

# Razas de roya amarilla y del tallo en trigo e implicaciones para su control

Las royas del trigo son enfermedades causadas por hongos del género *Puccinia*. Existen tres enfermedades de importancia económica: la roya de la hoja (o parda), la roya amarilla (o lineal) y la roya del tallo (o negra). En este artículo nos centraremos en las dos últimas, si bien la mayoría de los conceptos son extrapolables también a la roya parda.

Dolors Villegas Tort<sup>1</sup>, Carlos Cantero Martínez<sup>2</sup>, Joan Serra Gironella<sup>3</sup> y Fernando Martínez-Moreno<sup>4</sup>. <sup>1</sup>IRTA Lleida. <sup>2</sup>Universitat de Lleida, Agrotecnio. <sup>3</sup>IRTA Mas Badia. <sup>4</sup>ETSIA Universidad de Sevilla.

La roya amarilla (causada por el hongo *Puccinia striiformis*) se caracteriza por unas lesiones lineales en las hojas, aunque en casos muy severos pueden extenderse al tallo y a las glumas. Las esporas son de color amarillo-anaranjado (**figura 1a**). Esta roya suele aparecer en fases tempranas del cultivo (en España, desde mediados de marzo hasta finales de abril), por lo que en caso de infección grave causará una pérdida de rendimiento importante. Esta roya se desarrolla bien a temperaturas relativamente bajas (de 10 a 15°C), de manera que suele afectar en momentos clave de la formación del rendimiento. Cuando la temperatura sube por encima de un cierto valor aparecen unas manchas de color negro (telios, **figura 1b**) y la infección se detiene.

Por su parte, la roya del tallo (causada por el hongo *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*) se distingue porque produce lesiones en el tallo y hojas. Estas lesiones (o pústulas) son de gran tamaño y virulencia, levantan parte de la epidermis para dar paso a una gran cantidad de esporas de color pardo-oscuro (**figura 1c**). Cuando el trigo madura o bien las condiciones ambientales dejan de ser propicias se forman telios (**figura 1d**). Esta roya suele aparecer más tarde que la amarilla (finales de abril, principios de mayo) y se desarrolla bien a temperaturas más altas (de 20 a 25°C). En el momento en que el trigo se infecta puede que el grano esté casi formado en su totalidad, por lo que los daños serán limitados en ese caso.

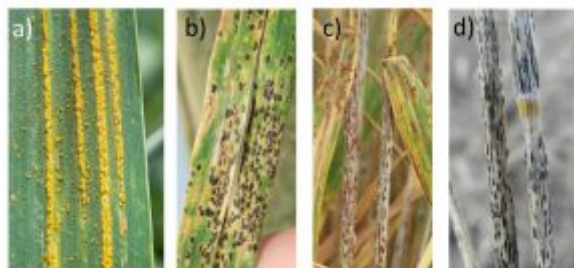


Figura 1. a) Lesiones típicas de la roya amarilla (producción de uredosporas). b) Telios de roya amarilla. c) Lesiones típicas de la roya del tallo (producción de uredosporas). d) Telios de roya del tallo.

Sin embargo, cuando aparecen síntomas durante la antesis del trigo o incluso antes, la destrucción de la cosecha puede ser prácticamente total. Esta roya daba bastantes problemas en el pasado debido, sobre todo, a la mayor duración del ciclo de las variedades locales de trigo. Pero la selección de variedades de ciclos más cortos desde la segunda mitad del siglo XX, los programas de erradicación en muchos lugares del mundo del agracejo (huésped alternativo de esta roya) y la introducción de genes de resistencia eficaces frente a la mayor parte de las razas (Sr2 y Sr31), hicieron que esta enfermedad se convirtiera en un problema menor.

Los métodos para controlar las royas son principalmente los tratamientos fungicidas y el uso de variedades resistentes. Los fungicidas son una solución rápida y eficaz, aunque el coste asociado puede llegar a ser excesivo en algunas explotaciones y en ciertas ocasiones (como en caso de lluvias prolongadas) no se pueden aplicar en el momento deseado. Además, muchos de los productos eficaces frente a roya no están permitidos en agricultura ecológica. Por ello se están dedicando grandes esfuerzos a mejorar la resistencia genética de las variedades de trigo.

## Genes de resistencia a roya

En trigo los genes de resistencia se agrupan en dos categorías: genes mayores y genes menores.

### Genes mayores

Los genes mayores tienen un efecto muy marcado frente a la roya, de manera que una variedad con un gen efectivo puede defenderse incluso sin mostrar ningún síntoma de la enfermedad. Como contraposición, este tipo de genes son muy específicos para algunas razas de roya concretas y no confieren resistencia frente a otras. Generalmente, se pueden desarrollar marcadores moleculares (de ADN) para determinar su presencia en las variedades que los posean.

Estos genes se encuentran de manera natural en las distintas variedades de trigo en otros cultivos de la familia de las gramíneas (trigo duro, centeno, etc.) o incluso hierbas silvestres, y se han podido incorporar al trigo cultivado mediante cruzamientos. Los genes mayores de resistencia a roya amarilla generalmente se nombran con las letras Yr (del inglés *Yellow rust*, que significa roya amarilla) y un número. A medida que se van conociendo nuevos genes se van añadiendo cifras a los nombres. Así, existen los genes Yr1, Yr2, Yr3, etc. Para la roya del tallo, los genes mayores se nombran con las letras Sr (del inglés *Stem rust*, que significa roya del tallo) y un número, siguiendo un patrón similar al de los genes de resistencia a roya amarilla.

### Genes menores

Los genes menores tienen un efecto menos notable que los mayores, ya que causan un desarrollo más lento de la enfermedad en la planta (también llamado resistencia parcial) respecto a una planta susceptible. Estos genes en general son difíciles de localizar con marcadores moleculares y es necesario acumular diversos genes distintos en la misma variedad para que el efecto sea suficiente para proteger la planta.

En la mayoría de los casos aparecen síntomas de la enfermedad, a pesar de que las pérdidas de rendimiento debidas a la roya sean bajas. Este tipo de resistencia resulta

poco atractiva para el agricultor, que ve que su cultivo desarrolla parcialmente la enfermedad, pero este mecanismo se cree efectivo frente a todas las razas de roya y es duradero (las nuevas razas de roya no superan este tipo de resistencia), por lo que representa una solución a largo plazo.

Mediante técnicas de mejora vegetal, en una misma variedad se pueden acumular genes mayores y menores de resistencia a una enfermedad. Los primeros protegen efectivamente a la planta frente a la enfermedad, y los segundos prolongan la duración de la resistencia a lo largo del tiempo.

## Cómo se definen las razas de roya

Es bien conocido que los trigos no son todos iguales, sino que hay distintas variedades, genéticamente distintas, que tienen diferencias morfológicas entre sí. En el caso de las royas también hay poblaciones y diferencias genéticas. Sin embargo, ni el patólogo más experto podría discernir visualmente de qué raza es una roya, a menos que pueda realizar algunas pruebas de laboratorio con ella.

### Colecciones de diferenciales y definición de raza

Para el estudio y caracterización de las razas de patógenos se han utilizado tradicionalmente colecciones de variedades diferenciales (o colección de diferenciales). Estas colecciones constan de variedades resistentes, donde la resistencia de cada variedad es debida a genes de resistencia distintos.



Figura 2. Representación esquemática de la caracterización de razas en roya utilizando diferenciales.

Para la definición de las razas de una determinada roya lo primero que hay que hacer es aislar la raza, multiplicarla y luego ver qué genes de resistencia son efectivos frente a ella y cuales no (**figura 2**).

La reacción de una raza de roya frente a una planta de una variedad resistente de trigo ocurre según la teoría gen a gen, propuesta por primera vez por el investigador estadounidense H. Flor.

Si una raza es capaz de infectar con éxito a una variedad resistente (con un gen de resistencia conocido), entonces esa raza tiene virulencia frente a ese gen y además presenta un gen de virulencia específico. En caso contrario esa raza tiene avirulencia frente a ese gen y además presenta un gen de avirulencia específico. Inoculando una determinada raza de roya sobre la colección de diferenciales (mencionada antes) y viendo la respuesta de resistencia-susceptibilidad sobre cada diferencial, podemos

deducir la virulencia-avirulencia de esa raza para esos genes de resistencia, y por tanto podemos conocer su patrón o perfil de virulencia (**figura 2**).

### Definición de genotipo del patógeno

Con el desarrollo de las técnicas de marcadores moleculares de las últimas décadas ha sido posible caracterizar genéticamente algunos patógenos. En el caso de las royas, algunos análisis permiten distinguir diferencias genéticas entre diferentes razas de royas, aunque la correspondencia entre grupo genético y raza no es exacta, pero sí aproximada.

El análisis de grupos de genotipos de roya está evolucionando rápidamente y tiene ciertas ventajas frente a la determinación de razas por diferenciales: con un laboratorio bien equipado se pueden procesar cientos de muestras en una campaña, no es necesario que las muestras de roya estén vivas al llegar al laboratorio y, una vez puesto a punto el método, los resultados se pueden obtener de manera más rápida que con la infección sobre la colección de diferenciales.

## Fuentes de variación en las royas

### Selección natural

La infección de roya se inicia cuando una espora, generalmente traída por el viento, llega a una planta de trigo (normalmente la hoja) y la infecta. Las pústulas que producirá esta planta infectada estarán llenas de esporas iguales a la que llegó inicialmente, incrementando una población que se denomina "clonal" porque básicamente las esporas producidas serán iguales a la espora inicial. A veces el viento no trae esporas de una única raza sino una mezcla de diversas razas, cada una en distinta proporción (técnicamente denominada "frecuencia"). Si a un campo llega un grupo de esporas de tres razas diferentes, pero la variedad de trigo de ese campo es resistente a una de las tres razas, sólo infectarán y se multiplicarán las otras dos razas en ese campo (**figura 3**).

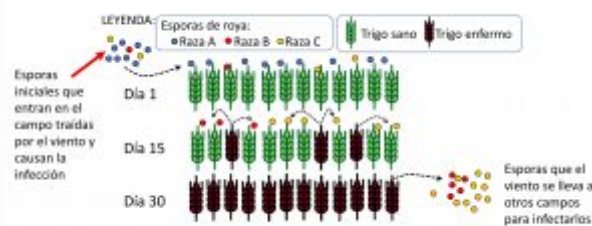


Figura 3. Esquema del proceso de selección de razas de roya en función de las variedades de trigo, suponiendo que el trigo representado es resistente a la raza A y susceptible a las razas B y C.

El proceso mostrado en la **figura 3** hace que las frecuencias de las distintas razas o genotipos cambien con el tiempo, a veces de manera muy importante.

La **figura 4** muestra la evolución durante los últimos años de los distintos grupos genéticos (que corresponden aproximadamente a razas) de roya amarilla en Europa. Un ejemplo claro de la evolución es el grupo genético representado por el color rosa claro

en la **figura 4**, que era minoritario en 2013 y ha pasado a ser el más importante en 2021, mientras que el grupo de color azul ha desaparecido con los años.

### Mutación genética

Durante la multiplicación de las esporas de roya en la planta de trigo se producen mutaciones espontáneas que suelen ser al azar, por lo que no siempre representan una amenaza para los cultivos. Algunas mutaciones son letales para la roya y desaparecen inmediatamente de la población. Otras no tienen implicaciones en la virulencia y pueden o no mantenerse en el tiempo.

A veces se producen mutaciones más virulentas para variedades muy cultivadas de trigo, lo que representa una amenaza para la producción agrícola. Estas mutaciones se presentan en proporciones muy bajas, pero basta que una sola espora tenga una mutación en el gen de avirulencia relacionado con el gen de resistencia de una variedad que sea muy popular en una determinada región, para que se multiplique clonalmente sobre las plantas de esta variedad y cause un serio problema. Recordemos que todos los años se siembran unos 215 millones de hectáreas de trigo en el mundo y gran parte de esta superficie está sembrada con variedades resistentes. Esto representa muchas oportunidades para las esporas de roya con una mutación de virulencia acertada.

Las mutaciones espontáneas suelen ser cambios pequeños en la dotación genética de la roya y son difíciles de detectar con marcadores moleculares. Desde la década de 1980, el gen *Sr31* era un gen que protegía muchas variedades de trigo frente a todas las razas de roya del tallo.

En 1998 apareció en Uganda una raza de roya del tallo con virulencia frente a este gen. Esta raza era potencialmente virulenta sobre más de la mitad del trigo cultivado a nivel mundial en ese tiempo. Afortunadamente, los centros internacionales y las empresas de mejora vegetal obtuvieron líneas de trigo con otros genes de resistencia, procedentes de parientes silvestres del trigo, y los introdujeron mediante cruzamientos en variedades productivas de trigo a tiempo para evitar una hambruna en el este de África y suroeste de Asia.

### Recombinación genética

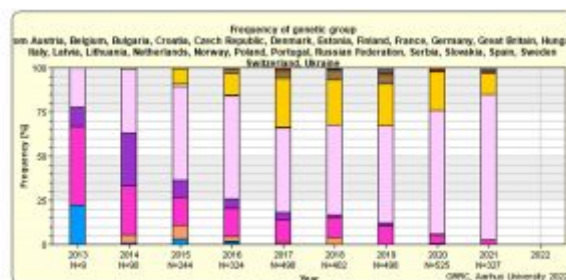


Figura 4. Evolución de las frecuencias de los distintos grupos genéticos de roya amarilla en Europa, donde cada columna representa un año y el número de muestras analizado (N), y cada color en las columnas corresponde a una raza.

La reproducción de las royas en el trigo y otras gramíneas es una fase asexual del ciclo de vida del hongo que las causa (*Puccinia* spp.). Sin embargo, existe una fase sexual en la cual hay recombinación de genes, de manera que las esporas que entran en el ciclo sexual son genéticamente diferentes de las que salen. La fase sexual tanto de la roya amarilla como de la roya del tallo tiene lugar en el agracejo (*Berberis* spp. L.).

El agracejo es un arbusto espinoso muy común en Eurasia, con aplicaciones farmacéuticas y que antiguamente se había usado como separador de campos para el ganado y también se extraía tinte amarillo de su corteza. Desde hace tiempo se sabía que el agracejo tenía este papel en la roya del tallo. Recientemente se ha demostrado que los agracejos españoles también pueden completar el ciclo sexual de la roya amarilla. Aunque antiguamente se había recomendado su exterminio para proteger el trigo de la roya del tallo, esta prohibición se levantó posteriormente y en algunos lugares de Europa los agracejos están protegidos por leyes de conservación de la biodiversidad, lo que puede favorecer la aparición de nuevas razas de estas royas.

## **Implicaciones y aspectos prácticos para el control**

Hemos explicado que tanto en roya amarilla como en roya del tallo existen diferentes razas que pueden surgir mediante recombinación sexual o bien mutaciones puntuales. La interacción entre estas razas y los genes de resistencia presentes en las variedades de trigo modulan las frecuencias de las distintas razas y hacen que éstas cambien a lo largo del tiempo. En consecuencia, hay que estar atentos a la aparición de nuevas razas de roya, especialmente si afectan variedades que habían sido resistentes en los años anteriores.

La mejora genética tradicional, con las nuevas herramientas basadas en biología molecular, nos están permitiendo obtener variedades resistentes de forma más rápida. Aun así, se necesita un tiempo para su obtención y comercialización. Al respecto, se recomienda a los agricultores y técnicos estar actualizados acerca de las variedades disponibles y sus niveles de tolerancia y resistencia probados a las razas predominantes.

El otro método de control disponible y utilizado habitualmente es la aplicación de fungicidas. Primero es importante considerar que las aplicaciones de estos productos están sujetas a normativa. Además, y desde el aspecto agronómico, hay que considerar que se dispone de un grupo de productos para su control con efectividades y precios variables.

Es fundamental no abusar de los mismos productos de forma repetitiva, pues fomenta la aparición de resistencias en las poblaciones de roya. En caso de tratamiento fungicida, éste se deberá basar en el principio de la aplicación justificada y buscando rotación de materias o principios activos. Una aplicación indiscriminada y abusiva tendrá además un retorno negativo para el agricultor en forma de gasto económico innecesario. Por ello es importante en caso de infección habitual por royas, así como en situaciones previsibles, utilizar como primer método las variedades más tolerantes o resistentes que ya hay disponibles en el mercado.

Los denominados métodos de control "culturales", como modificación de fechas de siembra, laboreo, eliminación de restos de cosecha, rotaciones de cultivo y otros, son recomendaciones generales que se realizan para muchos de estos problemas fúngicos y de otros agentes bióticos como plagas o enfermedades. Antes de ponerlos en marcha de forma generalizada, se deberían testar localmente y considerar globalmente los beneficios e inconvenientes. En cualquier caso, es conveniente consultar la información disponible de los servicios de protección vegetal locales.