

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID  
FACULTAD DE FARMACIA**



**TESIS DOCTORAL**

**La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid como un  
sistema de información de polen aerovagante de utilidad en  
Salud Pública**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR**

**PRESENTADA POR**

**Patricia Cervigón Morales**

**DIRIGIDA POR**

**Adela Montserrat Gutiérrez Bustillo  
Jesús Rojo Úbeda**

Madrid

© Patricia Cervigón Morales, 2025

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

Facultad de Farmacia



**Tesis Doctoral**

**La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid como  
un sistema de información de polen aerovagante  
de utilidad en Salud Pública**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR  
PRESENTADA POR

**Patricia Cervigón Morales**

Directores

**Adela Montserrat Gutiérrez Bustillo  
Jesús Rojo Úbeda**

Madrid



**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

Facultad de Farmacia

PROGRAMA DE DOCTORADO EN FARMACIA



## **Tesis Doctoral**

**La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid como  
un sistema de información de polen aerovagante  
de utilidad en Salud Pública**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR  
PRESENTADA POR

**Patricia Cervigón Morales**

Directores

**Adela Montserrat Gutiérrez Bustillo  
Jesús Rojo Úbeda**

Madrid, 2024

*A los ausentes,  
presentes en mi memoria*

*A los ausentes,  
presentes en mi memoria*



## **Mis más sinceros agradecimientos**

A Montse, mi querida Directora de tesis, por su infatigable apoyo desde mis tiempos de becaria, primero, después como colaboradora externa en el grupo de investigación desde mi trabajo como coordinadora; por su apoyo incondicional a lo largo de estos años de trabajo aerovagante que hemos compartido. No tengo palabras suficientes de agradecimiento y cariño, y porque sin ella la presente tesis doctoral no hubiera sido posible.

A Jesús, mi genial Director de Tesis, por haberme ayudado a darle forma y fin a este trabajo. Ha sido un lujo haberlo tenido de maestro en esta etapa. Gracias por llevar a buen puerto el trabajo de todos estos años.

A los coordinadores de la Red Palinocam, mi querido Chema por enseñarme que siempre que se hace camino al andar, aunque no siempre siguiera sus huellas y a mi querido Emiliano, porque me enseñó a aprender, siempre a pesar de no ser la mejor de las aprendices. Gracias por haber construido con Montse los pilares de un trabajo, que ahora se recoge en esta tesis y que empezasteis juntos hace treinta años.

A los responsables y técnicos de la Red Palinocam, de los que empezaron muchos ya están disfrutando de su jubilación, otros siguen y otros se han renovado. A todas gracias porque cada dato, cada número y cada lectura ha sido posible gracias a todos vosotros.

A los becarios de la Red Palinocam, con los que he compartido muchos años; como becaria primero, queridas Concha y Gema, y después a todos los que siguieron con el trabajo, que han contribuido con su esfuerzo y dedicación al trabajo bien hecho.

A Zuzana por ser una gran compañera desde nuestros primeros años en los cursos de doctorado allá por el año 99, hasta su última etapa en la Red Palinocam.

A mis compañeros de Sanidad Ambiental, unos jubilados ya, y otros aún al pie del cañón, aunque ya no trabaje con vosotros siempre nos quedarán los cafés y gratos momentos que disfrutar.

A todo el departamento de Botánica, que me ha acogido todo este tiempo desde los años de especialidad ecológica tan lejanos, hasta los cursos de doctorado en Biodiversidad. A todos los que me habéis ayudado en esta recta final con vuestros tertulias, cafés, compañía y apoyo: Paloma, Marga, Ana, Ángel, Álvaro, Jorge, Javier.

Al departamento de Farmacología y Farmacognosia. Luismi y José, a los que os corresponde por antigüedad y cariño, estar aquí en estas palabras. Y a Marina por iluminarme con los trámites y los últimos pasos en esta andadura.

A mi Facultad de Farmacia, el lugar al que siempre me gusta volver y estar, a mis antiguas compañeras y profesores de mi etapa estudiantil, que aún me transporta en espíritu cuando subo las escaleras.

Y a los que en esta última etapa habéis me habéis guiado y apoyado. Por supuesto a la gran facilitadora de todas las cosas, Macarena.

Y como no, a mi familia, y a mis tres compañeros de vida: Isaac, Yago e Irene que me han aguantado en estos últimos tiempos, dándole a la tecla y ahora ya les puedo decir al fin ; *“Dormidas están, las treinta, redondas, blancas”*

Con mi más profundo cariño y agradecimiento a todos y cada uno de los que he nombrado, y a los que haya olvidado también, mis disculpas, porque no quiero escribir cientos de renglones, que al final se puedan torcer.

*Caminante, son tus huellas  
el camino y nada más;  
Caminante, no hay camino,  
se hace camino al andar.  
Al andar se hace el camino,  
y al volver la vista atrás  
se ve la senda que nunca  
se ha de volver a pisar.  
Caminante no hay camino  
sino estelas en la mar.*

*Antonio Machado*



# Índice

Resumen

Abstract

1.	Introducción general	25
2.	Objetivos generales	47
3.	Material y métodos	51
4.	Capítulo I. Control de calidad en la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid. Ejercicio Interlaboratorio. ( <i>Importance of the quality management of aerobiological monitoring networks: The case study of Madrid Region in Spain</i> )	61
5.	Capítulo II: La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid. Treinta años como sistema de vigilancia e información de polen aerovagante de utilidad en Salud Pública	75
6.	Capítulo III. Detección de cambios a largo plazo en la calidad biológica del aire de la Comunidad de Madrid mediante calendarios polínicos. ( <i>Progressive pollen calendar to detect long-term changes in the biological air quality of cities in the Madrid Region, Spain</i> )	87
7.	Capítulo IV: Delimitación de zonas de riesgo ambiental, basada en los niveles polínicos, los usos y vegetación del territorio. ( <i>Assessment of environmental risk areas based on airborne pollen patterns as a response to land use and land cover distribution</i> )	103
8.	Discusión general	117
9.	Conclusiones generales	137
10.	Material suplementario	143



# Resumen



## RESUMEN

El polen atmosférico es la principal fuente de aeroalergenos en el ambiente de nuestras ciudades, con un importante impacto en salud pública, que afecta al 15-20% de la población española según los últimos estudios. La Organización Mundial de la Alergia considera actualmente a las afecciones respiratorias relacionadas con procesos alérgicos, como uno de los grandes problemas de salud pública. Se prevé que la incidencia de las enfermedades alérgicas respiratorias aumente en los próximos años como consecuencia de la contaminación ambiental, los cambios en el uso del suelo, el incremento de población en las ciudades y el cambio climático.

Ante el reto que supone el diagnóstico y la aplicación de un adecuado tratamiento a las personas sensibilizadas a algunos de los tipos polínicos alérgicos, la vigilancia ambiental, la información pública y los sistemas de alerta de los niveles de exposición polínica constituyen herramientas de extraordinaria utilidad para los profesionales sanitarios y el autocuidado de las personas alérgicas. Todos estos aspectos de información y seguimiento de la salud ambiental son competencia de las redes de vigilancia y monitorización aerobiológica, las cuales en España y en Europa han alcanzado una gran relevancia desde los años 90 del pasado siglo y hasta la actualidad.

En 1992 la Comunidad de Madrid promovió el Programa Regional de Prevención y Control del Asma, en cuya estrategia se incluía la vigilancia y control de la contaminación ambiental. Para ello se diseñó y puso en marcha, en marzo de 1993 la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid. Esta red de control del polen atmosférico, que en España fue la primera promovida desde un programa de Salud Pública, ha resultado un ejemplo de colaboración institucional exitosa entre la Consejería de Sanidad de la CM, la Universidad Complutense de Madrid y varios Ayuntamientos, con un largo recorrido de más de 30 años.

La presente tesis “La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid como un sistema de información de polen aerovagante de utilidad en salud pública” se articula como un trabajo de investigación desarrollado desde dos puntos de vista, por un lado, para mostrar los resultados de gestión de la Red Palinocam y de los

principales resultados de la actividad diaria de la red como sistema de control del polen atmosférico y de difusión de la información polínica (capítulos I y II), y por otro, el análisis de la serie histórica de datos polínicos para los años 1994-2022, empleando herramientas científicas propias de la disciplina aerobiológica, con el objetivo de caracterizar la exposición espaciotemporal al polen en la Comunidad de Madrid (capítulos III y IV).

- Capítulo I: Control de calidad en la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid. Ejercicio interlaboratorio.
- Capítulo II: La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid. Treinta años como sistema de vigilancia e información de polen aerovagante de utilidad en salud pública.
- Capítulo III: Detección de cambios a largo plazo en la calidad biológica del aire de la Comunidad de Madrid mediante calendarios polínicos.
- Capítulo IV: Delimitación de zonas de riesgo ambiental basadas en los niveles polínicos, los usos y vegetación del territorio.

En el Capítulo I se presentan los resultados de un ejercicio de control de calidad basado en un intercomparativo entre los resultados obtenidos por los técnicos de la Red Palinocam, con el objetivo de evaluar competencias y para detectar cualquier posible error en el procedimiento de análisis de las muestras diarias. Los ejercicios de control de calidad son esenciales para mantener la calidad de los datos generados por las redes aerobiológicas que realizan el control rutinario del polen atmosférico.

Los resultados de este ejercicio de intercomparación, mediante dos pruebas de aptitud diferentes, i) el análisis de las mismas preparaciones por diferentes técnicos, en sus laboratorios con sus microscopios ópticos y ii) el análisis de muestras comunes, en un único microscopio óptico, por los técnicos participantes, mostraron una muy buena calidad de los datos polínicos. Se detectaron algunos errores puntuales significativos, como la confusión entre el polen de *Quercus* con el de *Acer* y el de *Quercus* con el de *Platanus*, por parte de algunos participantes. En cuanto a los posibles errores matemáticos en el cálculo de resultados, en nuestro caso no fueron destacables. Visto que los

errores más significativos son los cometidos en la identificación morfológica de algunos tipos polínicos, son muy recomendables los programas de formación dirigidos a los analistas, para profundizar en el reconocimiento morfológico de los tipos polínicos más problemáticos.

Vistas las posibles fuentes de error, la realización de pruebas de aptitud como garantía de la calidad de los datos generados, es clave en la creación de las bases de datos históricas. La calidad de los datos de las redes regionales es crucial cuando estas pasan a formar parte de las redes nacionales o continentales, como es el caso de la Red Palinocam, que se integra y contribuye con sus datos, a la Red Aerobiológica Española (REA) y a la *European Aeroallergen Network* (EAN).

La Red Palinocam se basa en un modelo de cooperación institucional, que integra la administración regional (Comunidad de Madrid), la local (diversos ayuntamientos de la Comunidad) y la Universidad Complutense de Madrid. Las principales tareas de la coordinación de la Red Palinocam son: garantizar el correcto funcionamiento de las estaciones que la integran, gestionar y mantener su base de datos y difundir la información generada a los profesionales sanitarios y a la población.

En el Capítulo II se recogen las principales actividades de difusión de la información aerobiológica generada por la Red Palinocam durante el periodo 1994-2022.

La difusión de la información aerobiológica a la población, ha ido evolucionando junto con las tecnologías, desde el fax y el contestador automático de los inicios, hasta la difusión actual por medios electrónicos. El análisis de las muestras diarias en cada captador y el envío diario de los datos de concentración de polen al centro coordinador es uno de los pilares fundamentales que han permitido que la página Web, uno de los canales principales de información, sea todos los años una de las páginas más visitadas en la primavera coincidiendo con la época de mayor demanda por parte de los usuarios de información actualizada.

En esta tesis doctoral se presentan los calendarios polínicos de todas las estaciones de muestreo aerobiológico de la Red Palinocam. Un calendario

polínico es una herramienta muy adecuada como elemento de difusión de información polínica y resulta de gran utilidad para informar a la población sobre el momento y la intensidad de la exposición a polen con un formato muy fácil de interpretar. Pero, además, los calendarios polínicos son presentados como herramientas científicas de interpretación del espectro polínico con los cuales se pueden analizar patrones temporales y espaciales de exposición polínica.

En las últimas décadas, la Comunidad de Madrid ha experimentado notables cambios en los usos del suelo y una importante tendencia al alza de las temperaturas. En cuanto al polen atmosférico, en todas las estaciones de la red, hemos observado una mayor incidencia de los tipos polínicos arbóreos más importantes (*Cupressaceae*, *Platanus* y *Quercus*, pero también *Pinaceae*, *Olea* y otros). Estos cambios temporales son muy evidentes si comparamos los calendarios polínicos de dos periodos, 1994-2004 (pasado) y 2012-2022 (presente), lo que indica cambios en las fuentes de polen, en la fenología de las plantas productoras y en otros factores que afectan a la dinámica atmosférica del polen. En base a estos resultados, presentamos una propuesta técnica a la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid para generar calendarios polínicos para cada ciudad utilizando el periodo de referencia de los diez últimos años y actualizar esta información cada tres años. Finalmente proponemos, que el calendario polínico realizado para los últimos diez años (2013-2022), se considere la información aerobiológica de referencia para todas las estaciones de la red.

El enfoque espacial de todos los datos analizados queda reflejado en el capítulo IV, donde se analiza la estrecha correlación entre las fuentes potenciales de polen y la dinámica del polen aerotransportado, utilizando para ello, los datos polínicos y la información de uso del suelo del Corine Land Cover. Integrando la distribución espacial de las fuentes de polen y la información sobre estacionalidad e incidencia del polen atmosférico de los calendarios polínicos, hemos delimitado seis áreas de riesgo aerobiológico, con patrones comunes de exposición polínica, cuya consideración permitiría mejorar la aplicación de planes de gestión e información polínica en la Comunidad de Madrid y permitiría optimizar el diseño de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid.

# Abstract



## **ABSTRACT**

Airborne pollen is the main source of aeroallergens in the environment of our cities and has a significant impact on public health, affecting 15-20% of the Spanish population according to the latest studies. The World Allergy Organization currently considers allergy-related respiratory conditions a major public health issue. The incidence of respiratory allergic diseases is expected to rise in the coming years as a result of environmental pollution, changes in land use, population growth in cities and climate change.

Faced with the challenge of diagnosing and providing suitable treatments to people sensitized to some of the allergenic pollen types, environmental monitoring, public information and pollen exposure warning systems are extremely useful tools, both for health professionals and for allergic individuals for self-care purposes. All these environmental health information and monitoring aspects fall within the scope of aerobiological surveillance and monitoring networks, which have achieved great relevance in Spain and Europe since the 1990s.

In 1992 the Community of Madrid launched its Regional Programme for the Prevention and Control of Asthma, the strategy of which included the monitoring and control of environmental pollution. The Madrid Region Palynological Network (Palinocam Network) was designed to this end, which was introduced in March 1993. This atmospheric pollen control network, which was the first of its kind to be promoted as part of a public health programme in Spain, is an example of successful institutional collaboration among the Health Department of the Community of Madrid, the Complutense University of Madrid and several city councils in the Community of Madrid. It now has a long history of more than 30 years.

This thesis, entitled " Madrid Region Palynological Network as an airborne pollen information system useful in Public Health ", has been articulated as research work conducted from two points of view: on the one hand, the presentation of the results of the management of the Palinocam network and the main results of the daily activity of the network as a atmospheric pollen control and pollen information dissemination system (Chapters I and II) and, on the other, the analysis of the

historical series of pollen data from 1994 to 2022 using aerobiological tools with the aim of characterising the spatio-temporal exposure to pollen in the Community of Madrid (Chapters III and IV).

- Chapter I: Quality control in the Madrid Region Palynological Network. Interlaboratory exercises.
- Chapter II: The Madrid Region Palynological Network. Thirty years as a surveillance and information system of airborne pollen useful in public health.
- Chapter III: Detection of long-term changes in the biological air quality of the Community of Madrid by means of pollen calendars.
- Chapter IV: Delimitation of environmental risk zones based on pollen levels, land use and vegetation.

Chapter I presents the results of a quality control exercise which consisted in benchmarking the results obtained by the technicians of the Palinocam Network with the aim of evaluating their skills and to detect potential errors in the daily sample analysis procedure. Quality control exercises are essential to assure the quality of the data generated by the aerobiological networks performing the routine monitoring of atmospheric pollen.

The results of this benchmarking exercise using two different proficiency tests – 1) the analysis of the same preparations made by different technicians at their laboratories using their own optical microscopes, and 2) the analysis of common samples in a single optical microscope by all participating technicians – show the quality of the pollen data was very high. Some significant one-off mistakes were detected, such as the confusion of *Quercus* spp pollen with *Acer* spp pollen and of *Quercus* spp pollen with *Platanus* spp pollen by some participants. As for possible mathematical errors in the obtention of the results, they were not significant in our case. Given that the most significant mistakes were those made in the morphological identification of some pollen types, training programmes for analysts are highly recommended in order to improve their ability to morphologically recognise the most problematic types.

In view of the aforementioned potential sources of error, proficiency testing to assure the quality of the data generated is key to creating historical databases.

quality of the data from regional networks is crucial once they become part of national or continental networks, as is the case of the Palinocam network, which is part of and provides its data to the Spanish Aerobiological Network and the European Aeroallergen Network.

The Palinocam network is based on a model of institutional cooperation among the regional administration (the Community of Madrid), local administrations (various town councils in the Community) and the Complutense University of Madrid. The Palinocam Network coordination tasks include the management and maintenance of the historical pollen database, thereby ensuring the correct interoperation of different network components, and the dissemination of the information generated to both health professionals and the general public. Chapter II lists the main activities for the dissemination of the aerobiological information generated by the Palinocam network throughout the 1994-2022 period.

The dissemination of aerobiological information to the public has evolved with technology, from the fax and answering machines of the early days to current electronic dissemination means. The analysis of daily samples in each sampler and the daily transmission of pollen concentration data to the network coordination centre are one of the fundamental pillars that have allowed the webpage, one of the main public information channels, to become one of the most visited webpages every spring, coinciding with the time when user demand for updated information is at its highest.

The pollen calendars of all the aerobiological sampling stations in the Palinocam Network are presented herein. A pollen calendar is an excellent tool for providing pollen information and is very useful for informing the population about the time and intensity of pollen exposure in a format that is easy to interpret. In addition, pollen calendars are presented as scientific tools for the interpretation of the pollen spectrum with which the temporal and spatial patterns of pollen exposure can be analysed.

Over the past few decades the Community of Madrid has experienced marked changes in land use and a significant upward trend in temperatures. As far as airborne pollen is concerned, all network stations have seen a higher incidence

of the main tree pollen types (Cupressaceae, *Platanus* and *Quercus*, but also Pinaceae, *Olea* and others). These temporal changes are very evident when the pollen calendars of two periods – 1994-2004 (past) and 2012-2022 (present) – are compared, indicating there have been changes in pollen sources, the phenology of pollen producing plants and other factors affecting the atmospheric dynamics of pollen. Based on these results, we would like to submit a technical proposal to the Madrid Region Palynological Network consisting in creating pollen calendars for each city using the reference period of the last ten years and updating this information every three years. Finally, we propose that the pollen calendar covering the last ten years (2013-2022) be considered as the reference aerobiological information for all stations in the network.

The spatial focus of all the data analysed is reflected in Chapter IV, where the close correlation between potential pollen sources and airborne pollen dynamics is analysed using pollen data and land use information from the CORINE Land Cover inventory. By integrating the spatial distribution of pollen sources and the information on airborne pollen seasonality and occurrence from the pollen calendars we were able to identify six aerobiological risk areas having common pollen exposure patterns, the consideration of which would allow the implementation of pollen management and information plans in the Community of Madrid to be improved and the design of the Madrid Region Palynological Network optimised.

# **1. Introducción general**



## **Introducción general**

### **1. Red Palinológica de la Comunidad de Madrid (Red Palinocam)**

#### **Antecedentes y justificación**

##### **1.1 Redes aerobiológicas**

##### **1.2 Creación y configuración jurídica de la Red Palinocam**

##### **1.3 Polinosis. Impacto en salud**

### **2. Funcionamiento y control de calidad en la Red Palinocam**

#### **2.1 Requisitos de la normativa internacional y nacional**

#### **2.2 Calidad y formación del personal de la Red Palinocam**

### **1. Red Palinológica de la Comunidad de Madrid (Red Palinocam).**

#### **Antecedentes y justificación**

En la presente tesis “La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid como un sistema de información de polen aerovagante de utilidad en Salud Pública” se recogen y analizan los principales resultados de la actividad diaria de la red como sistema de control del polen atmosférico y de información durante los años 1994-2022.

El polen atmosférico es la principal fuente de aeroalergenos en el ambiente de nuestras ciudades, con un importante impacto en salud pública, que afecta al 15-20% de la población española (ALERGOLÓGICA-2015; Ojeda et al., 2018). En este contexto, las enfermedades respiratorias relacionadas con procesos alérgicos están considerados como uno de los grandes problemas de salud pública por la Organización Mundial de la Alergia (Pawankar, 2014). Además, el patrón de incidencia de las enfermedades alérgicas se está incrementando durante las últimas décadas como consecuencia del cambio climático y la contaminación ambiental en las ciudades (Lake et al., 2017; D’Amato et al., 2020; Agache et al., 2024).

El control rutinario del polen aerovagante, se viene realizando sistemáticamente desde los años 80 por las redes aerobiológicas (Buters et al., 2018). En 1993 se creó la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid (Red

Palinocam) en el marco del Programa Regional del Control y Vigilancia del Asma, impulsado por la Consejería de Sanidad de la Comunidad de Madrid, y bajo la dirección técnica del Grupo de Investigación de Aerobiología de la Universidad Complutense de Madrid.

La Red Palinocam (<https://www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen>) se basa en un modelo de cooperación institucional, entre la administración regional, local y la universidad, con representación en un Comité de Expertos creado mediante la Resolución de 18/08/2004 (BOCM 18/08/2004). Este comité consta de un Coordinador en la Consejería de Sanidad, un Director Científico-Técnico en la Facultad de Farmacia de la UCM y un representante de cada una de las instituciones responsables de las estaciones aerobiológicas.

Durante el periodo 2004-2021, la autora de esta tesis doctoral, Patricia Cervigón Morales, fue la coordinadora de la Red Palinocam en la Consejería de Sanidad de la Comunidad de Madrid, y entre las funciones de coordinación se encontraban: 1) garantizar el correcto funcionamiento de la Red Palinocam; 2) gestionar la coordinación entre las distintas estaciones de muestreo aerobiológico, 3) mantener la base histórica de datos polínicos, 4) informar periódicamente a los profesionales sanitarios y a la población en general de los niveles polínicos; 5) desarrollar herramientas útiles en salud pública como folletos divulgativos, predicciones de las concentraciones diarias, calendarios, polínicos, etc.

Por ello esta tesis pretende analizar los resultados, el funcionamiento y la difusión de la información aerobiológica generada por la red como sistema de información de interés en salud pública orientado a la prevención y al tratamiento de la información relacionada con la “polinosis”.

La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid ha sido la primera red aerobiológica promovida desde un programa de salud pública, pues se creó en el marco del Programa Regional de Control y Prevención del Asma en el año 1993, dentro del subprograma de Vigilancia Ambiental. Desde la administración regional se promovió e impulsó la creación y el mantenimiento de la Red Palinocam, y en los inicios desarrolló una importante labor para su diseño y puesta en marcha D. José María Ordóñez Iriarte (1994-1997) como primer coordinador; en una segunda etapa, el coordinador y gestor de la red fue D.

Emiliano Aránguez Ruiz (1998-2003) y desde el año 2004 al 2021 la coordinación y gestión recayó en D<sup>a</sup> Patricia Cervigón Morales. La dirección científico-técnica se llevó a cabo desde la Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense de Madrid, siendo su directora desde el inicio D<sup>a</sup> Adela Montserrat Gutiérrez Bustillo, hasta el año 2022 en que tomó el relevo D. Jesús Rojo Úbeda.

Desde 1993, la Red Palinocam se encarga del análisis diario del polen y genera la información aerobiológica de nuestra región. Inicialmente la red estaba integrada por once puntos de muestreo, en la actualidad son diez, que cubren las principales áreas urbanas, en las que reside el 80 % de la población de la Comunidad de Madrid.

Los altos niveles atmosféricos de polen alergénico provocan problemas en la población asmática y alérgica de Madrid. Dada la evidente relación entre la carga alergénica del aire y los episodios alérgicos (Pfaar et al., 2019; Bastl et al., 2021), la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid es una herramienta con gran relevancia desde el punto de vista de la salud pública para informar y alertar a los profesionales sanitarios y a la población, como usuarios finales de la información (Kmenta et al., 2016), sobre los niveles de exposición a polen alergénico en la Comunidad de Madrid.

### **1.1. Redes aerobiológicas**

En 1992 los grupos de investigación españoles en aerobiología, se reunieron en Zuheros (Córdoba) creando la Red Española de Aerobiología (REA), que integró a todas las estaciones de control, activas en ese momento y que estaban organizadas como redes regionales. Su principal objetivo fue coordinar los diferentes puntos de control a nivel nacional y crear una base de datos común para su difusión a los colectivos interesados.

En 1995 nace la Asociación Española de Aerobiología (<https://www.aerobiologia.com/>) con los objetivos de desarrollar estudios científicos colaborativos en la disciplina de la aerobiología, mantener protocolos comunes normalizados de metodología aerobiológica y constituir un foro de Aerobiología en el estado español; incorporando como rama técnica a la Red Española de Aerobiología (REA) (<https://www.uco.es/investiga/grupos/rea/>)

Actualmente la REA constituida por numerosos puntos de muestreo, es la red científica de información aerobiológica más importante de España (Figura 1). Cada estación de muestreo se encuentra gestionada independientemente por la red aerobiológica regional a la que pertenece (Galán et al., 2007) y envía semanalmente sus resultados a la base de datos nacional de REA, ubicada en la Universidad de Córdoba. En el Centro Coordinador se actualizan, tanto la base de datos polínicos nacional como la europea y se genera la información pública y las previsiones polínicas que se difunden, a través de los distintos medios de comunicación, a nivel nacional. España es actualmente, uno de los países europeos con más estaciones de control aerobiológico de todo el continente (Buters et al., 2018).



Figura 1.1. Mapa de estaciones tomado de [https://www.uco.es/investiga/grupos/rea/?page\\_id=24](https://www.uco.es/investiga/grupos/rea/?page_id=24)

(10/03/2024)

Desde su origen, la REA se integró en la Red Europea de Aeroalergenos (EAN; <https://ean.polleninfo.eu/Ean/>) que almacena actualmente información de más de 400 estaciones de control de polen activas y 300 históricas en toda Europa, incluyendo 39 países, no todos ellos situados en el continente europeo. Estos datos son utilizados por científicos para crear estadísticas y analizar y modelizar la dinámica de la distribución del polen a nivel continental, y en

general, para desarrollar estudios científicos de polen en el ámbito europeo (Sofiev et al., 2017).

La Red Europea de Aeroalergenos (EAN), tal y como la conocemos hoy en día, se creó en 1988 por iniciativa del Dr. Siegfried Jäger, y la base de datos se centralizó en la Universidad de Viena y ahora está alojada en la página de la Austrian Polleninformation ([www.polleninformation.at](http://www.polleninformation.at)). La EAN representa una iniciativa de cooperación voluntaria entre analistas y aerobiólogos en toda Europa. La base de datos en sí es la mayor recopilación de datos polínicos no comercial del mundo.

La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid, Red Palinocam está integrada en la Red Española de Aerobiología (REA) desde sus comienzos; comenzó suministrando los datos de la Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense, pero se ha ido ampliando en los últimos años, y en la actualidad son cuatro las estaciones que envían datos de Madrid: Alcalá de Henares, Aranjuez, Collado Villalba y Facultad de Farmacia, en el municipio de Madrid.

Paralelamente, la Sociedad Española de Alergología e Inmunología Clínica (SEAIC), a través de su Comité de Aerobiología Clínica, cuenta con una red nacional (<https://www.polenes.com/home>) que funciona también desde 1993 y que desde 1995 a través de su WEB, ofrece los recuentos polínicos los principales tipos alergénicos en España para todas aquellas personas interesadas (profesionales o pacientes).

En España, las administraciones regionales (Consejerías de Sanidad, de Medio Ambiente, Educación) se han implicado en el control rutinario del polen atmosférico, promoviendo y financiando el desarrollo de redes de control de alergenitos en sus territorios. Es el caso de la Red Palinocam en Madrid, la Red de Investigación Aerobiológica de Galicia, La Red de Aerobiología de Castilla-León y La Red de Aerobiología de Castilla-La Mancha, todas ellas integradas en la Red Española de Aerobiología.

## **1.2. Creación y configuración Jurídica de la Red Palinocam**

En 1993 se creó la Red Palinocam en el marco del Programa Regional de Control y Vigilancia del Asma. La Red ha proporcionado en sus 30 años de

funcionamiento un amplio conocimiento de la evolución espacial y temporal de las concentraciones de polen en la atmósfera de la Comunidad de Madrid.

La red es un ejemplo de colaboración institucional exitosa, ya que en la misma se involucraron desde su inicio distintos ayuntamientos, la universidad y el gobierno regional. El entramado institucional de la Red Palinocam se inicia con la creación de un Comité de Expertos mediante la Resolución 19/1994 (BOCM nº58) cuya composición será la siguiente, un Coordinador de la Dirección General de Prevención y Promoción de la Salud, un vocal Director Técnico de la Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense y los Vocales-Asesores como responsables de cada una de las estaciones de la Red. Posteriormente, se procedió a nombrar a las personas integrantes, mediante Resolución de 29 de noviembre de 1994 (BOCM nº 290). Los necesarios cambios personales en la composición fueron publicándose sucesivamente (Resolución 11163/98, de 12 de junio (BOCM nº158); Resolución 13/2000 de 21 de enero (BOCM. nº27); Resolución de 20 de julio de 2004 (BOCM nº 196). Por último, la Resolución de 21 de marzo de 2011, del Director General de Ordenación Inspección (BOCM nº 91), actualiza y amplía a 11 Vocales-Asesores el Comité de Expertos de la Red, para dar acogida a los responsables de las estaciones de Collado Villalba y Las Rozas, últimas estaciones de muestreo incorporadas posteriormente a la red. El marco jurídico se completa con acuerdos firmados por los Ayuntamientos con la Consejería de Sanidad y con el Convenio de Colaboración firmado por la Consejería de Sanidad y la Universidad Complutense de Madrid para el muestreo y análisis aerobiológicos de cada una de las estaciones.

### **1.3. Polinosis. Impacto en salud**

Con el término de “polinosis” se denominan todos los trastornos alérgicos ocasionados por el polen. Los principales son la rinitis alérgica y el asma. La rinitis alérgica es la más común, en Europa afecta entre el 17% y el 28,5% de los adultos y con frecuencia se asocia al asma, que presentan entre el 15% y el 38% de los pacientes con rinitis alérgica (Brožek et al., 2017).

El asma es una de las principales enfermedades no transmisibles que afecta a adultos y niños, siendo la enfermedad crónica más prevalente en este último grupo de edad. A nivel mundial, el asma ocupa el puesto 24 entre las principales causas de años vividos con discapacidad y el 34 entre las principales causas de

carga de enfermedad (*The Global Asthma Report*, GAR, 2022). En este informe, según la última encuesta de *Global Asthma Network* (GAN), en España la prevalencia de los síntomas relacionados con el asma en niños de 6-7 y 13-14 años y adultos es, respectivamente, del 10,4%, 15,3% y 13,7%. Más del 10% de la población (más de cinco millones de personas en el país) padece asma.

En la Encuesta de Prevalencia de Asma de la Comunidad de Madrid (Galán et al., 1994) y en estudios posteriores (Galán and Cervigón, 2009; Galán et al., 2010), se puso de manifiesto la relación entre los altos niveles atmosféricos de polen alergénico y los problemas de alergia y asma en la población de Madrid. Analizando los datos de demanda de urgencia hospitalaria, junto a los datos de presencia atmosférica de los tipos polínicos más alergénicos, se comprobó la asociación entre los picos epidémicos de asma y las concentraciones elevadas de polen de gramíneas durante los meses de mayo y junio.

En el último estudio epidemiológico en la Comunidad de Madrid (Pachón et al., 2022) se evidencia nuevamente la relación entre los altos niveles de polen alergénico y el incremento de la demanda de urgencias y visitas de atención primaria por casos de asma y rinitis alérgica durante el periodo primaveral (Figuras 1.2 y 1.3). En cuanto al polen de cupresáceas, en el periodo invernal, coincide con una pequeña elevación de las consultas por rinitis alérgica, pero no alcanza correlación lineal significativa.

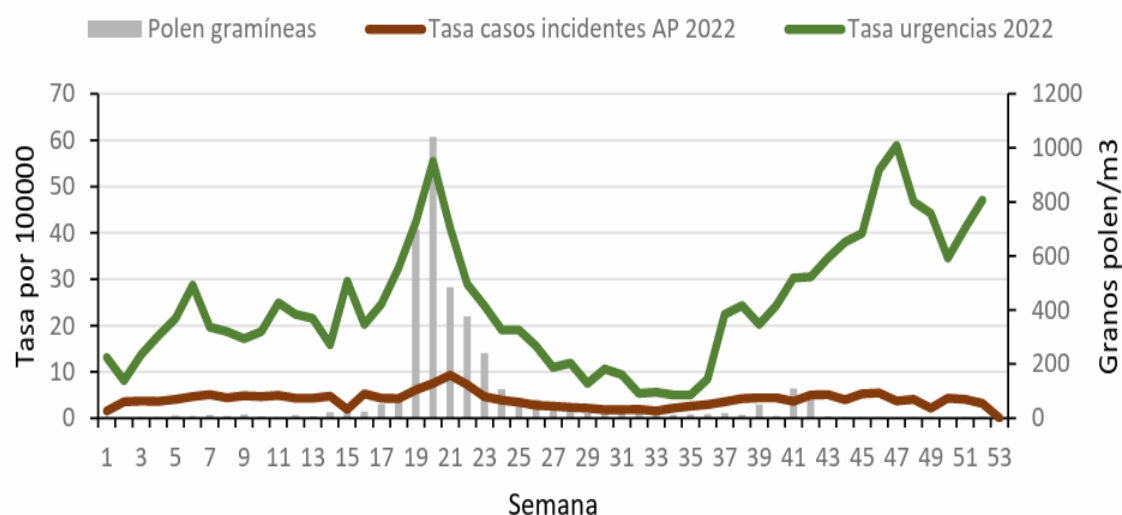


Figura 1.2. Evolución semanal de niveles de polen de gramíneas, tasa de casos de asma en urgencias y tasa de casos incidentes asma en Atención Primaria en 2022. (Pachón et al., 2022)

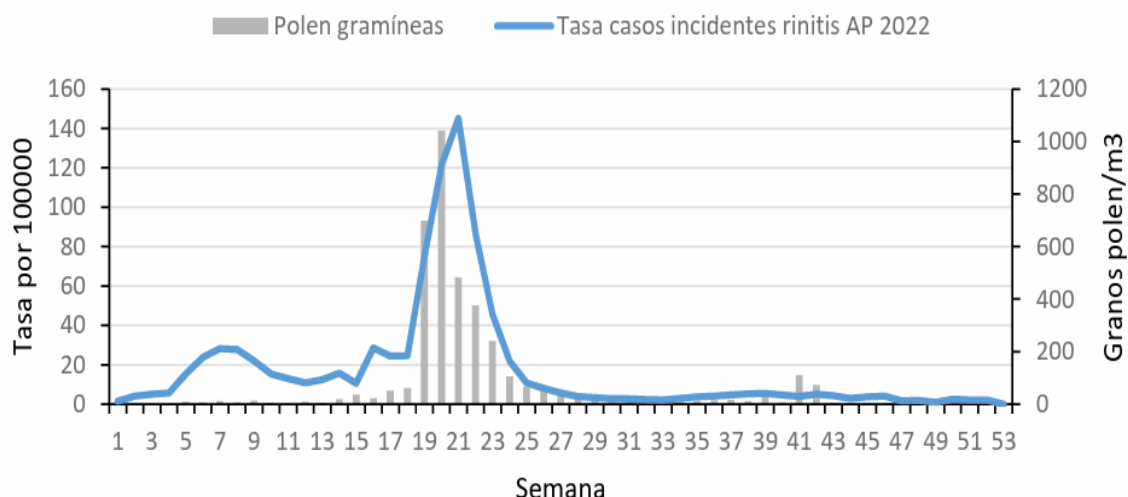


Figura 1.3. Evolución semanal de niveles de polen de gramíneas y tasa de casos incidentes de rinitis alérgica en Atención Primaria en 2022. (Pachón et al., 2022)

También en este informe se observa una correlación positiva significativa entre el polen de plantago y olivo y las visitas a urgencias por asma y los episodios de asma y rinitis alérgica en Atención Primaria en las 26 primeras semanas del año 2022. La tabla 1.1 resume los casos incidentes de asma por sexo y edad atendidos en centros de Atención Primaria de la Comunidad de Madrid en 2022. El informe de Madrid en 2022(Pachón et al., 2022) concluye que el pico primaveral de asma y rinitis se correlaciona de manera significativa con el aumento de los niveles de polen de gramíneas, olivo y plantago. El aumento de los niveles de cupresáceas coincide con una pequeña elevación de las consultas por rinitis alérgica, pero no alcanza correlación lineal significativa.

Tabla 1.1. Casos incidentes de asma por sexo y edad atendidos en centros de Atención Primaria de la Comunidad de Madrid en 2022. (Pachón et al., 2022)

Edad	Mujer	Hombre	Total
<15 años	1.516 (42,8%)	2.026 (57,2%)	<b>3.542 (25,1%)</b>
≥15 años	6.664 (63,1%)	3.901 (36,9%)	<b>10.565 (74,9%)</b>
<b>Total</b>	<b>8.180 (57,9%)</b>	<b>5.927 (42,1%)</b>	<b>14.107 (100%)</b>

Los niveles de polen en el aire dependen de múltiples factores (Smith et al., 2014), entre los que destacan: i), los relativos a la distribución, abundancia y características de la vegetación próxima, fuente de emisión del polen (Rojo et al., 2015; Bogawski et al., 2019), ii), los relativos a la

dinámica atmosférica y factores meteorológicos, que determinan los patrones de emisión, el modo de difusión del polen y su presencia en el aire ambiente en un momento y lugar determinado (Izquierdo et al., 2015), incluso las condiciones ambientales previas a la producción polínica (Bogdiewicz et al., 2020; Guada et al., 2024) La monitorización continua del polen atmosférico permite conocer la abundancia de los diferentes tipos de polen y la dinámica del polen en el aire de manera continua (Pérez-Badía et al., 2010). Dada la evidente relación entre la carga alérgica del aire y los episodios alérgicos (Jantunen et al., 2012; Pfaar et al., 2019), toda esta información es indicativa del riesgo de exposición de la población y puede incidir en un mejor control y gestión de las enfermedades alérgicas. En la Comunidad de Madrid la Red Palinocam opera con un objetivo prioritario desde el punto de vista de la Salud Pública, aunque la información polínica tiene gran impacto desde otros muchos puntos de vista, como el ecológico, forestal, agronómico, etc. (Oteros et al., 2014; Fernández-González et al., 2021; Rojo et al., 2021; Tummon et al., 2024)

## **2. Funcionamiento y control de calidad en la Red Palinocam**

Una de las prioridades en el funcionamiento de la Red Palinocam desde sus inicios ha sido que la información aerobiológica fuera de calidad y se ajustara al consenso científico internacional (Galán et al., 2014). En 1993, cuando se iniciaba en el control rutinario del polen atmosférico, la Red Palinocam solo contaba con las normas y recomendaciones metodológicas consensuadas por la International Association for Aerobiology (IAA), para su muestreo y posterior análisis.

En 1995 Jäqer et al., propusieron unos “requisitos mínimos” de funcionamiento que debían cumplir las estaciones integradas en la European Aeroallergen Network (EAN), que coinciden en gran parte con los anteriores de la IAA.

En los años posteriores se publicaron varios trabajos centrados en diversos aspectos metodológicos del muestreo y análisis rutinario del polen y las esporas atmosféricas, como el método de recuento (Tormo et al., 1996; Sterling et al., 1999), el adhesivo utilizado (Comtois & Mandrioli 1997; Galán & Domínguez-Vilches 1997) o la precisión de los resultados (Comtois et al., 1999) para evaluar y mejorar la metodología estándar utilizada.

En 2007 se publicó el Manual de Calidad y Gestión de la Red Española de Aerobiología (REA), que siguen todas las estaciones que la integran, con el fin de obtener registros polínicos homologados y comparables, que permitan generar una información aerobiológica rigurosa y contrastable. Fruto de este trabajo y del consenso científico previo en el diseño del protocolo internacional aplicado al muestreo aerobiológico Galán et al., en 2014 recopilaron las recomendaciones y requisitos mínimos en todas las fases de la monitorización aerobiológica en el contexto de la European Aerobiology Society (EAS).

En 2020, se publicó la norma europea UNE-EN 16868, elaborada por el comité técnico CTN 77 Medio ambiente, que especifica el procedimiento para muestrear continuamente y analizar la concentración de granos de polen y esporas atmosféricas en aire ambiente, usando el captador volumétrico Hirst o cualquier método equivalente que asegure datos comparables. El documento describe los procedimientos de muestreo y análisis para los fines de las redes aerobiológicas en relación con la alergia.

## **2.1. Requisitos del protocolo internacional y nacional**

En 1994, para configurar jurídicamente la red como sistema de información en salud pública, se creó un Comité de Expertos mediante la Resolución 19/1994 (BOCM nº58) del que forma parte el coordinador y los vocales-asesores como responsables de cada una de las estaciones de la red y un director científico-técnico, perteneciente a la Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense de Madrid, como se ha detallado anteriormente.

Desde el principio, ha sido responsabilidad del director técnico-científico de la red garantizar el funcionamiento de la misma de acuerdo a los estándares de calidad vigentes. En los convenios posteriores de colaboración entre la Consejería de Sanidad y la UCM, se especifican las funciones que la dirección científico-técnica tiene asignadas:

1. Definir criterios analíticos para el recuento e identificación del polen.
2. Proporcionar, en cualquier momento, el asesoramiento científico-técnico adecuado a los responsables de los captadores de la Red Palinocam.

3. Validar y rediseñar la red cuando sea necesario, evaluando su funcionamiento y ejerciendo un control de calidad del mismo.
4. Facilitar conocimientos apropiados para el reciclaje continuo y la actualización de los técnicos en materia de aerobiología.
5. Elaboración del Informe Técnico Anual de situación.
6. Supervisión de la implantación y cumplimiento del Manual de Calidad de la Red Palinocam.

Desde sus inicios la red ha utilizado para el muestreo y análisis la metodología estándar para redes aerobiológicas. Desde 2016, la Red Palinocam cuenta con su propio manual de calidad, documento de uso interno como transposición de las recomendaciones mínimas y protocolo estandarizado en materia aerobiológica y que se revisa periódicamente (última revisión 2021), para adaptarse a la norma internacional.

En 2014 Galán et al., publicaron en un artículo, los resultados de la información obtenida mediante un cuestionario hecho a los coordinadores de las diversas redes integradas en la European Aeroallergen Network (EAN), con preguntas sobre (a) la ubicación y el mantenimiento del captador de polen; (b) la preparación y análisis de las muestras; (c) la gestión de datos; (d) ejercicios de control de calidad y cursos; (e) preguntas y comentarios adicionales. Con los resultados de la encuesta elaboraron un informe de requisitos mínimos para el control del polen atmosférico que se pueden resumir en los siguientes aspectos:

1. Ubicación del captador. El captador deberá estar colocado sobre una superficie horizontal, terraza de edificio y alejado de los bordes más de 2 m, con el fin de reducir el efecto de las turbulencias; sin que existan pantallas arquitectónicas que impidan la llegada de masas de aire procedentes de cualquier dirección; elevado entre 100-150 cm de la superficie para evitar la turbulencia del aire; alejado de fuentes fijas o móviles de emisión masiva de partículas bióticas y abióticas.
2. Control del caudal de succión mediante comprobación semanal (10 l/min).
3. Adhesivos para la superficie de captación, silicona (polidimetilsiloxano) o vaselina (puede incluir vaselina y mezcla de parafina).

4. Medios de montaje de las preparaciones glicerogelatina o alcohol polivinílico. Las preparaciones se pueden teñir o no. Para la tinción del polen se recomienda el uso de fuchsina o safranina básica.
5. Métodos de recuento. Transectos longitudinales (horizontales) o latitudinales (verticales). La superficie mínima analizada será de al menos el 10% del área total de la muestra.
6. Período de muestreo. Todo el año.
7. Formación. Cursos nacionales o internacionales o períodos de formación, con especial énfasis en la identificación de los principales tipos de polen, el funcionamiento del captador, la preparación de las muestras para su análisis.
8. Validación interna de las muestras analizadas, mediante ejercicios de control de calidad entre los diferentes analistas.
9. Informe escrito elaborado anualmente.

Estos requisitos, son los mismos que quedaron recogidos posteriormente en Thibaudon et al., (2017) y en la norma UNE-EN 16868 (2020) y tenidos en cuenta en el Manual de Calidad de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid. Los requisitos 1 a 4, se refieren al muestreo y la preparación de las muestras diarias y se incluyen en dicho manual, con instrucciones para el mantenimiento y el control del flujo de los captadores, en el "Procedimiento Normalizado de Trabajo para la metodología de captación, recogida y preparación de muestras" (PNT1) (Figura 1.4).

El control del flujo en los captadores de tipo Hirst debe hacerse con los rotámetros portátiles (Oteros et al., 2017) suministrados con los captadores, el caudal de aspiración ha de ajustarse mediante una válvula de control de flujo y la recomendación es de 10 L/min con un error aceptable de precisión y exactitud inferior al 10 % ( $\pm 1$  L/min). En la Red Palinocam, se controla semanalmente el flujo de succión.



Figura 1.4. Fotografías del muestreo y la preparación de muestras. Captador Burkard (1); Captador Lanzoni (2); Muestreo (3-6); Preparación de muestras (7-9).

El requisito 5 se refiere al análisis de las muestras y que el Manual de Calidad de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid se describe detalladamente en el "Procedimiento Normalizado de Trabajo para la metodología de análisis de muestras y obtención de resultados" (PNT2)". En la Red Palinocam, al igual que en la Red Española de Aerobiología, el método de recuento que se utiliza es el de 4 barridos horizontales continuos a lo largo de toda la preparación con el objetivo de 40x10 aumentos (UNE-EN 16868). Toda la metodología aplicada se detalla en apartados posteriores

La superficie analizada no debe ser inferior al 10-12% del total de la muestra, ni superior al 20%, ya que en este último caso el grado de significación de los resultados obtenidos, no justifica la mayor cantidad de tiempo invertido en el análisis. En 2017 Gharbi et al., compararon los métodos de análisis de la Red Española de Aerobiología, (REA) y a la Rete Italiana di Monitoraggio in Aerobiologia, el (RIMA). Para ello analizaron las mismas muestras mediante cuatro bandas barridos longitudinales (REA) o seis (RIMA) a 400 aumentos. El análisis estadístico de los resultados no mostró diferencias significativas entre ambos métodos de análisis.

## **2.2 Calidad del análisis y formación del personal la Red Palinocam**

En el análisis polínico atmosférico los principales errores pueden ocurrir por errores instrumentales o por errores en la identificación y cuantificación por los técnicos analistas de los diferentes laboratorios (Comptois et al., 1999; Oteros et al., 2013). Por esta razón, Galán et al., incorporaron las recomendaciones 7 y 8 expuestas anteriormente, relativas a la formación del personal analista de muestras aerobiológicas y al control de calidad de los análisis. (Galán et al., 2014)

El requisito 7, concierne a la formación del personal técnico encargado de los análisis. Cada estación debe tener al menos un técnico analista cualificado, e idealmente dos o más, que deben estar formados y certificados para que la calidad de los recuentos sea fiable. En la Red Palinocam, los responsables de las estaciones aerobiológicas y el personal técnico pertenecen a laboratorios municipales, algunos de ellos acreditados en calidad, con suficiente cualificación y formación en gestión de calidad. Por ejemplo, el Laboratorio Municipal de Aranjuez implantó un Sistema de gestión de Calidad, en base a la Norma UNE-EN ISO 9001, obteniendo la Certificación ISO 9001:2000, nº ES05/1709 para “El recuento e identificación de polen en la atmósfera”.

La Red Palinocam comenzó a proporcionar recuentos de polen el 15 de febrero de 1993. Previamente se impartió al personal técnico un curso de Aerobiología básica, sobre metodología y morfología polínica. A partir de esta formación inicial, la coordinación de la red y la dirección científico técnica se han encargado de programar cursos anuales y seminarios estacionales para la formación continuada de todo el personal técnico de la red. Todas estas actividades, siempre han incluido una parte teórica, otra parte práctica y se han impartido en la Facultad de Farmacia de la UCM.

En 2011 se impartió un curso específico sobre la “Gestión de Calidad en el Laboratorio de Aerobiología” y en 2016 otro sobre “Curso Aerobiología basado en PNTs y calidad”, es decir basado en el propio Manual de Calidad de la Red Palinocam. A partir de este curso, todas las estaciones de la red siguen estrictamente estos procedimientos y los técnicos responsables cumplimentan los estadillos comunes, sobre el control del funcionamiento de los captadores y las incidencias del muestreo.

En relación con los ejercicios de validación interna (requisito 8, Galán et al., 2014) en la red se han realizado varios de estos ejercicios de interlaboratorio. El último en 2018, para determinar y analizar el posible error que se comete cuando distintas personas analizan una misma preparación. Los resultados se incluyen en el capítulo I de esta memoria de tesis doctoral. La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid también ha participado en ejercicios de interlaboratorio de validación externa, como el realizado en la Red Española de Aerobiología para evaluar la calidad del análisis de los técnicos analistas de las diferentes redes regionales (Oteros et al., 2013).

Finalmente, el último requisito propuesto por Galán et al., (2014) en la metodología aerobiológica es la realización de un informe anual para analizar los resultados del muestreo polínico. Este informe anual de resultados se ha estructurado, para el conjunto de la Red Palinocam, atendiendo a la diversidad de tipos polínicos identificados, a la incidencia de cada uno de ellos y a la estacionalidad. Los datos aerobiológicos se presentan mediante tablas y gráficas, que hacen referencia a los principales parámetros aerobiológicos. Es la dirección científico-técnica de la red, la responsable de elaboración de estos informes anuales. Pueden consultarse los informes de los últimos años en la web <https://www.comunidad.madrid/servicios/salud/aerobiologia-polen-esporas>

## Bibliografía

- Agache, I., Annesi-Maesano, I., Cecchi, L., Biagioni, B., Chung, K.F., Clot, B., D'Amato, G., Damialis, A., Del Giacco, S., Dominguez-Ortega, J., Galán, C., Gilles, S., Holgate, S., Jeebhay, M., Kazadzis, S., Nadeau, K., Papadopoulos, N., Quirce, S., Sastre, J., Tummon, F., Traidl-Hoffmann, C., Walusiak-Skorupa, J., Jutel, M., Akdis, C.A., 2024. EAACI guidelines on environmental science for allergy and asthma: The impact of short-term exposure to outdoor air pollutants on asthma-related outcomes and recommendations for mitigation measures. *Allergy* all.16103. <https://doi.org/10.1111/all.16103>.
- Bastl, M., Bastl, K., Dirr, L., Berger, M., Berger, U., 2021. Variability of grass pollen allergy symptoms throughout the season: Comparing symptom data profiles from the Patient's Hayfever Diary from 2014 to 2016 in Vienna (Austria). *World Allergy Organization Journal* 14, 100518. <https://doi.org/10.1016/j.waojou.2021.100518>.
- Bogawski, P., Borycka, K., Grewling, Ł., Kasprzyk, I., 2019. Detecting distant sources of airborne pollen for Poland: Integrating back-trajectory and dispersion modelling with a satellite-based phenology. *Sci Total Environ.* 689: 109-125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.348>.
- Bogdziewicz, M., Szymkowiak, J., Bonal, R., Hackett-Pain, A., Espelta, J.M., Pesendorfer, M., Grewling, L., Kasprzyk, I., Belmonte, J., Kluska, K., De

- Linares, C., Peñuelas, J., Fernandez-Martinez, M. 2020. What drives phenological synchrony? Warm springs advance and desynchronize flowering in oaks. *Agric. For. Meteorol.* 294, 108140. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108140>.
- Brožek, J. L., Bousquet, J., Agache, I., Agarwal, A., Bachert, C., Bosnic-Anticevich, S., Brignardello-Petersen, R., Canonica, G. W., Casale, T., Chavannes, N. H., Correia de Sousa, J., Cruz, A. A., Cuello-García, C. A., Demoly, P., Dykewicz, M., Etxeandia-Ikobaltzeta, I., Florez, I. D., Fokkens, W., Fonseca, J., Hellings, P. W., Schünemann, H. J., 2017. Allergic Rhinitis and its Impact on Asthma (ARIA) guidelines-2016 revision. *The Journal of allergy and clinical immunology*, 140(4), 950–958. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2017.03.050>.
- Buters, J.T.M., Antunes, C., Galveias, A., Bergmann., K.C., Thibaudon, M., Galán, C., Schmidt-Weber, C., Oteros, J., 2018. Pollen and spore monitoring in the world. *Clinical and Translational Allergy* 8. <https://doi.org/10.1186/s13601-018-0197-8>.
- Comtois, P., Alcázar, P., Neron, D. 1999. Pollen counts statistics and its relevance to precision. *Aerobiologia* 15, 19–28. <https://doi.org/10.1023/A:1007501017470>.
- D'Amato G, Chong-Neto HJ, Monge Ortega OP, Vitale C, Ansotegui I, Rosario N, Haahtela T, Galan C, Pawankar R, Murrieta-Aguttes M, Cecchi L, Bergmann C, Ridolo E, Ramon G, Gonzalez Diaz S, D'Amato M, Annesi-Maesano I. 2020. The effects of climate change on respiratory allergy and asthma induced by pollen and mold allergens. *Allergy*. 75(9): 2219-2228. <https://doi.org/10.1111/all.14476>.
- Fernández-González, M., Lara, B., González-Fernández, E., Rojo, J., Pérez-Badía, R., Rodríguez-Rajo, F.J., 2021. Pinus Pollen Emission Patterns in Different Bioclimatic Areas of the Iberian Peninsula. *Forests* 12, 688. <https://doi.org/10.3390/f12060688>.
- Galán I, Prieto A, Rubio M, Herrero T, Cervigón P, Cantero JL, Gurbindo MD, Martínez MI, Tobías A. 2010. Association between airborne pollen and epidemic asthma in Madrid, Spain: a case-control study. *Thorax*. 65(5): 398-402. <https://doi.org/10.1136/thx.2009.118992>
- Galán I. & Martínez M. 1994. Encuesta de Prevalencia de Asma de la Comunidad de Madrid. Documento Técnico de Salud Pública Nº 20. Consejería de Salud. Madrid.
- Galán, C. & Domínguez-Vilches, E. 1997. The capture media in aerobiological sampling. *Aerobiologia* 13, 155–160. <https://doi.org/10.1007/BF02694502>
- Galán, C., Cariñanos, P., Alcázar, P., Domínguez-Vilches, E. 2007. Manual de calidad y gestión de la Red Española de Aerobiología. Servicio de Publicaciones. Universidad de Córdoba.
- Galán, C., Smith, M., Thibaudon, M., Frenguelli, G., Oteros, J., Gehrig, R., Berger, U., Clot, B., Brandao, R., & EAS QC Working Group. (2014). Pollen monitoring: Minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia*, 30(4), 385–395. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9335-5>
- Galán, I. & Cervigón, P. 2009. VI. Epidemiología del asma primaveral por polen de gramíneas. En: Quirce, S. & Quirarte, J. (Eds.). *Las bases alérgicas del asma*: 67-77. MRA ediciones. ISBN: 978-84-96504-20-2.
- Gharbi, D., Brighetti, M.A., Travaglini, A., Trigo M.M. 2017. Comparison between the counting methods used by two aerobiology networks in southern Europe

- (Spain and Italy). *Aerobiologia* 33, 87–92. <https://doi.org/10.1007/s10453-016-9452-4>.
- Guada, G., Fernández-González, M., Amigo, R., Dias-Lorenzo, D. A., Sánchez Espinosa, K. C., Rodríguez-Rajo, F. J., 2024. Precipitation masks the effect of temperature on Birch airborne pollen start, and previous summer temperature affects pollen intensity; A 31-year study at its southwestern distribution boundary. *Agric. For. Meteorol.* 353, 110072. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110072>.
- Izquierdo R, Alarcon M, Periago C, Belmonte J. 2015. Is long range transport of pollen in the NW Mediterranean basin influenced by Northern Hemisphere teleconnection patterns? *Sci Total Environ.* 532: 771-779. <https://10.1016/j.scitotenv.2015.06.047>.
- Jantunen, J., Saarinen, K., Rantio-Lehtimäki, A. 2012. Allergy symptoms in relation to alder and birch pollen concentrations in Finland. *Aerobiologia* 28, 169–176. <https://doi.org/10.1007/s10453-011-9221-3>
- Jäger, S., Mandroli, P., Spieksma, F., Emberlin, J., Hjelmroos, M., Rantio-Lehtimäki, A. et al. 1995. News. *Aerobiologia* 11, 69–70. <https://doi.org/10.1007/BF02136148>.
- Kmenta, M., Zetter, R., Berger, U., Bastl, K. 2016. Pollen information consumption as an indicator of pollen allergy burden. *Wien Klin Wochenschr* 128, 59–67. <https://doi.org/10.1007/s00508-015-0855-y>.
- Lake, I.R., Jones, N.R., Agnew, M., Goodess, C.M., Giorgi, F., Hamaoui-Laguel, L., Semenov, M.A., Solomon, F., Storkey, J., Vautard, R., Epstein, M.M. 2017. Climate change and future pollen allergy in Europe. *Environ. Health Perspect.* 125(3): 385–391. <https://doi.org/10.1289/EHP2073>.
- Ojeda, P., Sastre, J., Olaguibel, J., Chivato, T. 2018. Alergológica 2015: a national survey on allergic diseases in the adult Spanish population. *J Investig. Allergol. Clin. Immunol.* 28, 151–164. <https://doi.org/10.18176/jiaci.0264>.
- Oteros, J., Buters, J., Laven, G., Röseler, S., Wachter, R., Schmidt-Weber, C., Hofmann, F. 2017. Errors in determining the flow rate of Hirst-type pollen traps. *Aerobiologia* 33,201–210. <https://doi.org/10.1007/s10453-016-9467-x>.
- Oteros, J., Galán, C., Alcázar, P. & Domínguez-Vilches, E. 2013. Quality control in bio-monitoring networks, Spanish Aerobiology Network. *Sc. Total Environ.* 443: 559-565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.040>.
- Oteros, J., Orlandi, F., García-Mozo, H., Aguilera, F., Dhiab, A.B., Bonofiglio, T., Abichou, M., Ruiz-Valenzuela, L., del Trigo, M.M., de La Guardia, C.D. 2014. Better prediction of Mediterranean olive production using pollen-based models. *Agronomy for sustainable development* 34, 685–694. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0198-x>.
- Pachón V., Jiménez E., Esteban M., Domínguez F., Gandarillas, A. Informe: Vigilancia del asma y la rinitis alérgica en la Comunidad de Madrid, 2022. *Boletín Epidemiológico de la Comunidad de Madrid.* Nº 1. Volumen 29. Enero 2024. [BVCM051172 Boletín Epidemiológico. Número 1. Volumen 29. Enero 2024 \(madrid.org\)](https://doi.org/10.1016/j.bvcm.2024.01.001).
- Pawankar R. 2014. Allergic diseases and asthma: a global public health concern and a call to action. *World Allergy Organ J.* 7(1):12. <https://doi.org/10.1186/1939-4551-7-12>.
- Pérez-Badía, R., Rapp, A., Morales, C., Sardinero, S., Galán, C., García-Mozo, H., 2010. Pollen spectrum and risk of pollen allergy in central Spain. *Ann.*

- Agric. Environ. Med. 17, 139–151. <https://www.aaem.pl/Pollen-spectrum-and-risk-of-pollen-allergy-in-central-Spain-,71626,0,2.html>.
- Pfaar, O., Karatzas, K., Bastl, K., Berger, U., Buters, J., Darsow, U., Demoly, P., Durham, S., Galán, C., Gehrig, R., Gerth van Wijk, R., Jacobsen, L., Katsifarakis, N., Klimek, L., Saarto, A., Sofiev, M., Thibaudon, M., Werchan, B., Bergmann, K. 2019. Pollen season is reflected on symptom load for grass and birch pollen-induced allergic rhinitis in different geographic areas - an EAACI Task Force Report. *Allergy* all. <https://doi.org/10.1111/all.14111>.
- Rojo J., Rapp A., Lara B., Fernández-González F., Pérez-Badia R. 2015. Effect of land uses and wind direction on the contribution of local sources to airborne pollen. *Sci Total Environ.* 538: 672-682. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.074>.
- Rojo, J., Oteros, J., Picornell, A., Maya-Manzano, J.M., Damialis, A., Zink, K., Werchan, M., Werchan, B., Smith, M., Menzel, A., Timpf, S., Traidl-Hoffmann, C., Bergmann, K.-C., Schmidt-Weber, C.B., Buters, J. 2021. Effects of future climate change on birch abundance and their pollen load. *Global Change Biology*, 27(22): 5934-5949. <https://doi.org/10.1111/gcb.15824>.
- Smith, M., Jäger, S., Berger, U., Šikoparija, B., Hallsdottir, M., Sauliene, I., Bergmann, K.-C., Pashley, C.H., de Weger, L., Majkowska-Wojciechowska, B., Rybníček, O., Thibaudon, M., Gehrig, R., Bonini, M., Yankova, R., Damialis, A., Vokou, D., Gutiérrez Bustillo, A.M., Hoffmann-Sommergruber, K., van Ree, R. 2014. Geographic and temporal variations in pollen exposure across Europe. *Allergy* 69, 913–923. <https://doi.org/10.1111/all.12419>.
- Sofiev, M., Ritenberga, O., Albertini, R., Arteta, J., Belmonte, J., Bernstein, C.G., Bonini, M., Celenk, S., Damialis, A., Douros, J., Elbern, H., Friese, E., Galan, C., Oliver, G., Hrga, I., Kouznetsov, R., Krajsek, K., Magyar, D., Parmentier, J., Plu, M., Prank, M., Robertson, L., Steensen, B.M., Thibaudon, M., Segers, A., Stepanovich, B., Valdebenito, A.M., Vira, J., Vokou, D. 2017. Multi-model ensemble simulations of olive pollen distribution in Europe in 2014: current status and outlook. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17, 12341–12360. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12341-2017>.
- Sterling, M., Rogers, C., Levetin, E. 1999. An evaluation of two methods used for microscopic analysis of airborne fungal spore concentrations from the Burkard Spore Trap. *Aerobiologia* 15, 9–18. <https://doi.org/10.1023/A:1007561201541>
- The Global Asthma Report. *Int J Tuberc Lung Dis* 2022; 26: S1–S102. [Global Asthma Report 2022.pdf](https://doi.org/10.1007/s11522-022-00444-4).
- Thibaudon, M., Monnier, S., Galán, C., Bonini, M., Röseler, S. Fernández González, D. 2017. Normalización del método volumétrico tipo Hirst para redes aerobiológicas CEN/C264/WG39. *Revista de Salud Ambiental* 17: 40-43. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/862>.
- Tormo, R., Rodríguez, A.M. & Palacios, I.S. 1996. Sampling in aerobiology. Differences between traverses along the length of the slide in Hirst sporetraps. *Aerobiologia* 12, 161–166. <https://doi.org/10.1007/BF02248144>.
- Tummon, F., Adams-Groom, B., Antunes, C.M., Bruffaerts, N., Buters, J., Cariñanos, P., Celenk, S., Choël, M., Clot, B., Cristofori, A., Crouzy, B., Damialis, A., Fernández, A.R., González, D.F., Galán, C., Gedda, B., Gehrig, R., Gonzalez-Alonso, M., Gottardini, E., Gros-Daillon, J., Hajkova, L., O'Connor, D., Östensson, P., Oteros, J., Pauling, A., Pérez-Badia, R., Rodinkova, V., Rodríguez-Rajo, F.J., Ribeiro, H., Sauliene, I., Sikoparija, B., Skjøth, C.A., Spanu, A., Sofiev, M., Sozinova, O., Srnc, L., Visez, N., De

- Weger, L.A., 2024. The role of automatic pollen and fungal spore monitoring across major end-user domains. *Aerobiologia* 40, 57–75. <https://doi.org/10.1007/s10453-024-09820-2>
- UNE-EN 16868, 2020. Ambient Air—Sampling And Analysis of Airborne Pollen Grains And Fungal Spores for Networks Related to Allergy—Volumetric Hirst Method.



## **2. Objetivos generales**



## **OBJETIVOS PRINCIPALES**

Uno de los principales objetivos de esta tesis doctoral es el analizar la gestión y la difusión de la información polínica por parte de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid (Red Palinocam). Este análisis permite optimizar la eficacia de las estrategias de difusión utilizadas y abordar adecuadamente los múltiples problemas que surgen a la hora de gestionar una red aerobiológica desde el punto de vista de la sanidad ambiental y la salud pública. Otro de los principales objetivos de esta tesis es realizar un análisis completo y detallado de los datos diarios de polen generados por todas las estaciones de la Red Palinocam, durante el periodo 1994 a 2022, con metodologías específicas de la disciplina aerobiológica para el análisis de resultados, como el calendario polínico. Con ello se pretende ampliar el conocimiento espaciotemporal de los patrones de exposición polínica en la Comunidad de Madrid y desarrollar herramientas específicas que contribuyan a mejorar la eficacia de las estrategias preventivas en salud pública.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Los objetivos específicos, que se corresponden con cada uno de los capítulos de la tesis doctoral son:

### Capítulo I: Control de calidad en la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid. Ejercicio interlaboratorio.

- Analizar la calidad de los datos polínicos generados por los distintos laboratorios que conforman la Red Palinocam.
- Evaluar el grado de error cometido por los diferentes técnicos analistas que analizan las muestras aerobiológicas en los distintos laboratorios de la Red Palinocam.
- Identificar las posibles fuentes de error cometidos durante las distintas fases del análisis de muestras aerobiológicas en la Red Palinocam.

### Capítulo II: La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid. Treinta años como sistema de vigilancia e información de polen aerovagante de utilidad en salud pública.

- Analizar la evolución temporal de la gestión y de la coordinación de la Red Palinocam, como adaptación a los cambios y el desarrollo de las tecnologías de la información y comunicación.
- Realizar una revisión de las estrategias de difusión y los sistemas de información empleados por la Red Palinocam desde sus inicios y hasta la actualidad.
- Poner en valor las principales actividades de difusión de la información aerobiológica generada por la Red Palinocam, en todo el periodo de actividad de esta red de vigilancia de la calidad del aire.

### Capítulo III: Detección de cambios a largo plazo en la calidad biológica del aire de la Comunidad de Madrid mediante calendarios polínicos.

- Determinar los cambios significativos en fenología e intensidad polínica registrados en las estaciones aerobiológicas de la Red Palinocam durante el periodo 1994-2022.
- Caracterizar los periodos de aparición y mayor incidencia de los tipos polínicos más relevantes en la Comunidad de Madrid mediante calendarios polínicos.
- Valorar la utilidad del calendario polínico como herramienta de información sobre exposición polínica a los usuarios finales de la Red Palinocam, y discutir la necesidad de su actualización periódica.

### Capítulo IV: Delimitación de zonas de riesgo ambiental basadas en los niveles polínicos, los usos y vegetación del territorio.

- Caracterizar los periodos de presencia e incidencia de los tipos polínicos más relevantes en las distintas áreas de la Comunidad de Madrid.
- Relacionar el espectro polínico de las distintas estaciones de muestreo de la Red Palinocam con la distribución y abundancia de las fuentes potenciales de emisión polínica próximas a las mismas.
- Delimitar áreas de riesgo aerobiológico en la Comunidad de Madrid, en base a zonas homogéneas con patrones similares de exposición a los tipos polínicos más importantes.

## **3. Material y métodos**



## **MATERIAL Y MÉTODOS**

- 1. Área de estudio**
- 2. Metodología aerobiológica**
  - 2.1. Muestreo con captadores volumétricos tipo Hirst**
  - 2.2. Análisis aerobiológico de las muestras diarias**
- 3. Base de datos aerobiológicos de la Red Palinocam**

### **1. Área de estudio. Diseño de la red y ubicación de los captadores**

La Red Palinocam cuenta con diez captadores volumétricos tipo Hirst de gestión pública, distribuidos en el territorio de la Comunidad de Madrid con el fin de cubrir todas las zonas con características fitogeográficas diferentes y los principales núcleos de población (la estación de Leganés interrumpió su muestreo en el año 2022). La población residente en los municipios en los que hay un captador representa el 80 % de la población total de la Comunidad de Madrid. A este porcentaje se puede sumar el 10% de población que vive en municipios de características similares a los que tienen estación aerobiológica. Por tanto, se estima que la Red Palinocam proporciona información sobre la exposición al polen de más del 90% de la población de la Comunidad de Madrid.

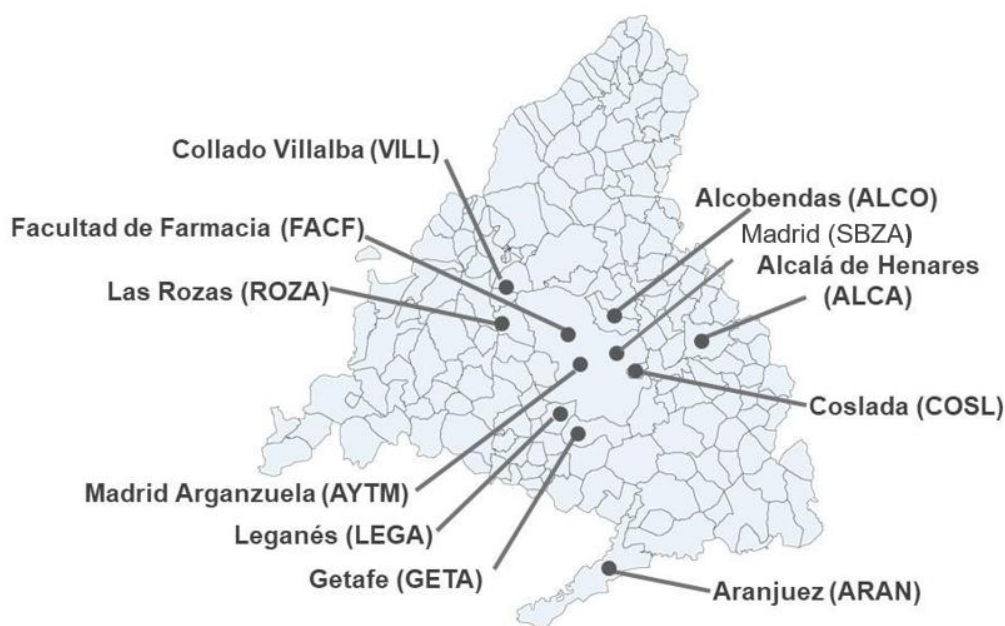


Figura 3.1. Localización de las estaciones de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid y abreviatura

Dos de estas estaciones están situadas en la ciudad de Madrid, el distrito de Arganzuela AYTМ, y la Universidad Complutense FACF (además de otra estación en el municipio de gestión privada), y el resto en otras ocho ciudades de la región (Alcalá de Henares ALCA, Alcobendas ALCO, Aranjuez ARAN, Coslada COSL, Getafe GETA, Leganés LEGA, Las Rozas ROZA y Collado Villalba VILL) (Figura 3.1, Tabla 3.1).

Ciudad	Código	Lat (epsg 4258)	Long (epsg 4258)	Altitud (m a.s.l.)
Alcalá de Henares	ALCA	40.480415	-3.370529	588
Alcobendas	ALCO	40.542595	-3.652715	637
Aranjuez	ARAN	40.031765	-3.598762	503
Madrid/Arganzuela	AYTM	40.402487	-3.695461	600
Coslada	COSL	40.426248	-3.565569	620
Madrid/Facultad de Farmacia	FACF	40.445393	-3.726293	637
Getafe	GETA	40.310180	-3.733128	531
Leganés	LEGA	40.328373	-3.765614	668
Las Rozas	ROZA	40.523734	-3.889936	740
Collado Villalba	VILL	40.654306	-4.001604	887

Tabla 3.1. Ubicación, códigos, coordenadas y altitud de las estaciones de gestión pública de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid

El área sureste de la región de estudio tiene la altitud más baja (altitud mínima de 476 m s.n.m.) y está dominada por campos agrícolas. El oeste y noroeste de la región incluyen la Sierra de Guadarrama, que tiene una altitud máxima de 2428 m s.n.m. y está dominada por bosques, matorrales y pastizales. En el centro de la Comunidad de Madrid y hacia el este se localizan las áreas con mayor concentración urbanística e industrial, constituyendo una de las áreas metropolitanas más importantes de Europa.

## 2. Metodología aerobiológica

Las partículas biológicas, incluyendo el polen y las esporas de hongos (esporas), fueron monitorizadas por primera vez con fines médicos en 1870 por Charles Blackley en el Reino Unido (Blackley, 1873) utilizando métodos gravimétricos. Es un método muy sencillo, se expone al aire un portaobjetos microscópico recubierto de una sustancia adhesiva durante un tiempo, sobre el que se van depositando las partículas atmosféricas por gravedad. Este portaobjetos posteriormente se analiza al microscopio óptico, aplicando

normalmente un medio de tinción de materia orgánica. Esta metodología se utilizó principalmente durante la primera mitad del siglo XX.

En España, la primera publicación sobre la relación entre el polen de la atmósfera y la “fiebre del heno” (como se denominó a los procesos alérgicos), se debe al médico Jiménez Díaz (“El asma y otras enfermedades alérgicas”, 1932) que incluye estudios del polen atmosférico en Madrid y en Santander, también por métodos gravimétricos. En la década de los años 40 se publicaron varios estudios sobre polen atmosférico en otras ciudades como Cádiz (Barrios Pérez, 1942), Bilbao (Posse, 1946), Santiago (Vieitez Cortizo, 1946), Barcelona (Surinyach, 1947) y Granada (Muñoz Medina, 1949).

Después de 1950 comenzaron a desarrollarse y a utilizarse diversos captadores volumétricos, para llevar a cabo el muestreo aerobiológico. Un captador volumétrico succiona un cierto volumen de aire que incide directamente en una superficie de captación, donde quedan retenidas las partículas presentes en el aire. Existen diversos tipos de captadores volumétricos, pero los más utilizados por las redes aerobiológicas son los captadores volumétricos de tipo Hirst (Hirst, 1952). Un primer estudio con esta metodología fue el realizado en Cardiff (Reino Unido) por Hyde (1959). En España los primeros estudios con captadores volumétricos se realizaron en Madrid (Subiza, 1980; Sáenz Laín & Gutiérrez Bustillo, 1982).

Actualmente los captadores volumétricos tipo Hirst son los más utilizados, por las redes aerobiológicas, para el control rutinario del polen y las esporas aerovagantes en todo el mundo, a excepción de Estados Unidos, donde se utilizan preferentemente muestreadores de impacto de brazo giratorio (Rotorod Sampler) (Buters et al. 2018).

En 1993, cuando comenzó a funcionar la Red Palinocam, todas las estaciones de muestreo fueron equipadas con un captador volumétrico tipo Hirst (Marca Burkard, <http://www.burkard.co.uk/> <http://www.burkardscientific.co.uk>). Posteriormente, la mayoría de ellos, han sido reemplazados por los de la marca Lanzoni (<https://www.lanzoni.it/>).

Tras la integración de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid (Red Palinocam) en la Red Española de Aerobiología (REA), se adoptaron los

protocolos estandarizados de metodología aerobiológica propuestos por dicha red nacional (Galán et al., 2007). El fin era utilizar una metodología estandarizada, que proporcionara datos polínicos homologados, con los que poder generar una información polínica comparable, rigurosa y de calidad entre las distintas redes aerobiológicas regionales. Desde 2016, la Red Palinocam cuenta con su propio Manual de Calidad que incluye los Procedimientos Normalizados de Trabajo (PNTs) para el muestreo y el análisis de las muestras aerobiológicas, así como la definición de los 25 tipos morfológicos de polen de obligado reconocimiento en todas las estaciones de la red.

### **2.1. Muestreo con captadores volumétricos tipo Hirst**

Los captadores volumétricos tipo Hirst, succionan un cierto volumen de aire con un caudal constante (10 litros  $\pm$ 1 por minuto) a través de un orificio orientado en la dirección del viento, que incide directamente en la superficie de captación recubierta de una sustancia adhesiva (vaselina). Las partículas contenidas en el aire impactan y quedan adheridas a la superficie de muestra que se desplaza a una velocidad uniforme de 2 mm/hora, mediante un mecanismo de relojería. Los captadores utilizados permiten el muestreo continuo del aire durante siete días (Bukard, “*Seven-day recording volumetric spore trap*”). La cinta adhesiva con la muestra se segmenta para la preparación de muestras diarias. Cada segmento correspondiente a la muestra de un día se coloca en un portaobjetos con glicerogelatina que permite la fijación de la muestra y posteriormente se le aplica una tinción con fucsina para la coloración de los granos de polen, respecto al material particulado de origen no vegetal. Posteriormente se coloca un cubreobjetos y se sella la muestra que quedará lista para su análisis. Al final del proceso se obtiene una muestra por día, que es una preparación para su observación al microscopio óptico, cuyo análisis permite obtener datos de concentración media atmosférica de polen en un día, o en cada hora a lo largo de todo el día.

### **2.2. Análisis aerobiológico de las muestras diarias**

El análisis microscópico de las muestras aerobiológicas constituye un proceso fundamental en la obtención de resultados. Cada muestra es

analizada al microscopio óptico por un técnico especialista, con conocimientos de morfología polínica, que le permitirán identificar y cuantificar los granos de polen presentes en la muestra, siendo una de las etapas que más tiempo requiere, sobre todo cuando hay gran cantidad de granos de polen en ellas.

En la Red Palinocam, al igual que en la Red Española de Aerobiología, el método de recuento que se utiliza es el de 4 barridos horizontales continuos a lo largo de toda la preparación con el objetivo de 400 aumentos. Estos barridos deben ser equidistantes entre sí y del borde de la preparación en el caso del primer y último barrido. Esto representa una submuestra analizada del 12-13% de superficie total, en función del diámetro del campo del microscopio que estemos utilizando. Es necesario que la superficie de la muestra que examinemos sea estadísticamente representativa del total. Teniendo en cuenta el tamaño medio de las partículas a estudiar (30-45  $\mu\text{m}$ ), se recomienda trabajar a 400x aumentos, para que la imagen de los granos de polen sea adecuada y suficiente para su reconocimiento e identificación morfológica.

Como resultado del análisis de cada muestra se obtiene una relación de tipos morfológicos de polen (espectro polínico diario) cuantificados mediante el valor medio diario de estas partículas por metro cúbico de aire.

Los tipos polínicos reflejados en el manual de calidad de la Red Palinocam como de obligada identificación y cuantificación, son los tipos polínicos considerados principales (TPP), determinados mediante criterios de incidencia atmosférica, representatividad y alergenicidad (Tabla 3.2). En la identificación morfológica, se intenta asignar a un determinado "tipo morfológico de polen" a todos los granos de polen hallados en las cuatro bandas de lectura. En aquellos casos en los que la identificación resulta imposible, bien por su grado de deterioro o por la presencia de otras partículas que dificultan su visión, se incluyen en una categoría especial denominada "polen no identificado" (PNI). Por ello en el análisis aerobiológico es importante definir con precisión los "tipos morfológicos" de polen a identificar. Por otro lado, los tipos de polen no incluidos en la categoría de tipos polínicos principales, pero que pueden ser distinguidos por el personal experto, se consideran tipos polínicos secundarios, que serán considerados cuando se necesite el máximo grado de detalle en la identificación, pero que serán agrupados como "Otros" en otras fases del análisis de datos.

### 3. Base de datos aerobiológicos de la Red Palinocam

Los datos obtenidos en cada estación se remiten al Centro Coordinador, mediante una aplicación informática denominada SPOL, que cuenta con acceso remoto desde los puntos de muestreo, y fue creada “ad hoc” para la inclusión de los datos aerobiológicos y la creación de la base de datos histórica de la Red Palinocam.

Tipos Polínicos Principales (TPP)	
1	<i>Acer</i> ( <b>ACER</b> )
2	<i>Alnus</i> ( <b>ALNU</b> )
3	<i>Amaranthaceae</i> (antes <i>Chenopodiaceae/Amaranthaceae</i> ) ( <b>AMAR</b> )
4	<i>Artemisia</i> ( <b>ARTE</b> )
5	<i>Betula</i> ( <b>BETU</b> )
6	<i>Castanea</i> ( <b>CAST</b> )
7	<i>Compositae</i> (excluido <i>Artemisia</i> ) ( <b>COMP</b> )
8	<i>Corylus</i> ( <b>CORY</b> )
9	<i>Cupressaceae/Taxaceae</i> ( <b>CUPR</b> )
10	<i>Ericaceae</i> ( <b>ERIC</b> )
11	<i>Eucalyptus</i> ( <b>EUCA</b> )
12	<i>Fraxinus</i> ( <b>FRAX</b> )
13	<i>Ligustrum</i> ( <b>LIGU</b> )
14	<i>Moraceae</i> ( <b>MORA</b> )
15	<i>Olea</i> ( <b>OLEA</b> )
16	<i>Pinaceae</i> ( <b>PINA</b> )
17	<i>Plantago</i> ( <b>PLAN</b> )
18	<i>Platanus</i> ( <b>PLAT</b> )
19	<i>Poaceae</i> (=Gramineae) ( <b>POAC</b> )
20	<i>Populus</i> ( <b>POPU</b> )
21	<i>Quercus</i> ( <b>QUER</b> )
22	<i>Rumex</i> ( <b>RUME</b> )
23	<i>Salix</i> ( <b>SALI</b> )
24	<i>Ulmus</i> ( <b>ULMU</b> )
25	<i>Urticaceae</i> ( <b>URTI</b> )

Tabla 3.2. Los 25 tipos polínicos de obligado reconocimiento en la red Palinocam (**TPP**), con su código o abreviatura.

En SPOL se incluyen los datos diarios de los 25 tipos polínicos de obligado reconocimiento (TPP). Cualquier otro tipo polínico identificado y cuantificado, se incluye en SPOL como OTROS. En esta base se almacenan, por tanto, los datos diarios de los 25 tipos polínicos mencionados y de todas las estaciones desde el

año 1994. A partir de estos datos se elabora y procesa la información que se difundirá posteriormente.

En el año 2010 se desarrolló la aplicación informática SPOL que marcó una diferencia sustantiva en la gestión y mantenimiento de la base de datos aerobiológica. Esta aplicación informática, a la cual se migraron las bases de datos de la serie histórica de la Red Palinocam, recibe y almacena los datos diarios de polen de cada una de las estaciones de muestreo, y permite la generación automática de los boletines de información polínica, en cada una de sus modalidades. Además, esta aplicación incorpora un gestor de envío de correo electrónico y de envío de avisos por mensajes cortos. También se integra en esta aplicación el sistema de suscripción a través de Internet de los usuarios demandantes de la información. Los datos del sistema de gestión informática de la Red Palinocam (SPOL) derivados de los distintos envíos, suscripciones y encuestas de satisfacción, incluyendo la opinión de los usuarios de la Web, son indicadores de la utilidad de la información polínica que se genera a partir de los datos de toda la Red Palinocam y son tratados en detalle en el capítulo II.

El centro coordinador de la Red Palinocam recibe los datos del análisis de concentración de polen todos los días desde enero a junio, y semanalmente desde julio a diciembre. La elaboración de la información se realiza de forma diaria de enero a junio, meses en que las concentraciones de polen son más relevantes y la incidencia de asma y alergia es mayor en la Comunidad de Madrid. De julio a diciembre la información se envía y se actualiza con los datos de concentración diarios, pero con periodicidad semanal.

Los datos aerobiológicos empleados en la presente tesis doctoral se corresponden con las concentraciones medias diarias, expresadas como número de granos de polen por metro cúbico de aire, de los diferentes tipos morfológicos de polen identificados, en las estaciones de la red durante el periodo 1994-2022.

## Bibliografía

- Barrios Pérez, J. 1942. Estudio polínico primaveral del campo de Sanlúcar de Barrameda y sus deducciones para la clínica. *Rev. Clin. Esp.* 6: 29-33.
- Blackley C., 1873. Experimental researches on the cause and nature of *Catarrhus Aestivus* (hay fever, hay asthma). London: Balliere, Tindall & Cox. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=ien.35558002034201&seq=237>.
- Buters, J. T. M., Antunes, C., Galveias, A., Bergmann, K. C., Thibaudon, M., Galán, C., Schmidt-Weber, C. Oteros, J. 2018. Pollen and spore monitoring in the world. *Clin. Transl. Allergy*, 8: 9. <https://doi.org/10.1186/s13601-018-0197-8>.
- Galán Soldevilla, C., Cariñanos González, P., Alcázar Teno, P. Domínguez Vilches, E. 2007. Manual de calidad y gestión de la Red Española de Aerobiología. Servicio de Publicaciones. Universidad de Córdoba.
- Hirst JM. 1952. An automatic volumetric spore trap. *Ann Appl Biol.* 39(2):257–65.
- Hyde, HA. 1959. Volumetric counts of pollen grains at Cardiff, 1954–1957. *J Allergy*. 30(3): 219–34. [https://10.1016/0021-8707\(59\)90069-3](https://10.1016/0021-8707(59)90069-3).
- Jiménez Díaz, C. 1932. El asma y otras enfermedades alérgicas. de España. Madrid.
- Muñoz Medina, J. M. 1949 Una introducción al estudio de los alérgenos polínicos de Granada. *Real Acad. Med. Granada* 13: 15-27.
- Posse, J. M. 1946. Contribución al estudio de la alergia respiratoria de Vizcaya. *Arch. Hosp. Civil Basurto (Bilbao)* 2: 25-87.
- Sáenz-Laín, C. & Gutiérrez- Bustillo, A. M. 1982. El contenido polínico de la atmósfera de Madrid. *Anal. Jard. Bot. Madrid.* 39(2): 433-463. [https://rjb.csic.es/jardinbotanico/ficheros/documentos/pdf/anales/1982/Anales\\_39\(2\)\\_433\\_463.pdf](https://rjb.csic.es/jardinbotanico/ficheros/documentos/pdf/anales/1982/Anales_39(2)_433_463.pdf).
- Subiza- Martín, E. 1980. Incidencia de granos de polen en la atmósfera de Madrid. *Metodo volumétrico. Allergol. Immunopathol. suppl.* 7: 261-276.
- Surinyach, R. 1947. Contribución al estudio de la fiebre del heno en Barcelona. *Calendario de polinización observado durante tres años 1941-1943. Anales Med.* 34: 299-303.
- Vieitez Cortizo, E. 1946. Estudios botánicos sobre la flora alérgica y contenido en polen de la atmósfera de la comarca de Santiago de Compostela. *Anales Inst. Edafol.* 5(2): 306-439.

## **4. Capítulo I**

**Control de calidad en el laboratorio de  
Aerobiología. Ejercicio interlaboratorio**

***Importance of the quality management of  
aerobiological monitoring networks: The  
case study of Madrid Region in Spain***

*Science of total Environment 2024*





Contents lists available at ScienceDirect

## Science of the Total Environment

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv)

## Importance of the quality management of aerobiological monitoring networks: The case study of Madrid Region in Spain

Patricia Cervigón<sup>a</sup>, Zuzana Ferencova<sup>b</sup>, Ángel Cascón<sup>a</sup>, Jorge Romero-Morte<sup>a</sup>,  
 Javier Galán Díaz<sup>a,c</sup>, Silvia Sabariego<sup>d</sup>, Margarita Torres<sup>a</sup>,  
 Adela Montserrat Gutiérrez-Bustillo<sup>a</sup>, Jesús Rojo<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Pharmacology, Pharmacognosy and Botany, Faculty of Pharmacy, Complutense University of Madrid, Madrid, Spain

<sup>b</sup> Atlantic Botanical Garden of Gijón, Gijón, Spain

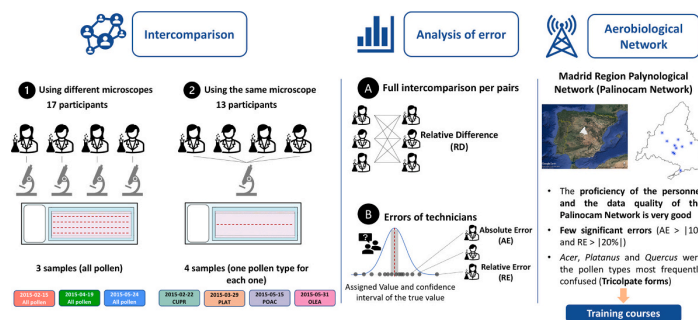
<sup>c</sup> Department of Plant Biology and Ecology, University of Sevilla, Sevilla, Spain

<sup>d</sup> Department of Biodiversity, Ecology and Evolution, University Complutense of Madrid, Madrid, Spain

### HIGHLIGHTS

- High-quality environmental data is crucial for sharing between large-scale networks.
- Proficiency of the staff of the Madrid Region Palynological Network has been assessed.
- The proficiency of the personnel and the data quality in this study was very good.
- A few isolated significant errors were detected (mistakes in tricolpate pollen).
- Adequate training in pollen analysis is essential to ensure high quality standards.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

Editor: Anastasia Paschalidou

#### Keywords:

Data quality  
 Proficiency  
 Pollen  
 Intercomparison exercise  
 Reproducibility  
 Environmental health

### ABSTRACT

Interest in biological air quality monitoring is rising, and updated public information is increasingly demanded by stakeholders in the case of airborne pollen, which requires maintaining high standards of data quality. The number of aerobiological stations worldwide is continuously growing, and quality management is becoming more complex with the increase in the scale of aerobiological networks. Quality control exercises are crucial for maintaining the quality of the data used in the pollen monitoring routine over time. In this study we show the results of an intercomparison test among technicians in the Madrid Region Palynological Network in central Spain in order to identify potential sources of error during the pollen analysis. The findings of this intercomparison exercise indicated very high-quality pollen data based on two different proficiency tests: i) the technicians' analysis of common samples with the light microscopes used in the routine pollen analysis; and ii) the analysis of common samples with all technicians using the same light microscope. A few specific remarkable errors were detected (i.e., those whose Absolute Error > |10| and Relative Error > |20 %|), such as confusion by four participants between *Quercus* vs. *Acer* and *Quercus* vs. *Platanus* pollen. Since the pollen analysis routine requires very experienced professionals, we believe it is essential to provide adequate training programmes for

\* Corresponding author.

E-mail address: [jesrojo@ucm.es](mailto:jesrojo@ucm.es) (J. Rojo).

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176544>

Received 28 June 2024; Received in revised form 31 August 2024; Accepted 24 September 2024

Available online 25 September 2024

0048-9697/© 2024 The Author(s). Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

pollen analysis and the specific identification of these problematic pollen types. High-quality environmental data is crucial for sharing with regional, national and continental networks to ensure applicability, reproducibility and integration in large-scale studies.

## 1. Introduction

Interest in biological air quality monitoring has increased considerably since the last decades of the 20th century (Lee, 2011; Šanti-Temkiv et al., 2020; Yao, 2018). Pollen is an important component of the bio-aerosol and is of great scientific interest because of the multiple repercussions of the incidence of airborne pollen taxa on public health and the environment (Maya-Manzano et al., 2021; Rodríguez-Arias et al., 2023). Pollen is one of the main causes of allergic respiratory diseases worldwide and its prevalence is rising as a consequence of variations in pollen exposure patterns, changes in people's lifestyle, and the synergic influence of other human-related factors resulting from global change (Biagioni et al., 2020; D'Amato et al., 2020). The allergenic pollen from grasses, olive, birch, cypress, plane tree, ragweed, etc. has received special attention (D'Amato et al., 2007; García-Mozo, 2017; Grewling et al., 2023; Lake et al., 2017). However, beyond its clinical relevance, the monitoring of airborne pollen also provides important information of interest to other fields such as ecology, forestry and agronomy (Guada et al., 2024; López-Orozco et al., 2023; Oteros et al., 2014). Updated public information on airborne pollen is increasingly demanded by stakeholders, which requires maintaining high standards of data quality (Matricardi et al., 2020; Tummon et al., 2024). From a scientific point of view, larger spatial scales are used to generate models of pollen dynamics, which requires adequate data integration between different data sources and models (Kurganskiy et al., 2020; Sofiev et al., 2017; Zhang and Steiner, 2022).

Airborne pollen monitoring has traditionally used volumetric samplers based on impaction and morphological particle identification using light microscopy (Buters et al., 2022; UNE-EN 16868, 2020). Numerous pollen monitoring networks have been established worldwide since the 1980s, and the number of aerobiological stations is continuously growing. Compared to other regions in the world, Europe has the densest network of pollen monitoring sites, comprising different national and regional networks (Buters et al., 2018). As the size of an aerobiological network increases, so too does the complexity of the management and personnel involved. In this context, integrating the aerobiological data requires applying a range of management strategies focused on following the same standard methodological procedures, providing comparable and reproducible data, ensuring the quality of the data, and identifying common issues in the monitoring routine and the analysis of airborne pollen data (Galán et al., 2014; Oteros et al., 2013, 2017; Picornell et al., 2021; Tasioulis et al., 2022).

The airborne pollen spectrum is an important indicator of the timing and intensity of flowering in the surrounding natural and human-managed vegetation. Although the 10–15 most abundant morphological pollen types represent around 90 % of the total airborne pollen abundance (ELHassani et al., 2022; Elvira-Rendueles et al., 2019; Lo et al., 2019; Markey et al., 2022; Pérez-Badia et al., 2010), up to approximately 80 pollen taxa can be detected in the air throughout the year (Cervigón et al., 2024). Pollen monitoring routines based on morphological identification therefore require highly experienced professionals to analyse the entire pollen spectrum in the air. Even in the recent automatic pollen monitoring frameworks based on automated pollen recognition systems, the algorithm should be trained by supplying information based on human knowledge and the validation of images (Oteros et al., 2020). National or international training courses are powerful initiatives that allow technicians to achieve the necessary expertise in pollen identification and quantification, and quality control exercises are essential for maintaining the data quality of the pollen monitoring routine over time (Galán et al., 2014).

Ensuring the optimal quality of environmental data requires considering performance during the different stages of data collection and analysis. Potential errors in pollen monitoring can result from i) biases in instrumental error (Oteros et al., 2017), ii) biases caused by applying the incorrect mathematical transformation of units to obtain pollen concentration as a standard measure of airborne pollen levels (Galán et al., 2017), iii) random technician errors due to misidentification and counting errors (Comtois et al., 1999; Oteros et al., 2013). Numerous studies have been conducted to assess the uncertainty of the aerobiological method based on volumetric impactor samplers and optical microscopy (Adamov et al., 2021; Addison-Smith et al., 2020; Cotos-Yáñez et al., 2013; Rojo et al., 2019a). In the later stages of data analysis, even a comparison has been made of the effectiveness of the different methodological procedures used to complete the missing data from historical time-series of pollen data, a common occurrence in long environmental time-series due to mechanical interruptions in the monitoring process or human failure (Junger and Ponce de Leon, 2015; Picornell et al., 2021; Rojo et al., 2019c).

Several national aerobiological networks have carried out quality control exercises to evaluate the proficiency of the technicians responsible for pollen analysis in regard to their recognition of specific pollen types or an entire analysis of common aerobiological samples (Milic et al., 2019, 2021; Oteros et al., 2013; Smith et al., 2019). Proficiency experiences at the European scale have also been promoted by the European Aerobiology Society (EAS) Working Group on Quality Control (Šikoparija et al., 2017; Smith and Šikoparija, 2021). Also, ensuring the data quality of manual pollen samples is crucial in the context of the automation of aerobiological monitoring while pollen measurements using the traditional method are assumed as the “gold standard” to train and validate the automatic systems (Maya-Manzano et al., 2023). The aims of this study were to assess the performance of the pollen analysis by technicians in the Madrid Region Palynological Network in central Spain, and to identify potential sources of error during the pollen analysis using two different proficiency exercises: i) the analysis of common samples by the technicians with the light microscopes used in their respective routine pollen analysis; and ii) the analysis of common samples all using the same light microscope.

## 2. Methods

### 2.1. Aerobiological network

The objective was to assess the proficiency of the staff of the Madrid Region Palynological Network in Spain (henceforth the Palinocam Network, <https://www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen>). The Palinocam Network monitors the biological air quality in Madrid and is coordinated by the Directorate-General for Public Health of the Madrid Autonomous Region (Cervigón Morales, 2005). The quality control exercise was coordinated by the Aerobiology Group at the Faculty of Pharmacy in the Complutense University of Madrid, which is responsible for the scientific and technical management of this network. The Palinocam Network integrates the different municipal laboratories of various city councils in the Madrid Region, whose technical staff kindly participated in the proficiency test.

The Palinocam Network's pollen monitoring procedure follows the standardised methodology proposed by the Spanish Aerobiology Network (Galán et al., 2007, 2014) and the international standard (UNE-EN 16868, 2020). The aerobiological stations are equipped with volumetric Hirst-type pollen traps (Hirst, 1952) which operate continuously and collect the pollen grains on a vaseline-coated Melinex® film strip.

Daily samples are mounted using a fuchsin-stained glycerin medium, and the pollen grains are identified and quantified by trained experts under light microscopy (400× magnification). Several common daily samples from the airborne monitoring routine at the Madrid/University station were used in this intercomparison exercise, as explained below.

2.2. Design of the intercomparison exercise

The participants in the quality control exercise were the technicians and employees at the following aerobiological stations: Madrid/University (Faculty of Pharmacy), Madrid/Arganzuela (Madrid City Council), Alcalá de Henares, Alcobendas, Aranjuez, Coslada, Getafe, Leganés and Las Rozas. Two different proficiency tests were carried out, with: i) the participants analysing the entire pollen spectrum of common samples with their own light microscopes as used in their respective routine pollen analysis; and ii) the participants analysing common samples all using the same light microscope to estimate the pollen concentration of specific highly allergenic taxa (Fig. 1).

Seventeen technicians participated in the first test from November 2018 to November 2019, in which all the participants used their own microscopes. Three common daily samples were analysed by all the technicians to identify and quantify the pollen grains, following the same routine method for pollen analysis (Fig. 1). Three very different samples in the year 2015 were selected for the exercise, containing a

minimum of 200 and a maximum of 400 pollen grains/m<sup>3</sup> of total pollen: winter (15th February), early spring (19th April) and late spring (24th May) (Fig. 2). The technicians analysed four horizontal transects, accounting for roughly 12 % of the total area of the sample, and subsequently applied a specific transformation factor to each microscope in order to estimate the airborne pollen concentration (pollen grains/m<sup>3</sup>). This is the usual procedure for analysing the aerobiological samples in the Palinocam Network following the standardised international protocol (UNE-EN 16868, 2020).

Thirteen technicians participated in the second exercise between 19th-20th November 2019, in which all the participants used the same microscope. As a simplification of the protocol, the participants counted the pollen grains of specific allergenic pollen taxa along one horizontal transect in four different samples in the year 2015 (Fig. 1): Cupressaceae/Taxaceae (CUPR) on 22nd February, *Platanus* (PLAT) on 29th March, Poaceae (POAC) on 15th May and *Olea* (OLEA) on 31st May (Fig. 2). These are the most allergenic airborne pollen types in the Madrid Autonomous region.

2.3. Selection of samples and pollen types

The samples used in the intercomparison exercise were taken and processed by the Madrid/University station in 2015. For the first exercise, samples were selected in three relevant periods of the year, as

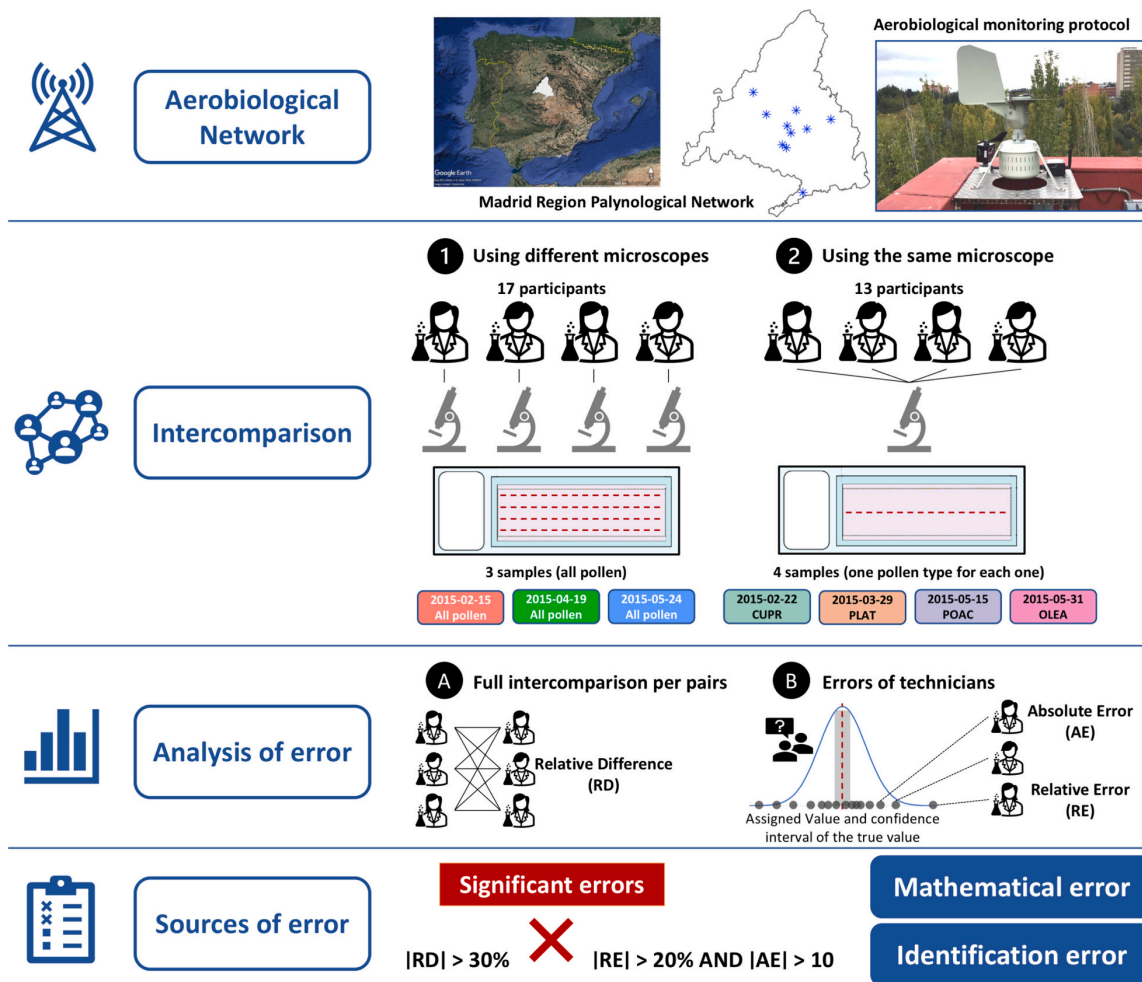
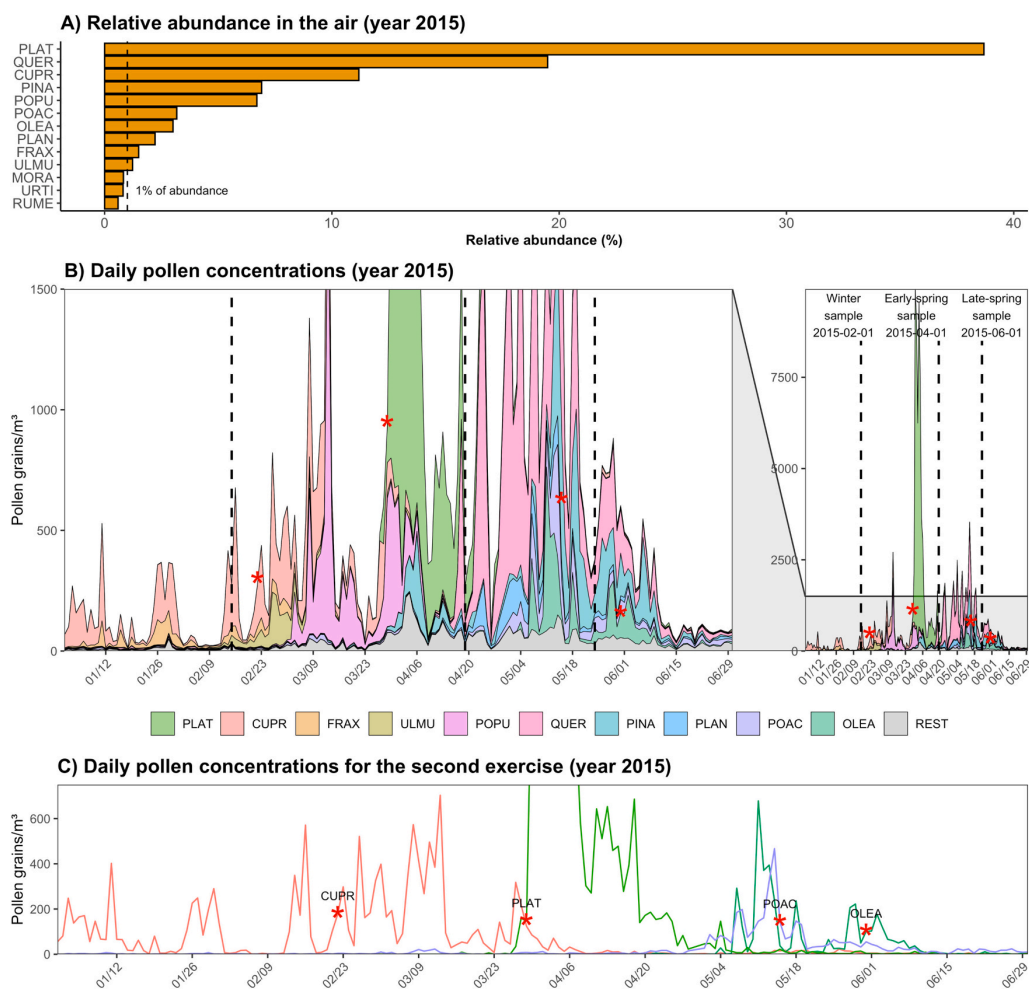


Fig. 1. Design of the intercomparison exercise and phases of the study.



**Fig. 2.** Relative abundance in the air of the most abundant pollen types in the Madrid/University station in 2015 (A), airborne daily pollen concentrations for the ten most abundant pollen types in the Madrid/University station in 2015 (B), and airborne daily pollen concentrations for the pollen types assessed in the second exercise (using the same microscope) (C). Dashed vertical lines represent the samples analysed in the first exercise (using different microscopes) and red asterisks represent the samples analysed in the second exercise (using the same microscope) of the intercomparison exercise. Abbreviations of pollen types: CUPR: Cupressaceae (including Taxaceae); FRAX: *Fraxinus*; ULMU: *Ulmus*; PLAT: *Platanus*; OLEA: *Olea*; PINA: Pinaceae; PLAN: *Plantago*; POAC: Poaceae; POPU: *Populus*; QUER: *Quercus*; REST: rest of pollen.

indicated above, to ensure the presence of the most representative pollen types in abundance and importance in the air (Fig. 2). The Palinocam Network data sheet includes 25 morphological pollen types which must routinely be recognised. The following pollen types were identified in this exercise: ACER: *Acer*; ALNU: *Alnus*; AMAR: Amaranthaceae; ARTE: *Artemisia*; BETU: *Betula*; CAST: *Castanea*; COMP: Compositae (except *Artemisia*); CORY: *Corylus*; CUPR: Cupressaceae (including Taxaceae); ERIC: Ericaceae; EUCA: *Eucalyptus*; FRAX: *Fraxinus*; LIGU: *Ligustrum*; MORA: Moraceae; OLEA: *Olea*; PINA: Pinaceae; PLAN: *Plantago*; PLAT: *Platanus*; POAC: Poaceae; POPU: *Populus*; QUER: *Quercus*; RUME: *Rumex*; SALI: *Salix*; ULMU: *Ulmus* and URTI: Urticaceae. Other pollen grains not included in these main categories were considered as “others” (REST), and total pollen was analysed (TOTA). Only pollen types reaching pollen concentrations over 10 pollen grains/m<sup>3</sup> in each sample were considered in the analysis, as a certain magnitude is needed to obtain significant statistical differences. This pollen concentration was identified as the threshold value in the uncertainty measurement of the Hirst-type pollen volumetric trap (Adamov et al., 2021; Rojo et al., 2019b).

#### 2.4. Estimation of the error

Since the true pollen concentrations and counts are not known, the staff proficiency was evaluated following two approaches: i) full inter-comparison between the values retrieved by pairs of technicians; and ii) estimation of the technicians' error compared to the centred assigned value among the technicians.

In the first case, the value of pollen concentration observed by each participant was compared pairwise using the Relative Difference (RD) based on Comtois et al. (1999), according to Eq. (1):

$$RD(\%) = \frac{(X_2 - X_1)}{(X_2 + X_1)/2} \times 100 \quad (1)$$

where  $X_1$  is the pollen value from one participant and  $X_2$  is the pollen value from the other participant in the pair being compared. Remarkable errors were considered as those whose  $|RD| > 30\%$  following the criterion proposed by Smith et al. (2019). This threshold was used in similar proficiency tests of pollen analysis and this level of acceptance is encouraged by the nature of pollen data because of low pollen

concentrations can cause very high error values even in variations of a few pollen grains (Adamov et al., 2021).

In the second case, the estimation of the assigned value from the pollen values of all the participants requires the assumption that the data follows a Gaussian distribution (Figs. S1 and S2, Supplementary Material) (Oteros et al., 2013). The assigned value was calculated as the mean value of the observations for each pollen type (Oteros et al., 2013), after removing the most deviant values characterised as outliers. The outliers were identified as those values surpassing the dispersion range of a boxplot ( $\pm$  interquartile range  $\times 1.5$ ).

Other statistics were estimated in addition to the assigned value (mean value), namely, median, standard deviation, coefficient of variation and 95 % confidence intervals (CI95%) based on Eq. (2):

$$CI95\% = X \pm \frac{(1.96 \times S)}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

where  $X$  is the assigned value and  $S$  and  $n$  are the standard deviation and number of cases for which the assigned value has been calculated (excluding outliers) respectively.

Finally, absolute and relative errors were calculated for each pollen type and participant. Absolute error (AE) was calculated using Eq. (3):

$$AE = X_i - X \quad (3)$$

where  $X_i$  is the pollen value recorded by each specific technician and  $X$  is the assigned value calculated.

Relative error (RE) was calculated using Eq. (4):

$$RE = \frac{X_i - CI95\%}{X} \times 100 \quad (4)$$

where  $X_i$  is the pollen value recorded by each specific technician,  $X$  is the assigned value calculated and CI95% is the nearest limit (upper or lower) to  $X_i$  for the 95 % confidence interval. Remarkable errors were considered as those whose  $AE > |10|$  and  $RE > |20\%|$  following the criterion proposed by Oteros et al. (2013). This level of acceptance of the relative error has been proposed based on the ISO recommendations (ISO 13528: *Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons*) and this is the minimum value considered by other similar exercises (Galán et al., 2021). Also, a more restricted value of  $RE > |5\%|$  is applied and shown in Supplementary Material. In the case of the absolute error, the acceptance level of 10 pollen grains is a very appropriate value of error because of this is the uncertainty value for the aerobiological procedure estimated by Adamov et al. (2021).

## 2.5. Interpretation of sources of error

It is crucial to identify sources of error in pollen analysis in order to address specific issues which can reduce the quality of the data and to improve accuracy throughout all the stages of the process. Two main sources of error can be identified based on the results of this intercomparison exercise, namely mathematical errors and identification errors.

Mathematical errors may be made by technicians when transforming the pollen counts into pollen concentrations, which directly depends on the microscope's field of view. This type of error would be detected in the results as a constant error observed in all pollen types. Identification errors may be made by technicians confusing some pollen types with others. This type of error would be detected through different pollen types showing a different sign of relative and absolute errors of a similar magnitude by the same technician. Any more errors cannot specifically be classified and will be considered as counting errors by the technicians (Oteros et al., 2013).

## 3. Results

### 3.1. First intercomparison exercise – using different microscopes

In the first exercise, all the participants were potentially able to identify the 25 mandatory pollen types, listed above; however, the number of pollen types registered and identified depended on the season of the year (Fig. S3, Supplementary Material). A total of 13 pollen types were identified in the winter sample (15th February), 19 pollen types in the early-spring sample (19th April) and 21 pollen types in the late-spring sample (24th May). Although discrepancies between participants with pollen concentrations below 10 grains/m<sup>3</sup> should be considered with caution, Fig. S3 allowed possible errors to be detected when a few participants diverged from the others. This was the case of three technicians assigning pollen grains to *Betula* pollen in winter when most technicians identified only *Corylus* pollen. In late spring, only one technician diverged in the case of *Salix* and *Eucalyptus* pollen (assigned to *Rumex* and *Ericaceae* respectively by the rest of the participants).

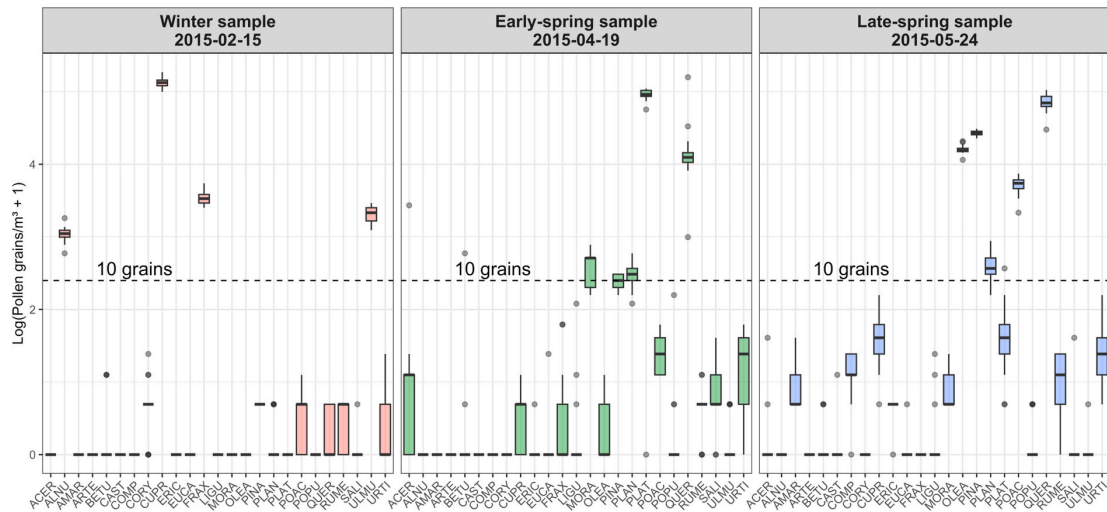
As indicated, pollen concentrations above 10 pollen grains/m<sup>3</sup> were considered in the rest of the analysis, in addition to the total pollen (including other pollen types plus the 25 main pollen types). The pollen types considered were i) *Alnus*, Cupressaceae, *Fraxinus* and *Ulmus* in the winter sample; ii) Moraceae, Pinaceae, *Plantago*, *Platanus* and *Quercus* in the early-spring sample; iii) *Olea*, Pinaceae, *Plantago*, Poaceae and *Quercus* in the late-spring sample (Fig. 3). Fig. 3 also shows the dispersion of the participants' data for each pollen type, and the outliers removed to obtain the assigned value.

The relative difference (in percentage) represents the difference between pairs of participants, with relative differences of <30 % being acceptable (Fig. 4). The winter sample revealed the smallest relative difference with most of the main pollen types, where at least 89 % of the pairwise comparison showed <30 % difference. In the early-spring sample, the worst performance was observed in Moraceae, *Quercus* and *Plantago* pollen types with 53, 66 and 70 % of the comparison pairs below 30 % relative difference (Pinaceae and *Platanus* pollen had over 85 % of pairs below 30 % difference). The worst performance in the late-spring sample was observed in *Plantago* pollen, with 69 % of the comparison pairs below 30 % relative difference (*Olea*, Pinaceae, Poaceae and *Quercus* pollen exceeded 85 % of pairs below 30 % difference). 100 % of the total pollen comparison pairs in all samples showed relative differences below 30 % (Fig. 4). The relative difference value between the Moraceae and *Plantago* pollen types is influenced by their low pollen concentrations (Fig. 3).

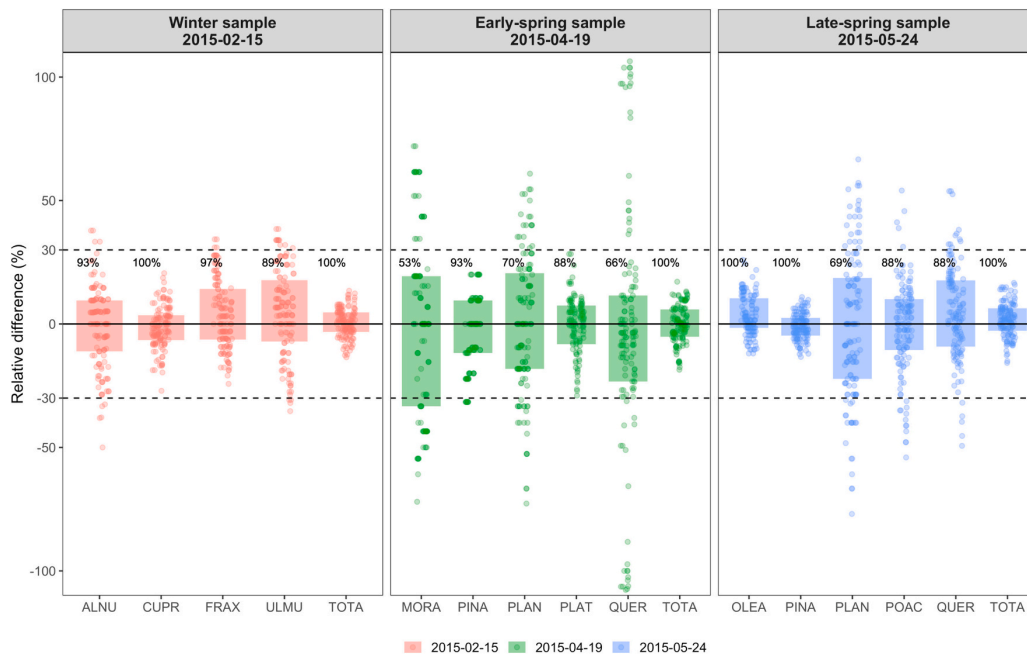
Table 1 shows the median and mean (assigned value after excluding outlier values). The confidence intervals (range between the lower interval *LCI* and upper interval *UCI*) are considered to be the agreement range of true value between the participants. The variation coefficient was in general low (<15 %), except for Moraceae and *Plantago* in early-spring (25 and 19 %) and *Plantago* in late-spring samples (21 %).

There were very few notable deviant values among the participants in the intercomparison exercise (considered as remarkable errors according to the criteria of Absolute Error  $AE > |10|$  and Relative Error  $RE > |20\%|$ ) (Fig. 5). The most notable error was the overestimation of the concentration of *Quercus* pollen in the early-spring sample by two technicians (*Tec6* and *Tec7*), coinciding with an underestimation of *Platanus* or *Acer* pollen types, among others (Fig. S4, Supplementary Materials). However, another technician (*Tec5*) underestimated the *Quercus* pollen concentration in the early-spring sample and considerably overestimated *Acer* pollen (Fig. S4). Fig. S4 uses a more restricted threshold of  $RE > |5\%|$  to define the remarkable errors, however, the results did not change considerably and only a few more remarkable errors were reported, most of them in *Quercus* and *Platanus* pollen types, but also two errors in Cupressaceae pollen and four errors in the total sum of pollen.

In the case of the late-spring sample, the *Quercus* pollen concentration was also underestimated by one technician (*Tec12*), and the



**Fig. 3.** Pollen types exceeding the level of 10 pollen grains/m<sup>3</sup> (dashed line) in each sample. y-axis has been transformed using the function log(x + 1). Abbreviations of pollen types: ACER: *Acer*; ALNU: *Alnus*; AMAR: *Amaranthaceae*; ARTE: *Artemisia*; BETU: *Betula*; CAST: *Castanea*; COMP: *Compositae* (except *Artemisia*); CORY: *Corylus*; CUPR: *Cupressaceae* (including *Taxaceae*); ERIC: *Ericaceae*; EUCA: *Eucalyptus*; FRAX: *Fraxinus*; LIGU: *Ligustrum*; MORA: *Moraceae*; OLEA: *Olea*; PINA: *Pinaceae*; PLAN: *Plantago*; PLAT: *Platanus*; POAC: *Poaceae*; POPU: *Populus*; QUER: *Quercus*; RUME: *Rumex*; SALI: *Salix*; ULMU: *Ulmus*; URTI: *Urticaceae*.



**Fig. 4.** Relative differences by pairs of technicians. Dashed lines represent the acceptable range of error of 30 %. Abbreviations of pollen types: ALNU: *Alnus*; CUPR: *Cupressaceae* (including *Taxaceae*); FRAX: *Fraxinus*; MORA: *Moraceae*; OLEA: *Olea*; PINA: *Pinaceae*; PLAN: *Plantago*; PLAT: *Platanus*; POAC: *Poaceae*; QUER: *Quercus*; ULMU: *Ulmus*; TOTA: total pollen.

Poaceae pollen concentration was underestimated by another (*Tec7*) (Fig. 5). Although it did not produce remarkable error, the recurrent underestimation of pollen concentrations in several pollen types and total pollen could indicate a bias in two technicians (*Tec5* and *Tec16*) (Fig. S4). No remarkable error was detected in the winter sample (Fig. 5).

### 3.2. Second intercomparison exercise – using the same microscope

In the second exercise, the participants focused on the identification of four specific pollen types in four respective samples using all the same microscope. The full pairwise comparison showed a significant agreement between pairs in all cases within the relative difference of 30 % (Fig. 6A). The comparison of the technicians' performance with the assigned value (Fig. 6B) showed that all measurements were within the acceptable range of relative error of 20 %, and only one technician

**Table 1**

Statistics of the pollen concentrations analysed by the technicians in the inter-comparison exercise. Abbreviations: SD Standard Deviation; LCI Lower limit of the confidence interval; UCI Upper limit of the confidence interval; VC Variation coefficient; N Number of cases after excluding outliers. Abbreviations of pollen types: ALNU: *Alnus*; CUPR: Cupressaceae (including Taxaceae); FRAX: *Fraxinus*; MORA: Moraceae; OLEA: *Olea*; PINA: Pinaceae; PLAN: *Plantago*; PLAT: *Platanus*; POAC: Poaceae; QUER: *Quercus*; ULMU: *Ulmus*; TOTA: total pollen.

Date	Pollen types	Median	Mean	SD	LCI	UCI	VC	N
2015-02-15	ALNU	20	20	1	19	21	7	15
2015-02-15	CUPR	166	166	8	162	170	5	16
2015-02-15	FRAX	33	34	4	32	36	10	17
2015-02-15	ULMU	27	26	3	25	28	13	17
2015-02-15	TOTA	252	255	11	250	260	4	17
2015-04-19	MORA	14	13	3	11	14	25	17
2015-04-19	PINA	10	10	1	9	10	10	17
2015-04-19	PLAN	11	11	2	10	12	19	17
2015-04-19	PLAT	145	144	8	140	148	6	15
2015-04-19	QUER	58	59	7	56	63	11	14
2015-04-19	TOTA	273	266	14	259	272	5	17
2015-05-24	OLEA	64	65	2	64	67	4	14
2015-05-24	PINA	83	83	3	81	84	4	17
2015-05-24	PLAN	12	13	3	12	14	21	17
2015-05-24	POAC	41	41	4	39	43	9	16
2015-05-24	QUER	126	129	14	123	136	11	16
2015-05-24	TOTA	373	373	18	364	382	5	17

exceeded the acceptable interval of absolute error, in this case underestimating *Platanus* pollen concentrations by 10 pollen grains (Fig. 6B).

#### 4. Discussion

The results of the intercomparison exercises showed that, in general, the proficiency of the personnel and the data quality of the Palinocam Network is very good. The remarkable errors, exceeding specific thresholds of absolute and relative errors, were detected in a very isolated way, as discussed below. The combination of the results of the two approaches using both the laboratories' own microscopes and one single microscope improves the detection of the specific source of errors (Oteros et al., 2013).

The most remarkable errors are a few cases of misidentification. One of the most common identification mistakes was related to the *Quercus* pollen type; four technicians over- or underestimated the pollen concentration reported by all the rest of the participants in early and late spring. Misidentification of *Quercus* pollen was detected in parallel with mistakes in other pollen types by the same technician, and with a similar magnitude of error as *Quercus* pollen but with the opposite sign, indicating confusion (Oteros et al., 2013). *Acer* and *Platanus* were the pollen types most frequently confused with *Quercus* pollen as they all have tricolpate forms, which are the most common pollen apertural systems in eudicot plants (The Angiosperm Phylogeny Group, 2016).

*Quercus* pollen is produced by various native perennial or deciduous species in central Spain such as holm oak (*Quercus rotundifolia* Lam.), oaks (mainly *Quercus pyrenaica* Willd.), cork oak (*Quercus suber* L.), etc.

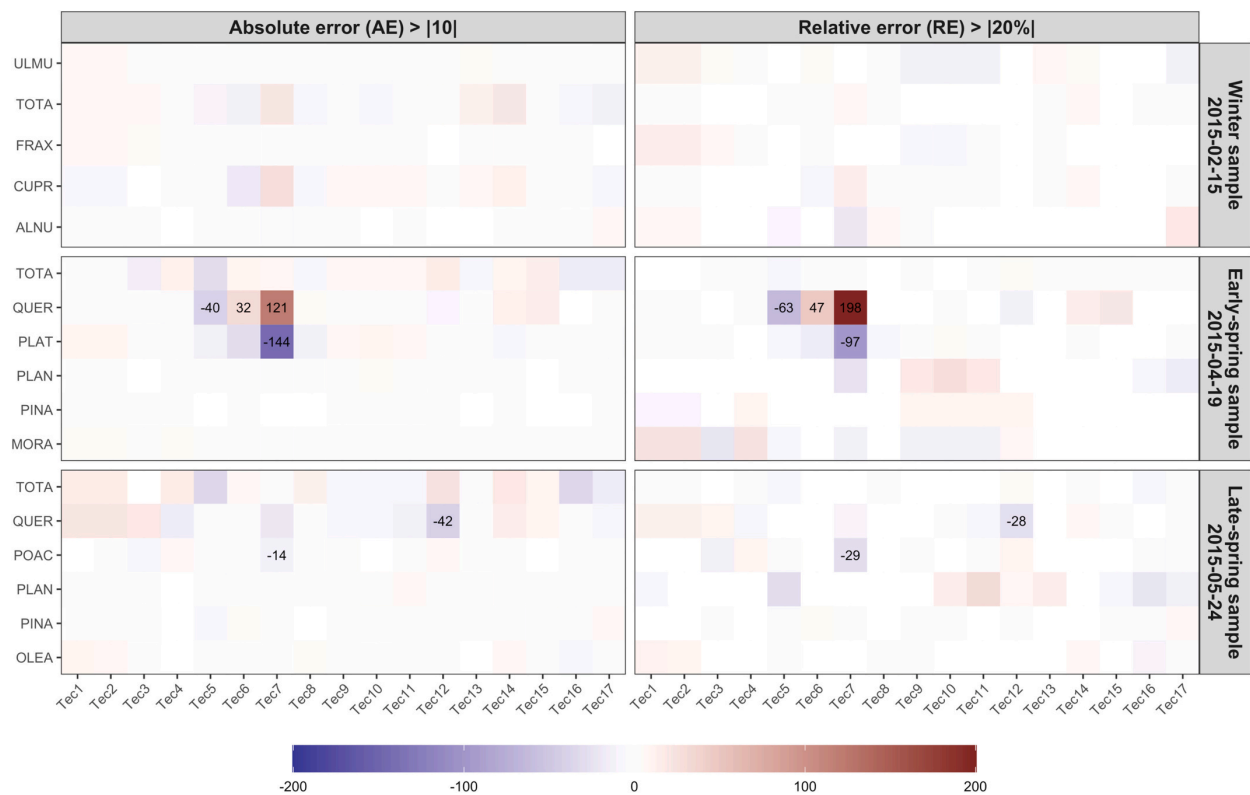
*Quercus* pollen is therefore very morphologically diverse in central Spain; it is mainly tricolpate or tricolporate, although the pollen grains are sometimes considered as tricolporoidate since the endoapertures are not clearly expressed (Denk and Tekleva, 2014; Di Marco et al., 2023; Wrońska-Pilarek et al., 2016). *Acer* pollen is tricolpate and occasionally tricolporate (Biesboer, 1975), and is also a very morphologically diverse pollen type originated by different native and non-native species. Furthermore, according to Erdtman's (1986) pollen size classification, *Acer* and *Quercus* pollen are both considered medium-sized pollen types (average pollen diameter of 25–40  $\mu\text{m}$ ) (Weber, 1998). Based on the above, it is not surprising to find confusion between such similar pollen types, which requires specific training activities in cases of misidentification.

*Platanus* pollen is smaller than *Quercus* pollen. It is classified as having small-sized pollen grains (Erdtman, 1986) and with a granulate aperture membrane and reticulate ornamentation (Denk and Tekleva, 2006). Still, *Platanus* pollen was confused with *Quercus* pollen by one technician in the proficiency exercise. This pollen was also misidentified in previous similar proficiency exercises (Oteros et al., 2013). The anthropic origin of the human-managed plantations of plane trees (*Platanus* spp.) in the Western Mediterranean region may favour the morphological diversity of this pollen type, with a wide range of pollen sizes between cultivated species, which reach a medium size (*Platanus x acerifolia*, 19.1–27.0  $\mu\text{m}$  in polar axis) (Denk and Tekleva, 2006), slightly overlapping with other tricolpate pollen grains. We believe that these identification errors can be partially minimised in each laboratory's usual pollen analysis routine. The spatiotemporal context of each sample allows the experienced technician to detect inconsistencies based on unexpected pollen occurrences with the sampling location, period of the year, etc. It is therefore very useful to have relevant information such as pollen calendars for the general pollen spectrum for specific monitoring sites (Cervigón et al., 2024).

Other minor pollen types in central Spain such as *Betula* and *Corylus* pollen have been sporadically confused, although the low concentrations do not permit a comprehensive analysis of the scale of this error. These morphological types have a similar triporate form and belong to the Betulaceae family, distinguishable by distinct pore-associated elements (annuli, atria, onci, opercula) (Halbritter et al., 2018; Weber, 1998). Whether these potential errors by a few technicians are remarkable or not cannot be assessed in the samples of this proficiency exercise as it would require a larger sample mean (Adamov et al., 2021; Oteros et al., 2013), and Betulaceae pollen types generally have a very low incidence in central Spain (Cervigón et al., 2024; Smith et al., 2014).

Potential mathematical errors are committed while transforming units from pollen counts to pollen concentrations in pollen grains per cubic metre (Galán et al., 2014, 2017). No remarkable errors from this source were detected in this intercomparison exercise; however isolated slightly underestimated values from two technicians were registered for several pollen types compared to the agreed assigned value. Regular quality control exercises should be conducted in regional and national scientific networks to maintain comparable and assimilable common databases (Milic et al., 2019, 2021). Other potential sources of error committed during the phases of the aerobiological procedure and the data processing should be controlled. For example, wrong labelling of pollen types, station codes or sampling dates are very common mistakes which can be included in the databases of the aerobiological networks and be hardly detected in the medium term.

Ensuring the quality of the environmental data in historical time-series is extremely important and constitutes the basis for significant scientific advances and the dissemination of reliable high-quality information to the stakeholders involved (Tummon et al., 2021). Therefore, proficiency tests in environmental networks should be a key aspect in the constitution of the historical databases. Data quality is also crucial for the generation of data by regional environmental networks when this information often becomes a part of networks on a larger spatial scale, e.g. national or continental (Damialis et al., 2021; Pauling et al., 2012;



**Fig. 5.** Absolute and relative errors made by technicians (Tec) participating in the intercomparison exercise. Errors were remarked when  $AE > |10|$  and  $RE > |20\%$ . Abbreviations of pollen types: ALNU: *Alnus*; CUPR: Cupressaceae (including Taxaceae); FRAX: *Fraxinus*; MORA: Moraceae; OLEA: *Olea*; PINA: Pinaceae; PLAN: *Plantago*; PLAT: *Platanus*; POAC: Poaceae; QUER: *Quercus*; ULMU: *Ulmus*; TOTA: total pollen.

Sofiev et al., 2017). This is the case of the Madrid Region Palynological Network (Palinocam Network), a regional network integrated in the Spanish Aerobiological Network at the national scale, and the European Aeroallergen Network at the continental scale. International cooperation and data sharing programmes in the aerobiological scientific field are possible thanks to important scientific initiatives i) to make data openly available and accessible (Buters et al., 2018), ii) to develop common standardised protocols (Galán et al., 2014; UNE-EN 16868, 2020), and iii) to ensure data quality from the national or regional scale at which aerobiological data is gathered and supplied (Oteros et al., 2013; Smith et al., 2019).

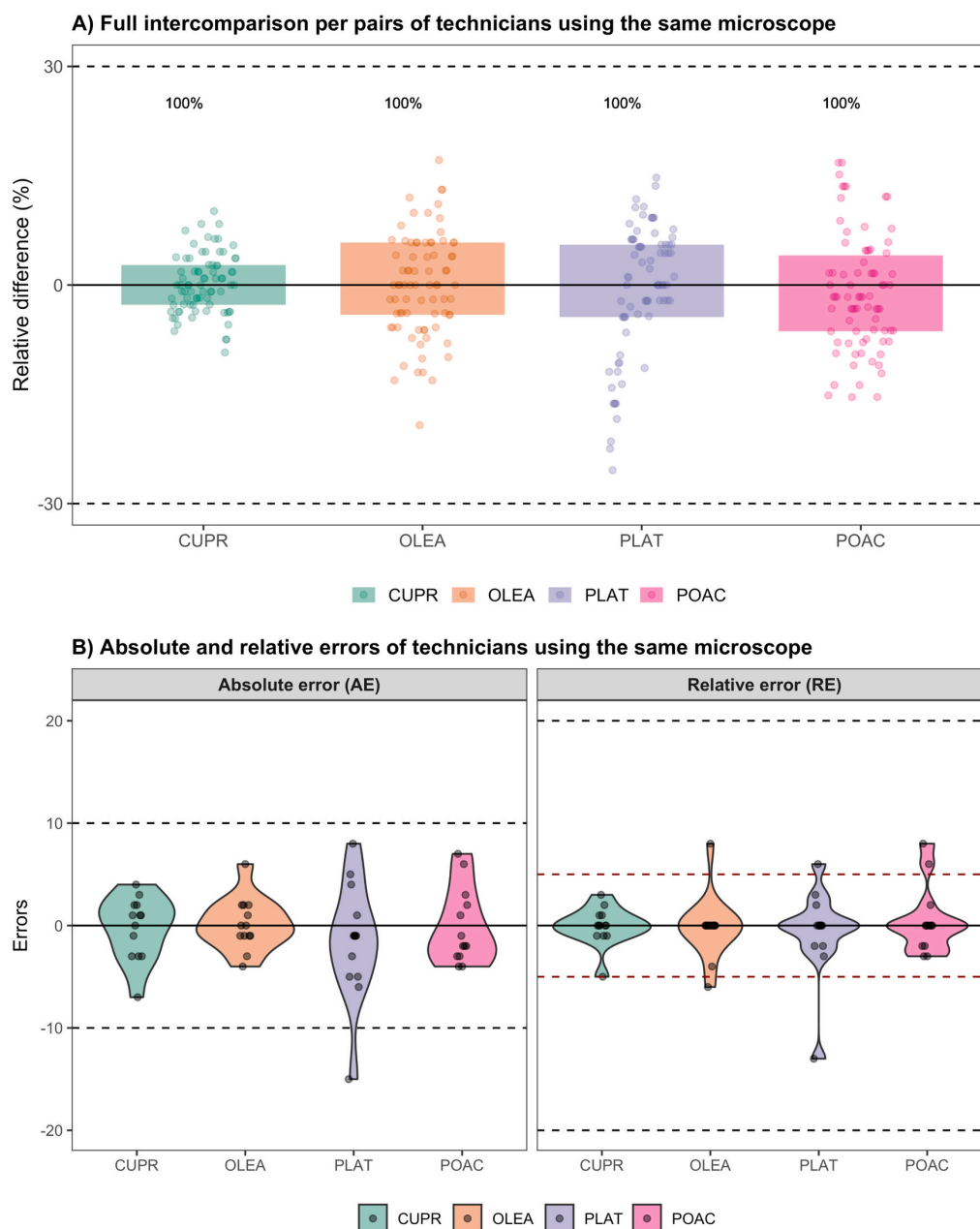
The Palinocam Network is an example of successful collaboration between public institutions and different laboratories of pollen analysis (Cervigón Morales, 2005). Each laboratory in the Palinocam Network must conduct their own quality controls internally since they have an official character. However, a common intercomparison exercise is necessary to ensure the proficiency of the staff, reduce sources of biases and errors as much as possible (Comtois et al., 1999), and make the results comparable and reproducible within the regional network and between aerobiological networks at the international scale. In this study, one first exercise comprised the analysis of common samples and using the laboratories' own devices, and the second involved analysing common samples in one common optical microscope at the Complutense University of Madrid. Both exercises were independent and the meeting of all technicians in the same place for the second experience using the same optical microscope was challenging. This is the reason of the different number of participants in both exercises. It was a limitation to directly assess the decreasing error using the same microscope with respect to be using the laboratories' own devices in the pollen analysis.

Although for ethical reasons this exercise has maintained the

anonymity of the technicians involved in analysing the samples, the results of this proficiency test have allowed the Aerobiology Research Group at the University to take preventive or corrective actions and measurements to solve undesirable potential biases and errors. Throughout the Palinocam Network's long history there have been changes in the Palinocam personnel and the inclusion of new technicians who are inexperienced in the pollen monitoring routine. Newly hired personnel in this task were trained in pollen analysis and identification by members of the Aerobiology Research Group. The Directorate-General for Public Health in the Madrid Autonomous Region organises regular training workshops for technicians in airborne pollen analysis in order to reduce the potential sources of identification and quantification errors. This case study shows not only the results of a proficiency test of the pollen analysts belonging to an aerobiological network using all the published methods until the moment in intercomparison exercises, but also the corrective measurements and the actions carried out to prevent sources of error as possible following the example of the Madrid Region Palynological Network which can be extended to other aerobiological networks.

## 5. Conclusions

High-quality environmental data is crucial for sharing between regional, national and continental networks to ensure applicability, reproducibility and integration. Pollen data are increasingly being used in large-scale studies, so each data provider must ensure high quality standards. The findings of this intercomparison exercise showed a very good quality of the pollen data of the Madrid Region Palynological Network. A few isolated remarkable errors were detected which have already been addressed. In view of the results of this intercomparison



**Fig. 6.** Technicians' proficiency using the same microscope based on relative difference in pairwise comparison between technicians (A), and absolute and relative errors from the assigned values for each pollen type (B). Abbreviations of pollen types: CUPR: Cupressaceae (including Taxaceae); OLEA: *Olea*; PLAT: *Platanus*; POAC: Poaceae.

exercise, it would be useful to carry out specific advanced workshops focused on the comprehensive analysis of problematic pollen types such as *Quercus* vs. *Acer* pollen and *Betula* vs. *Corylus* pollen. Since the pollen analysis routine requires highly experienced professionals, we believe that adequate training in pollen analysis and identification for the personnel of the Palinocam Network is essential to ensure the performance of the technicians and the quality of the pollen datasets.

**CRedit authorship contribution statement**

**Patricia Cervigón:** Writing – review & editing, Writing – original

draft, Visualization, Validation, Software, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Zuzana Ferencova:** Writing – review & editing, Visualization, Software, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Ángel Cascón:** Writing – review & editing, Visualization, Validation, Investigation, Formal analysis, Data curation. **Jorge Romero-Morte:** Writing – review & editing, Validation, Software, Investigation, Formal analysis, Data curation. **Javier Galán Díaz:** Writing – review & editing, Visualization, Software, Investigation, Formal analysis, Data curation. **Silvia Sabariego:** Writing – review & editing, Visualization, Resources, Methodology, Formal analysis, Data curation. **Margarita Torres:**

Writing – review & editing, Validation, Resources, Methodology, Investigation, Data curation. **Adela Montserrat Gutiérrez-Bustillo:** Writing – review & editing, Validation, Supervision, Project administration, Funding acquisition, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Jesús Rojo:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Supervision, Software, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization.

### Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

### Data availability

Data will be made available on request.

### Acknowledgments

The Madrid Region Palynological Network (Palinocam Network) results from the cooperation of different public institutions: Government of the Madrid Autonomous Region, University Complutense of Madrid and eight city councils of the Madrid Region (Alcalá de Henares, Alcobendas, Aranjuez, Coslada, Getafe, Leganés, Las Rozas and Madrid). The authors thank all these institutions for supporting the Palinocam Network. Also, the authors would like to thank all the staff at the pollen analysis laboratories who participated in this proficiency exercise. This research was funded by the Directorate-General for Public Health of the Madrid Autonomous Region and the Directorate-General of Sustainability and Environmental Control of the Madrid city council, thanks to different agreements signed with the Aerobiology Research Group of the Faculty of Pharmacy of the Complutense University of Madrid as responsible of the scientific and technical supervision of the Palinocam Network. JGD is supported by a Margarita Salas fellowship funded by the Spanish Ministry of Universities and the European Union-Next Generation Plan.

### Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176544>.

### References

- Adamov, S., Lemonis, N., Clot, B., Crouzy, B., Gehrig, R., Graber, M.-J., Sallin, C., Tummon, F., 2021. On the measurement uncertainty of Hirst-type volumetric pollen and spore samplers. *Aerobiologia*. <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09724-5>.
- Addison-Smith, B., Wraith, D., Davies, J.M., 2020. Standardising pollen monitoring: quantifying confidence intervals for measurements of airborne pollen concentration. *Aerobiologia* 36, 605–615. <https://doi.org/10.1007/s10453-020-09656-6>.
- Biagioni, B., Annesi-Maesano, I., D'Amato, G., Cecchi, L., 2020. The rising of allergic respiratory diseases in a changing world: from climate change to migration. *Expert Rev. Respir. Med.* 14, 973–986. <https://doi.org/10.1080/17476348.2020.1794829>.
- Biesboer, D.D., 1975. Pollen morphology of the Aceraceae. *Grana* 15, 19–27. <https://doi.org/10.1080/00173134.1975.11864620>.
- Buters, J.T.M., Antunes, C., Galveias, A., Bergmann, K.C., Thibaudon, M., Galán, C., Schmidt-Weber, C., Oteros, J., 2018. Pollen and spore monitoring in the world. *Clin. Transl. Allergy* 8. <https://doi.org/10.1186/s13601-018-0197-8>.
- Buters, J., Clot, B., Galán, C., Gehrig, R., Gilge, S., Hentges, F., O'Connor, D., Sikoparija, B., Skjoth, C., Tummon, F., Adams-Groom, B., Antunes, C.M., Bruffaerts, N., Çelenk, S., Crouzy, B., Guillaud, G., Hajkova, L., Seliger, A.K., Oliver, G., Ribeiro, H., Rodinkova, V., Saarto, A., Sauliene, I., Sozinova, O., Stjepanovic, B., 2022. Automatic detection of airborne pollen: an overview. *Aerobiologia*. <https://doi.org/10.1007/s10453-022-09750-x>.
- Cervigón Morales, P., 2005. Palinocam network: airborne pollen vigilance in Madrid. *Rev. Salud Ambient* 5, 131–136. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/308>.
- Cervigón, P., Ferencova, Z., Cascón, Á., Romero-Morte, J., Galán Díaz, J., Sabariego, S., Torres, M., Montserrat Gutiérrez-Bustillo, A., Rojo, J., 2024. Progressive pollen calendar to detect long-term changes in the biological air quality of cities in the Madrid region, Spain. *Landsc. Urban Plan.* 247, 105053. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105053>.
- Comtois, P., Alcazar, P., Néron, D., 1999. Pollen counts statistics and its relevance to precision. *Aerobiologia* 15, 19–28. <https://doi.org/10.1023/A:1007501017470>.
- Cotos-Yáñez, T.R., Rodríguez-Rajo, F.J., Pérez-González, A., Aira, M.J., Jato, V., 2013. Quality control in aerobiology: comparison different slide reading methods. *Aerobiologia* 29, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10453-012-9263-1>.
- D'Amato, G., Cecchi, L., Bonini, S., Nunes, C., Annesi-Maesano, I., Behrendt, H., Liccardi, G., Popov, T., Van Cauwenberge, P., 2007. Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy* 62, 976–990. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2007.01393.x>.
- D'Amato, G., Chong-Neto, H.J., Ortega, O.P.M., Vitale, C., Ansotegui, I., Rosario, N., Haahtela, T., Galan, C., Pawankar, R., Murrieta-Aguttes, M., Cecchi, L., Bergmann, C., Ridolo, E., Ramon, G., Diaz, S.G., D'Amato, M., Annesi-Maesano, I., 2020. The effects of climate change on respiratory allergy and asthma induced by pollen and mold allergens. *Allergy* 75, 2219–2228. <https://doi.org/10.1111/all.14476>.
- Damialis, A., Gilles, S., Sofiev, M., Sofieva, V., Kolek, F., Bayr, D., Plaza, M.P., Leier-Wirtz, V., Kaschuba, S., Ziska, L.H., Bielory, L., Makra, L., Trigo, M. del M., Group, C.-19/POLLEN study, Traidl-Hoffmann, C., 2021. Higher airborne pollen concentrations correlated with increased SARS-CoV-2 infection rates, as evidenced from 31 countries across the globe. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2019034118>.
- Denk, T., Tekleva, M.V., 2006. Comparative pollen morphology and ultrastructure of *Platanus*: implications for phylogeny and evaluation of the fossil record. *Grana* 45, 195–221. <https://doi.org/10.1080/00173130600873901>.
- Denk, T., Tekleva, M.V., 2014. Pollen morphology and ultrastructure of *Quercus* with focus on group Ilex (= *Quercus* subgenus *Heterobalanus* (Oerst.) Menitsky): implications for oak systematics and evolution. *Grana* 53, 255–282. <https://doi.org/10.1080/00173134.2014.918647>.
- Di Marco, C., D'Agostino, A., Braglia, R., Redi, E.L., Iacobelli, S., Gismondi, A., Canini, A., 2023. Pollen variability in *Quercus* L. species and relative systematic implications. *Plant Physiol. Biochem.* 204, 108079. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108079>.
- ELHassani, L., Boullayali, A., Janati, A., Achmakh, L., Bouziane, H., 2022. Aerobiological study of airborne pollen in Tétouan (NW of Morocco): diversity, intensity and calendar. *Aerobiologia* 38, 483–499. <https://doi.org/10.1007/s10453-022-09761-8>.
- Elvira-Rendueles, B., Moreno, J.M., Costa, I., Bañón, D., Martínez-García, M.J., Moreno-Grau, S., 2019. Pollen calendars of Cartagena, Lorca, and Murcia (region of Murcia), southeastern Iberian Peninsula: 2010–2017. *Aerobiologia* 35, 477–496. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09578-y>.
- Erdtman, G., 1986. *Pollen Morphology and Plant Taxonomy Angiosperms (an Introduction to Palynology)*. BRILL, Boston.
- Galán, C., Carriñanos, P., Alcázar, P., Domínguez-Vilches, E., 2007. Spanish Aerobiology Network (REA): Management and Quality Manual. Publicaciones Univ. Córdoba Spain, Serv doi:www.uco.es/rea/infor\_rea/manual\_eng.pdf.
- Galán, C., Smith, M., Thibaudon, M., Frenguelli, G., Oteros, J., Gehrig, R., Berger, U., Clot, B., Brandao, R., EAS QC Working Group, 2014. Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia* 30, 385–395. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9335-5>.
- Galán, C., Ariatti, A., Bonini, M., Clot, B., Crouzy, B., Dahl, A., Fernandez-González, D., Frenguelli, G., Gehrig, R., Isard, S., Levetin, E., Li, D.W., Mandrioli, P., Rogers, C.A., Thibaudon, M., Sauliene, I., Skjoth, C., Smith, M., Sofiev, M., 2017. Recommended terminology for aerobiological studies. *Aerobiologia* 33, 293–295. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9496-0>.
- Galán, C., Smith, M., Damialis, A., Frenguelli, G., Gehrig, R., Grinn-Gofroñ, A., Kasprzyk, I., Magyar, D., Oteros, J., Sauliene, I., Thibaudon, M., Sikoparija, B., EAS QC Working Group, 2021. Airborne fungal spore monitoring: between analyst proficiency testing. *Aerobiologia* 37, 351–361. <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09698-4>.
- García-Mozo, H., 2017. Poaceae pollen as the leading aeroallergen worldwide: a review. *Allergy* 72, 1849–1858. <https://doi.org/10.1111/all.13210>.
- Grewling, L., Ribeiro, H., Antunes, C., Apangu, G.P., Çelenk, S., Costa, A., Eguiluz-Gracia, I., Galveias, A., Roldan, N.G., Lika, M., Magyar, D., Martinez-Bracero, M., Ørby, P., O'Connor, D., Penha, A.M., Pereira, S., Pérez-Badia, R., Rodinkova, V., Xhetani, M., Sauliene, I., Skjoth, C.A., 2023. Outdoor airborne allergens: characterization, behavior and monitoring in Europe. *Sci. Total Environ.* 167042. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167042>.
- Guada, G., Fernández-González, M., Amigo, R., Dias-Lorenzo, D.A., Sánchez Espinosa, K. C., Rodríguez-Rajo, F.J., 2024. Precipitation masks the effect of temperature on birch airborne pollen start, and previous summer temperature affects pollen intensity: a 31-year study at its southwestern distribution boundary. *Agric. For. Meteorol.* 353, 110072. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110072>.
- Halbritter, H., Ulrich, S., Grímsson, F., Weber, M., Zetter, R., Hesse, M., Buchner, R., Svojtka, M., Frosch-Radivo, A., 2018. *Illustrated Pollen Terminology*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71365-6>.
- Hirst, J.M., 1952. An automatic volumetric spore trap. *Ann. Appl. Biol.* 39, 257–265. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1952.tb00904.x>.
- Junger, W.L., Ponce de Leon, A., 2015. Imputation of missing data in time series for air pollutants. *Atmos. Environ.* 102, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.049>.
- Kurganskiy, A., Skjoth, C.A., Baklanov, A., Sofiev, M., Saarto, A., Severova, E., Smyshlyayev, S., Kaas, E., 2020. Incorporation of pollen data in source maps is vital for pollen dispersion models. *Atmospheric Chem. Phys.* 20, 2099–2121. <https://doi.org/10.5194/acp-20-2099-2020>.

- Lake, I.R., Jones, N.R., Agnew, M., Goodess, C.M., Giorgi, F., Hamaoui-Laguél, L., Semenov, M.A., Solomon, F., Storkov, J., Vautard, R., Epstein, M.M., 2017. Climate change and future pollen allergy in Europe. *Environ. Health Perspect.* 125, 385–391. <https://doi.org/10.1289/EHP173>.
- Lee, B.U., 2011. Life comes from the air: a short review on bioaerosol control. *Aerosol Air Qual. Res.* 11, 921–927. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.06.0081>.
- Lo, F., Bitz, C.M., Battisti, D.S., Hess, J.J., 2019. Pollen calendars and maps of allergenic pollen in North America. *Aerobiologia* 35, 613–633. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09601-2>.
- López-Orozco, R., García-Mozo, H., Oteros, J., Galán, C., 2023. Long-term trends and influence of climate and land-use changes on pollen profiles of a Mediterranean oak forest. *Sci. Total Environ.* 897, 165400. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165400>.
- Markey, E., Clancy, J.H., Martínez-Bracero, M., Maya-Manzano, J.M., Smith, M., Skjøth, C., Dowding, P., Sarda-Estève, R., Baisnée, D., Donnelly, A., McGillicuddy, E., Sewell, G., O'Connor, D.J., 2022. A comprehensive aerobiological study of the airborne pollen in the Irish environment. *Aerobiologia* 38, 343–366. <https://doi.org/10.1007/s10453-022-09751-w>.
- Matricardi, P.M., Dramburg, S., Alvarez-Perea, A., Antolín-Amérigo, D., Apfelbacher, C., Atanaskovic-Markovic, M., Berger, U., Blais, M.S., Blank, S., Boni, E., Bonini, M., Bousquet, J., Brockow, K., Buters, J., Cardona, V., Caubet, J., Cavkaytar, Ö., Elliott, T., Esteban-Gorjijo, I., Fonseca, J.A., Gardner, J., Gevaert, P., Ghiordanescu, I., Hellings, P., Hoffmann-Sommergruber, K., Fusun Kalpaklioglu, A., Marmouz, F., Mejjide Calderón, A., Mösger, R., Nakonechna, A., Ollert, M., Oteros, J., Pajno, G., Panaitescu, C., Perez-Formigo, D., Pfaar, O., Pitsios, C., Rudenko, M., Ryan, D., Sánchez-García, S., Shih, J., Tripodi, S., Van Der Poel, L., Van Os-Medendorp, H., Varricchi, G., Wittmann, J., Worm, M., Agache, I., 2020. The role of mobile health technologies in the allergy care: an EAACI position paper. *Allergy* 75, 259–272. <https://doi.org/10.1111/all.13953>.
- Maya-Manzano, J.M., Smith, M., Markey, E., Hourihane Clancy, J., Sodeau, J., O'Connor, D.J., 2021. Recent developments in monitoring and modelling airborne pollen, a review. *Grana* 60, 1–19. <https://doi.org/10.1080/00173134.2020.1769176>.
- Maya-Manzano, J.M., Tummon, F., Abt, R., Allan, N., Bunderson, L., Clot, B., Crouzy, B., Daunys, G., Erb, S., Gonzalez-Alonso, M., Graf, E., Grewling, L., Haus, J., Kadantsev, E., Kawashima, S., Martinez-Bracero, M., Matavulj, P., Mills, S., Niederberger, E., Lieberherr, G., Lucas, R.W., O'Connor, D.J., Oteros, J., Palamarchuk, J., Pope, F.D., Rojo, J., Saulienė, I., Schäfer, S., Schmidt-Weber, C.B., Schnitzler, M., Šikoparija, B., Skjøth, C.A., Sofiev, M., Stemmler, T., Triviño, M., Zeder, Y., Buters, J., 2023. Towards European automatic bioaerosol monitoring: comparison of 9 automatic pollen observational instruments with classic Hirst-type traps. *Sci. Total Environ.* 866, 161220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161220>.
- Milic, A., Addison-Smith, B., Jones, P.J., Beggs, P.J., Erbas, B., Davies, J.M., 2019. Quality control of pollen identification and quantification exercise for the AusPollen aerobiology collaboration network: a pilot study. *Aerobiologia*. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09580-4>.
- Milic, A., Addison-Smith, B., Van Haefen, S., Davies, J.M., 2021. Analysis of quality control outcomes of grass pollen identification and enumeration: experience matters. *Aerobiologia*. <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09723-6>.
- Oteros, J., Galán, C., Alcázar, P., Domínguez-Vilches, E., 2013. Quality control in bio-monitoring networks, Spanish aerobiology network. *Sci. Total Environ.* 443, 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.040>.
- Oteros, J., Orlandi, F., García-Mozo, H., Aguilera, F., Dhiab, A.B., Bonofiglio, T., Abichou, M., Ruiz-Valenzuela, L., del Trigo, M.M., de La Guardia, C.D., et al., 2014. Better prediction of Mediterranean olive production using pollen-based models. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 685–694.
- Oteros, J., Buters, J., Laven, G., Röseler, S., Wachter, R., Schmidt-Weber, C., Hofmann, F., 2017. Errors in determining the flow rate of Hirst-type pollen traps. *Aerobiologia* 33, 201–210. <https://doi.org/10.1007/s10453-016-9467-x>.
- Oteros, J., Weber, A., Kutzora, S., Rojo, J., Heinze, S., Herr, C., Gebauer, R., Schmidt-Weber, C.B., Buters, J.T.M., 2020. An operational robotic pollen monitoring network based on automatic image recognition. *Environ. Res.* 191, 110031. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110031>.
- Pauling, A., Rotach, M.W., Gehrig, R., Clot, B., 2012. A method to derive vegetation distribution maps for pollen dispersion models using birch as an example. *Int. J. Biometeorol.* 56, 949–958.
- Pérez-Badía, R., Rapp, A., Morales, C., Sardinero, S., Galán, C., García-Mozo, H., 2010. Pollen spectrum and risk of pollen allergy in Central Spain. *Ann. Agric. Environ. Med.* 17, 139–151. <http://www.aaem.pl/Pollen-spectrum-and-risk-of-pollen-allergy-in-central-spain-71626,0,2.html>.
- Picornell, A., Oteros, J., Ruiz-Mata, R., Recio, M., Trigo, M.M., Martínez-Bracero, M., Lara, B., Serrano-García, A., Galán, C., García-Mozo, H., Alcázar, P., Pérez-Badía, R., Cabezedo, B., Romero-Morte, J., Rojo, J., 2021. Methods for interpolating missing data in aerobiological databases. *Environ. Res.* 200, 111391. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111391>.
- Rodríguez-Arias, R.M., Rojo, J., Fernández-González, F., Pérez-Badía, R., 2023. Desert dust intrusions and their incidence on airborne biological content. Review and case study in the Iberian Peninsula. *Environ. Pollut.* 316, 120464. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120464>.
- Rojo, J., Núñez, A., Lara, B., Sánchez-Parra, B., Moreno, D.A., Pérez-Badía, R., 2019a. Comprehensive analysis of different adhesives in aerobiological sampling using optical microscopy and high-throughput DNA sequencing. *J. Environ. Manage.* 240, 441–450. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.116>.
- Rojo, J., Oteros, J., Pérez-Badía, R., Cervigón, P., Ferencova, Z., Gutiérrez-Bustillo, A.M., Bergmann, K.-C., Oliver, G., Thibaudon, M., Albertini, R., Rodríguez-De la Cruz, D., Sánchez-Reyes, E., Sánchez-Sánchez, J., Pessi, A.-M., Reinharju, J., Saarto, A., Calderón, M.C., Guerrero, C., Berra, D., Bonini, M., Chiodini, E., Fernández-González, D., García, J., Trigo, M.M., Myszkowska, D., Fernández-Rodríguez, S., Tormo-Molina, R., Damialis, A., Kolek, F., Traidl-Hoffmann, C., Severova, E., Caeiro, E., Ribeiro, H., Magyar, D., Makra, L., Udvardy, O., Alcázar, P., Galán, C., Borycka, K., Kasprzyk, I., Newbigin, E., Adams-Groom, B., Apangu, G.P., Frisk, C.A., Skjøth, C.A., Radišić, P., Šikoparija, B., Celenk, S., Schmidt-Weber, C.B., Buters, J., 2019b. Near-ground effect of height on pollen exposure. *Environ. Res.* 174, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.027>.
- Rojo, J., Picornell, A., Oteros, J., 2019c. AeRobiology: the computational tool for biological data in the air. *Methods Ecol. Evol.* 10, 1371–1376. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13203>.
- Šanti-Temkiv, T., Šikoparija, B., Maki, T., Carotenuto, F., Amato, P., Yao, M., Morris, C. E., Schnell, R., Jaenicke, R., Pöhlker, C., DeMott, P.J., Hill, T.C.J., Huffman, J.A., 2020. Bioaerosol field measurements: challenges and perspectives in outdoor studies. *Aerosol Sci. Tech.* 54, 520–546. <https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1676395>.
- Šikoparija, B., Galán, C., Smith, M., EAS QC Working Group, 2017. Pollen-monitoring: between analyst proficiency testing. *Aerobiologia* 33, 191–199. <https://doi.org/10.1007/s10453-016-9461-3>.
- Smith, M., Šikoparija, B., 2021. Interlaboratory proficiency test in aerobiology using virtual slides – feasibility study. *Grana* 60, 132–145. <https://doi.org/10.1080/00173134.2020.1784266>.
- Smith, M., Jäger, S., Berger, U., Šikoparija, B., Hallsdottir, M., Sauliene, I., Bergmann, K.-C., Pashley, C.H., de Weger, L., Majkowska-Wojciechowska, B., Rybníček, O., Thibaudon, M., Gehrig, R., Bonini, M., Yankova, R., Damialis, A., Vokou, D., Gutiérrez Bustillo, A.M., Hoffmann-Sommergruber, K., van Ree, R., 2014. Geographic and temporal variations in pollen exposure across Europe. *Allergy* 69, 913–923. <https://doi.org/10.1111/all.12419>.
- Smith, M., Oteros, J., Schmidt-Weber, C., Buters, J.T.M., 2019. An abbreviated method for the quality control of pollen counters. *Grana* 58, 185–190. <https://doi.org/10.1080/00173134.2019.1570327>.
- Sofiev, M., Ritenberga, O., Albertini, R., Arteta, J., Belmonte, J., Bernstein, G.C., Bonini, M., Celenk, S., Damialis, A., Douros, J., Elbern, H., Friese, E., Galán, C., Oliver, G., Hrga, I., Kouznetsov, R., Krajsek, K., Magyar, D., Parmentier, J., Plu, M., Prank, M., Robertson, L., Steensen, B.M., Thibaudon, M., Segers, A., Stepanovich, B., Valdebenito, A.M., Vira, J., Vokou, D., 2017. Multi-model ensemble simulations of olive pollen distribution in Europe in 2014: current status and outlook. *Atmospheric Chem. Phys.* 17, 12341–12360. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12341-2017>.
- Tasioulis, T., Karatzas, K., Charalampopoulos, A., Damialis, A., Vokou, D., 2022. Five ways to define a pollen season: exploring congruence and disparity in its attributes and their long-term trends. *Aerobiologia*. <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09735-2>.
- The Angiosperm Phylogeny Group, 2016. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Bot. J. Linn. Soc.* 181, 1–20. <https://doi.org/10.1111/bj.12385>.
- Tummon, F., Arboledas, L.A., Bonini, M., Guinot, B., Hicke, M., Jacob, C., Kendrovski, V., McCairns, W., Petermann, E., Peuch, V., Pfaar, O., Sicard, M., Šikoparija, B., Clot, B., 2021. The need for Pan-European automatic pollen and fungal spore monitoring: a stakeholder workshop position paper. *Clin. Transl. Allergy* 11. <https://doi.org/10.1002/ctt2.12015>.
- Tummon, F., Adams-Groom, B., Antunes, C.M., Bruffaerts, N., Buters, J., Cariñanos, P., Celenk, S., Choël, M., Clot, B., Cristofori, A., Crouzy, B., Damialis, A., Fernández, A. R., González, D.F., Galán, C., Gedda, B., Gehrig, R., Gonzalez-Alonso, M., Gottardini, E., Gros-Daillon, J., Hajkova, L., O'Connor, D., Östenson, P., Oteros, J., Pauling, A., Pérez-Badía, R., Rodinkova, V., Rodríguez-Rajo, F.J., Ribeiro, H., Sauliene, I., Šikoparija, B., Skjøth, C.A., Spanu, A., Sofiev, M., Sozinova, O., Srncel, L., Visek, N., De Weger, L.A., 2024. The role of automatic pollen and fungal spore monitoring across major end-user domains. *Aerobiologia*. <https://doi.org/10.1007/s10453-024-09820-2>.
- UNE-EN 16868, 2020. Ambient Air—Sampling And Analysis of Airborne Pollen Grains And Fungal Spores for Networks Related to Allergy—Volumetric Hirst Method.
- Weber, R.W., 1998. Pollen Identification. *Ann. Allergy. Asthma. Immunol.* 80, 141–148. [https://doi.org/10.1016/S1081-1206\(10\)62947-X](https://doi.org/10.1016/S1081-1206(10)62947-X).
- Wronska-Pilarek, D., Danielewicz, W., Bocianowski, J., Maliński, T., Janysek, M., 2016. Comparative pollen morphological analysis and its systematic implications on three European oak (*Quercus* L., Fagaceae) species and their spontaneous hybrids. *PLoS One* 11, e0161762. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161762>.
- Yao, M., 2018. Bioaerosol: a bridge and opportunity for many scientific research fields. *J. Aerosol Sci.* 115, 108–112. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.07.010>.
- Zhang, Y., Steiner, A.L., 2022. Projected climate-driven changes in pollen emission season length and magnitude over the continental United States. *Nat. Commun.* 13, 1234. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28764-0>.



## **5. Capítulo II**

***La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid. Treinta años como sistema de vigilancia e información de polen aerovagante de utilidad en Salud Pública***

***Madrid Region Palynological Network. A 30-year airborne pollen surveillance and information system useful in Public Health***

*Revista de Salud Ambiental 2024*



## La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid. Treinta años como sistema de vigilancia e información de polen aerovagante de utilidad en Salud Pública

### A rede palinológica da Comunidade de Madrid. Trinta anos como sistema de vigilância e información do pólen aerovagante de utilidade em Saúde Pública

#### *Madrid Region Palynological Network. 30-year airborne pollen surveillance and information system useful in Public Health*

Patricia Cervigón Morales<sup>1</sup>, Jesús Rojo Úbeda<sup>1</sup>, Zuzana Ferencova<sup>3</sup>, José M<sup>a</sup> Ordóñez Iriarte<sup>2</sup>, Emiliano Aránguez Ruiz<sup>1</sup>, Adela Montserrat Gutiérrez Bustillo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Farmacología, Farmacognosia y Botánica. Facultad de Farmacia. Universidad Complutense de Madrid. Madrid. España.

<sup>2</sup> DG Salud Pública. Consejería de Sanidad Comunidad de Madrid. Madrid. España.

<sup>3</sup> Jardín Botánico Atlántico de Gijón. Gijón. España.

**Cita:** Cervigón Morales P, Rojo Úbeda J, Ferencova Z, Ordóñez Iriarte JM, Aránguez Ruiz E, Gutiérrez Bustillo AM. Rev Salud ambient. La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid. Treinta años como sistema de vigilancia e información de polen aerovagante de utilidad en Salud Pública. 2024; 24(2):168-177.

**Recibido:** 4 de abril de 2024. **Aceptado:** 2 de octubre de 2024. **Publicado:** 15 de diciembre de 2024.

**Autor para correspondencia:** Patricia Cervigón Morales.  
correo e: patcervi@ucm.es

**Financiación:** Este grupo no ha contado con ningún tipo de financiación para el desarrollo de su trabajo.

**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 al diseño del estudio y la redacción del artículo. Asimismo, todos los autores aprobaron la versión final.

### Resumen

En este trabajo se recogen las principales actividades de difusión de información aerobiológica de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid (red Palinocam), de 1994 a 2022. En 1992, en el Programa Regional de Prevención y Control del Asma, la Comunidad de Madrid incluía en su estrategia la vigilancia y control de la contaminación ambiental, incluyendo partículas de origen biológico. Así se diseñó y puso en marcha la red Palinocam, marzo de 1993, para monitorizar la concentración de polen y esporas con potencial alergénico en el aire. Esta red fue la primera en España promovida desde un programa de Salud Pública y es un ejemplo de colaboración institucional exitosa, involucrando a la Consejería de Sanidad, la Facultad de Farmacia, de la Universidad Complutense de Madrid, varios Ayuntamientos y una estación privada. Actualmente cuenta con once captadores volumétricos tipo Hirst, permitiendo conocer el riesgo de exposición al polen de más de un 80 % de la población madrileña. La difusión de la información aerobiológica ha evolucionado con las tecnologías, desde el fax y contestador automático, hasta la actual difusión, a mayor escala, por medios electrónicos. La página web de la red ([www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen](http://www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen)), principal canal de información es una de las páginas más visitadas durante la primavera, coincidiendo con la época de mayor demanda de información actualizada. El análisis de las muestras y el envío diarios de datos al centro coordinador es uno de los pilares fundamentales del éxito de los sistemas de información de la red Palinocam.

**Palabras clave:** aerobiología; polen; red Palinocam; redes aerobiológicas; salud pública; salud ambiental.

## Resumo

Este trabalho inclui as principais atividades de divulgação de informação aerobiológica da Rede Palinológica da Comunidade de Madrid (rede Palinocam), de 1994 a 2022. Em 1992, o Programa Regional de Prevenção e Controlo da Asma incluiu a Comunidade de Madrid em a sua estratégia de monitorização e controlo da poluição ambiental, incluindo partículas de origem biológica. Assim, a rede Palinocam foi concebida e lançada em Março de 1993, para monitorizar a concentração de pólen e esporos com potencial alergénico no ar. Esta rede foi a primeira em Espanha promovida a partir de um programa de Saúde Pública e é um exemplo de colaboração institucional bem sucedida, envolvendo o Ministério da Saúde, a Faculdade de Farmácia da Universidade Complutense de Madrid, várias Câmaras Municipais e um posto privado. Atualmente dispõe de onze sensores volumétricos do tipo Hirst, que nos permitem conhecer o risco de exposição ao pólen de mais de 80 % da população madrilenha. A difusão da informação aerobiológica evoluiu com as tecnologias, desde o fax e os atendedores de chamadas, até à actual difusão, em maior escala, por meios electrónicos. O site da rede ([www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen](http://www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen)), principal canal de informação, é uma das páginas mais visitadas durante a primavera, coincidindo com o período de maior procura de informação atualizada. A análise das amostras e o envio diário de dados ao centro coordenador é um dos pilares fundamentais do sucesso dos sistemas de informação da rede Palinocam.

**Palavras-chave:** aerobiologia; pólen; Rede Palinocam; redes aerobiológicas; saúde pública; saúde ambiental.

## Abstract

This work includes the main activities for the dissemination of aerobiological information of the Madrid Region Palynological Network of the Community of Madrid (Palinocam network), from 1994 to 2022. In 1992, the Regional Program for the Prevention and Control of Asthma included the Community of Madrid in its strategy for monitoring and controlling environmental pollution, including particles of biological origin. Thus, the Palinocam network was designed and launched in March 1993, to monitor the concentration of pollen and spores with allergenic potential in the air. This network was the first in Spain promoted from a Public Health program and is an example of successful institutional collaboration, involving the Ministry of Health, the Faculty of Pharmacy of the Complutense University of Madrid, several City Councils and a private station. It currently has eleven Hirst-type volumetric spore traps, allowing us to know the risk of exposure to pollen for more than 80 % of the Madrid population. The dissemination of aerobiological information has evolved with technologies, from fax and answering machines, to the current dissemination, on a larger scale, by electronic means. The network's website ([www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen](http://www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen)), the main information channel, is one of the most visited pages during the spring, coinciding with the time of greatest demand for updated information. The analysis of the samples and the daily sending of data to the coordinating center is one of the fundamental pillars of the success of the information systems of the Palinocam network.

**Keywords:** aerobiology; pollen; Palinocam Network; aerobiological networks; public health; environmental health.

## INTRODUCCIÓN

El polen presente en el aire es un importante factor desencadenante de procesos alérgicos y asmáticos entre la población. Por ello, en 1992 se planteó en la Comisión Regional de Prevención y Control del Asma, de la Comunidad de Madrid, la necesidad de crear un dispositivo de vigilancia de los niveles polínicos diarios existentes en el aire a lo largo del año. Para ello, se diseñó y se puso en marcha la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid (red Palinocam) en marzo de 1993. La red Palinocam, que recientemente ha cumplido 30 años, es un ejemplo exitoso de colaboración institucional entre administraciones públicas y la Universidad Complutense de Madrid<sup>1</sup>.

El polen es uno de los desencadenantes exógenos más importantes de procesos alérgicos entre la población. Durante las épocas de floración, la concentración de los

granos de polen provoca serios trastornos a un porcentaje de la población cada vez más amplio. Desde los primeros estudios poblacionales se ha ido evidenciando la importancia creciente de los alérgenos presentes en granos de polen en el aumento de sensibilizaciones, y la asociación de algunos tipos polínicos con efectos severos, como el asma. A pesar de que el tamaño de los granos de polen es aparentemente muy grande como para poder alcanzar con facilidad las vías aéreas intrapulmonares, la relación existente entre las concentraciones de polen y la presencia de síntomas de asma es evidente debido a la liberación de los alérgenos en las vías respiratorias altas o a su transporte libres como consecuencia de la ruptura de los granos de polen<sup>2,3</sup>.

Cerca de un 30 % de la población sufre alergia al polen aerovagante o polinosis, que actualmente es uno de los grandes problemas de Salud Pública<sup>4</sup>. Se estima que las alergias, rinoconjuntivitis y asma afectan al 15-40 % de

la población europea<sup>5</sup>, y el polen de las gramíneas causa síntomas a aproximadamente el 80 % de los alérgicos al polen, como primera causa de alergia a polen<sup>6</sup>. Respecto a tipos polínicos arbóreos, los más alergénicos son abedul (especies del género *Betula*) en el norte, centro y este de Europa, y el olivo (*Olea europaea* L.) y el polen de cupresáceas (especies de la familia *Cupressaceae*) en la región Mediterránea<sup>7</sup>.

En España, el polen se considera el responsable de más del 65 % del asma alérgico, según la encuesta española Alergológica 2015, y se ha incrementado un 50 % desde 2005<sup>8</sup>. El 35 % de los pacientes alérgicos al polen, lo son a polen de las gramíneas, el 30 % al polen de olivo, el 10 % al polen de amarantáceas, el 9 % al polen de cupresáceas, el 8 % al polen de plátano de sombra o plátano de paseo y un 7 % a otros tipos de polen.

En Madrid, se realizó en el año 1993 la primera encuesta de prevalencia del asma en la región<sup>9</sup> en que un 62 % de las personas asmáticas presentaban sensibilidad cutánea a algún tipo de polen y una prevalencia acumulada de 7,3 %. Posteriormente, la encuesta extraída del Sistema de Vigilancia de Factores de Riesgo de Enfermedades No transmisibles para adultos (SIVFRENT-A) proporcionó datos evolutivos sobre asma autopercibido entre 1996 y 2013, constatando el aumento de prevalencia y de la incidencia de crisis asmáticas<sup>10</sup>. En la Comunidad de Madrid el análisis de la sensibilización al polen, mediante pruebas cutáneas, evidenció que el polen de gramíneas es el principal responsable de prevalencias (85,1 % de los casos y 47,6 % de los controles), seguido por el polen de olivo (82,8 % y 49,0 %) y el polen de llantenes (70,0 % y 37,9 %). Las concentraciones máximas de estos tipos polínicos coinciden temporalmente durante los meses de mayo y junio. A continuación, se sitúa el polen de cupresáceas, principal aeroalergeno invernal (65,6 % y 37,8 %), y el polen de plátano de paseo con picos muy intensos de concentración polínica durante el mes de marzo o abril (53,7 % y 26,6 %) <sup>11</sup>.

El control rutinario del polen aerovagante se viene realizando en Europa desde los años 80 por las redes aerobiológicas. Actualmente, la mayoría de las redes funcionan con captadores volumétricos tipo Hirst<sup>12</sup>, y en la Comunidad de Madrid se localizan 11 estaciones de muestreo para dar a conocer el riesgo de exposición al polen en un área donde reside más de un 80 % de la población madrileña<sup>13</sup>. Sin embargo, las administraciones públicas no siempre se hacen cargo de la promoción y mantenimiento de las estaciones aerobiológicas para el muestreo de polen y esporas fúngicas aerovagantes. No es el caso de la red Palinocam, red pública impulsada y financiada desde el gobierno regional, constituyendo una valiosa herramienta de vigilancia y control ambiental de utilidad en salud pública. El objetivo de este trabajo es hacer una revisión de los sistemas de información empleados en la Red Palinológica de la Comunidad de

Madrid y poner en valor las principales actividades de difusión de la información aerobiológica generada por la red durante el periodo 1994–2022.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### 1. CREACIÓN DE UNA RED DE CONTROL AEROBIOLÓGICO SIGUIENDO ESTÁNDARES DE CALIDAD

En el marco del Programa Regional de Control y Prevención del Asma, en el Subprograma de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica, se creó en el año 1993 la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid (red Palinocam). Para estabilizar y garantizar el funcionamiento de la red, se creó un Comité de Expertos mediante la Resolución 19/1994, de 4 de marzo (BOCM de 10 de marzo de 1994), cuya composición se define mediante Resolución de 29 de noviembre de 1994 (BOCM de 7 de diciembre de 1994). Este Comité consta de un Coordinador en la Consejería de Sanidad, un Director Científico-Técnico en la Facultad de Farmacia, de la Universidad Complutense de Madrid y un representante de cada una de las instituciones responsables de cada estación aerobiológica.

La elección del número y situación de las estaciones aerobiológicas que iban a componer la red Palinocam se determinó teniendo en cuenta i) criterios científicos como la distribución de la vegetación, las características fitogeográficas del territorio y la configuración urbana<sup>14</sup>, ii) criterios de salud pública para conocer la exposición al polen de la mayor parte de la población, y iii) criterios de oportunidad, ya que la instalación y mantenimiento de una estación de muestreo tiene algunos requerimientos técnicos y de ubicación ineludibles<sup>15</sup>.

Desde el punto de vista de la salud pública, interesa conocer los niveles polínicos atmosféricos como medida del riesgo de exposición a la que está sometida la población residente, y que procede principalmente de plantas de polinización anemófila. La cantidad de polen presente en el aire en cada momento depende principalmente de la composición, la fenología y la producción polínica de la vegetación local; de características propias de los granos de polen que determinan su capacidad para permanecer suspendidos, y además, de la dinámica atmosférica y de los factores meteorológicos que condicionan el transporte y permanencia del polen en el aire<sup>16</sup>. La red Palinocam, con 11 estaciones de muestreo, tres situadas en el municipio de Madrid (Ciudad Universitaria, Arganzuela y Barrio de Salamanca) y ocho distribuidas por la región, concretamente en Alcalá de Henares, Alcobendas, Aranjuez, Collado Villalba, Coslada, Getafe, Las Rozas y Leganés, cubre un territorio que alberga más del 80 % de la población de la Comunidad de Madrid. Se ha estimado que los datos obtenidos en una estación de muestreo son razonablemente válidos para informar a la

población residente en un área de 30 km alrededor de la misma<sup>17</sup>.

Garantizar la calidad de la información aerobiológica generada por la red para su difusión ha sido un objetivo prioritario desde el inicio, por lo que se han seguido las normas y recomendaciones para las redes aerobiológicas consensuadas por la comunidad científica internacional en cada momento. En 1993 solo se contaba con las normas y recomendaciones metodológicas dadas por la Asociación Internacional de Aerobiología (IAA, por sus siglas en inglés). En 2007 se publicó el *Manual de Calidad y Gestión de la Red Española de Aerobiología* (REA), que siguen todas las estaciones que la integran<sup>15</sup>.

Desde sus inicios la red ha utilizado para el muestreo y análisis la metodología estándar para redes aerobiológicas. Desde 2016, la Red Palinocam cuenta con su propio manual de calidad, documento de uso interno como transposición de las recomendaciones mínimas y protocolo estandarizado en materia aerobiológica y que se revisa periódicamente, la última revisión es de 2021, para adaptarse a la norma internacional. Los requisitos, son los mismos que quedaron recogidos posteriormente en Thibaudon y cols. (2017)<sup>18</sup> y en la norma UNE-EN 16868 (2020)<sup>19</sup> y tenidos en cuenta en el *Manual de Calidad de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid* para incorporar las particularidades propias de la red madrileña durante todas las fases del protocolo de recogida y análisis de la muestra aerobiológica.

## **2. OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN DIARIA. CREACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA BASE DE DATOS AEROBIOLÓGICOS**

Cada estación aerobiológica de la red Palinocam está equipada con un captador volumétrico tipo Hirst, y realiza un muestreo continuo del polen en el aire. El análisis microscópico de las muestras aerobiológicas constituye un proceso fundamental en la obtención de resultados. Cada muestra es analizada al microscopio óptico por un técnico especialista, con conocimientos de morfología polínica, para identificar y contabilizar los granos de polen presentes en la muestra clasificados por diferentes tipos morfológicos correspondientes con diversos grupos taxonómicos de plantas. En cada uno de los puntos de la Red Palinocam los técnicos especialistas que pertenecen a cada estación aerobiológica, son personal propio de cada una de las entidades locales.

La identificación polínica se basa en la morfología de los granos de polen que es específica para determinados grupos de plantas, por ello, como resultado del análisis de una muestra diaria obtenemos una relación de tipos morfológicos de polen (espectro polínico diario) cuantificados mediante el valor medio diario de granos de polen por metro cúbico de aire tras la aplicación de una transformación basada en el caudal de aire

que el muestreador aspira diariamente. Los resultados de los recuentos, por razones metodológicas, son necesariamente del día anterior<sup>20</sup>. Los datos obtenidos en cada estación se remiten al centro coordinador, mediante la aplicación Informática denominada SPOL creada “*ad hoc*” para la consolidación de los datos, el acceso remoto desde los puntos de muestreo.

En SPOL se incluyen los datos diarios de 25 tipos polínicos considerados como principales por su alergenicidad, relevancia e incidencia: *Acer*, *Alnus*, *Amaranthaceae*, *Artemisia*, *Betula*, *Castanea*, *Compositae* (excluyendo el género *Artemisia*), *Corylus*, *Cupressaceae*, *Ericaceae*, *Eucalyptus*, *Fraxinus*, *Ligustrum*, *Moraceae*, *Olea*, *Pinaceae*, *Plantago*, *Platanus*, *Poaceae*, *Populus*, *Quercus*, *Rumex*, *Salix*, *Ulmus* y *Urticaceae*. Cualquier otro tipo polínico identificado y cuantificado, se incluye en SPOL como tipo polínico secundario. En esta base de datos se almacenan, por tanto, los datos diarios de los 25 tipos polínicos mencionados y de todas las estaciones para los años 1994–2022. A partir de estos datos se elabora y procesa la información que se difundirá posteriormente.

## **3. PROCESADO DE INFORMACIÓN Y DIFUSIÓN**

El objetivo último del sistema de información de la red Palinocam es hacer llegar la información elaborada al sistema asistencial, los medios de comunicación y al público, en general. Inicialmente, la recepción y el envío de la información se realizaba de una manera muy personal e individualizada a través del fax, más adelante a través del correo electrónico y desde 2010 mediante la aplicación informática (SPOL) de acceso remoto a través de Internet y del móvil de usuarios suscritos al servicio, lo que ha permitido en los últimos años una difusión automatizada y masiva de la información polínica. En el centro coordinador y gestor, dependiente de la Consejería de Sanidad, es el personal de esta administración el encargado de elaborar toda la información y difusión aerobiológica. El centro coordinador de la red recibe los datos de concentración diaria de polen todos los días desde enero a junio, y semanalmente desde julio a diciembre. La elaboración de la información se realiza de forma diaria de enero a junio, meses en que las concentraciones de polen son más relevantes y la incidencia de asma y alergia es mayor en la Comunidad de Madrid. De julio a diciembre la información se envía y se actualiza con periodicidad semanal.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

A continuación, se presenta una revisión de los distintos tipos de boletines elaborados a partir de los datos recibidos y de los canales de información empleados por la red Palinológica, de la Comunidad de Madrid, para la difusión de información polínica a la población a lo largo de su historia.

## 1. BOLETINES DE INFORMACIÓN

**Boletines de evolución de polen.** Desde 1993, se han elaborado y distribuido los boletines diarios y semanales por diversos medios. Inicialmente, a partir de las hojas de cálculo en que se ejecutaban manualmente los boletines; posteriormente se migró toda la información a una base de datos automatizada, llamada "POLEN", que permitía generar los boletines con una programación en lenguaje SQL de forma semiautomática. En el año 2010 se desarrolló la aplicación informática SPOL que marcó una diferencia sustantiva en la gestión y mantenimiento de la base de datos aerobiológica. Esta aplicación informática, a la cual se migraron las bases de datos de la serie histórica de la red Palinocam, recibe y almacena los datos diarios de polen de cada una de las estaciones de muestreo, y permite la generación automática de los boletines, en cada una de sus modalidades. Además, incorpora un gestor de envío de correo electrónico y de envío de avisos por mensajes cortos. También se integra en esta aplicación el sistema de suscripción a través de Internet de los usuarios demandantes de la información. La configuración de esta aplicación informática para la gestión de las bases de datos de la red se realizó conjuntamente entre la coordinación de la red Palinocam y los servicios informáticos de la Comunidad de Madrid.

## Predicciones de los niveles diarios de polen.

Desde el año 2002, la red Palinocam ha proporcionado las predicciones de los niveles diarios de polen entre los meses de enero a junio, para los tipos polínicos más alergénicos (cupresáceas, plátano de paseo, gramíneas, olivo y llantenes). Para ello ha utilizado un modelo de series temporales basado en el análisis autorregresivo y de media móvil de los datos polínicos de la red (modelos ARIMA), junto con los datos diarios del captador de Ciudad Universitaria (Madrid) y la predicción meteorológica suministrada por la Delegación Territorial en Madrid de AEMET. Los boletines de predicción incluían el valor diario y predicciones para los tres días siguientes. A partir de 2022 se introdujo una actualización y automatización del método predictivo, implementando nuevas metodologías de Inteligencia Artificial (redes neuronales y el modelo *DeepAR*), utilizando variables meteorológicas proporcionadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), además del componente autorregresivo de la serie temporal. Los nuevos boletines de información que implementan los resultados de los modelos de predicción desarrollados mediante Inteligencia Artificial constituyen un nuevo impulso para la mejora paso a paso en los sistemas de información futuros de la red Palinocam para proporcionar información de calidad a un número cada vez creciente de usuarios<sup>21,22</sup>.

Figura 1. Ejemplo de boletín de predicción de niveles de polen la Red Palinocam. Área de Vigilancia de Riesgos Ambientales. DG Salud Pública



## 2. CANALES DE INFORMACIÓN POLÍNICA

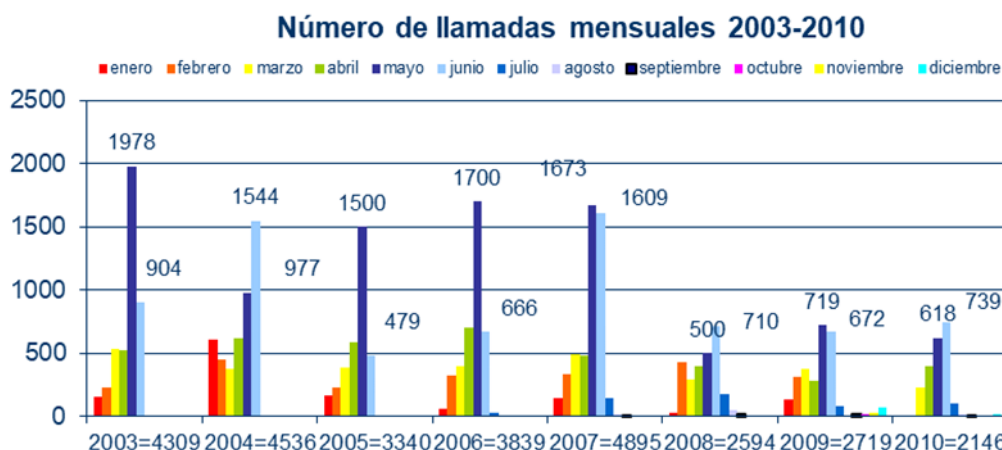
**Fax.** En los inicios de la red Palinocam, desde el año 1993, se utilizaba este medio para el envío de los boletines semanales a todos los centros de atención primaria, hospitales (servicios de alergia, neumología, urgencias y pediatría), medios de comunicación y servicios de salud

pública. Casi 9 000 faxes se enviaban desde los servicios centrales (350 destinatarios asistenciales, envíos diarios desde abril hasta junio). Este sistema se fue quedando obsoleto y fue siendo sustituido progresivamente por el correo electrónico, mucho más ágil y versátil, dando la posibilidad a los usuarios y pacientes individuales de suscribirse mediante este canal.

**Contestador automático.** En el mes de enero de 2003 se puso en funcionamiento un sistema de contestador automático que dejó de utilizarse en 2010. Este sistema ofrecía un servicio de información telefónica diaria de enero a junio, que ofrecía la concentración diaria de los tipos polínicos con mayor presencia atmosférica, los

valores diarios y también las predicciones. Es destacable el pico de llamadas durante los meses de mayo y junio, coincidiendo con el de mayor presencia de polen alérgico en la Comunidad de Madrid. El patrón se repite en los datos mensuales de las visitas a la web de la red Palinocam.

Figura 2. Evolución de llamadas mensuales recibidas. Elaboración a partir de la información de la Red Palinocam. Servicio de Sanidad Ambiental. DG Salud Pública

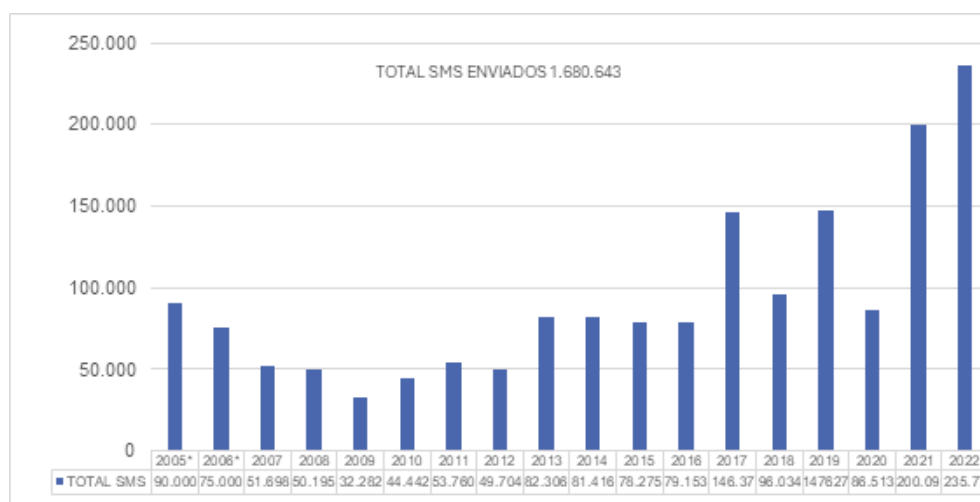


**Mensajes cortos de texto a móvil (SMS).** En el año 2005 se puso en marcha un proyecto piloto en el que se enviaba la información con la media diaria de la red y los avisos de predicción de concentraciones elevadas de polen, mediante mensajes cortos a los teléfonos móviles que previamente se habían dado de alta en el servicio de suscripción. Los dos primeros años se enviaba la predicción de niveles de polen de gramíneas todos los días durante los meses de mayo y junio. A partir de 2007 se enviaban avisos SMS con la predicción de niveles de polen de cupresáceas, plátano de sombra, olivo y gramíneas, únicamente aquellos días en los cuales la predicción de niveles de cada tipo polínico era elevada,

entre los meses de enero a junio. Hasta 2010 se empleó una conexión externa a la plataforma de envío de mensajería corta de Madrid Digital, que se modificó con la integración del servicio de suscripción a través de la página web en 2010 y la nueva aplicación informática SPOL.

Desde su puesta en funcionamiento se han enviado más de 1 680 000 de mensajes de avisos de niveles elevados de polen en el periodo de enero a junio, con un mínimo de 32 282 en la serie en el año 2009 y un máximo de mensajes de avisos en el año 2022 con 235 773, correspondiendo a un aumento creciente de los usuarios suscritos a este servicio.

Figura 3. Evolución del envío total de SMS. Fuente Red Palinocam. Sº Sanidad Ambiental. DG Salud Pública.

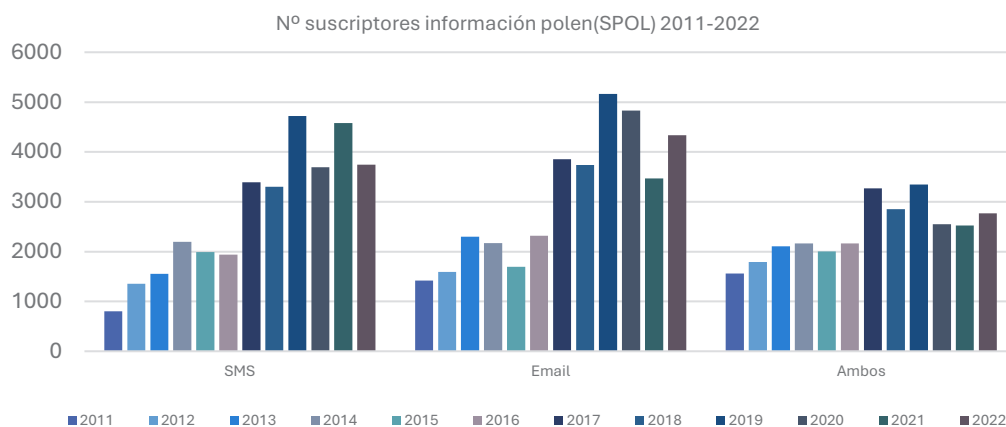


**Página web.** Desde el año 1999, Internet ha sido un importante entorno de difusión de la información de la red Palinocam. En la web de Polen y Salud: [www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen](http://www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen), gestionada por la Dirección General de Salud Pública, de la Comunidad de Madrid, se puede acceder a la información diaria actualizada de enero a junio, y a información semanal durante el resto del año, además del servicio de suscripción para la recepción de información por correo electrónico y mensajes SMS. La automatización de la suscripción por los usuarios se incorpora a la aplicación SPOL en 2010, a través de un módulo en la página web. En este momento finaliza el proceso de migración y programación de esta nueva aplicación que integra la gestión de los datos y la información aerobiológica y la gestión de los suscriptores y los envíos. También en 2010 se inició el trabajo de revisión y actualización de contenidos de la web, que resultó en un nuevo diseño de la página web de la red

Palinocam, que se puso marcha en 2011. Con la nueva imagen de la página web de la Consejería y el Portal Salud, se inició el sistema de suscripción a la información diaria, semanal y a los avisos a través de la propia página web.

En 2015, se realizó una nueva migración de la web a un nuevo gestor de contenido, denominado Drupal, con una nueva estructura de navegación, temática no estructural, en la que se incluían los contenidos estáticos y dinámicos del anterior gestor, Content Server. La actual página web de la red Palinocam se publicó en 2018 en la nueva url, [www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen](http://www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen), siendo un nuevo entorno web adaptativo y en el que la accesibilidad y la usabilidad van incrementándose e incorporándose conforme al desarrollo de las tecnologías.

Figura 4. Evolución suscriptores. Elaboración a partir de los datos de la Red Palinocam. Área de Vigilancia de Riesgos Ambientales en Salud. DG Salud Pública

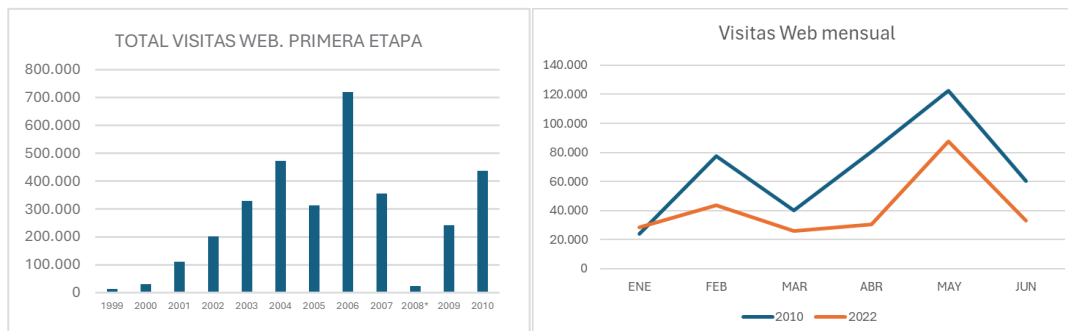


En cuanto a las visitas a la web, y debido a los cambios en los programas de medición hay dos periodos de análisis diferentes; el primero de 1999 a 2010, en que se realizó una primera migración de los contenidos y las plantillas del Portal Salud. El incremento desde las 12 900 visitas iniciales es notable hasta el año 2010 en el que se interrumpe y cambia el sistema de medición (en 2008 no hay estadísticas completas). Se recogen las estadísticas del último año 2022, y aun no siendo comparables directamente, presenta el mismo patrón de vistas primaverales que las recogidas en 2010. Este patrón mensual del número de visitas representa muy claramente el interés de la población alérgica durante los periodos de mayor exposición a polen alérgico en el aire, así como la demanda estacional de la información polínica<sup>23,24</sup>. Los periodos de mayor demanda de información polínica se observan durante los máximos de polinización de las cupresáceas (mes de enero) y los máximos de polinización de gramíneas y olivo (mes de junio)<sup>25</sup>. Es destacable que la información polínica de la

Comunidad de Madrid, y en concreto la página Polen y Salud de la red Palinocam, es la que recibe un mayor número de visitas de usuarios durante los meses de mayo a junio de toda la web de la Comunidad de Madrid<sup>26</sup>, lo que es una importante muestra del interés suscitado por la población hacia este tipo de información.

En el caso de los resultados de las gráficas de difusión y visitas a Internet, las diferencias encontradas pueden corresponder, por un lado, a la distinta incidencia de los tipos polínicos alérgicos en cada año, y por otro lado al aumento del uso generalizado de las consultas en Internet desde distintos dispositivos. El motivo por el cual los datos no han sido comparados en este artículo atiende a los distintos métodos de extracción de estadísticas, y de los cambios en los gestores de contenidos y de los distintos dominios que ha habido en la página de información de la Red Palinocam desde su primera publicación en Internet en 1999.

Figura 5. Evolución visitas web. Elaboración a partir de la información de la Red Palinocam. Servicio de Sanidad Ambiental. DG Salud Pública Comunidad de Madrid

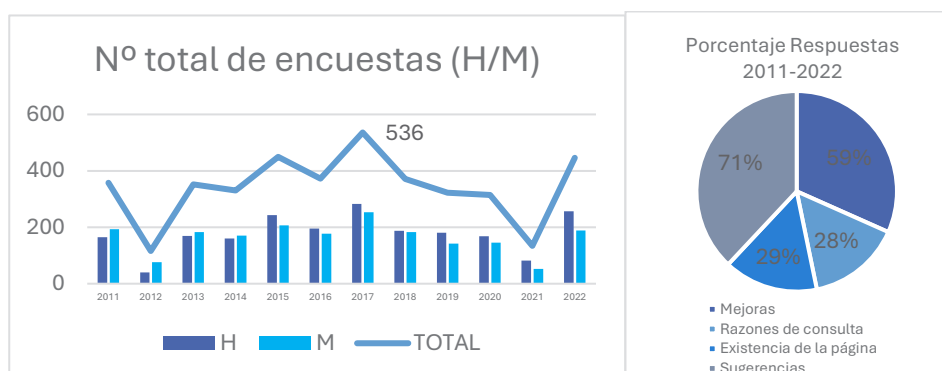
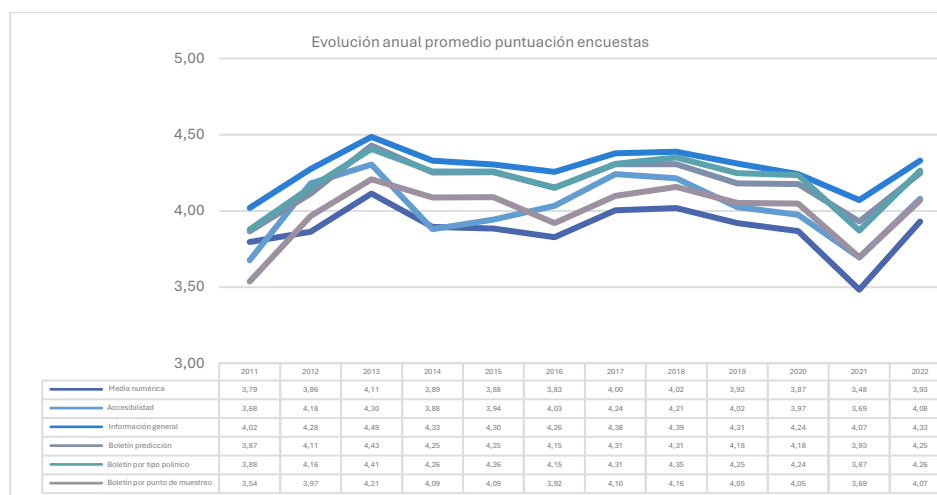


### 3. ENCUESTAS DE SATISFACCIÓN

Un importante aspecto de los sistemas de información son las opiniones y los comentarios que el usuario final de la información devuelve al sistema y que permite la continua mejora y la eficiencia de los servicios proporcionados. El sistema de información de la red Palinocam implementó en la web en 2011 las encuestas

de satisfacción para conocer la opinión de los usuarios sobre la información polínica proporcionada. Se han cumplimentado un total de 14 023 encuestas. El máximo número de encuestas se registró en 2017, con un total de 536 encuestas, el menor número el segundo año de la puesta en marcha del servicio de encuestas en 2012, con 142 encuestas y el año 2021 con 185.

Figura 6. Evolución resultados encuestas. Elaboración a partir de los datos de la Red Palinocam. Área de vigilancia de riesgos ambientales en salud. DG Salud Pública



El resultado medio de la encuesta de satisfacción es 3,9 en una escala de 1-5 para todo el periodo, siendo en 2013 el año con mejor valoración 4,1, y el inferior el año 2021 con 3,5. Las 5 variables cuantitativas en las que se puntúa la utilidad del servicio en una escala de 0 a 5, siendo 0 muy mala y 5 muy buena, valorándose la información aerobiológica de los boletines de evolución y la información que se actualiza diariamente en la web y que se envía por correo electrónico. En los años de estudio entre 2011 y 2022, el 59 % de los usuarios aportaron criterios de mejora y un 71 % de los usuarios cumplieron sugerencias y propuestas. Mientras que las razones de consulta y la existencia de la página web son cumplimentados por una media de 28 y 29 % de los usuarios, respectivamente<sup>25</sup>.

Estos resultados demuestran una implicación muy importante de los usuarios finales de la información polínica que demandan una información de calidad y cada vez más personalizada. El sistema de encuestas a la población alérgica es un método cada vez mejor implantado, además de para mejorar los servicios de información polínica en la población como en el caso de la red Palinocam, para conocer la relación entre la exposición a polen alérgico y la sintomatología de alergia y asma por los usuarios<sup>27,28</sup>.

## CONCLUSIONES

Las redes aerobiológicas son una herramienta útil en salud pública de incuestionable interés para las administraciones sanitarias y la población general, siendo la información acumulada y generada de utilidad en el campo de la salud ambiental, pero también en medio ambiente, en agricultura o desde el punto de vista forestal.

La difusión de la información de la red Palinocam a través de la implementación e integración de distintos recursos informáticos ha supuesto una mejora cuantitativa y cualitativa en la estrategia de divulgación y servicio público desde la fundación de la red. Esta información es de gran utilidad para todo el sistema asistencial, los pacientes y todos los usuarios que solicitan la información.

Durante todas las fases del desarrollo del sistema de información de la red Palinocam, desde el envío de faxes y grabación del contestador automático hasta la difusión activa y masiva al público por correo electrónico, mensajes de texto y la página web, la demanda de información desde los usuarios finales es un buen ejemplo de la fidelización de los pacientes interesados en esta información, lo que revierte en una mejora de sus autocuidados frente a enfermedades respiratorias de origen alérgico.

La información proporcionada al sistema asistencial, sociedades y asociaciones científicas y profesionales se completa con la difusión a través de los medios de comunicación, notas de prensa, audio y teletipos enviados a las agencias de prensa con un carácter más divulgativo para todos los públicos.

Las estadísticas de visitas y navegación en la página web de la red Palinocam, aun sin ser comparables por los cambios técnicos a lo largo de todo el periodo, reflejan un gran número de visitas, especialmente en los meses con mayor exposición al polen alérgico, siendo una de las secciones más visitadas de la página del dominio Comunidad de Madrid.

Las encuestas a los usuarios arrojan un elevado grado de satisfacción con un resultado medio de 3,9 sobre 5, lo que resulta útil para valorar la satisfacción de los usuarios del servicio de salud pública que la red Palinocam ofrece a través de la página web y los servicios de suscripción asociados.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Cervigón Morales, P. Red Palinocam: Vigilancia en Madrid del polen aerovagante. *Rev. Salud ambient.* 2005;5(2):131-6.
2. García-Marcos L, Quirós AB, Hernández GG, Guillén-Grima F, Díaz CG, Ureña IC, et al. Stabilization of asthma prevalence among adolescents and increase among schoolchildren (ISAAC phases I and III) in Spain. *Allergy.* 2004;59(12):1301-7. DOI:10.1111/j.1398-9995.2004.00562.x.
3. Tobías A, Galán I, Banegas JR, Aránguez E. Short term effects of airborne pollen concentrations on asthma epidemic. *Thorax.* 2003;58(8):708-10. DOI:10.1136/thorax.58.8.708.
4. Pawankar R. Allergic diseases and asthma: a global public health concern and a call to action. *World Allergy Organ. J.* 2014;7:12. DOI:10.1186/1939-4551-7-12.
5. European Academy of Allergy and Clinical Immunology. *Advocacy Manifesto. Tackling the Allergy Crisis in Europe - Concerted Policy Action Needed.* Brussels, Belgium. 2015.
6. García-Mozo H. Poaceae pollen as the leading aeroallergen worldwide: A review. *Allergy.* 2017;72:1849-58. DOI:10.1111/all.13210.
7. Zubeldia JM, Baeza ML, Chivato T, Jáuregui I, Senent CJ. *El libro de las enfermedades alérgicas.* Madrid: Fundación BBVA. 2021.
8. Ojeda P, Sastre J, Olaguibel J, Chivato T. *Alergológica 2015: A national survey on allergic diseases in the adult Spanish population.* *J. Investig. Allergol. Clin. Immunol.* 2018;28:151-64. DOI:10.18176/jiaci.0264.
9. Galán I, Martínez M. Encuesta de prevalencia de asma de la Comunidad de Madrid. Documento técnico de salud pública nº 20. Madrid: Consejería de Salud. 1994.
10. Pereira PL, Grande AMG, Gañán LD, Gavín MO. Evolución de la prevalencia de asma y factores sociodemográficos y de salud asociados en población de 18 a 64 años de la comunidad de Madrid (1996-2013). *Rev. Esp. Salud Pública.* 2017;91(1):1-14.

11. Galán I, Prieto A, Rubio M, Herrero T, Cervigón P, Cantero JL, et al. Association between airborne pollen and epidemic asthma in Madrid, Spain: a case-control study. *Thorax*. 2010;65(5):398–402. DOI:10.1136/thx.2009.118992.
12. Buters JTM, Antunes C, Galveias A, Bergmann KC, Thibaudon M, Galan C, et al. Pollen and spore monitoring in the world. *Clin. Translat. Allergy*. 2018;8:1–5. DOI:10.1186/s13601-018-0197-8.
13. Cervigón Morales P. Redes aerobiológicas y su vinculación con las políticas sanitarias: situación actual. *Rev. Salud ambient*. 2015;15(Espec. Congr.):47–8.
14. Galán C, Smith M, Thibaudon M, Frenguelli G, Oteros J, Gehrig R, et al. Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia*. 2014;30:385–95. DOI:10.1007/s10453-014-9335-5.
15. Galán Soldevilla C, Cariñanos González P, Alcázar Teno P, Domínguez Vilches E. Manual de calidad y gestión de la Red Española de Aerobiología. Córdoba: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2007.
16. Cervigón P, Ferencova Z, Rojo J, Gutiérrez M. CO78. Espectro polínico de Ciudad Universitaria (ciudad de Madrid) durante el periodo 1994–2019, p.206. En: Libro de Actas del Primer Congreso Español de Botánica. Toledo: Ed. Sociedad Botánica Española (SEBOT). 2021.
17. Katelaris CH, Burke TV, Byth K. Spatial variability in the pollen count in Sydney, Australia: can one sampling site accurately reflect the pollen count for a region? *Ann. Allergy Asthma Immunol*. 2004;93(2):131–6. DOI: 10.1016/S1081-1206(10)61464-0.
18. UNE-EN 16868. Ambient air. Sampling and analysis of airborne pollen grains and fungal spores for networks related to allergy. Volumetric Hirst Method. UNE. 2020.
19. Thibaudon, M., Monnier, S., Galán, C., Bonini, M., Röseler, S. & Fernández González, D.-2017-Normalización del método volumétrico tipo Hirst para redes aerobiológicas CEN/C264/WG39. *Revista de Salud Ambiental* 17: 40-43. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/862/823>.
20. UNE-EN 16868. Ambient air. Sampling and analysis of airborne pollen grains and fungal spores for networks related to allergy. Volumetric Hirst Method. UNE. 2020.
21. Geller-Bernstein C, Portnoy JM. The clinical utility of pollen counts. *Clinic. Rev. Allerg. Immunol*. 2019;57:340–9. DOI:10.1007/s12016-018-8698-8.
22. Bastl K, Berger M, Bergmann KC, Kmenta M, Berger U. The medical and scientific responsibility of pollen information services. *Wien Klin. Wochenschr*. 2017;129:70–4. DOI:10.1007/s00508-016-1097-3.
23. Matricardi PM, Dramburg S, Alvarez-Perea A, Antolín-Américo D, Apfelbacher C, Atanaskovic-Markovic M, et al. The role of mobile health technologies in allergy care: an EAACI position paper. *Allergy*. 2019;75(2):259–72. DOI:10.1111/all.13953.
24. Sitaru S, Tizek L, Buters J, Ekeboom A, Wallin JE, Zink A. Assessing the national burden of allergic asthma by web-search data, pollen counts, and drug prescriptions in Germany and Sweden. *World Allergy Organ. J*. 2023;16:100752. DOI:10.1016/j.waojou.2023.100752.
25. Silver JD, Spriggs K, Haberle SG, Katelaris CH, Newbigin EJ, Lampugnani ER. Using crowd-sourced allergic rhinitis symptom data to improve grass pollen forecasts and predict individual symptoms. *Sci. Total Environ*. 2020;720:137351. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.137351.
26. Rojo J, Cervigón P, Ferencova Z, Cascón Á, Galán Díaz J, Romero-Morte J, et al. Assessment of environmental risk areas based on airborne pollen patterns as a response to land use and land cover distribution. *Environ. Pollut*. 2024; 344:123385. DOI:10.1016/j.envpol.2024.123385.
27. Cervigón Morales P, Bardón Iglesias R, Cámara Díez E, Fúster Lorán F, Ribes Ripoll MA, Vilas Herranz F. Actualización digital de la Red Palinocam: [www.comunidad.madrid](http://www.comunidad.madrid). *Rev. Salud ambient*. 2019;19(Espec. Congr.):364.
28. Matricardi PM, Hoffmann T, Dramburg S. The “allergic nose as a pollen detector” concept: e-Diaries to predict pollen trends. *Pediatr. Allergy Immunol*. 2023;34:e13966. DOI:10.1111/pai.13966.
29. Medek DE, Simunovic M, Erbas B, Katelaris CH, Lampugnani ER, Huete A, et al. Enabling self-management of pollen allergies: a pre-season questionnaire evaluating the perceived benefit of providing local pollen information. *Aerobiologia*. 2019;35:777–82. DOI:10.1007/s10453-019-09602-1.

## **6. Capítulo III**

**Detección de cambios a largo plazo en la calidad biológica del aire de la Comunidad de Madrid mediante calendarios polínicos**

***Progressive pollen calendars to detect long term changes in the biological air quality of cities in Madrid Region, Spain***

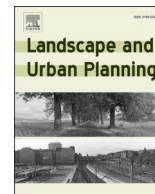
*Landscape and Urban Planning 2024*





Contents lists available at ScienceDirect

## Landscape and Urban Planning

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/landurbplan](http://www.elsevier.com/locate/landurbplan)

## Progressive pollen calendar to detect long-term changes in the biological air quality of cities in the Madrid Region, Spain

Patricia Cervigón<sup>a,1</sup>, Zuzana Ferencova<sup>b,2</sup>, Ángel Cascón<sup>a,3</sup>, Jorge Romero-Morte<sup>a,4</sup>,  
 Javier Galán Díaz<sup>c,a,5</sup>, Silvia Sabariego<sup>d,6</sup>, Margarita Torres<sup>a,7</sup>, Adela Montserrat Gutiérrez-  
 Bustillo<sup>a,8</sup>, Jesús Rojo<sup>a,9,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Pharmacology, Pharmacognosy and Botany, Faculty of Pharmacy, Complutense University of Madrid, Madrid, Spain

<sup>b</sup> Atlantic Botanical Garden of Gijón, Gijón, Spain

<sup>c</sup> Department of Plant Biology and Ecology, Faculty of Biology, University of Sevilla, Sevilla, Spain

<sup>d</sup> Department of Biodiversity, Ecology and Evolution, University Complutense of Madrid, Madrid, Spain

### HIGHLIGHTS

- Madrid Region has registered a marked shift in urban pollen exposure (phenology and incidence)
- Airborne pollen from tree species, most of them allergenic, has increased in recent decades in cities.
- The environmental information provided by monitoring networks must be as updated as possible.
- A technical proposal to the aerobiological networks is presented to improve public health information.
- The current pollen calendar of Madrid is released as reference aerobiological information.

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Aerobiology  
 Madrid  
 Pollen calendar  
 Public health  
 Environmental information

### ABSTRACT

Rhinoconjunctivitis and allergic asthma are among the most frequent diseases in the world, and pollen is their main cause. The incidence of respiratory allergic diseases is expected to grow in the coming years as a consequence of ambient pollution, changes in land use and land cover in cities, and climate change. In this context of global change, the environmental information provided by monitoring and warning networks must be as updated as possible in order to be useful to the end users in the cities. The Madrid Autonomous Region (central Spain) has suffered a noticeable change in its land-use configuration in recent decades and a significant upward temperature trend throughout the entire area. We found that the aerobiological stations in the Madrid Region Palynological Network, covering the most populated cities of this region in central Spain, registered a marked shift towards a greater airborne pollen load of the most abundant tree pollen taxa (Cupressaceae, *Platanus* and *Quercus*, but also Pinaceae, *Olea* and others). These temporal changes are very evident in the pollen calendar for two periods, 1994–2004 (past) and 2012–2022 (present), pointing to changes in the phenology and intensity of the airborne pollen dynamic in cities in the Madrid Region. Based on these findings, we present a technical proposal to the Madrid Region Palynological Network to generate pollen calendars for each city using the reference period of the last ten years, and to update this information every three years. Finally, we propose the latest pollen calendar for

\* Corresponding author.

E-mail address: [jesrojo@ucm.es](mailto:jesrojo@ucm.es) (J. Rojo).

<sup>1</sup> Patricia Cervigón (ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7774-5906>).

<sup>2</sup> Zuzana Ferencova (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-0916>).

<sup>3</sup> Ángel Cascón (ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6606-1550>).

<sup>4</sup> Jorge Romero-Morte (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2108-578X>).

<sup>5</sup> Javier Galán Díaz (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3284-3059>).

<sup>6</sup> Silvia Sabariego (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3880-025X>).

<sup>7</sup> Margarita Torres (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0906-5241>).

<sup>8</sup> Adela Montserrat Gutiérrez-Bustillo (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6782-0527>).

<sup>9</sup> [jesrojo@ucm.es](mailto:jesrojo@ucm.es) (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3627-130X>).

<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105053>

Received 23 September 2023; Received in revised form 19 January 2024; Accepted 9 March 2024

Available online 16 March 2024

0169-2046/© 2024 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

all the aerobiological stations in the Madrid Region Palynological Network for the last ten years (2013–2022), which is considered the reference aerobiological information at present for one of the most populated metropolitan areas in Europe.

## 1. Introduction

Pollen is the most important source of aeroallergens worldwide, and allergic respiratory diseases are considered one of the foremost public health issues (Pawankar et al., 2013). Allergic diseases such as rhinoconjunctivitis and asthma are among the most frequent in the world, and are estimated to affect between 15 and 40 % of the European population (Zubeldia et al., 2021), an incidence that is expected to rise in the coming years (European Academy of Allergy and Clinical Immunology, 2015). In Spain, pollen is responsible for 65.6 % of cases of allergic asthma, and this rate has increased by up to 50 % since 2005, according to the Spanish report *Alergológica 2015* (Ojeda et al., 2018). Owing to the ubiquitous nature of pollen grains in the air, preventive measures and avoiding exposure to the aeroallergen are the best ways to substantially reduce allergy symptoms (Strzelczyk et al., 2020). The air quality monitoring networks for biological agents (such as pollen and spores) are important information systems for alerting the sensitised population to the most important public health risks (Gutiérrez-Bustillo et al., 2015; Suanno et al., 2021).

Biological air quality monitoring networks are therefore crucial in cities, as 72 % of the European population live in urban areas where anthropogenic impacts such as changes in land use and cover or air pollution directly affect air quality and public health (Khomenko et al., 2021). Other components of global change such as climate change represent important stressors that drive variations in biodiversity (García et al., 2014), and are also related to the changing airborne pollen spectrum in cities (López-Orozco et al., 2023).

In this work we focus on pollen calendars as a key resource to provide essential environmental information for urban managers and planners, doctors, policy-makers and other end users for multiple purposes (urban planning, public health, ecology, agriculture, etc.) (Tummon et al., 2021). Pollen calendars summarise historical aerobiological information and allow the comprehensive interpretation of the seasonal dynamic of bioaerosols in the atmosphere throughout the year, considering two main factors: phenology and the intensity of the occurrence of the most abundant taxa in the air (Calderón-Ezquerro et al., 2018; Haberle et al., 2014), including fungal spores (Abbas et al., 2012; Sánchez-Reyes et al., 2016). Crucially, because of the changing context of global change, the environmental information provided by these monitoring and warning networks must be as updated as possible in order to be useful (Werchan et al., 2018).

Previous calendars have focused on pollen type (Lo et al., 2019), and have tended to be grouped by pollen station for an easy comparison of the stations within a region (Elvira-Rendueles et al., 2019; Martínez-Bracero et al., 2015; Pecero-Casimiro et al., 2020). The pollen calendar has been graphically represented in very diverse formats, from the original weekly pollen calendar based on the design of Speksma (1991) using the exponential classes proposed by Stix & Ferretti (1974), the calendar showing relative pollen intensity proposed by O'Rourke (1990), the calendar based on probability distribution models of the pollen curve (Shin et al., 2020), the monthly pollen calendar proposed by Haberle et al. (2014), the calendar based on the phenological definition of the pollen season (Werchan et al., 2018) and the calendar based on quantiles (Gehrig et al., 2018). The definition of classes of pollen load and risk in pollen calendars follows different approaches. Previous calendars have used exponential categorisation or a clinical definition of thresholds to show different pollen risk levels (Gehrig et al., 2018; Ravindra et al., 2021), or simply the phenological timing of the pollen season (Adams-Groom et al., 2020; Camacho et al., 2020).

In this study we generated the pollen calendars for the aerobiological

stations in the Madrid Region Palynological Network. This air quality monitoring network has a very long historical pollen time series (1994–2022) and spatially covers the most populated cities in the Madrid Autonomous Region in central Spain and the area where 80 % of the region's population resides. We used a completely quantile approach to create the pollen calendar and define the necessary thresholds to classify the pollen risk levels. Quantile analysis has been successfully implemented to categorise the risk level in epidemiological, aerobiological and environmental risk studies (Cariñanos et al., 2022; De Bodas Terassi et al., 2022; Wei et al., 2019). However, due to the changing aerobiological patterns observed in cities, an exhaustive discussion is required to establish the optimal periodicity to update all this information. The most powerful tools should also be used to design an operational proposal to transfer the findings of the research to the managers of the aerobiological networks.

The main aims of this study were, i) to determine the key changes observed in the pollen load registered by the aerobiological monitoring of the Madrid Region Palynological Network for the period 1994–2022; ii) to characterise the pollen spectrum of the aerobiological stations in the Madrid Autonomous Region in current conditions using pollen calendars as a useful tool to disseminate aerobiological information; and iii) to discuss the need to update the information on the seasonal bioaerosol content of the atmosphere provided to the end users in cities.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Study area

The study was carried out in the Madrid Autonomous Region (henceforth Madrid), located in the central Iberian Peninsula. It includes Spain's biggest city and capital (Fig. 1). It is the most populated area in Spain and one of the largest European metropolitan areas by population (6,751,251 people registered in 2021 according to the Spanish National Institute of Statistics). Although Madrid's main urban patch is located at an elevation of between 532 and 775 m a.s.l. (Galán Díaz et al., 2023), the Madrid Region, with an area of 8,028 km<sup>2</sup>, covers a wide range of altitudes, from 476 m a.s.l. in the southwest of the region to 2,428 m a.s.l. in the Peñalara massif in the north (Guadarrama mountain range).

The climate in the city of Madrid in the centre of the study area is characterised by a mean average temperature of 15.0 °C (mean monthly temperatures ranging from 6.3 to 7.9 °C in winter to 22.2–25.6 °C in summer), and an annual precipitation of 421 mm (mean monthly rainfall from 33 to 51 mm in winter to 10–21 mm in summer) (Agencia Estatal de Meteorología, 2017).

The aerobiological data for the study area were provided by the Madrid Region Palynological Network (henceforth Palinocam Network) (Directorate-General for Public Health of the Madrid Autonomous Region, 2024). This network includes ten public aerobiological stations that have continuously monitored the biological air quality in Madrid since 1994, covering the most urbanised area where 80 % of the region's population resides (Table 1, Fig. 1). The network is coordinated by the Directorate-General for Public Health of the Madrid Autonomous Region, and the scientific and technical supervision is carried out by the Faculty of Pharmacy of Complutense University of Madrid (Cervigón Morales, 2005).

### 2.2. Climate trends and evolution of land uses

We analysed changes in annual mean temperature and annual precipitation in the entire area of the Madrid Region using the historical

climate data from CRU-TS 4.06 (Harris et al., 2020) downscaled with WorldClim 2.1 (Fick & Hijmans, 2017). We used linear regressions to obtain the regression coefficients of these two variables throughout the period 1994–2021 (according to the availability of data).

The changes in land use and vegetation configuration in a 10 km radius around the location of each Madrid Region Palynological Network station were also assessed for the years 2000, 2006, 2012 and 2018 using the Corine Land Cover product (Copernicus Land Monitoring Service, 2023). The Corine Land Cover categories were reclassified in nine main units to better interpret the changes between the different versions of the land-use map: broad-leaved forests, coniferous forests, mixed forests, scrubs and grasslands, agro-forestry areas, agricultural fields, water surfaces, urban areas and urban green areas.

### 2.3. Aerobiological monitoring routine

Pollen monitoring was performed using a Hirst-type volumetric pollen trap located on the roof of various public buildings (Hirst, 1952) (Table 1). The location of the samplers and the sampling method followed the management guidelines of the Palinocam Network, in line with the standardised methodology proposed by the Spanish Aerobiology Network, international aerobiological societies (Galán et al., 2007, 2014), and the international standard (UNE-EN 16868, 2020). The volumetric pollen trap ran continuously for the period 1994–2022 with a flow rate of 10 l/min, and the pollen grains were collected on a vaseline-coated Melinex® film strip. Daily samples were mounted using a fuchsin-stained glycerin medium, and the pollen grains were identified and quantified under light microscopy (400 × magnification). Pollen data were expressed as the number of pollen grains per cubic metre (pollen grains/m<sup>3</sup>). For several analyses, the Annual Pollen Integral (API) was calculated as the sum of the average daily concentration throughout the year (Galán et al., 2017). Seventy-six pollen taxa were identified in the complete database. Abbreviations of the most abundant pollen taxa: ACER: *Acer*; AMAR: Amaranthaceae (before Amaranthaceae-Chenopodiaceae families); CUPR: Cupressaceae (including Taxaceae); FRAX: *Fraxinus*, MORA: Moraceae; OLEA: *Olea*; PINA: Pinaceae; PLAN: *Plantago*; PLAT: *Platanus*; POAC: Poaceae; POPU: *Populus*; QUER: *Quercus*; RUME: *Rumex*; ULMU: *Ulmus*; URTI: *Urtica*-ae. Also, unidentified pollen grains were considered (PNI).

Continuous monitoring is not exempt from mechanical or human

**Table 1**

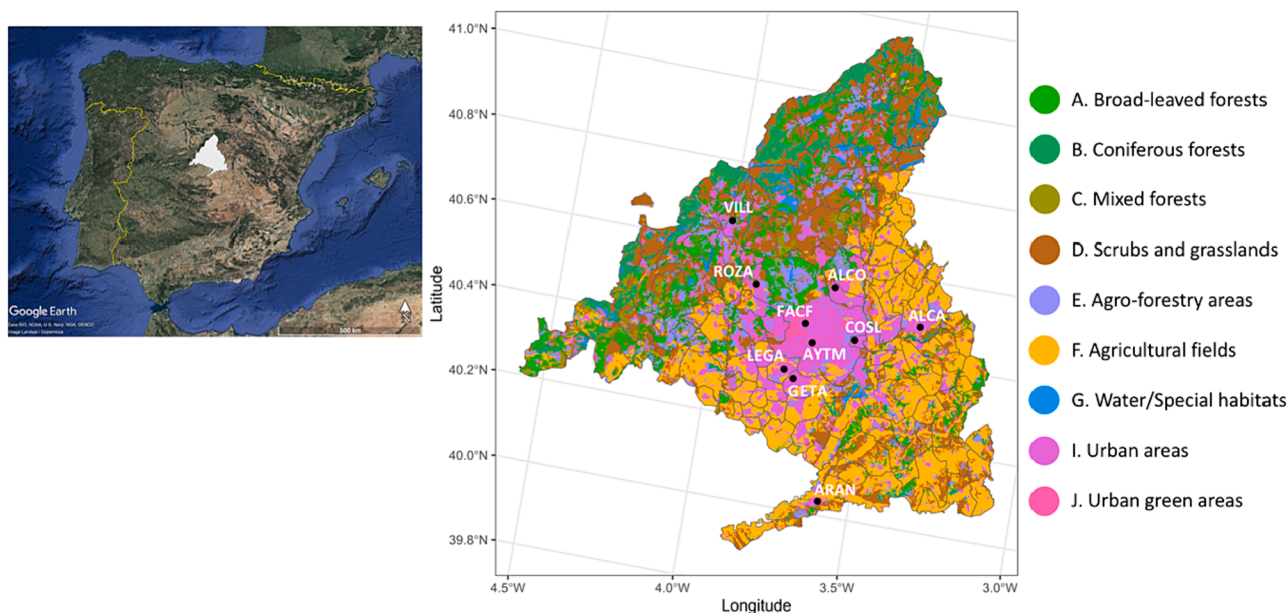
Public aerobiological stations in the Madrid Region Palynological Network. Source: Madrid Region OpenData Catalogue (<https://datos.comunidad.madrid/>).

Code	City	Lat (epsg 4258)	Long (epsg 4258)	Elevation (m a.s.l.)
ALCA	Alcalá de Henares	40.480415	-3.370529	588
ALCO	Alcobendas	40.542595	-3.652715	637
ARAN	Aranjuez	40.031765	-3.598762	503
AYTM	Madrid/Arganzuela	40.402487	-3.695461	600
COSL	Coslada	40.426248	-3.565569	620
FACF	Madrid/University	40.445393	-3.726293	637
GETA	Getafe	40.310180	-3.733128	531
LEGA	Leganés	40.328373	-3.765614	668
ROZA	Las Rozas	40.523734	-3.889936	740
VILL	Collado Villalba	40.654306	-4.001604	887

failure, which can cause gaps in the time series data (Picornell et al., 2021). The vast amount of pollen data was checked and filtered using the quality control framework implemented in the ‘AeRobiology’ R package, which includes the most common tasks and algorithms for managing aerobiological databases (Rojo et al., 2019). This methodology detects very incomplete years by applying different filters based on the lack of data within the pollen season. We manually removed very incomplete years (in terms of missing data within the pollen seasons) from the original pollen database before the analysis to reduce their impact on the results (Fig. S1, Supplementary Material).

### 2.4. Pollen calendar design

A pollen calendar can represent the dynamic of the most abundant pollen taxa in the atmosphere of a specific place in different ways (Rojo et al., 2019). In this work we calculated daily pollen concentration quantiles for each day of the year in a moving time window over the pollen time series following the approach used by Gehrig et al. (2018). We used the same parameters as Gehrig et al. (2018), i.e. the 90 % quantile and a moving nine-day time window. A detailed explanation of the calculation method can be consulted in Gehrig et al. (2018). We highlight two important advantages to calculating the pollen calendar with this methodology: i) unlike a simple daily average, quantile analysis identifies the highest pollen levels and omits highly deviated data;



**Fig. 1.** Location of the aerobiological stations in the Madrid Autonomous Region (Spain) and land-use map. © European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2023, European Environment Agency (EEA). Station abbreviations are available in Table 1.

and ii) the moving time window smooths the results and reduces the influence of outliers which leads to a more robust and coherent interpretation throughout the year. The reference period for the most updated pollen calendar was the last ten years of the study period (2013–2022). However, other periods were analysed to compare the change in the biological air quality in certain aerobiological stations, namely the first (1994–2004) and last (2012–2022) decade of sampling by the aerobiological network.

2.5. Thresholds for pollen risk classification

The pollen concentrations (continuous variable) were converted into

categorical pollen levels, and then into a sequence of colours that are easy to interpret by the general public. The categorical pollen levels were defined based on thresholds derived from a quantile analysis of data from all the stations in the Palinocam Network for each pollen type, so these thresholds are common to the entire regional network. The classification was based on the 80, 90, 92.5, 95, 97.5, 99, 99.5 % quantiles (including those quantiles used by Carriñanos et al. (2022)). These quantiles are used to define thresholds (expressed as the number of pollen grains per cubic metre, pollen grains/m<sup>3</sup>) with which to categorise pollen risk. Each category is defined by the lower quantile, e. g. the number of days belonging to quantile 80 (q80) corresponds to the number of days between quantiles 80 and 90, and so on. This method of

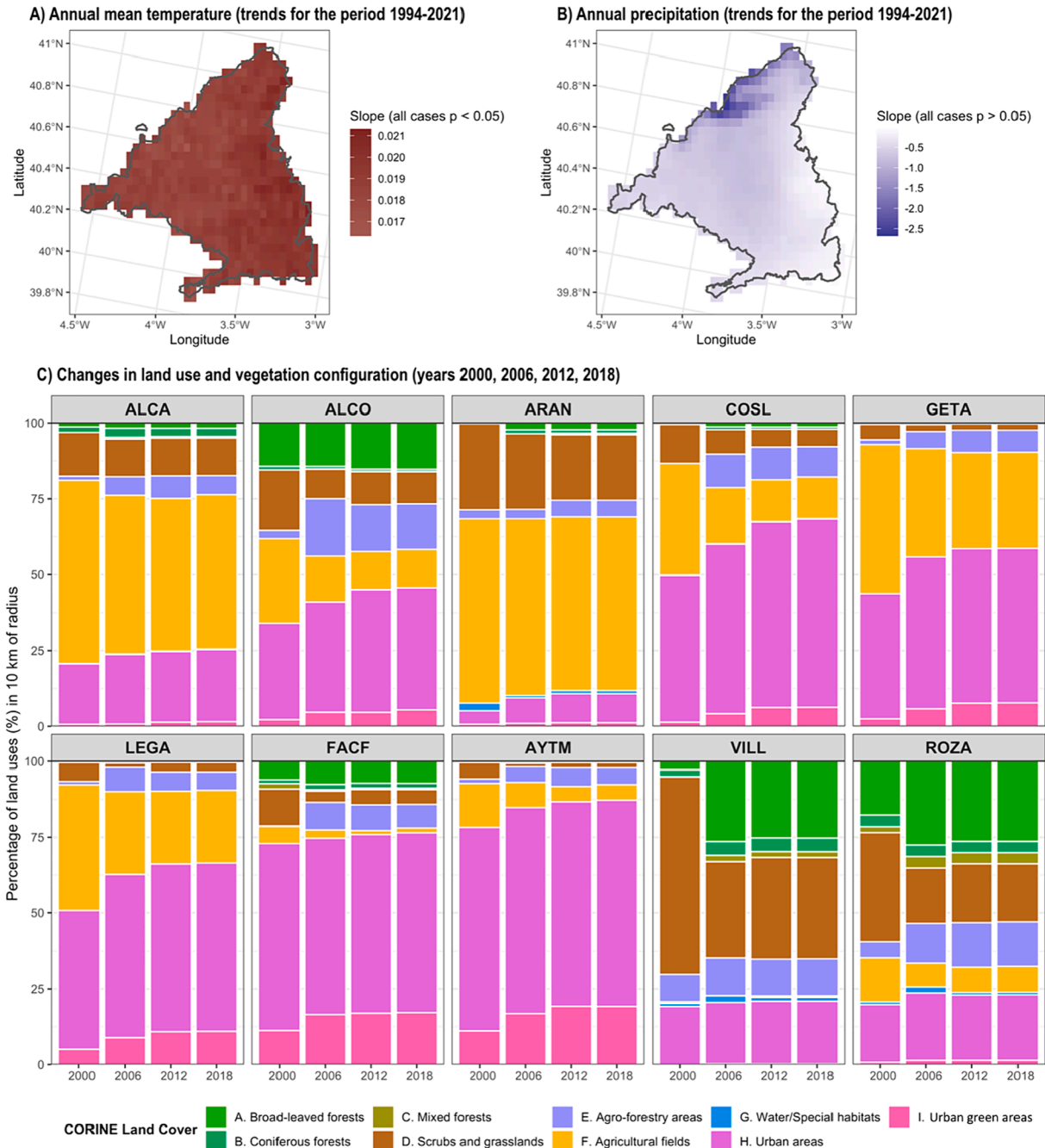


Fig. 2. Climate trends for the period 1994–2021 in the Madrid Region for annual mean temperature (A) and annual precipitation (B). Changes in land use and vegetation configuration around the stations in the Madrid Region Palynological Network for the years 2000, 2006, 2012 and 2018. For each station and year, we quantified the percentage of land use and vegetation type in a 10 km radius around the sampling stations (C). © European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2023, European Environment Agency (EEA). Station abbreviations are available in Table 1.

pollen risk classification maintains objective aerobiological criteria and makes pollen levels comparable across the pollen stations in Madrid and between different reference periods. The public information system of allergy risk in the Palinocam Network follows this methodology using a summarised system of three levels (low, medium and high) of pollen risk (Directorate-General for Public Health of the Madrid Autonomous

Region, 2024).

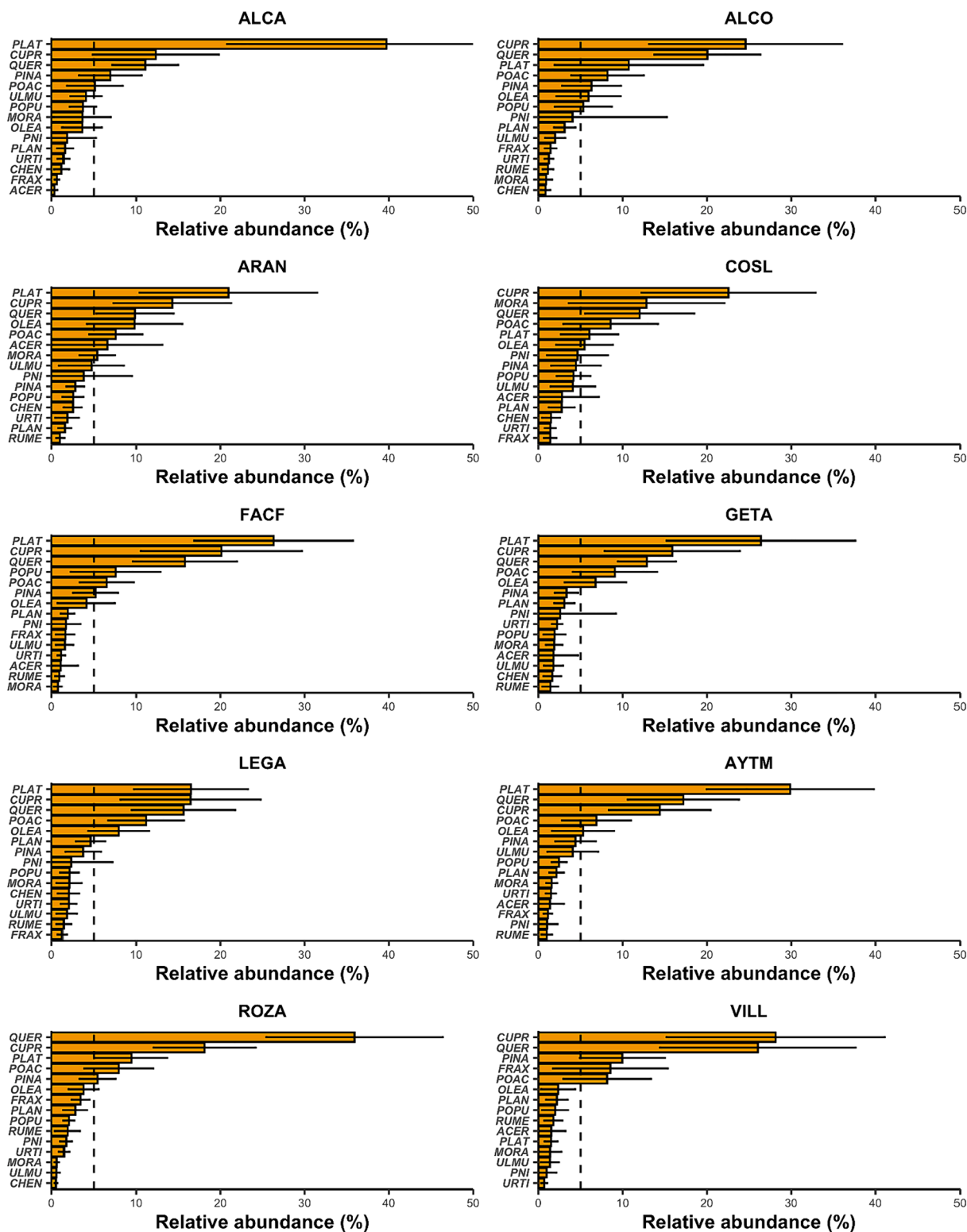


Fig. 3. Relative abundance of the 15 most abundant pollen taxa during the period 1994–2022. Dashed vertical line represents 5% abundance. Pollen type abbreviations are available in section 2.3, and station abbreviations are available in Table 1.

### 3. Results

#### 3.1. Climate trends and evolution of land uses

Madrid experienced a generalised increase in its annual mean temperature during the study period (1994–2022), which was more intense in the east and southeast (Fig. 2A). The annual precipitation showed a decreasing trend in the entire region, albeit in this case non-significant (Fig. 2B). The land-use configuration and vegetation distribution have also changed over time around the sampling stations in the PalinoCam Network (Fig. 2C). In general, the surface covered by urban areas has increased, mainly in the most urbanised stations (e.g. ALCO, COSL, GETA, LEGA, FACF, AYTM), although there has also been a rise in urban green areas (Fig. 2C). The agroforestry surface has expanded due to the reduction of agricultural land, which can be seen mainly in the most agricultural environments (e.g. ARAN, ALCA). A certain recovery can be observed in the surface covered by forests (mainly broad-leaved forests, but also coniferous and mixed forests). This is perceptible in the most natural environments (e.g. VILL, ROZA) but is generally evident in most of the areas around the stations (Fig. 2C).

#### 3.2. Pollen dynamics

In total, 76 pollen taxa were identified. However, the 15 most abundant pollen taxa represent around 90 % of the total pollen abundance observed in the air: from 88.8 % in Leganés station (LEGA) to 95.5 % in Alcalá de Henares station (ALCA) (Fig. 3). *Platanus* (PLAT) and Cupressaceae (CUPR) were the most abundant pollen types in the pollen spectrum of most of the stations, followed by *Quercus* (QUER), Pinaceae (PINA), Poaceae (POAC), Moraceae (MORA) and *Olea* (OLEA). *Quercus* (QUER) pollen was important in Collado Villalba (VILL) and was the most abundant pollen type in Las Rozas (ROZA). Compared to the other stations, *Fraxinus* (FRAX) pollen was abundant in VILL and ROZA

(Fig. 3).

On average, around five to seven pollen taxa per station exceeded the percentage of 5 % of relative abundance during the period 1994–2022 (Fig. 3). The pollen taxa exceeding the relative abundance level of 5 % in any sampling stations were *Acer* (ACER), Cupressaceae (CUPR), *Fraxinus* (FRAX), Moraceae (MORA), *Olea* (OLEA), Pinaceae (PINA), *Platanus* (PLAT), Poaceae (POAC), *Populus* (POPU) and *Quercus* (QUER) (Fig. 3). However, these taxa are not the same in all sampling stations, and the order of abundance strongly depended on the land-use configuration and vegetation distribution around the stations (Fig. 2). For example, in GETA the pollen types exceeding 5 % of relative abundance were in decreasing order PLAT, CUPR, QUER, POAC and OLEA; whereas in VILL the pollen types exceeding this level were CUPR, QUER, PINA, FRAX and POAC. The ten most abundant pollen taxa indicated above are shown in Fig. 4 to characterise the monthly abundance of pollen in the sampling stations in Madrid Region. The highest pollen concentrations were collected from January to June, with March, April and May showing the maximum monthly abundance, depending on the sampling stations and the predominant pollen taxa. August–November was the period with the lowest pollen concentrations, coinciding with the typical seasonal pattern of the pollen spectrum (Fig. 4).

Temporal changes were observed in the annual pollen integrals for the most abundant pollen taxa. In general, a marked increase in pollen amounts were observed, e.g. Aranjuez (ARAN), Madrid/University (FACF), Getafe (GETA) and Collado Villalba (VILL) stations (Fig. 5). The pollen taxa showing the greatest increase were *Platanus* (PLAT) in FACF and GETA, Cupressaceae (CUPR) in FACF and VILL, and *Quercus* (QUER) in FACF and VILL. Other taxa evidencing a sharp rise included *Acer* (ACER) and *Olea* (OLEA) in ARAN and *Fraxinus* (FRAX) in VILL (Fig. 5).

Significant changes in annual pollen amounts were registered between the past (1994–2004) and the present (2012–2022) for the most abundant tree pollen taxa in the pollen spectrum (Cupressaceae CUPR, *Platanus* PLAT and *Quercus* QUER) (Fig. 6). Other tree pollen taxa also



Fig. 4. Monthly average abundance of the main pollen taxa (>5% of the relative abundance in any sampling station) during the period 1994–2022. Pollen type abbreviations are available in section 2.3, and station abbreviations are available in Table 1.

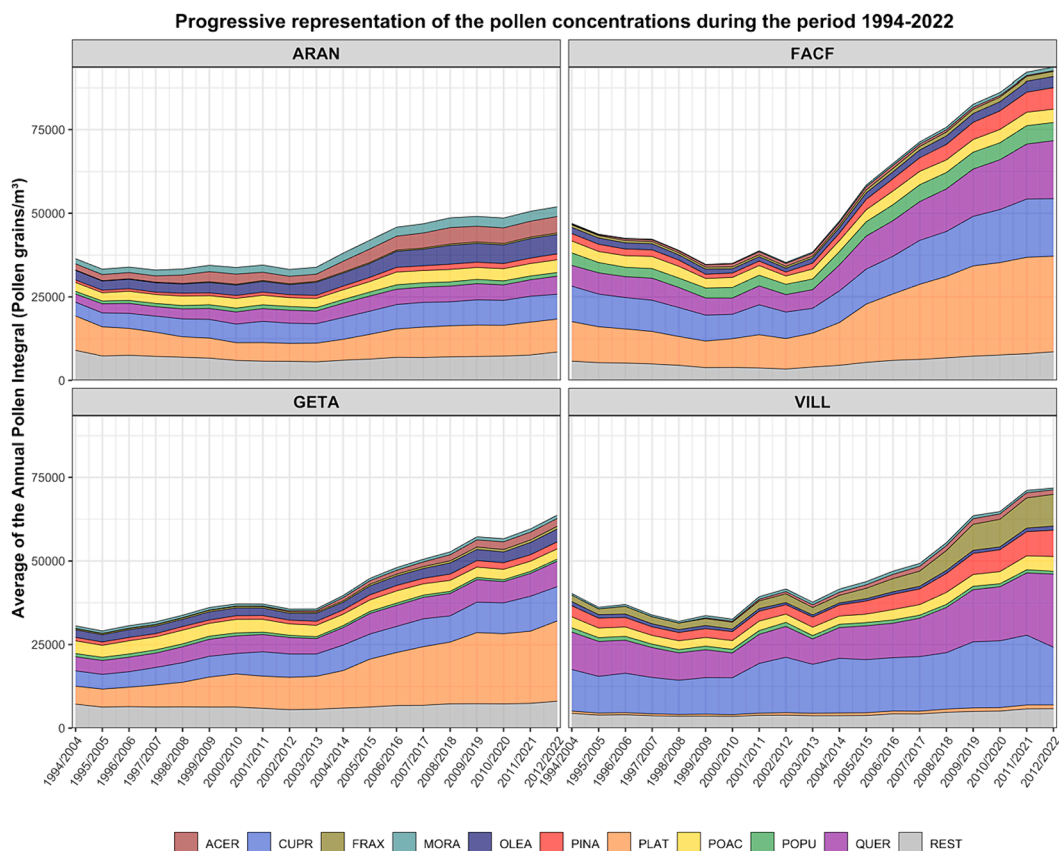


Fig. 5. Changes in the pollen spectrum in time considering a moving average of 11 years as a time window. Pollen type abbreviations are available in section 2.3, and station abbreviations are available in Table 1.

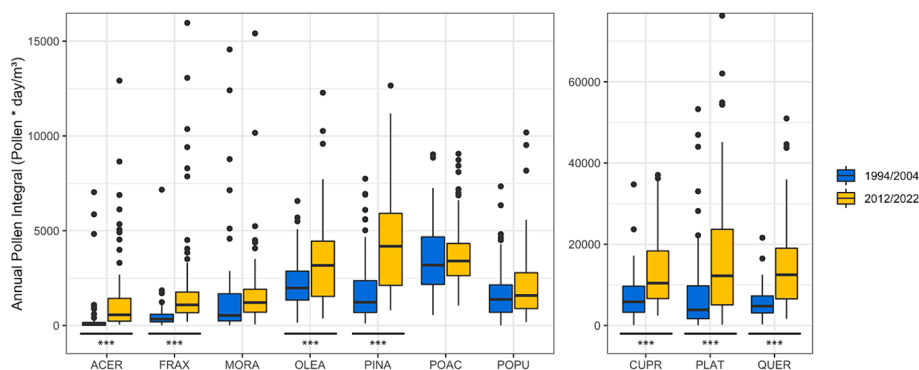


Fig. 6. Differences in annual pollen amounts between two periods: 1994–2004 (past) and 2012–2022 (present). Pollen type abbreviations in section 2.3. Significance level in t-test analysis: \*\*\*  $p < 0.001$ .

showed the same pattern, namely *Acer* (ACER), *Fraxinus* (FRAX), *Olea* (OLEA) and *Pinaceae* (PINA). *Moraceae* (MORA), *Poaceae* (POAC) and *Populus* (POPU) did not show significant differences between the two periods (Fig. 6). Fig. S2 in Supplementary Material shows similar patterns for each aerobiological station and a clear increase in the main tree pollen taxa in the current conditions.

### 3.3. Pollen calendars

The pollen calendars revealed important temporal changes in the phenology and intensity of the airborne pollen dynamics of cities in the Madrid Region between the two periods: 1994–2004 (past) and 2012–2022 (present): see the examples of Madrid/University (FACH) and Getafe (GETA) (Fig. 7). Changes in the risk of pollen exposure are

observed in relevant allergenic pollen taxa such as Cupressaceae (CUPR), *Platanus* (PLAT), *Fraxinus* (FRAX), *Olea* (OLEA) and Urticaceae (URTI). The number of days in the highest risk categories (quantiles 99 and 99.5 %) of these pollen taxa increased considerably between the two periods (Table 2). The length of the pollen risk (days in quantiles > 80 %) was also extended for *Platanus* (PLAT), Cupressaceae (CUPR), *Fraxinus* (FRAX) and Urticaceae (URTI). The case of Cupressaceae (CUPR) in Madrid/University (FACH) is particularly worth noting, with an increase in the number of days of moderate risk in December (period 2012/2022). The number of days of pollen risk remained unchanged or even decreased for *Poaceae* (POAC) and *Amaranthaceae* (AMAR) (Fig. 7; Table 2).

Finally, the most current pollen calendar for all the aerobiological stations in the Madrid Region Palynological Network was proposed for

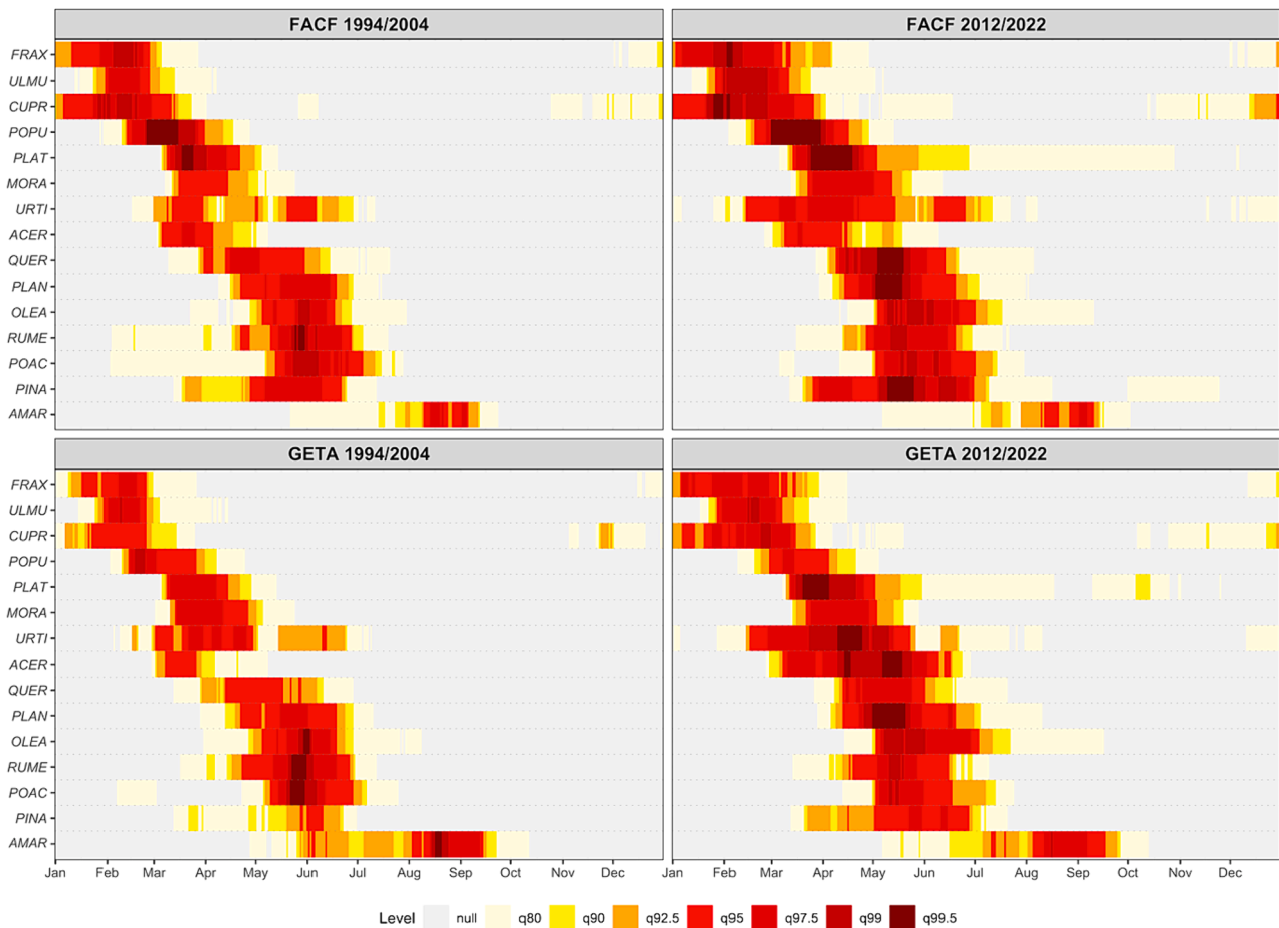


Fig. 7. Pollen calendars for two different periods: 1994–2004 (past) and 2012–2022 (present). Pollen type abbreviations are available in section 2.3, and station abbreviations are available in Table 1.

the last ten years (2013–2022). The daily pollen concentrations were categorised in parallel based on the quantile analysis for all aerobiological stations in the Palinocam Network (Table 3), so the pollen calendars for each aerobiological station in Madrid can be compared, and effectively represent the intrinsic characteristics of the pollen spectrum (Fig. 8). A simplified version with only three categories of risk is included in Supplementary Material (Fig. S3). This simplified pollen calendar followed the criteria established by the Palinocam Network for dissemination among the general public (Directorate-General for Public Health of the Madrid Autonomous Region, 2024).

#### 4. Discussion

A clear temporal change in two aspects of pollen occurrence, i.e. phenology and intensity, is evident in Madrid for the period 1994–2022. The changes in the airborne pollen dynamics in the atmosphere of cities depends on two main factors: transformation of land uses and vegetation distribution (including urban development and urban green space management), and environmental changes in climate patterns (Anderegg et al., 2021; de Weger et al., 2020; Hjort et al., 2016; Katz & Batterman, 2020; López-Orozco et al., 2023). These factors are drivers of global change and major stressors of biodiversity patterns (García et al., 2014; Santos et al., 2021). Although this study does not aim to quantify the relationship between these factors and temporal changes in airborne pollen dynamics, we can report a noticeable modification in land-use configuration in recent decades and a significant positive trend in temperatures in the study area. They are both therefore presented as potential drivers of changes in the airborne pollen spectrum in cities in the Madrid Region.

One of the most notable impacts is the increase in urbanised areas around all the stations, a global trend that has been documented worldwide and is projected to continue increasing in the future (Jiang & O’Neill, 2017). Urbanisation is an important and known stressor of biodiversity and the airborne pollen spectrum (Hjort et al., 2016), and influences not only changes in the pollen load but also phenological responses (Christmann et al., 2023; Galán Díaz et al., 2023; Li et al., 2019). Habitat fragmentation and urban development lead directly to a reduction in pollen production in several pollen taxa as a result of the removal of vegetation, e.g., the case of grasses in Hugg et al. (2017). However, beyond this phenomenon, urbanisation is frequently associated with the rise of urban plantations, in some cases monospecific allergenic tree species (Cariñanos et al., 2017; Maya-Manzano et al., 2017), or the development of non-native spontaneous species in gardens and peri-urban areas directly linked to anthropogenic activities (Katz & Carey, 2014; Lake et al., 2017). The evolution of the pollen calendars and the change in annual pollen amounts in our study coincided with the increase in anthropogenic land uses and the use of ornamental plant species such as plane trees and cypresses in urban green areas.

Another noteworthy aspect of the changes in land use and land cover is the forest recovery recorded in the Corine Land Cover data due to the reduction in agricultural land, scrub and grasslands in the area around the study cities in the Madrid Region, a pattern that has commonly been observed worldwide in recent decades (Liu et al., 2020). An increase in forest cover has been documented since the nineteenth century to the present day in Europe (Abadie et al., 2018; Smiraglia et al., 2015), where the abandonment of arable lands and pastures is the main source of forest transition (Xystrakis et al., 2017). This would potentially increase the pollen production of native tree species, as observed in our results.

**Table 2**

Changes in the number of days of risk to pollen exposure for the most abundant airborne pollen taxa in cities, considering different quantiles (q) to categorise the daily pollen concentration: 80, 90, 92.5, 95, 97.5, 99 and 99.5%. Each category is defined by the lower quantile, e.g. q80 corresponds to the number of days between quantiles 80 and 90, and so on.

Pollen type	q80	q90	q92.5	q95	q97.5	q99	q99.5	q80	q90	q92.5	q95	q97.5	q99	q99.5
FACF	1994–2004							2012–2022						
<i>Acer</i>	9	14	13	23	8	0	0	29	26	13	34	3	0	0
Amaranthaceae	70	18	12	15	10	0	0	81	14	29	20	5	0	0
Cupressaceae	77	15	7	31	20	15	0	119	8	17	35	19	26	8
<i>Fraxinus</i>	42	7	14	21	13	13	0	45	5	27	12	38	14	3
Moraceae	25	8	15	30	0	0	0	21	8	11	14	37	0	0
<i>Olea</i>	62	10	7	23	14	7	0	72	10	8	15	24	20	0
Pinaceae	23	28	16	21	34	0	0	101	4	11	22	37	22	16
<i>Plantago</i>	23	5	11	27	31	0	0	37	11	10	29	15	7	16
<i>Platanus</i>	11	5	11	10	15	12	7	130	31	27	10	10	6	25
Poaceae	104	7	12	20	18	15	0	45	4	11	20	29	11	0
<i>Populus</i>	22	8	12	7	10	11	19	25	7	10	16	8	3	30
<i>Quercus</i>	52	7	18	36	18	0	0	52	3	10	13	19	18	16
<i>Rumex</i>	81	14	16	17	27	6	5	48	9	15	10	34	10	0
<i>Ulmus</i>	34	11	11	8	19	0	0	49	7	11	10	9	25	0
Urticaceae	28	25	49	40	0	0	0	68	16	27	70	39	0	0
GETA	1994–2004							2012–2022						
<i>Acer</i>	33	10	8	19	0	0	0	7	12	6	18	35	29	16
Amaranthaceae	43	25	50	16	20	6	4	54	30	28	22	25	1	0
Cupressaceae	46	23	19	34	0	0	0	101	11	23	24	33	6	0
<i>Fraxinus</i>	48	5	9	26	11	0	0	34	11	15	28	37	0	0
Moraceae	28	4	8	16	28	0	0	10	8	16	8	35	0	0
<i>Olea</i>	66	8	10	18	19	4	4	73	13	8	8	30	24	0
Pinaceae	51	27	20	12	0	0	0	23	12	37	46	12	0	0
<i>Plantago</i>	27	11	10	39	17	0	0	45	7	15	27	13	8	20
<i>Platanus</i>	16	9	8	9	28	0	0	121	22	17	8	8	20	16
Poaceae	56	4	8	22	10	9	9	29	7	21	19	23	4	0
<i>Populus</i>	24	8	8	25	10	6	0	24	15	10	29	7	0	0
<i>Quercus</i>	34	8	28	38	0	0	0	44	14	8	15	35	0	0
<i>Rumex</i>	36	9	8	27	23	6	9	38	14	7	35	16	8	0
<i>Ulmus</i>	47	6	7	7	18	1	0	28	13	8	7	26	6	0
Urticaceae	41	4	48	34	23	0	0	100	1	15	21	30	31	15

**Table 3**

Thresholds (expressed as the number of pollen grains per cubic metre, pollen grains/m<sup>3</sup>) used to define categories of pollen risk. Thresholds were calculated for all the aerobiological stations in the Madrid Region Palynological Network during the period 2013–2022 (last ten years) considering different quantiles (q) to categorise the daily pollen concentration: 80, 90, 92.5, 95, 97.5, 99 and 99.5%.

Pollen type	q80	q90	q92.5	q95	q97.5	q99	q99.5
<i>Acer</i>	0	3	6	11	28	78	139
Amaranthaceae	2	5	6	8	10	15	18
Cupressaceae	21	73	114	194	368	685	1050
<i>Fraxinus</i>	1	8	13	23	46	108	202
Moraceae	0	3	7	17	46	112	171
<i>Olea</i>	2	12	24	49	112	226	332
Pinaceae	7	27	39	61	115	229	335
<i>Plantago</i>	4	13	19	29	51	83	104
<i>Platanus</i>	2	16	41	139	486	1310	2294
Poaceae	9	28	39	57	99	163	219
<i>Populus</i>	0	6	13	25	58	128	207
<i>Quercus</i>	15	72	117	207	425	821	1174
<i>Rumex</i>	1	4	5	9	15	27	37
<i>Ulmus</i>	0	4	8	18	50	135	203
Urticaceae	4	8	9	12	17	26	33

Land-use and land-cover changes should be considered in conjunction with climate change to adequately analyse shifts in biodiversity patterns (De Chazal & Rounsevell, 2009; Tasser et al., 2017). In general, a warming climate increases the airborne pollen load, which has mainly been evidenced in tree species (Gehrig & Clot, 2021; Zhang et al., 2015; Ziello et al., 2012). These productivity patterns can be attributed to the increase in both temperature and CO<sub>2</sub> concentrations (Rogers et al., 2006; Ziska et al., 2019), although their individual contribution is not always easy to disentangle (Anderegg et al., 2021). The significant rise in mean temperatures documented in the entire territory of Madrid

could explain the higher amounts of certain pollen taxa registered in recent years. However, this generalisation can lead to inaccurate predictions when the potential pollen sources are omitted from the pollen modelling, so variations in the pollen productivity of plants and long-term changes in the distribution of the sources must be assumed (Rojo et al., 2021). Several examples have even revealed that the amounts of pollen were negatively related to temperature in local conditions (Jetschni et al., 2023; Jochner et al., 2013). A more exhaustive analysis of all these factors should be conducted to understand the partial contribution of each driver to the changes in the airborne pollen spectrum in central Spain.

Our results clearly show a highly significant change in tree pollen taxa in recent years, supporting the results obtained in other regions (Glick et al., 2021). This change is very pronounced in several stations such as the Faculty of Pharmacy at the Complutense University of Madrid (FACF). Pollen monitoring networks should therefore maintain this information as updated as possible in order to provide relevant and useful information about biological air quality to the city-dwelling allergic population (Cervigón et al., 2016). The Madrid Region Palynological Network approaches the short-term publication of pollen concentrations by increasing the frequency of sample collection and analysis from a weekly to a daily resolution during the annual peak pollen period (Directorate-General for Public Health of the Madrid Autonomous Region, 2024). Novel automatic systems for monitoring biological air quality are in place to resolve this issue (Maya-Manzano et al., 2023; Oteros et al., 2020). A detailed discussion is also required on the need to update and define the optimal reference period to generate general biological air quality information products such as pollen calendars in the long term.

The transfer of the research findings and the vast amount of information generated by environmental monitoring systems for stakeholders such as aerobiological network managers, policy-makers and

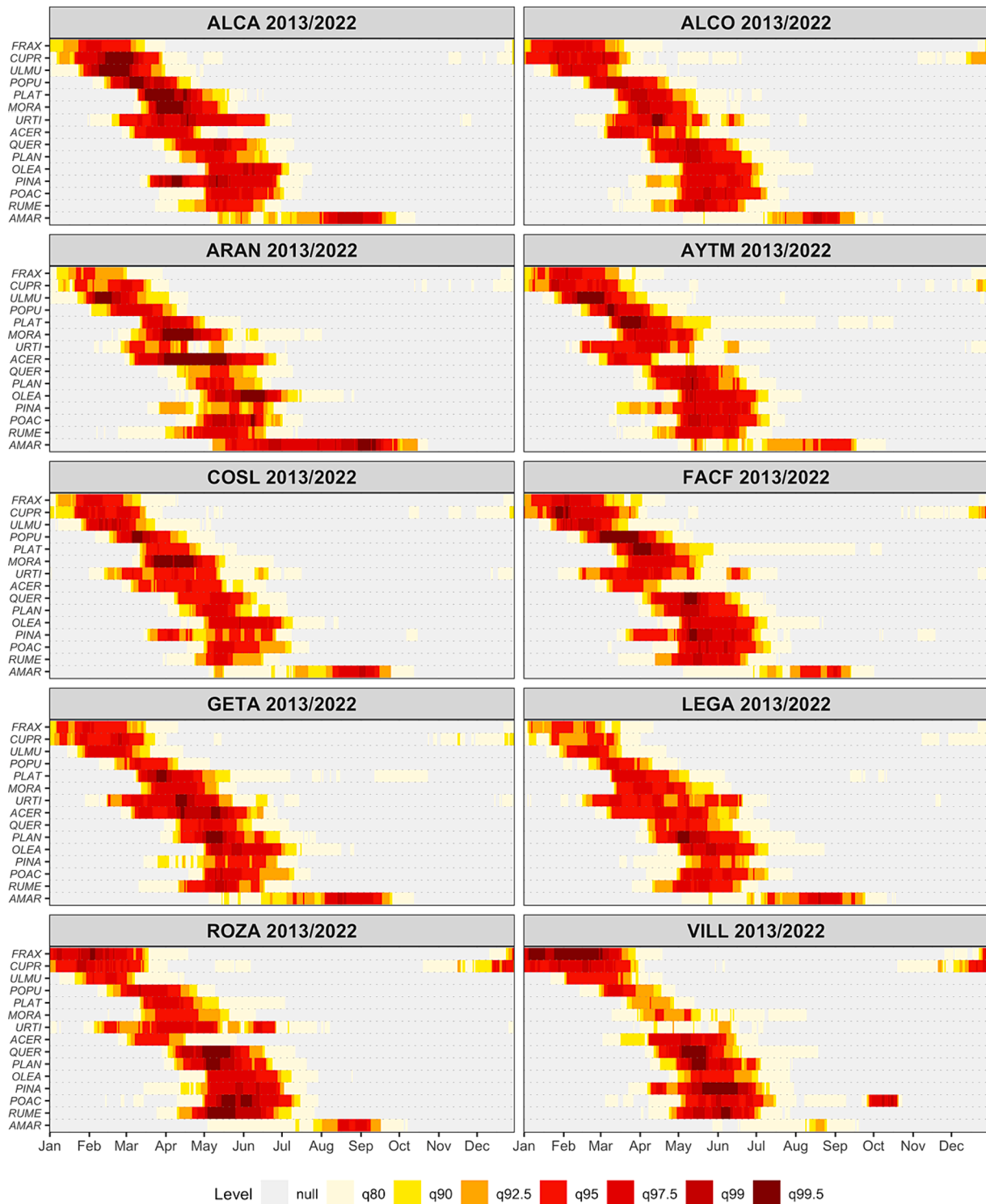


Fig. 8. Current pollen calendar for all the aerobiological stations in the Madrid Region Palynological Network during the period 2013–2022 (last ten years). Pollen type abbreviations are available in section 2.3, and station abbreviations are available in Table 1.

end users requires tools to summarise all this information in easy-to-interpret and attractive outputs. The pollen calendar is a very useful tool to characterise the general airborne pollen spectrum for a given area due to the strong seasonality of the pollen taxa (Rojo et al., 2016). The pollen calendar has become a common air quality indicator for managers and policy-makers worldwide since the publication of the first pollen calendars in Europe by Spieksma (1991) and in United States by O’Rourke (1990), when the early aerobiological networks started to

collect enough pollen time series (Buters et al., 2018). Pollen calendars show historical aerobiological information, which in this work was achieved using a quantile design with a daily resolution. However, we also performed a quantile analysis to categorise the pollen concentrations into discrete classes of pollen load in accordance with the risk for pollen allergy sufferers (Šukienė et al., 2021).

Previous calendars have used exponential categorisation, clinical definitions of thresholds (Calderón-Ezquerro et al., 2018; Gehrig et al.,

2018; Ravindra et al., 2021) or simply the phenological timing of the pollen season (Adams-Groom et al., 2020; Camacho et al., 2020; Haberle et al., 2014) to highlight different pollen risk levels. However, the exponential approach is an arbitrary system that applies a blanket classification to all pollen taxa. The use of clinical criteria to establish pollen thresholds using allergic symptoms lacks general scientific consensus and is based on barely generalisable studies focused on the most common allergenic pollen types in local conditions (Choi et al., 2020; Rakotozandry et al., 2019). Numerous authors have pointed to the need to develop future studies on this topic to avoid the biases produced by multiple factors on clinical thresholds (Cecchi et al., 2010; Steckling-Muschack et al., 2021); it is even more challenging to define threshold levels based on clinical criteria for fungal spores (Anees-Hill et al., 2021). Faced with the problem of objectively establishing pollen thresholds, it is recommended to classify them by applying aerobiological criteria from historical pollen time series, in line with clinical data, as demonstrated by Šukienė et al. (2021). In our study the use of thresholds based on quantiles for all the stations allows users to create pollen calendars that are comparable between different locations according to common regional levels of pollen risk for the entire Palinocam Network. The public information system of allergy risk in Madrid Region follows this methodology using a summarised system of three levels of pollen risk (low, medium and high) (Directorate-General for Public Health of the Madrid Autonomous Region, 2024), similar to other pollen alert systems in Europe (Gehrig et al., 2018).

The number of years considered to generate representative pollen calendars for a region depends on the intended purpose of the calendar. While we agree with the stability of using at least the 20-year period proposed by Gehrig et al. (2018), our results support the premise that, in a changing pollen spectrum, public information should be updated at shorter time intervals to reflect the most realistic biological air quality patterns. It has been documented that the application of time-series analysis to the maximum possible number of years of data is not always the most appropriate approach to study the effects of climate change, as it can mask several important trends (Fu et al., 2016). However, on the other hand, too few years of study may be sufficient for a preliminary investigation of the airborne pollen spectrum for an unexplored area (Abbas et al., 2012), but can be sensitive to strong inter-annual patterns as observed for ornamental plants (Lara et al., 2019). The optimal reference period to generate a pollen calendar is therefore the result of a consensus between two factors: achieving a representative and stable analysis of the airborne pollen spectrum in a region, and the need to maintain pollen information as updated as possible, avoiding the obsolescence of the pollen calendar due to very rapid changes in environmental patterns.

New tools for programming these analytical routines allow the managers of aerobiological networks to generate rapid interfaces and graphic outputs with vast computing power (Gehrig et al., 2018; Rojo et al., 2019). Even the analysis of the progression of air quality can be easily generated using a moving average for a certain time span to allow a smoother representation and a better interpretation of long-term temporal changes (Picornell et al., 2021). The increasing availability of open-source programming code and open databases improves the reproducibility of the research and the public's access to environmental information. This work supports these principles by providing open-source code for programming the quantile pollen calendar in R language ([https://github.com/jesrojo/quantile\\_pollen\\_calendar](https://github.com/jesrojo/quantile_pollen_calendar)). An interactive web application has also been released, oriented to the pollen information stakeholders in the Madrid Autonomous Region ([https://jesrojoucm.shinyapps.io/pcalendar\\_app2/](https://jesrojoucm.shinyapps.io/pcalendar_app2/)).

## 5. Conclusions

The pollen calendar is a very useful output that summarises the seasonal dynamics of the most abundant bioaerosols in cities. The air quality monitoring networks must provide easy-to-interpret

environmental information to stakeholders such as network managers, doctors, policy-makers and other end users for multiple purposes (urban planning, public health, ecology, agriculture, etc.). This information is especially relevant for optimising the design and planning of gardens and urban green areas in cities. Based on our findings, we present a technical proposal to the Madrid Region Palynological Network to generate the pollen calendars for each city using the reference period of the last ten years, and to update this information every three years. The areas surrounding the cities in the Madrid Region have seen important changes in land use and land cover and significant climate warming. We therefore consider that the public information should be updated periodically to reflect the changing pollen spectrum and the most realistic biological air quality pattern in cities. In the age of the Internet of Things, automation and the management of huge amounts of data require powerful tools to allow end users to interpret environmental information. The biological air quality assessment framework represents a promising advance thanks to the integration of new automatic systems based on real-time monitoring with the forecasting models and the environmental information products available to the allergic population in cities.

## CRedit authorship contribution statement

**Patricia Cervigón:** Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Validation, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Zuzana Ferencova:** Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Writing – review & editing. **Ángel Cascón:** Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Writing – review & editing. **Jorge Romero-Morte:** Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Software, Validation, Writing – review & editing. **Javier Galán Díaz:** Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Software, Validation, Writing – review & editing. **Silvia Sabariego:** Data curation, Investigation, Methodology, Resources, Writing – review & editing. **Margarita Torres:** Data curation, Investigation, Methodology, Resources, Writing – review & editing. **Adela Montserrat Gutiérrez-Bustillo:** Investigation, Resources, Validation, Writing – review & editing. Funding acquisition, Supervision. **Jesús Rojo:** Conceptualization, Formal analysis, Funding acquisition, Investigation, Project administration, Resources, Supervision, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

## Acknowledgment

The Madrid Region Palynological Network (Palinocam Network) results from the cooperation of different public institutions: Government of the Madrid Autonomous Region, University Complutense of Madrid and eight city councils of the Madrid Region (Alcalá de Henares, Alcobendas, Aranjuez, Coslada, Getafe, Leganés, Las Rozas and Madrid). The authors thank all these institutions for supporting the Palinocam Network. Also, the authors would like to thank all the staff at the pollen analysis laboratories for the generation of the pollen databases. This research was funded by the Directorate-General for Public Health of the Madrid Autonomous Region (Spain) and the Directorate-General of Sustainability and Environmental Control of the Madrid city council, thanks to different agreements signed with the Aerobiology Research Group of the Faculty of Pharmacy of the Complutense University of Madrid as responsible of the scientific and technical supervision of the Palinocam Network. This study was carried out within the AIRTEC-CM (urban air quality and climate change integral assessment) scientific program funded by the Directorate General for Universities and Research of the Madrid Region (S2018/EMT-4329). JGD is supported by a Margarita Salas fellowship funded by the Spanish Ministry of Universities (Spain) and the European Union-Next Generation Plan.

### Data availability.

The [supporting data](#) for the findings of this study are openly

available in the Madrid Region's OpenData Catalogue (<https://datos.comunidad.madrid/>). The programming code in R language to generate quantile pollen calendars following the methodology of Gehrig et al. (2018) is openly available in GitHub ([https://github.com/jesrojo/quantile\\_pollen\\_calendar](https://github.com/jesrojo/quantile_pollen_calendar)). An interactive web application is also available in [https://jesrojoucm.shinyapps.io/pcalendar\\_app2/](https://jesrojoucm.shinyapps.io/pcalendar_app2/) where the user can individually adjust the controls to generate the pollen calendar in an easy and reproducible way.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105053>.

## References

- Abadie, J., Dupouey, J.-L., Avon, C., Rochel, X., Taton, T., & Bergès, L. (2018). Forest recovery since 1860 in a Mediterranean region: Drivers and implications for land use and land cover spatial distribution. *Landscape Ecology*, 33(2), 289–305. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0601-0>
- Abbas, S., Katelaris, C. H., Singh, A. B., Raza, S. M., Khan, M. A., Rashid, M., Abbas, M., & Ismail, M. (2012). World allergy organization study on aerobiology for creating first pollen and Mold Calendar with clinical significance in Islamabad, Pakistan; a project of world allergy organization and Pakistan allergy, Asthma & Clinical Immunology Centre of Islamabad. *World Allergy Organization Journal*, 5(9), 103–110. <https://doi.org/10.1097/WOX.0b013e31826421c8>
- Adams-Groom, B., Ambelas Skjøth, C., Selby, K., Pashley, C., Satchwell, J., Head, K., & Ramsay, G. (2020). Regional calendars and seasonal statistics for the United Kingdom's main pollen allergens. *Allergy*, 75(6), 1492–1494. <https://doi.org/10.1111/all.14168>
- Agencia Estatal de Meteorología. (2017). Guía resumida del clima en España 1981-2010. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. [www.aemet.es](http://www.aemet.es)
- Anderegg, W. R. L., Abatzoglou, J. T., Anderegg, L. D. L., Bielory, L., Kinney, P. L., & Ziska, L. (2021). Anthropogenic climate change is worsening north American pollen seasons. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(7). <https://doi.org/10.1073/pnas.2013284118>
- Anees-Hill, S., Douglas, P., Pashley, C. H., Hansell, A., & Marczylo, E. L. (2021). A systematic review of outdoor airborne fungal spore seasonality across Europe and the implications for health. *Science of The Total Environment*, 151716. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151716>
- Buters, J. T. M., Antunes, C., Galveias, A., Bergmann, K. C., Thibaudon, M., Galán, C., Schmidt-Weber, C., & Oteros, J. (2018). Pollen and spore monitoring in the world. *clinical and translational. Allergy*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s13601-018-0197-8>
- Calderón-Ezquerro, M. C., Martínez-Lopez, B., Guerrero-Guerra, C., López-Espinosa, E. D., & Cabos-Narvaez, W. D. (2018). Behaviour of Quercus pollen in the air, determination of its sources and transport through the atmosphere of Mexico City and conurbated areas. *International Journal of Biometeorology*. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1572-9>
- Camacho, I., Caeiro, E., Nunes, C., & Morais-Almeida, M. (2020). Airborne pollen calendar of Portugal: A 15-year survey (2002–2017). *Allergologia et Immunopathologia*, 48(2), 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.aller.2019.06.012>
- Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., Díaz de la Guardia, C., Aira, M. J., Belmonte, J., Boi, M., Elvira-Rendueles, B., De Linares, C., Fernández-Rodríguez, S., Maya-Manzano, J. M., Pérez-Badía, R., Rodríguez-de la Cruz, D., Rodríguez-Rajo, F. J., Rojo-Ubeda, J., Romero-Zarco, C., Sánchez-Reyes, E., Sánchez-Sánchez, J., Tormo-Molina, R., & Vega Maray, A. M. (2017). Assessing allergenicity in urban parks: A nature-based solution to reduce the impact on public health. *Environmental Research*, 155, 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.02.015>
- Cariñanos, P., Guerrero-Rascado, J. L., Valle, A. M., Cazorla, A., Titos, G., Foyo-Moreno, I., Alados-Arboledas, L., & Díaz de la Guardia, C. (2022). Assessing pollen extreme events over a Mediterranean site: Role of local surface meteorology. *Atmospheric Environment*, 118928. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118928>
- Cecchi, L., D'Amato, G., Ayres, J. G., Galan, C., Forastiere, F., Forsberg, B., Gerritsen, J., Nunes, C., Behrendt, H., Akdis, C., Dahl, R., & Annesi-Maesano, I. (2010). Projections of the effects of climate change on allergic asthma: The contribution of aerobiology: Climate change and aerobiology. *Allergy*, 65, 1073–1081. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2010.02423.x>
- Cervigón Morales, P. (2005). Palinocam network: Airborne pollen vigilance in Madrid. *Revista de Salud Ambiental*, 5(2), 131–136. <https://ojs.difundit.com/index.php/rsa/article/view/308>
- Cervigón, P., Gutiérrez Bustillo, M., & Pérez-Badía, R. (2016). Aerobiology and health. *Revista de Salud Ambiental*, 16(1), 1–5. <https://ojs.difundit.com/index.php/rsa/article/view/807>
- Choi, Y.-J., Jeon, J.-H., Jeong, J. H., Kim, K.-R., Lee, Y.-S., & Oh, J.-W. (2020). Revision of threshold levels for evoking pollinosis to oak, pine, japanese hop, and ragweed in the metropolitan area Seoul, Korea. *Allergy, Asthma & Respiratory Disease*, 8(4), 199. <https://doi.org/10.4168/aard.2020.8.4.199>
- Christmann, T., Kowarik, I., Bernard-Verdier, M., Buchholz, S., Hiller, A., Seitz, B., & Lippe, M. V. D. (2023). Phenology of grassland plants responds to urbanization. *Urban Ecosystems*, 26(1), 261–275. <https://doi.org/10.1007/s11252-022-01302-y>
- Copernicus Land Monitoring Service. (2023). Corine Land Cover. 2000(2006), pp. (2018). 2012. European Environment Agency (EEA): European Union. <https://land.copernicus.eu/>
- De Bodas Terassi, P. M., Da Silva Oscar-Júnior, A. C., Galvani, E., De Oliveira-Júnior, J. F., Sobral, B. S., Biffi, V. H. R., & De Gois, G. (2022). Daily rainfall intensity and temporal trends in eastern Paraná state – Brazil. *Urban Climate*, 42, Article 101090. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101090>
- De Chazal, J., & Rounsevell, M. D. A. (2009). Land-use and climate change within assessments of biodiversity change: A review. *Global Environmental Change*, 19(2), 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.09.007>
- de Weger, L. A., Molster, F., de Raat, K., den Haan, J., Romein, J., van Leeuwen, W., de Groot, H., Mostert, M., & Hiemstra, P. S. (2020). A new portable sampler to monitor pollen at street level in the environment of patients. *Science of The Total Environment*, 140404. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140404>
- Directorate-General for Public Health of the Madrid Autonomous Region. (2024). Website of the Madrid region palynological network accessed: 2024.01.09 <https://www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen>
- Elvira-Rendueles, B., Moreno, J. M., Costa, I., Bañón, D., Martínez-García, M. J., & Moreno-Grau, S. (2019). Pollen calendars of Cartagena, Lorca, and Murcia (region of Murcia), southeastern Iberian Peninsula: 2010–2017. *Aerobiologia*, 35(3), 477–496. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09578-y>
- European Academy of Allergy and Clinical Immunology. (2015). Advocacy manifesto tackling the allergy crisis in Europe—Concerted policy action needed Accessed 24 October 2018 [http://www.eaaci.org/images/media/EAACI\\_Manifesto\\_brochure\\_Interactive.pdf](http://www.eaaci.org/images/media/EAACI_Manifesto_brochure_Interactive.pdf)
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fu, Y. H., Piao, S., Ciais, P., Huang, M., Menzel, A., Peaucelle, M., Peng, S., Song, Y., Vitasse, Y., Zeng, Z., Zhao, H., Zhou, G., Peñaflor, J., & Janssens, I. A. (2016). Long-term linear trends mask phenological shifts. *International Journal of Biometeorology*, 60(11), 1611–1613. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1253-5>
- Galán, C., Ariatti, A., Bonini, M., Clot, B., Crouzy, B., Dahl, A., Fernandez-González, D., Frenguelli, G., Gehrig, R., Isard, S., Levetin, E., Li, D. W., Mandrioli, P., Rogers, C. A., Thibaudon, M., Sauliene, I., Skjøth, C., Smith, M., & Sofiev, M. (2017). Recommended terminology for aerobiological studies. *Aerobiologia*, 33(3), 293–295. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9496-0>
- Galán, C., Cariñanos, P., Alcázar, P., & Domínguez-Vilches, E. (2007). *Spanish aerobiology network (REA): Management and quality manual*. Spain: Servicio de Publicaciones de La Universidad de Córdoba. [https://doi.org/www.uco.es/raa/infor\\_raa/manual\\_eng.pdf](https://doi.org/www.uco.es/raa/infor_raa/manual_eng.pdf)
- Galán, C., Smith, M., Thibaudon, M., Frenguelli, G., Oteros, J., Gehrig, R., Berger, U., Clot, B., Brandao, R., & EAS QC Working Group. (2014). Pollen monitoring: Minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia*, 30(4), 385–395. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9335-5>
- Galán Díaz, J., Gutiérrez-Bustillo, A. M., & Rojo, J. (2023). Influence of urbanisation on the phenology of evergreen coniferous and deciduous broadleaf trees in Madrid (Spain). *Landscape and Urban Planning*, 235, Article 104760. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104760>
- García, R. A., Cabeza, M., Rahbek, C., & Araujo, M. B. (2014). Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science*, 344(6183), 1247579. <https://doi.org/10.1126/science.1247579>
- Gehrig, R., & Clot, B. (2021). 50 Years of pollen monitoring in Basel (Switzerland) demonstrate the influence of climate change on airborne pollen. *Frontiers in Allergy*, 2. <https://doi.org/10.3389/falgy.2021.677159>
- Gehrig, R., Maurer, F., & Schwiertz, C. (2018). Designing new automatically generated pollen calendars for the public in Switzerland. *Aerobiologia*, 34(3), 349–362. <https://doi.org/10.1007/s10453-018-9518-6>
- Glick, S., Gehrig, R., & Eeftens, M. (2021). Multi-decade changes in pollen season onset, duration, and intensity: A concern for public health? *Science of The Total Environment*, 146382. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146382>
- Gutiérrez-Bustillo, M., Pérez-Badía, R., & Cervigón, P. (2015). Aerobiology: Airborne pollen and fungal spores networks. *Revista de Salud Ambiental*, 15(2), 155–156. <https://ojs.difundit.com/index.php/rsa/article/view/787>
- Haberle, S. G., Bowman, D. M. J. S., Newnham, R. M., Johnston, F. H., Beggs, P. J., Buters, J., Campbell, B., Erbas, B., Godwin, I., Green, B. J., Huete, A., Jaggard, A. K., Medek, D., Murray, F., Newbigin, E., Thibaudon, M., Vicendese, D., Williamson, G. J., & Davies, J. M. (2014). The macroecology of airborne pollen in australian and New Zealand urban areas. *PLoS ONE*, 9(5), e97925.
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7(1), 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Hirst, J. M. (1952). An automatic volumetric spore trap. *Annals of Applied Biology*, 39(2), 257–265. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1952.tb00904.x>
- Hjort, J., Hugg, T. T., Antikainen, H., Rusanen, J., Sofiev, M., Kukkonen, J., Jaakkola, M. S., & Jaakkola, J. J. K. (2016). Fine-scale exposure to allergenic pollen in the urban environment: Evaluation of land use regression approach. *Environmental Health Perspectives*, 124(5), 619–626. <https://doi.org/10.1289/ehp.1509761>
- Hugg, T. T., Hjort, J., Antikainen, H., Rusanen, J., Tuokila, M., Korkonen, S., Weckström, J., Jaakkola, M. S., & Jaakkola, J. J. K. (2017). Urbanity as a determinant of exposure to grass pollen in Helsinki metropolitan area. *Finland. PLOS ONE*, 12(10), e0186348.
- Jetschni, J., Fritsch, M., & Jochner-Oette, S. (2023). How does pollen production of allergenic species differ between urban and rural environments? *International Journal of Biometeorology*. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02545-w>

- Jiang, L., & O'Neill, B. C. (2017). Global urbanization projections for the Shared socioeconomic pathways. *Global Environmental Change*, 42, 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.03.008>
- Jochner, S., Höfler, J., Beck, I., Göttlein, A., Ankerst, D. P., Traidl-Hoffmann, C., & Menzel, A. (2013). Nutrient status: A missing factor in phenological and pollen research? *Journal of Experimental Botany*, 64(7), 2081–2092. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert061>
- Katz, D. S. W., & Batterman, S. A. (2020). Urban-scale variation in pollen concentrations: A single station is insufficient to characterize daily exposure. *Aerobiologia*, 36(3), 417–431. <https://doi.org/10.1007/s10453-020-09641-z>
- Katz, D. S. W., & Carey, T. S. (2014). Heterogeneity in ragweed pollen exposure is determined by plant composition at small spatial scales. *Science of The Total Environment*, 485–486, 435–440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.099>
- Khomenko, S., Cirach, M., Pereira-Barboza, E., Mueller, N., Barrera-Gómez, J., Rojas-Rueda, D., de Hoogh, K., Hoek, G., & Nieuwenhuijsen, M. (2021). Premature mortality due to air pollution in European cities: A health impact assessment. *The Lancet Planetary Health*, 5(3), e121–e134. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30272-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30272-2)
- Lake, I. R., Jones, N. R., Agnew, M., Goodess, C. M., Giorgi, F., Hamaoui-Laguel, L., Semenov, M. A., Solomon, F., Storker, J., Vautard, R., & Epstein, M. M. (2017). Climate change and future pollen allergy in Europe. *Environmental Health Perspectives*, 125(3), 385–391. <https://doi.org/10.1289/EHP173>
- Lara, B., Rojo, J., Fernández-González, F., & Pérez-Badía, R. (2019). Prediction of airborne pollen concentrations for the plane tree as a tool for evaluating allergy risk in urban green areas. *Landscape and Urban Planning*, 189, 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.05.002>
- Li, D., Stucky, B. J., Deck, J., Baiser, B., & Guralnick, R. P. (2019). The effect of urbanization on plant phenology depends on regional temperature. *Nature Ecology & Evolution*, 3(12), 1661–1667. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1004-1>
- Liu, H., Gong, P., Wang, J., Clinton, N., Bai, Y., & Liang, S. (2020). Annual dynamics of global land cover and its long-term changes from 1982 to 2015. *Earth System Science Data*, 12(2), 1217–1243. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1217-2020>
- Lo, F., Bitz, C. M., Battisti, D. S., & Hess, J. J. (2019). Pollen calendars and maps of allergenic pollen in North America. *Aerobiologia*, 35(4), 613–633. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09601-2>
- López-Orozco, R., García-Mozo, H., Oteros, J., & Galán, C. (2023). Long-term trends and influence of climate and land-use changes on pollen profiles of a Mediterranean oak forest. *Science of The Total Environment*, 897, Article 165400. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165400>
- Martínez-Bracero, M., Alcázar, P., Díaz de la Guardia, C., González-Minero, F. J., Ruiz, L., Trigo Pérez, M. M., & Galán, C. (2015). Pollen calendars: A guide to common airborne pollen in Andalusia. *Aerobiologia*, 31(4), 549–557. <https://doi.org/10.1007/s10453-015-9385-3>
- Maya-Manzano, J. M., Tormo Molina, R., Fernández Rodríguez, S., Silva Palacios, I., & Gonzalo Garijo, A. (2017). Distribution of ornamental urban trees and their influence on airborne pollen in the SW of Iberian Peninsula. *Landscape and Urban Planning*, 157, 434–446. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.011>
- Maya-Manzano, J. M., Tummon, F., Abt, R., Allan, N., Bunderson, L., Clot, B., Crouzy, B., Daunys, G., Erb, S., Gonzalez-Alonso, M., Graf, E., Grewling, E., Haus, J., Kadantsev, E., Kawashima, S., Martínez-Bracero, M., Matavulj, P., Mills, S., Niederberger, E., & Buters, J. (2023). Towards european automatic bioaerosol monitoring: Comparison of 9 automatic pollen observational instruments with classic first-type traps. *Science of The Total Environment*, 866, Article 161220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161220>
- Ojeda, P., Sastre, J., Olaguibel, J., & Chivato, T. (2018). Alergológica 2015: A National Survey on allergic diseases in the adult Spanish population. *Journal of Investigational Allergy and Clinical Immunology*, 28(3), 151–164. <https://doi.org/10.18176/jiaci.0264>
- O'Rourke, M. K. (1990). Comparative pollen calendars from Tucson, Arizona: Durhams Burkard samplers. *Aerobiologia*, 6(2), 136–140. <https://doi.org/10.1007/BF02539105>
- Oteros, J., Weber, A., Kutzora, S., Rojo, J., Heinze, S., Herr, C., Gebauer, R., Schmidt-Weber, C. B., & Buters, J. T. M. (2020). An operational robotic pollen monitoring network based on automatic image recognition. *Environmental Research*, 191, Article 110031. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110031>
- Pawankar, R., Canonica, G. W., Holgate, S. T., Lockey, R. F., & Blaiss, M. (2013). *World allergy organisation (WAO) white book on allergy: Update 2013*. Milwaukee: World Allergy Organization. <http://www.worldallergy.org/UserFiles/file/WhiteBook2-2013-v8.pdf>
- Pecero-Casimiro, R., Maya-Manzano, J. M., Fernández-Rodríguez, S., Tormo-Molina, R., Silva-Palacios, I., Monroy-Colín, A., & Gonzalo-Garijo, A. (2020). Pollen calendars and regional gradients as information tools in the Extremadura pollen monitoring network (SW Spain). *Aerobiologia*, 36(4), 731–748. <https://doi.org/10.1007/s10453-020-09667-3>
- Picornell, A., Oteros, J., Ruiz-Mata, R., Recio, M., Trigo, M. M., Martínez-Bracero, M., Lara, B., Serrano-García, A., Galán, C., García-Mozo, H., Alcázar, P., Pérez-Badía, R., Cabezudo, B., Romero-Morte, J., & Rojo, J. (2021). Methods for interpolating missing data in aerobiological databases. *Environmental Research*, 200, Article 111391. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111391>
- Rakotondrandy, T., Cassagne, E., Martin, S., Alauzet, P., Navarro, I., Delcroix, C., Caillaud, D., Besancenot, J.-P., Thiabaudon, M., & Charpin, D. (2019). Exposure to cypress pollens and subsequent symptoms: A panel study. *International Archives of Allergy and Immunology*, 180(2), 135–141. <https://doi.org/10.1159/000501223>
- Ravindra, K., Goyal, A., Kumar, S., Aggarwal, A., & Mor, S. (2021). Pollen calendar to depict seasonal periodicities of airborne pollen species in a city situated in indo-gangetic plain. *India. Atmospheric Environment*, 262, Article 118649. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118649>
- Rogers, C. A., Wayne, P. M., Macklin, E. A., Muilenberg, M. L., Wagner, C. J., Epstein, P. R., & Bazzaz, F. A. (2006). Interaction of the onset of spring and elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) pollen production. *Environmental Health Perspectives*, 114(6), 865–869. <https://doi.org/10.1289/ehp.8549>
- Rojo, J., Oteros, J., Picornell, A., Maya-Manzano, J. M., Damialis, A., Zink, K., Werchan, M., Werchan, B., Smith, M., Menzel, A., Timpf, S., Traidl-Hoffmann, C., Bergmann, K.-C., Schmidt-Weber, C. B., & Buters, J. (2021). Effects of future climate change on birch abundance and their pollen load. *Global Change Biology*, 27(22), 5934–5949. <https://doi.org/10.1111/gcb.15824>
- Rojo, J., Picornell, A., & Oteros, J. (2019). AeRobiology: The computational tool for biological data in the air. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(8), 1371–1376. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13203>
- Rojo, J., Rapp, A., Lara, B., Sabariego, S., Fernández-González, F., & Pérez-Badía, R. (2016). Characterisation of the airborne pollen spectrum in Guadalajara (central Spain) and estimation of the potential allergy risk. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(3), 130. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5129-2>
- Sánchez-Reyes, E., Rodríguez de la Cruz, D., & Sánchez-Sánchez, J. (2016). First fungal spore calendar of the middle-west of the Iberian Peninsula. *Aerobiologia*, 32(3), 529–539. <https://doi.org/10.1007/s10453-016-9430-x>
- Santos, M. J., Smith, A. B., Dekker, S. C., Eppinga, M. B., Leitão, P. J., Moreno-Mateos, D., Morueta-Holme, N., & Ruggeri, M. (2021). The role of land use and land cover change in climate change vulnerability assessments of biodiversity: A systematic review. *Landscape Ecology*. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01276-w>
- Shin, J.-Y., Han, M. J., Cho, C., Kim, K. R., Ha, J.-C., & Oh, J.-W. (2020). Allergenic pollen calendar in Korea based on probability distribution models and up-to-date observations. *Allergy, Asthma & Immunology Research*, 12(2), 259. <https://doi.org/10.4168/air.2020.12.2.259>
- Smiraglia, D., Ceccarelli, T., Bajocco, S., Perini, L., & Salvati, L. (2015). Unraveling landscape complexity: Land use/land cover changes and landscape pattern dynamics (1954–2008) in contrasting peri-urban and agro-forest regions of northern Italy. *Environmental Management*, 56(4), 916–932. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0533-x>
- Spiekma, F.T.M. (1991). Regional european pollen calendars. In D'Amato, G., Spiekma, F.T.M., & Bonini, S. (Eds.), *Allergenic pollen and pollinosis in Europe*, (pp. 49–65). Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Steckling-Muschack, N., Mertes, H., Mittermeier, I., Schutzmeier, P., Becker, J., Bergmann, K.-C., Böse-O'Reilly, S., Buters, J., Damialis, A., Heinrich, J., Kabesch, M., Nowak, D., Walser-Reichenbach, S., Weinberger, A., Zamfir, M., Herr, C., Kutzora, S., & Heinze, S. (2021). A systematic review of threshold values of pollen concentrations for symptoms of allergy. *Aerobiologia*, 37(3), 395–424. <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09709-4>
- Stix, E., & Ferretti, M. L. (1974). Pollen calendars of three locations in Western Germany. *Atlas European Des Pollens Allergisants*, 85–94.
- Strzelczyk, Z., Roszkowski, M., Feleszko, W., & Krauze, A. (2020). Avoidance of allergens as an environmental method in the prevention of inhaled allergy symptoms. *Allergologia et Immunopathologia*, 48(6), 745–752. <https://doi.org/10.1016/j.aller.2019.06.011>
- Suanno, C., Aloisi, I., Fernández-González, D., & Del Duca, S. (2021). Monitoring techniques for pollen allergy risk assessment. *Environmental Research*, 111109. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111109>
- Šukienė, L., Šaulienė, I., Dubakienė, R., Rudzevičienė, O., & Daunys, G. (2021). Analysis of allergenic pollen data, focusing on a pollen load threshold statement. *Aerobiologia*. <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09727-2>
- Tasser, E., Leitinger, G., & Tappeiner, U. (2017). Climate change versus land-use change—What affects the mountain landscapes more? *Land Use Policy*, 60, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.019>
- Tummon, F., Arboledas, L. A., Bonini, M., Guinot, B., Hicke, M., Jacob, C., Kendrovski, V., McCairns, W., Petermann, E., Peuch, V., Pfaar, O., Sicard, M., Sikoparija, B., & Clot, B. (2021). The need for Pan-European automatic pollen and fungal spore monitoring: A stakeholder workshop position paper. clinical and translational. *Allergy*, 11(3). <https://doi.org/10.1002/ctt2.12015>
- UNE-EN 16868. (2020). *Ambient Air—Sampling And Analysis of Airborne Pollen Grains And Fungal Spores for Networks Related to Allergy—Volumetric Hirst Method*.
- Wei, Y., Kehm, R. D., Goldberg, M., & Terry, M. B. (2019). Applications for quantile regression in epidemiology. *Current Epidemiology Reports*, 6(2), 191–199. <https://doi.org/10.1007/s40471-019-00204-6>
- Werchan, M., Werchan, B., & Bergmann, K.-C. (2018). German pollen calendar 4.0 – update based on 2011–2016 pollen data. *allergy journal. International*, 27(3), 69–71. <https://doi.org/10.1007/s40629-018-0055-1>
- Xystrakis, F., Psarras, T., & Koutsias, N. (2017). A process-based land use/land cover change assessment on a mountainous area of Greece during 1945–2009: Signs of socio-economic drivers. *Science of The Total Environment*, 587–588, 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.161>
- Zhang, Y., Bielory, L., Mi, Z., Cai, T., Robock, A., & Georgopoulos, P. (2015). Allergenic pollen season variations in the past two decades under changing climate in the United States. *Global Change Biology*, 21(4), 1581–1589. <https://doi.org/10.1111/gcb.12755>
- Ziello, C., Sparks, T. H., Estrella, N., Belmonte, J., Bergmann, K. C., Bucher, E., Brighetti, M. A., Damialis, A., Detandt, M., Galán, C., Gehrig, R., Grewling, L., Gutiérrez Bustillo, A. M., Hallsdóttir, M., Kockhans-Bieda, M.-C., De Linares, C.,

- Myszkowska, D., Páldy, A., Sánchez, A., & Menzel, A. (2012). Changes to airborne pollen counts across Europe. *PLoS ONE*, 7(4), e34076.
- Ziska, L. H., Makra, L., Harry, S. K., Bruffaerts, N., Hendrickx, M., Coates, F., Saarto, A., Thibaudon, M., Oliver, G., Damialis, A., Charalampopoulos, A., Vokou, D., Heidmarsson, S., Gudjohnsen, E., Bonini, M., Oh, J.-W., Sullivan, K., Ford, L., Brooks, G. D., & Crimmins, A. R. (2019). Temperature-related changes in airborne allergenic pollen abundance and seasonality across the northern hemisphere: A retrospective data analysis. *The Lancet Planetary Health*, 3(3), e124–e131. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30015-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30015-4)
- Zubeldia, J. M., Baeza, M. L., Chivato, T., Jáuregui, I., & Senent, C. J. (2021). El libro de las enfermedades alérgicas. Fundacion BBVA.

## **7. Capítulo IV**

**Delimitación de las zonas de riesgo ambiental, basada en los niveles polínicos, los usos y vegetación del territorio**

***Assesment of enviromental risk areas based on airborne pollen patterns as a response to land use and land cover distribution***

*Environmental Pollution 2024*





Contents lists available at ScienceDirect

## Environmental Pollution

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/envpol](http://www.elsevier.com/locate/envpol)

## Assessment of environmental risk areas based on airborne pollen patterns as a response to land use and land cover distribution<sup>☆</sup>

Jesús Rojo<sup>a,\*</sup>, Patricia Cervigón<sup>a</sup>, Zuzana Ferencova<sup>b</sup>, Ángel Cascón<sup>a</sup>, Javier Galán Díaz<sup>c,a</sup>, Jorge Romero-Morte<sup>a</sup>, Silvia Sabariego<sup>d</sup>, Margarita Torres<sup>a</sup>, Adela Montserrat Gutiérrez-Bustillo<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Pharmacology, Pharmacognosy and Botany, Faculty of Pharmacy, Complutense University of Madrid, Madrid, Spain

<sup>b</sup> Atlantic Botanical Garden of Gijón, Gijón, Spain

<sup>c</sup> Department of Plant Biology and Ecology, University of Sevilla, Sevilla, Spain

<sup>d</sup> Department of Biodiversity, Ecology and Evolution, University Complutense of Madrid, Madrid, Spain

## ARTICLE INFO

## Keywords:

Pollen exposure  
Risk assessment  
Pollinosis  
Bioaerosol  
Public health

## ABSTRACT

Allergic respiratory diseases are considered to be among the most important public health concerns, and pollen is the main cause of allergic respiratory diseases worldwide. However, the biological component of air quality is largely underestimated, and there is an important gap in the legislation in this area. The aims of this study were to characterise the occurrence and incidence of pollen exposure in relation to potential pollen sources and to delineate the main areas of aerobiological risk in the Madrid Autonomous Region based on homogeneous patterns of pollen exposure. This study uses the historical aerobiological database of the Madrid Region Palynological Network (central Spain) from ten pollen stations from 1994 to 2022, and the land-use information from the Corine Land Cover. Multiple clustering approaches were followed to group the sampling stations and subsequently all the 1 × 1 km pixels for the Madrid Autonomous Region. The clustering dendrogram for land-use distribution was compared to the dendrogram for historical airborne pollen data. The two dendrograms showed a good alignment with a very high correlation (0.95) and very low entanglement (0.15), which indicates a close correspondence between the distribution of the potential pollen sources and the airborne pollen dynamics. Based on this knowledge, the Madrid Autonomous Region was divided into six aerobiological risk areas following a clear anthropogenic gradient in terms of the potential pollen sources that determine pollen exposure in the Madrid Region. Spatial regionalisation is a common practice in environmental risk assessment to improve the application of management plans and optimise the air quality monitoring networks. The risk areas proposed by scientific criteria in the Madrid Autonomous Region can be adjusted to other operational criteria following a framework equivalent to other air quality networks.

### 1. Introduction

Environmental air pollution is one of the main causes of respiratory diseases and mortality worldwide (Landrigan et al., 2018), and bioaerosols are a major component of air quality. Within bioaerosols, aeroallergens are the most important cause of allergic respiratory diseases and represent a major public health concern which affects between 15 and 40% of the European population (European Academy of Allergy and

Clinical & Immunology, 2015; Pawankar, 2014; Zubeldia et al., 2021). Since 72% of the European population lives in cities, and because urban areas are a very important source of air pollution (Khomeenko et al., 2021), air quality monitoring networks have intensified their efforts in large metropolitan areas, also in the case of bioaerosol monitoring (Borge et al., 2022; Buters et al., 2018).

Allergic respiratory diseases are primarily dependent on the seasonal occurrence of pollen and fungal spores, the main source of aeroallergens

<sup>☆</sup> This paper has been recommended for acceptance by Pavlos Kassomenos.

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [jesrojo@ucm.es](mailto:jesrojo@ucm.es) (J. Rojo), [patcervi@ucm.es](mailto:patcervi@ucm.es) (P. Cervigón), [zferenco@ucm.es](mailto:zferenco@ucm.es) (Z. Ferencova), [angecasc@ucm.es](mailto:angecasc@ucm.es) (Á. Cascón), [javiergalandiaz@gmail.com](mailto:javiergalandiaz@gmail.com) (J. Galán Díaz), [jromer09@ucm.es](mailto:jromer09@ucm.es) (J. Romero-Morte), [ssabarie@farm.ucm.es](mailto:ssabarie@farm.ucm.es) (S. Sabariego), [mtm@ucm.es](mailto:mtm@ucm.es) (M. Torres), [montseg@ucm.es](mailto:montseg@ucm.es) (A.M. Gutiérrez-Bustillo).

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123385>

Received 8 November 2023; Received in revised form 12 January 2024; Accepted 16 January 2024

Available online 17 January 2024

0269-7491/© 2024 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

in outdoor environments (Grewling et al., 2023), so the exacerbation of allergic symptoms due to pollen follows a strongly seasonal pattern (Wecker et al., 2023). Aerobiological monitoring networks must therefore provide high-resolution and up-to-date temporal and spatial estimates of the occurrence and intensity of pollen exposure to support the increasing number of allergy sufferers (Adams-Groom et al., 2020; Pecero-Casimiro et al., 2020). However, pollen is often insufficiently sampled from a spatial point of view, or the aerobiological stations do not cover the entire phytogeographical range of the aerobiological networks (Oteros et al., 2019a).

Despite its importance for public health, pollen is a largely underestimated component of the air quality. While the regulation of inorganic air pollution is well defined, there is a gap in the legislation regarding the biological content of air pollution. In the case of pollen, this is a consequence of the ubiquitous nature of pollen grains in the air (Cruden, 2000), which leads to think that pollen allergy is the consequence of a natural process and its incidence in the urban landscape cannot be addressed by managers and policy makers. However, pollen grains are released from both natural and human-managed sources (e.g. agricultural lands, urban green areas, etc.) (Bosch-Cano et al., 2011; Cariñanos et al., 2020; Rojo et al., 2015), so the impacts of allergenic pollen sources should be considered in urban and landscape planning policies and included in legislative frameworks (Cariñanos and Casares-Porcel, 2011).

We argue that areas of pollen exposure and risk mapping could be defined similarly to the approach to air quality zones proposed by European legislative policy. For instance, Directive 2008/50/EC encourages the definition of air quality zones based on the dynamic of inorganic pollutants to improve the application of management plans and optimise the existing air quality monitoring networks (Borge et al., 2022). This same approach would be a key step towards applying preventive measurements and encouraging self-care strategies in public health using homogeneous areas of pollen exposure (Pecero-Casimiro et al., 2019). Numerous studies in aerobiology have modelled airborne pollen concentrations based on pollen sources (Lugonja et al., 2019; McInnes et al., 2017). This important relationship between pollen sources and pollen emission allows pollen exposure to be modelled at the city level by land-use regression approaches using an adequate inventory of sources (Hjort et al., 2016). At a larger geographical scale, clustering analyses have hierarchically classified pollen emission areas based on different pollen dispersal patterns (Fernández-Rodríguez et al., 2020; Makra et al., 2016; Rojo et al., 2021). This classification approach can be used to apply a regionalisation of pollen risk in the area of the Madrid Autonomous Region based on potential pollen sources.

According to the report Alergológica 2015 Ojeda et al., (2018), pollen is responsible for 65.6% of cases of allergic asthma in Spain. Grass pollen (from the Poaceae family) is the main cause of pollen allergy worldwide, and for this reason, this morphological pollen type has received great interest from a clinical point of view (García-Mozo, 2017). In the Mediterranean region, and the Madrid Autonomous Region in particular, the second most common cause of allergy in the population sensitised to pollen is usually olive pollen (from *Olea europaea* species) due to the allergenicity potential of olive allergens and the abundance of olive trees (D'Amato et al., 2007). Other relevant allergenic species, such as cypresses (Cupressaceae family) and plane trees (*Platanus* genus) have been widely planted in Mediterranean cities (Cariñanos et al., 2020; Charpin et al., 2017), leading to a rise in pollen exposure to these species in recent years (Lara et al., 2020). Species of the taxa *Plantago*, Urticaceae, *Rumex* and Amaranthaceae are important herbaceous weed species from an allergenic point of view (Grewling et al., 2023). Other pollen taxa are relevant due to their high incidence and ecological interest (Bogdziewicz et al., 2020; Fernández-González et al., 2021).

The pollen concentrations of the most allergenic taxa in the Madrid Autonomous Region have been continuously monitored over the last thirty years thanks to the work of the Madrid Region Palynological

Network, a pioneering monitoring network established in 1994 in central Spain and part of the Madrid Region's Asthma Prevention and Control Programme ([www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen](http://www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen)). This air quality monitoring network is the result of the cooperation between several public institutions: the Madrid Regional Government, the Complutense University of Madrid, and eight city councils in the Madrid Region (Alcalá de Henares, Alcobendas, Aranjuez, Coslada, Getafe, Leganés, Las Rozas and Madrid). Using these data, our objectives were i) to characterise the periods of occurrence and incidence of the most relevant pollen types in the Madrid Autonomous Region using the pollen calendar as a tool for information in public health; ii) to relate the pollen spectra in the sampling stations in the Madrid Region Palynological Network with potential pollen sources; and iii) to delineate areas of aerobiological risk based on homogeneous zones in the Madrid Autonomous Region with similar patterns of exposure to the most important pollen types.

## 2. Methods

### 2.1. Study area

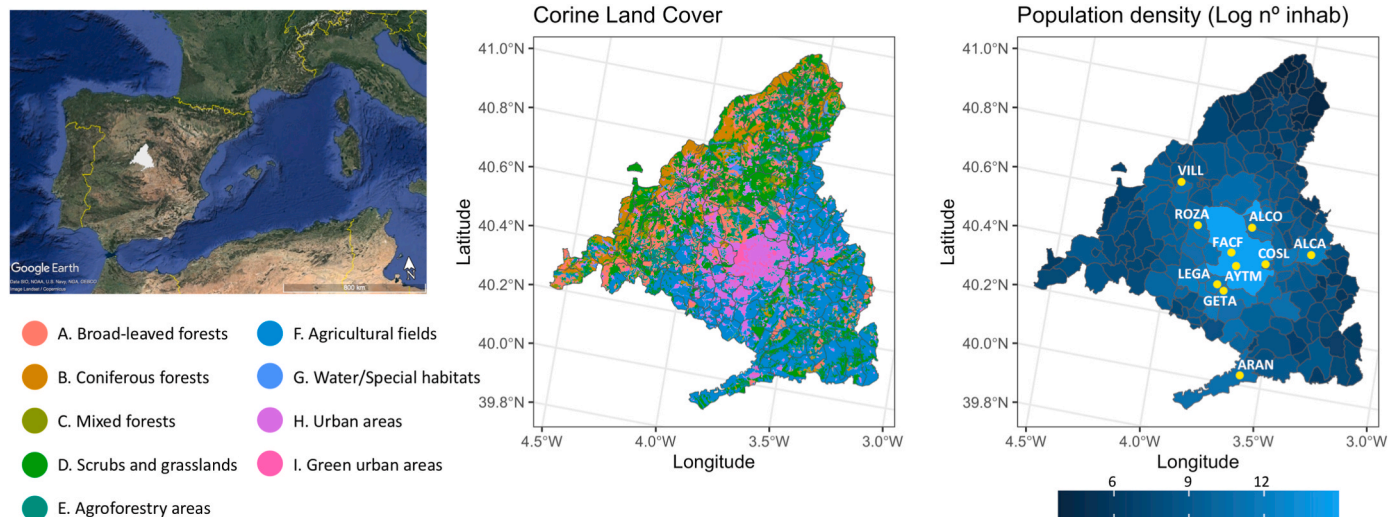
The study was carried out in the Madrid Autonomous Region (henceforth Madrid Region) located in the central Iberian Peninsula. The Madrid Region includes the city of Madrid (capital of Spain), one of the most populated and intensively urbanised metropolitan areas in Europe (6,751,251 inhabitants in 2021 according to the Spanish National Institute of Statistics). The southeast portion of the study region has the lowest altitude (minimum altitude of 476 m a.s.l.) and is dominated by agricultural fields. The west and northwest of the region include the Guadarrama mountain range, which has a maximum altitude of 2428 m a.s.l. and is dominated by forests, scrubs and grasslands (Fig. 1).

The Madrid Region Palynological Network is coordinated by the Directorate-General for Public Health in the Madrid Region and the scientific management is carried out by the Aerobiology Group at the Faculty of Pharmacy of the Complutense University of Madrid (Cervigón Morales, 2005). The network has ten public aerobiological stations which cover an area that includes 80% of the region's population. Two of these stations are located in the city of Madrid (the Arganzuela district AYTMA, and the Complutense University FACH), and the rest in other eight cities in the region (Alcalá de Henares ALCA, Alcobendas ALCO, Aranjuez ARAN, Coslada COSL, Getafe GETA, Leganés LEGA, Las Rozas ROZA and Collado Villalba VILL).

### 2.2. Aerobiological data

This study was based on the historical database of the Madrid Region Palynological Network (data openly available from the Madrid Region's OpenData Catalogue, <https://datos.comunidad.madrid/>). The aerobiological data in this study consist of pollen concentrations for the period 1994–2022 expressed as pollen grains per cubic metre of air which were obtained following the international standardised methodology for sampling and analysis of bioaerosols using the volumetric Hirst method (Galán et al., 2014; UNE-EN 16868, 2020). The Madrid/Arganzuela, Collado Villalba and Las Rozas stations began sampling later, in 1997, 1999 and 2009 respectively. The complete aerobiological database was checked using the quality control function implemented in the 'Aerobiology' R package used for managing aerobiological databases (Rojo et al., 2019). Years with many missing observations as result of mechanical or human failure were removed from the original database to reduce their impact on the analysis (Fig. S1, Supplementary Material).

Seventy-six morphological pollen types were identified in the complete database, but only the fifteen most abundant pollen types were used for the aerobiological characterisation of the stations (according to their relative abundance in the air): *Acer*, Amaranthaceae, Cupressaceae (including Taxaceae), *Fraxinus*, Moraceae, *Olea*, Pinaceae, *Plantago*,



**Fig. 1.** Left: location of the study area in Spain. Centre: main land uses found in the region according to the 2018 Corine Land Cover product. Right: population density and location of the aerobiological stations in the Madrid Autonomous Region. Abbreviations: ALCA Alcalá de Henares, ALCO Alcobendas, ARAN Aranjuez, AYTM Madrid/Arganzuela, COSL Coslada, FACF Madrid/University, GETA Getafe, LEGA Leganés, ROZA Las Rozas, VILL Collado Villalba. © European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2023, European Environment Agency.

*Platanus*, Poaceae, *Populus*, *Quercus*, *Rumex*, *Ulmus* and *Urticaceae*. The pollen calendar representation was used to characterise the aerobiological spectrum by station. In this work, the pollen calendar was based on the calculation of daily pollen concentration quantiles for each day of the year in a moving time window over the complete pollen time series (1994–2022), following the methodology proposed by Gehrig et al. (2018). The pollen amount values were then converted into categorical pollen levels based on thresholds (for pollen risk classification) derived from a quantile analysis of data from all the sampling stations in the Madrid Region. This parameterisation allows the pollen spectrum per station to be translated into a matrix with the number of days of risk per month and pollen type, which was then used to classify the sampling stations based on pollen characteristics.

### 2.3. Land-use data

Land-use configuration and vegetation distribution around the sampling stations were analysed using the 2018 Corine Land Cover product (Copernicus Land Monitoring Service, 2023). The spatial information was reclassified in ten main units to better interpret the potential pollen sources: broad-leaved forests, coniferous forests, mixed forests, scrubs and grasslands, agro-forestry areas, agricultural fields, urban areas, green urban areas and, water and special habitats (mainly sparsely vegetated areas). For each land-use unit, the abundance and distribution was estimated in relative abundance (%) using a concentric ring analysis based on four rings around the locations of the sampling stations (0–1, 1–5, 5–15 and 15–30 km) (Suarez-Suarez et al., 2023). This parameterisation allows the land-use configuration per station to be translated to a matrix with the percentage of land-use surface by distance, which was used to classify the sampling stations based on land-use characteristics.

### 2.4. Statistical analysis

Sampling stations were classified using an agglomerative clustering analysis following two different approaches: i) based only on pollen characteristics from the pollen matrix, or ii) based only on land-use characteristics from the land-use matrix, as calculated in the previous section. Agglomerative clustering follows two consecutive steps: i) calculation of the distance matrix between stations, and ii) classification of the stations in clusters using the distance information. Both steps were

conducted using the 'stats' R package (R Core Team, 2023). The two dendrograms resulting from the pollen and land-use classifications were compared using the correlation and entanglement measurements, in both cases ranging between 0 and 1. Correlation measures near to 1 means similar cophenetic distances between two dendrograms, and entanglement measures near to 0 show a good alignment of the dendrograms. The 'dendextend' R package was used to compare the dendrograms (Galili, 2015).

Different combination of methods to calculate the distance matrix (e.g. *Canberra*, *Euclidean*, *Manhattan* or *maximum*) and classify the objects in clusters (e.g. *average*, *centroid*, *complete*, McQuitty, *median*, *single* or *Ward*) can affect the interpretations of the results. We therefore compared correlation (original vs cophenetic distance) and entanglement measures between pollen and land-use dendrograms to select the optimal approach, prioritising the correlation measurements. In this study, we selected the 'Euclidean' distance and 'single' agglomeration providing the best results (one of the highest correlation measures within and between dendrograms, and one of the lowest entanglement measure between dendrograms) (Table S1, Supplementary Material). We used a k-means clustering to classify the sampling stations in multiple groups based on similarity (Figs. S2–S3, Supplementary Material). The optimal number of clusters was estimated using the stabilisation of the curve of total within-cluster sum of squares implemented in the 'factoextra' R package (Kassambara and Mundt, 2020).

### 2.5. Environmental risk areas

The relationship between the airborne pollen dynamics and the spatial configuration of the pollen sources around the sampling stations (evaluated by comparing both dendrograms) allows environmental risk areas to be delineated following aerobiological criteria. For this purpose, the same analysis of land-use characterisation performed for the stations in the Madrid Region Palynological Network was carried out for the centroids of the 1 km cell of a raster for the entire Madrid Region. A k-means clustering was then conducted to classify the pixels in multiple groups based on the similarity of the pollen source distribution, in the same way as in the previous section (Fig. S4, Supplementary Material).

### 2.6. Long-term changes of the environmental risk areas

The complete sampling period was split into two proportional

periods: from 1994 to 2008 and from 2009 to 2022. Then, we applied the same procedure described for clustering the land-use data and the historical pollen data in both periods. We assigned the Corine Land Cover data of the year 2000 to the first period, and the classification of 2018 to the second. The comparison between both periods, 1994–2008 and 2009–2022, is included in Supplementary Material (Figs. S5–S10).

### 3. Results

#### 3.1. Analysis of pollen sources

Most of the sampling stations in the Madrid Region Palynological Network are located in an intensely urbanised environment. Urban areas and green urban areas were the main land-use units covering the first ring (0–1 km) around the samplers. Only Las Rozas (ROZA) and Collado Villalba (VILL) have significant areas covered by broad-leaved forests, scrubs, grasslands and agro-forestry areas in the vicinity of the sampler (Fig. 2).

A greater diversity of land-use units and vegetation types was observed in the second ring (1–5 km). Madrid/University (FACF) and Madrid/Arganzuela (AYTM) were the only stations with an almost exclusive presence of urban areas and green urban areas within this ring. In fact, the land-use configuration and vegetation distribution around the stations FACF and AYTM were very similar in the entire area (to 30 km from the location of the sampler). Getafe (GETA) and Leganés (LEGA) also shared a very similar vegetation distribution throughout all the spatial rings.

ROZA and VILL are the sampling stations located furthest north and west of the territory, and this was reflected in the high proportion of surface covered by natural vegetation (forests, scrubs and grasslands) compared to the rest of the stations in the Madrid Region (Fig. 2). Although ROZA and VILL showed very similar land-use patterns in their surroundings, VILL had a larger surface of coniferous forests and ROZA a larger surface of urban areas and agricultural fields. The sampling station of Aranjuez (ARAN) stood out for its larger surface of agricultural fields because of its location in the southeast of the Madrid Region.

#### 3.2. Airborne pollen spectra

The airborne pollen spectrum of each sampling station served to summarise the phenology and intensity of the occurrence of the main pollen types. Fig. 3 shows the pollen calendar for three sampling sites with a very different pollen source distribution, as reflected in the pollen

dynamics: i) Aranjuez (ARAN), a mainly agricultural environment; ii) Madrid/University (FACF), an urban setting; and iii) Las Rozas (ROZA), mostly surrounded by forests. We found a great influence of ornamental plants in the three locations, represented by the high proportion of *Platanus* and Cupressaceae pollen. The FACF and ARAN stations showed a notable relative abundance of *Platanus* pollen; while the most abundant pollen type in the ROZA station was *Quercus*; *Fraxinus* and Pinaceae also showed a higher pollen intensity compared to the other stations. ARAN was characterised by a higher relative abundance of *Olea* pollen.

Herbaceous pollen types such as Poaceae, *Plantago*, *Rumex* and Urticaceae showed fewer high-risk days, and a shorter period of risk in the case of the FACF station. It is particularly worth noting the number of high-risk days (quantiles 99 and 99.5%) for these allergenic herbaceous pollen types in the ROZA station (pollen levels for each pollen type in Table S2; Supplementary Material). The length of the risk period for Amaranthaceae pollen was also noteworthy in ARAN compared to a very reduced season in the ROZA and FACF stations (Fig. 3).

#### 3.3. Clustering of sampling stations

The land-use and airborne pollen distance matrices (Fig. 4A and B) showed very similar patterns. We detected a large group of stations which shared both land-use and pollen patterns, including: Coslada (COSL), Alcobendas (ALCO), Leganés (LEGA), Getafe (GETA), Madrid/Arganzuela (AYTM) and Madrid/University (FACF). The greatest similarities were observed between pairs LEGA-GETA and AYTM-FACF, and also ALCO-FACF for the airborne pollen classification. The most different pairs of sampling stations were Collado Villalba (VILL), Las Rozas (ROZA) and Aranjuez (ARAN). Alcalá de Henares (ALCA) was the station that showed the greatest discrepancies between the land-use and pollen distance matrices (Fig. 4).

We found a good alignment between the land-use and pollen dendrograms (Fig. 5), with a very high correlation (0.95) and very low entanglement (0.27) between dendrograms, which indicates a close correspondence between the distribution of the potential pollen sources and the airborne pollen dynamics of the sampling stations. The complete agglomerative clustering process and k-means partitioning clustering can be seen in Figs. S2 and S3 of the Supplementary Material.

The similarities found among ALCO, COSL, GETA, LEGA, FACF and AYTM motivate the inclusion of all these stations in a single large cluster, although the pairwise relationships between these stations revealed certain discrepancies between the land-use and pollen dendrograms within this group (Fig. 5). The rest of the stations (ALCA,

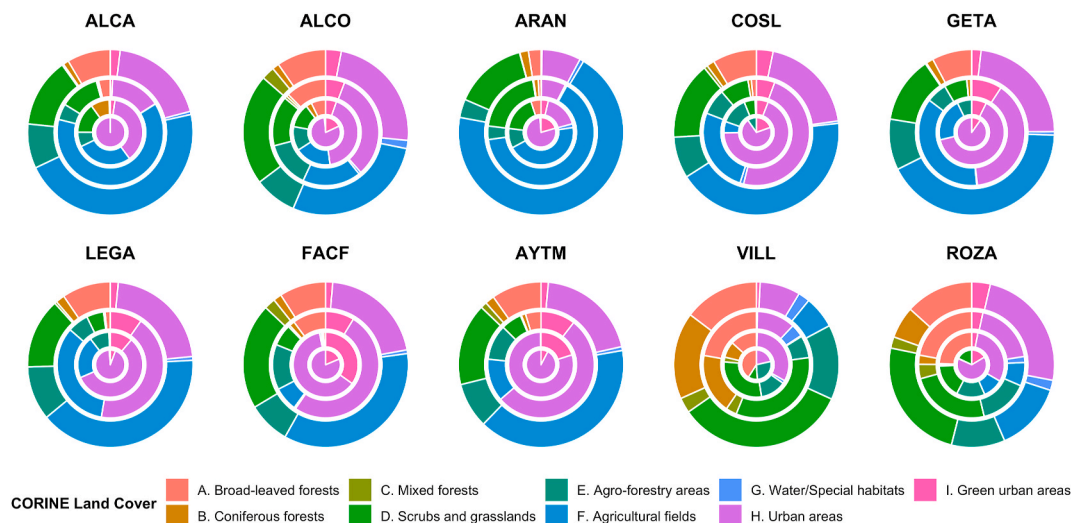
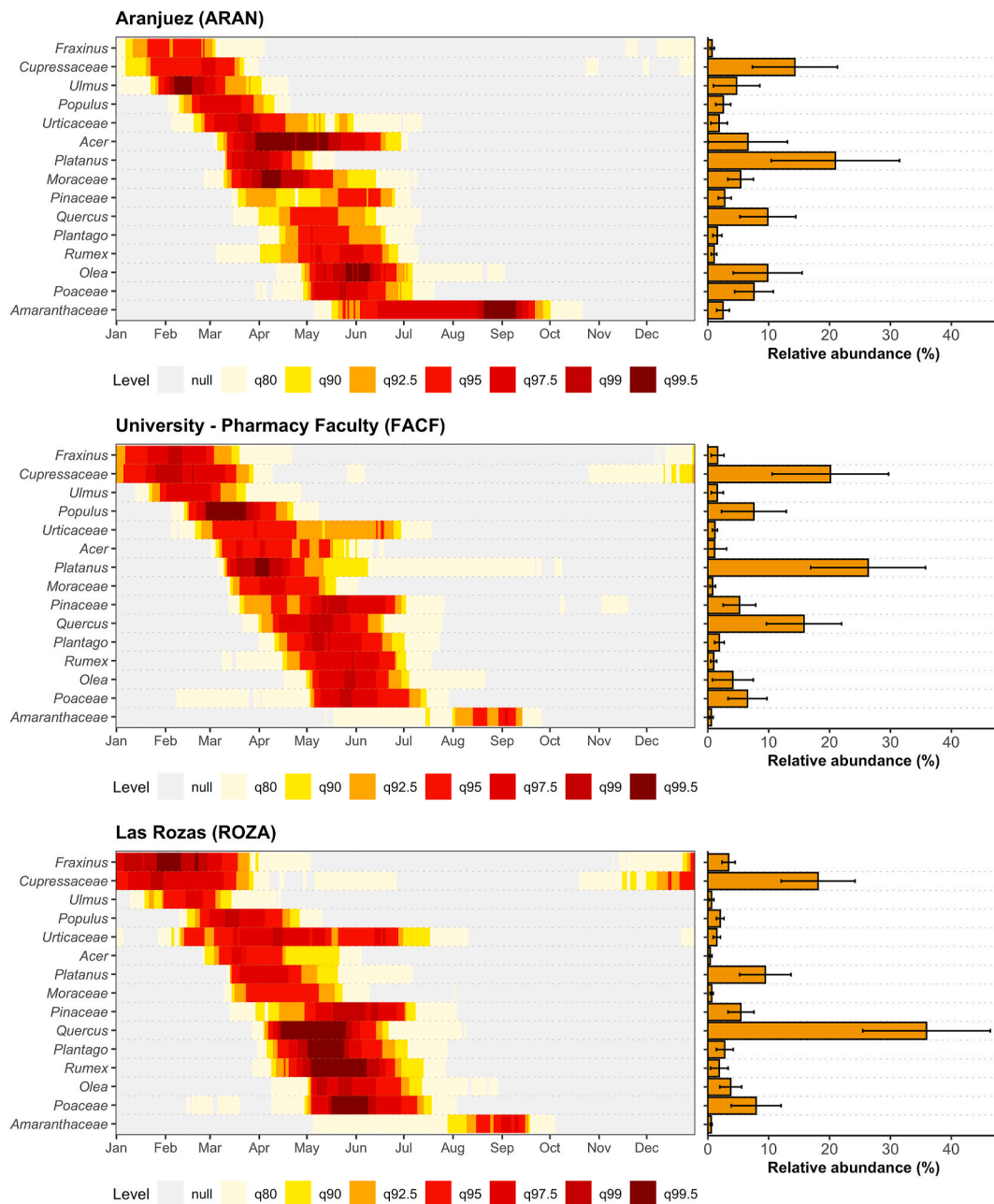


Fig. 2. Relative abundance (%) of land-use and vegetation categories around the sampling stations (1, 5, 15 and 30 km). Abbreviations of sampling stations in Fig. 1. © European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2023, European Environment Agency.



**Fig. 3.** Pollen calendar and relative abundance for three sampling stations with contrasting pollen source distribution: Aran juez (ARAN), Madrid/University (FACF) and Las Rozas (ROZA).

ROZA, ARAN and VILL) were different enough to justify assigning them to one single cluster for each station.

Each cluster of stations was characterised by a particular airborne pollen dynamic. Fig. 6 shows the average pollen curves of the main allergenic pollen types in the Madrid Region for each cluster of stations: Cupressaceae, *Platanus*, *Olea*, Poaceae and *Plantago* pollen types. *Quercus* pollen was also analysed due to the great interest in forestry. The Cupressaceae pollen type includes very diverse taxa with native and allochthonous species, most of them subjected to human management practices. This explains why the phenological pattern of the Cupressaceae pollen curve in VILL and ROZA occurs earlier, and later in ALCA and ARAN. The *Platanus* pollen curve had a highly explosive character and occurred at the same time in all stations, but with differences in pollen intensity. The most intense pollen peak of *Platanus* was observed in the most urbanised stations (ALCA, ALCO, COSL, GETA, LEGA, FACF, AYT M), while the most intense amounts of *Olea* pollen were obtained in

ARAN, and the least intense amounts in VILL (Fig. 6).

Higher amounts of herbaceous pollen such as Poaceae and *Plantago* were recorded in the ROZA cluster. Both pollen types followed a very similar pattern with significant phenological differences between clusters. The pollen amounts of *Quercus* were remarkably high in ROZA and VILL, and minimal in ARAN (Fig. 6). A clear phenological sequence can also be seen in the *Quercus* pollen curve for the different clusters.

### 3.4. Environmental risk areas

The territory in the Madrid Region was divided into six areas of aerobiological risk based on the potential pollen sources (Fig. S4; Supplementary Material). The ordination of the aerobiological risk areas by k-means clustering showed a clear anthropogenic gradient represented very adequately on the x-axis of the ordination space, with clusters covering urbanised and agricultural areas located on the left and clusters

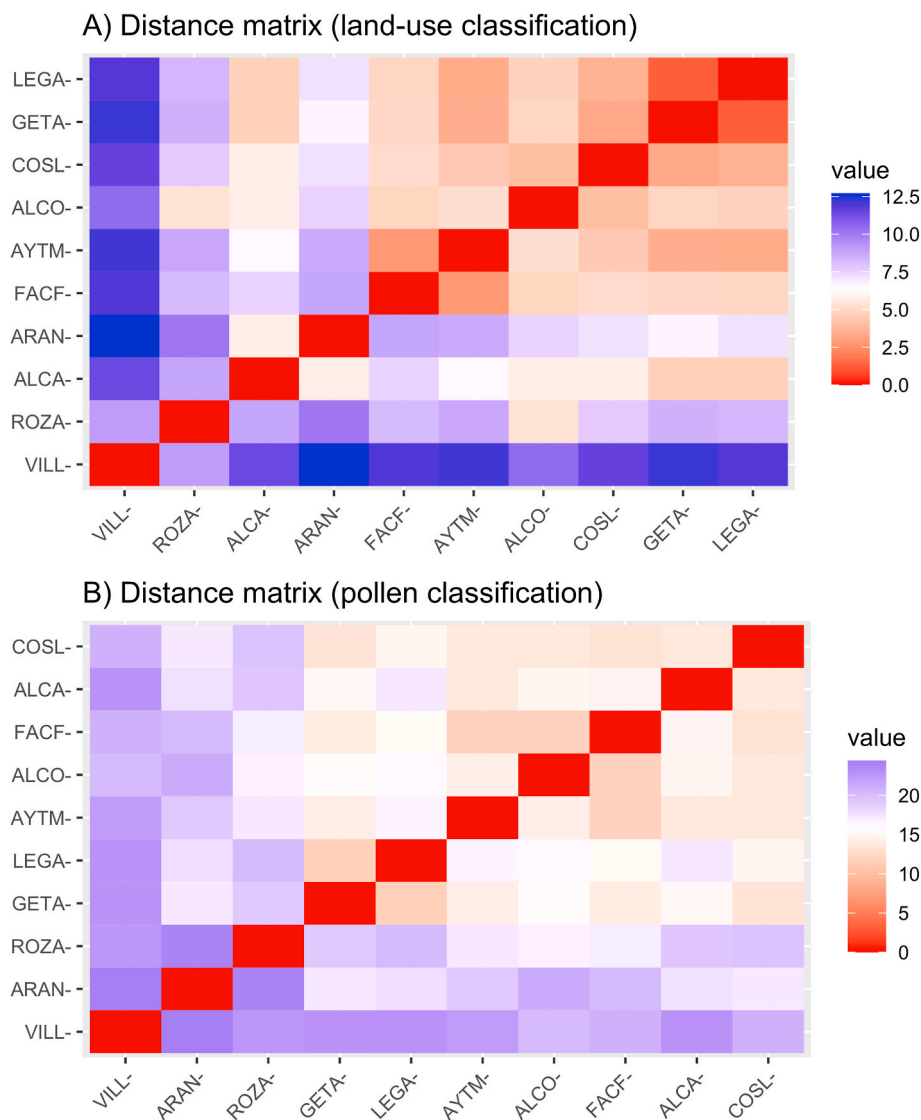


Fig. 4. Distance matrices based on (A) land-use and vegetation and (B) pollen characteristics of the sampling stations. Abbreviations of sampling stations in Fig. 1.

covering natural areas on the right of the scatterplot (Fig. 7).

The results of the regional classification (Fig. 7) coincided with those of the classification by sampling stations (Fig. 5). Our analysis identified one cluster in the centre of the Madrid Region which was characterised by the most urbanised areas and included the stations of ALCA, ALCO, COSL, GETA, LEGA, FACF and AYTm. A second large cluster covered the south and southeast of the region and was dominated by agricultural lands (represented in the Madrid Region Palynological Network by the ARAN station). Another three clusters were defined in the most natural environment of the Madrid Region (west and northwest of the region); VILL station is located in one of these clusters. Finally, a transitional cluster including the ROZA station was defined between the most urbanised and natural areas of the region.

#### 4. Discussion

In this study, we spatially delimited the aerobiological risk areas in the Madrid Region (central Spain) based on the land-use and vegetation configuration of the potential pollen sources across the study region. We identified different areas characterised by specific features of pollen exposure:

- **Area 1** (centre of the Madrid Region) is characterised by very intensive urbanised zones with a very significant pollen exposure from allergenic ornamental plants (allochthonous species of the Cupressaceae family and *Platanus* genus) planted in green urban areas.
- **Area 2** (east and southeast of the Madrid Region) is dominated by agricultural lands. *Olea* pollen exposure represents one of the most important allergenic risks in this area. The herbaceous pollen risk is also noteworthy, mainly from species in the families Poaceae and Amaranthaceae. The phenological patterns of most of the allergenic species are considerably advanced because of the influence of lower altitudes.
- **Area 3** is a transitional area dominated by grasslands and open agroforestry areas with a greater pollen exposure from herbaceous allergenic species in the family Poaceae and the genus *Plantago*. Pollen levels from forest species are particularly significant (species in the genera *Quercus*, *Fraxinus*, etc.).
- **Area 4** (west and northwest of the Madrid Region) is the most heterogeneous area and covers three natural zones in the Guadarrama mountain range. There is a high representation of pollen from species in the genera *Quercus* and *Fraxinus*, and the families Cupressaceae and Pinaceae. The phenological patterns of most of the allergenic species is considerably delayed due to the influence of higher altitudes.

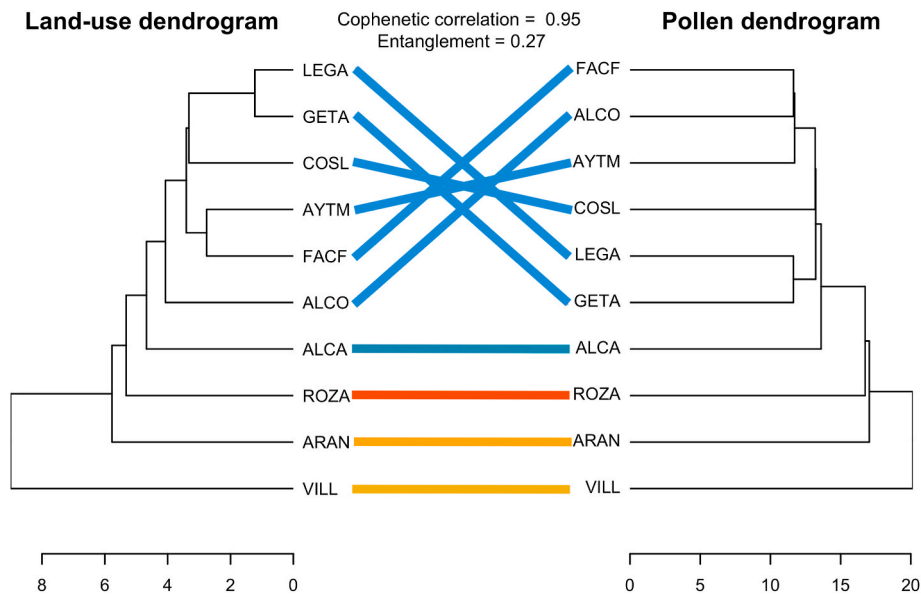


Fig. 5. Comparison of the land-use and airborne pollen dendrograms of the sampling stations. Abbreviations of sampling stations in Fig. 1.

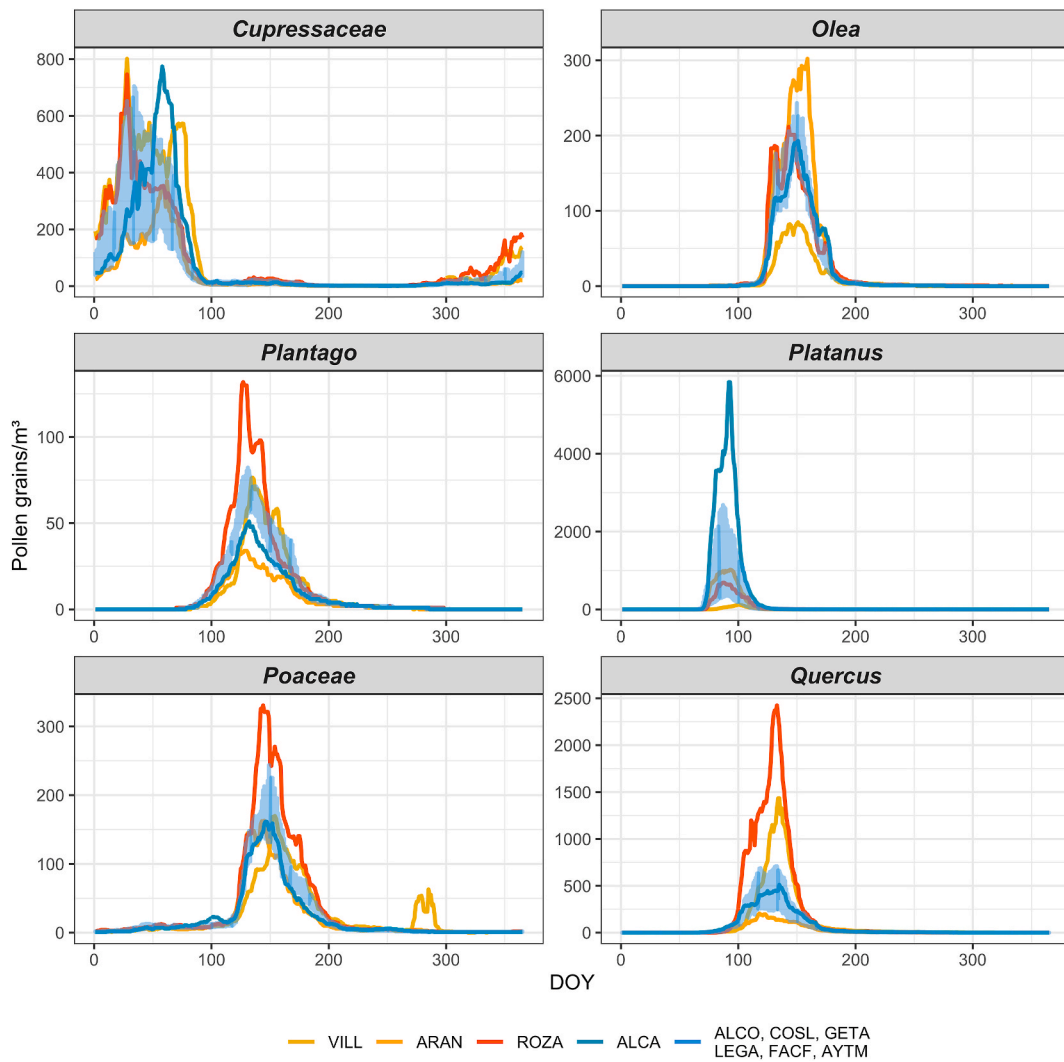


Fig. 6. Airborne pollen curves for the different clusters. The pollen types considered are the most important from an allergenic and forestry point of view. In the cluster composed by ALCO, COSL, GETA, LEGA, FACF and AYTM the curve is shown as a surface between the minimum and maximum values. Abbreviations of sampling stations in Fig. 1.

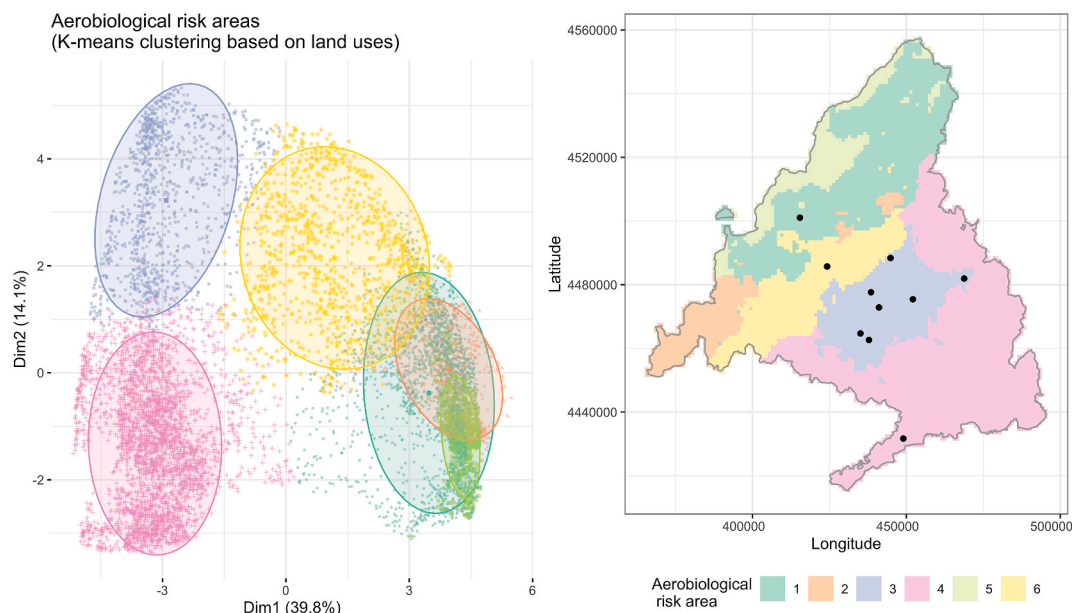


Fig. 7. Definition of six areas of aerobiological risk in the entire Madrid Region by k-means partitioning clustering based on the pollen source regional classification.

The delimitation of aerobiological risk areas in the Madrid Region constitutes an interesting tool for the resident and visiting population of one of the largest metropolitan areas in Europe. Two crucial characteristics of pollen risk must be considered to inform the allergic population about their exposure to aeroallergens, namely the length and intensity of exposure (Zhang and Steiner, 2022; Ziska et al., 2011). Both characteristics determine the airborne pollen dynamic of a specific territory, which can be parameterised and clearly represented in a pollen calendar (Abbas et al., 2012; Rojo et al., 2016; Shin et al., 2020; Werchan et al., 2018).

The length of pollen exposure depends on the phenological patterns of plants, which is determined by the diversity of species represented by a particular morphological pollen type. While Cupressaceae or Poaceae pollen exposure is characterised by numerous pollen peaks over a long period of time as a consequence of the sequential pollination of numerous species (Charpin et al., 2017; Romero-Morte et al., 2018), *Platanus* or *Olea* pollen exposure generally occurs during a shorter time window (Lara et al., 2019; Sabariego et al., 2008). Specifically, the *Platanus* pollen curve, which comes from one species planted in cities (*Platanus x hispanica* Mill. ex Münchh), showed a highly synchronised pattern across the risk areas in the Madrid Region, but with important differences in pollen magnitude. Another important factor influencing the length of pollen exposure is the meteorological gradient associated to topographical features, such as the altitude where pollen sources are distributed. *Olea* pollen is very illustrative of this behaviour in a wide geographical profile (Oteros et al., 2013). Pollen load (intensity), however, depends mainly on the abundance of the sources, and the characteristics of land-use and vegetation distribution strongly determine the airborne pollen spectrum for a specific territory (Rojo et al., 2015; Šikoparija et al., 2018). Significant changes in pollen magnitude have been observed between the aerobiological risk areas in arboreal pollen types such as *Platanus* and *Quercus*, highlighting the differences in plant landscape between sampling stations.

Our findings show that the abundance and distribution of potential pollen sources permit an accurate prediction of the length and intensity of the general pattern of pollen exposure. This novel framework illustrates how the analysis of the main pollen sources allows the identification of the main aerobiological risk areas, using as an example the Madrid Region. The definition of aerobiological risk areas based on bioaerosol dynamics goes beyond simple public health information for the allergic population. While the European legislation (European Air

Quality Directive, 2008/50/EC) requires the Member States to define air quality zones based on the dynamic of inorganic pollutants and administrative criteria, the delineation of biological air quality zones is a step towards the management of air quality in the Madrid Region when there is still a considerable gap in the legislation governing the biological content of pollution. Just as the air quality zones for inorganic pollution lead to a better application of management plans and assessment of monitoring measurements, areas of aerobiological risk allow preventive strategies to be enacted in homogeneous areas based on aeroallergen exposure (Maya-Manzano et al., 2017).

Our approach for the delineation of aerobiological risk areas in the Madrid Region is one of the first attempts at this geographical scale. Numerous important modelling targets have been achieved in pollen mapping for individual pollen taxa following statistical and process-based approaches at the national or international scale in order to perform short-term predictions and historical reconstructions (Shokouhi et al., 2023; Sofiev et al., 2017; Verstraeten et al., 2022). A large number of previous studies have also been carried out in order to generate city-scale aerobiological risk maps based on very intensive inventories of pollen sources (Dbouk et al., 2022; Katz et al., 2023; Pecero-Casimiro et al., 2019). Here, we present a proposal to characterise homogeneous aerobiological risk areas at a regional scale for management purposes.

The notion of spatial regionalisation in environmental risk assessments is not new (Makra et al., 2016; Neumann et al., 2019; Russo et al., 2020), and the regionalisation of pollen information is standard practice in the presentation of pollen calendars and pollen forecasts (Adams-Groom et al., 2020; Lake et al., 2017; Pecero-Casimiro et al., 2020; Ren et al., 2022). Recently, a new air quality zoning based on inorganic pollutants was proposed for the Madrid Region by Borge et al. (2022), following the guidelines of the European legislation (Directive, 2008/50/EC). This zoning is closely aligned with our proposal for biological air quality zoning despite the very different origin and nature of the pollutants.

In view of the findings of this study, we suggest some recommendations for the optimal location of monitoring sampling stations. The optimisation of the Madrid Region Palynological Network is very important for the efficient use of public resources. An over-representation of pollen monitoring has been detected in urban areas, which is unsurprising as most people reside in cities where air quality monitoring is intensified (Khomenko et al., 2021). Clustering techniques allow the identification of redundancy in monitoring efforts, and

likewise, important aerobiological monitoring gaps can be detected in undersampled aerobiological areas. This is the case of the most heterogeneous aerobiological risk areas located in the northwest of the Madrid Region, whose aerobiological monitoring could have an ecological rather than a clinical interest (Bogdziewicz et al., 2020; Picornell et al., 2019).

The results of this work will also be useful for the future design of an automatic aerobiological network. Over the past few years, several automatic devices have been presented as very promising advances for aerobiological monitoring for their ability to generate real-time information with a low maintenance cost (Maya-Manzano et al., 2023; Oteros et al., 2020; Tummon et al., 2021). The transition from a manual aerobiological network based on Hirst devices to a hybrid or automatic monitoring network also requires the optimisation of the number and location of sampling stations to study biological air quality in a more efficient and representative way (Oteros et al., 2019b; Sofiev et al., 2023). The findings of this study are very valuable for selecting the most useful aerobiological stations to be maintained in the future automation of the Madrid Region Palynological Network.

We should point out some uncertainties in this work. First, the applicability of our approach and the clustering algorithm relies on the number of available stations. The Madrid Region Palynological Network was designed to cover the area where 80% of the region's population resides. For this reason, the aerobiological sampling is mainly oriented towards highly urbanised areas, whereas other environments are undersampled. This overrepresentation of urban areas leads to the formation of a large group that includes multiple sampling stations in the network. A second limitation of the study is the difficulty in establishing a correspondence between certain pollen types and specific land-use classes. It is not easy to relate potential pollen sources for pollen types that come from diverse and ubiquitous species (Picornell et al., 2023). This limitation has been addressed using an unsupervised clustering approach which does not require prior knowledge of the classification criteria (Borge et al., 2022). An integrative definition of aerobiological risk areas would also require the analysis of other bioaerosols such as bacteria, fungal spores, etc. (Myszkowska et al., 2023; Yao, 2018). However, the identification of the potential sources of these aerosols is not operational at a large scale because in most cases they are restricted to indoor environments.

Finally, the methodology used for airborne pollen characterisation by means of the aerobiological spectrum for several decades is based on the study of the general patterns of the airborne pollen, in the same way to other similar approaches (Oteros et al., 2015). The events of the short and long-distance pollen transport as well as year-to-year pollen intensity could influence the periods of the pollen risk in the short term (Ghasemifard et al., 2020; Myszkowska et al., 2021), although it is smoothed when we consider long-term general patterns. Due to the aforementioned, the characterisation of the airborne pollen spectrum requires a long-time period historical database for at least 15 years (Fu et al., 2016). This number of years can be considered as indicative for the application of this approach to similar monitoring networks together with having an appropriate number of stations in relation to the size of the region. However, the objective of the research can determine the number of years considered in the analysis. A comprehensive analysis of the effects of global change (e.g. land-use transformation, climate change) in the patterns of environmental risk areas would require splitting the historical pollen time series to analyse changes in different time periods, as showed in Supplementary Material (Figs. S5–S10).

## 5. Conclusions

Spatial regionalisation in environmental risk assessment is a common practice among institutions responsible for managing public health systems. It favours the application of management plans and assessment monitoring measurements and allows the optimisation of resources and funds. This study proposes the delineation of six aerobiological risk

areas in the Madrid Region based on the abundance and distribution of potential pollen sources, whose relationship with the airborne pollen exposure is analysed using the aerobiological sampling stations in the Madrid Region Palynological Network. The risk areas proposed in the Madrid Region by scientific criteria can be adjusted to other operational criteria, e.g. demographic, administrative, etc., and an equivalent approach can be applied in other similar monitoring networks. Other bioaerosols could be incorporated such as outdoor airborne fungal spores (e.g. *Alternaria*), although the systematic monitoring of these aerosols by the aerobiological networks is less common. Climate change and other drivers of global change determine variations in land-use configuration and vegetation distribution that might influence changes in the aerobiological risk areas in the long term.

## Data sharing

The data used in this study are openly available in the Madrid Region's OpenData Catalogue (<https://datos.comunidad.madrid/>). The programming code in R language to generate quantile pollen calendars following the methodology of Gehrig et al. (2018) is available in GitHub ([https://github.com/jesrojo/quantile\\_pollen\\_calendar](https://github.com/jesrojo/quantile_pollen_calendar)). An interactive web application is also available at [https://jesrojocm.shinyapps.io/pcalendar\\_app2/](https://jesrojocm.shinyapps.io/pcalendar_app2/) where the user can individually adjust the parameters to generate the pollen calendar in an easy and reproducible way.

## CRediT authorship contribution statement

**Jesús Rojo:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Software, Project administration, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Conceptualization. **Patricia Cervigón:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Methodology, Investigation, Formal analysis, Conceptualization. **Zuzana Ferencova:** Writing – review & editing, Resources, Methodology, Formal analysis, Data curation. **Ángel Cascón:** Visualization, Resources, Methodology, Formal analysis, Data curation. **Javier Galán Díaz:** Writing – review & editing, Resources, Methodology, Investigation, Data curation. **Jorge Romero-Morte:** Writing – review & editing, Resources, Methodology, Data curation. **Silvia Sabariego:** Writing – review & editing, Resources, Methodology, Investigation, Formal analysis. **Margarita Torres:** Writing – review & editing, Resources, Investigation, Formal analysis. **Adela Montserrat Gutiérrez-Bustillo:** Writing – review & editing, Supervision, Resources, Project administration, Funding acquisition, Conceptualization.

## Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## Data availability

The data used in this study are openly available in the Madrid Region's OpenData Catalogue (<https://datos.comunidad.madrid/>)

## Acknowledgments

The Madrid Region Palynological Network (Palinocam Network) results from the cooperation of different public institutions: Madrid Regional Government, Complutense University of Madrid and eight city councils in the Madrid Region (Alcalá de Henares, Alcobendas, Aranjuez, Coslada, Getafe, Leganés, Las Rozas and Madrid). The authors thank all these institutions for supporting the Palinocam Network. Also, the authors would like to thank all the staff at the pollen analysis laboratories for the generation of the pollen databases. This research was funded by the Directorate-General for Public Health of the Madrid

Autonomous Region and the Directorate-General of Sustainability and Environmental Control of the Madrid city council, thanks to different agreements signed with the Aerobiology Research Group of the Faculty of Pharmacy of the Complutense University of Madrid as responsible of the scientific and technical supervision of the Palinocam Network. This study was carried out within the AIRTEC-CM (urban air quality and climate change integral assessment) scientific program funded by the Directorate General for Universities and Research of the Madrid Region (S2018/EMT-4329). JGD is supported by a Margarita Salas fellowship funded by the Spanish Ministry of Universities and the European Union-Next Generation Plan.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123385>.

## References

- Abbas, S., Katelaris, C.H., Singh, A.B., Raza, S.M., Khan, M.A., Rashid, M., Abbas, M., Ismail, M., 2012. World allergy organization study on aerobiology for creating first pollen and mold calendar with clinical significance in Islamabad, Pakistan; A Project of world allergy organization and Pakistan allergy, asthma & clinical immunology centre of Islamabad. *World Allergy Organ. J.* 5, 103–110. <https://doi.org/10.1097/WOX.0b013e31826421c8>.
- Adams-Groom, B., Ambelas Skjøth, C., Selby, K., Pashley, C., Satchwell, J., Head, K., Ramsay, G., 2020. Regional calendars and seasonal statistics for the United Kingdom's main pollen allergens. *Allergy* 75, 1492–1494. <https://doi.org/10.1111/all.14168>.
- Bogdziewicz, M., Szymkowiak, J., Bonal, R., Hacket-Pain, A., Espelta, J.M., Pesendorfer, M., Grewling, L., Kasprzyk, I., Belmonte, J., Kluska, K., De Linares, C., Penuelas, J., Fernandez-Martinez, M., 2020. What drives phenological synchrony? Warm springs advance and desynchronize flowering in oaks. *Agric. For. Meteorol.* 294, 108140. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108140>.
- Borge, R., Jung, D., Lejarraga, I., De La Paz, D., Cordero, J.M., 2022. Assessment of the Madrid region air quality zoning based on mesoscale modelling and k-means clustering. *Atmos. Environ.* 287, 119258. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119258>.
- Bosch-Cano, F., Bernard, N., Sudre, B., Gillet, F., Thibaudon, M., Richard, H., Badot, P.-M., Ruffaldi, P., 2011. Human exposure to allergenic pollens: a comparison between urban and rural areas. *Environ. Res.* 111, 619–625.
- Buters, J.T.M., Antunes, C., Galveias, A., Bergmann, K.C., Thibaudon, M., Galán, C., Schmidt-Weber, C., Oteros, J., 2018. Pollen and spore monitoring in the world. *Clin. Transl. Allergy* 8. <https://doi.org/10.1186/s13601-018-0197-8>.
- Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., 2011. Urban green zones and related pollen allergy: a review. Some guidelines for designing spaces with low allergy impact. *Landsc. Urban Plann.* 101, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.006>.
- Cariñanos, P., Ruiz-Peñuela, S., Valle, A.M., de la Guardia, C.D., 2020. Assessing pollination disservices of urban street-trees: the case of London-plane tree (*Platanus x hispanica* Mill. ex Münchh). *Sci. Total Environ.*, 139722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139722>.
- Cervigón Morales, P., 2005. Palinocam Network: airborne pollen vigilance in Madrid. *Rev. Salud Ambient* 5, 131–136. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/308>.
- Charpin, D., Pichot, C., Belmonte, J., Sutra, J.-P., Zidkova, J., Chanez, P., Shahali, Y., Sénéchal, H., Poncet, P., 2017. Cypress pollinosis: from tree to clinic. *Clin. Rev. Allergy Immunol.* <https://doi.org/10.1007/s12016-017-8602-y>.
- Copernicus Land Monitoring Service, 2023. Corine Land Cover. 2018. European Union, European Environment Agency (EEA) [WWW Document]. URL <https://land.copernicus.eu/>.
- Cruden, R.W., 2000. Pollen grains: why so many? In: Dafni, A., Hesse, M., Pacini, E. (Eds.), *Pollen and Pollination*. Springer, Vienna, pp. 143–165. [https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6306-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6306-1_8).
- D'Amato, G., Cecchi, L., Bonini, S., Nunes, C., Annesi-Maesano, I., Behrendt, H., Liccardi, G., Popov, T., Van Cauwenberge, P., 2007. Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy* 62, 976–990. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2007.01393.x>.
- Dbouk, T., Visez, N., Ali, S., Shahrouf, I., Drikakis, D., 2022. Risk assessment of pollen allergy in urban environments. *Sci. Rep.* 12, 21076. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24819-w>.
- European Academy of Allergy and Clinical Immunology, 2015. *Advocacy Manifesto Tackling the Allergy Crisis in Europe - Concerted Policy Action Needed* (Brussels, Belgium).
- Fernández-González, M., Lara, B., González-Fernández, E., Rojo, J., Pérez-Badía, R., Rodríguez-Rajo, F.J., 2021. Pinus pollen emission patterns in different bioclimatic areas of the Iberian Peninsula. *Forests* 12, 688. <https://doi.org/10.3390/f12060688>.
- Fernández-Rodríguez, S., Maya-Manzano, J.M., Colín, A.M., Pecero-Casimiro, R., Buters, J., Oteros, J., 2020. Understanding hourly patterns of Olea pollen concentrations as tool for the environmental impact assessment. *Sci. Total Environ.* 736, 139363. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139363>.
- Fu, Y.H., Piao, S., Ciais, P., Huang, M., Menzel, A., Peaucelle, M., Peng, S., Song, Y., Vitasse, Y., Zeng, Z., Zhao, H., Zhou, G., Peñuelas, J., Janssens, I.A., 2016. Long-term linear trends mask phenological shifts. *Int. J. Biometeorol.* 60, 1611–1613. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1253-5>.
- Galán, C., Smith, M., Thibaudon, M., Frenguelli, G., Oteros, J., Gehrig, R., Berger, U., Clot, B., Brandao, R., EAS QC Working Group, 2014. Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia* 30, 385–395. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9335-5>.
- Gailli, T., 2015. dendextend: an R package for visualizing, adjusting and comparing trees of hierarchical clustering. *Bioinformatics* 31, 3718–3720. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btv428>.
- García-Mozo, H., 2017. Poaceae pollen as the leading aeroallergen worldwide: a review. *Allergy* 72, 1849–1858. <https://doi.org/10.1111/all.13210>.
- Gehrig, R., Maurer, F., Schwierz, C., 2018. Designing new automatically generated pollen calendars for the public in Switzerland. *Aerobiologia* 34, 349–362. <https://doi.org/10.1007/s10453-018-9518-6>.
- Ghasemifard, H., Ghada, W., Estrella, N., Lüpke, M., Oteros, J., Damialis, A., Traidl-Hoffmann, C., Buters, J., Menzel, A., 2020. High post-season Alnus pollen loads successfully identified as long-range transport of an alpine species. *Atmos. Environ.* 117453. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117453>.
- Grewling, L., Ribeiro, H., Antunes, C., Apangu, G.P., Çelenk, S., Costa, A., Eguiluz-Gracia, I., Galveias, A., Roldan, N.G., Lika, M., Magyar, D., Martinez-Bracero, M., Ørby, P., O'Connor, D., Penha, A.M., Pereira, S., Pérez-Badía, R., Rodinkova, V., Xhetani, M., Šauliene, I., Skjøth, C.A., 2023. Outdoor airborne allergens: characterization, behavior and monitoring in Europe. *Sci. Total Environ.* 167042. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167042>.
- Hjort, J., Hugg, T.T., Antikainen, H., Rusanen, J., Sofiev, M., Kukkonen, J., Jaakkola, M. S., Jaakkola, J.J.K., 2016. Fine-scale exposure to allergenic pollen in the urban environment: evaluation of land use regression approach. *Environ. Health Perspect.* 124, 619–626. <https://doi.org/10.1289/ehp.1509761>.
- Kassambara, A., Mundt, F., 2020. Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.7. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>.
- Katz, D.S.W., Baptist, A.P., Batterman, S.A., 2023. Modeling airborne pollen concentrations at an urban scale with pollen release from individual trees. *Aerobiologia* 39, 181–193. <https://doi.org/10.1007/s10453-023-09784-9>.
- Khomenko, S., Cirach, M., Pereira-Barboza, E., Mueller, N., Barrera-Gómez, J., Rojas-Rueda, D., de Hoogh, K., Hoek, G., Nieuwenhuijsen, M., 2021. Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment. *Lancet Planet. Health* 5, e121–e134. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30272-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30272-2).
- Lake, I.R., Jones, N.R., Agnew, M., Goodess, C.M., Giorgi, F., Hamaoui-Laguel, L., Semenov, M.A., Solomon, F., Storker, J., Vautard, R., Epstein, M.M., 2017. Climate change and future pollen allergy in Europe. *Environ. Health Perspect.* 125, 385–391. <https://doi.org/10.1289/EHP173>.
- Landrigan, P.J., Fuller, R., Acosta, N.J.R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N., Nil, Baldé, A. B., Bertollini, R., Bose-O'Reilly, S., Boufford, J.L., Breyse, P.N., Chiles, T., Mahidol, C., Coll-Seck, A.M., Cropper, M.L., Fobil, J., Fuster, V., Greenstone, M., Haines, A., Hanrahan, D., Hunter, D., Khare, M., Krupnick, A., Lanphear, B., Lohani, B., Martin, K., Mathiasen, K.V., McTeer, M.A., Murray, C.J.L., Ndahimananjara, J.D., Perera, F., Potočník, J., Preker, A.S., Ramesh, J., Rockström, J., Salinas, C., Samson, L.D., Sandilya, K., Sly, P.D., Smith, K.R., Steiner, A., Stewart, R.B., Suk, W.A., Van Schayck, O.C.P., Yadama, G.N., Yumkella, K., Zhong, M., 2018. The Lancet Commission on pollution and health. *Lancet* 391, 462–512. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0).
- Lara, B., Rojo, J., Fernández-González, F., González-García-Saavedra, A., Serrano-Bravo, M.D., Pérez-Badía, R., 2020. Impact of plane tree abundance on temporal and spatial variations in pollen concentration. *Forests* 11, 817. <https://doi.org/10.3390/f11080817>.
- Lara, B., Rojo, J., Fernández-González, F., Pérez-Badía, R., 2019. Prediction of airborne pollen concentrations for the plane tree as a tool for evaluating allergy risk in urban green areas. *Landsc. Urban Plann.* 189, 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.05.002>.
- Lugonja, P., Brdar, S., Simović, I., Mimić, G., Palamarchuk, Y., Sofiev, M., Šikoparija, B., 2019. Integration of in situ and satellite data for top-down mapping of Ambrosia infection level. *Remote Sens. Environ.* 235, 111455. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111455>.
- Makra, L., Matyasovszky, I., Tusnády, G., Wang, Y., Csépe, Z., Bozók, Z., Nyúl, L.G., Erostyák, J., Bodnár, K., Sümegehy, Z., Vogel, H., Pauling, A., Páldy, A., Magyar, D., Mányoki, G., Bergmann, K.-C., Bonini, M., Šikoparija, B., Radišić, P., Gehrig, R., Seliger, A.K., Stjepanović, B., Rodinkova, V., Prikhodko, A., Maleeva, A., Severova, E., Ščevková, J., Ivanović, N., Peterel, R., Thibaudon, M., 2016. Biogeographical estimates of allergenic pollen transport over regional scales: common ragweed and Szeged, Hungary as a test case. *Agric. For. Meteorol.* 221, 94–110. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.02.006>.
- Maya-Manzano, J.M., Fernández-Rodríguez, S., Monroy-Colín, A., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., Gonzalo-Garijo, Á., 2017. Allergenic pollen of ornamental plane trees in a Mediterranean environment and urban planning as a prevention tool. *Urban For. Urban Green.* 27, 352–362.
- Maya-Manzano, J.M., Tummon, F., Abt, R., Allan, N., Bunderson, L., Clot, B., Crouzy, B., Daunys, G., Erb, S., Gonzalez-Alonso, M., Graf, E., Grewling, L., Haus, J., Kadantsev, E., Kawashima, S., Martinez-Bracero, M., Matavulj, P., Mills, S., Niederberger, E., Lieberherr, G., Lucas, R.W., O'Connor, D.J., Oteros, J., Palamarchuk, J., Pope, F.D., Rojo, J., Šauliene, I., Schäfer, S., Schmidt-Weber, C.B., Schnitzler, M., Šikoparija, B., Skjøth, C.A., Sofiev, M., Stemmler, T., Trivino, M., Zeder, Y., Buters, J., 2023. Towards European automatic bioaerosol monitoring: comparison of 9 automatic pollen observational instruments with classic Hirst-type

- traps. *Sci. Total Environ.* 866, 161220 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161220>.
- McInnes, R.N., Hemming, D., Burgess, P., Lyndsay, D., Osborne, N.J., Skjøth, C.A., Thomas, S., Vardoulakis, S., 2017. Mapping allergenic pollen vegetation in UK to study environmental exposure and human health. *Sci. Total Environ.* 599, 483–499. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.136>, 600.
- Myszkowska, D., Bogawski, P., Piotrowicz, K., Bosiacka, B., Grinn-Gofron, A., Berger, U. E., Bonini, M., Ceriotti, V., Charalampopoulos, A., Galán, C., Gedda, B., Ianovici, N., Kloster, M., Oliver, G., Pashley, C.H., Pätsi, S., Pérez-Badía, R., Puc, M., Rodinkova, V., Skjøth, C.A., Thibaudon, M., Vokou, D., Damialis, A., 2023. Co-exposure to highly allergenic airborne pollen and fungal spores in Europe. *Sci. Total Environ.* 167285 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167285>.
- Myszkowska, D., Piotrowicz, K., Ziemianin, M., Bastl, M., Berger, U., Dahl, Å., Dąbrowska-Zapart, K., Górecki, A., Laffersová, J., Majkowska-Wojciechowska, B., Malkiewicz, M., Nowak, M., Puc, M., Rybnicek, O., Saarto, A., Šaulienė, I., Ščevková, J., Kofol Seliger, A., Šikoparija, B., Piotrowska-Weryszko, K., Czarnobilska, E., 2021. Unusually high birch (*Betula* spp.) pollen concentrations in Poland in 2016 related to long-range transport (LRT) and the regional pollen occurrence. *Aerobiologia*. <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09703-w>.
- Neumann, J.E., Anenberg, S.C., Weinberger, K.R., Amend, M., Gulati, S., Crimmins, A., Roman, H., Fann, N., Kinney, P.L., 2019. Estimates of present and future asthma emergency department visits associated with exposure to Oak, birch, and grass pollen in the United States. *GeoHealth* 3, 11–27. <https://doi.org/10.1029/2018GH000153>.
- Ojeda, P., Sastre, J., Olaguibel, J., Chivato, T., 2018. Alergológica 2015: a national survey on allergic diseases in the adult Spanish population. *J. Invest. Allergol. Clin. Immunol.* 28, 151–164. <https://doi.org/10.18176/jiaci.0264>.
- Oteros, J., Bergmann, K.-C., Menzel, A., Damialis, A., Traidl-Hoffmann, C., Schmidt-Weber, C.B., Buters, J., 2019a. Spatial interpolation of current airborne pollen concentrations where no monitoring exists. *Atmos. Environ.* 199, 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.045>.
- Oteros, J., García-Mozo, H., Alcázar, P., Belmonte, J., Bermejo, D., Boi, M., Cariñanos, P., de la Guardia, C.D., Fernández-González, D., González-Minero, F., others, 2015. A new method for determining the sources of airborne particles. *J. Environ. Manag.* 155, 212–218.
- Oteros, J., García-Mozo, H., Vázquez, L., Mestre, A., Domínguez-Vilches, E., Galán, C., 2013. Modelling olive phenological response to weather and topography. *Agric. Ecosyst. Environ.* 179, 62–68.
- Oteros, J., Sofiev, M., Smith, M., Clot, B., Damialis, A., Prank, M., Werchan, M., Wachter, R., Weber, A., Kutzora, S., Heinze, S., Herr, C.E.W., Menzel, A., Bergmann, K.-C., Traidl-Hoffmann, C., Schmidt-Weber, C.B., Buters, J.T.M., 2019b. Building an automatic pollen monitoring network (ePIN): selection of optimal sites by clustering pollen stations. *Sci. Total Environ.* 688, 1263–1274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.131>.
- Oteros, J., Weber, A., Kutzora, S., Rojo, J., Heinze, S., Herr, C., Gebauer, R., Schmidt-Weber, C.B., Buters, J.T.M., 2020. An operational robotic pollen monitoring network based on automatic image recognition. *Environ. Res.* 191, 110031 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110031>.
- Pawankar, R., 2014. Allergic diseases and asthma: a global public health concern and a call to action. *World Allergy Organ. J.* 7, 12. <https://doi.org/10.1186/1939-4551-7-12>.
- Pecero-Casimiro, R., Fernández-Rodríguez, S., Tormo-Molina, R., Monroy-Colín, A., Silva-Palacios, I., Cortés-Pérez, J.P., Garijo, Á.G., Maya-Manzano, J.M., 2019. Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: a case study of plane trees. *Sci. Total Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.382>. S0048969719334680.
- Pecero-Casimiro, R., Maya-Manzano, J.M., Fernández-Rodríguez, S., Tormo-Molina, R., Silva-Palacios, I., Monroy-Colín, A., Gonzalo-Garijo, Á., 2020. Pollen calendars and regional gradients as information tools in the Extremadura pollen monitoring network (SW Spain). *Aerobiologia* 36, 731–748. <https://doi.org/10.1007/s10453-020-09667-3>.
- Picornell, A., Recio, M., Trigo, M., del, M., Cabezudo, B., 2019. Preliminary study of the atmospheric pollen in Sierra de las Nieves Natural Park (Southern Spain). *Aerobiologia* 35, 571–576. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09591-1>.
- Picornell, A., Ruiz-Mata, R., Rojo, J., Oteros, J., Recio, M., de Gálvez-Montañez, E., Trigo, M.M., 2023. Applying wind patterns and land use to estimate the concentrations of airborne pollen of herbaceous taxa in a statistical framework. *Urban Clim.* 49, 101496 <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101496>.
- R Core Team, 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from. <https://www.R-project.org/>.
- Ren, X., Cai, T., Mi, Z., Bielory, L., Nolte, C.G., Georgopoulos, P.G., 2022. Modeling past and future spatiotemporal distributions of airborne allergenic pollen across the contiguous United States. *Front. Allergy* 3.
- Rojo, J., Moreno, J.M., Romero-Morte, J., Lara, B., Elvira-Rendueles, B., Negral, L., Fernández-González, F., Moreno-Grau, S., Pérez-Badía, R., 2021. Causes of increased pollen exposure during Saharan-Sahel dust intrusions. *Environ. Pollut.* 284, 117441 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117441>.
- Rojo, J., Picornell, A., Oteros, J., 2019. AeRobiology: the computational tool for biological data in the air. *Methods Ecol. Evol.* 10, 1371–1376. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13203>.
- Rojo, J., Rapp, A., Lara, B., Fernández-González, F., Pérez-Badía, R., 2015. Effect of land uses and wind direction on the contribution of local sources to airborne pollen. *Sci. Total Environ.* 538, 672–682. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.074>.
- Rojo, J., Rapp, A., Lara, B., Sabariego, S., Fernández-González, F., Pérez-Badía, R., 2016. Characterisation of the airborne pollen spectrum in Guadalajara (central Spain) and estimation of the potential allergy risk. *Environ. Monit. Assess.* 188, 130. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5129-2>.
- Romero-Morte, J., Rojo, J., Rivero, R., Fernández-González, F., Pérez-Badía, R., 2018. Standardised index for measuring atmospheric grass-pollen emission. *Sci. Total Environ.* 612, 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.139>.
- Russo, A., Sousa, P.M., Durão, R.M., Ramos, A.M., Salvador, P., Linares, C., Díaz, R.J., Trigo, R.M., 2020. Saharan dust intrusions in the Iberian Peninsula: predominant synoptic conditions. *Sci. Total Environ.* 137041 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137041>.
- Sabariego, S., Bustillo, A.M.G., Morales, P.C., Cuesta, P., 2008. Forecasting airborne *Platanus* pollen in the Madrid region. *Grana* 47, 234–240.
- Shin, J.-Y., Han, M.J., Cho, C., Kim, K.R., Ha, J.-C., Oh, J.-W., 2020. Allergenic pollen calendar in Korea based on probability distribution models and up-to-date observations. *Allergy Asthma Immunol. Res.* 12, 259. <https://doi.org/10.4168/air.2020.12.2.259>.
- Shokouhi, B.V., De Hoogh, K., Gehrig, R., Eeftens, M., 2023. Estimation of historical daily airborne pollen concentrations across Switzerland using a spatio-temporal random forest model. *Sci. Total Environ.* 167286 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167286>.
- Šikoparija, B., Mimić, G., Panić, M., Marko, O., Radišić, P., Pejak-Šikoparija, T., Pauling, A., 2018. High temporal resolution of airborne Ambrosia pollen measurements above the source reveals emission characteristics. *Atmos. Environ.* 192, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.040>.
- Sofiev, M., Buters, J., Tummon, F., Fatahi, Y., Sozinova, O., Adams-Groom, B., Bergmann, K.C., Dahl, Å., Gehrig, R., Gilge, S., Seliger, A.K., Kouznetsov, R., Lieberherr, G., O'Connor, D., Oteros, J., Palamarchuk, J., Ribeiro, H., Werchan, B., Werchan, M., Clot, B., 2023. Designing an automatic pollen monitoring network for direct use of observations to reconstruct the concentration fields. *Sci. Total Environ.* 165800 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165800>.
- Sofiev, M., Ritenberga, O., Albertini, R., Arteta, J., Belmonte, J., Bernstein, C.G., Bonini, M., Celenk, S., Damialis, A., Douros, J., Elbern, H., Friese, E., Galan, C., Oliver, G., Hrga, I., Kouznetsov, R., Krajsek, K., Magyar, D., Parmentier, J., Plu, M., Prank, M., Robertson, L., Steens, B.M., Thibaudon, M., Segers, A., Stepanovich, B., Valdebenito, A.M., Vira, J., Vokou, D., 2017. Multi-model ensemble simulations of olive pollen distribution in Europe in 2014: current status and outlook. *Atmos. Chem. Phys.* 17, 12341–12360. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12341-2017>.
- Suarez-Suarez, M., Costa-Gómez, I., Maya-Manzano, J.M., Rojo, J., Hentges, F., Porcsin, I., Sarda-Estève, R., Baisnée, D., Schmid-Weber, C., Buters, J., 2023. Diurnal pattern of Poaceae and betula pollen flight in central Europe. *Sci. Total Environ.* 165799 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165799>.
- Tummon, F., Arboledas, L.A., Bonini, M., Guinot, B., Hicke, M., Jacob, C., Kendrovski, V., McCairns, W., Petermann, E., Peuch, V., Pfaar, O., Sicard, M., Šikoparija, B., Clot, B., 2021. The need for Pan-European automatic pollen and fungal spore monitoring: a stakeholder workshop position paper. *Clin. Transl. Allergy* 11. <https://doi.org/10.1002/ctt2.12015>.
- UNE-EN 16868, 2020. *Ambient Air—Sampling and Analysis of Airborne Pollen Grains and Fungal Spores for Networks Related to Allergy—Volumetric Hirst Method*.
- Verstraeten, W.W., Kouznetsov, R., Hoebeke, L., Bruffaerts, N., Sofiev, M., Delcloo, A.W., 2022. Reconstructing multi-decadal airborne birch pollen levels based on NDVI data and a pollen transport model. *Agric. For. Meteorol.* 320, 108942 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108942>.
- Wecker, H., Tizek, L., Ziehfrennd, S., Kain, A., Traidl-Hoffmann, C., Zimmermann, G.S., Scala, E., Elberling, J., Doll, A., Boffa, M.J., Schmidt, L., Sikora, M., Torres, T., Ballardini, N., Chernyshov, P.V., Buters, J., Biedermann, T., Zink, A., 2023. Impact of asthma in Europe: a comparison of web search data in 21 European countries. *World Allergy Organ. J.* 16, 100805 <https://doi.org/10.1016/j.waojou.2023.100805>.
- Werchan, M., Werchan, B., Bergmann, K.-C., 2018. German pollen calendar 4.0 – update based on 2011–2016 pollen data. *Allergo J. Int.* 27, 69–71. <https://doi.org/10.1007/s40629-018-0055-1>.
- Yao, M., 2018. Bioaerosol: a bridge and opportunity for many scientific research fields. *J. Aerosol Sci.* 115, 108–112. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.07.010>.
- Zhang, Y., Steiner, A.L., 2022. Projected climate-driven changes in pollen emission season length and magnitude over the continental United States. *Nat. Commun.* 13, 1234. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28764-0>.
- Ziska, L., Knowlton, K., Rogers, C., Dalan, D., Tierney, N., Elder, M.A., Filley, W., Shropshire, J., Ford, L.B., Hedberg, C., Fleetwood, P., Hovank, K.T., Kavanaugh, T., Fulford, G., Vrtis, R.F., Patz, J.A., Portnoy, J., Coates, F., Bielory, L., Frenz, D., 2011. Recent warming by latitude associated with increased length of ragweed pollen season in central North America. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108, 4248–4251. <https://doi.org/10.1073/pnas.1014107108>.
- Zubeldia, J.M., Baeza, M.L., Chivato, T., Jáuregui, I., Senent, C.J., 2021. *El libro de las enfermedades alérgicas*. Fundación BBVA.



## **8. Discusi3n general**



## **8. DISCUSIÓN GENERAL**

En esta memoria de Tesis Doctoral se describe el funcionamiento y la trayectoria de una red aerobiológica a lo largo del periodo de 1994 a 2022 (29 años). Tras esta trayectoria, se abordan aspectos diversos y fundamentales desde el punto de vista de la calidad de la información aerobiológica generada, de su difusión a los profesionales, pacientes y población interesada, y de su utilidad en salud pública.

En lo referente al concepto de la calidad lo enfocamos desde dos aspectos diferentes: uno, el control del muestreo polínico y el análisis aerobiológico como garantía de la calidad desde el origen del dato generado; y dos, comprobación de la calidad de los datos aerobiológicos de las series temporales históricas, aspecto extremadamente importante, básico para su utilización en estudios científicos y para la difusión de información aerobiológica fiable y comparable a los sectores interesados (Tummon et al., 2021).

Los datos aerobiológicos en los que se basa la presente tesis son las concentraciones medias diarias de polen en el aire, expresadas como número de granos de polen por metro cúbico de aire, para los tipos morfológicos de polen de obligado reconocimiento en la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid (Red Palinocam), durante el periodo 1994-2022. Estos datos han sido generados por los distintos laboratorios pertenecientes a la Red Palinocam siguiendo la metodología internacional normalizada de muestreo por el método volumétrico tipo Hirst y el análisis de bioaerosoles por microscopía óptica (Galán et al. 2014; UNE-EN 16868 2020), bajo la supervisión técnica del Grupo 920538-Aerobiología adscrito a la Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense de Madrid.

Por tanto, los resultados de esta Tesis Doctoral se han estructurado en tres partes fundamentales interrelacionadas: i) La evaluación de la calidad de los datos aerobiológicos generados mediante un ensayo interlaboratorio (Capítulo I); ii) los resultados de la gestión de la Red Palinocam y la difusión de la información polínica durante el funcionamiento de la Red (Capítulo II); iii) y una fase de análisis de la serie histórica de datos polínicos mediante un estudio de la variabilidad temporal (Capítulo III) y espacial (Capítulo IV) del espectro polínico atmosférico en la Comunidad de Madrid (Figura 8.1).

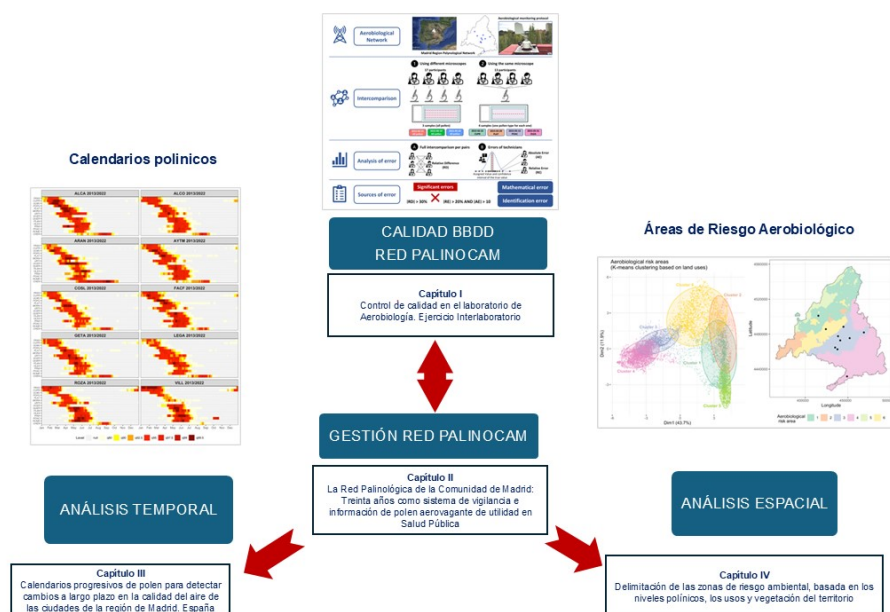


Figura 8.1 Diagrama de organización de la Tesis Doctoral y relación entre los capítulos que la componen.

En el análisis polínico de la atmósfera, los principales errores pueden ocurrir por errores instrumentales o por errores en la identificación y cuantificación por los técnicos analistas de los diferentes laboratorios (Comtois et al. 1999; Oteros et al. 2013). Por esta razón, Galán et al. (2014) incorporaron las recomendaciones relativas a la formación del personal analista de muestras aerobiológicas y el control de calidad de los análisis mediante ejercicios de intercomparación, para asegurar la competencia del personal, reducir al máximo los sesgos y errores, y hacer que los resultados sean comparables y reproducibles dentro de una red de monitorización aerobiológica. Estos son los objetivos perseguidos en el Capítulo I, y los resultados de este capítulo son muy relevantes para evaluar la calidad de los datos generados en la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid (Cervigón et al. 2024a).

Los resultados de esta Tesis Doctoral demostraron que, en general, la competencia del personal y la calidad de los datos de la Red Palinocam son muy buenas. Los errores notables, que superan umbrales específicos de errores absolutos y relativos, se detectaron de forma muy aislada y se resumen a continuación:

- Errores de identificación relacionados con el tipo polínico *Quercus*; cuatro técnicos sobreestimaron o subestimaron la concentración de polen respecto al resto de los participantes y otros tipos polínicos, lo

que indica confusión con otras formas tricolpadas (Oteros et al., 2013; The Angiosperm Phylogeny Group, 2016). *Acer* y *Platanus* fueron los tipos polínicos más frecuentemente confundidos con el polen de *Quercus*, a pesar de sus diferencias morfológicas (Erdtman, 1986; Denk y Tekleva, 2006).

- Esporádicamente, algún técnico cometió errores en la identificación de algunos tipos polínicos de baja incidencia en la región, como *Betula* y *Corylus*. Estos tipos de polen triporados, de la familia Betulaceae, presentan elementos morfológicos comunes (Halbritter et al., 2018; Weber, 1998). Sin embargo, en este ejercicio de aptitud no es posible valorar la importancia de estos errores ocasionales en unos pocos técnicos y muy bajas concentraciones, para ello se debería disponer de una muestra de mayor tamaño con mayores concentraciones de estos tipos polínicos (Adamov et al., 2021; Smith et al., 2014).
- También es posible cometer errores matemáticos al transformar los recuentos polínicos a concentraciones medias diarias de granos de polen por metro cúbico (Galan et al., 2014, 2017). En este ejercicio de intercomparación no se detectaron errores destacables procedentes de esta fuente; sin embargo, se registraron valores aislados ligeramente subestimados de dos técnicos para varios tipos de polen, respecto al valor asignado.

Creemos que estos errores de identificación pueden minimizarse parcialmente en la rutina habitual del análisis polínico de cada laboratorio. Cuando los técnicos experimentados se sitúan en el contexto espacio-temporal de cada muestra, detectan incoherencias como la aparición inesperada de polen en un lugar de muestreo o una época del año que no corresponden. Para poder detectar estas incoherencias, es muy útil disponer de calendarios polínicos que contienen la información polínica más relevante sobre la composición y la estacionalidad del espectro polínico de cada punto de red (Cervigón et al., 2024b).

Otros posibles errores, que también deben controlarse, son los cometidos

en la elaboración de los informes de resultados y en el tratamiento de los datos. Por ejemplo, el etiquetado incorrecto de los tipos de polen, de los códigos de las estaciones o de las fechas de muestreo son errores muy comunes que pueden incluirse en las bases de datos de las redes aerobiológicas y no detectarse a corto o medio plazo. Vistas las posibles fuentes de error, la realización de pruebas de aptitud en las redes aerobiológicas, como garantía de la calidad de los datos generados, es clave en la creación de las bases de datos históricas. También la calidad de los datos de las redes regionales es crucial cuando estas pasan a formar parte de las redes nacionales o continentales (Damialis et al., 2021; Pauling et al., 2012; Sofiev et al., 2017). Este es el caso de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid (Red Palinocam), red regional integrada en la Red Española de Aerobiología (REA) a escala nacional, y en la European Aeroallergen Network (EAN) a escala continental.

Los resultados del Capítulo I han permitido al Grupo de Investigación Aerobiología de la UCM tomar medidas y acciones preventivas o correctoras para solventar posibles sesgos y errores no deseados. El personal que se incorpora al análisis polínico en cualquiera de los laboratorios de la Red Palinocam es formado en el análisis e identificación del polen por los miembros del Grupo de Investigación de la UCM. La Dirección General de Salud Pública de la Comunidad de Madrid organiza periódicamente talleres de formación para los técnicos responsables del análisis polínico en la Red con el fin de reducir las posibles fuentes de errores de identificación y cuantificación. Este tipo de iniciativas se encuentran en consonancia con los criterios mínimos asumidos por las sociedades científicas en aerobiología para el correcto desarrollo y funcionamiento de una red aerobiológica (Galán et al., 2014).

Una vez asegurada la calidad de los datos generados por una red de monitorización aerobiológica, es importante analizar su finalidad. Los principales objetivos de una red de vigilancia ambiental como la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid son monitorizar la calidad biológica del aire y proporcionar información pública de calidad a los usuarios para reducir riesgos de salud pública, además de otros riesgos ambientales (Tummon et al., 2024). La utilidad y el funcionamiento de la Red Palinocam, y el análisis de su trayectoria a lo largo

de los últimos treinta años, se han analizado en detalle en el Capítulo II, cumpliendo con el segundo objetivo principal que nos planteamos en la presente Tesis Doctoral.

Desde el punto de vista de la gestión de la salud pública en la Comunidad de Madrid, interesaba conocer la exposición al polen a la que está sometida la población residente en la Comunidad. Por ello se constituyó la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid, con 11 estaciones de muestreo cubriendo un territorio que alberga el área donde reside más del 80% de la población de la Comunidad de Madrid. Desde los inicios de la Red en el año 1994, los datos obtenidos en cada estación de muestreo se han remitido al Centro Coordinador (Dirección General de Salud Pública de la Comunidad de Madrid), mediante la aplicación Informática SPOL de acceso remoto a través de Internet y desarrollada específicamente para la gestión de datos de polen y esporas en la Red. A partir de los datos aerobiológicos almacenados en SPOL se elabora y procesa la información que se difundirá posteriormente como información pública al ciudadano (Cervigón, 2005). Esta infraestructura basada en el análisis de las muestras diarias en cada captador y el envío diario de los datos de concentración de polen al centro coordinador para su gestión y difusión, es uno de los pilares fundamentales que han permitido a la Red almacenar y difundir la información polínica regional durante todo el periodo de funcionamiento de la Red Palinocam.

La utilización de la Red Palinocam como sistema de vigilancia del polen aerovagante en la Comunidad de Madrid constituye el pilar fundamental para establecer las estrategias de difusión y divulgación de la información a los pacientes y público en general, así como al sistema asistencial y los profesionales sanitarios. Los medios de difusión de la información aerobiológica a la población han ido evolucionando junto con las tecnologías, desde el fax y el contestador automático de los inicios, hasta la difusión actual por medios electrónicos, como adaptación a los cambios y el desarrollo de las tecnologías de la información y comunicación.

Desde 1994, la red difunde la información polínica mediante diversas modalidades de boletines, diarios y/o semanales, por estación y por tipo polínico. En 2002, la Red Palinocam comenzó a proporcionar predicciones de los niveles diarios de polen, para los tipos polínicos más alergénicos (cupresáceas, plátano de paseo, gramíneas, olivo y llantenes) utilizando un modelo de series

temporales basado en el análisis autorregresivo y de media móvil de los datos polínicos de la red (modelos ARIMA). En 2022, se introdujo una actualización y automatización del método predictivo, implementando nuevas metodologías de Inteligencia Artificial. Los nuevos boletines de información constituyen un nuevo impulso para la mejora paso a paso en los sistemas de información futuros de la Red Palinocam para proporcionar información de calidad a un número cada vez creciente de usuarios con una mayor demanda de inmediatez (Bastl et al. 2017; Matricardi et al. 2020).

Desde el año 1999, Internet ha sido un importante entorno de difusión de la información de la Red Palinocam. En la web de Polen y Salud: Vigilancia e información (<https://www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen>), gestionada por la Dirección General de Salud Pública de la Comunidad de Madrid, se puede acceder a la información diaria actualizada de enero a junio, y a la información semanal durante el resto del año, así como al servicio de suscripción para la recepción de información por correo electrónico y mensajes SMS. Es destacable, que la página Polen y Salud de la Red Palinocam, es la que recibe un mayor número de visitas de usuarios durante los meses de mayo a junio de toda la web de la Comunidad de Madrid (Cervigón et al. 2019). Este patrón mensual, con un claro incremento de visitas en los meses con mayor incidencia de polen alérgico, ilustra muy claramente el interés de la población alérgica durante los periodos de mayor exposición a polen alérgico en el aire, así como la demanda estacional de la información polínica (Silver et al., 2020; Sitaru et al., 2023). Los periodos de mayor demanda de información polínica se producen durante los máximos de polinización de las cupresáceas (mes de enero) y los máximos de polinización de gramíneas y olivo (meses de mayo a junio) (Rojo et al., 2024).

Un aspecto importante de cualquier herramienta de información pública, es conocer las opiniones y los comentarios de los usuarios finales de la información. Este tipo de retroalimentación en el sistema permite la continua mejora y la eficiencia de los servicios proporcionados al ciudadano. Con el objetivo de recibir opiniones y comentarios de los usuarios sobre la información polínica proporcionada, en 2011 la Red Palinocam implementó en la web su propia encuesta de satisfacción, solicitando valorar aspectos como la accesibilidad, la utilidad de los boletines de predicción y la información general de la web.

Los resultados mostraron, en general, una valoración positiva de 3,9 puntos (sobre 5), recibiendo criterios de mejora del 59% de los usuarios, y sugerencias y propuestas de un 71% de los usuarios que cumplimentaron la encuesta (Cervigón et al., 2019). Estos resultados demuestran una implicación muy importante de los usuarios finales de la información polínica que demandan una información de calidad y cada vez más personalizada. El sistema de encuestas a la población alérgica es un método cada vez mejor implantado y valorado, que permite mejorar los servicios de información polínica, y permite establecer una relación más directa entre la exposición a polen alérgico y la sintomatología de enfermedades alérgicas mostrada por los usuarios (Medek et al., 2019; Matricardi et al., 2023).

Tras la discusión de los resultados de difusión de la información periódica proporcionada por la Red Palinocam a corto plazo (Capítulo II), la larga trayectoria de la Red permite un análisis de los riesgos de exposición polínica más a largo plazo, empleando toda la serie histórica durante tres décadas de datos de concentración polínica en el aire. Los datos aerobiológicos generados por la Red Palinocam están almacenados en su base de datos histórica para el periodo 1994-2022 (datos disponibles en abierto en el Catálogo Open Data de la Comunidad de Madrid (<https://datos.comunidad.madrid>)). Durante todos estos años de funcionamiento continuo se han producido eventuales fallos mecánicos o humanos, que han ocasionado algunos periodos inevitables de ausencias de datos en las series temporales de datos polínicos. La ingente cantidad de datos polínicos requiere un procesado y una comprobación inicial mediante el marco de control de calidad implementado en el paquete R 'AeRobiology', que incluye las tareas y algoritmos más habituales para la gestión de bases de datos aerobiológicas (Picornell et al., 2021; Rojo et al., 2019). Esta metodología detecta los años muy incompletos o con problemas de fiabilidad aplicando diferentes filtros basados en la falta de datos dentro de la estación polínica. Esta primera evaluación de la calidad de los datos previa a la utilización de las bases de datos se corresponde con otra fase importante de la evaluación de la calidad de los datos analizada en el Capítulo I de esta Tesis Doctoral, y los resultados se presentan en el Material Suplementario como Anexo.

La base de datos depurada del periodo 1994-2022 se ha utilizado en la fase de análisis de los datos históricos en la Tesis, desde un punto de vista de la

variabilidad temporal en el Capítulo III para la elaboración de calendarios polínicos (Cervigón et al., 2024b), y empleando un análisis de los patrones espaciales de exposición polínica en la Comunidad de Madrid en el Capítulo IV (Rojo et al., 2024). Ambos capítulos presentan una gran utilidad en la difusión de información pública y en la gestión de la salud pública de la Comunidad, como se detalla a continuación.

El Capítulo III se ha basado en la generación de calendarios polínicos como herramienta de gran utilidad y sencillez para la difusión de la información aerobiológica en la Comunidad de Madrid. Un calendario polínico es una representación gráfica que resume la dinámica y abundancia de los taxones polínicos en la atmósfera de un determinado lugar (Rojo et al., 2019), y, por tanto, cada estación aerobiológica en la Comunidad tendrá asignado un calendario polínico propio. Pero, es más, la dinámica del polen en el aire cambia con el tiempo debido a que los factores ambientales influyentes en los patrones de emisión polínica han cambiado en las tres últimas décadas, como se documenta en el Capítulo III. Por un lado, se observó una variación climática significativa en el caso de la temperatura, y, por otro lado, la distribución de algunos usos del territorio y tipos de vegetación ha cambiado considerablemente en los últimos 30 años. Por este motivo, se recomienda una actualización periódica de los calendarios polínicos en la Comunidad de Madrid. El periodo de referencia para el calendario polínico más actualizado fueron los diez últimos años (2013-2022) de la serie histórica.

El número de años de la serie de datos para generar calendarios polínicos representativos para una región, puede debatirse en función de los objetivos propuestos. Aunque estamos de acuerdo con utilizar al menos el período de 20 años propuesto por Gehrig et al. (2018) para elaborar calendarios polínicos más a largo plazo, nuestros resultados respaldan la premisa de que la información pública debe actualizarse en intervalos de tiempo más cortos, para mostrar patrones biológicos de calidad del aire más realistas. Está documentado que la aplicación del análisis de series temporales al máximo número posible de años de datos podría enmascarar tendencias importantes en estudios de cambio climático (Fu et al., 2016). Por tanto, el período de referencia óptimo para generar un calendario polínico es el resultado del consenso entre dos factores: lograr un análisis representativo y estable del espectro polínico en el aire en una región, y

mantener la información polínica lo más actualizada posible, evitando la obsolescencia del calendario polínico debido a cambios muy rápidos en los patrones ambientales.

En base a estos resultados, presentamos una propuesta técnica a la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid para generar calendarios polínicos para cada ciudad utilizando el periodo de referencia de los últimos diez años, y actualizar esta información cada tres años. Consideramos el último calendario polínico de todas las estaciones aerobiológicas de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid para los últimos diez años (2013-2022), como la información de referencia actual para una de las áreas metropolitanas más pobladas de Europa.

Otro aspecto controvertido en los calendarios polínicos puede estar relacionado con la metodología de cálculo del calendario y la categorización de los niveles de riesgo alérgico utilizados. Desde el punto de vista de la metodología empleada para generar el calendario polínico, en el Capítulo III se ha utilizado el procedimiento propuesto por Gehrig et al. (2018) mediante su implementación en una rutina de programación que permite su actualización de manera sencilla. Sin embargo, otros diseños han sido validados durante décadas desde los primeros calendarios polínicos publicados en Europa por Spieksma (1991) y en Estados Unidos por O'Rourke (1990).

La categorización de umbrales de riesgo en el Capítulo III se ha desarrollado mediante el uso de umbrales basados en percentiles, para todas las estaciones, lo que permite crear calendarios de polen que son comparables entre las diferentes ubicaciones, con niveles comunes de riesgo polínico para toda la Red Palinocam. El sistema de información pública de riesgo de alergia de la Comunidad de Madrid sigue esta metodología utilizando un sistema resumido de tres niveles de riesgo de polen (bajo, medio y alto) (Dirección General de Salud Pública de la Comunidad de Madrid, 2024), similar a los niveles de riesgo de exposición polínica de otros sistemas de alerta en Europa (Gehrig et al., 2018), y en otros ámbitos de la salud pública (Carriñanos et al., 2022; De Bodas Terassi et al., 2022; Wei et al., 2019). Existe un clamor para el uso de criterios clínicos en la categorización de umbrales de riesgo en los niveles de polen, lo cual pensamos que sería muy recomendable. Sin embargo, el uso de criterios clínicos utilizando síntomas alérgicos carece de consenso científico general y se basa en

estudios apenas generalizables centrados en los tipos de polen alergénicos más comunes a nivel local (Choi et al., 2020; Rakotozandry et al., 2019). Son varios los autores que han señalado la necesidad del desarrollo de futuros estudios en esta temática, para evitar los sesgos producidos por múltiples factores sobre los umbrales clínicos (Cecchi et al., 2010; Steckling-Muschack et al., 2021). Por lo tanto, ante el problema de establecer objetivamente umbrales polínicos, se recomienda clasificarlos aplicando criterios aerobiológicos a partir de series históricas de polen suficientemente extensas (Sukiene et al., 2021).

Los nuevos calendarios y las herramientas informáticas incluidos en el Capítulo III (Cervigón et al., 2024b) pretenden facilitar el uso y la difusión de la información polínica en salud pública, ya que posibilitan la generación automática de actualizaciones periódicas y la obtención de calendarios individuales por estación y por tipo polínico. La transferencia de los resultados de la investigación y la gran cantidad de información generada por los sistemas de vigilancia ambiental requiere herramientas que resuman toda esta información en resultados atractivos y fáciles de interpretar para los gestores de redes aerobiológicas, los responsables políticos y los usuarios finales.

El enfoque espacial aplicado al análisis de datos de la serie histórica de la Red Palinocam queda reflejado en el Capítulo IV de la Tesis Doctoral. En este capítulo se analiza la estrecha relación entre las fuentes potenciales de polen (usos del territorio y tipos de vegetación) y la dinámica del polen en el aire (Rojo et al., 2024). Esta relación ha permitido elaborar una regionalización de los niveles de exposición polínica en la Comunidad de Madrid basada en los tipos de vegetación presente en las diferentes áreas socioeconómicas y biogeográficas. Este resultado se materializa en una división de la Comunidad de Madrid en áreas de riesgo aerobiológico según la dinámica de exposición polínica de los tipos polínicos alergénicos. Se han delimitado seis zonas de riesgo aerobiológico, clasificadas en cuatro áreas principales, siguiendo un claro gradiente antropogénico en cuanto a las fuentes polínicas potenciales que determinan la exposición al polen en la Comunidad de Madrid:

- El área 1 (centro de la Comunidad de Madrid) se caracteriza por zonas densamente urbanizadas, con una intensa exposición al polen procedente de plantas ornamentales alergénicas (especies alóctonas

de la familia Cupressaceae y del género *Platanus*) cultivadas en las zonas verdes urbanas. La mayoría de las estaciones de muestreo de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid están situadas en zonas muy urbanizadas, y existe una sobrerrepresentación de este tipo de ambiente en la Red Palinocam porque además es donde reside la mayor parte de la población.

- El área 2 (este y sureste de la Comunidad de Madrid) está dominada por terrenos agrícolas. La exposición al polen de *Olea* representa uno de los riesgos alérgicos más importantes en esta zona. También destaca el riesgo de exposición al polen de procedencia herbácea, principalmente de las familias Poaceae y Amaranthaceae. Los patrones fenológicos de la mayoría de las especies alérgicas se ven considerablemente adelantados, debido a la menor altitud del área.
- El área 3 es una zona de transición dominada por pastizales y zonas agroforestales abiertas con una mayor exposición al polen procedente de especies herbáceas alérgicas de la familia Poaceae y del género *Plantago*. Es significativa la elevada incidencia atmosférica del polen procedentes de las especies forestales (*Quercus*, *Fraxinus*, etc.).
- El área 4 (oeste y noroeste de la Comunidad de Madrid) es la más heterogénea y abarca tres zonas naturales de la Sierra de Guadarrama. Existe una alta representación de los tipos polínicos aportados por las especies de los géneros *Quercus* y *Fraxinus*, y las de las familias Cupressaceae y Pinaceae. Los patrones fenológicos de la mayoría de las especies alérgicas se retrasan considerablemente debido a la mayor altitud de esta área.

La delimitación de zonas de riesgo aerobiológico en la Comunidad de Madrid constituye una herramienta interesante para la población residente y visitante de una de las mayores áreas metropolitanas de Europa. Para informar a la población alérgica sobre su exposición a los aeroalérgenos deben tenerse en cuenta dos características cruciales del riesgo polínico: la duración y la intensidad de la exposición (Zhang y Steiner, 2022; Ziska et al., 2011). Ambas características determinan la dinámica polínica aérea de un territorio concreto,

que puede parametrizarse y representarse claramente en un calendario polínico como se ha puesto de manifiesto en el Capítulo III (Abbas et al., 2012; Rojo et al., 2016; Shin et al., 2020; Werchan et al., 2018).

Los resultados del Capítulo IV revelan que el análisis de las posibles fuentes de polen determina estrechamente la duración y la intensidad del patrón general de exposición al polen. Esta importante relación entre las fuentes de polen y las emisiones de polen permite modelar la exposición al polen a nivel de ciudad mediante enfoques de regresión utilizando un inventario adecuado de fuentes (Hjort et al., 2016). Por esa razón, numerosos estudios en aerobiología han modelado las concentraciones de polen en el aire basándose en fuentes de polen (Lugonja et al., 2019; McInnes et al., 2017).

La propuesta de esta Tesis Doctoral para la delimitación de áreas de riesgo aerobiológico en la Comunidad de Madrid, es una de las primeras iniciativas para identificar áreas de riesgo ambiental en función de la dinámica general del polen en un territorio, y además se asimila a la delimitación de zonas de calidad del aire basados en niveles de contaminación inorgánica que exige la legislación europea (Directiva europea sobre la calidad del aire, 2008/50/CE) (Borge et al., 2022). La delimitación de zonas biológicas de calidad del aire es un paso hacia la gestión de calidad del aire en la Comunidad de Madrid, cuando aún existe un importante vacío en la legislación que regula el contenido biológico de la contaminación atmosférica. La regionalización de la Comunidad de Madrid en áreas de riesgo aerobiológico propicia una mejor aplicación de los planes de gestión y evaluación de las medidas de seguimiento; y además, las zonas de riesgo aerobiológico permiten implementar estrategias preventivas en áreas homogéneas en función de la exposición a aeroalergenos (Maya-Manzano et al., 2017).

La regionalización espacial en las evaluaciones de riesgos ambientales no es un concepto nuevo (Makra et al., 2016; Neumann et al., 2019; Russo et al., 2020), e incluso la regionalización de la información polínica es una práctica habitual para presentar los calendarios polínicos y proporcionar información sobre las predicciones de los niveles del polen (Adams-Groom et al., 2020; Lake et al. 2017; Pecero-Casimiro et al., 2020; Ren et al., 2022). Además, establecer áreas de riesgo aerobiológico tiene importantes utilidades para optimizar y

gestionar más eficientemente una red de calidad ambiental como la Red Palinocam.

Las técnicas de clasificación espacial empleadas en el Capítulo IV permiten identificar y analizar la duplicidad de estaciones, como ocurre en áreas urbanas de la Comunidad de Madrid, lo cual es habitual porque en las ciudades es donde reside la mayoría de la población (Khomenko et al., 2021). Asimismo, pueden detectarse importantes lagunas en el seguimiento aerobiológico en zonas insuficientemente muestreadas. Este es el caso de las zonas de riesgo aerobiológico más heterogéneas situadas en el noroeste de la Comunidad de Madrid cuyo seguimiento aerobiológico podría presentar un interés ecológico más que clínico (Bogdziewicz et al., 2020; Picornell et al., 2019). La optimización de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid también es muy importante para el uso eficiente de los recursos públicos.

Los resultados del Capítulo IV también pueden ser útiles para el futuro diseño de una red aerobiológica automática. En los últimos años, se han desarrollado dispositivos automáticos, que se presentan como avances muy prometedores en el control aerobiológico, porque son capaces de generar información en tiempo real con un bajo coste de mantenimiento y análisis (Maya-Manzano et al., 2023; Oteros et al., 2020; Tummon et al., 2021). La transición de una red aerobiológica manual a una red de monitorización híbrida o automática, requeriría también la optimización del número y ubicación de las estaciones de muestreo para conocer la calidad biológica del aire de una manera más eficiente (Oteros et al., 2019; Sofiev et al., 2023). Los resultados derivados de esta Tesis Doctoral son muy valiosos para seleccionar las estaciones aerobiológicas más interesantes a mantener en la futura automatización de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abbas, S., Katelaris, C. H., Singh, A. B., Raza, S. M., Khan, M. A., Rashid, M., Abbas, M. & Ismail, M. 2012. World allergy organization study on aerobiology for creating first pollen and Mold Calendar with clinical significance in Islamabad, Pakistan; a project of world allergy organization and Pakistan allergy, Asthma & Clinical Immunology Centre of Islamabad. *World Allergy Organization Journal*, 5(9), 103–110. <https://doi.org/10.1097/WOX.0b013e31826421c8>.
- Adamov, S., Lemonis, N., Clot, B., Crouzy, B., Gehrig, R., Graber, M.-J., Sallin, C., Tummon, F., 2021. On the measurement uncertainty of Hirst-type volumetric pollen and spore samplers. *Aerobiologia*. <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09724-5>.

- Adams-Groom, B., Ambelas Skjøth, C., Selby, K., Pashley, C., Satchwell, J., Head, K., & Ramsay, G. 2020. Regional calendars and seasonal statistics for the United Kingdom's main pollen allergens. *Allergy*, 75(6), 1492–1494. <https://doi.org/10.1111/all.14168>.
- Bastl, K., Berger, M., Bergmann, K.-C., Kmenta, M. & Berger, U. 2017. The medical and scientific responsibility of pollen information services. *Wien Klin Wochenschr* 129, 70–74. <https://doi.org/10.1007/s00508-016-1097-3>
- Bogdziewicz, M., Szymkowiak, J., Bonal, R., Hacket-Pain, A., Espelta, J.M., Pesendorfer, M., Grewling, L., Kasprzyk, I., Belmonte, J., Kluska, K., De Linares, C., Penuelas, J., Fernandez-Martinez, M. 2020. What drives phenological synchrony? Warm springs advance and desynchronize flowering in oaks. *Agric. For. Meteorol.* 294, 108140 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108140>.
- Borge, R., Jung, D., Lejarraga, I., De La Paz, D., Cordero, J.M. 2022. Assessment of the Madrid region air quality zoning based on mesoscale modelling and k-means clustering. *Atmos. Environ.* 287, 119258. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119258>.
- Cariñanos, P., Guerrero-Rascado, J. L., Valle, A. M., Cazorla, A., Titos, G., Foyo-Moreno, I., Alados-Arboledas, L. & Díaz de la Guardia, C. 2022. Assessing pollen extreme events over a Mediterranean site: Role of local surface meteorology. *Atmospheric Environment*, 118928. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118928>.
- Cecchi, L., D'Amato, G., Ayres, J. G., Galan, C., Forastiere, F., Forsberg, B., Gerritsen, J., Nunes, C., Behrendt, H., Akdis, C., Dahl, R. & Annesi-Maesano, I. 2010. Projections of the effects of climate change on allergic asthma: The contribution of aerobiology: Climate change and aerobiology. *Allergy*, 65, 1073–1081. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2010.02423.x>.
- Cervigón Morales, P., Bardón Iglesias, R., Cámara Díez, E., Fúster Lorán, F., Ribes Ripoll, MA & Vilas Herranz F. 2019. Actualización digital de la Red Palinocam: [www.comunidad.madrid](http://www.comunidad.madrid). *Rev. salud ambient.* 19 (Espec. Congr.): 364.
- Cervigon Morales, P. 2005. Palinocam network: airborne pollen vigilance in Madrid. *Rev. Salud Ambient* 5, 131–136. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/308>.
- Cervigón P, Ferencova Z, Cascón Á, Romero-Morte J, Galán Díaz J, Sabariego S, Torres M, Gutiérrez-Bustillo AM, Rojo J. 2024a. Importance of the quality management of aerobiological monitoring networks: The case study of Madrid Region in Spain. *Sci Total Environ.* 25; 954:176544. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176544>.
- Cervigón P, Ferencova Z, Cascón A, Romero-Morte J, Galán Díaz J, Sabariego S, Torres M, Gutiérrez-Bustillo AM, Rojo J. 2024b. Progressive pollen calendar to detect long-term changes in the biological air quality of cities in the Madrid Region, Spain. *Landscape and Urban Planning*, 247, 105053. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105053>.
- Choi, Y.-J., Jeon, J.-H., Jeong, J. H., Kim, K.-R., Lee, Y.-S. & Oh, J.-W. 2020. Revision of threshold levels for evoking pollinosis to oak, pine, japanese hop, and ragweed in the metropolitan area Seoul, Korea. *Allergy, Asthma & Respiratory Disease*, 8(4), 199. <https://doi.org/10.4168/aard.2020.8.4.199>.
- Comtois, P., Alcázar, P., Néron, D. 1999. Pollen counts statistics and its relevance to precision. *Aerobiologia* 15, 19–28. <https://doi.org/10.1023/A:1007501017470>.
- Damialis A, Gilles S, Sofiev M, Sofieva V, Kolek F, Bayr D, Plaza MP, Leier-Wirtz V, Kaschuba S, Ziska LH, Bielory L, Makra L, Del Mar Trigo M. COVID-19/POLLEN study group; Traidl-Hoffmann C. 2021. Higher airborne pollen concentrations correlated with increased SARS-CoV-2 infection rates, as evidenced from 31 countries across the globe. *Proc Natl Acad Sci* 118(12): e2019034118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2019034118>.
- De Bodas Terassi, P. M., Da Silva Oscar-Júnior, A. C., Galvani, E., De Oliveira-Júnior, J. F., Sobral, B. S., Biffi, V. H. R., & De Gois, G. 2022 Daily rainfall intensity and temporal trends in eastern Paraná state – Brazil. *Urban Climate*, 42, Article 101090. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101090>.

- Denk, T., Tekleva, M.V. 2006. Comparative pollen morphology and ultrastructure of *Platanus*: implications for phylogeny and evaluation of the fossil record. *Grana* 45, 195–221. <https://doi.org/10.1080/00173130600873901>.
- Directorate-General for Public Health of the Madrid Autonomous Region. 2024. Website of the Madrid region palynological network accessed: 2024.01.09 <https://www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen>.
- Erdtman, G., 1986. Pollen Morphology and Plant Taxonomy Angiosperms (an Introduction to Palynology). BRILL, Boston.
- Fu, Y. H., Piao, S., Ciais, P., Huang, M., Menzel, A., Peaucelle, M., Peng, S., Song, Y., Vitasse, Y., Zeng, Z., Zhao, H., Zhou, G., Peñuelas, J. & Janssens, I. A. 2016. Long-term linear trends mask phenological shifts. *Int. J. Biometeorol.* 60(11), 1611–1613. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1253-5>.
- Galán, C., Ariatti, A., Bonini, M. et al. 2017. Recommended terminology for aerobiological studies. *Aerobiologia* 33, 293–295. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9496-0>.
- Galán, C., Smith, M., Thibaudon, M. et al. 2014. Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia* 30, 385–395 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9335-5>.
- Gehrig, R., Maurer, F., & Schwierz, C. 2018. Designing new automatically generated pollen calendars for the public in Switzerland. *Aerobiologia*, 34(3), 349–362. <https://doi.org/10.1007/s10453-018-9518-6>.
- Halbritter, H., Ulrich, S., Grímsson, F., Weber, M., Zetter, R., Hesse, M., Buchner, R., Svojtka, M., Frosch-Radivo, A., 2018. Illustrated Pollen Terminology. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71365-6>.
- Hjort, J., Hugg, T.T., Antikainen, H., Rusanen, J., Sofiev, M., Kukkonen, J., Jaakkola, M. S., Jaakkola, J.J.K. 2016. Fine-scale exposure to allergenic pollen in the urban environment: evaluation of land use regression approach. *Environ. Health Perspect.* 124, 619–626. <https://doi.org/10.1289/ehp.1509761>.
- Khomenko, S., Cirach, M., Pereira-Barboza, E., Mueller, N., Barrera-Gómez, J., Rojas-Rueda, D., de Hoogh, K., Hoek, G., Nieuwenhuijsen, M. 2021. Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment. *Lancet Planet. Health* 5, e121–e134. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30272-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30272-2).
- Lake, I.R., Jones, N.R., Agnew, M., Goodess, C.M., Giorgi, F., Hamaoui-Laguél, L., Semenov, M.A., Solomon, F., Storkey, J., Vautard, R., Epstein, M.M. 2017. Climate change and future pollen allergy in Europe. *Environ. Health Perspect.* 125, 385–391. <https://doi.org/10.1289/EHP173>.
- Lugonja, P., Brdar, S., Simović, I., Mimíc, G., Palamarchuk, Y., Sofiev, M., Šikoparija, B. 2019. Integration of in situ and satellite data for top-down mapping of Ambrosia infection level. *Remote Sens. Environ.* 235, 111455. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111455>.
- Matricardi, PM, Dramburg, S, Alvarez-Perea, A, Antolín-Amérigo D, Apfelbacher C. & al. 2020. The role of mobile health technologies in allergy care: An EAACI position paper. *Allergy*. 75(2): 259-272. <https://doi.org/10.1111/all.13953>.
- Matricardi, PM, Hoffmann T. & Dramburg, S. 2023. The "allergic nose as a pollen detector" concept: e-Diaries to predict pollen trends. *Pediatr Allergy Immunol.* 34(6): e13966. <https://doi.org/10.1111/pai.13966>.
- Maya-Manzano, J.M., Fernández-Rodríguez, S., Monroy-Colín, A., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., Gonzalo-Garijo, A. 2017. Allergenic pollen of ornamental plane trees in a Mediterranean environment and urban planning as a prevention tool. *Urban For. Urban Green.* 27, 352–362. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.09.009>.
- Maya-Manzano, J.M., Tummon, F., Abt, R., Allan, N., Bunderson, L., Clot, B., Crouzy, B., Daunys, G., Erb, S., Gonzalez-Alonso, M., Graf, E., Grewling, L., Haus, J., Kadantsev, E., Kawashima, S., Martinez-Bracero, M., Matavulj, P., Mills, S., Niederberger, E., Lieberherr, G., Lucas, R.W., O'Connor, D.J., Oteros, J., Palamarchuk, J., Pope, F.D., Rojo, J., Šaulienė, I., Schäfer, S., Schmidt-Weber, C.B., Schnitzler, M., Šikoparija, B., Skjøth, C.A., Sofiev, M., Stemmler, T., Triviño, M., Zeder, Y., Buters, J. 2023. Towards

- European automatic bioaerosol monitoring: comparison of 9 automatic pollen observational instruments with classic Hirst-type traps. *Sci. Total Environ.* 866, 161220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161220>.
- McInnes, R.N., Hemming, D., Burgess, P., Lyndsay, D., Osborne, N.J., Skjøth, C.A., Thomas, S., Vardoulakis, S. 2017. Mapping allergenic pollen vegetation in UK to study environmental exposure and human health. *Sci. Total Environ.* 599, 483–499. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.136,600>.
- Medek, DE, Simunovic, M, Erbas, B, Katelaris, CH, Lampugnani, ER, Hue, A, Beggs, PJ. & Davies, JM. 2019. Enabling self-management of pollen allergies: a pre-season questionnaire evaluating the perceived benefit of providing local pollen information. *Aerobiologia* 35, 777–782. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09602-1>.
- O'Rourke, M. K. 1990. Comparative pollen calendars from Tucson, Arizona: Durham vs. Burkard samplers. *Aerobiologia*, 6(2), 136–140. <https://doi.org/10.1007/BF02539105>
- Oteros, J., Galán, C., Alcázar, P. & Domínguez-Vilches, E. 2013. Quality control in bio-monitoring networks, Spanish Aerobiology Network. *Sc. Total Environ.* 443: 559-565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.040>.
- Oteros, J., García-Mozo, H., Vázquez, L., Mestre, A., Domínguez-Vilches, E., Galán, C. 2013. Modelling olive phenological response to weather and topography. *Agric. Ecosyst. Environ.* 179, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.07.008>.
- Oteros, J., Sofiev, M., Smith, M., Clot, B., Damialis, A., Prank, M., Werchan, M., Wachter, R., Weber, A., Kutzora, S., Heinze, S., Herr, C.E.W., Menzel, A., Bergmann, K.-C., Traidl-Hoffmann, C., Schmidt-Weber, C.B., Buters, J.T.M. 2019. Building an automatic pollen monitoring network (ePIN): selection of optimal sites by clustering pollen stations. *Sci. Total Environ.* 688, 1263–1274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.131>.
- Oteros, J., Weber, A., Kutzora, S., Rojo, J., Heinze, S., Herr, C., Gebauer, R., Schmidt-Weber, C.B., Buters, J.T.M. 2020. An operational robotic pollen monitoring network based on automatic image recognition. *Environ. Res.* 191, 110031. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110031>.
- Pauling, A., Rotach, M.W., Gehrig, R., Clot, B., 2012. A method to derive vegetation distribution maps for pollen dispersion models using birch as an example. *Int. J. Biometeorol.* 56, 949–958.
- Pecero-Casimiro, R., Maya-Manzano, J.M., Fernández-Rodríguez, S., Tormo-Molina, R., Silva-Palacios, I., Monroy-Colín, A., Gonzalo-Garijo, A. 2020. Pollen calendars and regional gradients as information tools in the Extremadura pollen monitoring network (SW Spain). *Aerobiologia* 36, 731–748. <https://doi.org/10.1007/s10453-020-09667-3>.
- Picornell A., Oteros J., Ruiz-Mata R., Recio M., Trigo MM., Martínez-Bracero M., Lara B., Serrano-García A., Galán C., García-Mozo H., Alcázar P., Pérez-Badia R., Cabezudo B., Romero-Morte J., Rojo J. 2021. Methods for interpolating missing data in aerobiological databases. *Environ Res.* 200: 111391. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111391>.
- Picornell, A., Recio, M., Trigo, MM., Cabezudo, B. 2019. Preliminary study of the atmospheric pollen in Sierra de las Nieves Natural Park (Southern Spain). *Aerobiologia* 35, 571–576. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09591-1>.
- Rakotozandry, T., Cassagne, E., Martin, S., Alauzet, P., Navarro, I., Delcroux, C., Caillaud, D., Besancenot, J.P., Thibaudon, M. & Charpin, D. 2019. Exposure to cypress pollens and subsequent symptoms: A panel study. *Int. Archives Allergy Immunol.* 180(2), 135–141. <https://doi.org/10.1159/000501223>.
- Ren, X., Cai, T., Mi, Z., Bielory, L., Nolte, C.G., Georgopoulos, P.G. 2022. Modeling past and future spatiotemporal distributions of airborne allergenic pollen across the contiguous United States. *Front. Allergy* 3. <https://doi.org/10.3389/falgy.2022.959594>
- Rojo, J, Cervigón, P, Ferencova, Z, Cascón, Á, Galán Díaz, J, Romero-Morte, J, Sabariego, S, Torres, M. & Gutiérrez-Bustillo, AM. 2024. Assessment of environmental risk areas based on airborne pollen patterns as a response to land use

- and land cover distribution. *Envir Pollution* 344, 123385. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123385>.
- Rojo, J., Picornell, A. & Oteros, J. 2019. AeRobiology: The computational tool for biological data in the air. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(8), 1371–1376. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13203>.
- Rojo, J., Rapp, A., Lara, B., Sabariego, S., Fernández-González, F. & Pérez-Badia, R. 2016. Characterisation of the airborne pollen spectrum in Guadalajara (central Spain) and estimation of the potential allergy risk. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(3), 130. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5129-2>
- Shin, J.-Y., Han, M.J., Cho, C., Kim, K.R., Ha, J.-C., Oh, J.-W. 2020. Allergenic pollen calendar in Korea based on probability distribution models and up-to-date observations. *Allergy Asthma Immunol. Res.* 12, 259. <https://doi.org/10.4168/aair.2020.12.2.259>.
- Silver, JD, Spriggs, K, Haberle, SG, Katelaris, CH, Newbigin, EJ. & Lampugnani, ER. 2020. Using crowd-sourced allergic rhinitis symptom data to improve grass pollen forecasts and predict individual symptoms. *Sci Tot Envir* 720:137351. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137351>.
- Sitaru, S., Tizek, L, Buters, J., Ekeboom, A., Wallin, JE. & Zink, A. 2023. Assessing the national burden of allergic asthma by web-search data, pollen counts, and drug prescriptions in Germany and Sweden. *World Allergy Organization Journal* 16: 100752. <https://doi.org/10.1016/j.waojou.2023.100752>.
- Smith, M., Jäger, S., Berger, U., Sikoparija, B., Hallsdottir, M., Sauliene, I., Bergmann, K.- C., Pashley, C.H., de Weger, L., Majkowska-Wojciechowska, B., Rybníček, O., Thibaudon, M., Gehrig, R., Bonini, M., Yankova, R., Damialis, A., Vokou, D., Gutiérrez Bustillo, A.M., Hoffmann-Sommergruber, K., van Ree, R., 2014. Geographic and temporal variations in pollen exposure across Europe. *Allergy* 69, 913–923. <https://doi.org/10.1111/all.12419>.
- Sofiev, M., Buters, J., Tummon, F., Fatahi, Y., Sozinova, O., Adams-Groom, B., Bergmann, K.C., Dahl, Å., Gehrig, R., Gilge, S., Seliger, A.K., Kouznetsov, R., Lieberherr, G., O'Connor, D., Oteros, J., Palamarchuk, J., Ribeiro, H., Werchan, B., Werchan, M., Clot, B. 2023. Designing an automatic pollen monitoring network for direct usage of observations to reconstruct the concentration fields. *Sci. Total Environ.* 165800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165800>.
- Sofiev, M., Ritenberga, O., Albertini, R., Arteta, J., Belmonte, J., Bernstein, C.G., Bonini, M., Celenk, S., Damialis, A., Douros, J., Elbern, H., Friese, E., Galan, C., Oliver, G., Hrga, I., Kouznetsov, R., Krajsek, K., Magyar, D., Parmentier, J., Plu, M., Prank, M., Robertson, L., Steensen, B.M., Thibaudon, M., Segers, A., Stepanovich, B., Valdebenito, A.M., Vira, J., Vokou, D., 2017. Multi-model ensemble simulations of olive pollen distribution in Europe in 2014: current status and outlook. *Atmospheric Chem. Phys.* 17, 12341–12360. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12341-2017>.
- Spieksma, F.T.M. 1991. Regional european pollen calendars. In D'Amato, G., Spieksma, F.T.M. & Bonini, S. (Eds.), *Allergenic pollen and pollinosis in Europe*, (pp. 49–65). Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Steckling-Muschack, N., Mertes, H., Mittermeier, I., Schutzmeier, P., Becker, J., Bergmann, K.-C., Böse-O'Reilly, S., Buters, J., Damialis, A., Heinrich, J., Kabesch, M., Nowak, D., Walser-Reichenbach, S., Weinberger, A., Zamfir, M., Herr, C., Kutzora, S. & Heinze, S. 2021. A systematic review of threshold values of pollen concentrations for symptoms of allergy. *Aerobiologia*, 37(3), 395–424. <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09709-4>.
- Sūkiene, L., Šaūliene, I., Dubakiene, R., Rudzevičiene, O. & Daunys, G. 2021. Analysis of allergenic pollen data, focusing on a pollen load threshold statement. *Aerobiologia*. <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09727-2>
- The Angiosperm Phylogeny Group. 2016. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Bot. J. Linn. Soc.* 181, 1–20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>.

- Tummon, F., Adams-Groom, B., Antunes, C.M. et al. 2024. The role of automatic pollen and fungal spore monitoring across major end-user domains. *Aerobiologia* 40, 57–75. <https://doi.org/10.1007/s10453-024-09820-2>.
- Tummon, F., Arboledas, L.A., Bonini, M., Guinot, B., Hicke, M., Jacob, C., Kendrovski, V., McCairns, W., Petermann, E., Peuch, V., Pfaar, O., Sicard, M., Sikoparija, B., Clot, B., 2021. The need for Pan-European automatic pollen and fungal spore monitoring: a stakeholder workshop position paper. *Clin. Transl. Allergy* 11. <https://doi.org/10.1002/ctt2.12015>.
- UNE-EN 16868. 2020. Ambient Air—Sampling and analysis of airborne pollen grains and fungal spores for Networks related to Allergy—Volumetric Hirst.
- Weber, R.W., 1998. Pollen Identification. *Ann. Allergy. Asthma. Immunol.* 80, 141–148. [https://doi.org/10.1016/S1081-1206\(10\)62947-X](https://doi.org/10.1016/S1081-1206(10)62947-X).
- Wei, Y., Kehm, R. D., Goldberg, M., & Terry, M. B. 2019. Applications for quantile regression in epidemiology. *Current Epidemiology Reports*, 6(2), 191–199. <https://doi.org/10.1007/s40471-019-00204-6>.
- Werchan, M., Werchan, B., Bergmann, K.-C. 2018. German pollen calendar 4.0 – update based on 2011–2016 pollen data. *Allergo J. Int.* 27, 69–71. <https://doi.org/10.1007/s40629-018-0055-1>.
- Zhang, Y., Steiner, A.L. 2022. Projected climate-driven changes in pollen emission season length and magnitude over the continental United States. *Nat. Commun.* 13, 1234. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28764-0>.
- Ziska, L., Knowlton, K., Rogers, C., Dalan, D., Tierney, N., Elder, M.A., Filley, W., Shropshire, J., Ford, L.B., Hedberg, C., Fleetwood, P., Hovanky, K.T., Kavanaugh, T., Fulford, G., Vrtis, R.F., Patz, J.A., Portnoy, J., Coates, F., Bielory, L., Frenz, D. 2011. Recent warming by latitude associated with increased length of ragweed pollen season in central North America. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108, 4248–4251. <https://doi.org/10.1073/pnas.1014107108>.

## **9. Conclusiones generales**



## **Conclusiones capítulo I**

### **Control de calidad en el laboratorio de Aerobiología. Ejercicio Interlaboratorio**

1. La realización de ejercicios de intercomparación, es imprescindible para asegurar la calidad del muestreo y el análisis polínico en todos los laboratorios pertenecientes a la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid y es la forma más eficaz de detectar los sesgos y desviaciones que se producen en el trabajo rutinario de los laboratorios.
2. Los resultados de este ejercicio de intercomparación mostraron una muy buena calidad de los datos polínicos de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid.
3. Dado que el análisis rutinario del polen atmosférico requiere profesionales muy experimentados, pensamos que son esenciales para asegurar el rendimiento de los técnicos y la calidad de los datos generados, programas adecuados de formación en análisis aerobiológico.
4. Asegurar la calidad datos aerobiológicos generados por las redes regionales, es fundamental para poder compartirlos con otras redes regionales, nacionales o continentales y para que puedan ser utilizados en estudios a gran escala.

## **Conclusiones capítulo II**

### **La Red Palinológica de la Comunidad de Madrid. Treinta años como sistema de vigilancia e información de polen aerovagante de utilidad en Salud Pública**

5. La Red Palinocam constituye un Sistema de Información de los niveles de polen atmosférico vinculado desde sus comienzos a un Programa Regional de Salud Pública. Continúa siendo un ejemplo de colaboración institucional, con el apoyo de la Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense y las distintas administraciones locales y regionales.
6. La difusión de la información de la Red Palinocam a través de la implementación e integración de distintos recursos informáticos supone una mejora cuantitativa y cualitativa, siendo de gran utilidad para todo el sistema asistencial, los pacientes y todos los usuarios que solicitan la información.
7. El conocimiento de la opinión de los usuarios de la Web, mediante encuestas, nos permitirá analizar los fallos y defectos, en orden a mejorar los contenidos aerobiológicos que se ofrecen en la Web.

### **Conclusiones capítulo III**

#### **Detección de cambios a largo plazo en la calidad biológica del aire de la Comunidad de Madrid mediante calendarios polínicos**

8. Los calendarios polínicos son una herramienta de gran utilidad para analizar y sintetizar la dinámica estacional del polen atmosférico, mediante un gráfico fácil de interpretar por los potenciales usuarios de esta información.
9. Las redes aerobiológicas deben proporcionar información ambiental fácil de interpretar a una gran diversidad de usuarios, gestores ambientales, médicos, responsables políticos, etc. y para múltiples propósitos (planificación urbana, salud pública, ecología, agricultura, etc.).
10. Hemos podido constatar importantes cambios temporales en el espectro polínico regional de las últimas décadas, con una tendencia al alza de los principales tipos de polen arbóreo en los principales núcleos urbanos.
11. Finalmente, proponemos el último calendario polínico de todas las estaciones aerobiológicas de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid para los últimos diez años (2013-2022), que consideramos la información aerobiológica de referencia en la actualidad para una de las áreas metropolitanas más pobladas de Europa.

### **Conclusiones Capítulo IV**

#### **Delimitación de las zonas de riesgo ambiental, basada en los niveles polínicos, los usos y vegetación del territorio**

12. La regionalización espacial en la evaluación de riesgos ambientales es una práctica común entre las instituciones responsables de la gestión de los sistemas de salud pública. Favorece la aplicación de planes de gestión y medidas de seguimiento para su evaluación y permite la optimización de recursos y fondos.
13. Este estudio propone la delimitación de seis zonas de riesgo aerobiológico en la Comunidad de Madrid en función de la abundancia y distribución de potenciales fuentes polínicas, cuya relación con la exposición al polen aéreo se analiza mediante las estaciones de muestreo aerobiológico de la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid.
14. La delimitación de zonas de riesgo aerobiológico en la Comunidad de Madrid constituye una herramienta interesante para la población residente y visitante de una de las mayores áreas metropolitanas de Europa.
15. Las zonas de riesgo propuestas en la Comunidad de Madrid con criterios científicos pueden adaptarse a otros criterios operativos, p. e. demográfico, administrativo, etc., y se puede aplicar un enfoque equivalente en otras redes de control de riesgos ambientales.

16. El cambio climático y otros impulsores del cambio global determinan variaciones en la configuración del uso de la tierra y la distribución de la vegetación, que podrían influir en los cambios en las áreas de riesgo aerobiológico a largo plazo.



# **10. Material Suplementario**

**Capítulo I. Control de calidad en el laboratorio de Aerobiología. Ejercicio interlaboratorio**

**Capítulo III. Detección de cambios a largo plazo en la calidad biológica del aire de la Comunidad de Madrid mediante calendarios polínicos**

**Capítulo IV. Delimitación de zonas de riesgo ambiental, basada en los niveles polínicos, los usos y vegetación del territorio**



## **Importance of the quality management of aerobiological monitoring networks: the case study of the Madrid Region in Spain**

Patricia Cervigón<sup>1</sup>, Zuzana Ferencova<sup>2</sup>, Ángel Cascón<sup>1</sup>, Jorge Romero-Morte<sup>1</sup>, Javier Galán Díaz<sup>3,1</sup>, Silvia Sabariego<sup>4</sup>, Margarita Torres<sup>1</sup>, Adela Montserrat Gutiérrez-Bustillo<sup>1</sup>, Jesús Rojo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Pharmacology, Pharmacognosy and Botany, Faculty of Pharmacy, Complutense University of Madrid, Madrid, Spain

<sup>2</sup> Atlantic Botanical Garden of Gijón, Gijón, Spain

<sup>3</sup> Department of Plant Biology and Ecology, University of Sevilla, Sevilla, Spain

<sup>4</sup> Department of Biodiversity, Ecology and Evolution, University Complutense of Madrid, Madrid, Spain

Patricia Cervigón (ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7774-5906>)

Zuzana Ferencova (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-0916>)

Ángel Cascón (ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6606-1550>)

Jorge Romero-Morte (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2108-578X>)

Javier Galán Díaz (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3284-3059>)

Silvia Sabariego (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3880-025X>)

Margarita Torres (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0906-5241>)

Adela Montserrat Gutiérrez-Bustillo (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6782-0527>)

\* Jesús Rojo, corresponding author: [jesrojo@ucm.es](mailto:jesrojo@ucm.es) (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3627-130X>)

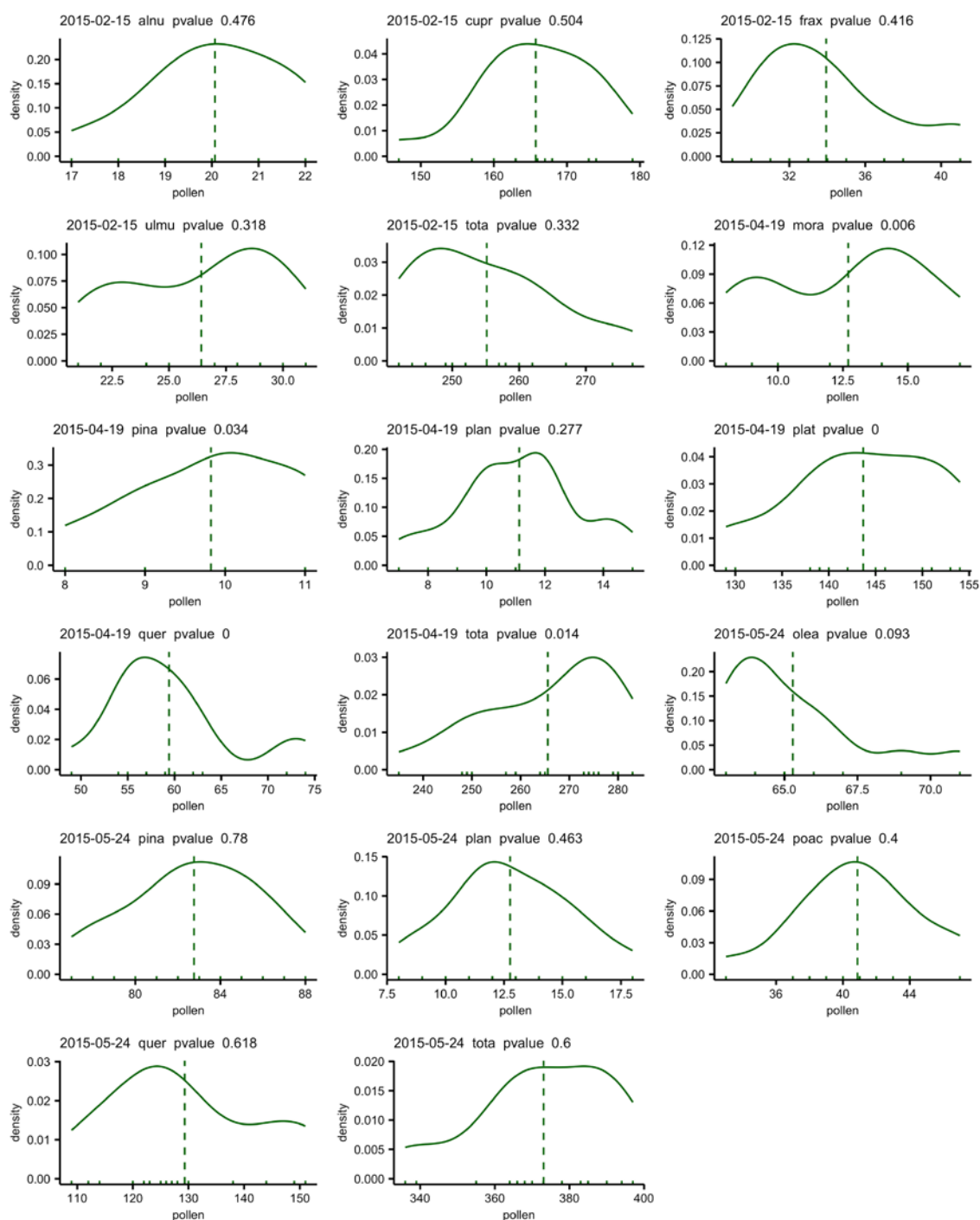


Figure S1. Density plots and Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) test for normality (pvalue) for each pollen type and sample for the proficiency test using different microscopes. Dashed line represents the mean value. Abbreviations of pollen types: alnu: *Alnus*; cupr: *Cupressaceae* (including *Taxaceae*); frax: *Fraxinus*, mora: *Moraceae*; olea: *Olea*; pina: *Pinaceae*; plan: *Plantago*; plat: *Platanus*; poac: *Poaceae*; quer: *Quercus*; ulmu: *Ulmus*; tota: total pollen.

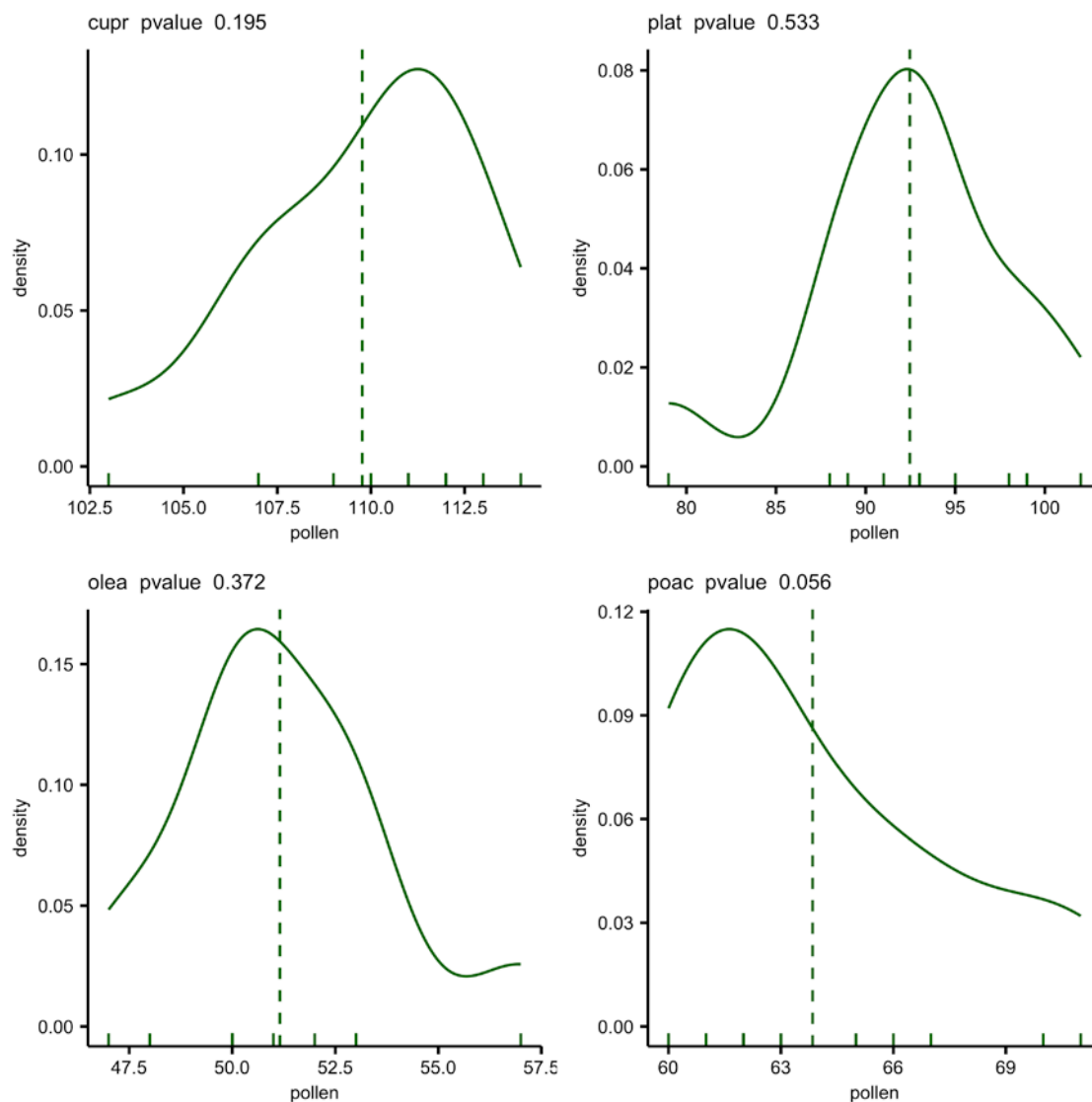


Figure S2. Density plots and Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) test for normality (pvalue) for each pollen type and sample for the proficiency test using the same microscope. Dashed line represents the mean value. Abbreviations of pollen types: cupr: Cupressaceae (including Taxaceae); olea: Olea; plat: Platanus; poac: Poaceae.

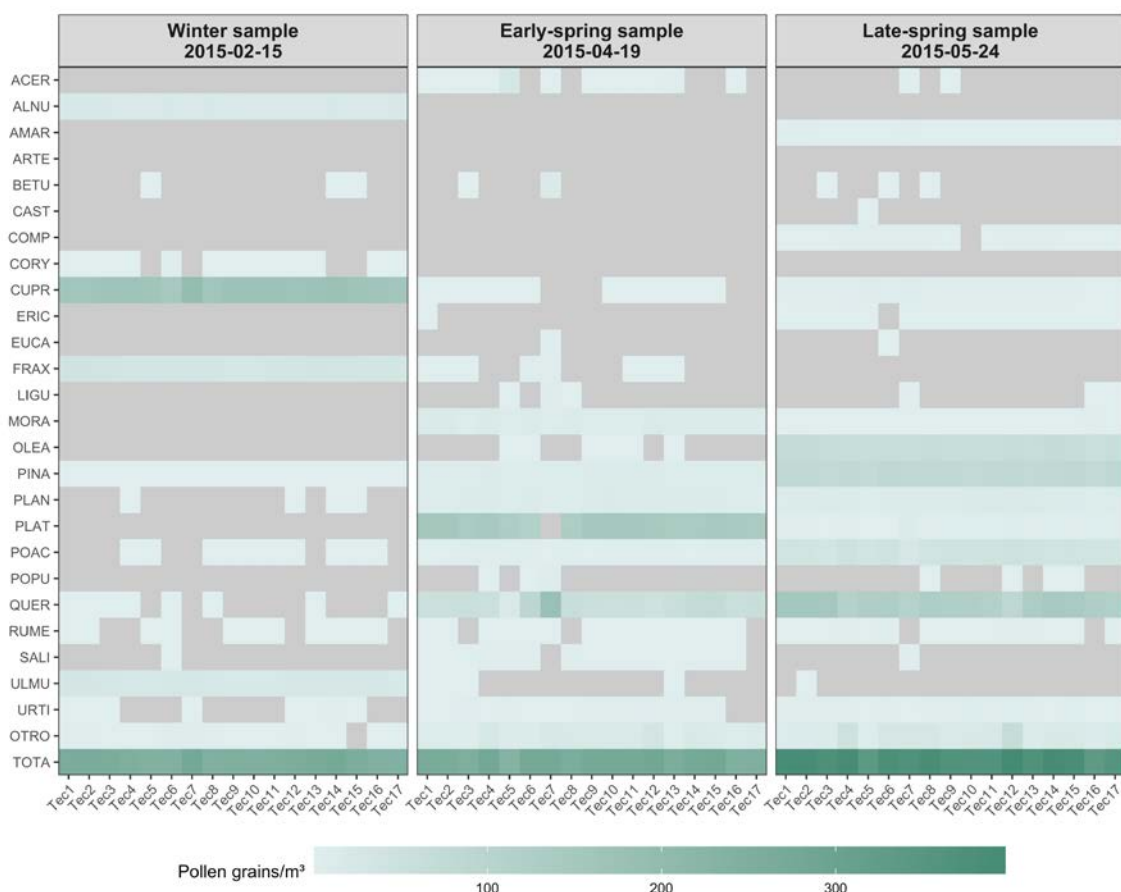


Figure S3. Pollen concentrations for each pollen type and sample recorded by technicians participating in the intercomparison exercise. Abbreviations of pollen types: ACER: Acer; ALNU: Alnus; AMAR: Amaranthaceae; ARTE: Artemisia; BETU: Betula; CAST: Castanea; COMP: Compositae (except Artemisia); CORY: Corylus; CUPR: Cupressaceae (including Taxaceae); ERIC: Ericaceae; EUCA: Eucalyptus, FRAX: Fraxinus, LIGU: Ligustrum; MORA: Moraceae; OLEA: Olea; PINA: Pinaceae; PLAN: Plantago; PLAT: Platanus; POAC: Poaceae; POPU: Populus; QUER: Quercus; RUME: Rumex; SALI: Salix; ULMU: Ulmus; URTI: Urticaceae; OTRO: other pollen types; TOTA: total pollen.

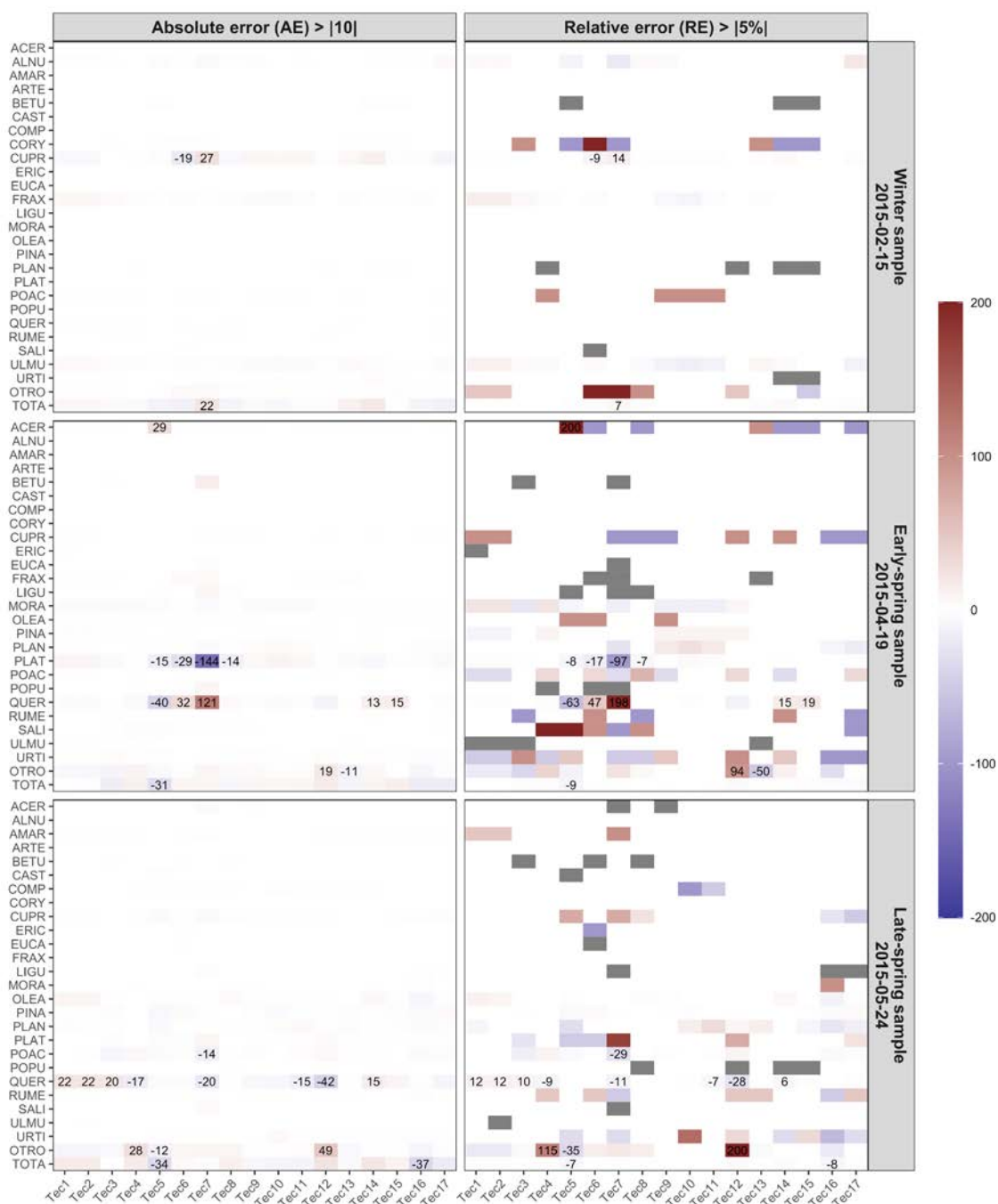


Figure S4. Absolute and relative errors made by technicians (Tec) participating in the intercomparison exercise. Errors were remarked when  $AE > |10|$  and  $RE > |5\%$ . Abbreviations of pollen types: ACER: Acer; ALNU: Alnus; AMAR: Amaranthaceae; ARTE: Artemisia; BETU: Betula; CAST: Castanea; COMP: Compositae (except Artemisia); CORY: Corylus; CUPR: Cupressaceae (including Taxaceae); ERIC: Ericaceae; EUCA: Eucalyptus, FRAX: Fraxinus, LIGU: Ligustrum; MORA: Moraceae; OLEA: Olea; PINA: Pinaceae; PLAN: Plantago; PLAT: Platanus; POAC: Poaceae; POPU: Populus; QUER: Quercus; RUME: Rumex; SALI: Salix; ULMU: Ulmus; URTI: Urticaceae; OTRO: other pollen types; TOTA: total pollen.

**Progressive pollen calendar to detect long-term changes in the biological air quality of cities in the Madrid Region, Spain**

Patricia Cervigón<sup>1,2</sup>, Jesús Rojo<sup>1</sup>, Zuzana Ferencova<sup>3</sup>, Ángel Cascón<sup>1</sup>, Jorge Romero-Morte<sup>1</sup>, Javier Galán Díaz<sup>4,1</sup>, Silvia Sabariego<sup>5</sup>, Margarita Torres<sup>1</sup>, Adela Montserrat Gutiérrez-Bustillo<sup>1</sup>

1 Department of Pharmacology, Pharmacognosy and Botany, Faculty of Pharmacy, Complutense University of Madrid, Madrid, Spain

2 Government of the Community of Madrid, Madrid, Spain

3 Atlantic Botanical Garden of Gijón, Gijón, Spain

4 Department of Plant Biology and Ecology, University of Sevilla, Sevilla, Spain

5 Department of Biodiversity, Ecology and Evolution, University Complutense of Madrid, Madrid, Spain

## Supplementary Material: Progressive pollen calendar to detect long-term changes in the biological air quality of cities in the Madrid Region, Spain

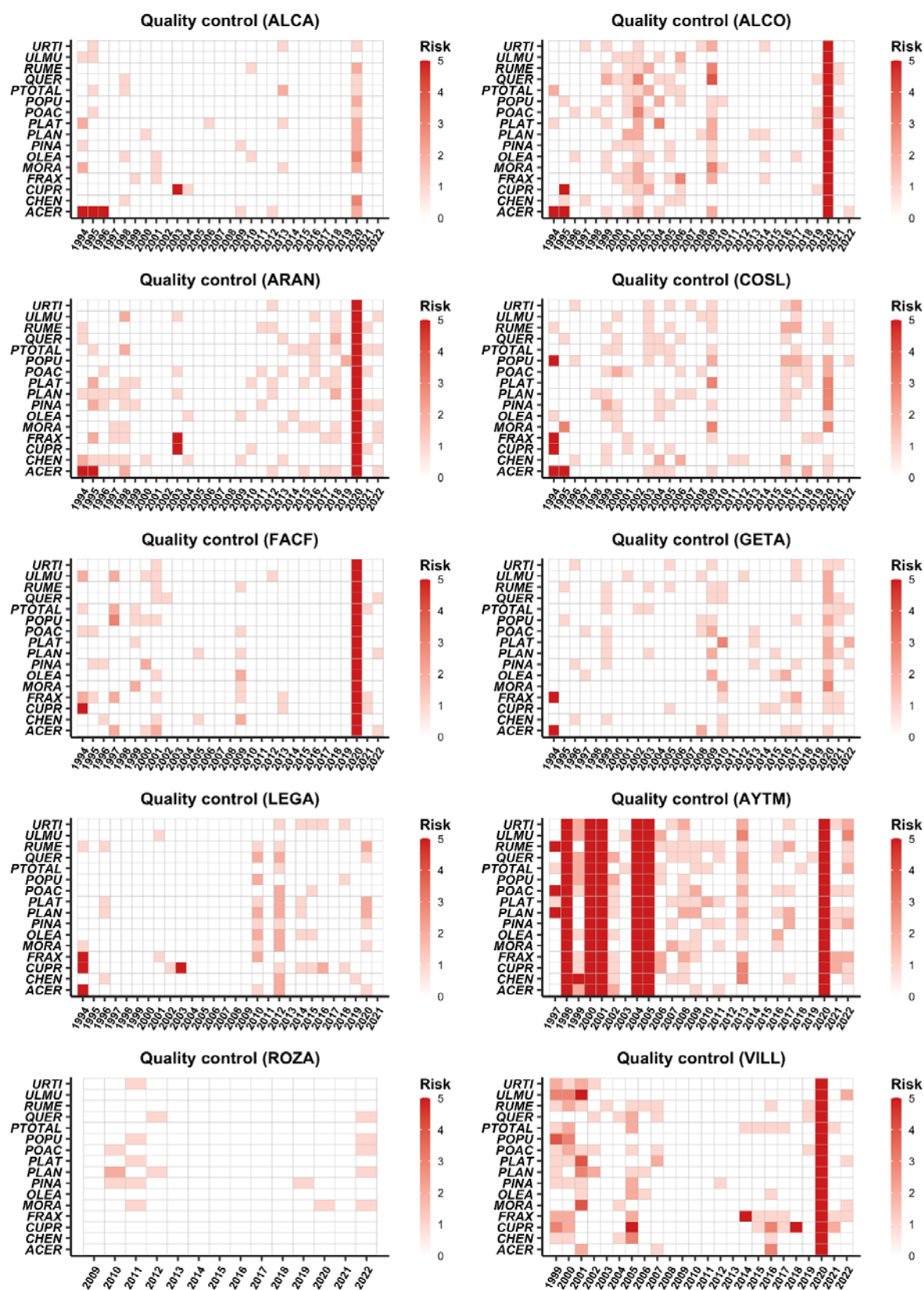


Figure S1. Quality control analysis to evaluate the elimination of incomplete years based on categories of risk. See Rojo et al. (2019) for more details. Pollen type abbreviations in section 2.2.

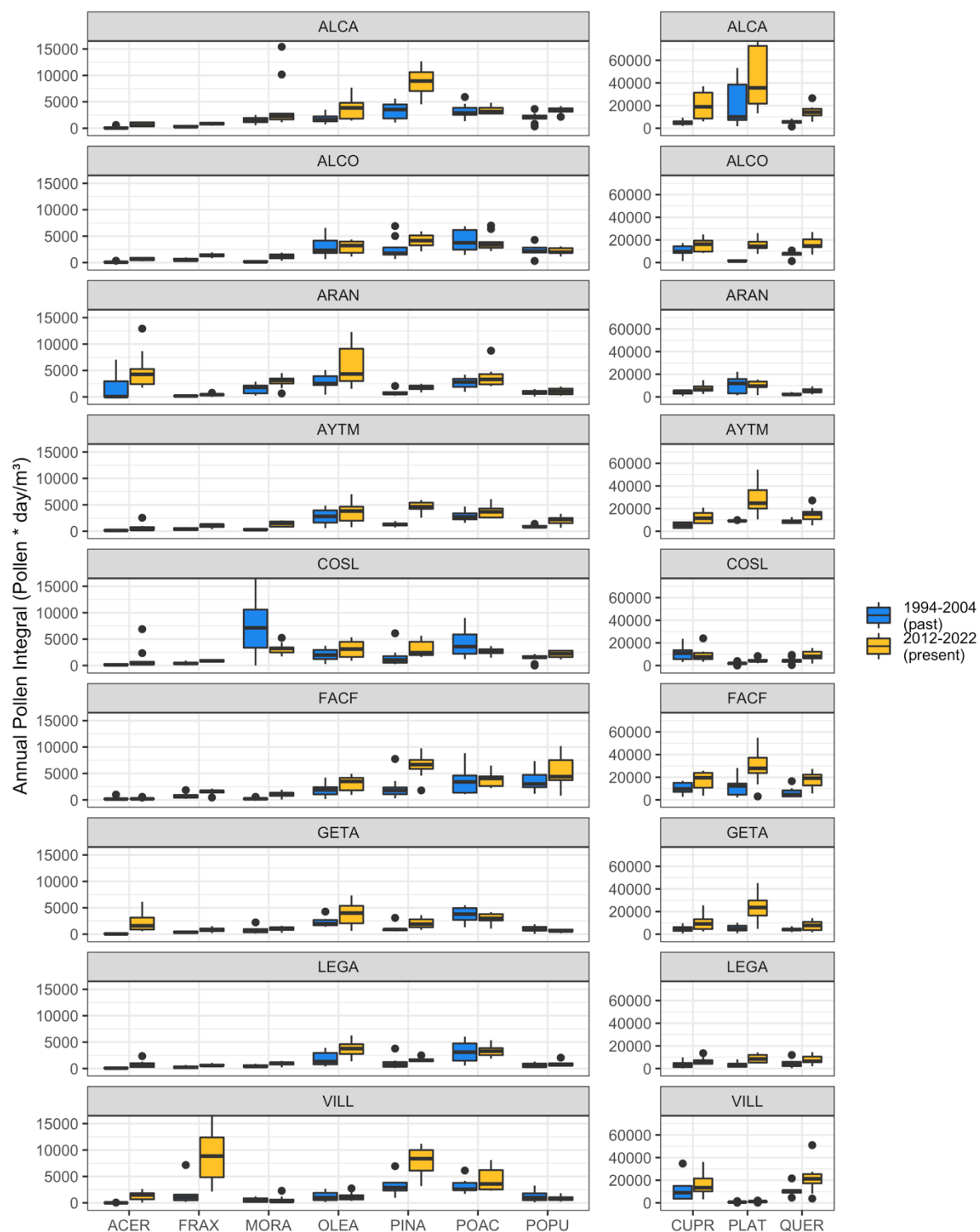
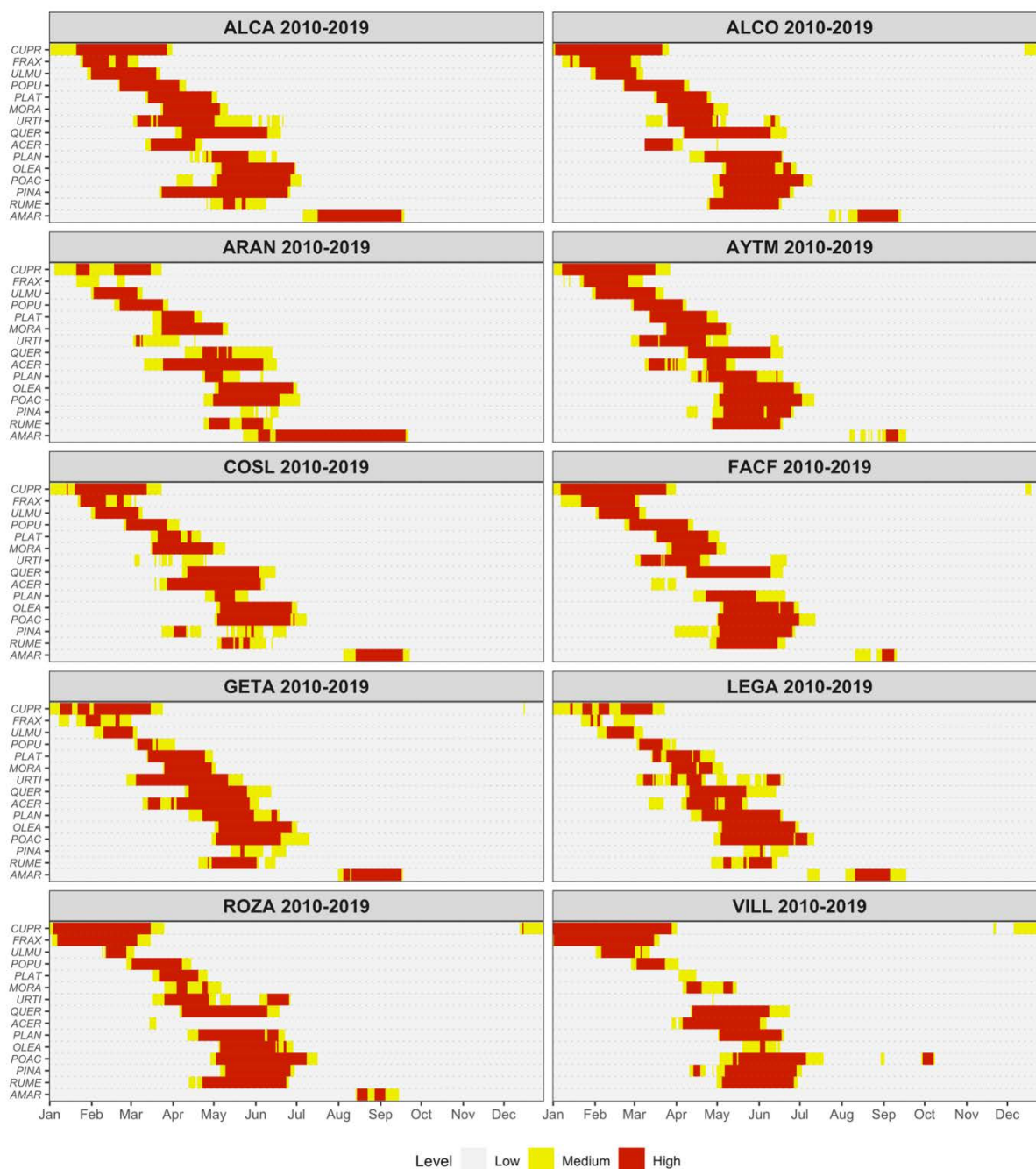


Figure S2. Differences in annual pollen amounts for each aerobiological station between two periods: 1994-2004 (past) and 2012-2022 (present). Pollen type abbreviations in section 2.2 and station abbreviations in Table 1. ROZA is excluded due to the shorter study period of this station.



Pollen thresholds (Pollen grains/m <sup>3</sup> )	ACER	AMAR	CUPR	FRAX	MORA	OLEA	PINA	PLAN	PLAT	POAC	POPU	QUER	RUME	ULMU	URTI
Medium	14	8	59	20	15	34	54	21	81	26	24	55	9	18	10
High	27	10	171	33	33	74	88	32	248	53	46	164	14	38	13

Figure S3. Pollen calendar for all the aerobiological stations in the Madrid Region Palynological Network during the period 2010-2019. This is a simplified version with only three categories of risk based on the quantile 95 (threshold between the categories low-medium, except for Cupressaceae, Poaceae and Quercus established in 90) and the quantile 97 (threshold between the categories medium-high, except except for Cupressaceae, Poaceae and Quercus established in 95). Criteria established by the Palinocam Network for the dissemination between the general public (<https://www.comunidad.madrid/servicios/salud/polen>, accessed: 2024.01.09).

## Supplemental material

### Assessment of environmental risk areas based on airborne pollen patterns as a response to land use and land cover distribution

Jesús Rojo<sup>1\*</sup>, Patricia Cervigón<sup>1</sup>, Zuzana Ferencova<sup>2</sup>, Ángel Cascón<sup>1</sup>, Javier Galán Díaz<sup>3,1</sup>, Jorge Romero-Morte<sup>1</sup>, Silvia Sabariego<sup>4</sup>, Margarita Torres<sup>1</sup>, Adela Montserrat Gutiérrez-Bustillo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Pharmacology, Pharmacognosy and Botany, Faculty of Pharmacy, Complutense University of Madrid, Madrid, Spain

<sup>2</sup> Atlantic Botanical Garden of Gijón, Gijón, Spain

<sup>3</sup> Department of Plant Biology and Ecology, University of Sevilla, Sevilla, Spain

<sup>4</sup> Department of Biodiversity, Ecology and Evolution, University Complutense of Madrid, Madrid, Spain

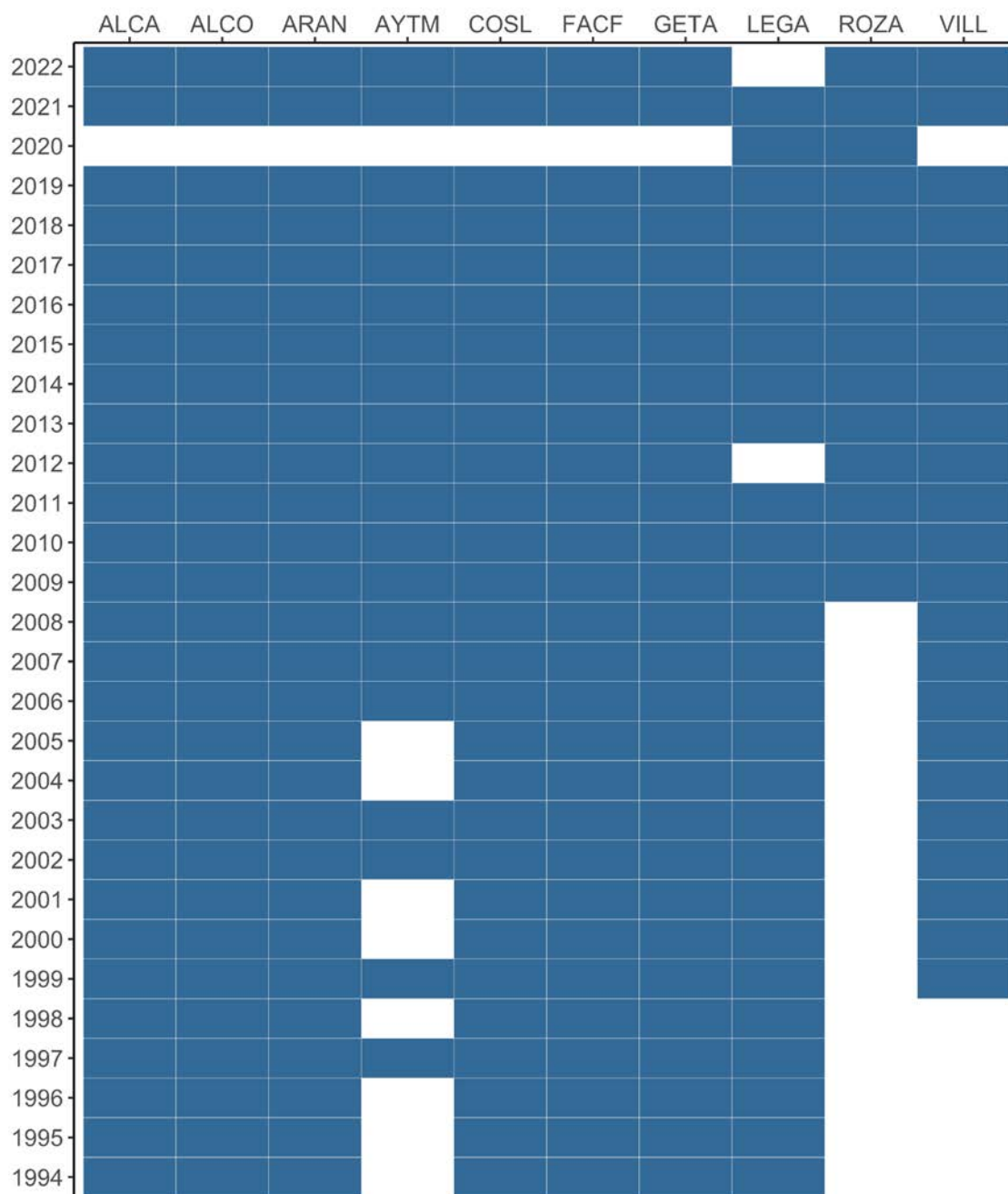
\* Jesús Rojo, corresponding author: [jesrojo@ucm.es](mailto:jesrojo@ucm.es)

Table S1. Results of the correlation between the pollen and land-use dendrogram (original vs cophenetic distance); and entanglement and correlation between pollen and land-use dendrograms (dend.) for different methods of distance estimation and cluster linkage.

Method (distance)	Method (cluster)	Correlation (pollen dend.)	Correlation (land-use dend.)	Entanglement (between dend.)	Correlation (between dend.)
canberra	average	0.81	0.91	0.69	0.74
canberra	centroid	0.54	0.86	0.27	0.83
canberra	complete	0.77	0.89	0.49	0.59
canberra	mcquitty	0.80	0.90	0.69	0.74
canberra	median	0.57	0.72	0.27	0.42
canberra	single	0.79	0.88	0.25	0.69
canberra	ward.D	0.61	0.88	0.86	0.29
canberra	ward.D2	0.63	0.89	0.86	0.32
euclidean	average	0.92	0.94	0.59	0.88
euclidean	centroid	0.84	0.94	0.03	0.90
euclidean	complete	0.85	0.88	0.44	0.66
euclidean	mcquitty	0.89	0.92	0.55	0.88
euclidean	median	0.85	0.91	0.03	0.82
<b>euclidean</b>	<b>single</b>	<b>0.91</b>	<b>0.93</b>	<b>0.27</b>	<b>0.95</b>
euclidean	ward.D	0.77	0.85	0.37	0.52
euclidean	ward.D2	0.90	0.86	0.39	0.70
manhattan	average	0.91	0.94	0.55	0.90
manhattan	centroid	0.87	0.95	0.21	0.95
manhattan	complete	0.60	0.86	0.70	0.21
manhattan	mcquitty	0.85	0.93	0.99	0.87
manhattan	median	0.80	0.92	0.21	0.93
manhattan	single	0.89	0.93	0.18	0.93
manhattan	ward.D	0.73	0.88	0.55	0.46
manhattan	ward.D2	0.74	0.88	0.55	0.47
maximum	average	0.58	0.91	0.10	0.64
maximum	centroid	-0.24	0.86	0.16	-0.31
maximum	complete	0.40	0.70	0.40	0.23
maximum	mcquitty	0.55	0.87	0.20	0.51
maximum	median	0.14	0.88	0.17	0.24
maximum	single	0.42	0.86	0.47	0.65
maximum	ward.D	0.51	0.82	0.71	0.11
maximum	ward.D2	0.51	0.84	0.71	0.10

Table S2. Thresholds to define categories of pollen risk used in the pollen calendars. Thresholds were calculated for all the aerobiological stations in the Madrid Region Palynological Network for the period 1994-2022 considering different quantiles (q): 80, 90, 92.5, 95, 97.5, 99 and 99.5%.

Pollen type	q80	q90	q92.5	q95	q97.5	q99	q99.5
<i>Acer</i>	0	1	3	6	18	55	106
Amaranthaceae	2	5	6	8	11	16	21
Cupressaceae	12	46	75	133	275	550	813
<i>Fraxinus</i>	0	4	6	12	26	58	104
Moraceae	0	2	4	12	35	95	170
<i>Olea</i>	1	7	14	31	80	175	265
Pinaceae	4	15	22	37	74	153	237
<i>Plantago</i>	3	9	13	20	34	58	77
<i>Platanus</i>	1	8	20	64	273	820	1600
Poaceae	8	23	33	52	91	155	208
<i>Populus</i>	0	4	9	21	50	114	180
<i>Quercus</i>	9	45	72	123	249	522	810
<i>Rumex</i>	1	3	5	8	15	26	37
<i>Ulmus</i>	0	3	6	14	40	104	168
Urticaceae	3	6	7	9	14	21	28



*Figure S1. Historical pollen time series from the Madrid Region Palynological Network for the period 1994-2022. Very incomplete years (gaps) were removed from the original database to reduce their impact on the analysis. Abbreviations: ALCA Alcalá de Henares, ALCO Alcobendas, ARAN Aranjuez, AYTM Madrid/Arganzuela, COSL Coslada, FACF Madrid/University, GETA Getafe, LEGA Leganés, ROZA Las Rozas, VILL Collado Villalba.*

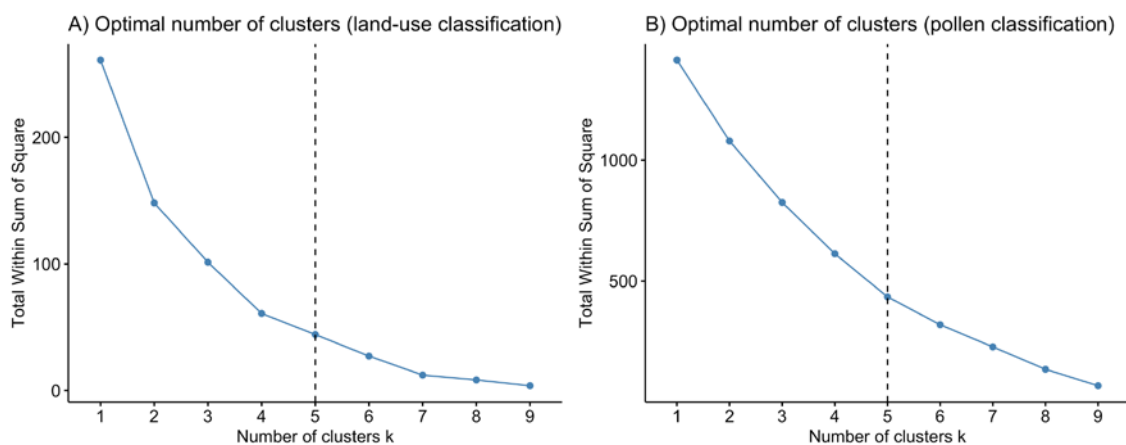


Figure S2. Optimal number of clusters calculated using the stabilisation of the curve of total within-cluster sum of squares for (A) land-use classification and (B) airborne pollen classification.

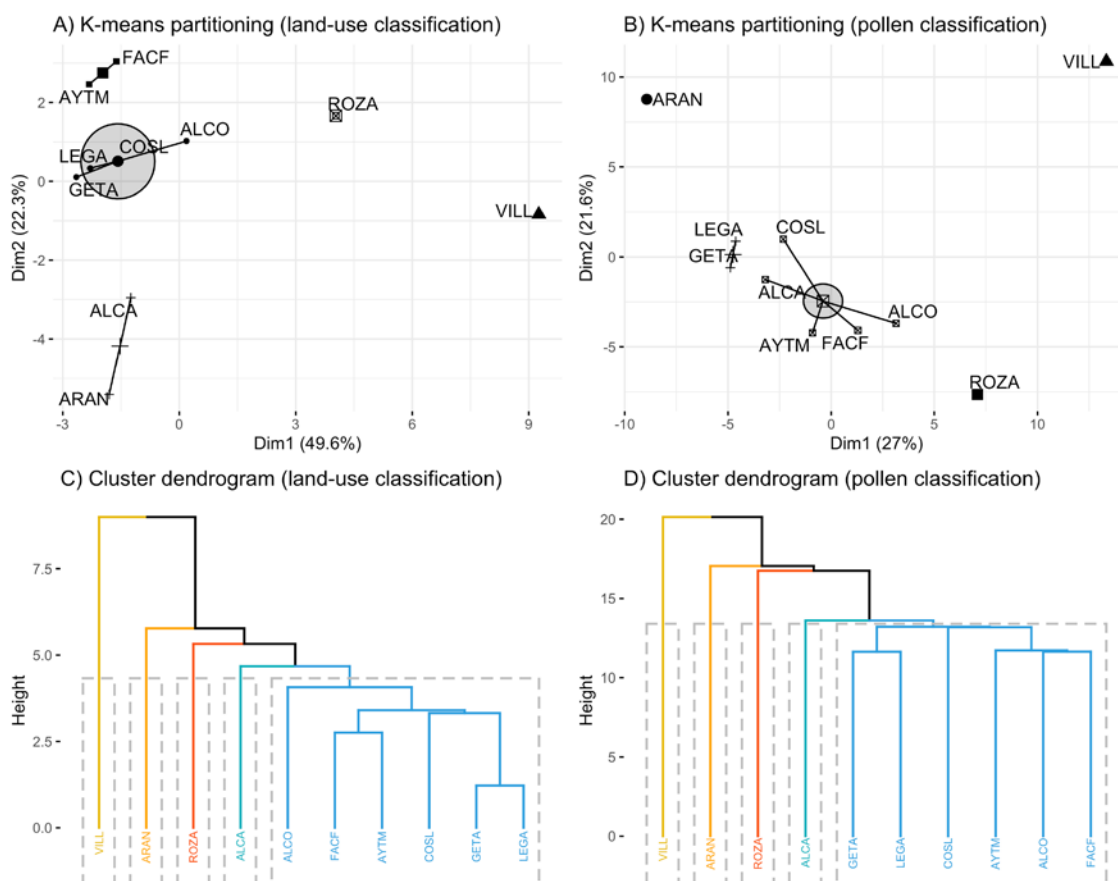


Figure S3. Classification of sampling stations using K-means partitioning clustering for (A) land-use classification and (B) airborne pollen classification, and agglomerative clustering for (C) land-use classification and (D) airborne pollen classification. Abbreviations: ALCA Alcalá de Henares, ALCO Alcobendas, ARAN Aranjuez, AYTM Madrid/Arganzuela, COSL Coslada, FACF Madrid/University, GETA Getafe, LEGA Leganés, ROZA Las Rozas, VILL Collado Villalba.

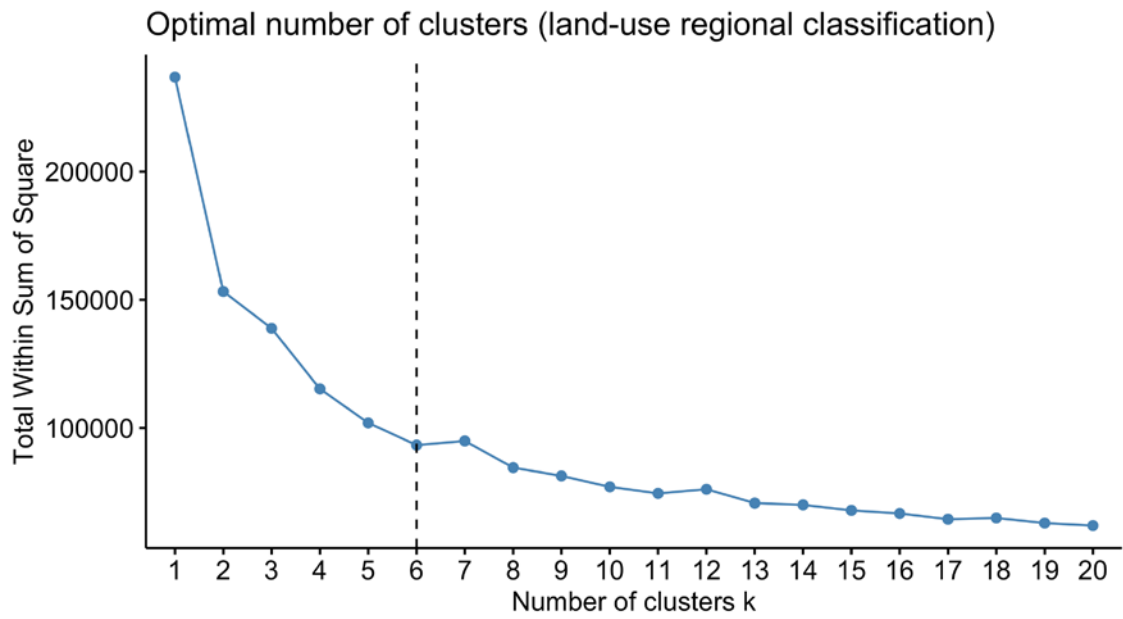


Figure S4. Optimal number of clusters calculated using the stabilisation of the curve of total within-cluster sum of squares for the pollen source regional classification (entire Madrid Region).

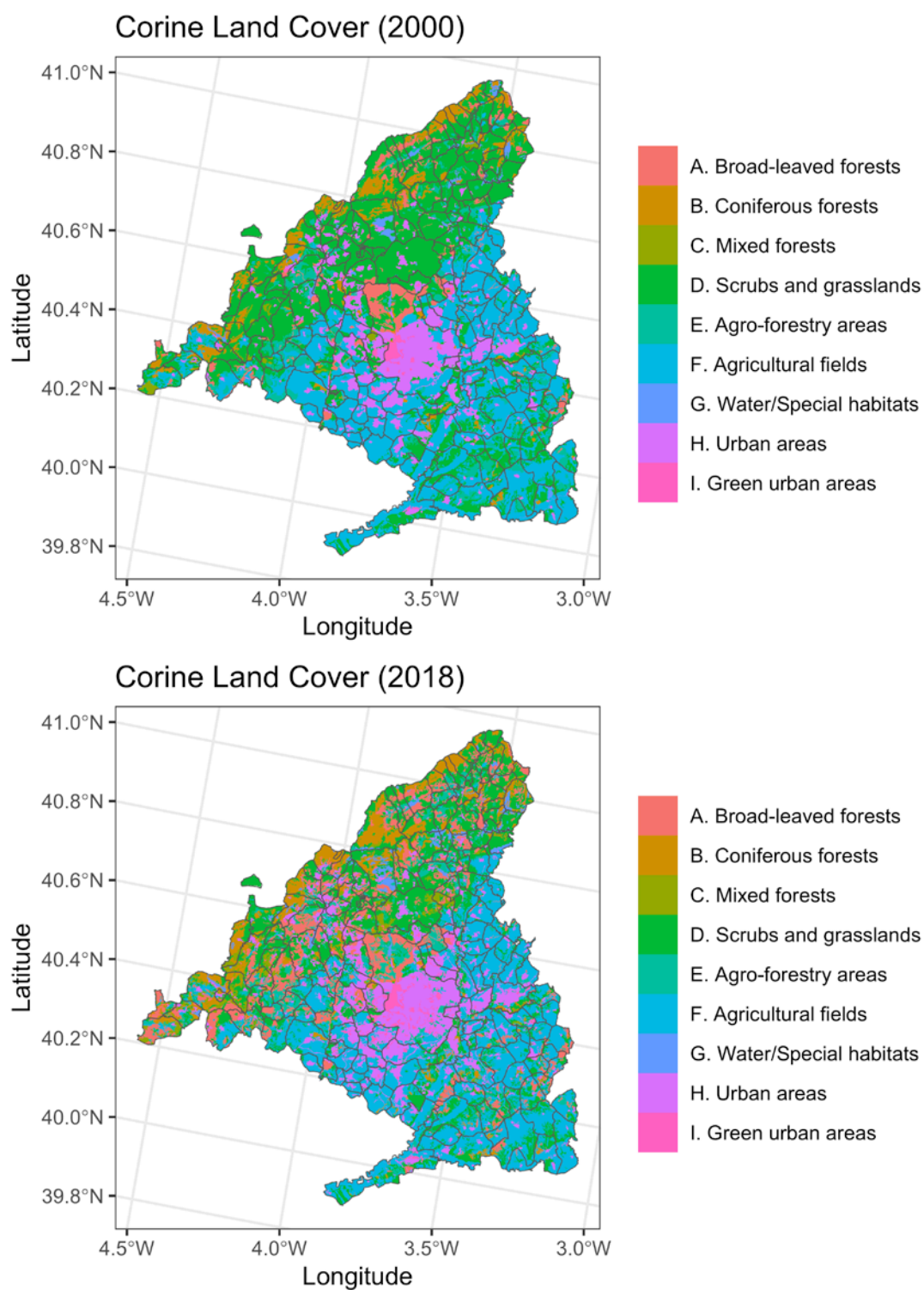


Figure S5. Main land uses found in the region according to the 2000 and 2018 Corine Land Cover products.

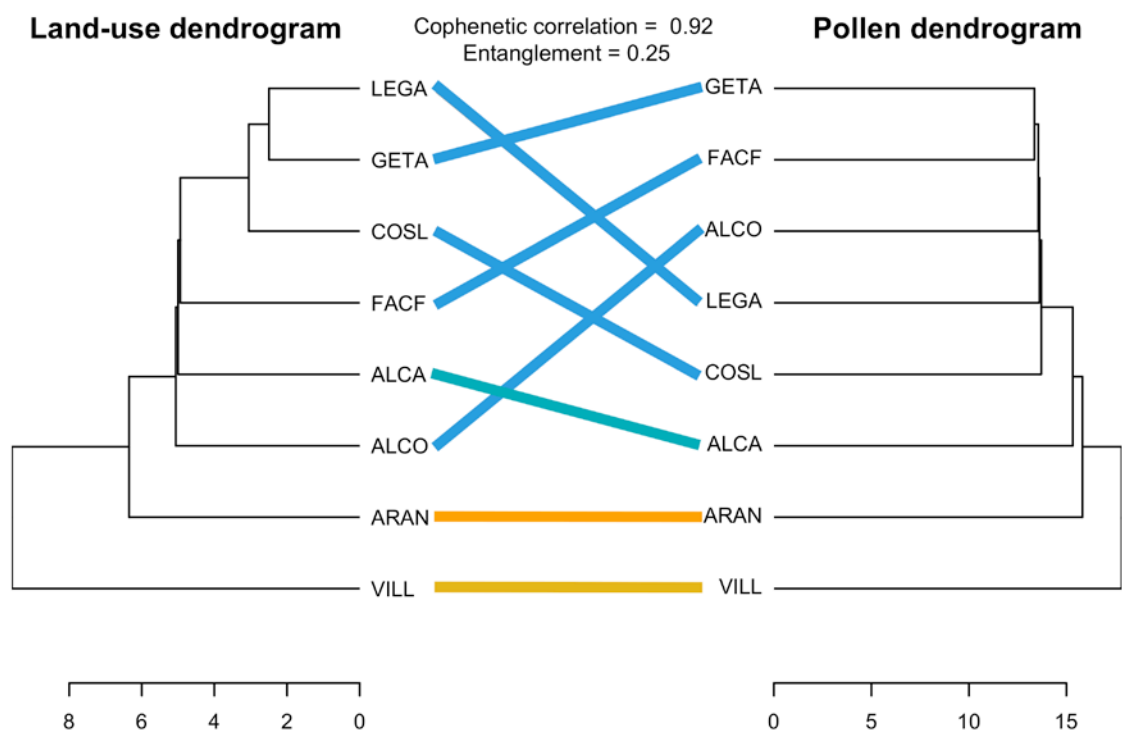
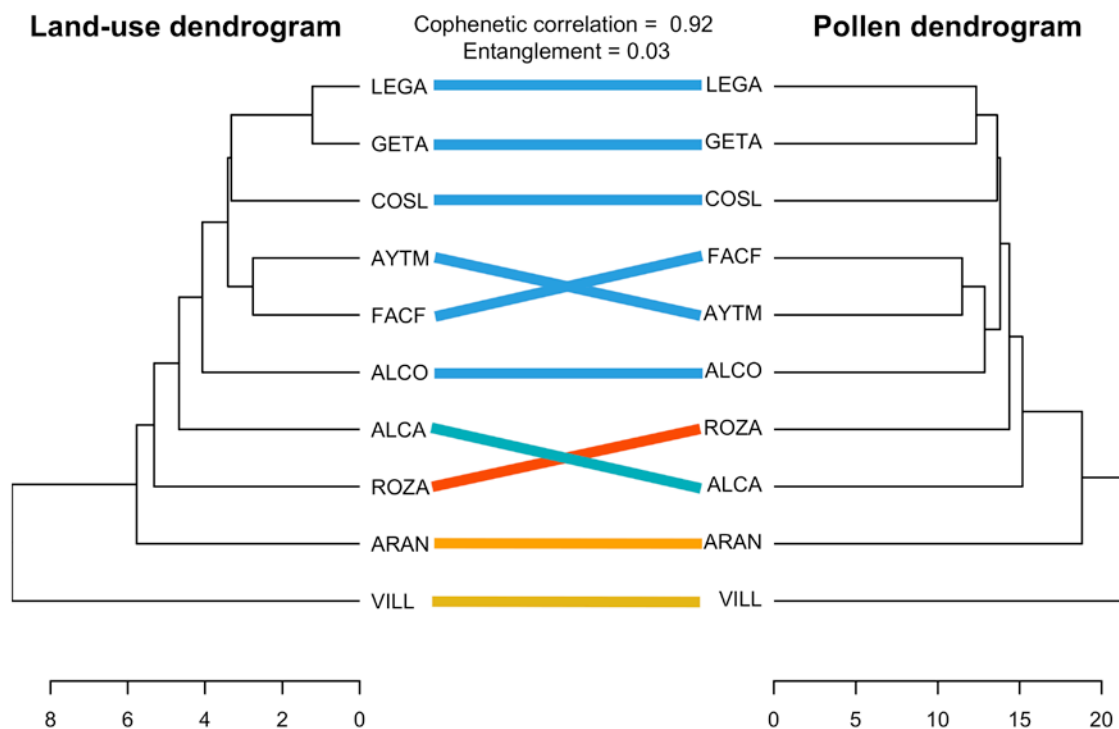


Figure S6. Comparison of the land-use and airborne pollen dendrograms of the sampling stations for the analysis of the period 1994-2008. Note that AYTМ and ROZA were removed from the analysis due to the lack of data during this period.



*Figure S7. Comparison of the land-use and airborne pollen dendrograms of the sampling stations for the analysis of the period 2009-2022. Note that AYTM and ROZA were removed from the analysis due to the lack of data during this period.*

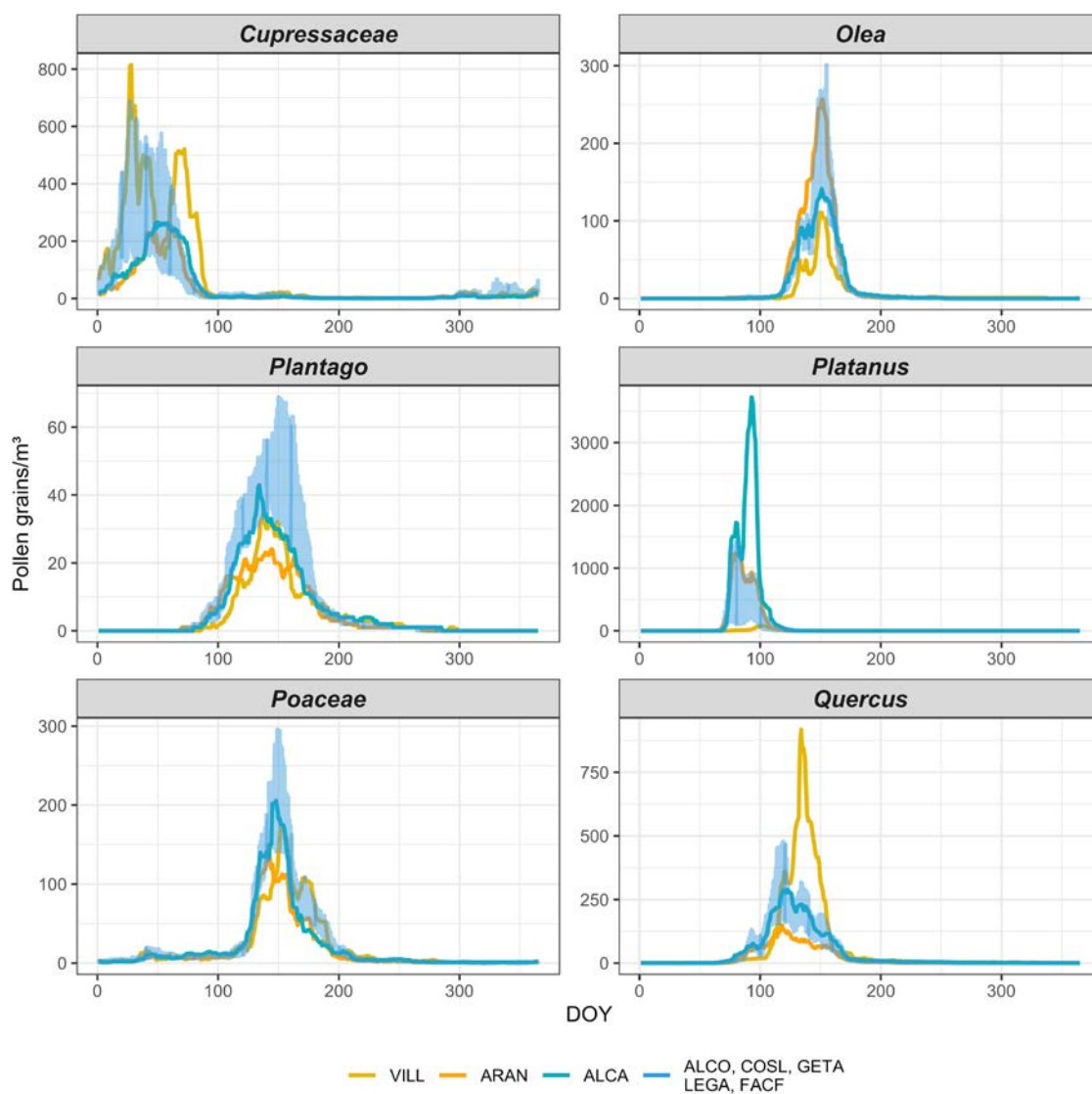


Figure S8. Airborne pollen curves for the different clusters for the analysis of the period 1994-2008. The pollen types considered are the most important from an allergenic and forestry point of view. In the cluster composed by ALCO, COSL, GETA, LEGA and FADF the curve is shown as a surface between the minimum and maximum values. Note that AYTМ and ROZA were removed from the analysis due to the lack of data during this period.

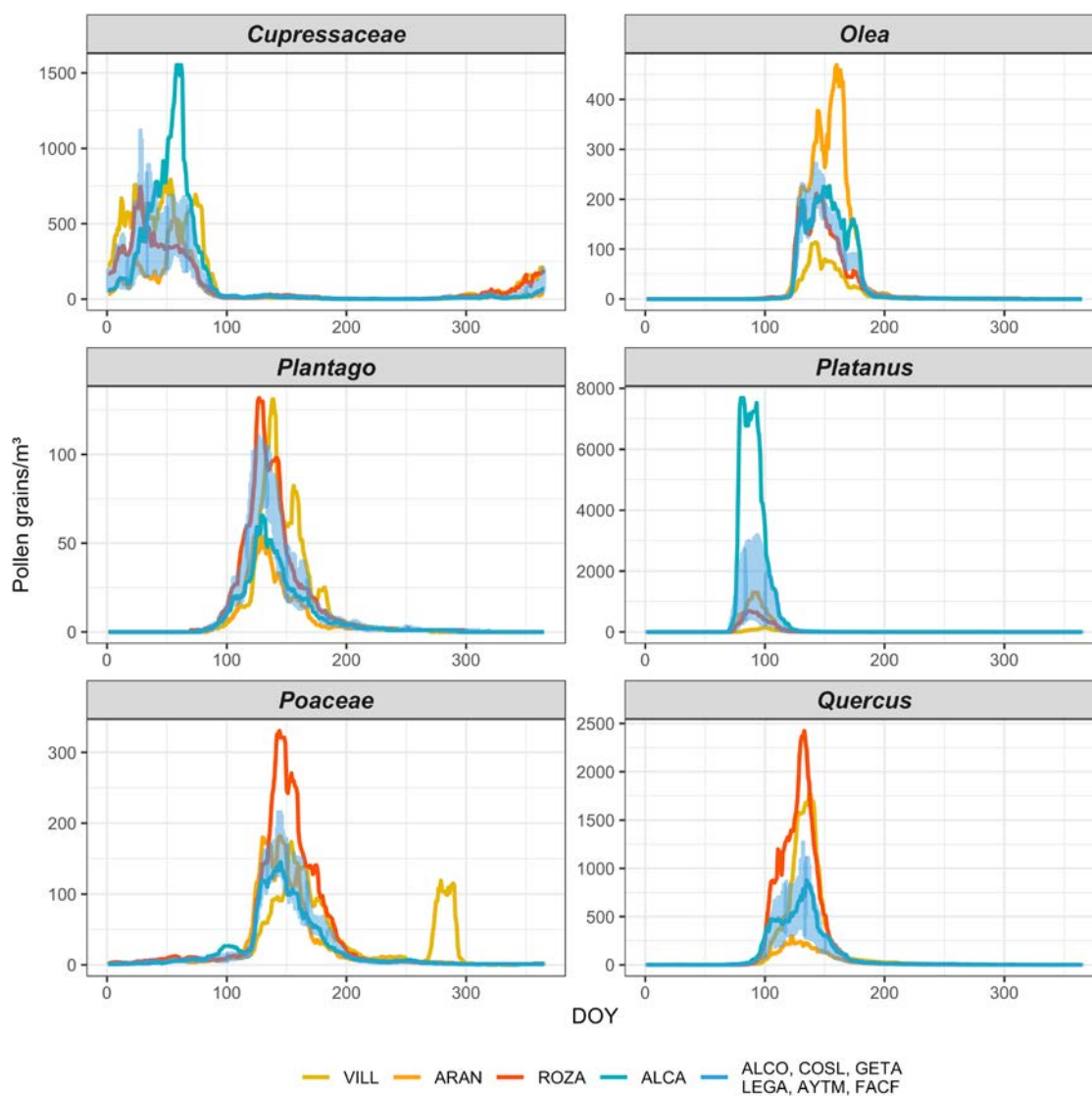


Figure S9. Airborne pollen curves for the different clusters for the analysis of the period 2009-2022. The pollen types considered are the most important from an allergenic and forestry point of view. In the cluster composed by ALCO, COSL, GETA, LEGA, FACF and AYTM the curve is shown as a surface between the minimum and maximum values.

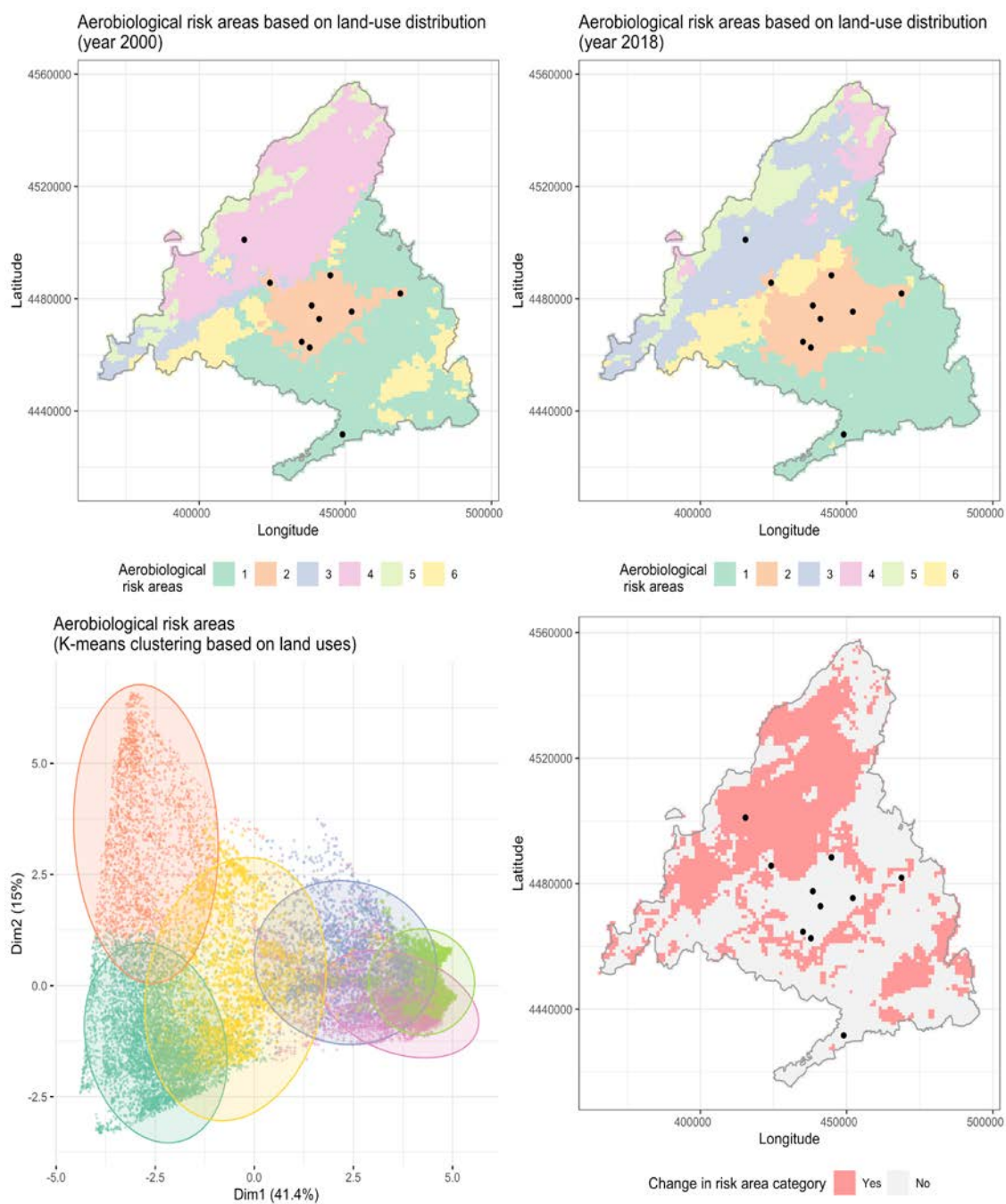


Figure S10. Definition of six areas of aerobiological risk in the entire Madrid Region based on the land-use classification for two periods (2000 and 2018) (top), k-means partitioning clustering based on the pollen source regional classification (bottom left) and map of change in risk area category between both periods (2000 and 2018) (bottom right).

