpo de este insecto es de 1.5 a 2.3 mm, de color oliva pardo con una mancha característica en forma de 8 en la base

de los sifones y la cauda (cola). Se le encuentra generalmente en los tallos. Normalmente no se presenta haciendo daño como especie única, sino en complejo con el pulgón del follaje y el del cogollo, por lo que se le controla indirectamente cuando se aplican insecticidas para el control de éstos. Sin embargo, en ocasiones puede presentarse en altas poblaciones (más de 500 individuos por planta), que incluso se transportan hasta la espiga dañando la base de ésta, en cuyo caso se recomienda su control cuando la población alcance los 80 individuos por planta.

- **Pulgón de la espiga.** Es el pulgón más grande que ataca al trigo. El adulto mide de 1.9 a 3.3 mm de largo. Es de color verde claro, aunque a veces se presenta con tonalidades de color rojizo a negro. Las antenas y los cornículos son largos y negros. El período crítico del cultivo con respecto a esta plaga es durante el llenado de grano, se le encuentra alimentándose de la savia a nivel del raquis y base de las glumas, lo cual causa una disminución del tamaño de los granos y por lo tanto del rendimiento. Se recomienda su control cuando se encuentren cinco pulgones por espiga en la etapa de desarrollo de emergencia de espigas y floración, y más de veinte pulgones en la etapa de grano acuoso. Normalmente las poblaciones colonizan las hojas y espigas causando daños durante la formación y llenado de los granos. Cuando se presentan altas poblaciones y no se manejan adecuadamente, se estima una reducción del 30 al 50% del rendimiento.
- **Ácaro café de los cereales.** A diferencia de los insectos que poseen seis patas y una clara separación en tres segmentos (cabeza, tórax y abdomen), los ácaros tienen ocho patas, no tienen alas y el tórax con el abdomen se encuentran unidos. La mayoría de los ácaros son de tamaño que varía de 0.1 a 0.6 mm de largo, lo que dificulta su observación a simple vista. Por lo general, su ciclo de vida es corto, lo que implica que en ciertas condiciones ambientales pueda haber un aumento rápido de sus poblaciones. Los ácaros se alimentan de las capas superficiales de los tejidos de las plantas, extrayendo su contenido celular con su aparato bucal raspador-chupador. Ello puede causar deshidratación, decoloración y deformación de las zonas

afectadas, dependiendo de la magnitud del daño, órgano de la planta afectado o susceptibilidad de la variedad. Se ha observado que las variedades de trigo duro o cristalino son más afectadas que las harineras, tal vez porque estas últimas tienden a doblar sus hojas, con lo que se forma un microclima más húmedo lo cual es desfavorable para el desarrollo de los ácaros. Esta plaga aparece en condiciones de sequía. En campo se ha observado que los daños más intensos se localizan por la orilla del lote sembrado y en las partes arenosas del terreno, por lo que se sugiere se revise con mayor atención en estos puntos, a fin de diagnosticar más rápido y acertadamente el problema. Aunque poco se sabe sobre umbrales de daño, se sugiere su control cuando la planta manifieste un color verde opaco (cenizo) que contraste con áreas de color verde brillante del resto de la planta, o de plantas vecinas a ésta y se observen más de cinco ácaros por planta.

- **Chinche apestosa.** El adulto mide de 11 a 15 mm de largo por 8 a 8.5 de ancho. El cuerpo es ligeramente convexo en el dorso, de color verde, variando su tonalidad desde un color intenso esmeralda, verde pasto, verde claro, hasta castaño verdoso. Las alas cubren todo el abdomen excepto una pequeña porción en los costados. El insecto succiona la savia de las hojas y frutos e inyecta saliva tóxica a los tejidos. El daño más severo lo ocasiona cuando el ataque se presenta en la etapa de embuche, ya que inyecta toxinas en la base del raquis de la espiga en formación, lo que posteriormente ocasiona la esterilidad y secado de la parte superior de la espiga. Se estima que una población de diez chinches por metro cuadrado es el umbral económico de daño, o bien, al capturar 15 o más por 100 golpes con una red entomológica.
- **Gusano soldado.** Es una plaga defoliadora del trigo y otros cultivos. Las larvas miden de 4 a 5 cm de longitud al alcanzar su completa madurez. Cuando están completamente desarrollados varían de color, siendo éste de un verde oscuro a café verdoso. Presentan una raya angosta discontinua por la mitad del dorso. En vista lateral se observan tres rayas, la primera moteada

de blanca, la segunda oscura y la última de color anaranjado pálido. La cabeza es de forma aplanada con rayas. El control químico de esta plaga es más eficiente cuando se lleva a cabo por la tarde o noche debido a sus hábitos alimenticios nocturnos. Éste se recomienda a partir de la etapa de embuche al encontrar de 10 a 15 larvas por metro cuadrado, y se observen plantas defoliadas y excremento en el suelo.

- **Gallina ciega.** Como gallina ciega se les conoce a las larvas de diversas especies de escarabeidos de los géneros *Phyllophaga* y otras. Esta plaga se ha estado presentando en la región desde el ciclo agrícola 2005-2006. Su distribución comprende toda la zona productora de trigo del sur de Sonora, aunque en lotes aislados y cada vez más frecuente. El ciclo de vida de este insecto es de dos a tres años, la larva entra en fase de latencia en una celda en el suelo y muda una vez que inicia el período de lluvias. En el tercer instar se alimenta de las raíces, lo cual ocurre en todo el ciclo de lluvias, luego se inicia el período pupal y en mayo o junio los adultos emergen a la superficie. Los principales daños que ocasionan las larvas son destrucción de raíces, lo que trae como consecuencia un mal desarrollo, marchitamiento, disminución de rendimiento y/o muerte de las plantas. Los adultos se alimentan del follaje, aunque en esta región, no se han observado daños importantes causados por éstos. Ya establecido el cultivo, los insecticidas no tienen un control eficiente, por lo que no se recomiendan.

El carbón parcial y el agente causal (*Tilletia indica*)

Ubicación mundial de la enfermedad

El carbón parcial causado por el hongo *T. indica* (Fig. 1), también conocido como *Neovossia indica* (Mitra) Mundkur; se reportó por primera vez en la India (Mitra, 1931), después se reportó en México (Duran, 1972), Paquistán (Munjil, 1975), Nepal (Singh *et al.*, 1989), Brasil (Da Luz *et al.*, 1993), Los Estados Unidos (APHIS, 1996), Irán (Torarbi *et al.*, 1996), África del Sur (Crous *et al.*, 2001) y Afganistán

(CIMMYT, 2011). Esta enfermedad ha causado epifitias en algunas partes del mundo como el noroeste de India, Pakistán y noroeste de México (Brennan *et al.*, 1990).

Presencia de la enfermedad en México

En la actualidad el carbón parcial del trigo se encuentra presente en los estados de Baja California Sur (Comondú), Sonora (Bácum, Benito Juárez, Cajeme, Etchojoa, Guaymas, Hermosillo, Huatabampo, Navojoa y San Ignacio Río Muerto), Sinaloa (Ahome, Angostura, Culiacán, El Fuerte, Guasave, Salvador Alvarado y Sinaloa) y Estado de México (Texcoco) (SENASICA, 2019a).

Importancia económica del carbón parcial del trigo

En México el carbón parcial ha causado pérdidas económicas considerables en la región de los valles del Yaqui y Mayo en el Estado de Sonora, al no poder exportar el producto (NOM-001-FITO-2001) (SAGARPA, 2002), ya que la masa de teliosporas reduce la calidad de la harina, debido a la producción de trimetilamina que causa un olor fétido como de pescado en descomposición. De 1 a 4% de granos infectados puede ser suficiente para que el grano de trigo sea inaceptable para el consumo humano. Los costos directos se deben a la pérdida en rendimiento (6%), pérdida en la calidad del grano (37%), pérdidas por la falta de exportación de semilla (16%); y los costos indirectos a las pérdidas por las restricciones de siembra (29%), el transporte de semilla de áreas libres del carbón parcial (8%), y pérdidas debidas a los rechazos de grano infectado por la industria, el tratamiento de semilla y la fumigación de grano. El costo anual estimado ha sido de 7.02 millones de dólares (EUA), representando el 2% del valor promedio del cultivo en áreas afectadas (Brennan *et al.*, 1990).



Figura 1. Síntomas de carbón parcial (*Tilletia indica*) en el grano de trigo harinero (*Triticum aestivum*).

Clasificación taxonómica de *Tilletia indica*

La clasificación taxonómica del carbón parcial (Fuentes-Dávila, 1984) es:

Dominio: Eukaryota

Reino: Fungi

Phylum: Basidiomycota

Clase: Ustilaginomycotina

Subclase: Exobasidiomycetes

Orden: Tilletiales

Familia: Tilletiaceae

Género: *Tilletia*

Especie: *indica* Mitra

Ciclo de Vida

Las condiciones de luz y temperatura no son críticas para el hongo, ya que las teliosporas pueden germinar a temperaturas que fluctúan de 5 a 30°C (Mitra, 1935;

Krishna y Singh, 1982; Zhang *et al.*, 1984; Smilanick *et al.*, 1985), siendo la óptima entre 15 y 25°C. Por otro lado, la germinación ocurre sobre un rango de pH 4.0-10, siendo la óptima entre 5-9 (Krishna y Singh, 1982; Smilanick *et al.*, 1985). Al germinar, cada teliospora produce generalmente un promicelio (Mitra, 1931), del cual se origina un agregado de esporidios primarios en su punto apical. En ocasiones el tubo germinativo no es visible y los esporidios aparecen como producidos directamente de las teliosporas. También el tubo germinativo puede ser corto, largo y/o ramificado. El porcentaje de germinación de las teliosporas generalmente es bajo, fluctuando entre 10 a 60% (Bansal *et al.*, 1983; Smilanick *et al.*, 1985). Los productos de la germinación son los esporidios primarios, alargados y delgados (filiformes) de donde se origina esporidios secundarios que pueden ser cortos y en forma de plátano (alantoides), filiformes, y también hifas (Fuentes-Dávila y Duran, 1986). Durante la germinación, el núcleo diploide pasa por el proceso de meiosis, y varias mitosis producen un gran número de núcleos haploides que migran por el promicelio, y pasan individualmente a cada uno de los esporidios primarios. Después de una o dos divisiones mitóticas, los esporidios pueden presentar hasta cuatro núcleos separados por septas. Los esporidios primarios pueden germinar directamente produciendo hifas mononucleares, laterales y terminales de varias células, o indirectamente producir esporidios secundarios, los cuales también germinan directamente o por repetición (Fuentes-Dávila and Duran, 1986). Según Dhaliwal (1989), la multiplicación del hongo en el suelo esterilizado, sobre hojas y espigas superficialmente desinfectadas, sugiere que, bajo condiciones naturales, el inóculo producido a partir de las teliosporas en el suelo, constituyen el inicio de las epifitias. Se desconoce el momento y lugar donde el proceso de dicarionización se lleva a cabo.

El hongo penetra a través de las estomas de las glumas, lemas y/o paleas (Goates, 1988; Salazar *et al.*, 1990). La infección se inicia cerca del embrión, extendiéndose por la sutura del grano, dejando el pericarpio parcialmente intacto. La porción afectada es cubierta por teliosporas de color café oscuro a negras, acompañadas de células estériles (teliosporas inmaduras), las cuales son subhialinas o amarillentas y de menor tamaño (Mitra, 1931). En general, los granos infectados

son destruidos parcialmente y en pocas ocasiones ocurre una destrucción total (Mitra, 1935; Bedi *et al.*, 1949); aunque el hongo puede penetrar el embrión, no necesariamente causa daño (Mitra, 1935; Chona *et al.*, 1961). Los granos parcialmente infectados pueden producir plantas sanas, sin embargo, aquéllos severamente afectados pierden su viabilidad, o presentan una germinación anormal (Rai y Singh, 1978). Fuentes-Dávila *et al.* (2013) reportaron que semilla con el nivel más alto de infección, pero sin daño en el embrión, produjo el número más alto de macollos.

Descripción morfológica de las teliosporas

Las teliosporas son de color rojizo oscuro a cobrizo, marrón opaco y oscuro, algunas son negro opaco, globosas a subglobosas, 22-42 x 25-40 μm en diámetro, promedio de 35.5 μm ; algunas pueden medir 55 μm ; ocasionalmente traen consigo un fragmento de micelio (apículo) (Roberson y Luttrell 1987); papila (Mitra 1931) o un vestigio adherido al micelio (Durán y Fischer 1961). Las teliosporas tienen tres capas en su pared (Khanna *et al.*, 1966; Khanna y Payak 1968; Roberson y Luttrell 1987; Gardner *et al.*, 1983a, b). La primera es una continuación de la pared del apículo (Roberson y Luttrell 1987). Las teliosporas inmaduras son estériles, numerosas, de color amarillento a subhialino, redondas, angulares o lacrimiformes, 10-28 μm en diámetro, y presentan paredes delgadas y laminadas (Fig. 2) (Mitra 1931; Durán y Fischer 1961)

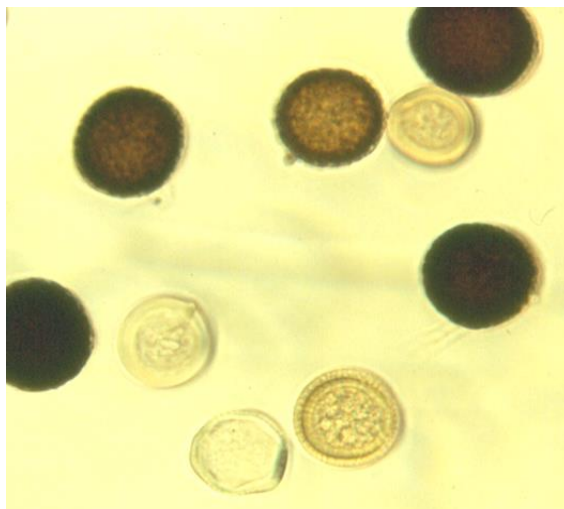


Figura 2. Teliosporas del hongo *Tilletia indica*

Control de la enfermedad

- **Control legal.** Esta campaña se opera bajo las regulaciones establecidas en la NOM-001-FITO-2001 (SAGARPA, 2002), para prevenir la introducción, erradicar o suprimir la enfermedad causada por el hongo, que ocasiona el daño al grano del trigo, afectando negativamente la calidad del mismo, lo que ocasiona castigos en su precio y hace menos costoso este cultivo. La aplicación de las medidas fitosanitarias por parte de los productores basadas en la normatividad de las campañas ha permitido que el estado Baja California sea considerado una de las Entidades con mayor sanidad en la república.

Así en la actualidad, el valle de Mexicali, donde se produce casi el 100% del trigo de la entidad, está considerado como zona libre de carbón parcial del trigo (SAGARPA, 2002) por las autoridades federales de México y de Estados Unidos desde 1997 y 1998, respectivamente. Lo anterior hace posible la oportunidad de exportación de grano y semilla libres de esta enfermedad. En época de cosecha del trigo, se establece vigilancia en los puntos de entrada al estado para detectar e impedir la introducción de trilladoras y camiones que transportaron trigo al estado, provenientes de lugares infestados por el hongo causante del carbón parcial.

- **Control químico.** Se han reportado algunos productos en aplicaciones foliares que han tenido un efecto importante en el control del carbón parcial (Singh y Prasad, 1980; Singh y Singh, 1985; Smilanick *et al.*, 1987; Figueroa y Valdés, 1991; Salazar-Huerta *et al.*, 1997; Figueroa-López y Alvarez-Zamorano, 2000; Fuentes-Dávila *et al.*, 2005; 2016; Fuentes-Dávila, 2007); y más recientemente Fuentes-Dávila *et al.* (2018b) reportaron que la efectividad biológica del Opus (epoxiconazol) fue de 98.2%, Jewel (epoxiconazol 11.50% + kresoxim-metil 11.50%) 97.7, Bemistop (propiconazol) 95.4 y Folicur (tebuconazol) 95.2%.
- **Control genético.** Aunque no se ha detectado inmunidad en variedades comerciales, se ha observado que existen diferencias genéticas en la susceptibilidad a la enfermedad. La más notable ha sido la existente entre los trigos cristalinos con un alto grado de resistencia, y los trigos harineros generalmente susceptibles. Debido a la presencia errática de la enfermedad en forma natural, tanto en la India como en México, la identificación de fuentes de resistencia genética, está basada en inoculaciones artificiales para que de esta manera se pueda hacer una selección confiable. Desde la década de los 80's, el programa de trigo en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) inició un proyecto de mejoramiento para resistencia a carbón parcial (Metzger, 1984), enfocado principalmente en trigo harinero, ya que esta especie es la más consumida por el hombre, pero también la que presenta los niveles más altos de susceptibilidad entre las especies afectadas. Los objetivos de este proyecto consisten en: a) la identificación de fuentes de resistencia a *T. indica*, b) hibridaciones para incorporar la resistencia en genotipos deseables, y c) la evaluación y selección de progenies para desarrollar líneas avanzadas resistentes que puedan ser utilizadas por los programas agrícolas nacionales, principalmente en aquellas regiones donde el carbón parcial representa un problema económico, político y social (Fuentes-Dávila, 1997). Algunos trigos harineros de Brasil, China y la India han mostrado resistencia a través de varios años de evaluación (Fuentes-Dávila y Rajaram, 1994). El programa colaborativo

de mejoramiento de trigo entre el CIMMYT y el INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias), ha logrado liberar algunas variedades moderadamente susceptibles a la enfermedad como Borlaug 100 (Camacho-Casas *et al.*, 2017), algunas moderadamente resistentes como CIANO M2018 (Chávez-Villalba *et al.*, 2021), y otras resistentes como Arivechi M92 (Camacho-Casas *et al.*, 1993) y Navojoa M2007 (Valenzuela-Herrera *et al.*, 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento. El experimento se realizó en las instalaciones del Campo Experimental Norman E. Bourlaug (CENEB) perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en la manzana 910 del Valle del Yaqui, Sonora, en las coordenadas geográficas: 27°22'3.01" N y 109°55'40.22" W, y a 37 msnm. Cuenta con un suelo de textura arcillosa y pH de 7.8.

Germoplasma experimental y siembra. Ciento cincuenta y siete líneas elite de trigo harinero (*Triticum aestivum* L.), producidas por el Programa Global de Trigo del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, se evaluaron para determinar su reacción a la inoculación artificial con el hongo *T. indica*, agente causal del carbón parcial. También se sembró la línea KBSUS como referencia por su susceptibilidad a *T. indica*. El experimento se llevó a cabo durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2020-2021 en tres fechas de siembra, la primera fecha se realizó el 28 de noviembre, la segunda el 8 de diciembre y la tercera el 17 de diciembre del 2020 con una densidad de 8 g de semilla por línea en camas con dos hileras, sembrando 70 cm en una de las dos hileras (Fig. 3). El testigo susceptible se sembró desfasado en 8 fechas de siembra, con el fin de tener plantas disponibles para inocular durante todo el período de inoculación del germoplasma experimental.



Figura 3. Siembra manual de líneas avanzadas elite de trigo harinero.

Manejo agronómico del cultivo. Previó a la siembra, el terreno se fertilizó con nitrógeno en forma de urea y fósforo; se dieron tres riegos de auxilio y se realizó un aporque. Para el control de maleza se aplicó Estarane ultra (300 ml p.c/ha) y Fulmina (300 ml p.c/ha) así como Everest plus (45 g p.c/ha) y también se dieron labores manuales.

Preparación de inóculo. Para preparar el inóculo, las teliosporas del hongo se obtuvieron de granos de trigo infectados de aproximadamente 1 año de edad, ya que las teliosporas presentan mejores porcentajes de germinación. Los granos infectados se colocaron dentro de un tubo de ensaye con una solución de agua con tween 20; para preparar dicha solución, se agrega una gota de tween por litro de agua y se agita suavemente hasta disolver. Luego se agitaron vigorosamente hasta que las teliosporas se soltaron de los granos, se cribaron utilizando una malla de 60 micrómetros (Fig. 4) y se dejaron reposar durante 24 h con el fin de propiciar un mejor porcentaje de germinación (Fuentes-Dávila y Figueroa-López, 2009).



Figura 4. Filtrado en una malla de 60 micrómetros.

Para la desinfección de las teliosporas se preparó una solución de hipoclorito de sodio al 0.6% con el producto comercial Cloralex, la cual se agregó a tubos de ensaye con teliosporas del hongo. Los tubos se agitaron brevemente y se

centrifugaron a 3,000 rpm, se desechó el sobrenadante y se agregó agua estéril para remover el exceso de cloro; se agitó y se centrifugó nuevamente a 3,000 rpm y se desechó el sobrenadante.

Bajo condiciones asépticas en cámara de flujo laminar, las teliosporas se transfirieron con una jeringa estéril a cajas Petri con agar al 2% (20 g de agar/L agua) (Fuentes-Dávila, 1984). Las teliosporas se distribuyeron tomando las cajas verticalmente con una mano y golpeando ligeramente sobre la otra. Las cajas con las teliosporas se incubaron a temperatura ambiente (18-22°C).

Las cajas se revisaron a contraluz y también con un microscopio compuesto a baja magnificación (3.2X) para asegurar que no hubiera contaminaciones. En caso de contaminaciones aisladas, éstas se pueden substraer, incluyendo una zona mayor que la afectada, utilizando una espátula delgada y esterilizada a la flama del mechero. Siete días después se empezó a observar la germinación de algunas teliosporas en donde se produjo un tubo germinativo o promicelio de donde se originan las basidiosporas o esporidios primarios (Fig. 5).

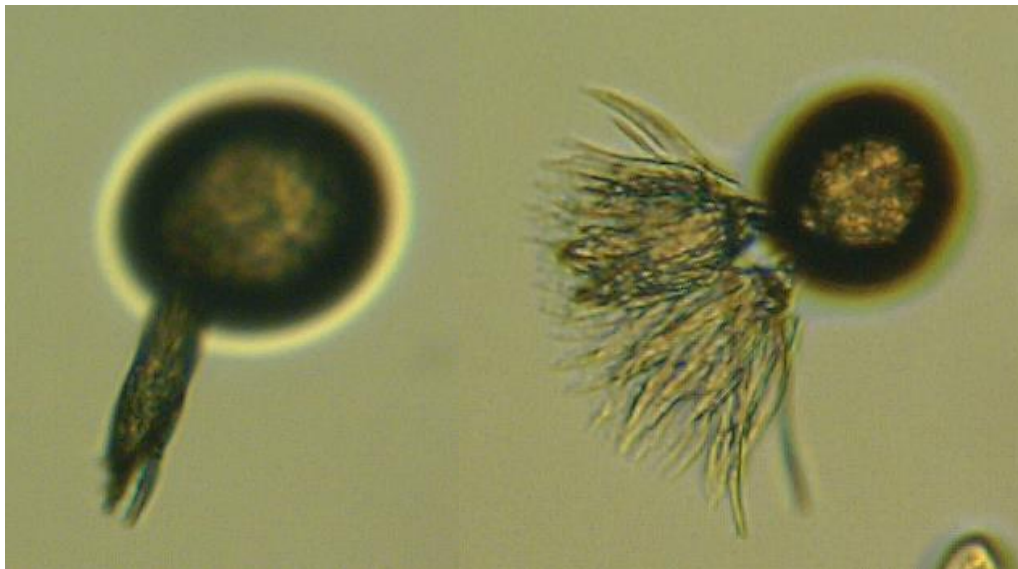


Figura 5. Teliosporas con tubo germinativo o promicelio y mostrando esporidios primarios.

Multiplicación del hongo. Una vez que se detectaron teliosporas germinando, se transfirieron secciones del medio agar con las teliosporas en germinación a cajas Petri con medio de cultivo papa-dextrosa-agar (PDA) (Fig. 6). Este procedimiento se realizó utilizando una espátula estéril a la flama del mechero. Ya que este organismo es de crecimiento lento, los segmentos de agar-hongo se colocaron invertidos sobre la tapa de las cajas Petri, para propiciar que el hongo produjera esporidios alantoides (Fig. 7), los cuales se pueden detectar 24 h después con el microscopio compuesto a 10X.

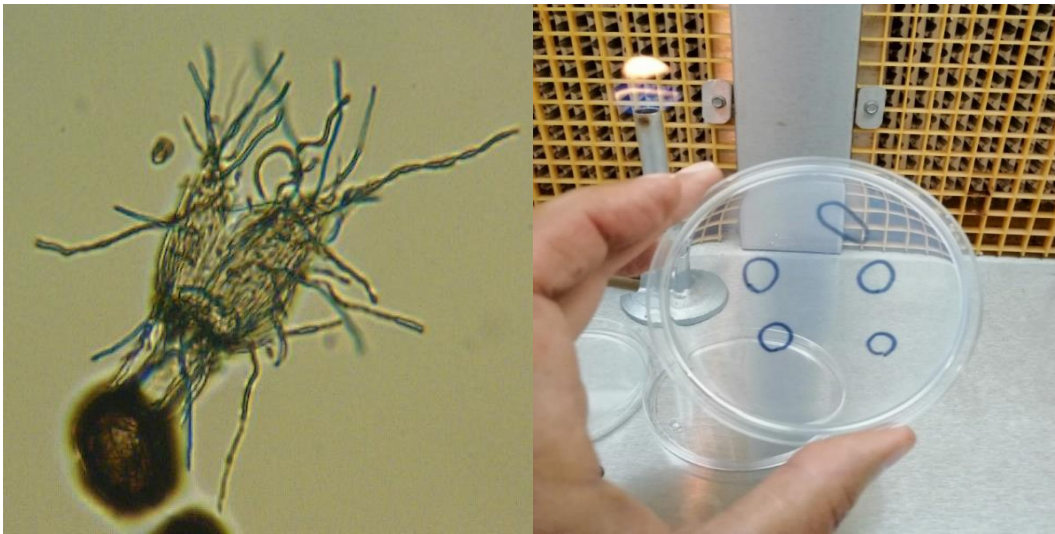


Figura 6. Identificación de áreas con teliosporas germinando.

Para multiplicar el hongo se agregaron aproximadamente 5 mL de agua esterilizada al medio de cultivo donde el hongo iniciaba la formación de colonias, se raspó suavemente la superficie del medio con una espátula estéril y con una jeringa estéril se transfirieron aproximadamente de 1.5 a 2.0 mL de la suspensión a otras cajas Petri con PDA; la suspensión se distribuyó sobre la superficie sosteniendo la caja con la mano y moviendo ésta hacia un lado y hacia el otro en forma horizontal e inclinándola ligeramente. Cada tercer día se inocularon de 10 a 20 cajas para tener inóculo suficiente y a tiempo, con base en las necesidades en el campo en cuanto al número de espigas a inocular en líneas que se encontraran en el estado de

embuche (estado 49 de acuerdo con la escala de Zadoks *et al.* 1974). Las cajas se dejaron a temperaturas de 18 a 25°C bajo condiciones normales de laboratorio. El excedente de la suspensión se descartó o se utilizó para inocular más cajas a los dos días después de la inoculación, una vez que el hongo se fijó al medio. Después de nueve días el excedente de humedad de cada caja se evaporó, y las cajas se sellaron con parafilm. Ya que el hongo cubrió toda la superficie de la caja (Fig. 8), se agregó agua y se raspó suavemente con la espátula para separar esporidios e hifas del medio. El producto obtenido se colectó en un vaso de precipitado, se filtró utilizando una gasa sobre un embudo con el fin de retener las partículas de agar y conglomerados de hifas que podrían tapar las agujas que se utilizan en el campo para realizar las inoculaciones, y se cuantificó la concentración de esporidios usando un hematocímetro. La multiplicación del inóculo se puede continuar utilizando los pedazos de agar-hongo originales, simplemente cambiando la tapa con dichos pedazos de PDA-hongo y colocándolos en la tapa de otras cajas con medio, o repitiendo de nuevo el proceso desde el aislamiento, desinfección, centrifugación y siembra de las teliosporas.

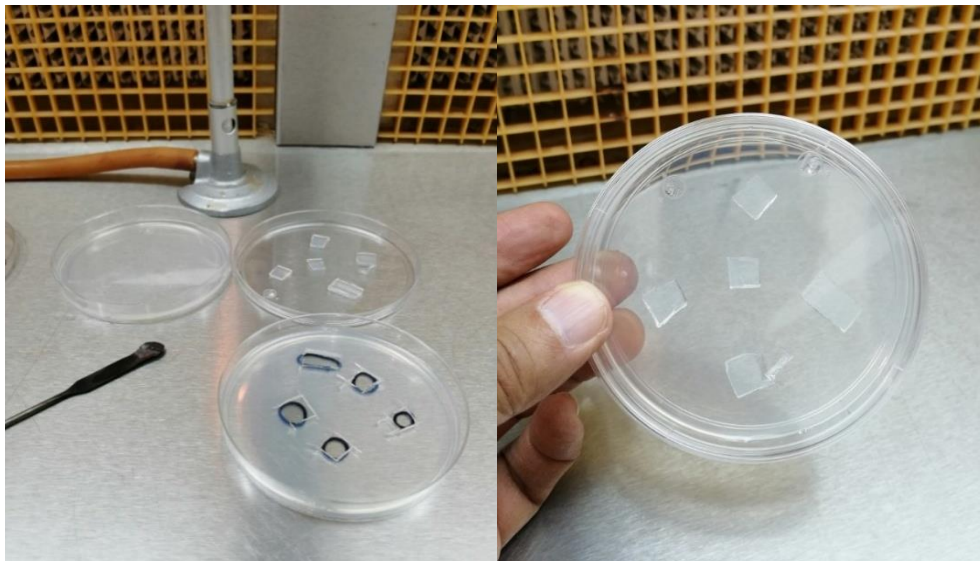


Figura 7. Colocación del pedazo de agar-hongo en forma invertida en la tapa de la caja Petri.



Figura 8. Crecimiento del hongo en medio de cultivo papa-dextrosa-agar.

Inoculaciones. Después del conteo de esporidios, se ajustó la concentración a 10,000/mL y de esta suspensión se utilizó 1 mL para inyectarlo con una jeringa hipodérmica en una espiga en estado de embuche, siguiendo el método de Chona et al. (1961), modificado por Fuentes-Dávila et al. (2001).

Las inoculaciones se realizaron durante los meses de enero, febrero y marzo de 2021, conforme las líneas alcanzaban su etapa de embuche; se seleccionaron y se marcaron 5 espigas por línea experimental con una etiqueta roja para su posterior identificación y así registrar su inoculación (Fig. 9). Para proveer de mayor humedad en el área de inoculación, se utilizó un sistema automatizado de microaspersión durante 20 minutos, tres veces por día. Se colocó malla protectora sostenida mediante un armazón a base de postes de metal, postes de madera y alambre recocido, para proteger las espigas inoculadas del daño de pájaro. (Fig. 10).

Cosecha y evaluación. La cosecha y trilla se llevó a cabo de manera manual en cada línea y en cada fecha, cortando las cinco espigas previamente marcadas e inoculadas. Las espigas se colocaron dentro de bolsas de papel previamente rotuladas para después ser evaluadas. La evaluación fue mediante inspección visual, realizando un conteo de granos infectados y sanos, y así calcular el porcentaje de infección de cada línea.



Figura 9. Inoculación de trigo con *Tilletia indica* mediante inyección en estado de embuche.



Figura 10. Sistema automatizado de microaspersión y malla antipájaro en el área experimental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El rango del porcentaje de infección de las líneas avanzadas en la primera fecha fue de 1.56 a 69.2% con un promedio de 29.18%, no hubo líneas sin granos infectados (Fig. 11). Dentro de las categorías de infección, tres líneas estuvo dentro del rango 0.1-5.0%, siete dentro de 5.1-10.0%, 81 dentro de 10.1-30% y 66 con más de 30% de infección (Fig. 12).

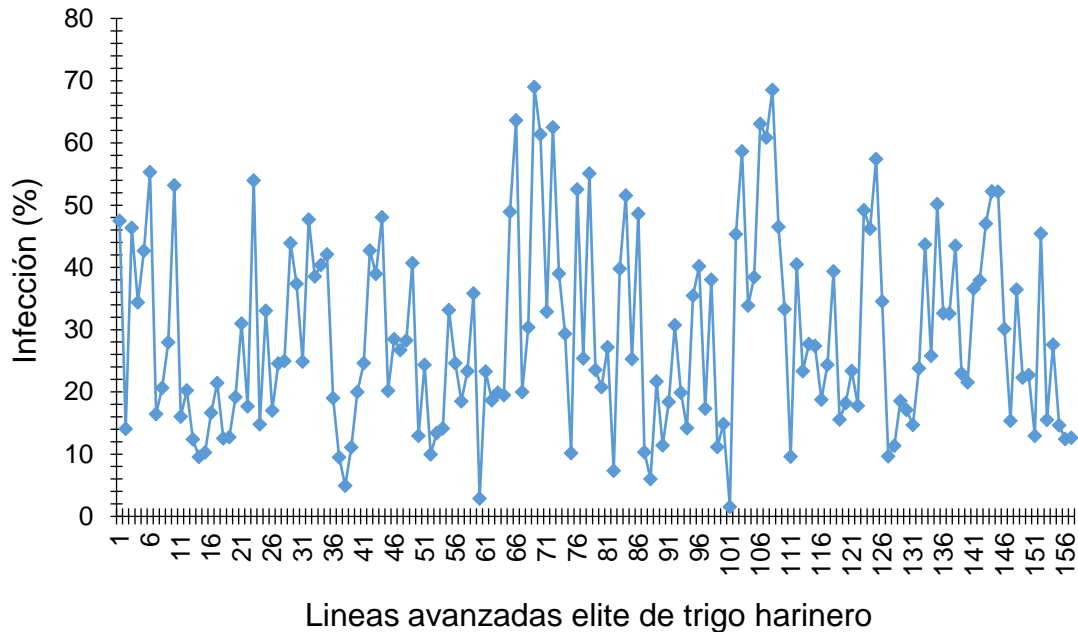


Figura 11. Porcentaje de infección con carbón parcial, de 157 líneas avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en la primera fecha de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

Las líneas que presentaron los porcentajes más bajos de infección en la primera fecha de siembra fueron: ESTOC/7/2*KISKADEE#1/5/KAUZ*2/MNV//KAUZ/3/MILAN/4/BAV92/6/WHEAR//2*PRL/2*PASTOR con 1.56, SUP152/BAJ #1//KIDEA con 2.87 y WBLL1*2/BRAMBLING*2//BAVIS*2/3/KACHU #1/KIRITATI//KACHU con 4.96, mientras que las líneas que presentaron los porcentajes más altos de infección en esa misma fecha de siembra fueron: PRL/2*PASTOR/3/WBLL1*2/SHAMA//KACHU/4/KACHU//WBLL1*2/BRAMBLING con 69.02%, SOKOLL/3/PASTOR//HXL7573/2*BAU/4/PASTOR//MILAN/KAUZ/3/BAV92/5/2*MUCUY con

68.52% y WBL1*2/BRAMBLING//TAM200/TUI/3/VILLAJUAREZF2009/4/KACHU*2/3/ND643//2*PRL/2*PASTOR con 63.64%.

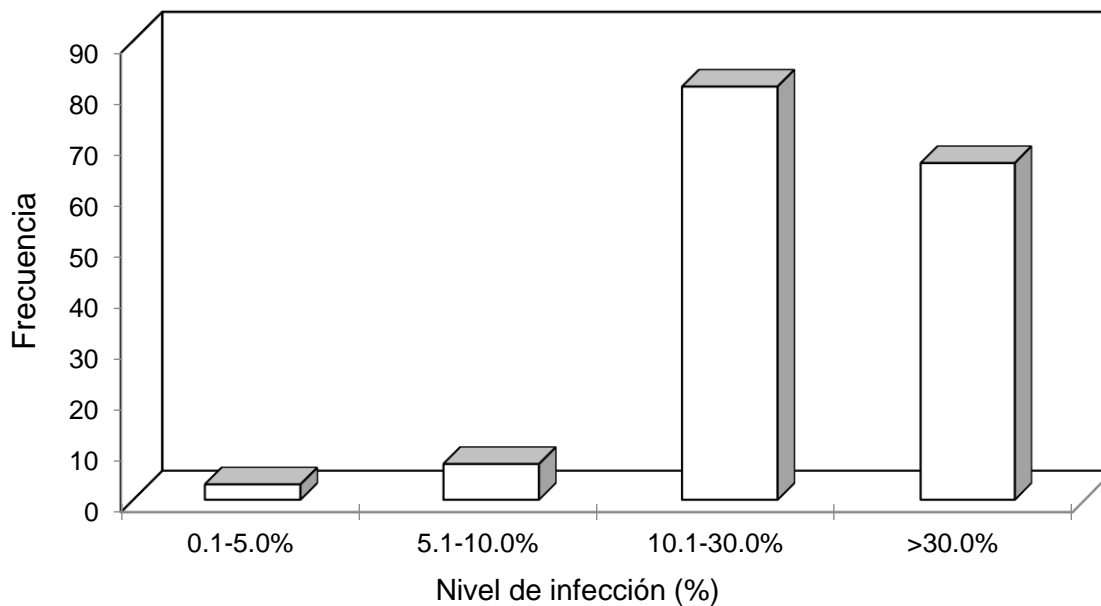


Figura 12. Categorías de infección (%) por carbón parcial, de líneas avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en la primera fecha de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

El rango del porcentaje de infección de las líneas avanzadas en la segunda fecha de siembra fue de 0.61 a 71.84% con un promedio de 29.63%, no hubo líneas sin granos infectados (Fig. 13); dos líneas estuvieron dentro del rango de infección 0.1-5.0%, seis dentro de 5.1-10.0%, 79 dentro de 10.1-30% y 70 con más de 30% de infección (Fig. 14).

Las líneas que presentaron los porcentajes más bajos de infección en la segunda fecha de siembra fueron: ESTOC/7/2*KISKADEE#1/5/KAUZ*2/MNV//KAUZ/3/MILAN/4/BAV92/6/WHEAR//2*PRL/2*PASTOR con 0.61 y ND643//2*PRL/2*PASTOR*2/3/HEILO/4/KAKURU con 3.38, mientras que las líneas que presentaron los porcentajes más altos de infección fueron: TUKURU//BAV92/RAYON/3/ND643/2*WBL1/4/BORL14 con 71.84%, BORL14*3//LALBMONO1*4/ PVN con 70.49% y PRL/2*PASTOR//KACHU/3/SEHER06/4/KACHU/3/WHEAR//2*PRL/2*PASTOR con 64.47%.

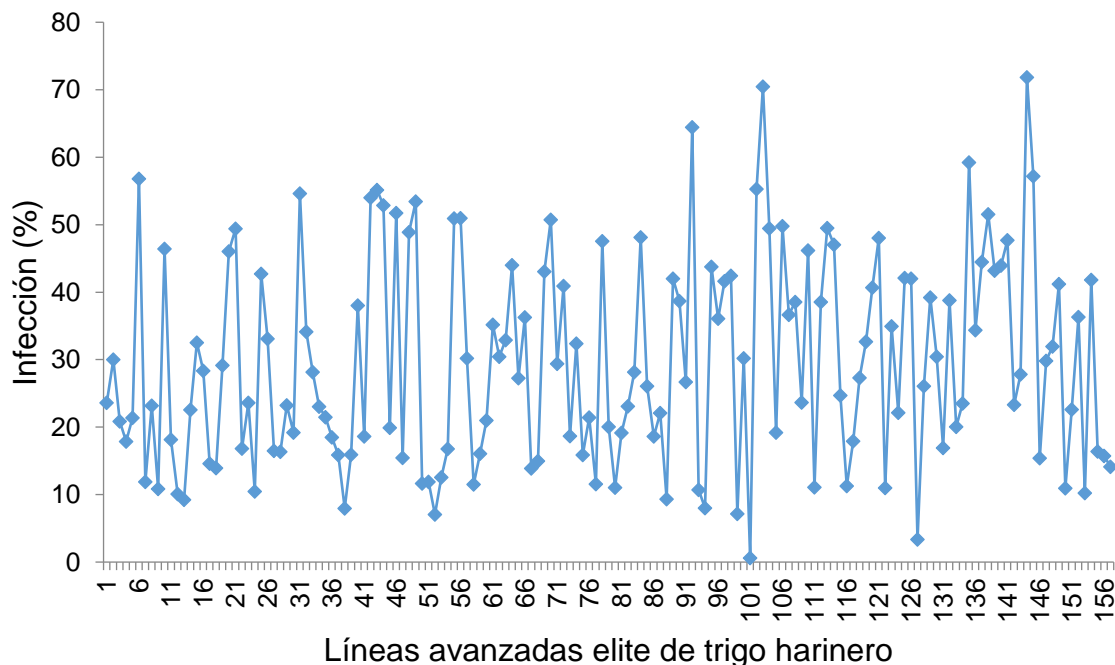


Figura 13. Porcentaje de infección con carbón parcial, de 157 líneas avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en la segunda fecha de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

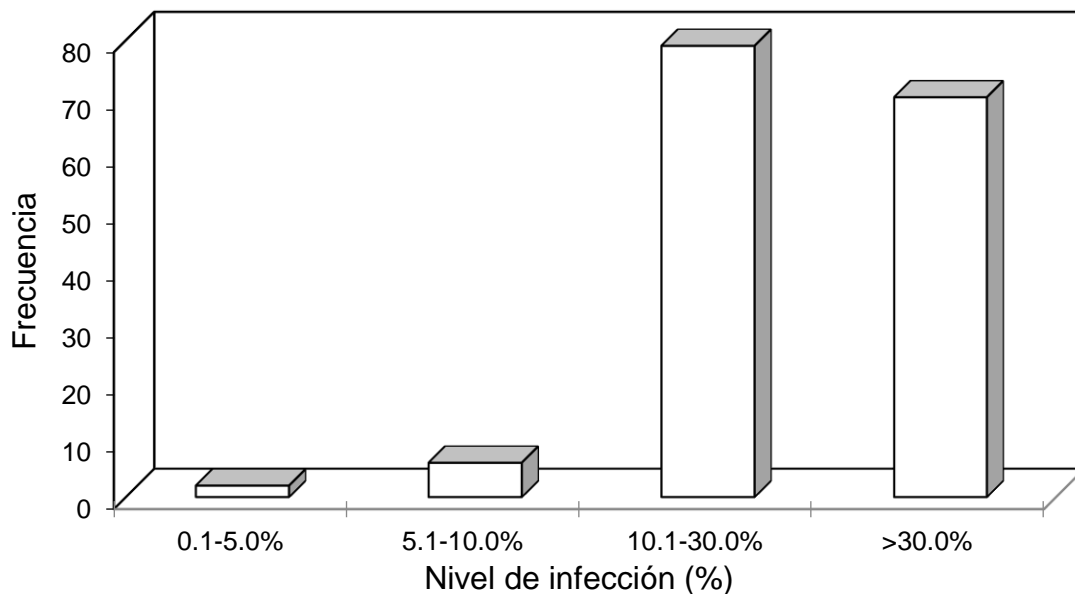


Figura 14. Categorías de infección (%) por carbón parcial, de líneas avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en la segunda fecha de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

El rango del porcentaje de infección de las líneas avanzadas en la tercera fecha de siembra fue 1.12 a 68.97% con una media de 27.96%; no hubo líneas sin granos infectados (Fig. 15). Dentro de las categorías de infección, tres líneas estuvieron dentro del rango 0.1-5.0%, cinco dentro de 5.1-10%, 89 dentro de 10.1-30% y 60 con más de 30% de infección (Fig. 16).

Las líneas que presentaron los porcentajes más bajos de infección en la tercera fecha de siembra fueron: ND643//2*PRL/2*PASTOR*2/3/HEILO/4/KAKURU con 1.12, WBLL1*2/BRAMBLING*2//BAVIS*2/3/KACHU#1/KIRITATI//KACHU con 1.67 y SUP152/BAJ#1//KIDEA con 4.33, mientras que las líneas que presentaron los porcentajes más altos de infección fueron: KASUKO/4/CIRO16*2/3/MUU #1/SAUAL//MUU con 68.97%, PFAU/WEAVER*2//TRANSFER#12,P88.272.2/3/WHEAR//2*PRL/2*PASTOR/4/SWSR22T.B./2*BLOUK#1//WBLL1*2/KURUKU/5/SWSR22T.B./2*BLOUK#1//WBLL1*2/KURUKU con 68.86%, y CROC_1/AE. SQUARROSA(205)//BORL95/3/PRL/SARA/TSI/VEE#5/4/FRET2/5/CIRO16/6/ONIX/KBIRD/7/KACHU/3/WHEAR//2*PRL/2*PASTOR con 65.97%.

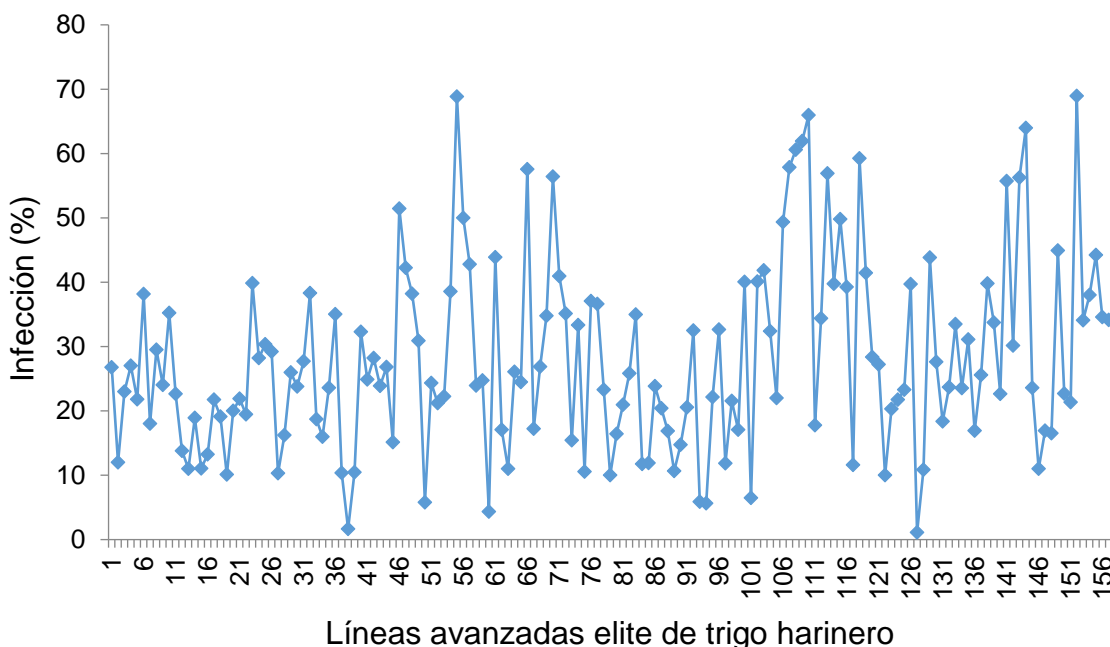


Figura 15. Porcentaje de infección con carbón parcial, de 157 líneas avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en la tercera fecha de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

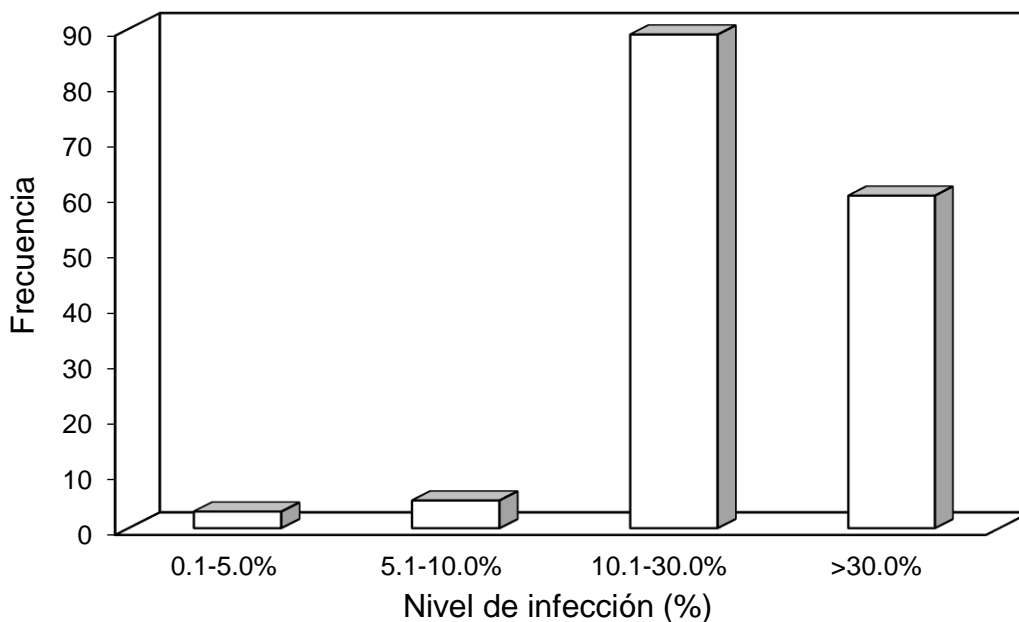


Figura 16. Categorías de infección (%) por carbón parcial, de líneas avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en la tercera fecha de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

El rango del porcentaje de infección global de las líneas avanzadas en las tres fechas de siembra fue de 2.89 a 62.68% con un promedio de 28.92%; no hubo líneas sin granos infectados (Fig. 17). Dentro de las categorías de infección, tres líneas estuvieron dentro del rango 0.1-5.0%, dos dentro de 5.1-10.0%, 83 dentro de 10.1-30% y 69 con más del 30% de infección (Fig. 18). El rango de infección del testigo susceptible fue de 65.9% el 24 de febrero, 2021, a 100% el 12 de febrero, con un promedio de 85.6%. El promedio de los tres porcentajes más altos de infección del testigo susceptible fue de 99.08%.

Las líneas que presentaron un porcentaje promedio global de infección menor a 5% en las tres fechas de siembra se muestran en el Cuadro 1 y las líneas que presentaron el mayor porcentaje global de infección fueron: TUKURU//BAV92 /RAYON/3/ND643/2*WBLL1/4/BORL14 con 62.68%, BORL14*3//LALBMONO1*4/ PVN con 57.01% y W15.92/4/PASTOR//HXL7573/2*BAU/3/WBLL1/6/VEE/MJI//2* TUI/3/2*PASTOR/4/BERKUT/5/PFAU/MILAN/7/ROBINK con 56.18%.

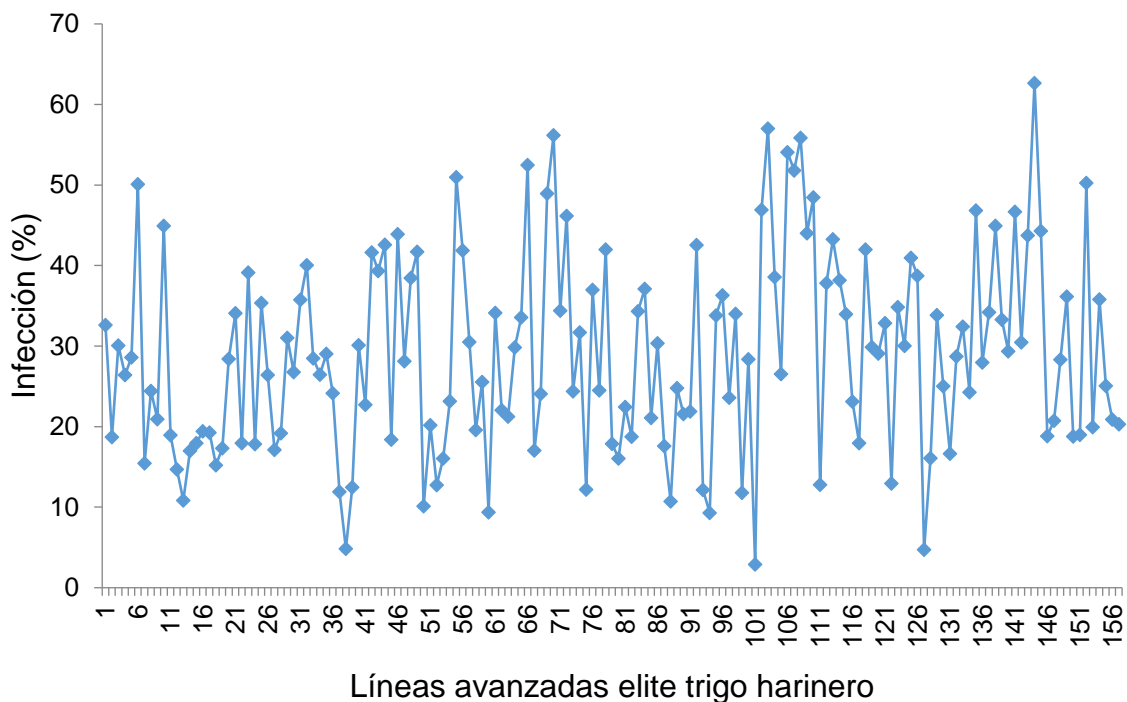


Figura 17. Porcentaje promedio de infección con carbón parcial, de 157 líneas avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en tres fechas de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

Aunque hubo solo tres líneas que presentaron un porcentaje global de infección menor al 5%, otras dos líneas tuvieron un porcentaje global de infección menor al 10%; las primeras están dentro de los grupos que se pueden utilizar como fuentes de resistencia (Fuentes-Dávila y Rajaram, 1994), y las dos últimas dentro de los límites aceptables para considerarse en el esquema para liberación como variedades y también para los programas de cruza. El grupo de líneas evaluadas en este experimento tuvieron un 1.81% de germoplasma resistente al carbón parcial y 43.9% de germoplasma susceptible.

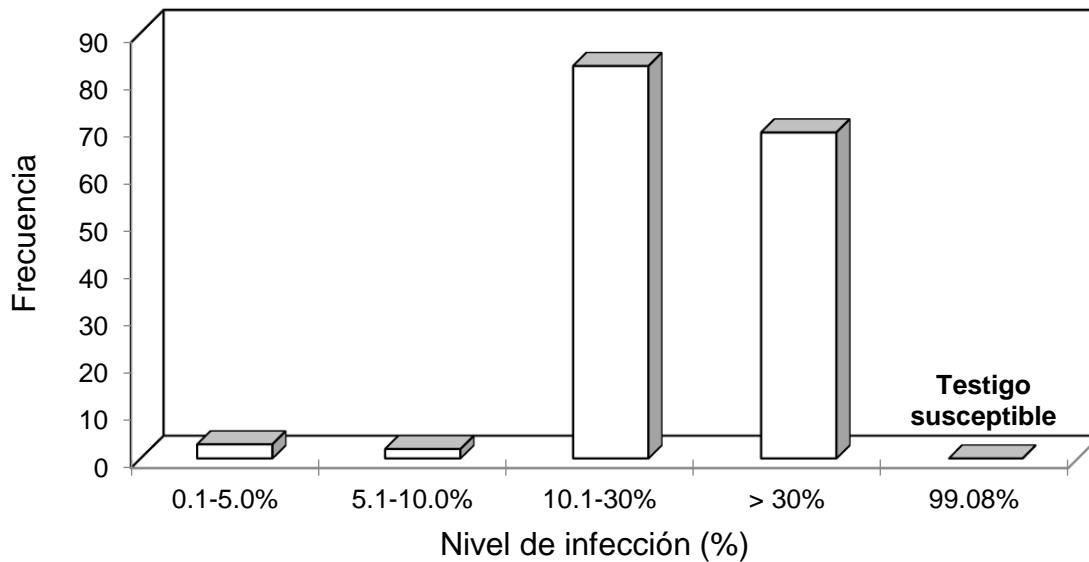


Figura 18. Categorías de infección (%) por carbón parcial, de líneas avanzadas elite de trigo harinero, inoculadas artificialmente en las tres fechas de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

Cuadro 1. Líneas avanzadas elite de trigo harinero que mostraron un promedio global menor a 5.0% de infección por carbón parcial, en inoculación artificial en tres fechas de siembra en el ciclo 2020-2021, en el Campo Experimental Norman E. Borlaug en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

No.	Pedigrí e historial de selección	Promedio
109	ESTOC/7/2*KISKADEE #1/5/KAUZ*2/MNV//KAUZ/3/ MILAN/4/ BAV92/6/WHEAR//2*PRL/2*PASTOR CMSS14B01796T-099TOPY-099M-099NJ-099NJ-13Y- 0WGY	2.89%
137	ND643//2*PRL/2*PASTOR*2/3/HEILO/4/KAKURU CMSS14Y01065S-099Y-0FUS-099Y-59B-0RGY-0RGY	4.73%
42	WBLL1*2/BRAMBLING*2//BAVIS*2/3/KACHU#1/KIRITATI //KACHU CMSS14Y01752T-099TOPM-099Y-099M-099NJ-099NJ- 6Y-0WGY	4.86%

Medina-Uriarte *et al.* (2013) evaluaron 180 líneas elite de trigo harinero con un 27.2% de germoplasma resistente y 9.4% de susceptible; en términos del menor

porcentaje de infección lo presentaron las líneas BAJ#1/3/KIRITATI//ATTILA*2/PASTOR con 0.28%, SAUAL/KIRITATI//SAUAL con 0.33%, TAM200/PASTOR//TOBA97/3/HEILO con 0.40%, otra línea hermana de SAUAL/KIRITATI//SAUAL con 0.47%, SAUAL/4/CROC_1/AE.SQUARROSA(205)//KAUZ/3/ATTILA/5/SAUAL con 0.71%, y dos líneas hermanas de MUNAL#1 con 0.75 y 0.76%. Fuentes-Dávila *et al.* (2014b) evaluaron 46 líneas elite de trigo harinero con un 41.3% de germoplasma resistente y 4.3% de susceptible; en esta evaluación el menor porcentaje de infección lo presentaron las líneas SWSR22T.B./5/KAUZ//ALTAR84/AOS/3/KAUZ/4/SW94.15464/6/2*PRL/2*PASTOR con 0.35%, MUNAL#1 con 0.82%, WHEAR/VIVITSI//WHEAR/3/PANDORA con 0.99%, NINGMAI96035/FINSI//HEILO/3/NAVJ07 con 1.13%, MUNAL/3/HUW234+LR34/PRINIA//PFAU/WEAVER/4/MUNAL#1 con 1.36%, BAVIS/VORB/5/CROC_1/AE.SQUARROSA(205)//BORL95/3/PRL/SARA//TSI/VEE#5/4/FRET2 con 1.48%, PRL/2*PASTOR/3/PFAU/WEAVER*2//CHAPIO con 1.89% y BABAX/LR42//BABAX/3/ER2000/4/NAVJ07 con 1.94%. En el año 2017, Fuentes-Dávila *et al.* reportaron que de 168 líneas elite de trigo harinero evaluadas para resistencia al carbón parcial, el 27.3% presentó resistencia y ninguna línea estuvo en la categoría de susceptible; 19 líneas mostraron un porcentaje de infección menor al 5%. En el 2018a, Fuentes-Dávila *et al.*, reportaron que 85 líneas elite de trigo harinero evaluadas para resistencia al carbón parcial, el 23.5% mostró resistencia y 1.17% mostró susceptibilidad. En la evaluación realizada en el ciclo 2020-2021, el testigo susceptible presentó un rango de infección de 65.97 a 100% con un promedio de 85.6% en 21 fechas de inoculación (enero 28 a marzo 1, 2021), indicativo de la buena efectividad del inóculo que se utilizó durante este experimento.

El mayor porcentaje de germoplasma evaluado en el ciclo 2020-2021 mostró susceptibilidad al carbón parcial, por lo que es importante continuar con las evaluaciones de campo para asegurar niveles aceptables de resistencia a esta enfermedad en los nuevos materiales promisorios de trigo harinero; esto hará factible el tener un cultivo comercialmente viable para los productores del noroeste de México y que satisfaga los parámetros organolépticos que requiere la industria molinera.

CONCLUSIÓN

De la inoculación artificial en campo en tres fechas de siembra con *Tilletia indica*, agente causal del carbón parcial de trigo, de 157 líneas avanzadas elite de trigo harinero. Las líneas que presentaron los promedios más bajos de infección de las tres fechas de siembra fueron: ESTOC/7/2*KISKADEE#1/5/KAUZ*2/MNV//KAUZ/3/MILAN/4/BAV92/6/WHEAR//2*PRL/2*PASTOR, ND 643//2*PRL/2*PASTOR*2/3/HEILO/4/KAKURU y WBLL1*2/BRAMBLING *2//BAVIS*2/3/KACHU#1/KIRITATI//KACHU. Estas líneas son candidatas como fuentes de resistencia al carbón parcial del trigo, y óptimas para su liberación como variedades y uso en los programas de cruza.

BIBLIOGRAFÍA

- Animal and Plant Health Inspection Service (APHIS). (1996). Karnal bunt: situation report update (March 29). USDA-APHIS, Plant Protection and Quarantine (<http://www.aphis.usda.gov/oa/bunt>).
- Bansal, R., Singh, D.V., and Joshi, L.M. (1983). Germination of teliospores of Karnal bunt of wheat. *Seed Research* 11:258-261.
- Bedi, S.K.S., Sikka, M.R., and Mundkur, B.B. (1949). Transmission of wheat bunt due to *Neovossia indica* (Mitra) Mundkur. *Indian Phytopathology* 2:20-26.
- Brennan, J.P., Warham, E.J., Hernandez, J., Byerlee, D., and Coronel, F. (1990). Economic Losses from Karnal bunt of wheat in Mexico. CIMMYT Economic Working Paper 90/02.
- Briggle, L.W., and Curtis, B.C. (1987). Wheat worldwide. pp: 1-32. *In: Wheat and Wheat Improvement*. 2nd Ed. Heyne, E. G. (ed.). American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 765 p.
- Camacho-Casas, M.A., Chávez-Villalba, G., Fuentes-Dávila, G., Figueroa-López, P., Huerta-Espino, J., Villaseñor-Mir, H.E., Félix-Fuentes, J.L. y Ortiz-Monasterio, J.I. (2017). BORLAUG 100, variedad de trigo harinero para el noroeste de México. INIFAP, Centro de Investigación Regional del Noroeste, Campo Experimental Norman E. Borlaug. Folleto Técnico No. 100. Cd. Obregón, Sonora, México. 32 p.
- Camacho-Casas, M.A., Félix-Valencia, P., Huerta-Espino, J., Salazar-Gómez, J.M. y Salazar-Huerta. F.J. (1993). Baviácora M92 y Arivechi M92: nuevas variedades de trigo harinero. Folleto Técnico Número 20. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Centro de Investigación Regional del Noroeste, Campo Experimental Valle del Yaqui. Ciudad Obregón, Sonora, México. 24 p.
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo (CIMMYT). (2011). Training to beat karnal bunt in Afghanistan. <http://blog.cimmyt.org/tag/karnal-bunt/>. Consultado el 20 de junio de 2021.

Chávez-Villalba, G., Borbón-Gracia, A., Díaz-Ceniceros, H.L., Alvarado-Padilla, J.I., Huerta-Espino, J., García-León, E. y Fuentes-Dávila, G. (2021). CIANO M2018: nueva variedad de trigo harinero para el noroeste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44(3):477-479.

Chona, B.L., Munjal, R.L., and Adlhaka, K.L. (1961). A method for screening wheat plants for resistance to *Neovossia indica*. *Indian Phytopathology* 14:99-101.

Cox, T.S., Bequette, R.K., Bowden, R.L., and Sears, R.G. (1997). Grain yield and breadmaking quality of wheat lines with the leaf rust resistance gene Lr41. *Crop Science* 37:154-161.

Crous, P.W., Van Jaarsveld, A.B., Castlebury, L.A., Carris, L.M., Frederick, R.D., and Pretorius, Z.A. (2001). Karnal bunt of wheat newly reported from the African continent. *Plant Disease* 85:561.

Da Luz, W.C., Mendes, M.A.S., Ferreira, M.A.S.V., and Urben, A.F. (1993). *Tilletia indica* on wheat in the south of the state of Rio Grande do Sul, Brazil and measures for eradication. *Fitopatologia Brasileira* 18:S329.

Dhaliwal, H. S. (1989). Multiplication of secondary sporidia of *Tilletia indica* on soil and wheat leaves and spikes and incidence of Karnal bunt. *Canadian Journal of Botany* 67:2387-2390.

Duran, R. (1972). Further aspects of teliospore germination in North American smut fungi II. *Canadian Journal of Botany* 50:2569-2573.

Duran, R., and Fischer, G.W. (1961). The Genus *Tilletia*. Washington State University Press. Pullman, WA, USA. 138 p.

Figuroa-López, P. y Álvarez-Zamorano, R. (2000). Opus (epoxiconazole): una nueva opción para controlar al Carbón Parcial del trigo (*Tilletia indica* Mitra) en aplicación foliar. pp. 31-34. En: G. Fuentes-Dávila (ed.). XIIth Biennial Workshop on the Smut Fungi. Sociedad Mexicana de Fitopatología, A.C. Puerto Vallarta, Jalisco, México. 65 p.

Figuroa-López, P., Fuentes-Dávila, G., Cortés-Jiménez, J.M., Tamayo-Esquer, L.M., Félix-Valencia, P., Ortiz-Enríquez, J.E., Armenta-Cárdenas, I., Valenzuela-

Herrera, V., Chávez-Villalba, G. y Félix-Fuentes, J.L. (2011). Guía para producir trigo en el sur de Sonora. Folleto para productores No. 39. INIFAP-CIRNO, Campo Experimental Norman E. Borlaug. Cd. Obregón, Sonora, México. 63 p.

Figuroa, L.P. y Valdés, A.J.C. (1991). Evaluación de fungicidas sistemáticos para el control del Carbón Parcial *Tilletia indica* (Mit.) en trigo en el Valle del Yaqui. Memorias XVIII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Fitopatología, del 24 al 26 de julio de 1991. Puebla, Puebla, México. (Resumen). p. 209.

Fuentes-Dávila, G. (1984). Biology of *Tilletia Indica* Mitra.M.S. Thesis. Department of Plant Pathology, Washington State University. Pullman, WA, USA.66 p.

Fuentes-Dávila, G. (1997). Carbón parcial del trigo: situación actual y perspectivas. pp. 105-118. Memorias del primer simposio internacional de trigo, 7 al 9 de Abril de 1997, Cd. Obregón, Sonora, México. 203 p.

Fuentes-Dávila, G. (2007). Chemical control of karnal bunt by foliar applications. *Phytopathology* 97(7):S37. Supplement.

Fuentes Dávila, G., Ammar, K., Figuroa López, P., Camacho Casas, M.A., Félix Valencia, P., Cortés Jiménez, J.M., Félix Fuentes, J.L., Chávez Villalba, G. y Ortiz Ávalos, A.A. (2014a). Reacción a la punta negra de líneas avanzadas de triticale durante el ciclo agrícola 2011-2012. pp. 345-350. Memorias del XVII Congreso Internacional de Ciencias Agrícolas. Octubre 9 y 10, 2014. Mexicali, Baja California, México. 622 p.

Fuentes-Dávila, G., and Duran, R. (1986). *Tilletia indica*: cytology and teliospore formation *in vitro* and in immature kernels. *Canadian Journal of Botany* 64:1712-1719.

Fuentes-Dávila, G., Félix-Valencia, P., Ayón-Ibarra, C.A., Figuroa-López, P., Camacho-Casas, M.A., Félix-Fuentes, J.L., Chávez-Villalba, G., and Rosas-Jáuregui, I.A. (2016). Biological effectiveness of several fungicides for control of karnal bunt (*Tilletia indica*) of wheat, in the field. *Annual Wheat Newsletter* 62:28-31.

Fuentes Dávila, G. y Figuroa López, P. (2009). Técnicas de laboratorio para la producción de inóculo de *Tilletia indica*. INIFAP, Centro de Investigación Regional

del Noroeste, Campo Experimental Valle del Yaqui. Folleto Técnico No. 62. Cd. Obregón, Sonora, México. 32 p.

Fuentes-Dávila, G., Figueroa-López, P., Cortés-Jiménez, J.M., Félix-Valencia, P., Camacho-Casas, M.A., Chávez-Villalba, G., Félix-Fuentes, J.L., and Ortiz-Ávalos A.A. (2013). Effect of the level of wheat seed infection with karnal bunt, on germination and tiller production. *Annual Wheat Newsletter* 59:45-48.

Fuentes-Dávila, G., Prakash-Singh, R., Rosas-Jáuregui, I.A., Félix-Fuentes, J.L., and Ayón-Ibarra, C.A. (2018a). Evaluation of bread wheat lines for resistance to karnal bunt. *Global Advanced Research Journal of Agricultural Science* 7(8):268-271.

Fuentes-Dávila Guillermo, Prakash-Singh Ravi, Vega-Ochoa Jesús Antonio, Figueroa-López Pedro, Camacho-Casas Miguel Alfonso, Félix-Fuentes José Luis y Chávez-Villalba Gabriela. (2014b). Evaluación de líneas elite de trigo harinero para resistencia al carbón parcial durante el ciclo 2013-14. pp. 383-388. *Memorias del XVII Congreso Internacional de Ciencias Agrícolas*. Octubre 9 y 10, 2014. Mexicali, Baja California, México. 622 p.

Fuentes-Dávila G., and Rajaram S. (1994). Sources of resistance to *Tilletia indica* in wheat. *Crop Protection* 13(1):20-24.

Fuentes- Dávila, G., Rajaram, S., and Van-Ginkel, M. (2001). Artificial Inoculation: An Efficient tool in Breeding for Resistance. *Ivth International Scientific Seminar of Plant Health 41st Annual Meeting of the American Phytopathological Society-Caribbean Division*. Varadero, Cuba, June 11-15, 2001.

Fuentes-Dávila, G., Rosas-Jáuregui, I.A., Ayón-Ibarra, C.A., Álvarez-Amado, K.D., Félix-Valencia, P., and Félix-Fuentes, J.L. (2018b). Biological effectiveness of Opus, Folicur, Jewel, and Bemistop for control of Karnal bunt (*Tilletia indica*) of wheat in the field. *Annual Wheat Newsletter* 64:30-33.

Fuentes-Dávila, G., Singh, R.P., Ayón-Ibarra, C.A., Rosas-Jáuregui, I.A., Félix-Valencia, P., Camacho-Casas, M.A., Félix-Fuentes, J.L., and Chávez-Villalba, G. (2017). Reaction of elite advanced bread wheat lines to karnal bunt under artificial

field inoculation, during the 2014-15 crop season. Annual Wheat Newsletter 63:30-33.

Fuentes-Dávila, G., Tapia-Ramos, E., Toledo-Martínez, J.A. y Figueroa-López, P. (2005). Evaluación de efectividad biológica de folicur 250 EW (Tebuconazol) para el control del carbón parcial (*Tilletia indica*) del trigo (*Triticum aestivum*), en el valle del Yaqui, Sonora, México, durante el ciclo de cultivo 2003-2004. Libro de Resúmenes, XIII Congreso Latinoamericano de Fitopatología, III Taller de la Asociación Argentina de Fitopatólogos. 19-22 de Abril, 2005. Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina. Resumen HC-29, página 271. 640 p.

Gardner, J.S., Allen, J.V., Hess, W.M., and Tripathi, R.K., (1983a). Sheath structure of *Tilletia indica* teliospore. *Mycologia* 75 (2):333-336.

Gardner, J.S., Hess, W.M., and Tripathi, R.K., (1983b). Surface rodlets of *Tilletia indica* teliospores. *Journal of Bacteriology* 154 (1):502-504.

Goates, B. J. (1988). Histology of infection of wheat by *Tilletia indica*, the Karnal bunt pathogen. *Phytopathology* 78:1434-1441.

Hanson, H., Borlaug, N.E., and Anderson, Y.R.G. (1982). Trigo en el Tercer Mundo. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. pp. 8-11.

Infoagro Systems. (2021). El cultivo del trigo (1ª parte). <https://www.infoagro.com/herbaceos/cereales/trigo.htm>. Consultado el 29 de septiembre del 2021.

Integrated Taxonomic Information System – Report (ITIS). (2021). *Triticum* L. https://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search_topic=TSN&search_value=42236#null. Consultado el 4 de octubre de 2021.

Khanna, A., Payak, M.M., and Mehta, S.C. (1966). Teliospore morphology of some smut fungi. I. Electron microscopy. *Mycologia* 58:562-569.

Khanna, A., and Payak, M.M. (1968). Teliospore morphology of some smut fungi. II. Light microscopy. *Mycologia* 60:655-662

Krishna, A., and Singh, R.A. (1982). Effect of physical factors and chemicals on the teliospore germination of *Neovossia indica*. *Indian Phytopathology* 35:448:455

Mathur, S.B., and Cunfer, B.M. (1993). Seed-borne Diseases and Seed Health Testing of Wheat. Danish Government Institute of Seed Pathology for Developing Countries. Hellerup, Denmark. 168 p.

Medina-Uriarte, Y., Fuentes-Dávila, G., Prakash-Singh, R., Figueroa-López, P., Camacho-Casas, M.A., Chávez-Villalba, G. y Félix-Fuentes, J.L. (2013). Evaluación de líneas elite de trigo harinero para resistencia al carbón parcial. pp. 405-409. Memorias del XVI Congreso Internacional de Ciencias Agrícolas. Octubre 24 y 25, 2013. Mexicali, Baja California, México. 781 p.

Metzger, R.J. (1984). Screening for genetic resistance in the field. In: Karnal Bunt (*Neovossia indica*) Disease of Wheat. pp. 15-17. Proceedings of a Conference, April 16-18, 1984, Ciudad Obregon, Sonora, Mexico. CIMMYT. 35 p.

Mitra, M. (1931). A new bunt of wheat in India. *Annals of Applied Biology* 18:178-179.

Mitra, M. (1935). Stinking smut (bunt) of wheat with a special reference to *Tilletia indica* Mitra. *Indian Journal of Agricultural Science* 5: 1-24.

Munjal, R.L. (1975). Status of Karnal bunt (*Neovossia indica*) of wheat in Northern India during 1968-1969 and 1969-1970. *Indian Journal of Mycology and Plant Pathology* 5(2):185-187.

Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable (OEIDRUS). (2002). Trigo situación nacional. <http://www.oeidrusbc.gob.mx/sispro/trigobc/Produccion/Mundial/Nacional2.pdf>. Consultado el 12 de septiembre, 2021.

Peña, R.J., Amaya, A. y Del Toro, E. (1992). Efecto del almacenamiento y del lavado de grano en las características de calidad de muestras de trigo (variedad Seri M82) con diferentes niveles de carbón parcial (*Tilletia indica*). En: Estado actual de la investigación sobre el carbón parcial en México, G. Fuentes-Dávila y G.P. Hettel (eds.). Reporte Especial de Trigo No. 7, México, D.F. CIMMYT. 24-32 p.

Prescott, J.M., Burnett, P.A., Saari, E.E., Ramsom, J., Bowman, J., de Milliano, W., Singh, R.P., and Bekele, G. (1986). *Wheat Diseases and Pests: A guide for field identification*. CIMMYT. Mexico, D.F. 135 p.

Rai, R. C., and Singh, A. (1978). A note on the viability of wheat seeds infected with Karnal bunt. *Seed Research* 6:188-190.

Robertson, R.W., and Luttrell, E.S. 1987. Ultrastructure of teliospore ontogeny in *Tilletia Indica*. *Mycologia* 79:753-763.

Roelfs, A.P. (1978). Estimated losses caused by rust in small grain cereals in the United States: 1918-1976. USDA. Mis. Pub. 1363.

Roelfs, A.P., Singh, R.P., and Saari, E.E. (1992). *Rust Diseases of Wheat: Concepts and methods of disease management*. Mexico, D.F. CIMMYT. 81 p.

Salazar-Huerta, F.J., Figueroa-Lopez, P., Smilanick, J.L., and Fuentes-Dávila, G. (1997). Evaluation of foliar fungicides for control of Karnal bunt of wheat during 1986-1989 in north western México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 15:73-80.

Salazar, H. F., Osada, S.K., Gilchrist, L.S. y Fuentes-Dávila, G. (1990). Evaluación de la resistencia de seis genotipos de trigo (*Triticum vulgare* L.) al carbón parcial causado por el hongo *Tilletia indica* Mitra en invernadero. *Revista Mexicana de Fitopatología* 8:145-152.

Scade, J. (1981). *Cereales*. Editorial Acribia. Zaragoza, España. 93 p.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-001-FITO-2001, por la que se establece la campaña contra el carbón parcial del trigo. *Diario Oficial*, (viernes) 8 de febrero de 2002. México, D.F. pp. 1-18.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2019). *Anuarios estadísticos de la producción agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Consultado 10 de Junio, 2021.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2021). Crecerá 10 por ciento producción de trigo en Sonora en ciclo agrícola otoño-invierno 2020-2021. Comunicado B261. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crecera-10-por-ciento-produccion-de-trigo-en-sonora-en-ciclo-agricola-otono-invierno-2020-2021?idiom=es>. Consultado el 10 de Junio, 2021.

Sekhon, K.S., Saxena, A.K., Randhawa, S.K., and Gill, K.S. (1980). Effect of Karnal bunt disease quality characteristics of wheat. *Bulletin of Grain Technology* 18 (3):208-212.

Sekhon, K.S., Randhawa, S.K., Saxena, A.K., and Gill, K.S. (1981). Effect of washing/steeping on the acceptability of Karnal bunt infected wheat for bread, cookie and chapati making. *Journal of Food Science and Technology* 18:1-2.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2021). Anuario estadístico de la producción agrícola. Resumen nacional por estado. Trigo grano. Ciclo otoño-invierno. Riego + temporal. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> Consultado octubre 19, 2021.

Servicios Estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAOSTAT). (2021). Datos sobre alimentación y agricultura. Producción. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>. Consultado el 28 de septiembre de 2021.

Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). (2019a). Carbón parcial del trigo. Aviso público del riesgo situación actual. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/466596/20._Aviso_publico_Carbon_parcial_del_trigov2.pdf. Consultado el 7 de octubre de 2021.

Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). (2019b). Carbón parcial del trigo, *Tilletia indica* Mitra. Ficha Técnica No. 24. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/466595/2_Ficha_Tecnica_Carbon_parcial_del_trigo.pdf. Consultado el 14 de octubre, 2021.

Singh, D.V., Agarwal, R., Shrestha, J.K., Thapa, B.R., and Dubin, H.J. (1989). First report of *Tilletia indica* on wheat in Nepal. *Plant Disease* 73:273.

Singh, A., and Prasad, R. (1980). Control of Karnal Bunt of wheat by a spray of fungicides. *Indian Journal of Mycology and Plant Pathology* 10:2. (Abstract).

Singh, S.L., and Singh, P.P. (1985). Effect of some fungicide applications against Karnal Bunt (*Neovossia indica*) of wheat. *Indian Phytopathology* 38:593. (Abstract).

Smilanick, J.L., Hoffman, J.A., Cashion, N.L., and Prescott, J.M. (1987). Evaluation of seed and foliar fungicides for control of Karnal Bunt of wheat. *Plant Disease* 71:94-96.

Smilanick, J.L., Hoffmann, J.A., and Royer, M.H. (1985). Effect of temperature, pH, light, and desiccation on teliospore germination of *Tilletia indica*. *Phytopathology* 75:1428-1431.

Smilanick, J.L., Hoffmann, J.A., Secret, L.R., and Wiese, K. (1988). Evaluation of chemical and physical treatment to prevent germination of *Tilletia indica* teliospores. *Plant Disease* 72:46-51.

Torarbi, M., Mardoukhi, V., and Jalaiani, N. (1996). First report on the occurrence of partial bunt on wheat in the southern parts of Iran. *Seed and Plant* 12:8-9.

Torabi, M., and Nazari, K. (1998). Seedling and adult plant resistance to yellow rust in Iranian bread wheats. *Euphytica* 100:51-54.

Valenzuela-Herrera, V., Fuentes-Dávila, G., Figueroa-López, P., Chávez-Villalba, G., Félix-Fuentes, J.L. y Mendoza-Lugo, J.A. (2011). Navojoa M2007, variedad de trigo harinero para el noroeste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34(1):73-76.

Watkins, J.E. (2013). Black point disease of wheat. University of Nebraska-Lincoln. http://baylor.agrilife.org/files/2011/06/blackpointnebguide_2.pdf. Consultado el 30 de septiembre del 2021.

Wiese, M.V. (1987). *Compendium of Wheat Diseases*. APS Press. The American Phytopathological Society. St. Paul, MN, USA. 112 p.

Zadoks, J.C., Chang, T.T., and Konzak, C.F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14:415-421.

Zhang, Z., Lange, L., and Mathur, S.B. (1984). Teliospore survival and plant quarantine significance of *Tilletia indica* (causal agent of Karnal bunt) particularly in relation to China. *European Plant Protection Bulletin* 14:119-128.

Zwer, P.M., and Qualset, C.O. (1994). Genes for resistance to stripe rust in four spring wheat varieties. 2. Adult plant responses. *Euphytica* 74:109-115.