

## Seguridad alimentaria: el hongo Ug99 una amenaza mundial a los cultivos de trigo

Gerardo Reyes Guzmán<sup>§</sup>

Universidad De la Salle Bajío-*Campus* Salamanca. Av. Universidad núm. 522, Colonia San Juan de Razos, Salamanca, Guanajuato, México. CP. 36782. Tel. 01 (464) 6474369.

<sup>§</sup>Autor para correspondencia: reyesg@delasalle.edu.mx.

### Resumen

El presente ensayo se propone investigar el estado del arte en materia del hongo Ug99 considerado por organismos internacionales como una de las principales amenazas a la seguridad alimentaria mundial. Para ello se dimensiona la importancia de la oferta y demanda de trigo a nivel internacional y se estima el daño que podría causar un brote del hongo Ug99. Asimismo, se analizan los orígenes, evolución, dispersión geográfica y clasificación de la roya de tallo para diferenciar sus tipos, razas y peligrosidad de infección de los diferentes genes contenidos en el trigo. En este contexto se documentan las más recientes evidencias de su presencia y las estrategias para su control y combate. Finalmente, se concluye que inclusive México es vulnerable en caso de que se presentara un brote epidemiológico en Norteamérica causado por el Ug99, tanto por el lado de la producción como del consumo.

**Palabras clave:** cultivos de trigo, roya de tallo amarilla, roya de tallo negra, seguridad alimentaria, Ug99.

Recibido: mayo de 2019

Aceptado: junio de 2019

## Antecedentes

En el contexto de seguridad alimentaria, un artículo publicado por el semanario alemán Die Zeit, Kerstin Hoppenhaus (2017) advierte del peligro que representa el resurgimiento del hongo Ug99, también conocido como *puccinia graminis* o roya de tallo negra para el cultivo de trigo a nivel mundial. Según Hoppenhaus (2017), en 2016 se produjeron 760 millones de toneladas de trigo a nivel mundial, y para 2017, se estimaba una caída a 740 millones de toneladas de trigo. La producción ha crecido a un promedio anual de 2.2% pasando de 230 millones de toneladas en 1961 a 760 millones en 2016. La producción promedio es de 3-4 t ha<sup>-1</sup>, pero se llegan a producir bajo condiciones favorables hasta 14 t ha<sup>-1</sup>.

El trigo cubre 19% de las calorías de los seres humanos en forma de pan, espagueti, chapata, pasta, etc. Aproximadamente 2.5 mil millones de personas que viven con menos de dos dólares al día (Naciones Unidas, 2015), dependen del trigo como alimento básico, por lo que ante una posible contracción de la oferta, tendrían que enfrentar mayores precios con lo cual surgiría una crisis alimentaria mundial. El potencial de daño se estima en 50 millones de hectáreas de trigo o 25% del área destinada a ese cultivo a nivel mundial con una aportación de 19% de la producción global.

Lo preocupante es que Singh *et al.* (2011) considerado como uno de los expertos más prestigiados en el tema declaró que en la mayor parte de las regiones en el mundo donde se cultiva trigo, existen condiciones favorables para una infección de roya de tallo, lo cual supone un peligro de brote epidemiológico. Esta situación, además del hecho de que las variedades de trigo son susceptibles al contagio del Ug99, así como otros patógenos relacionados, significa que nos encontramos ante el peligro de un desastre en la producción de trigo que podría vulnerar la seguridad alimentaria a nivel mundial.

El presente ensayo se propone elaborar un análisis exploratorio-descriptivo que parte de las siguientes preguntas. ¿Qué es el hongo Ug99? ¿dónde y cuándo surgió? ¿cuáles son sus características principales y por qué se piensa que puede causar un problema de seguridad alimentaria a nivel global? Para dar respuesta a estas preguntas, hemos dividido el escrito en cuatro apartados. En el primero se explican los antecedentes del *puccinia graminis* de acuerdo a la historia y partiendo de los logros alcanzados por el premio Nobel de la paz en 1970, Norman Borlaug.

En el segundo se detallan las características principales, los tipos de hongo que existen y las razas más peligrosas, así como los genes de trigo que han sido atacados por el hongo. En el tercero abordaremos las estrategias que se aplican para controlar y/o erradicar la amenaza del Ug99. En el cuarto apartado documentamos las apariciones más recientes del Ug99 en Europa como evidencia de su proceso de mutación y adaptación. Al final concluimos que la lucha contra el hongo Ug99 no ha concluido, a pesar de los significativos avances de la ciencia.

La roya de tallo equivale a la polio para la agricultura. Según Koerner (2010), William Wagonire, discípulo de Norman Borlaug, premio Nobel de la paz 1970 y padre de la agricultura moderna, fue quien descubrió la raza Ug99. Hay rastros de la *Puccinia graminis* en sitios arqueológicos de Israel pertenecientes a la edad de bronce, inclusive los romanos adoraban a un dios de nombre Robigus por su poder de defenderlos contra la roya y cada 25 de abril celebran una festividad llamada Robigalia en donde sacrifican a perros pelirrojos en honor a la deidad. Se sabe que los primeros pobladores ingleses de Massachusetts sufrieron pérdidas considerables en sus cultivos de granos en el siglo XVII y que en Mesoamérica la plaga se conocía como chahuistle.

Tanto en el siglo XIX, como en el XX, la plaga atacó las grandes planicies de Norteamérica. Uno de los desastres más importantes tuvo lugar en medio de la I Guerra Mundial, cuando el *Puccinia graminis* afectó a 200 millones de bushels de trigo, equivalentes a una tercera parte del consumo nacional. En 1917, el gobierno de los Estados Unidos de Norteamérica ordenó la erradicación de agracejos (*Berberis* sp.), planta en donde se creía que se hospedaba el *Puccinia graminis* y en donde el trigo era escaso. Rouse (1935) explica que en 50% de los cultivos de trigo de Minnesota y Dakota, así como 25% de la producción total se perdieron durante la epidemia de roya de tallo tipo Race56= MCCFC que atacó a los Estados Unidos de América en aquel año (Rouse, 2013).

En la década de los 40 del siglo pasado, cuando la II Guerra Mundial hacía difícil la investigación filantrópica, la Fundación Rockefeller puso su atención en México, donde campesinos desarraigados sufrían de hambre y desnutrición crónica. En 1944 esa Fundación envió al joven agrónomo Norman Borlaug a México para poner fin al problema. Borlaug halló la presencia de roya de tallo en los cultivos de trigo señalándola como la principal causa del hambre. Borlaug se dio a la tarea de buscar un gen resistente a la *Puccinia graminis* a través de un proceso de hibridación. Tras varios intentos, creó el *stem rust* 31, al que bautizó como Sr31, un gen extraído derivado del centeno y capaz de resistir la *Puccinia graminis*. El éxito fue fenomenal y el gen se comenzó a repartir por todo el mundo a través del Centro Internacional del Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

El Sr31 fue la piedra angular de la revolución verde y para 1970 la roya de tallo había sido erradicada, salvando a cientos de millones de seres humanos de la hambruna. Norman Ernest Borlaug fue galardonado con el Premio Nobel de la Paz en 1970 y la *Puccinia graminis* dejó de ocupar a los investigadores excepto para fines militares. Durante la Guerra Fría, los norteamericanos desarrollaron una bomba de racimo compuesta de plumas de pavo infestadas con esporas de *Puccinia graminis*.

Se cree que estas bombas fueron destruidas al acordar renunciar al uso de armas bacteriológicas. No obstante, el descubrimiento de William Wagoire marcó un hito al cerciorarse de la presencia de roya de tallo en un centro de investigación de cultivos ubicado en Kalengiere, Uganda, en 1998. Wagoire contactó de inmediato a Ravi Singh, director de incubación de trigo en el CIMMYT, quien confirmó que una nueva patología en la raza de roya de tallo había sido detectada en una zona apartada en Uganda, capaz de abatir al Sr31 (Koerner, 2010). Jin (2008), otro reconocido experto en el tema explicó que también el Sr24, localizado en la región del Este de África, es vulnerable, por tanto, los cultivos comerciales con resistencia a la roya de tallo basada en los genes Sr24 y Sr 31, debían ser supervisados cuidadosamente para evitar un brote potencial epidemiológico.

La última epidemia más severa tuvo lugar en Etiopía durante 1993-4 cuando el cultivo de trigo tipo *Enkoy* sufrió grandes pérdidas. Las tres décadas siguientes no registraron amenazas serias. No obstante, se halló la presencia de dos nuevas enfermedades: herrumbre de hojas (*leaf rust*) causado por le *Puccinia triticina* y la roya de tallo amarilla (*yellow rust*) causada a su vez por *Puccinia striiformis*. También hay pruebas de que el tipo de cultivos de trigo que se siembran en Paquistán, la India y China, son susceptibles a contraer el Ug99.

El Dr. Norman E. Borlaug advirtió al mundo del serio peligro que representaba este hongo para la seguridad alimentaria. A partir de ese momento, fundó la iniciativa Borlaug Global Rust (BGRI) que tiene su página en: <http://www.globalrust.org> y que se ha propuesto como principal objetivo

mitigar el peligro que representa esta plaga. Comenzó con 15 países en 2009 y para 2011 ya eran 20. Con el BGRI trabajan también el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y el Durable Rust Resistance in Wheat Project (DRRW) de la Universidad de Cornell. La BGRI concentra muestras, lleva a cabo pruebas bajo las más estrictas normas de bioseguridad y es la que mejor conoce el hongo Ug99.

La BGRI lanzó en 2005 cuatro recomendaciones básicas para reducir el riesgo de una pandemia: a) monitoreo de la expansión del Ug99 más allá de África, para poder intervenir a tiempo; b) actualizarse en la publicación de genes y germoplasmas resistentes; c) distribución a nivel mundial de fuentes, suministros e incubación de resistentes; y d) experimentar con nuevas variedades de genes y germoplasmas resistentes en plantas adultas de alta productividad. Según Ravi (2011) existen dos tipos de trigo el *hexaploide*, usado para producir pan (*triticum aestivum*) y el *tetraploide* o trigo duro (*triticum turgidum* var. *durum*) para la producción de pasta seca y sémola.

En contraste con el trigo para pan, las variedades y germoplasmas de trigo duro presentan una resistencia de 40% a 60% de los casos al Ug99. En virtud de que 90% de las variedades de cultivos son susceptibles a contraer el hongo Ug99, este hongo es considerado como una seria amenaza no solo a la producción del cereal, sino a la seguridad alimentaria mundial. Ravi (2011) afirma que el trigo ocupa 20% en el alimento humano, es el segundo cultivo que más calorías aporta a la dieta de las personas viviendo en países subdesarrollados y su principal fuente de proteínas. El trigo proporciona a 4.5 mil millones de personas en 94 países, 21% de calorías y 20% de proteínas que consumen en alimentos.

Se cultiva en 215 millones de hectáreas alrededor del mundo desde el ecuador hasta latitudes de 60 norte y 44 sur y altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 3 000 msnm. En su artículo titulado 'The emergence of Ug99 Races of Stem Rust Fungus is a Threat to World Wheat Production', Ravi (2011) señalaba que se producían 630 millones de toneladas anuales, de las cuales 50% se originaban en los países subdesarrollados. Según sus cálculos respecto al aumento de la demanda de trigo en esos países, esperaba aumentaría 60% para 2050. Por otro lado, vaticinaba una caída en la producción de trigo 29% debido a factores como el calentamiento global derivado del cambio climático.

Estas proyecciones se deterioran con el creciente uso de fertilizantes y sistemas de riego, nuevas enfermedades y cepas de plagas tal y como ocurre con el hongo Ug99. El riesgo actual lo representa el gran flujo migratorio, así como el número de personas, calculada en mil millones de seres humanos, que se vería afectado en caso de una epidemia. Si bien el riesgo es alto, deben ocurrir una serie de factores para que el Ug99 pudiera detonar una crisis en los cultivos de trigo comerciales. Según Brian Steffenson, un experto en patologías de granos de la Universidad de Minnesota, más de mil millones de vidas estarían en peligro. El 90% de cultivos de trigo mundial carecen de protección contra el Ug99 y si no se ataca, las hambrunas se podrían desatar desde el mar rojo hasta las estepas mongolas.

China e India son los grandes consumidores de trigo y en caso de presentarse una pandemia con el Ug99, su población se vería afectada, principalmente la rural; países como Paquistán y Afganistán, naciones fuertemente dependientes del trigo importado, se consideran vulnerables. El hongo ha sido también detectado en Irán y el Sur de Asia, hasta el Punjab de donde obtienen su alimento cientos de millones de hindúes y paquistanés.

## El Ug99: características, tipos y razas

Según la SAGARPA (2016), al Ug99 también se le conoce como roya de tallo negro. La enfermedad es causada por el hongo *Puccinia graminis* Pers. f sp. *tritici* Eriks. and *E. Henn* y su efecto ha sido históricamente devastador para la cosecha de trigo, convirtiéndose en la patología más temeraria entre los productores de trigo. La SAGARPA la tiene clasificada de manera taxonómica como: reino: *Fungi*, Phylum: *Basidiomycota*; clase: *Pucciniomycotina*, subclase: *Pucciniomicetes*, orden: *Pucciniales*, familia: *Pucciniaceae*, género: *Puccinea*, especie: *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*. La roya de tallo del trigo raza Ug99, también es designada como TTKSK con base en la nomenclatura norteamericana. Bhavani *et al.* (2016) por su parte asegura que habían surgido nuevas razas: TTKST, TTTSK y más recientemente TTKTT.

Esta nomenclatura se le atribuye a Wanyera (2009). aMamdouh *et al.* (2013); por ejemplo, identifica cuatro variantes más del Ug99: TTKSF, TTKSP, PTKSK y PTKST. Según Singh (2011) el Ug99 no solo afecta a los genes de trigo Sr31 y Sr38, presentes en el trigo tanto en Europa como en Australia, sino es susceptible de contagiarse a otros presentes en todo el mundo. En 2006 el Ug99 también afectó al Sr24 en Kenia, Singh (2008). La diversidad entre las diferentes razas de hongo es bien conocida y se ubica predominantemente en África del Este, siendo Uganda, cuna del Ug99.

En esas regiones los hongos encuentran condiciones climáticas ideales, con temperaturas templadas, sin inviernos exageradamente fríos y lluvias regulares. Asimismo, encuentran amplios cultivos de trigo a lo largo del año que los hongos usan para reproducirse. El aire y los rayos ultravioleta ayudan al hongo en el proceso de crecimiento y mutación con lo cual logran diversificarse.

El hongo Ug99, al igual que los parásitos, posee varias formas de reproducirse. En unos casos las células del hongo se separan para producir un clon. Esta clonación tiene lugar en los cultivos de trigo y se da en forma masiva y acelerada. En otros casos se funden dos células de hongo, mezclan su código genético y se reproducen. Aquí se trata de un proceso similar a la reproducción de los mamíferos. Si bien esta forma es más lenta, posibilita en algunos casos modificaciones radicales. Esta sexualidad en el hongo tiene lugar en los llamados agracejos (*Berberis vulgaris*) o arbustos. La presencia de este tipo de arbustos se observó en los lugares en donde recientemente se hallaron pruebas de un posible derivado del Ug99 en Horstberg, Alemania.

Uno de los expertos en agracejos relacionados con el hongo Ug99 es el profesor Jin (2008) de la Universidad de Minnesota, especialista en patología botánica y asesor del Ministerio de Agricultura del gobierno norteamericano. Jin (2008) lleva a cabo un análisis genético de los brotes de rolla de tallo negra en todo el mundo. La preocupación de Jin es que lo que se halló en Horstberg, Alemania, pudiera presentarse en cualquier otro lugar. En esta hipótesis, la presencia de los agracejos parece ser la clave. Los agracejos proceden de Asia y se internaron a Europa y Norteamérica gracias a la migración siendo muy utilizados como arbusto para establecer perímetros, principalmente con el propósito de proteger la cría de animales y la erosión de suelos. Sus pequeños frutos rojos son una fuente sustancial de vitamina C.

Asimismo, sirven como alimento a las aves; a través, del guano los agracejos fueron expandiéndose sin ayuda del hombre. La correlación entre los agracejos y la roya negra de tallo es conocida desde hace tiempo, pero lo que no se sabe bien es el efecto del hongo en los agracejos. Es muy difícil

experimentar con el hongo y sus esporas en relación con los agracejos en un laboratorio, pues antes de que se propaguen en éstos, requieren pasar por un proceso de hibernación. El laboratorio de Jin (2008) es uno de los pocos en el mundo que estudian la relación entre el Ug99 y los agracejos.

Hace algunos años pudo probar que no solo la roya negra de tallo lo usa como trampolín antes de infestar los cultivos de trigo, sino también la roya amarilla de tallo. Por ello, está convencido de que una estrategia para erradicar la amenaza del hongo debe incluir un meticuloso estudio de todas las etapas de su propagación, en especial donde ésta entra en contacto con los agracejos, puesto que a menudo se pasa por alto. Otra razón por la que los científicos han descuidado el papel de los agracejos en el estudio del Ug99 es que no ha sido debidamente estudiado. Y es que ya en el siglo XVII los productores agrícolas franceses habían detectado el vínculo, tras lo cual se dieron a la tarea de erradicar los agracejos.

A principios del siglo XX los agracejos habían desaparecido de Europa. Análogamente en los Estados Unidos se promulgaron leyes en contra del cultivo de agracejos; no obstante, se combatió de manera sistemática hasta finales de la primera guerra mundial, después de que una epidemia de roya negra de tallo amenazó con destruir la producción de trigo. Aproximadamente 1.7 millones de arbustos fueron destruidos en 1918. Para evitar su resurgimiento se usó sal. La campaña de erradicación de los agracejos se extendió hasta la gran depresión de 1929 y sirvió como medidas para la creación de empleo. Para 1972, se había acabado con 98% de los arbustos, dándose por terminada la tarea.

No obstante, las preguntas quedaron sin contestar: ¿de qué manera la roya negra de tallo se incubaba en los agracejos? ¿qué papel juega en el brote de epidemias del Ug99 y cómo favorece a la creación de nuevas razas? Los agracejos han regresado a Europa y Norteamérica, pero las preguntas siguen sin encontrar respuesta. De acuerdo con Koerner (2010), el Ug99 es un hongo que produce la roya de tallo negra. Sus esporas vuelan por el viento aterrizando en las hojas del trigo. De ahí se trasladan a las entrañas de la planta y secuestran su metabolismo para de inmediato extraer los nutrientes hasta secarla.

El patógeno se manifiesta a través de pústulas rojizas que aparecen tanto en el tronco como en las hojas. Cuando estas pústulas revientan, expulsan millones de esporas que buscan un hospedante fresco. Las plantas afectadas se comienzan a marchitar hasta morir y sus granos se vuelven inservibles. Koerner (2010) apunta que en St Paul, Minnesota se encuentra el laboratorio de granos llamado USDA's Central Disease Laboratory (CDL), en donde se concentran bajo estrictas medidas de seguridad cerca de 30 000 patógenos que atacan cultivos de trigo, cebada y avena. Entre éstos se encuentran muestras de todo tipo y modelo pertenecientes al Ug99.

Este laboratorio trabaja permanentemente con una amplia variedad de fenotipos procedentes de varios centros de investigación y de diferentes partes del mundo. Uno de los investigadores líderes en el ramo es Les Szabo, genetista de formación, quien detalla la habilidad del *Puccinia graminis* para expandirse y coexistir con sus anfitriones. Señala que es un viajero eficiente, de modo que una sola hectárea de trigo infectado puede expulsar 10 millones de esporas, cada una de las cuales puede detonar una epidemia. Todo lo que se necesita son las condiciones ideales: viento soplando hacia cultivos de trigo y esporas sobreviviendo durante el trayecto.



Así, las esporas del Ug99 se transportan con el viento elevándose hasta el límite de la atmósfera y descendiendo a los campos de cultivo, desplazándose a cientos de kilómetros. Ello explica la rápida expansión del hongo desde Uganda hacia Etiopía, la África Subsahariana y el este de Sudán. Un comunicado de la SAGARPA agrega que el ciclo de vida del hongo consta de cinco fases durante el cual este invade al cultivo y termina tiñéndolo de color negro. Tiene un periodo de latencia de 7-9 días y la infección ocurre en intervalo de 26 días; la esporulación diaria es de aproximadamente 20-30 esporas por lesión y la eficiencia de la infección de 20-45 lesiones por espора.

Requiere tejido de plantas verdes para infectar. Las condiciones climáticas en que se reproduce van de un mínimo de 4 °C a 29 °C con un óptimo de 23 °C. En regiones muy secas o tropicales no se reproduce el hongo, pero la irrigación de los cultivos podría favorecerle. La roya de tallo puede hibernar en forma de *teliosporas* en los residuos del cultivo para resurgir en primavera, siendo más susceptible en altas latitudes. Si la infección es severa antes de la floración, es posible perder totalmente el cultivo (Secretaría de Fomento a Agronegocios de la Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Dirección General de Sanidad Vegetal, 2016).

Las lesiones aparecen como pústulas ovaladas llamadas *uredias* que se esparcen a lo largo de la vaina, el tallo y la espiga. Las esporas son de color café rojizo y penetran toda la planta. Si las pústulas se encuentran dispersas, se trata de una infección leve, pero si se aglutinan, es intensa (SAGARPA/CESA-VEG). El Ug99 no solo está en marcha, sino que sigue mutando, desarrollando la capacidad de afectar a genes que hasta ahora se consideraban inmunes. Uno de los nuevos ha sido el gen *Sr24*, usado en cultivos de los Estados Unidos de América y posteriormente el *Sr36* que se usa en las grandes planicies de Norteamérica durante el invierno.

Existen diferentes tipos de hongo clasificados como roya de tallo negra, que afectan a los cultivos de trigo; algunos inocuos, otros muy peligrosos. Las diferentes formas en que se manifiesta el Ug99 fueron denominadas TTKS con base a la nomenclatura norteamericana. En una presentación de 2013 hecha por Matthew Rouse de la Universidad de Cornell en Nueva York, el investigador, que labora en el Durable Rust Resistance Wheat Project, señala que el TTKS es el fenotipo original, se toma de la clasificación 04KEN156 y de él se derivan varias razas. Rouse presenta mediante el Cuadro 1, la forma en que se integra la codificación de los diferentes fenotipos según el nivel de infección al hongo con solo dos valores: alta (H) y baja (L) por sus siglas en inglés.

Cada valor corresponde a un grupo de genes que se ven afectados por el TTKS. La primera letra T afecta a los tipos de trigo que se detallan en la segunda columna de Cuadro 1 y son vulnerables a los genes que aparecen en la tercera columna. La cuarta columna muestra el nivel de peligrosidad, que va del 0 al 2 como bajas (L) y del 3 al 4 como altas (H). Por ejemplo, para entender el código TTKS, comenzamos con la primera letra 'T' tiene cuatro niveles de peligrosidad (H, H, H, H) para los genes correspondientes. En la parte inferior del Cuadro 1, aparece la clasificación y se lee de arriba abajo, de manera que la primera letra 'T' significa cuatro niveles de peligrosidad, lo mismo que la segunda; la tercera letra 'K' tiene un nivel de peligrosidad bajo y tres altos (L, H, H, H) y la cuarta: 'S' tiene tres altos y uno bajo (H, H, H, L).

Ergo, el TTKS se clasifica como un hongo altamente infeccioso. Matthew Rose explica que los Sr son genes contenidos en diferentes tipos de trigo que presentan niveles de resistencia al hongo Ug99, y que los que presentan mayor vulnerabilidad según el Cuadro 1 son Sr5, Sr21, Sr9e y Sr7b, mientras que los más resistentes son el Sr36 y SrTmp (Rouse, 2013).

**Cuadro 1. Nomenclatura para la clasificación del hongo Ug99 (04KEN156).**

Nivel	Tipo de trigo	Gen Sr	Peligrosidad
1	ISr5Ra	5	4 (alto)
T	T.m.deri	21	3+ (alto)
	Verstein	9e	4 (alto)
	ISr7bRa	7b	3 (alto)
2	ISr11Ra	11	4(alto)
T	ISr6Ra	6	4(alto)
	ISr8Ra	8a	4(alto)
	CnsSr9g	9g	4(alto)
3	W2691SrTt-1	36	0 (bajo)
K	W2691Sr9b	9b	4 (alto)
	BtSr30Wst	30	4 (alto)
	Comb.VII	17+13	2++ (bajo)
4	ISr9aRa	9a	4 (alto)
S	ISr9dRa	9d	4 (alto)
	W2691Sr10	10	4 (alto)
	CnsSrTmp	Tmp	2+ (bajo)

## Clasificación

B	C	D	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	T
L	L	L	L	L	L	L	L	H	K	H	H	H	H	H	H
L	L	L	L	H	H	H	H	L	L	L	L	H	H	H	H
L	L	H	H	L	L	H	H	L	L	H	H	L	L	H	H
L	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L	H

Fuente: (Rouse, 2013); H (high); L (low).

Posteriormente se rebautizó el TTKS tras agregar una quinta clasificación (letra K), pues pasó a afectar genes hasta entonces resistentes como Sr24, Sr31 y Sr 38, quedando finalmente como TTKSK, pero siguió dentro del código, que alude al año y al país; ejemplo, 04KEN156, Kenia, 2004. Más tarde surgió el TTKST equivalente al código 06KEN19v y el TTTKS con su código 07KEN24-1. Así, el Ug99 no solo afecta al gen Sr31, sino a otros genes de trigo (Sr).

Se advierte entonces una intensa batalla entre dos frentes, por un lado, la multiplicación de las razas que emergen del TTKSK con cada vez nuevas variantes con gran capacidad de adaptación y por el otro, los tipos de trigo dotados con distintos genes *Sr* resistentes al hongo y resultado a su vez de un proceso de hibridación científica o *stem rust resistant breeding*. No obstante, estos nuevos genes se vuelven cada vez más vulnerables ante apariciones de nuevas variantes del hongo.

Según Matt Rouse, desde la década de los 30 y 50 del siglo pasado comenzó la lucha. Al ataque de raza 56 conocida como MCCFC se respondió con los trigos *Ceres* y *Triumph* dotados con los genes Sr5, Sr28 y SrTmp, al de la raza 15B también conocida como TPMKC se respondió con el



trigo *Thatcher* que contiene los genes Sr12, Sr9 y con el trigo Chris que contiene los genes Sr6 y Sr30 (Rouse, 2013). Si bien no se ha presentado una epidemia del hongo en los últimos 50 años en los Estados Unidos de América, los cultivos actuales de trigo son vulnerables al TTKSK, TTKST y TTTSK, por lo que urge hallar cada vez más nuevos genes Sr resistentes al mismo (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Razas de Ug99 identificadas hasta 2010 en varios países y sus diferentes virulencias.**

Raza <sup>a</sup>	Nombre	Diferencias fundamentales en virulencia				Presencia confirmada del hongo
		Sr31	Sr21	Sr24	Sr36	
1. TTKSK	Ug99	Vir	Vir	Avir	Avir	Uganda (1998); Kenia (2001); Etiopía (2003); Sudan (2006); Yemen (2006); Irán (2007)
2. TTKSF		Avir	Vir	Avir	Avir	Sudáfrica (2000); Zimbabue (2009)
3. TTKST	Ug99+Sr24	Vir	Vir	Vir	Avir	Kenia (2006)
4. TTTSK	Ug99+Sr36	Vir	Vir	Avir	Vir	Kenia (2007)
5. TTKSP		Avir	Vir	Vir	Avir	Sudáfrica (2007)
6. PTKSK		Vir	Avir	Avir	Avir	Kenia (2007); Etiopía (2007)
7. PTKST		Vir	Avir	Vir	Avir	Kenia (2008); Sudáfrica (2009)

<sup>a</sup>= bajo el sistema de nomenclatura norteamericano. Ravi *et al.* (2011).

Ravi *et al.* (2011) por su parte, asegura que ya en 2011 se conocían siete variedades relacionadas con el Ug99 que aparecen en el Cuadro 2. En la primera columna aparece la raza, en la segunda la denominación; en la tercera la virulencia al tipo de gen y en la cuarta el país y el año en que fue detectada. Solo la TTKSK, hallada también fuera de territorio africano, se conoce como Ug99, es virulenta al Sr31, S21 y no virulenta al Sr24 y Sr36. Se teme que por la ruta que toman las corrientes de aire, esporas del hongo puedan afectar cultivos localizados en Israel, Jordania y Egipto, otros modelos sugieren que las esporas pueden expandirse hasta la región del Cáucaso y el Asia Central.

Un vehículo de contagio adicional lo representa la soya asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) infectada con roya de tallo. Primero se identificó en Uganda en 1996, pero luego se extendió a través del aire hacia Ruanda, Zimbabue y Zambia. Asimismo, el comercio puede ser otra vía, ya que entre Sudáfrica y Kenia existe un intercambio comercial intenso. Ello hace que no se descarte su contagio hacia Australia y América del Sur. Hay reportes de presencia de roya de tallo en Líbano e Israel en 2010. La TTKST denominada Ug99+Sr24 es virulenta a genes Sr31, Sr21 y Sr 36, pero no virulenta al Sr 24. El TTTSK Ug99+Sr36 es virulenta a genes Sr31, Sr21 y Sr36, pero no virulenta al Sr 24. Singh (2008) coloca al gen Sr24 como uno de los más resistentes en Kenia.

Tanto el TTKST como el TTTSK son razas que suponen el peligro potencial más grande. El resto son razas derivadas del Ug99 pero que no se les denominan Ug99. Singh resalta que la raza PTKST resultó virulenta al Sr31 y Sr24 en Kenia (2008) y Sudáfrica (2009), el PTKSK resultó virulento al Sr31 en Kenia (2007) y Etiopía (2007), mientras que TTKSP se cree que evolucionó en Sudáfrica y se tornó virulento al Sr21 y Sr24 por mutación. Ello hizo que se designara a Sudáfrica como una singular zona epidemiológica. La detección del TTKSF en Zimbabue fortalece la hipótesis de la expansión de razas comunes en la región. Asimismo, la detección del PTKST, (ubicado en Kenia), en Sudáfrica prueba el vínculo de la presencia de la roya de tallo en el este y sur de África.

En su documento Ravi (2011) señala a Tanzania como país en donde también se detectó la presencia de TTKST, TTTSK, y TTKSK en 2009. De ahí se cree que pudo haber saltado a Zambia, Malawi y Mozambique. En 2015 ya se habían detectado 13 razas a lo largo de 13 países Bhavani *et al.* (2016). Mamdough (2013) por su parte señala que son ocho los genes que confieren resistencia al TTKSK: Sr 13, Sr 14, Sr 22, Sr 28, Sr 33, Sr 35, Sr 42 y Sr 45. Singh (2008) explica que el TTKSK pudo haber estado presente en Kenia desde 1993, desde donde se expandió constantemente en un periodo de 10 años. En 2005, reportes de Etiopia ubicaron una región ideal para la propagación del hongo en los altos africanos que denominaron ‘hot spot’, que partía de Uganda, pasando por Kenya, Etiopia, Sudán y Yemen.

Este último país pudo haber servido como trampolín a la expansión del virus hacia Medio Oriente y Asia, Singh (2008). Singh (2011) explica que para 2007 se había confirmado la presencia del Ug99 en Uganda, Kenia, Etiopia, Sudán y Yemen. Se percibía su expansión hacia el Oriente Medio y Asia. Posteriormente se confirma la raza TTKSK en Irán en marzo de 2008. De modo que partir de ese año se ha expandido a lo largo de miles de kilómetros desde el este de África, incluyendo Sudáfrica, Egipto, el Medio Oriente e Irán. En 2008, 80% de los tipos de trigo fueron susceptibles a adquirir el Ug99.

### **Estrategias de combate**

Para combatir al Ug99 se usan básicamente dos herramientas. En primer lugar, está la búsqueda desesperada de genes resistentes al hongo. Una de las estrategias más usadas ha sido la identificación de genes con efectos acumulativos que transmiten una capacidad de resistencia duradera contra el Ug99, como es el caso del trasladado de Sr2 de trigos *tetraploides* a trigos *hexaploides*. Singh (2011) explica que se cree que el complejo Sr 2 ha proporcionado un base de larga resistencia a la roya de tallo en germoplasmas que se encuentran en la Universidad de Minnesota en los Estados Unidos de América, en la Universidad de Sídney Australia, pero también en un germoplasma de trigo desarrollado por el Dr. Borlaug en el CIMMYT de México.

Por su parte, Matt Rouse trabaja en un proyecto de genes resistentes al hongo que divide en tres secciones: a) el *T. monococcum*; b) el trigo Thatcher; y c) el cromosoma 2BL. En el primer caso identifica dos especies de trigo que por su composición genética han probado éxito en resistencia a más de una raza del Ug99 y por su contenido de genes novedosos: el *Triticum monococcum* susceptible a contener genes del tipo Sr35, Sr22, Sr21, SrTm4 y SrTm5 y *Aegilops tauschii*, susceptible a contener genes del tipo Sr33, Sr45, SrTA1662, SrTA10187 y SrTA10171. En especial emplea procedimientos de clonación en los genes Sr35 y Sr33 para poderlos incorporar en diferentes tipos del *Triticum monococcum* y *Aegilops tauschii*.

En el segundo, Matt Rouse trabaja también con combinaciones que incluyen el Sr12 y 1AL a las que denomina *QTL* en trigos del tipo Thatcher y McNeal obteniendo resultados alentadores. En tercer lugar, el cromosoma 2BL ha probado también ser resistente al hongo mediante pruebas con el Sr28 y SrGabo56. En su presentación de 2013, Rouse explicaba que en un periodo de 5 años, el número de genes resistentes al hongo se había duplicado (Rouse, 2013). Por su parte, Les Szabo afirma que se pueden utilizar fungicidas, pero solo como medida de emergencia, en virtud de que son venenosos al medio ambiente, escasos y caros.

Todos los cultivos de trigo comerciables son susceptibles de adquirir este virus, por lo que se vuelve necesario aplicar fungicidas. Ya en el pasado se había logrado abatir el flagelo sin necesidad de fungicidas, a través de cultivos resistentes al hongo. Pero con el paso del tiempo y a través de la aparición de nuevas razas de Ug99, los cultivos resistentes se vuelven vulnerables. De modo que urge encontrar nuevos cultivos resistentes, pero mientras tanto se recurre a los fungicidas. Si bien el problema se ha atacado con el uso de fungicidas, Wanyera (2009) señala que no hay suficiente información sobre la eficiencia en su uso, pero está convencido de que los fungicidas no son una solución de largo plazo.

Por su parte, la SAGARPA (2016) agrega que el fungicida azoxistrobin a  $200 \text{ g L}^{-1}$  + ciproconazole a  $80 \text{ g L}^{-1}$ , tebuconazole y tebuconazole + tridimenol fueron efectivos en la reducción de las poblaciones de la raza Ug99 en sitios probados. Por otro lado, los que no resultaron exitosos, fueron trifloxystrobin + propiconazole, hexaconazole, epoxiconazole + carbendazim, cyproconazole a  $80 \text{ g L}^{-1}$  + propiconazole a  $250 \text{ g L}^{-1}$ , y epoxiconazole a  $125 \text{ g L}^{-1}$  + carbendazim a  $125 \text{ g L}^{-1}$ .

### **Resurge el Ug99 en Italia y Alemania**

Varga (2007) reportaba ya la presencia de hongos en la agricultura europea. Señala que en Austria se encontró evidencia de presencia de hongos en semillas de diferentes productos agrícolas comercializados en aquel país. En 2013, se halló un indicio de Ug99 en Alemania, hecho que alarmó a los científicos. En cuestión de semanas se recibieron reportes de la posible presencia del Ug99 en la Alta y Baja Sajonia, así como en Thüringen y Brandenburg. Posteriormente, en 2016 se encontraron dos casos de roya negra de tallo en la Baja Sachonia, Alemania, pero permanecieron controlados. En 2013 se estudiaron en laboratorio varias muestras de Ug99 encontradas en Horstbergs, Alemania.

Si bien se detectó que no se trataba del Ug99, sí resultó ser una nueva variante clasificada como: TKTTF. Se cree que la TKTTF causó graves daños en países como Turquía (2005) y Etiopía (2013, 2014 y 2015) (Bhavani *et al.*, 2016). Singh (2015) por su parte, asegura que el TKTTF es altamente virulento en trigos del tipo *Digalu*, cultivado en Etiopía y Medio Oriente. La experiencia de afectación de cultivos por la presencia del TKTTF encendió la alarma por su alto potencial devastador. Por otro lado, en Sicilia ese mismo año se infectaron 10 mil hectáreas de trigo de roya negra de tallo, por lo que se cree que el número de esporas que flotan en Europa es relativamente alto.

A pesar de no tener nuevas noticias de brotes, los investigadores encendieron luces de alerta. Según el RustTracker.org, el 2 de febrero de 2017 se publicó la detección de un brote roya de tallo en la cuenca del mediterráneo (Yalemayehu, 2017). Las muestras obtenidas en Sicilia apuntan al surgimiento de otra nueva raza bautizada ahora bajo el nombre de TTTTF. Ésta se detectó tanto en trigo de pan y trigo duro durante el periodo de abril-junio de 2016 en Sicilia, Italia. Esta nueva TTTTF afecta a los genes resistentes Sr9 y Sr13, con antecedentes en Turquía. Expertos aseguran que no está relacionada con el grupo de razas de la familia Ug99 y que es avirulenta a los genes Sr31, Sr24 y Sr25.

Por la extensión del área afectada en Sicilia, se trata de uno de los brotes más severos de la roya de tallo más recientes en Europa. Por la gran extensión de cultivos contaminada se teme que genere una gran cantidad de esporas que se dispersen durante 2017. Por la ubicación geográfica, países

como Grecia, Albania, Montenegro, Bosnia Herzegovina, Croacia y Eslovenia podrían verse afectadas, así como el norte de Libia y el noreste de Túnez. Mogen Hovmøller de la Universidad de Aarhus en Dinamarca, es director del Globale Rost-Referenzzentrum (GRRC) de donde monitorea a nivel internacional brotes de enfermedades relacionadas con la roya de tallo.

Su especialidad es la roya de tallo amarilla que se ha detectado en Europa Central; es menos agresiva que la roya de tallo negra, pero hay pérdidas hasta 40% de la cosecha. Si bien la presencia de la roya de tallo amarilla era esporádica en Europa, a partir de 2011 se hallaron dos nuevas razas: *Warrior* y *Kranich* Carmona (2017). Los nombres se derivaron del tipo de trigo donde se descubrieron. Éstas se esparcieron y anidaron en la región a expensas de otros tipos de roya de tallo amarilla.

Después de varios esfuerzos por encontrar de dónde provenían, Mogen Hovmøller señaló que se originaron en el Himalaya. El especialista afirma que la roya de tallo amarilla se expande en Europa no solo a través de estas dos nuevas razas, sino de otras variantes. Hasta ahora, el hongo se ha controlado con fungicidas y se procura mantener un sistema de aviso para combatir de inmediato la plaga en sus periodos iniciales.

## Conclusiones

Las recientes apariciones de roya de tallo amarilla en Europa y la propagación de la roya de tallo negra en el este de África y Oriente medio, han encendido los focos rojos en la comunidad académica. La amenaza que representa el hongo Ug99 a los cultivos de trigo, se suma a una serie de problemas que aquejan a la seguridad alimentaria mundial. Si bien por un lado la ciencia sigue mostrando avances sustanciales en la creación de nuevos genes resistentes al hongo, la multiplicación de las razas clasificadas como de alta peligrosidad no se ha detenido, por lo que se está aún lejos su erradicación.

Es decir, están las apariciones de roya de tallo del tipo TTTTF en Europa, así como de los tipos *Warrior* y *Kranich* en roya de tallo amarilla, y por el otro, el avance en los laboratorios líderes el de St Paul en Minnesota como en la Universidad de Aarhus en Dinamarca, que ya han dado resultados positivos mediante el uso de tecnología de punta como la clonación y el estudio del genoma. Añádase a ello el peligro que representa el empleo de los fungicidas y herbicidas en la agricultura a la salud humana y al medio ambiente, con lo cual no solo tenemos una amenaza a la producción de alimentos, sino a la salud pública como en el escándalo que recientemente causó el glifosato, herbicida ampliamente usado en la agricultura vinculado con el cáncer.

México ostenta un déficit en trigo panificable que cubre con importaciones procedentes de la Unión Americana, cuyos cultivos de trigo son vulnerables a los TTKSK, TTKST y TTTSK, ante un brote epidemiológico en el vecino del norte, México resultaría afectado. Afortunadamente, la presencia del CIMMYT en México y la cooperación internacional de sus investigadores han tomado nota del peligro y el Ug99 está ya en sus agendas y líneas de investigación.

Solo queda continuar atentos para prevenir y en su caso tomar las medidas necesarias ante un inusitado brote epidemiológico en territorio nacional, en especial en los estados de Sonora y Guanajuato que son los más vulnerables, pues enfrentarían pérdidas que podrían ir, según se analizó en este estudio, de 25% a 50% de su producción de trigo.

## Literatura citada

- aMamdouh A. Asmmawy, aWalid M. El-Orabey, bMohamed Nazim, aAtef A. Shahin. 2013. Effect of stem rust infection on grain yield and yield components of some wheat cultivars in Egypt, *ESci Journal of Plant Pathology*. 2(3):171-178.
- BM. Banco Mundial. 2012. Informe anual 2012. [http://issuu.com/world.bank.publications/docs/annual\\_report\\_2012\\_sp?e=1107022/2562915](http://issuu.com/world.bank.publications/docs/annual_report_2012_sp?e=1107022/2562915).
- Bhavani, S.; Njau, P.; Wanyera, R.; Girma, B.; Geleta, A. B.; Badebo, A. and Gordon, C. 2016. Decade of stem rust research on Ug99: progress and challenges. International Maize and Weath improvement Center: <http://repository.cimmyt.org/xmlui/handle/10883/18844>.
- Bourne, Jr. Joel, K. (2009). The end of plenty. National Geographic. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.com/magazine/2009/06/cheap-food/>.
- Carmona, M. 2017. Roya amarilla de trigo. Nuevas razas en el mundo, monitoreo y uso de fungicidas. Buenos Aires, Argentina, Argentina. <http://herbariofitopatologia.agro.uba.ar/wp-content/uploads/2016/03/carmona-sautua-roya-amarilla-2017-fauba.pdf> de s/m de s/a.
- Hoppenhaus, K. 2017. Böses erwachen. Die zeit. 30:32-35. <https://www.zeit.de/2017/30/schwarzrost-pilz-weizen-berberitze-ug99>.
- Jin, Y. S.; L. J., P.; Z. A.; S. R. and Ward, R. a. 2008. Detection of virulence to resistance gene Sr24 within race TTKS of *Puccinia graminis* f. sp. tritici. *Plant Dis*. 92(6):923-926.
- Koerner, B. I. 2010. Red menace: stop the Ug99 fungus before its spores bring starvation. <https://www.wired.com/2010/02/ff-ug99-fungus/all/1>.
- Milenio. 2017. Producción de trigo en México creció 14.6% en tres años. <http://www.milenio.com/negocios/trigo-produccion-trigo-mexico-sagarpa-sonora-baja-california-milenio-noticias-0.946705634.html>.
- ONU. 2010. Objetivos del milenio, informe 2010. Departamento de Asuntos Económicos. Nueva York. ONU. Objetivo 1: erradicar la pobreza y el hambre. <https://www.un.org/es/millenniumgoals/pdf/MDG-Report-2010-SP.pdf>.
- ONU. 2015. Objetivos del desarrollo del milenio, informe 2015. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas. Nueva York. ONU.
- Rouse, M. 2013. Accessing genetic diversity for wheat resistance to UG99. The science media production Center at Cornel. <https://www.youtube.com/watch?v=zWcvR5z4zF0>. New York. Cornell University.
- SFA-SAGARPA. 2011. Secretaría de Fomento a Agronegocios-Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Perspectivas a largo plazo para el sector agropecuario de México 2011-2020. [http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/documents/estudios\\_economicos/escenariobase/perspectivalp.11-20.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/documents/estudios_economicos/escenariobase/perspectivalp.11-20.pdf).
- SFA-SAGARPA. 2016. Secretaría de Fomento a Agronegocios- Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Dirección General de Sanidad Vegetal. Roya del tallo del trigo; puccinia f. sp. tritici raza Ug99 Eriksson & Henning. Gobierno Federal. México, DF.
- Singh, R. P. E. 2008. Will stem rust destroy the world's wheat crop? *Advances in agronomy*. 98:271-309.
- Singh, R. D.; Jin, H.; Lagudah, E.; Ayliffe, E.; Bhavani, S. and Hovmøller, M. 2011. Emergence and spread of new races of wheat stem rust fungus: continued threat to food security and prospects of genetic control. *The American Phytopathological Society*. 465-481 pp.
- Varga, P. Z. 2007. Samenübertragbare pilzkrankheiten der gräser. *Der Planzenartz*. 3:22-24.

- Wanyera, R. M. 2009. Foliar fungicides to control wheat stem rust, race TTKS (Ug99), in Kenya. *Plant Dis.* 3(9):929-932. <https://apsjournals.apsnet.org/doi/pdf/10.1094/PDIS-93-9-0929>.
- Yalemayehu. 2017. Rust tracker.org a global wheat rust monitoring system. Risk of wheat stem rust in Mediterranean Basin in the forthcoming 2017 crop season following outbreaks on Sicily in 2016: <http://rusttracker.cimmyt.org/?p=7083>.