

Dinámica y comportamiento aerobiológico de las esporas de *Erysiphe necator* y *Plasmopara viticola* en viñedos de Castilla-La Mancha

Dinâmica e comportamento aerobiológico dos esporos de *Erysiphe necator* e *Plasmopara viticola* em vinhas de Castilla-La Mancha

Aerobiological dynamics and behaviour of *Erysiphe necator* and *Plasmopara viticola* spores in vineyards in Castilla-La Mancha

Guillermo Muñoz-Gómez, Eduardo Jiménez-Jiménez, Federico Fernández-González, Rosa Pérez-Badia

Instituto de Ciencias Ambientales. Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, España.

Cita: Muñoz-Gómez G, Jiménez-Jiménez E, Fernández-González F, Pérez-Badia R. Dinámica y comportamiento aerobiológico de las esporas de *Erysiphe necator* y *Plasmopara viticola* en viñedos de Castilla-La Mancha. Rev. Salud ambient. 2025; 25(2):183-191.

Recibido: 4 de agosto de 2025. **Aceptado:** 11 de octubre de 2025. **Publicado:** 15 de diciembre de 2025.

Autor para correspondencia: Guillermo Muñoz Gómez.
correo e: guillermo.munoz@uclm.es

Financiación: Proyecto SBPLY/21/180501/000172 financiado por la Consejería de Educación, Cultura y Deportes de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Proyecto 2022-GRIN-34507 financiado por la Universidad de Castilla-La Mancha.

Declaración de conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que hayan influido en la realización y preparación de este trabajo.

Declaraciones de autoría: Todos los autores contribuyeron a la revisión de literatura y la redacción del artículo. Asimismo, todos los autores aprobaron la versión final.

Resumen

El mildiu (*Plasmopara viticola*) y el óidio (*Erysiphe necator*) son enfermedades fúngicas problemáticas en viticultura. Este trabajo analiza la dinámica y el comportamiento de los niveles de esporas aerovagantes de estos hongos en el centro de la península ibérica (Castilla-La Mancha) y su relación con las condiciones meteorológicas y las fenofases de la vid.

El estudio se realizó en viñedos del oeste de la provincia de Cuenca (Castilla-La Mancha). Se efectuó la monitorización aerobiológica de las esporas y el seguimiento fenológico del cultivo. Se realizó un análisis intradiario de los niveles de esporas y un análisis de la relación entre las concentraciones diarias de esporas y las variables meteorológicas.

Las esporas de *E. necator* aparecieron constantemente durante el periodo de muestreo, alcanzando concentraciones máximas durante el desarrollo de las inflorescencias (mayo). Las esporas de *P. viticola* predominaron durante la brotación (marzo-abril). Las concentraciones de esporas de *E. necator* estuvieron influenciadas positivamente por las temperaturas y negativamente por la humedad relativa y la precipitación. Las de *P. viticola* estuvieron influenciadas negativamente por las temperaturas y la velocidad del viento y positivamente por la humedad relativa. El análisis intradiario mostró que los niveles más altos de esporas de *E. necator* se alcanzan entre las 16-18 horas, mientras que los de *P. viticola* entre las 11-12 horas.

El riesgo de infección por mildiu y óidio es alto en primavera, entre la brotación y la floración. Sin embargo, las condiciones meteorológicas del periodo estival dificultan el desarrollo del ciclo de vida de estos hongos.

Palabras clave: esporas fúngicas; esporas aerovagantes; mildiu; óidio; viñedo.

Resumo

O mildio (*Plasmopara viticola*) e o óidio (*Erysiphe necator*) são doenças fúngicas problemáticas na viticultura. Este trabalho analisa a dinâmica e o comportamento dos níveis de esporos aerotransportados desses fungos no centro da península ibérica (Castela-La Mancha) e sua relação com as condições meteorológicas e as fenofases da videira.

O estudo foi realizado em vinhas no oeste da província de Cuenca (Castela-La Mancha). Foi efetuada a monitorização aerobiológica dos esporos e o acompanhamento fenológico da cultura. Foi realizada uma análise intradiária dos níveis de esporos e uma análise da relação entre as concentrações diárias de esporos e as variáveis meteorológicas.

As esporas de *E. necator* apareceram constantemente durante o período de amostragem, atingindo concentrações máximas durante o desenvolvimento das inflorescências (maio). As esporas de *P. viticola* predominaram durante a brotação (março-abril). As concentrações de esporos de *E. necator* foram influenciadas positivamente pelas temperaturas e negativamente pela humidade relativa e precipitação. As de *P. viticola* foram influenciadas negativamente pelas temperaturas e pela velocidade do vento, e positivamente pela humidade relativa. A análise intradiária mostrou que os níveis mais elevados de esporos de *E. necator* são atingidos entre as 16 e as 18 horas, enquanto os de *P. viticola* entre as 11 e as 12 horas.

O risco de infeção por míldio e oídio é elevado na primavera, entre a brotação e a floração. No entanto, as condições meteorológicas do período estival dificultam o desenvolvimento do ciclo de vida destes fungos.

Palavras-chave: esporos fúngicos; esporos aerotransportados; míldio; oídio; vinha.

Abstract

Downy mildew (*Plasmopara viticola*) and powdery mildew (*Erysiphe necator*) are problematic fungal diseases in viticulture. This study analyses the dynamics and behaviour of airborne spore levels of these fungi in the centre of the Iberian Peninsula (Castilla-La Mancha), and their relationship with meteorological conditions and vineyard phenophases.

The study was conducted in vineyards in the west of the province of Cuenca (Castilla-La Mancha). Aerobiological monitoring of spores and phenological monitoring of the crop were carried out. An intraday analysis of spore levels and an analysis of the relationship between daily spore concentrations and meteorological variables were performed.

E. necator spores appeared constantly during the sampling period, reaching maximum concentrations during inflorescence development (May). *P. viticola* spores predominated during budding (March-April). *E. necator* spore concentrations were positively influenced by temperatures and negatively influenced by relative humidity and precipitation. *P. viticola* spore concentrations were negatively influenced by temperatures and wind speed, and positively influenced by relative humidity. Intraday analysis showed that the highest levels of *E. necator* spores are reached between 4 and 6 p.m., while those of *P. viticola* are reached between 11 a.m. and 12 p.m.

The risk of infection by downy mildew and powdery mildew is high in spring, between budding and flowering. However, summer meteorological conditions hinder the development of the life cycle of these fungi.

Keywords: fungal spores; airborne spores; downy mildew; powdery mildew; vineyard.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de la vid (*Vitis vinifera* L.) es de los más extendidos e importantes a nivel mundial¹. Por su frecuencia y ubicuidad, el mildiu y el oídio, producidos por *Plasmopara viticola* (Berk. & Curtis) Berl. & De Toni y *Erysiphe necator* Schw., respectivamente, son las enfermedades fúngicas más nocivas para la viticultura desde el punto de vista económico^{2,3}. Estos hongos infectan los tejidos verdes de la vid, como hojas, yemas y racimos, afectando negativamente a la producción y a la calidad de la uva^{4,5,6}.

En la agricultura, las epidemias producidas por organismos patógenos, como los hongos, se originan cuando las condiciones ambientales y la susceptibilidad del cultivo favorecen el desarrollo de las etapas de sus ciclos de vida⁷.

El ciclo de vida de *E. necator* comienza en primavera a partir de la brotación de la vid⁸. Las infecciones primarias

pueden originarse por la vía sexual, a través de las ascosporas liberadas por los cleistotecios invernantes⁹, o por la vía asexual, debido a la reactivación del micelio invernante en yemas latentes infectadas¹⁰. Tras la infección primaria, el micelio se desarrolla, comenzando la esporulación y los ciclos de infecciones secundarias mediante la liberación de esporas asexuales (conidios) que son dispersadas por el viento⁵. Este proceso ocurre principalmente durante el desarrollo de las inflorescencias, la floración y el desarrollo de los frutos¹¹. Las temperaturas, en un rango de 15 a 30 °C, favorecen el crecimiento del micelio¹², la esporulación¹³ y la germinación e infección de las esporas asexuales de este hongo¹⁴. Sin embargo, las temperaturas superiores a 30 °C dificultan o inhiben estos procesos^{13,15}. La esporulación y dispersión de esporas se ve favorecida por valores bajos de humedad relativa y la presencia de precipitaciones nulas o suaves^{16,17}. *E. necator* finaliza su ciclo de vida con la formación del cleistotecio por reproducción sexual o por la supervivencia del micelio en las yemas latentes durante el invierno^{18,19}.

El ciclo de vida de *P. viticola* comienza en primavera con la germinación de las formas sexuales invernantes, las oosporas, cuando las precipitaciones superan los 10 mm y las temperaturas son mayores a 10 °C²⁰. Estas liberan macrosporangios, muy similares a las esporas asexuales, desde la dormancia hasta la floración de la vid²¹, produciendo infecciones primarias. Después del desarrollo del micelio comienza la esporulación, donde se producen y liberan esporas asexuales (esporangios) que causan infecciones secundarias²². Estas provocan daños desde el desarrollo de las inflorescencias hasta la maduración^{23,24}. Para la esporulación, dispersión y germinación e infección de esporas es necesaria una humedad relativa alta (>80 %) ^{25,26}, temperaturas de entre 10 y 25 °C^{2,26,27} y periodos continuos de lluvia²⁶. Durante el otoño, en las hojas infectadas tiene lugar la reproducción sexual, mediante la que se forman las oosporas²⁸.

Para conocer el comportamiento del sistema huésped-patógeno-ambiente del mildiu y el oídio, es necesario conocer la evolución temporal de los niveles poblacionales de estos patógenos, lo que puede realizarse a través de la monitorización aerobiológica de las concentraciones de esporas²⁹, para relacionarla con el seguimiento fenológico del cultivo y la monitorización de las condiciones meteorológicas³⁰. Estudios de estas características han sido llevados a cabo en territorios del noroeste³⁰ y del sur³¹ de la península ibérica. Sin embargo, en el centro peninsular, donde Castilla-La Mancha es líder en cuanto a superficie de viñedo y producción de vino³², no se han realizado estudios de este tipo.

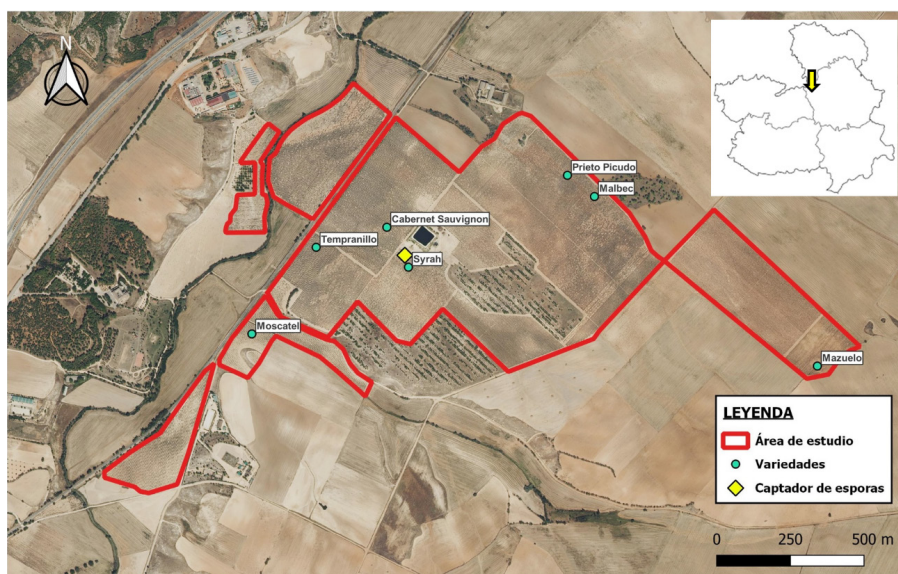
En este sentido, los objetivos de este trabajo son conocer la dinámica y el comportamiento del contenido atmosférico de esporas de oídio (*E. necator*) y mildiu (*P.*

viticola) a lo largo del ciclo vegetativo anual de la vid en el centro de la península ibérica, y analizar su relación con las condiciones meteorológicas y las fenofases del viñedo. Se espera que los niveles de esporas de ambos hongos sean más altos durante los meses de primavera donde, en el área de estudio, se presentan algunas de las fases fenológicas de la vid más susceptibles a la infección y las condiciones meteorológicas que favorecen la esporulación y dispersión. Durante los meses de verano se espera que las concentraciones sean más bajas por la presencia de condiciones meteorológicas adversas para la esporulación, a pesar de la presencia de fases fenológicas susceptibles a la infección.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se ha llevado a cabo en la provincia de Cuenca (Castilla-La Mancha), en los viñedos del Complejo Enoturístico Finca La Estacada (figura 1), ubicados en el término municipal de Tarancón y pertenecientes a la Denominación de Origen Uclés. Los viñedos se sitúan a 800 m.s.n.m. y su cultivo se realiza en espaldera bajo las normas de producción ecológica. Entre las características climáticas del área de estudio destaca que el mes más frío es enero con una temperatura de 4,5 °C, mientras que el mes más cálido es julio con 25,5 °C, obteniendo una amplitud media anual de 21 °C. La temperatura media anual es de 14 °C y la precipitación media anual de 514 mm. La zona pertenece al macrobioclima Mediterráneo, termotipo Mesomediterráneo y ombrotipo Seco³³. Desde el punto de vista biogeográfico, el área de estudio pertenece al sector Manchego de la provincia Mediterránea Ibérica Central, de la subregión Mediterránea Occidental³⁴.

Figura 1. Localización del área de estudio en Castilla-La Mancha, situación del captador de esporas y variedades de cultivo seleccionadas para el seguimiento fenológico



El muestreo aerobiológico se realizó desde marzo hasta diciembre de 2024. Para ello, se utilizó un captador volumétrico tipo Hirst³⁵ situado a 2 metros del suelo en una parcela de viñedo de la variedad de cultivo Syrah (figura 1). Las muestras fueron preparadas y analizadas en el laboratorio siguiendo la metodología establecida por la Red Española de Aerobiología³⁶. Los resultados se expresaron como la concentración media diaria de esporas por metro cúbico de aire (esporas/m³) y como la Integral Estacional de Esporas (SEIn, por sus siglas en inglés)³⁷. Para el análisis intradiario de la distribución de esporas, se seleccionaron aquellos días en los que las concentraciones de esporas superaron el doble de la media obtenida durante el periodo de muestreo, 39 días en el caso de *E. necator*, y 31 días en *P. viticola*. Para cada uno de los días, se calculó el porcentaje de esporas para cada hora sobre el total diario^{38,39}.

El seguimiento fenológico se realizó semanalmente, durante el mismo periodo de muestreo aerobiológico, sobre 140 individuos de 7 variedades de cultivo diferentes (20 individuos por variedad). Para el muestreo fenológico se utilizó una adaptación de la escala BBCH⁴⁰, considerando 14 fenofases, desde la dormancia (0) hasta la senescencia (12 y 13) (tabla 1). La toma de datos consistió en asignar porcentajes a cada una de las fenofases en función del estado presentado por cada individuo. Los datos se procesaron para calcular el desarrollo fenológico utilizando el método de desarrollo fenológico ponderado (WPD)⁴¹ para obtener una tendencia fenológica continua.

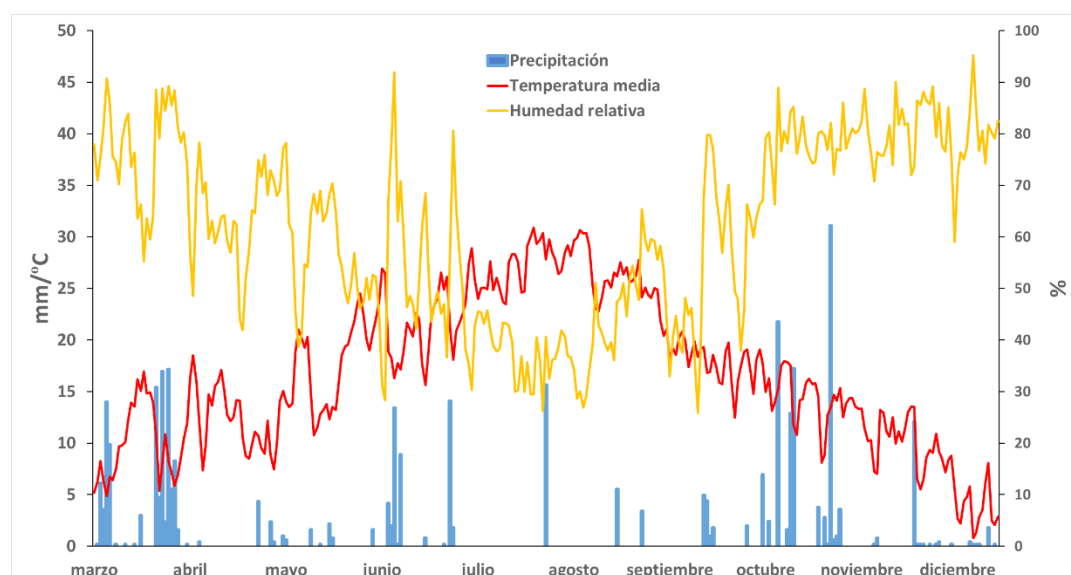
Los datos meteorológicos se obtuvieron de la estación meteorológica de Barajas de Melo, situada a 10 km del área de estudio, perteneciente a la Red de

Estaciones Meteorológicas del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR). Se obtuvieron datos diarios de las siguientes variables meteorológicas: temperatura media, máxima y mínima (°C), humedad relativa (%), precipitación acumulada (mm) (figura 2) y velocidad del viento (m/s).

Tabla 1. Fenofases utilizadas para el seguimiento fenológico de las variedades de vid y su equivalencia con las etapas de la escala BBCH.

Nº	BBCH	Descripción
0	00	Dormancia: yemas de invierno puntiagudas con escamas cerradas
1	03	Hinchado de yemas, pero no verdes. Fin del hinchado de las yemas
2	05	Yemas lanosas marrones
3	09	Apertura de las yemas: ápices foliares claramente visibles
4	11-19	Desarrollo de las hojas
5	53	Inflorescencias claramente visibles
6	57	Inflorescencias desarrolladas completamente, flores separándose
7	61-68	Floración
8	71-77	Cuajado de los frutos
9	79	Todas las bayas del racimo se tocan
10	81-85	Comienzo de la maduración, las bayas comienzan a brillar
11	89	Maduración completa, bayas listas para recolectarse
12	92	Decoloración foliar
13	93-97	Caída de las hojas

Figura 2. Evolución de la temperatura media, la precipitación (eje y, izquierda) y la humedad relativa media (eje y, derecha) diarias en el periodo de estudio (año 2024)



Para analizar la relación entre las concentraciones diarias de esporas de cada patógeno y las variables meteorológicas, se utilizó el test de correlación de Spearman, calculando el grado de significación para $p < 0,05$ (*) y $p < 0,01$ (**). El análisis se realizó utilizando el software IBM SPSS Statistics 28.0.

RESULTADOS

Las esporas de *E. necator* estuvieron presentes en el aire durante todo el periodo de muestreo (figura 3). Las concentraciones de esporas de este hongo aumentaron progresivamente desde principios de marzo hasta finales de mayo, y posteriormente fueron descendiendo hasta principios de julio. Desde ese momento, las concentraciones se mantuvieron bajas, sin llegar a superar las 30 esporas/m³. Por su parte, las esporas de *P. viticola* estuvieron presentes de forma bastante irregular desde marzo hasta principios de julio, y desde principios de octubre hasta principios de diciembre (figura 3). Los niveles de esporas de este hongo fueron bastante bajos y, exceptuando las concentraciones de mediados de marzo y principios de abril, las concentraciones diarias no alcanzaron más de 30 esporas/m³. En los meses de julio, agosto y septiembre las esporas de *P. viticola* no fueron detectadas en el aire.

La SSIn de *E. necator* fue muy superior a la de *P. viticola*, con 6 744 y 13 02 esporas*día/m³, respectivamente (tabla 2). La concentración máxima diaria de esporas de *E. necator* se produjo el día 16 de mayo con 210 esporas/m³, mientras que la de *P. viticola* se obtuvo el día 4 de abril con 111 esporas/m³ (tabla 2).

Tabla 2. Integral Estacional de Esporas (SSIn), y primera y segunda concentración máxima de esporas alcanzadas junto con la fecha y las fenofases en que se produjeron

	<i>Erysiphe necator</i>	<i>Plasmopara viticola</i>
SSIn (espora*día/m ³)	6744	1302
Concentración máxima 1 (esporas/m ³)	216	111
Fecha	16 de mayo	4 de abril
Fenofases	5 y 6	1, 2 y 3
Concentración máxima 2 (esporas/m ³)	191	96
Fecha	25 de mayo	18 de marzo
Fenofases	6	0 y 1

Figura 3. Evolución de la concentración diaria de esporas de *Erysiphe necator* y *Plasmopara viticola* junto a las fenofases de las diferentes variedades de vid (columnas horizontales)

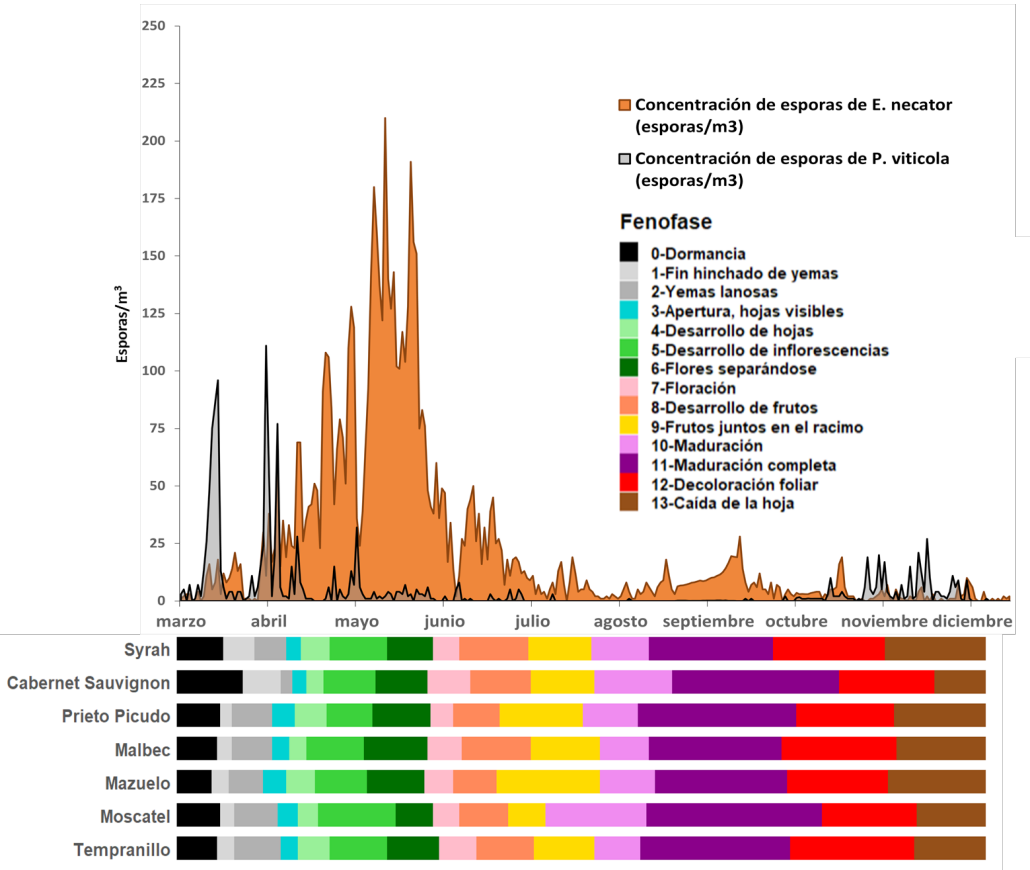
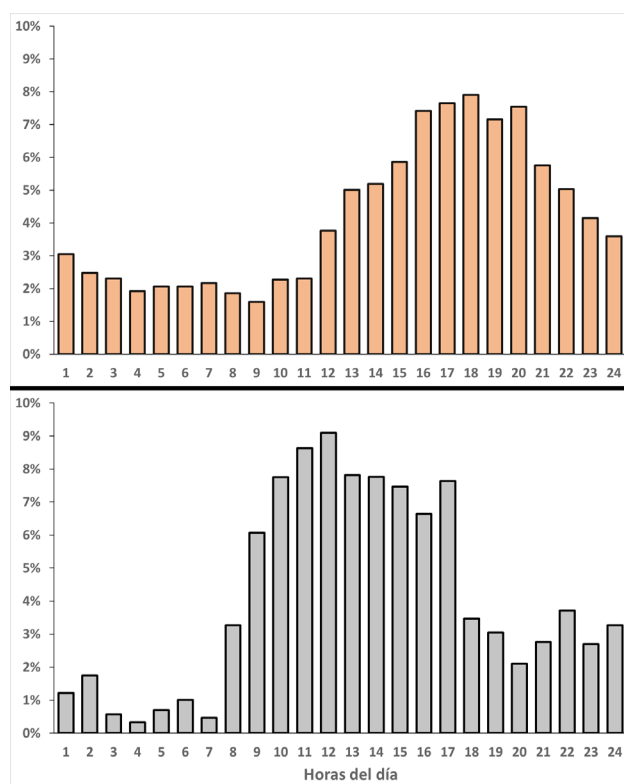


Tabla 3. Resultados del test de correlación de Spearman entre la concentración diaria de esporas y las variables meteorológicas. Grado de significación $p < 0,05$ (*) y $p < 0,01$ (**)

Variable meteorológica	<i>Erysiphe necator</i>	<i>Plasmopara viticola</i>
Temperatura media (°C)	0,204**	-0,430**
Temperatura máx. (°C)	0,273**	-0,422**
Temperatura mín. (°C)	0,040	-0,384**
Humedad relativa (%)	-0,344**	0,476**
Velocidad del viento (m/s)	-0,133*	-0,231**
Precipitación (mm)	-0,176**	0,083

Figura 4. Evolución intradiaria de la concentración de esporas de *Erysiphe necator* (barras naranjas) y *Plasmopara viticola* (barras grises)



Las mayores concentraciones diarias de esporas de *E. necator* coincidieron con las fenofases de desarrollo de inflorescencias (5) y separación de flores (6) (tabla 2). Durante las fenofases de apertura de yemas (3), desarrollo de las hojas (4), floración (7) y desarrollo de los frutos (8), se encontraron concentraciones destacables, alcanzando más de 50 esporas/m³ (figura 3). En el caso de *P. viticola*, las concentraciones más altas se obtuvieron al final de la dormancia (0) y durante la brotación (1, 2 y 3) (tabla 2). En la fenofase de desarrollo de las inflorescencias (5), se llegaron a alcanzar valores de concentración importantes, que superaron las 30 esporas/m³ (figura 3).

El análisis de la correlación entre las concentraciones de esporas y las variables meteorológicas se indica en la tabla 3. Durante el periodo de muestreo, las concentraciones diarias de *E. necator* estuvieron influenciadas significativamente de forma positiva por las temperaturas media y máxima, y de forma negativa por la humedad relativa, la precipitación y la velocidad del viento. En lo que respecta a *P. viticola*, las concentraciones diarias estuvieron influenciadas significativamente de forma positiva por la humedad relativa, y de forma negativa por las variables de temperatura y velocidad del viento.

Los niveles de esporas de *E. necator* y *P. viticola* mostraron tendencias diferentes en cuanto a su comportamiento intradiario (figura 4). Las esporas de *E. necator* mantienen sus valores más bajos durante las primeras horas del día, alcanzando los niveles mínimos durante las primeras horas de la mañana (8-9 horas). A partir del mediodía, los niveles ascienden progresivamente hasta el periodo que va desde las 16 hasta las 20 horas, durante el cual se alcanzan los valores máximos. A partir de ahí, los niveles vuelven a descender progresivamente. En el caso de *P. viticola*, los niveles más bajos de esporas también aparecen durante las primeras horas del día, alcanzando valores mínimos entre las 3 y las 7 horas. Sin embargo, a partir de las 9 horas los niveles alcanzan rápidamente los valores más altos, manteniéndose desde las 10 horas hasta 17 horas, y obteniendo los valores máximos a las 11-12 horas. Los niveles descienden bruscamente a las 18 horas, manteniendo valores medios hasta el final del día.

DISCUSIÓN

Los resultados indican que, en este territorio, las esporas de *E. necator* son más abundantes que las de *P. viticola* y aparecen de forma constante en la atmósfera de los viñedos durante el ciclo vegetativo anual de la vid.

Los niveles de esporas de *E. necator* encontrados en viñedos del noroeste³⁰ y sur peninsular³¹ superan a los de *P. viticola*. Al igual que los resultados obtenidos en este trabajo, en el sur peninsular, la presencia de esporas de *E. necator* también es constante durante los periodos de muestreo³¹, mientras que las de *P. viticola* desaparecen de forma frecuente, especialmente en los meses de verano¹³.

E. necator y *P. viticola* son patógenos especialistas de la vid^{28,42}, por lo que sus ciclos de vida están muy relacionados con la fenología de la planta⁴³. Algunos autores han detectado la presencia de ascosporas de *E. necator* en el aire desde la dormancia hasta la floración⁴⁴. Sin embargo, en el presente estudio no se han detectado, por lo que es muy probable que la fuente de infección sea la reactivación del micelio invernante¹⁰. En las infecciones de este tipo las esporas asexuales se producen directamente en los pámpanos desarrollados

por las yemas infectadas⁵, lo que explicaría la detección de esporas asexuales en fenofases tempranas, como la brotación y el desarrollo de las hojas, encontradas en este y otros estudios^{20,39}. Según González-Fernández y cols. (2019), las concentraciones más altas de esporas coinciden con el desarrollo de las inflorescencias, la floración y el desarrollo de los frutos¹¹. Sin embargo, los resultados muestran una mayor concentración de esporas durante las fenofases de desarrollo de las inflorescencias, en tanto que durante la floración y el desarrollo de los frutos las concentraciones descendieron, debido probablemente a la presencia de condiciones meteorológicas desfavorables para el desarrollo del hongo.

En el análisis de la relación entre las concentraciones de esporas de *E. necator* y las variables meteorológicas, se encontró que las temperaturas media y máxima tuvieron una influencia positiva, mientras que la humedad relativa y la precipitación influenciaron de forma negativa.

Las temperaturas, en un rango de 15 a 30 °C, favorecen el crecimiento del micelio¹², la esporulación¹³ y la germinación e infección de las esporas de este hongo¹⁴. Sin embargo, las temperaturas superiores a 30 °C dificultan o inhiben estos procesos^{13,15}, lo que explicaría las bajas concentraciones encontradas durante los meses de verano.

La dispersión de esporas de este hongo se ve favorecida por valores bajos de humedad relativa y la presencia de precipitaciones nulas o suaves^{16,17}. En los viñedos del noroeste y del sur de la península ibérica, las concentraciones más altas de esporas se han registrado con poca o ninguna precipitación, o tras periodos de lluvias suaves, y con valores de humedad relativa comprendidos entre 47 y 79 %^{11,13,30}. Estas condiciones coinciden con las registradas durante los periodos de altas concentraciones de esporas de *E. necator* en este trabajo.

Las infecciones primarias de *P. viticola* tienen lugar desde la dormancia hasta la floración de la vid²¹, siendo esta susceptible a la infección desde la brotación⁴⁵. Las infecciones secundarias se producen principalmente entre el desarrollo de las inflorescencias y la maduración^{23,24}. Las concentraciones más altas de esporas asexuales en el aire han sido detectadas en diversas fenofases como la brotación³¹, el desarrollo de las hojas y el de las inflorescencias²⁶, la floración y el desarrollo de los frutos⁴⁶ y la maduración³⁰. Los resultados de este estudio muestran una mayor concentración de esporas durante la dormancia, brotación y desarrollo de las inflorescencias, coincidiendo con los resultados de algunos de los autores citados. Durante las demás fenofases las concentraciones fueron muy bajas, debido probablemente, como en el caso anterior, a condiciones meteorológicas adversas para el desarrollo del hongo.

P. viticola necesita una humedad relativa alta (>80 %) para la esporulación y dispersión de esporas^{25,26}, produciéndose concentraciones bajas en el aire cuando la humedad relativa baja del 60 %²⁶.

La esporulación², dispersión de esporas³⁰ y germinación e infección de estas²⁷ es posible a partir de temperaturas superiores a 10 °C, mientras que, a partir de los 25 °C, estos procesos se ven perjudicados²⁷, encontrándose bajas concentraciones de esporas cuando las temperaturas máximas superan los 30 °C³⁰. Las concentraciones más bajas de esporas, e incluso su ausencia en el aire, se produjeron durante los periodos más calurosos y secos, especialmente en los meses de verano.

Algunos autores han encontrado relaciones positivas entre la velocidad del viento y las concentraciones de esporas de *P. viticola*²⁶, mientras que al igual que en este trabajo, otros han obtenido una relación negativa⁴⁷. Según McCartney (1991), para muchas especies de hongos no existen unos umbrales de velocidad del viento claros que determinen qué valores favorecen la dispersión o la dilución de sus esporas en el aire⁴⁸.

En cuanto a la evolución intradiaria de la concentración de esporas de *E. necator* y *P. viticola*, varios autores han obtenido resultados similares a los del presente estudio. Los niveles de esporas más altos de *E. necator* coinciden con las horas de la tarde, entre las 19-20 horas, mientras que los más bajos se producen a primeras horas de la mañana, sobre las 8-10 horas^{43,49,50}. En el caso de *P. viticola*, los niveles más altos coinciden con las horas del mediodía y primeras horas de la tarde, entre las 11 y las 14 horas, en tanto que los más bajos se producen durante las primeras horas del día, entre las 5 y las 8 horas^{49,50}.

Los resultados de este estudio muestran que, desde el comienzo del ciclo vegetativo de la vid hasta la prefloración, el riesgo de infección por los hongos que producen el mildiu y el oídio es muy alto en el centro de la península ibérica. Durante ese periodo pueden producirse daños que reduzcan drásticamente la producción. Las condiciones ambientales de los meses de verano, que coinciden con fenofases posteriores a la floración, dificultan el desarrollo de los ciclos de vida de estos hongos. Con todo, la presencia constante de esporas de *E. necator* en la atmósfera de los viñedos, debido a sus menores requerimientos de humedad, hace que el riesgo de infección se mantenga durante estos periodos. El monitoreo y seguimiento constante de las variables que afectan al sistema vid-ambiente-patógeno en el centro de la península ibérica permitirá el desarrollo de modelos predictivos del riesgo de infección por hongos patógenos que ayudarán a establecer estrategias de prevención sostenibles.

AGRADECIMIENTOS

La Consejería de Educación, Cultura y Deportes, de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (JCCM), y la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM) financiaron este trabajo a través de los proyectos SBPLY/21/180501/000172 y 2022-GRIN-34507, respectivamente. Guillermo Muñoz Gómez es contratado predoctoral por el Plan Propio I+D+i de la UCLM, cofinanciado por el Fondo Social Europeo Plus (FSE+). Eduardo Jiménez Jiménez está contratado para la realización de iniciativas de investigación e innovación por el Programa Investigo, cofinanciado por la JCCM y el FSE+. Los autores agradecen al Complejo Enoturístico Finca La Estacada por permitirnos trabajar en sus viñedos, y por su colaboración y apoyo en el desarrollo de nuestra investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Organisation Internationale de la Vigne et du Vin (OIV). Annual Assessment of the World Vine and Wine Sector in 2023. Paris: OIV Statistics Publications. [actualizado en 2024; citado 19 de julio de 2025] Disponible en: https://www.oiv.int/sites/default/files/documents/Annual_Assessment_2023.pdf.
2. Gessler C, Pertot I, Perazzolli M. *Plasmopara viticola*: A review of knowledge on downy mildew of grapevine and effective disease management. *Phytopathol Mediterr*. 2011;50:3–44.
3. Bois B, Zito S, Calonnet A, Ollat N. Climate vs grapevine pests and diseases worldwide: The first results of a global survey. *OENO One*. 2017;51(2):133–9.
4. Calonnet A, Cartolaro P, Poupot C, Dubourdieu D, Darriet P. Effects of *Uncinula necator* on the yield and quality of grapes (*Vitis vinifera*) and wine. *Plant Pathol*. 2004;53(4):434–45.
5. Gadoury DM, Cadle-Davidson L, Wilcox WF, Dry IB, Seem RC, Milgroom MG. Grapevine powdery mildew (*Erysiphe necator*): a fascinating system for the study of the biology, ecology and epidemiology of an obligate biotroph. *Mol Plant Pathol*. 2012;13:1–16.
6. Kolenkova K, Esmaeel Q, Jacquard C, Nowak J, Clément C, Ait Barka E. *Plasmopara viticola* the causal agent of downy mildew of grapevine: From its taxonomy to disease management. *Front Microbiol*. 2022;13:889472.
7. Stevens RB. Cultural practices in disease control. En: Horsfall JG, director. *Plant Pathology: An Advanced Treatise. Volume III: The Diseases, Population, Epidemics and Control*. London: Academic Press Inc.; 1960. pp. 357–429.
8. Holb IJ, Füzi I. Monitoring of ascospore density of *Erysiphe necator* in the air in relation to weather factors and powdery mildew development. *Eur J Plant Pathol*. 2016;144:751–62.
9. Hoffmann P, Virányi F. The occurrence of cleistothecia of *Erysiphe necator* (Grapevine powdery mildew) and their epidemiological significance in some vine-growing regions of Hungary. *Acta Phytopathol Entomol Hung*. 2007;42(1):9–16.
10. Karbalaee-Khiavi H, Shikhlini H, Babaei-Ahari A, Heydari A, Akrami M. Study on the biology and epidemiology of *Uncinula necator* – the causal agent of grape powdery mildew disease. *J Environ Sci Eng A*. 2012;1:574–9.
11. González-Fernández E, Piña-Rey A, Fernández-González M, Rodríguez-Rajo FJ. Effect of environmental conditions and phenology in the dispersal of secondary *Erysiphe necator* conidia in a vineyard. *Vitis*. 2019;58:49–58.
12. Jailloux F, Willocquet L, Chapuis L, Froidefond G. Effect of weather factors on the release of ascospores of *Uncinula necator*, the cause of grape powdery mildew, in the Bordeaux region. *Can J Bot*. 1999;77:1044–51.
13. Martínez-Bracero M, González-Fernández E, Wójcik M, Alcázar P, Fernández-González M, Kasprzyk I, Rodríguez-Rajo FJ, Galán C. Airborne fungal phytopathological spore assessment in three European vineyards from different bioclimatic areas. *Aerobiologia*. 2020;36:715–29.
14. Willocquet L, Colombet D, Rougier M, Fargues J, Clerjeau M. Effects of radiation, especially ultraviolet B, on conidial germination and mycelial growth of grape powdery mildew. *Eur J Plant Pathol*. 1996;102:441–9.
15. Peduto F, Backup P, Hand EK, Janousek CN, Gubler WD. Effect of high temperature and exposure time on *Erysiphe necator* growth and reproduction: revisions to the UC Davis powdery mildew risk index. *Plant Dis*. 2013;97:1438–47.
16. Willocquet L, Berud F, Raoux L, Clerjeau M. Effects of wind, relative humidity, leaf movement and colony age on dispersal of conidia of *Uncinula necator*, causal agent of grape powdery mildew. *Plant Pathol*. 1998;47:234–42.
17. Willocquet L, Clerjeau M. An analysis of the effects of environmental factors on conidial dispersal of *Uncinula necator* (Grape powdery mildew) in vineyards. *Plant Pathol*. 1998;47:227–33.
18. Pearson RC, Gärtel W. Occurrence of hyphae of *Uncinula necator* in buds of grapevine. *Plant Dis*. 1985;69:149–51.
19. Pearson RC, Gadoury DM. Cleistothecia, the source of primary inoculum for grape powdery mildew in New York. *Phytopathology*. 1987;77:1509–14.
20. Rossi V, Caffi T, Bugiani R, Spanna F, Della Valle D. Estimating the germination dynamics of *Plasmopara viticola* oospores using hydro-thermal time. *Plant Pathol*. 2008;57:216–26.
21. Maddalena G, Russo G, Toffolatti SL. The study of the germination dynamics of *Plasmopara viticola* oospores highlights the presence of phenotypic synchrony with the host. *Front Microbiol*. 2021;12.
22. Rossi V, Caffi T. Effect of water on germination of *Plasmopara viticola* oospores. *Plant Pathol*. 2007;56:957–66.
23. Gindro K, Schnee S, Lecoultré N, Michellod E, Zufferey V, Spring JL, Viret O, Dubuis PH. Development of downy mildew in grape bunches of susceptible and resistant cultivars: infection pathways and limited systemic spread. *Aust J Grape Wine Res*. 2022;28(4):572–80.
24. Rakhmatov A, Kholliiev A, Tashpulatov U, Haydarova S. Damage periods of the main diseases occurring in vineyards during the annual development phases. *E3S Web Conf*. 2024;563:03002.
25. Caffi T, Gilardi G, Monchiero M, Rossi V. Production and release of asexual sporangia in *Plasmopara viticola*. *Phytopathology*. 2013;103:64–73.
26. Fernández-González M, Piña-Rey A, González-Fernández E, Aira MJ, Rodríguez-Rajo FJ. First assessment of Goidanich Index

- and aerobiological data for *Plasmopara viticola* infection risk management in north-west Spain. *J Agric Sci.* 2019;1–11.
27. Caffi T, Legler SE, González-Domínguez E, Rossi V. Effect of temperature and wetness duration on infection by *Plasmopara viticola* and on post-inoculation efficacy of copper. *Eur J Plant Pathol.* 2016;144:737–50.
 28. Burruano S. The life-cycle of *Plasmopara viticola*, cause of downy mildew of vine. *Mycologist.* 2000;14:179–82.
 29. Díaz MR, Iglesias I, Jato MV. Airborne concentrations of *Botrytis*, *Uncinula* and *Plasmopara* spores in a vineyard in Leiro-Ourense (N.W. Spain). *Aerobiología.* 1997;13:31–5.
 30. Fernández-González M, Ramos-Valcárcel D, Aira MJ, Rodríguez-Rajo FJ. Prediction of biological sensors appearance with ARIMA models as a tool for integrated pest management protocols. *Ann Agric Environ Med.* 2016;23:129–37.
 31. Martínez-Bracero M, Alcázar P, Velasco-Jiménez MJ, Galán C. Fungal spores affecting vineyards in Montilla-Moriles, southern Spain. *Eur J Plant Pathol.* 2019;153:1–13.
 32. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). Tercera parte: Estadísticas Agrarias. Capítulo 7: Superficie y producciones de cultivo. Madrid: MAPA, Anuario de Estadística 2023. [actualizado en 2024; citado 27 de julio de 2025] Disponible en: <https://www.mapa.gob.es/estadistica/pags/anuario/2023/FORMATO%20PDF/AE23-C07/CAP%C3%8DTULO%207.pdf>.
 33. Rivas-Martínez S, Penas Á, del Río S, Díaz González TE, Rivas-Sáenz S. Bioclimatology of the Iberian Peninsula and the Balearic Islands. En: Loidi J, director. *The Vegetation of the Iberian Peninsula*. Cham: Springer. 2017. pp. 29–80.
 34. Rivas-Martínez S, Penas Á, Díaz González TE, Cantó P, del Río S, Costa JC, Herrero L, Molero J. Biogeographic units of the Iberian Peninsula and Balearic Islands to district level. A concise synopsis. En: Loidi J, director. *The Vegetation of the Iberian Peninsula*. Cham: Springer. 2017. pp. 131–88.
 35. Hirst J. An automatic volumetric spore trap. *Ann Appl Biol.* 1952;39(2):257–65.
 36. Galán C, Cariñanos P, Alcázar P, Domínguez-Vilches E. Spanish aerobiology network (REA): Management and quality manual. Córdoba: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2007.
 37. Galán C, Ariatti A, Bonini M, Clot B, Crouzy B, Dahl A, et al. Recommended terminology for aerobiological studies. *Aerobiología.* 2017;33:293–5.
 38. Galán C, Tormo R, Cuevas J, Infante F, Domínguez E. Theoretical daily variation patterns of airborne pollen in the southwest of Spain. *Grana.* 1991;30(1):201–9.
 39. Oliveira M, Ribeiro H, Delgado JL, Abreu I. Seasonal and intradiurnal variation of allergenic fungal spores in urban and rural areas of the North of Portugal. *Aerobiología.* 2009;25(2):85–98.
 40. Lorenz DH, Eichhorn KW, Bleiholder H, Klose R, Meier U, Weber E. Growth stages of the grapevine: Phenological growth stages of the grapevine (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*)—Codes and descriptions according to the extended BBCH scale. *Aust J Grape Wine Res.* 1995;1(2):100–3.
 41. Cornelius C, Petermeier H, Estrella N, Menzel A. A comparison of methods to estimate seasonal phenological development from BBCH scale recording. *Int J Biometeorol.* 2011;55(6):867–77.
 42. Halleen F, Holz G. An overview of the biology, epidemiology and control of *Uncinula necator* (Powdery Mildew) on grapevine, with reference to South Africa. *S Afr J Enol Vitic.* 2001;22:111–21.
 43. Fernández-González M, Rodríguez-Rajo FJ, Jato V, Aira MJ. Incidence of fungals in a vineyard of the denomination of origin Ribeiro (Ourense - North-Western Spain). *Ann Agric Environ Med.* 2009;16:263–71.
 44. Grove GG. Perennation of *Uncinula necator* in vineyards of Eastern Washington. *Plant Dis.* 2004;88(3):242–7.
 45. Kennelly MM, Gadoury DM, Wilcox WF, Magarey PA, Seem RC. Primary infection, lesion productivity, and survival of sporangia in the grapevine downy mildew pathogen *Plasmopara viticola*. *Phytopathology.* 2007;97:512–22.
 46. Cortiñas-Rodríguez JA, Fernández-González M, Vázquez-Ruiz RA, Aira MJ, Rodríguez-Rajo FJ. The understanding of phytopathogens as a tool in the conservation of heroic viticulture areas. *Aerobiología.* 2022;38:177–93.
 47. Carrera L, Fernández-González M, Aira MJ, Espinosa KCS, Otero RP, Rodríguez-Rajo FJ. Airborne *Plasmopara viticola* sporangia: a study of vineyards in two bioclimatic regions of northwestern Spain. *Horticulturae.* 2025;11(3):228.
 48. McCartney HA. Airborne dissemination of plant fungal pathogens. *J Appl Bacteriol Symp Suppl.* 1991;70:395–485.
 49. Rodríguez-Rajo FJ, Seijo MC, Jato V. Estudio de los niveles de los principales fitopatógenos para la optimización de cosechas de *Vitis vinifera* en Valdeorras, Ourense (1998). *Bot Complut.* 2002;26:121–35.
 50. Fernández-González M. Estudio fenológico y aerobiológico en un viñedo en la Comarca del Ribeiro. Tesis doctoral. Vigo: Universidade de Vigo, 2011. [citado 23 de julio de 2025]. Disponible en: <https://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/handle/11093/227>.