

Incidencia de las concentraciones de polen alergénico del tipo *Platanus* en el centro de la península Ibérica



Departamento de Ciencias Ambientales. Área de Botánica.

Facultad de Ciencias Ambientales y Bioquímica.

Universidad de Castilla-La Mancha

**Incidencia de las concentraciones de polen alergénico del tipo
Platanus en el centro de la península Ibérica**

Memoria presentada por la Doctoranda Beatriz Lara Espinar para optar al grado de
Doctor por la Universidad de Castilla-La Mancha.

Trabajo dirigido por la Dra. Rosa Pérez Badía, Profesora Titular de Botánica del
Departamento de Ciencias Ambientales de la Universidad de Castilla-La Mancha, y por
el Dr. Jesús Rojo Úbeda, Profesor Asociado del Departamento de Ciencias
Ambientales.

La doctoranda

Vº Bº de la Directora

Vº Bº del Director

Beatriz Lara Espinar

Rosa Pérez Badía

Jesús Rojo Úbeda

Agradecimientos

Es curioso lo difícil que me resulta encontrar las palabras adecuadas para expresar la gratitud que siento hacia las personas que me han apoyado durante estos años, en el fondo se debe a que no hay palabras para describir estos sentimientos.

Comenzando por el principio quiero agradecer a Rosa, mi directora de tesis, que me diese la oportunidad de iniciarme en esta etapa de mi vida. Aún recuerdo cuando me propusiste trabajar en el laboratorio y quién me iba a decir que en ese trabajo encontraría mi pasión en la investigación y en la Aerobiología. Hace muchos años de eso y, durante todos ellos, has sido un ejemplo que seguir y una fuente de inspiración. También quiero agradecer a Jesús, mi director de tesis, la paciencia que has tenido y la tranquilidad que has intentado trasmitirme. Sin duda eres otro de mis ejemplos a seguir por tu gran esfuerzo y constancia. A mis directores de tesis, gracias por todos los conocimientos que me habéis trasmitido durante estos años y que espero que me sigáis transmitiendo, gracias por las responsabilidades depositadas en mí y por darme la confianza de trabajar a mi manera. Esta memoria no hubiese sido posible sin vuestro esfuerzo y apoyo.

No puedo olvidarme de agradecer a Ana Rapp especialmente por su paciencia, pero también por todas sus enseñanzas, consejos y ánimos. Has sido un ángel de la guarda durante todos estos años. A mis compañeras de laboratorio, Alicia y Dámaris, gracias por todos los momentos compartidos y por toda la ayuda recibida. Siempre he podido contar con vosotras y eso ha sido una gran tranquilidad.

Este camino no hubiese sido posible sin el apoyo de mis padres y amigos. A mis padres se lo debo todo durante estos años; la paciencia, el respeto, la financiación, pero sobre todo sus ánimos constantes y su atención pese a que no entendiesen nada de lo que les estaba contando. A Darío, que considera que todo esto es aburridísimo, tengo que agradecer los momentos en los que me has distraído con tus tonterías y al ánimo pese a que no entienda mi estilo de vida. A mi tía Maricarmen y mi tío Jose, gracias por toda vuestra ayuda, preocupación y cariño. Sin olvidar a mi familia toledana y en especial a Lola, gracias por estar siempre ahí.

Juanjo, porque ninguno de los dos sabíamos exactamente en lo que me metía, no hay palabras para describir lo importante que has sido en ese camino. Sin tu apoyo, paciencia

y sacrificio no hubiese sido posible llegar hasta este punto. Gracias por entenderme sin entenderme y gracias por confiar en mí, incluso más que yo misma.

A mis compañeras de experiencia, Patri y Mercedes, gracias por todos esos cafés de cinco minutos y esas miradas de ánimo. Sólo las personas que viven lo mismo que tú saben cómo te sientes y por eso tengo que agradecer tanto las conversaciones mantenidas como las preguntas no realizadas.

A Cristina, Sandra y Blanca, porque aun sabiendo que no os he dedicado todo el tiempo que debería, me habéis mantenido al día y habéis sabido hacerme un hueco en vuestra vida. Gracias por todas las experiencias compartidas, por sacarme de la rutina y por vuestro apoyo.

A toda la gente que ha hecho posible, de una forma u otra, este trabajo.

Índice

Resumen.....	7
Abstract.....	11
1. Introducción.....	15
1.1. Antecedentes y justificación.....	17
1.2. Plátano de sombra.....	20
1.3. Procesos de emisión y dispersión polínica.....	27
2. Objetivos.....	43
3. Consideraciones metodológicas.....	47
3.1. Área de estudio.....	49
3.2. Estudio aerobiológico.....	51
4. Capítulo I. Impacto de la abundancia del arbolado de plátano de sombra en las variaciones temporales y espaciales de la concentración de polen.....	57
5. Capítulo II. La predicción de las concentraciones de polen atmosférico de plátano de sombra, una herramienta para evaluar el riesgo de alergia de los espacios verdes urbanos.....	77
6. Capítulo III. Patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.	91
7. Discusión general.....	119
8. Conclusiones generales / General conclusions	143

Resumen

El plátano de sombra (*Platanus orientalis* L. var. *acerifolia* Dryand.) es una especie ornamental ampliamente utilizada en los espacios verdes urbanos de la región Mediterránea. El cultivo masivo de esta especie en las ciudades provoca que durante el periodo de polinización se registren elevadas concentraciones de polen en la atmósfera. Esto, unido a que el polen de esta especie es causante importante de polinosis, conlleva que el estudio de la dinámica y el comportamiento aerobiológico de esta especie posean gran interés.

En este trabajo se han estudiado los factores ambientales y las variables meteorológicas que influyen en la dinámica y el comportamiento aerobiológico del plátano de sombra en el centro de la península Ibérica. El inicio del periodo de polinización de esta especie, que transcurre durante los meses de marzo y abril, da comienzo al importante periodo de alergias de primavera. Aunque la estación polínica del plátano de sombra es corta, es muy intensa lo que produce que la concentración de polen exceda el umbral de riesgo de alergia para las personas sensibles a este tipo polínico.

El objetivo general de esta Tesis Doctoral es analizar las concentraciones de polen del tipo polínico *Platanus* y de su alérgeno mayoritario Pla a 1 en el aire, así como determinar los factores antrópicos y las variables meteorológicas más influyentes para generar modelos de predicción de las concentraciones de polen en el aire y con ello evaluar el riesgo de alergia para la población sensible. Este objetivo principal se desglosa en una serie de objetivos específicos que se abordan en los diferentes apartados de esta memoria:

- Capítulo I: impacto de la abundancia del arbolado de plátanos de sombra sobre las variaciones temporales y espaciales de la concentración de polen.
- Capítulo II: la predicción de las concentraciones de polen atmosférico de plátano de sombra, una herramienta para evaluar el riesgo de alergia de los espacios verdes urbanos.
- Capítulo III: patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

En el Capítulo I se analiza la dinámica y el comportamiento aerobiológico del plátano de sombra desde el punto de vista espacial y temporal en el centro de la península Ibérica. Los resultados obtenidos se relacionan con la evolución de los árboles plantados durante las dos últimas décadas en la ciudad de Toledo.

Los resultados muestran una tendencia hacia el incremento de la cantidad anual de polen junto con un incremento en el número de días de riesgo de alergia lo que puede derivar en un problema de salud pública. Estas tendencias se relacionan con un claro incremento de la plantación de árboles en las ciudades. Esta relación se pone de manifiesto por primera vez de manera empírica a través del inventario del número de árboles.

En el Capítulo II se desarrollan diferentes modelos de predicción de la concentración polínica del plátano de sombra en la ciudad de Toledo, con el objetivo de conseguir un modelo capaz de estimar los niveles de riesgo alergénico con la mayor antelación posible. Para la construcción de estos modelos se han identificado los patrones de variación a largo y corto plazo utilizando un proceso de descomposición muy utilizado en metodología estadística de análisis de series temporales. Se ha identificado un patrón de comportamiento cíclico cada tres años, caracterizado por la presencia de dos años con elevadas concentraciones de polen seguido por un tercer año con una menor concentración, atribuido a las podas periódicas realizadas en la ciudad. Las oscilaciones a corto plazo de la curva de polen han sido modeladas utilizando los datos diarios de las concentraciones de polen y los valores de las variables meteorológicas (temperatura máxima y mínima, precipitación y humedad relativa) de días anteriores.

Todos los modelos generados con esta metodología permiten identificar adecuadamente los picos de concentración polínica que suponen un riesgo alto para la población sensible. El modelo generado con el patrón cíclico de tres años y los valores de las variables de 7 a 9 días previos permite explicar la mayor varianza (60-70%) de entre los modelos construidos. En concreto, este modelo supone un avance importante ya que permite pronosticar los niveles de polen de plátano de sombra con una semana de antelación.

En el Capítulo III se ha estudiado la correspondencia entre las concentraciones diarias de polen de *Platanus*, *Poaceae* y *Olea* y las de sus alérgenos mayoritarios, Pla a 1, Phl p

1, Phl p 5 y Ole e 1, en las ciudades de Toledo y Évora (Portugal). Además, se han identificado los casos discrepantes entre las concentraciones de ambas variables y se han analizado las variables meteorológicas (temperatura, precipitación y humedad relativa) que pueden provocar esta discrepancia.

Los resultados obtenidos indican que existe una buena correspondencia entre las concentraciones de polen y de alérgeno, pese a la presencia de algunas discordancias entre ambas concentraciones. Estos resultados demuestran que los sistemas de alerta sanitaria basados en los niveles de concentración de polen como índice de riesgo de alergia son efectivos.

La humedad relativa y la temperatura son las variables que más influyen en la presencia de episodios discordantes entre la concentración de polen y alérgeno. Además, para cada tipo polínico estudiado se han identificado diferentes patrones atribuidos a la incidencia de estas variables meteorológicas sobre las distintas fases del proceso aerobiológico.

En el caso del plátano de sombra, la relación polen-alérgeno se correlacionó positivamente con la humedad relativa de los días inmediatamente anteriores al registro de partículas (polen y alérgenos). En el caso del olivo, cuyo polen posee gran capacidad dispersiva, la relación entre las concentraciones de polen y de alérgeno son más dependientes de las variables meteorológicas de 4-6 días antes, más asociadas al proceso de emisión y dispersión. En cuanto a la relación polen-alérgeno de Poaceae, la influencia de las variables meteorológicas es similar al caso del olivo; destacando que las estaciones polínicas de *Olea* y Poaceae coinciden en el tiempo y presentan un comportamiento parecido en el centro de España. Además, la relación entre la comparativa polen de Poaceae y alérgeno Phl p 5 y las variables meteorológicas en la ciudad de Évora (Portugal) ha mostrado similares resultados a los obtenidos en Toledo para el polen de Poaceae y el alérgeno Phl p 1.

Los resultados de esta Tesis Doctoral permiten ampliar el conocimiento sobre la dinámica y el comportamiento del polen del plátano de sombra y la forma en la que las variables ambientales y meteorológicas influyen en la concentración atmosférica de este tipo polínico. Los resultados ponen de manifiesto la importancia de incorporar los estudios aerobiológicos a los planes de gestión de las zonas verdes urbanas. Por otra parte,

Resumen

se han obtenido modelos de predicción de las concentraciones de polen con una antelación de siete días e importantes resultados respecto a la influencia de los patrones ambientales en la relación entre las concentraciones de polen y la carga alérgica para interpretar mejor los índices de riesgo alérgico.

Abstract

The plane tree (*Platanus orientalis* L. var *acerifolia* Dryand.) is a highly used ornamental species in urban green spaces in the Mediterranean region. The massive cultivation of this species in the cities causes high pollen concentrations in the atmosphere during the pollination period. This, together with the fact that the pollen of this species is an important cause of pollinosis, implies that the study of the dynamics and aerobiological behaviour of this species have great interest.

In this Doctoral Thesis, the environmental factors and meteorological variables that influence the dynamics and aerobiological behaviour of the plane tree in the center of the Iberian Peninsula have been studied. The beginning of the pollination period of this species, which takes place during the months of March and April, leads to the beginning of the important period of spring allergies. Although the plane tree pollen season is short, it is very intense which causes that the pollen concentration exceeds the allergy risk threshold for people sensitive to this pollen type.

The main aim of this Doctoral Thesis is to analyze the pollen concentrations of the *Platanus* pollen type and its major allergen Pla a 1 in the atmosphere, as well as determine the anthropic factors and meteorological variables to generate prediction models of airborne pollen concentrations and thereby assess the risk of allergy for the sensitive population.

This main objective is broken down into a series of specific objectives that are developed in the different chapters of this thesis:

- Chapter I: Impact of plane tree abundance on temporal and spatial variations in pollen concentration
- Chapter II: Prediction of airborne pollen concentrations for the plane tree, as a tool for evaluating allergy risk in urban green areas.
- Chapter III: Environmental patterns and their relationships with atmospheric pollen and allergen concentrations of plane tree, grasses and olive tree.

In Chapter I the dynamics and aerobiological behaviour of the plane tree are analyzed from a spatial and temporal point of view in the center of the Iberian Peninsula. The results obtained are related to the evolution of the trees planted during the last two decades in the city of Toledo.

The results show a trend towards increasing the annual pollen index along with an increase in the number of allergy risk days which will result in a public health problem. These trends are related to a clear increase in plane tree planting in cities. This relationship is empirically revealed for the first time through the inventory of the number of trees.

In Chapter II different models of prediction of the plane tree pollen concentrations in the city of Toledo are developed, with the aim of obtaining a model capable of estimating the levels of allergenic risk as early as possible.

In order to construct these models, long- and short-term variation patterns are identified using a decomposition process widely used in statistical methodology of time series analysis. A pattern of cyclic behaviour has been identified every three years, characterized by the presence of two years with high pollen concentrations followed by a third year with a lower concentration, attributed to the periodic pruning performed in the city. The short-term oscillations of the pollen curve have been modelled using the daily data of pollen concentrations and the values of the meteorological variables (maximum and minimum temperature, precipitation and relative humidity) of previous days. All models generated with this methodology allow the proper identification of pollen concentration peaks that mean a high risk for the sensitive population.

The model generated with the three-year cyclic pattern together with the values of the meteorological variables corresponding to 7 to 9 days before the prediction, is the one that obtains the best result in terms of the explained variance (60-70%). Specifically, this model represents an important advance as it allows predicting plane tree pollen levels one week in advance.

In Chapter III the correspondence between the daily *Platanus*, *Poaceae* and *Olea* pollen concentrations and those of its major allergens, Pla a 1, Phl p 1, Phl p 5 and Ole e 1, in the cities of Toledo and Évora (Portugal) has been studied. Besides, the discrepant cases between the concentrations of both variables have been identified and the

meteorological variables (temperature, precipitation and relative humidity) that can cause this discrepancy have been analyzed.

The results obtained indicate that there is a good correspondence between pollen and allergen concentrations, despite the presence of some disagreements between both of them. These results demonstrate that the health alert systems based on pollen concentration levels as an allergy risk index are effective.

Relative humidity and temperature are the variables that most influence the presence of discordant episodes between the concentrations of pollen and allergen. Moreover, for each pollen type studied, different patterns attributed to the incidence of these meteorological variables on the different phases of the aerobiological process have been identified.

In the case of the plane tree, the pollen-allergen ratio was positively related to the relative humidity of the days immediately previous to the particle registration. On the other hand, in the case of the olive tree, whose pollen possesses great dispersive capacity, the relationship between pollen and allergen concentrations is more dependent on the weather variables 4-6 days before. These variables are associated with the emission and dispersion process. As for Poaceae pollen, a similar influence has been found highlighting that the *Olea* and Poaceae pollen seasons coincide in time and have a similar behaviour in central Spain. In addition, the comparison between Poaceae pollen and Phl p 5 allergen and its relationship with the meteorological variables in the city of Évora (Portugal) has shown similar results to those obtained in Toledo for Poaceae pollen and Phl p 1 allergen.

The results of this Doctoral Thesis allow us to broaden our knowledge about plane tree pollen dynamics and behaviour and how environmental and meteorological variables influence the atmospheric concentration of this pollen type. The results highlight the importance of incorporating aerobiological studies into the management plans of urban green areas.

On the other hand, pollen concentration prediction models with a seven-day advance have been obtained and important results regarding the environmental patterns influence on the relationship between pollen and allergenic load to better interpret the allergen risk indexes.

1. Introducción

1.1. Antecedentes y justificación

Los granos de polen se encuentran entre los componentes principales del bioaerosol que rodea a los seres humanos como consecuencia de su función en la reproducción sexual de las plantas (Cresti & Linskens, 2000). Actualmente, el incremento de las enfermedades alérgicas se encuentra entre uno de los problemas de salud pública más importantes (Pawankar, 2014; Platts-Mills, 2015), y la principal causa de estas enfermedades son los aeroalérgenos procedentes de los granos de polen (Lake et al., 2017). Pero además de las implicaciones sanitarias, el seguimiento de las concentraciones de polen en la atmósfera es una herramienta eficaz en muchos otros aspectos relacionados con el manejo de especies agrícolas, con la distribución y el estado de la vegetación, o con estudios ecológicos realizados en especies bioindicadoras de cambio climático, entre otros (Chuine & Rousseau, 1999; Mercuri, Torri, Fornaciari, & Florenzano, 2016; Picornell, Recio, Trigo, & Cabezudo, 2019; Rojo & Pérez-Badia, 2015a; Rojo, Rapp, Lara, Fernández-González, & Pérez-Badia, 2015).

La producción de polen varía tanto en el tiempo como en el espacio, por ello, analizar los patrones e identificar las causas de las variaciones es importante para la interpretación aerobiológica (Nowosad et al., 2015; Rojo & Pérez-Badia, 2015b; Verstraeten et al., 2019). La concentración de polen en el aire depende de las variables meteorológicas que influyen en la fenología de las plantas y en los procesos de dispersión y transporte de los granos de polen (Cresti & Linskens, 2000). Pero además de estos factores ambientales, las concentraciones atmosféricas de polen están relacionadas con los cambios en el uso del suelo que determinan la distribución y abundancia de las fuentes de polen (Estrella, Menzel, Krämer, & Behrendt, 2006; García-Mozo, Oteros, & Galán, 2016; Hidalgo-Galvez et al., 2018; Luo, Sun, Ge, Xu, & Zheng, 2007; Rojo et al., 2020, 2015). Los factores antrópicos son especialmente relevantes en la dinámica atmosférica de los tipos de polen procedentes de especies manejadas por el ser humano como son la flora ornamental o los cultivos agrícolas (Aguilera, Orlandi, Ruiz-Valenzuela, Msallem, & Fornaciari, 2015; Cariñanos et al., 2017).

El incremento del uso de especies ornamentales alergénicas en parques y jardines, tanto en lugares públicos como privados, ha proporcionado nuevas fuentes de emisión de aeroalérgenos (D'Amato et al., 2007). Durante años se había considerado que el plátano de sombra tenía una importancia baja en la polinosis debido al bajo recuento polínico en

muchas ciudades y a los bajos porcentajes de sensibilización (Caillaud et al., 2015). Sin embargo, el cultivo excesivo de esta especie en las ciudades para uso ornamental hace que este tipo polínico registre elevadas concentraciones atmosféricas durante el periodo de polinización (Alcázar et al., 2011; Caillaud et al., 2015; Gabarra, Belmonte, & Canela, 2002; Pérez-Badia, Rapp, Vaquero, & Fernández-González, 2011; Rojo, Rapp, et al., 2016). Por ello, el polen de plátano de sombra ha sido descrito como una causa importante de polinosis en ciudades donde se ha cultivado masivamente como ha sucedido en Europa occidental (Cariñanos & Casares-Porcel, 2011; Sánchez-Mesa et al., 2005; Subiza et al., 1994; Varela et al., 1997).

El rango de prevalencia para este tipo polínico es muy amplio dependiendo del área geográfica considerada. En general, la prevalencia media de alergia al polen de *Platanus* en Europa es del 5,6%, siendo Finlandia (Helsinki) el país con menor prevalencia (0,9%) y Reino Unido (Londres) el de mayor prevalencia (15,9%) (Heinzerling et al., 2009). Sin embargo, si se estudia a nivel local los valores de prevalencia pueden superar el 30% en ciudades como son los casos de Barcelona y Zaragoza, o incluso llegan a superar el 50% en Madrid y Toledo (Puiggròs et al., 2015; Subiza Garrido-Lestache, Pola Pola, Feo Brito, & Moral de Gregorio, 2007; Subiza et al., 1994; Valero et al., 1999). En Portugal se ha observado una prevalencia del 32% al plátano de sombra (Tavares, Machado, Loureiro, Cemlyn-Jones, & Pereira, 2008). Además, los estudios realizados a lo largo del tiempo evidencian el incremento paulatino de la prevalencia de este polen. En la ciudad de Barcelona el ritmo de incremento de la prevalencia a polen de plátano de sombra fue del 13% en 1999, el 30% en 2003 y el 37% en 2015 (Puiggròs et al., 2015; Subiza Garrido-Lestache et al., 2007; Valero et al., 1999).

Los patrones ambientales de cambio a largo plazo están induciendo cambios en la producción y dispersión del polen como consecuencia del cambio climático (Menzel et al., 2006; Ziska et al., 2019). Sin embargo, dado el carácter ornamental del plátano de sombra es probable que los cambios potenciales que se puedan dar en las características aerobiológicas estén más relacionados con los cambios locales debidos a la actividad antrópica, en lugar de atribuirse únicamente a alteraciones en el clima (Galán et al., 2016). Ya que las variaciones en la distribución de las fuentes potenciales de polen está relacionada con la cantidad de polen emitido a la atmósfera (Ziello et al., 2012), las tendencias del polen deben examinarse considerando los cambios en los usos del suelo y

no solo en términos del impacto potencial del cambio climático (García-Mozo et al., 2016) (Capítulo I).

Por tanto, el seguimiento de las concentraciones de polen a largo plazo permite identificar las principales fuentes de emisión polínica, así como las variables climáticas que más influyen en la variación de las concentraciones polínicas (Rojo et al., 2015). Pero en una escala temporal más reducida, las variaciones más momentáneas en las concentraciones de polen están asociadas a oscilaciones meteorológicas a corto plazo (Rojo, Rivero, Romero-Morte, Fernández-González, & Pérez-Badia, 2017). La estocasticidad de estas variaciones diarias requiere la aplicación de modelos estadísticos basados en parámetros meteorológicos y concentraciones polínicas de los días anteriores para generar predicciones de los niveles de riesgo alérgico que puedan ser integradas en los sistemas de alerta sanitaria para personas alérgicas (Karatzas, 2009).

La elaboración de modelos de predicción de concentraciones polínicas se ha basado en numerosas técnicas estáticas. Se han utilizado técnicas de regresión como es el análisis de regresión, árboles de decisión o la regresión de mínimos cuadrados parciales (Pérez-Badia, Bouso, Rojo, Vaquero, & Sabariego, 2013; Sabariego Ruiz, Gutiérrez Bustillo, Cervigón Morales, & Cuesta, 2008). Otras técnicas además han utilizado análisis de series temporales, ya sea utilizando modelos ARIMA o una integración de la componente autorregresiva de la serie de datos polínicos (Fernández-Rodríguez et al., 2016; Rojo, Orlandi, et al., 2016; Rojo et al., 2017; Silva-Palacios et al., 2016). La importancia de obtener unos modelos de predicción precisos y con suficiente antelación, es esencial para permitir alertar a la población de los periodos de mayor riesgo para que puedan tomar las medidas oportunas como comenzar con el tratamiento de antihistamínicos o planificar sus actividades al aire libre (Capítulo II).

Los modelos de predicción de la concentración polínica serán útiles como índices de riesgo alérgico, cuando exista una correspondencia adecuada entre estos niveles y la carga alérgica en el aire, responsable directa de las reacciones alérgicas (Buters et al., 2015). Sin embargo, debido a que la cuantificación de proteínas alérgicas en el aire resulta muy laboriosa desde el punto de vista metodológico y costosa en términos económicos, la concentración de polen y esporas se ha empleado como medida indirecta de riesgo alérgico (Buters et al., 2012; D'Amato et al., 2007; De Linares, Díaz de la Guardia, Nieto Lugilde, & Alba, 2010; Fernández-González, Ribeiro, Pereira, Rodríguez-

Rajo, & Abreu, 2019; Vara, Fernández-González, Aira, & Rodríguez-Rajo, 2016). Por esta razón, las redes de vigilancia de la calidad biológica del aire representan una herramienta muy importante para caracterizar los periodos de riesgo de exposición a los principales aeroalérgenos y, por ello, se han extendido por todo el mundo desde finales del siglo XX (Buters et al., 2018).

Pese a la buena correspondencia que se evidencia en los trabajos que comparan concentraciones de polen y alérgeno, existen discordancias debidas a variaciones diarias en las dinámicas de emisión y dispersión de polen y alérgenos (Plaza, Alcázar, Hernández-Ceballos, & Galán, 2016). Esta disparidad observada puntualmente entre la concentración polínica y la carga alérgica se atribuye a factores meteorológicos, a los diversos patrones de origen y dispersión en el aire o a la presencia de reactividad cruzada con alérgenos homólogos (Fernández-González et al., 2011; González-Parrado et al., 2014; Moreno-Grau et al., 2016; Rodríguez-Rajo et al., 2011). Por tanto, identificar los factores involucrados en la relación ente polen y alérgeno en el aire es de gran interés para conocer las causas de grandes discrepancias entre las concentraciones y poder realizar mejores estimaciones del riesgo alérgico (Alan et al., 2018; Plaza et al., 2016) (Capítulo III).

1.2. Plátano de sombra

a) Características de las especies del género *Platanus*

El género *Platanus* pertenece a la familia Platanaceae, integrada a su vez por especies originarias de zonas templadas del norte de América, sudeste de Europa, Himalaya e Indochina. Se trata de grandes árboles, muy cultivados en las áreas urbanas. La familia solo la integra un género, *Platanus*, con ocho (diez) especies distribuidas en las zonas templadas de Norteamérica (*Platanus gentryi*, *Pl. mexicana*, *Pl. occidentalis*, *Pl. racemosa*, *Pl. rzedowskii*, *Pl. wrightii*), a excepción de una especie en Europa y oeste de Asia (*Platanus orientalis*) y otra en Indochina (*Platanus kerri*).

En España, se cultivan varias especies, todas conocidas como plátano de sombra, plátano de paseo, sicomoro, platanero, London plane o plane tree (inglés). De entre ellas desataca la especie mayoritaria que se viene nombrando como *Platanus orientalis* L. var. *acerifolia* Dryand in Aiton o como *Platanus hispanica* Mill. ex Munchh. En el primer caso el nombre corresponde al cultivar de la especie *Platanus orientalis* L., originaria de

la zona de los Balcanes, Mediterráneo oriental y del Himalaya (López González, 2006; López González, 1998). A esta especie pertenecerían los restos de polen fósil encontrado en la península Ibérica (Charco, Fernández, García, Mateo, & Valdés, 2008). Por el contrario, el nombre de *Platanus x hispanica* Mill. ex Munchh, se refiere a esta misma especie aceptando que se trata de una especie híbrida (Besnard, Tagmount, Baradat, Vigouroux, & Bervillé, 2002; Grimm & Denk, 2008; Vigouroux, Besnard, Sossey-Alaoui, Tersac, & Bervillé, 1997) de características intermedias entre las especies *Platanus orientalis* L. y *Platanus occidentalis* L., ambas también cultivadas en España. En Portugal este taxon se cita habitualmente con el sinónimo de *Platanus hybrida* Brot.

Se trata de árboles caducifolios, que alcanzan los 35-40 metros de altura, de copas amplias y globosas (Figura 1). El tronco es recto, con corteza muy característica que se desprende en placas dejando huecos que forman mosaicos con los trozos no desprendidos (Figura 2). Las hojas son simples, largamente pecioladas, de 3-5 (7) palmatífidias o plamatipartidas con lóbulos enteros o dentados y estípulas generalmente caducas. Se disponen de forma alterna y son grandes, de 12 a 30 cm, palmeadas y lobuladas. La coloración del haz es verde mientras que el envés es verde-blanquecino, cubiertas de pelos estrellados (García Gómez, Pérez-Badia, & Moral-de Gregorio, 2015; López González, 1990).

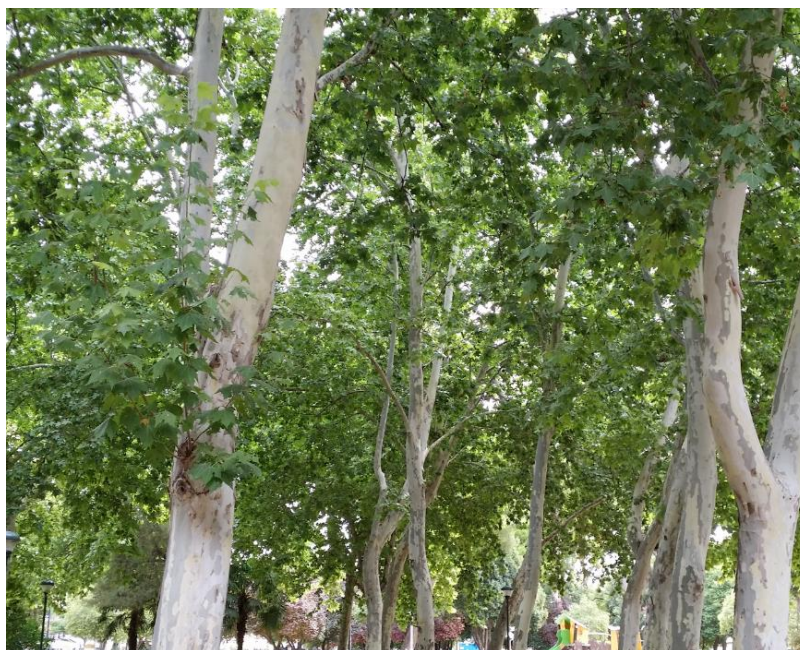


Figura 1. Aspecto general del porte de *Platanus orientalis* var. *acerifolia*

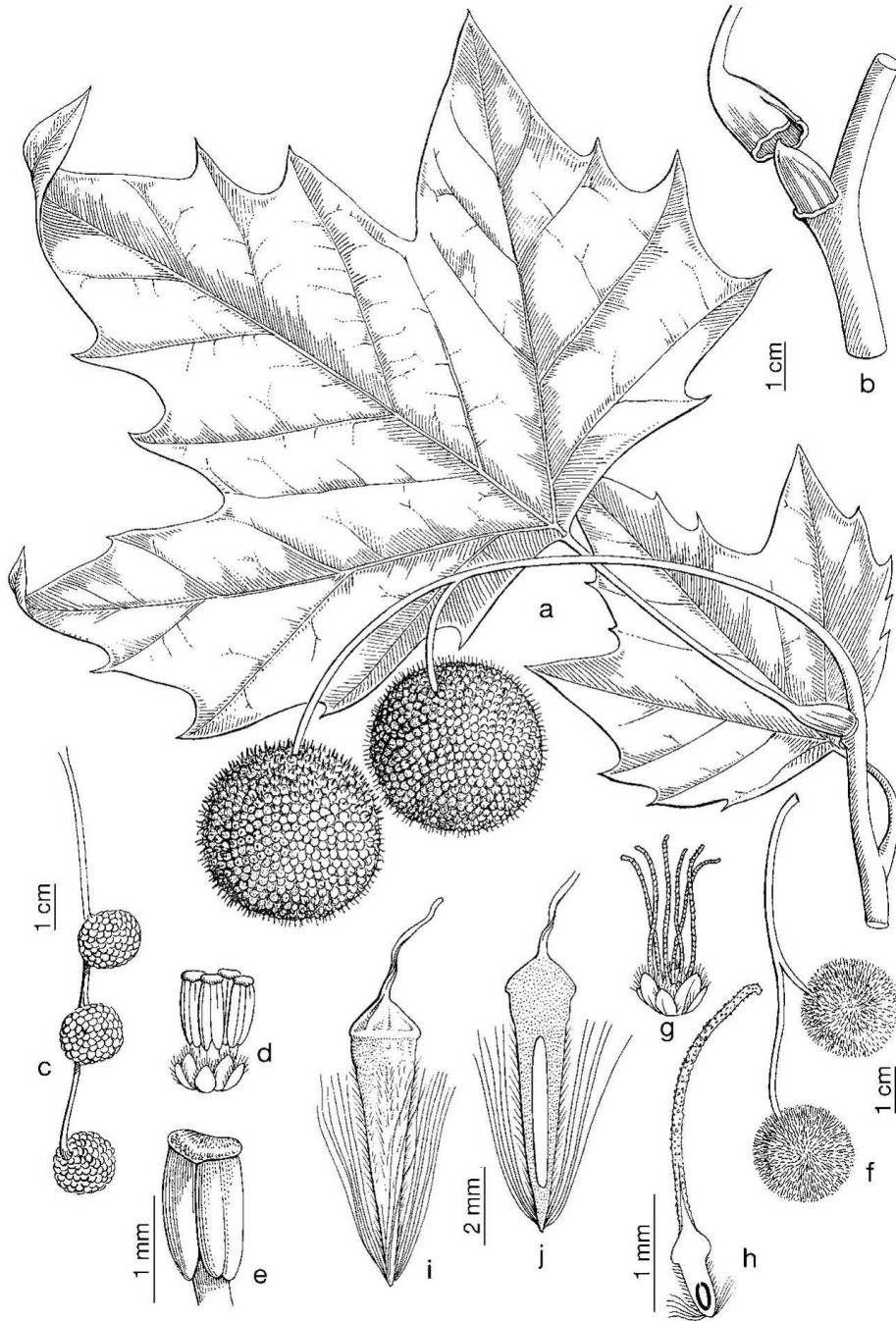


Figura 2. Detalle de la parte exterior de la corteza (ritidoma) de *Platanus orientalis* var. *acerifolia*

Las flores son unisexuales, muy pequeñas con flores femeninas y masculinas en un mismo ejemplar. Sépalos escamiformes más cortos que los pétalos que a su vez son escariosos y agudos. Estambres de 3 a 8 con anteras alargadas subsésiles o con filamento corto. Carpelos de (3) 6-9 envueltos en la base por un penacho de pelos largos (Figura 3, Figura 4). Las flores se agrupan en inflorescencias globosas muy pedunculadas, solitarias o en grupos de 2-7 y la floración tiene lugar, dependiendo de los territorios, desde finales de marzo hasta principios de mayo. La polinización es anemófila y el fruto (Figura 3, Figura 4) es de tipo aquenio con pelos en la base, que se reúnen formando infrutescencias globosas, que penden de largos pedúnculos y se dispersan en otoño (García Gómez et al., 2015; López González, 1990; López Lillo & Sánchez de Lorenzo Cáceres, 1999).

Esta especie ha sido cultivada como ornamental y árbol de sombra desde muy antiguo, bien de forma aislada en parques y jardines; bien en alineaciones en paseos y avenidas o en márgenes de cursos de agua. En Barcelona constituye el 32 % del arbolado viario, mientras que en Madrid supone un 21 % (García Gómez et al., 2015). El hábitat natural de esta especie está en los bosques riparios, como pueden ser las choperas o las fresnedas, donde a veces es posible encontrarla naturalizada. Su madera es dura, ligera, resistente y de grano fino; cualidades que hacen que pueda emplearse en ebanistería y para chapados. Se trata de una especie de rápido crecimiento, muy adaptada a los tratamientos de podas y de longevidad hasta 300 años (García Gómez et al., 2015). Existen ejemplares

considerados singulares y monumentales en muchos lugares de España, ejemplares que a veces confluyen formando esplendorosas alineaciones como es el caso de las que existen en los Jardines de Aranjuez (Madrid).



Lám. 1.—*Platanus hispanica*, paseo de Becedo, Santander (MA 162969) y parque de Montjuich, Barcelona (BC): a) rama con infrutescencias; b) nudo y base del peciolo; c) inflorescencias masculinas; d) flor masculina; e) estambre; f) inflorescencias femeninas; g) flor femenina; h) pistilo en sección longitudinal; i) aquenio; j) ídem en sección longitudinal.

Figura 3. Características de la hoja, flor y fruto de *Platanus hispanica*. Ilustración procedente de *Flora iberica Vol II* (López González, 1990)



Figura 4. Aspecto general de las hojas, flores e infrutescencias de *Platanus orientalis* var. *acerifolia*

b) Morfología del polen

El grano de polen de las especies del género *Platanus* (Trigo, Jato, Fernández, & Galán, 2008) es trizonocolpado, isopolar y radiosimétrico (Figura 5); lo que se traduce en que posee tres colpos en la zona ecuatorial, entendiéndose como colpo a las aberturas caracterizadas por ser al menos dos veces más largas que anchas. Posee igual forma y tamaño en sus polos polar y proximal y presenta tres o más planos de simetría, en vista polar y corte óptico ecuatorial.

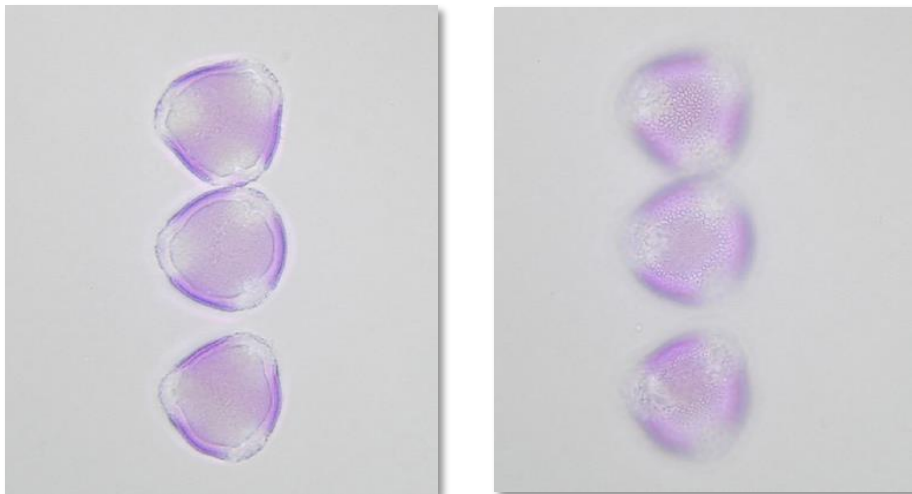


Figura 5. Grano de polen tipo *Platanus*, visión al microscopio óptico (www.polleninfo.org)

La forma puede ser desde subtriangular a subcircular en visión polar o de circular a elíptico en visión ecuatorial. El tamaño es pequeño, con eje polar de 18 a 24 μm de longitud y diámetro ecuatorial de 20 a 26 μm (Figura 5).

La exina, o capa más externa constituida por esporopolenina, tiene 2 μm de grosor. La superficie del grano es reticulada, con lúmenes pequeños e irregulares y muros de superficie lisa con espínulas (psilados-equinulados), que son elementos cónicos de punta aguda o redondeada de menos de 1 μm de longitud, visibles con el microscopio electrónico de barrido (Figura 6) (Trigo et al., 2008). La producción polínica se estimada en 21×10^6 granos de polen por inflorescencia (Tormo Molina, Muñoz Rodríguez, Silva Palacios, & Gallardo López, 1996).

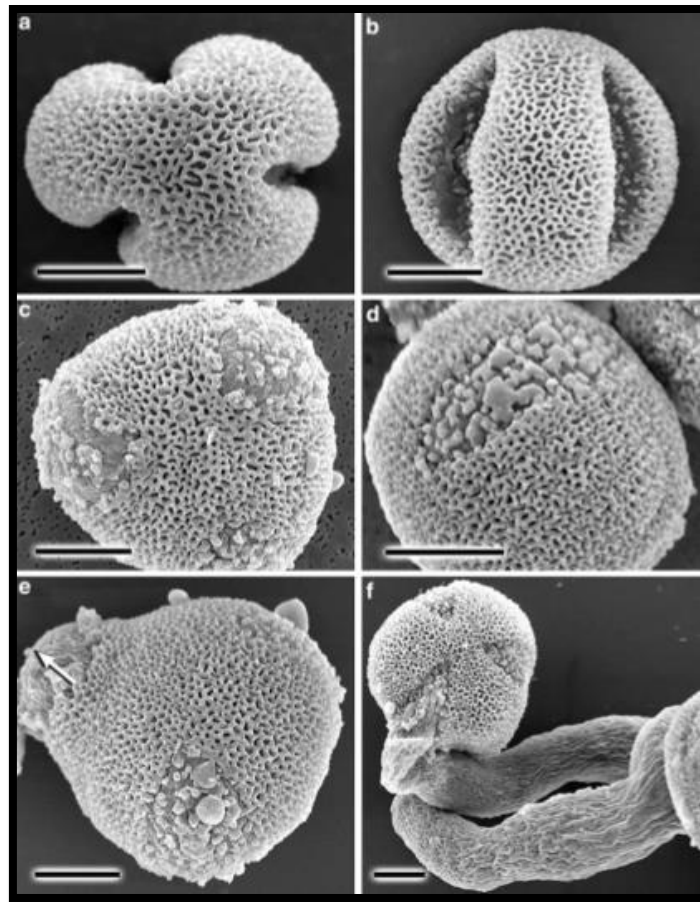


Figura 6. Grano de polen de Platanus, visión al microscopio electrónico. a,b: granos de polen maduros y secos; c,d: granos de polen hidratados durante 5 min; e: granos de polen hidratados durante 15 min con abertura de germinación (flecha); f: polen germinado. Escala: 5 μm (Suárez-Cervera et al., 2005)

c) Proteínas alergénicas del polen

Las fracciones alergénicas descritas en el polen del tipo *Platanus* poseen un tamaño que oscila entre 10 y 43 kilodalton (kDa) habiéndose identificado Pla a 1, Pla a 2, Pla a 3, Pla a 8 y Pla a TLP (Moral de Gregorio et al., 2017). La diferente naturaleza de cada

una de ellas conlleva a que las personas alérgicas al polen del plátano de sombra generalmente lo son también a otros tipos polínicos y lo más frecuente es encontrar pacientes polisensibilizados en lugar de monosensibilizados a *Platanus*. Esto se debe a la presencia de co-sensibilizadores o a la reactividad cruzada entre diferentes fracciones alérgicas. La mayoría de pacientes polisensibilizados, lo son a *Platanus* y a pólenes de gramíneas, a *Olea europea*, *Parietaria judaica*, *Plantago ovata*, *Artemisia vulgaris* y a chenopodiáceas (Enrique et al., 2002; Valero et al., 1999). También existe reactividad cruzada con ciertas proteínas presentes en alimentos de origen vegetal, principalmente frutas; entre las que destacan el melocotón, la manzana, la cereza, la ciruela, los frutos secos como la avellana, la nuez y la castaña, el melón, el kiwi, el cacahuete, el garbanzo, la lechuga, las judías verdes y el maíz (Enrique et al., 2002; Miranda, 2002; Palacín et al., 2012).

Pla a 1

Es un alérgeno mayoritario, que posee una fracción de 18 kDa y aparece hasta en el 92% de los pacientes monosensibles a *Platanus* y en el 83% de los polisensibles. Se trata de una proteína no glicosilada con un punto isoeléctrico superior a 9.3, presumiblemente con actividad inhibitoria de la invertasa (Asturias et al., 2002). Se encuentra en las cisternas del retículo endoplásmico. Pla a 1 solo existe al comienzo de la hidratación, su acción como inhibidor de la invertasa conlleva que durante el proceso de hidratación se conserve el azúcar como sacarosa, dado que esta actúa como protector de membranas frente a cambios osmóticos, que podrían romper el incipiente tubo polínico y abortar el proceso germinativo (Moral de Gregorio et al., 2017).

Pla a 2

Es otro alérgeno mayoritario, posee una fracción de 43 kDa y aparece en el 84 % de los pacientes, ya sean mono o polisensibles (Asturias et al., 2002). Es una glicoproteína con un punto isoeléctrico de 9.3. Se halla en las cisternas y vesículas del aparato de Golgi (Ibarrola, Arilla, Martínez, & Asturias, 2004). Esta proteína, al igual que Pla a 1, difunde al exterior intensamente durante el proceso de hidratación (Suárez-Cervera et al., 2005). En cuanto a su actividad biológica es una poligalacturonasa. Tiene reactividad cruzada Ig G con una poligalacturonasa de tomate y las pectatolyasas de las cupresáceas (Ibarrola et al., 2004; Moral de Gregorio et al., 2017).

Pla a 3

Posee un tamaño de 10 kDa y se trata de una LTP, proteína transportadora de lípidos, se comporta como alérgeno mayor en los pacientes que también son alérgicos al melocotón en el área mediterránea con una prevalencia del 63,3 %. Sin embargo, en los pacientes que no asocian alergia a melocotón esta prevalencia disminuye al 27,3 % (Lauer et al., 2007).

Pla a 8

Pertenece a la familia de las profilinas, proteínas consideradas como panalérgenos y responsables de la reactividad cruzada con otros alimentos, de origen vegetal (Asturias et al., 2002; Miranda, 2002).

Pla a TLP

Palacín et al., (2012) purificaron en polen de *Platanus* esta proteína que pertenece al grupo de las proteínas análogas a la Thaumatina (Thaumatina like proteins o TLP) presentes en el polen, pero también en frutas de ahí que los alérgicos al polen de *Platanus* también pueden presentar alergia a alimentos de origen vegetal como ya se ha comentado.

1.3. Procesos de emisión y dispersión polínica

La abundancia y dinámica del polen en el aire varía en el espacio y en el tiempo (Nowosad et al., 2015; Rojo & Pérez-Badía, 2015b). En la mayoría de los casos, el polen alérgico procede de especies anemófilas que liberan grandes cantidades de polen para asegurar su reproducción, debido a la imprecisión del viento como medio de polinización (Culley, Weller, & Sakai, 2002; Friedman & Barrett, 2009). El proceso aerobiológico que incluye la liberación, el transporte y la deposición de partículas de origen biológico, posee en el caso de los granos de polen una evidente función biológica que tiene por objetivo llegar con éxito a la fase de la fecundación durante el ciclo de la reproducción sexual (Lord & Russell, 2002).

La liberación de los granos de polen se distribuye de forma desigual durante el transcurso del año y depende de las condiciones climáticas, con dinámica muy diferente dependiendo de la fenología de las especies vegetales (Romero-Morte, Rojo, Rivero, Fernández-González, & Pérez-Badía, 2018; Tormo et al., 2011). Además, su variación no

solo se produce de manera estacional, sino que también presenta variaciones a corto plazo. La distribución temporal del polen en el aire refleja los periodos de polinización y, por tanto, refleja además el período de mayor riesgo para especies alergénicas (Cresti & Linskens, 2000).

La liberación de los granos de polen desde las anteras y su transporte por el viento es diferente y característica de cada grupo taxonómico de plantas; pero, en general, transcurre en diferentes fases principales dependientes de factores ambientales (Cresti & Linskens, 2000; Firon, Nepi, & Pacini, 2012; Pacini & Hesse, 2004) (Figura 7):

1. Antesis o apertura de la flor, que depende de la temperatura, la humedad y la intensidad lumínica.
2. Dehiscencia, que produce la liberación de los granos de polen desde las anteras. Esta etapa implica la ruptura de la pared de la antera y está muy influida por la humedad relativa.
3. Dispersión o distribución de los granos de polen en el aire, influenciada por las características dispersivas de la capa límite atmosférica con factores tan relevantes como la dirección y la velocidad del viento.
4. Deposición del grano de polen, relacionada también con los patrones de viento, pero, además, por la humedad relativa y la precipitación que provoca la sedimentación de partículas.

Las elevadas temperaturas y una baja humedad relativa favorecen el proceso de antesis de la flor y dehiscencia de las anteras, facilitando el proceso de emisión polínica (Cresti & Linskens, 2000). El proceso de emisión polínica es especialmente dependiente de las condiciones ambientales en especies anemófilas, cuya liberación del polen debe producirse en grandes cantidades a la atmósfera durante el periodo óptimo desde el punto de vista meteorológico (Friedman & Barrett, 2009; Rojo & Pérez-Badia, 2015b). Sin embargo, una vez que los granos de polen se encuentran en la atmósfera, están expuestos a las condiciones ambientales por lo que deben soportar condiciones variables de temperatura y humedad relativa. En concreto, hay evidencias de que la baja humedad permite la liberación de polen desde las anteras, favoreciendo las fases de dispersión y transporte mientras que una alta humedad está asociada con una menor concentración atmosférica de polen (D'Amato & Cecchi, 2008). Por otro lado, la precipitación produce un efecto de lavado de la atmósfera que facilita la sedimentación de la materia particulada

(Pérez, Gassmann, & Covi, 2009). Las partículas suspendidas en el aire son transportadas por el viento y dispersadas por procesos de turbulencia y convección generada dentro de la capa atmosférica más baja, denominada capa límite atmosférica en la cual se producen todos los intercambios entre la atmósfera y la superficie terrestre (Jones & Harrison, 2004; Makra et al., 2010). Dependiendo de la altura que alcanzan las partículas biológicas en función de las condiciones de la atmósfera y las características de la partícula, estas pueden transportarse localmente o a grandes distancias (D'Amato et al., 2007; Grewling et al., 2019; Rojo & Pérez-Badia, 2015b).

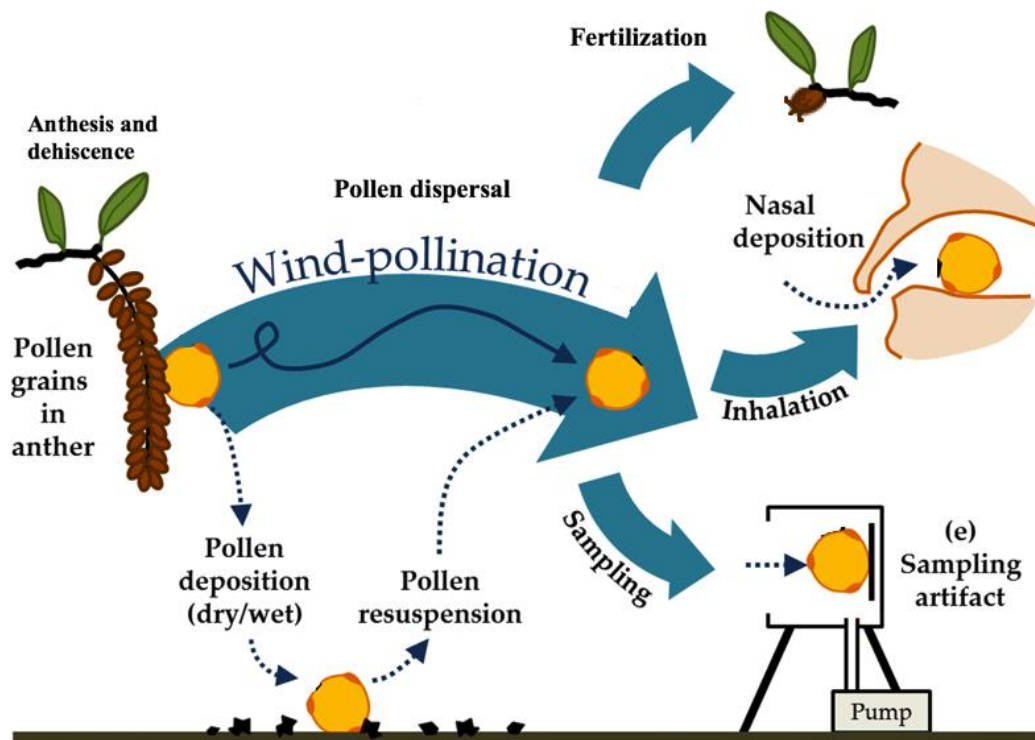


Figura 7. Diagrama de las fases que componen el proceso aerobiológico general de las plantas anemófilas (adaptado de Visez et al., (2019))

La sedimentación de la partícula de polen se puede producir por una deposición seca o húmeda, dependiendo de las condiciones meteorológicas (Jones & Harrison, 2004), no obstante, como se ha comentado anteriormente, una elevada humedad relativa o episodios de precipitación pueden favorecer este proceso (Pérez et al., 2009). Los granos de polen durante la deposición pueden impactar en el estigma o micropilo de las flores de su misma especie que será el único caso en el cual se cumpla su verdadera función biológica (Lord & Russell, 2002). Por el contrario, los granos de polen pueden depositarse en cualquier superficie o en las mucosas del ser humano, donde tendrá especial relevancia desde un

punto de vista sanitario como causante de reacciones alérgicas en individuos sensibilizados (Kim, Jahan, & Kabir, 2013; Kim, Kabir, & Kabir, 2015; Visez et al., 2019).

En el contexto de la alergia, los granos de polen son considerados como portadores de alérgenos ya que contienen las moléculas alérgicas en la exina (pared externa del grano de polen), en la intina (parte interna de la pared del polen), así como en los orbículos y en el citoplasma (Behrendt & Becker, 2001; Cresti & Linskens, 2000; D'Amato et al., 2007). Cuando el grano de polen entra en contacto con agua o con un sustrato que contiene agua (ej. Mucosa), el grano de polen se hidrata, libera gránulos de almidón y desarrolla el tubo polínico (Cresti & Linskens, 2000; Firon et al., 2012). Además, durante este proceso se produce la amplificación del número de partículas alérgicas de menor tamaño que los granos de polen, muchas de ellas con importantes funciones biológicas en el proceso de la fecundación (Suárez-Cervera et al., 2005).

Los granos de polen también pueden romperse durante su transporte en la atmósfera como consecuencia de factores climáticos (ej. lluvia, niebla, tormentas eléctricas) o por los contaminantes del aire (ej. SO₂), haciendo de las moléculas de almidón y otras moléculas los nuevos portadores de alérgenos (D'Amato, 2001; D'Amato, Tedeschini, Frenguelli, & D'Amato, 2019). Los aeroalérgenos libres están presentes en la atmósfera en un rango de tamaño de partículas incluidos en la fracción fina PM_{2.5} los cuales pueden unirse a otras partículas finas, como las partículas residuales de la combustión del diésel, otros contaminantes e incluso partículas biológicas submicrónicas (Fröhlich-Nowoisky et al., 2016; Sénéchal et al., 2015; Visez et al., 2019). Además, los alérgenos pueden desprenderse de sus portadores y transportarse libremente (Behrendt & Becker, 2001; Cresti & Linskens, 2000; Firon et al., 2012; Grote, 1999), lo que aporta complejidad a la interpretación de la carga alérgica en base a la concentración polínica en el aire.

Referencias

- Aguilera, F., Orlandi, F., Ruiz-Valenzuela, L., Msallem, M., & Fornaciari, M. (2015). Analysis and interpretation of long temporal trends in cumulative temperatures and olive reproductive features using a seasonal trend decomposition procedure. *Agricultural and Forest Meteorology*, 203, 208–216. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.019>
- Alan, Ş., Şahin, A. A., Sarışahin, T., Şahin, S., Kaplan, A., & Pınar, N. M. (2018). The effect of geographical and climatic properties on grass pollen and Phl p 5 allergen release. *International Journal of Biometeorology*, 62, 1325–1337. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1536-0>
- Alcázar, P., García-Mozo, H., Trigo, M. del M., Ruiz, L., González-Minero, F. J., Hidalgo, P., ... Galán, C. (2011). *Platanus* pollen season in Andalusia (southern Spain): trends and modeling. *Journal of Environmental Monitoring*, 13, 2502. <https://doi.org/10.1039/c1em10355e>
- Asturias, J. A., Ibarrola, I., Bartolome, B., Ojeda, I., Malet, A., & Martinez, A. (2002). Purification and characterization of Pla a 1, a major allergen from *Platanus acerifolia* pollen. *Allergy*, 57, 221–227. <https://doi.org/10.1034/j.1398-9995.2002.03406.x>
- Behrendt, H., & Becker, W.-M. (2001). Localization, release and bioavailability of pollen allergens: the influence of environmental factors. *Current Opinion in Immunology*, 13, 709–715. [https://doi.org/10.1016/S0952-7915\(01\)00283-7](https://doi.org/10.1016/S0952-7915(01)00283-7)
- Besnard, G., Tagmount, A., Baradat, P., Vigouroux, A., & Bervillé, A. (2002). Molecular approach of genetic affinities between wild and ornamental *Platanus*. *Euphytica*, 126, 401–412. <https://doi.org/10.1023/A:1019912425987>
- Buters, J., Prank, M., Sofiev, M., Pusch, G., Albertini, R., Annesi-Maesano, I., ... Cecchi, L. (2015). Variation of the group 5 grass pollen allergen content of airborne pollen in relation to geographic location and time in season. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 136, 87-95.e6. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2015.01.049>
- Buters, J. T. M., Antunes, C., Galveias, A., Bergmann, K. C., Thibaudon, M., Galán, C., ... Oteros, J. (2018). Pollen and spore monitoring in the world. *Clinical and Translational Allergy*, 8:9. <https://doi.org/10.1186/s13601-018-0197-8>

- Buters, J. T. M., Thibaudon, M., Smith, M., Kennedy, R., Rantio-Lehtimäki, A., Albertini, R., ... Cecchi, L. (2012). Release of Bet v 1 from birch pollen from 5 European countries. Results from the HIALINE study. *Atmospheric Environment*, 55, 496–505. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.054>
- Caillaud, D. M., Martin, S., Ségala, C., Vidal, P., Lecadet, J., Pellier, S., ... Evrard, B. (2015). Airborne pollen levels and drug consumption for seasonal allergic rhinoconjunctivitis: a 10-year study in France. *Allergy*, 70, 99–106. <https://doi.org/10.1111/all.12522>
- Cariñanos, P., & Casares-Porcel, M. (2011). Urban green zones and related pollen allergy: A review. Some guidelines for designing spaces with low allergy impact. *Landscape and Urban Planning*, 101, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.006>
- Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., Díaz de la Guardia, C., Aira, M. J., Belmonte, J., Boi, M., ... 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>
- Charco, J., Fernández, F., García, R., Mateo, G., & Valdés, A. (2008). Árboles y arbustos autóctonos de Castilla-La Mancha. Centro de Investigaciones Ambientales del Mediterráneo (CIAMED). Ciudad Real.
- Chuine, I., & Rousseau, D. D. (1999). Selecting models to predict the timing of flowering of temperate trees: implications for tree phenology modelling. *Plant, Cell and Environment*, 22, 1–13.
- Cresti, M., & Linskens, H. F. (2000). Pollen-allergy as an ecological phenomenon: A review. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 134(3), 341–352. <https://doi.org/10.1080/11263500012331350495>
- Culley, T. M., Weller, S. G., & Sakai, A. K. (2002). The evolution of wind pollination in angiosperms. *Trends in Ecology & Evolution*, 17(8), 361–369. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)02540-5](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)02540-5)
- D'Amato, G., Cecchi, L., Bonini, S., Nunes, C., Annesi-Maesano, I., Behrendt, H., ... van Cauwenberge, P. (2007). Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy*, 62(9), 976–990. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2007.01393.x>

- D'Amato, G., Tedeschini, E., Frenguelli, G., & D'Amato, M. (2019). Allergens as trigger factors for allergic respiratory diseases and severe asthma during thunderstorms in pollen season. *Aerobiologia*, 35, 379–382. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09560-8>
- D'Amato, G. (2001). Airborne paucimicronic allergen-carrying particles and seasonal respiratory allergy. *Allergy*, 56, 1109–1111. <https://doi.org/10.1034/j.1398-9995.2001.00317.x>
- D'Amato, G., & Cecchi, L. (2008). Effects of climate change on environmental factors in respiratory allergic diseases. *Clinical and Experimental Allergy*, 38, 1264–1274. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2008.03033.x>
- De Linares, C., Díaz de la Guardia, C., Nieto Lugilde, D., & Alba, F. (2010). Airborne Study of Grass Allergen (Lol p 1) in Different-Sized Particles. *International Archives of Allergy and Immunology*, 152, 49–57. <https://doi.org/10.1159/000260083>
- Enrique, E., Cisteró-Bahíma, A., Bartolomé, B., Alonso, R., San Miguel-Moncín, M., Bartra, J., & Martínez, A. (2002). *Platanus acerifolia* pollinosis and food allergy. *Allergy*, 57(4), 351–356. <https://doi.org/10.1034/j.1398-9995.2002.1s3509.x>
- Estrella, N., Menzel, A., Krämer, U., & Behrendt, H. (2006). Integration of flowering dates in phenology and pollen counts in aerobiology: analysis of their spatial and temporal coherence in Germany (1992–1999). *International Journal of Biometeorology*, 51, 49–59. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0038-7>
- Fernández-González, D., Rodríguez Rajo, F. J., González Parrado, Z., Valencia Barrera, R. M., Jato, V., & Moreno-Grau, S. (2011). Differences in atmospheric emissions of Poaceae pollen and Lol p 1 allergen. *Aerobiologia*, 27, 301–309. <https://doi.org/10.1007/s10453-011-9199-x>
- Fernández-González, M., Ribeiro, H., Pereira, J. R. S., Rodríguez-Rajo, F. J., & Abreu, I. (2019). Assessment of the potential real pollen related allergenic load on the atmosphere of Porto city. *Science of The Total Environment*, 668, 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.345>
- Fernández-Rodríguez, S., Durán-Barroso, P., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J. M., & Gonzalo-Garijo, Á. (2016). *Quercus* long-term pollen season trends

- in the southwest of the Iberian Peninsula. *Process Safety and Environmental Protection*, 101, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.11.008>
- Firon, N., Nepi, M., & Pacini, E. (2012). Water status and associated processes mark critical stages in pollen development and functioning. *Annals of Botany*, 109, 1201–1214. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs070>
- Friedman, J., & Barrett, S. C. H. (2009). Wind of change: new insights on the ecology and evolution of pollination and mating in wind-pollinated plants. *Annals of Botany*, 103, 1515–1527. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp035>
- Fröhlich-Nowoisky, J., Kampf, C. J., Weber, B., Huffman, J. A., Pöhlker, C., Andreae, M. O., ... Pöschl, U. (2016). Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions. *Atmospheric Research*, 182, 346–376. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.018>
- Gabarra, E., Belmonte, J., & Canela, M. (2002). Aerobiological behaviour of *Platanus* L. pollen in Catalonia (North-East Spain). *Aerobiologia*, 18, 185–193.
- Galán, C., Alcázar, P., Oteros, J., García-Mozo, H., Aira, M. J., Belmonte, J., ... Domínguez-Vilches, E. (2016). Airborne pollen trends in the Iberian Peninsula. *Science of The Total Environment*, 550, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.069>
- García-Mozo, H., Oteros, J. A., & Galán, C. (2016). Impact of land cover changes and climate on the main airborne pollen types in Southern Spain. *Science of The Total Environment*, 548–549, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.005>
- García Gómez, E., Pérez-Badía, R., & Moral-de Gregorio, Á. (2015). El plátano como árbol. *La Cultura Del Árbol*, 70, 29–35.
- González-Parrado, Z., Fernández-González, D., Camazón, B., Valencia-Barrera, R., Vega-Maray, A., Asturias, J. A., ... Mandrioli, P. (2014). Molecular aerobiology – *Plantago* allergen Pla 1 1 in the atmosphere. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 21(2), 282–289. <https://doi.org/10.5604/1232-1966.1108592>
- Grewling, Ł., Bogawski, P., Kryza, M., Magyar, D., Šikoparija, B., Skjøth, C. A., ... Smith, M. (2019). Concomitant occurrence of anthropogenic air pollutants, mineral dust and

-
- fungal spores during long-distance transport of ragweed pollen. *Environmental Pollution*, 254, 112948. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.116>
- Grimm, G. W., & Denk, T. (2008). ITS Evolution in *Platanus* (Platanaceae): Homoeologues, Pseudogenes and Ancient Hybridization. *Annals of Botany*, 101, 403–419. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm305>
- Grote, M. (1999). In situ Localization of Pollen Allergens by Immunogold Electron Microscopy: Allergens at Unexpected Sites. *International Archives of Allergy and Immunology*, 118, 1–6. <https://doi.org/10.1159/000024024>
- Heinzerling, L. M., Burbach, G. J., Edenharter, G., Bachert, C., Bindslev-Jensen, C., Bonini, S., ... Zuberbier, T. (2009). GA 2 LEN skin test study I: GA2LEN harmonization of skin prick testing: novel sensitization patterns for inhalant allergens in Europe. *Allergy*, 64, 1498–1506. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2009.02093.x>
- Hidalgo-Galvez, M. D., García-Mozo, H., Oteros, J., Mestre, A., Botey, R., & Galán, C. (2018). Phenological behaviour of early spring flowering trees in Spain in response to recent climate changes. *Theoretical and Applied Climatology*, 132, 263–273. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2089-6>
- Ibarrola, I., Arilla, M. C., Martínez, A., & Asturias, J. A. (2004). Identification of a polygalacturonase as a major allergen (Pla a 2) from *Platanus acerifolia* pollen. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 113, 1185–1191. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2004.02.031>
- Jones, A. M., & Harrison, R. M. (2004). The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations—a review. *Science of The Total Environment*, 326, 151–180. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.11.021>
- Karatzas, K. D. (2009). Informing the public about atmospheric quality: air pollution and pollen. *Allergo Journal*, 18, 212–217. <https://doi.org/10.1007/BF03362059>
- Kim, K.-H., Jahan, S. A., & Kabir, E. (2013). A review on human health perspective of air pollution with respect to allergies and asthma. *Environment International*, 59, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.05.007>

- Kim, K.-H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>
- Lake, I. R., Jones, N. R., Agnew, M., Goodess, C. M., Giorgi, F., Hamaoui-Laguel, L., ... 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>
- Lauer, I., Miguel-Moncin, M. S., Abel, T., Foetisch, K., Hartz, C., Fortunato, D., ... Scheurer, S. (2007). Identification of a plane pollen lipid transfer protein (Pla a 3) and its immunological relation to the peach lipid-transfer protein, Pru p 3. *Clinical & Experimental Allergy*, 37, 261–269. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2007.02653.x>
- López González, G. (1990). Platanaceae. In S. Castroviejo, M. Laínz, G. López González, P. Montserrat, F. Muñóz Garmedia, J. Paiva, & L. Villar (Eds.), *Flora iberica. Plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares. Vol. II [Platanaceae-Plumbaginaceae (patim)]* (pp. 3–5). Real Jardín Botánico, CSIC, Madrid.
- López González, Ginés. (1998). Sobre el plátano de paseo, *Platanus orientalis* L. var. *Acerifolia* dryand. (Platanaceae), y su posible origen. *Anales Del Jardín Botánico de Madrid*, 56(1), 159–161.
- López González, G. (2006). *Los árboles y arbustos de la Península Ibérica e Islas Baleares*. Mundi-Prensa Libros.
- López Lillo, A., & Sánchez de Lorenzo Cáceres, J. M. (1999). *Árboles en España. Manual de identificación*. Mundi-Prensa Libros.
- Lord, E. M., & Russell, S. D. (2002). The Mechanisms of Pollination and Fertilization in Plants. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 18, 81–105. <https://doi.org/10.1146/annurev.cellbio.18.012502.083438>
- Luo, Z., Sun, O. J., Ge, Q., Xu, W., & Zheng, J. (2007). Phenological responses of plants to climate change in an urban environment. *Ecological Research*, 22, 507–514. <https://doi.org/10.1007/s11284-006-0044-6>
- Makra, L., Sánta, T., Matyasovszky, I., Damialis, A., Karatzas, K., Bergmann, K.-C., & Vokou, D. (2010). Airborne pollen in three European cities: Detection of atmospheric

- circulation pathways by applying three-dimensional clustering of backward trajectories. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115, D24220. <https://doi.org/10.1029/2010JD014743>
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., ... Zust, A. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12, 1969–1976. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>
- Mercuri, A., Torri, P., Fornaciari, R., & Florenzano, A. (2016). Plant Responses to Climate Change: The Case Study of Betulaceae and Poaceae Pollen Seasons (Northern Italy, Vignola, Emilia-Romagna). *Plants*, 5, 42. <https://doi.org/10.3390/plants5040042>
- Miranda, E. E. (2002). Plátano de sombra. In A. L. Valero & A. Cadahía (Eds.), *Polinosis: polen y alergia* (pp. 149–156). Madrid: Laboratorios Menarini.
- Moral de Gregorio, A., Senent Sánchez, C. J., García Gómez, E., & Pérez-Badía, R. (Eds.). (2017). *Manual de Alergopalinología. Plantas, Pólenes y Proteínas* (pp. 258) Ed. Laboratorios Diater.
- Moreno-Grau, S., Aira, M. J., Elvira-Rendueles, B., Fernández-González, M., Fernández-González, D., García-Sánchez, A., ... Rodríguez-Rajo, F. J. (2016). Assessment of the *Olea* pollen and its major allergen Ole e 1 concentrations in the bioaerosol of two biogeographical areas. *Atmospheric Environment*, 145, 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.040>
- Nowosad, J., Stach, A., Kasprzyk, I., Grewling, Ł., Latałowa, M., Puc, M., ... Uruska, A. (2015). Temporal and spatiotemporal autocorrelation of daily concentrations of *Alnus*, *Betula*, and *Corylus* pollen in Poland. *Aerobiologia*, 31, 159–177. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9354-2>
- Pacini, E., & Hesse, M. (2004). Cytophysiology of pollen presentation and dispersal. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 199, 273–285. <https://doi.org/10.1078/0367-2530-00156>
- Palacín, A., Rivas, L. A., Gómez-Casado, C., Aguirre, J., Tordesillas, L., Bartra, J., ... Díaz-Perales, A. (2012). The Involvement of Thaumatin-Like Proteins in Plant Food Cross-Reactivity: A Multicenter Study Using a Specific Protein Microarray. *PLoS ONE*, 7(9), e44088. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044088>

- Pawankar, R. (2014). Allergic diseases and asthma: a global public health concern and a call to action. *World Allergy Organization Journal*, 7, 12. <https://doi.org/10.1186/1939-4551-7-12>
- Pérez-Badía, R., Bouso, V., Rojo, J., Vaquero, C., & Sabariego, S. (2013). Dynamics and behaviour of airborne *Quercus* pollen in central Iberian Peninsula. *Aerobiologia*, 29(3), 419–428. <https://doi.org/10.1007/s10453-013-9294-2>
- Pérez-Badía, R., Rapp, A., Vaquero, C., & Fernández-González, F. (2011). Aerobiological Study in East-Central Iberian Peninsula: pollen diversity and dynamics for mayor taxa. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 18, 99–111.
- Pérez, C. F., Gassmann, M. I., & Covi, M. (2009). An evaluation of the airborne pollen–precipitation relationship with the superposed epoch method. *Aerobiologia*, 25, 313–320. <https://doi.org/10.1007/s10453-009-9135-5>
- 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>
- Platts-Mills, T. A. E. (2015). The allergy epidemics: 1870-2010. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 136(1), 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2015.03.048>
- Plaza, M. P., Alcázar, P., Hernández-Ceballos, M. A., & Galán, C. (2016). Mismatch in aeroallergens and airborne grass pollen concentrations. *Atmospheric Environment*, 144, 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.008>
- Puiggròs, A., Muñoz-Cano, R., Roger, R. A., Raga, E., Belmonte, J., & Valero, A. (2015). Prevalence of sensitization to pollen from trees planted in Barcelona city. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 25(2), 133–162.
- Rodríguez-Rajo, F. J., Jato, V., González-Parrado, Z., Elvira-Rendueles, B., Moreno-Grau, S., Vega-Maray, A., ... Suárez-Cervera, M. (2011). The combination of airborne pollen and allergen quantification to reliably assess the real pollinosis risk in different bioclimatic areas. *Aerobiologia*, 27, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10453-010-9170-2>
- Rojo, J., Orlandi, F., Pérez-Badía, R., Aguilera, F., Ben Dhiab, A., Bouziane, H., ... Fornaciari, M. (2016). Modeling olive pollen intensity in the Mediterranean region

-
- through analysis of emission sources. *Science of The Total Environment*, 551–552, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.193>
- Rojo, J., Oteros, J., Picornell, A., Ruëff, F., Werchan, B., Werchan, M., ... Buters, J. (2020). Land-Use and Height of Pollen Sampling Affect Pollen Exposure in Munich, Germany. *Atmosphere*, 11(2), 145. <https://doi.org/10.3390/ATMOS11020145>
- Rojo, J., & Pérez-Badia, R. (2015a). Models for forecasting the flowering of Cornicabra olive groves. *International Journal of Biometeorology*, 59, 1547–1556. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-0961-6>
- Rojo, J., & Pérez-Badia, R. (2015b). Spatiotemporal analysis of olive flowering using geostatistical techniques. *Science of The Total Environment*, 505, 860–869. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.022>
- 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. *Science of The Total Environment*, 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-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, 130. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5129-2>
- Rojo, J., Rivero, R., Romero-Morte, J., Fernández-González, F., & Pérez-Badia, R. (2017). Modeling pollen time series using seasonal-trend decomposition procedure based on LOESS smoothing. *International Journal of Biometeorology*, 61, 335–348. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1215-y>
- Romero-Morte, J., Rojo, J., Rivero, R., Fernández-González, F., & Pérez-Badia, R. (2018). Standardised index for measuring atmospheric grass-pollen emission. *Science of the Total Environment*, 612, 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.139>
- Sabariego Ruiz, S., Gutiérrez Bustillo, A. M., Cervigón Morales, P., & Cuesta, P. (2008). Forecasting airborne *Platanus* pollen in the Madrid region. *Grana*, 47, 234–240. <https://doi.org/10.1080/00173130802218574>

- Sánchez-Mesa, J. A., Serrano, P., Cariñanos, P., Prieto-Baena, J. C., Moreno, C., Guerra, F., & Galan, C. (2005). Pollen allergy in Cordoba city Pollen allergy in Cordoba city: frequency of sensitization and relation with antihistamine sales. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 15(1), 50–56.
- Sénéchal, H., Visez, N., Charpin, D., Shahali, Y., Peltre, G., Biolley, J.-P., ... Sutra, J.-P. (2015). A Review of the Effects of Major Atmospheric Pollutants on Pollen Grains, Pollen Content, and Allergenicity. *The Scientific World Journal*, 2015, 1–29. <https://doi.org/10.1155/2015/940243>
- Silva-Palacios, I., Fernández-Rodríguez, S., Durán-Barroso, P., Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J. M., & Gonzalo-Garijo, Á. (2016). Temporal modelling and forecasting of the airborne pollen of Cupressaceae on the southwestern Iberian Peninsula. *International Journal of Biometeorology*, 60, 297–306. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1026-6>
- Suárez-Cervera, M., Asturias, J. A., Vega-Maray, A., Castells, T., López-Iglesias, C., Ibarrola, I., ... Seoane-Camba, J. A. (2005). The role of allergenic proteins Pla a 1 and Pla a 2 in the germination of *Platanus acerifolia* pollen grains. *Sexual Plant Reproduction*, 18, 101–112. <https://doi.org/10.1007/s00497-005-0002-4>
- Subiza Garrido-Lestache, F. J., Pola Pola, J., Feo Brito, F., & Moral de Gregorio, A. J. (2007). Pólenes de interés en alergología en nuestro medio. In *Tratado de Alergología* (pp. 425–447).
- Subiza, J., Cabrera, M., Valdivieso, R., Subiza, J. L., Jerez, M., Jimenez, J. A., ... Subiza, E. (1994). Seasonal asthma caused by airborne *Platanus* pollen. *Clinical and Experimental Allergy*, 24, 1123–1129. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.1994.tb03317.x>
- Tavares, B., Machado, D., Loureiro, G., Cemlyn-Jones, J., & Pereira, C. (2008). Sensitization to profilin in the Central region of Portugal. *Science of the Total Environment*, 407(1), 273–278. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.08.013>
- Tormo Molina, R., Muñoz Rodríguez, A., Silva Palacios, I., & Gallardo López, F. (1996). Pollen production in anemophilous trees. *Grana*, 35(1), 38–46. <https://doi.org/10.1080/00173139609430499>

- Tormo, R., Silva, I., Gonzalo, Á., Moreno, A., Pérez, R., & Fernández, S. (2011). Phenological records as a complement to aerobiological data. *International Journal of Biometeorology*, 55, 51–65. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0308-2>
- Trigo, M. M., Jato, V., Fernández, D., & Galán, C. (2008). Atlas aeropalinológico de España. Universidad de León, Secretariado de Publicaciones.
- Valero, A., Rosell, E., Amat, P., Sancho, J., Roig, J., Piulats, J., & Malet Allergo Centre Barcelona, A. (1999). Hypersensitivity to *Platanus acerifolia* pollen: detection of the allergenic fractions. *Alergología e Inmunología Clínica*, 14(4), 220–227.
- Vara, A., Fernández-González, M., Aira, M. J., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2016). *Fraxinus* pollen and allergen concentrations in Ourense (South-western Europe). *Environmental Research*, 147, 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.014>
- Varela, S., Subiza, J., Subiza, J., Rodríguez, R., García, B., Jerez, M., ... Panzani, R. (1997). *Platanus* pollen as an important cause of pollinosis. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 100(6), 748–754. [https://doi.org/10.1016/S0091-6749\(97\)70268-9](https://doi.org/10.1016/S0091-6749(97)70268-9)
- Verstraeten, W. W., Dujardin, S., Hoebeke, L., Bruffaerts, N., Kouznetsov, R., Dendoncker, N., ... Delcloo, A. W. (2019). Spatio-temporal monitoring and modelling of birch pollen levels in Belgium. *Aerobiologia*, 35, 703–717. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09607-w>
- Vigouroux, A., Besnard, G., Sossey-Alaoui, K., Tersac, M., & Bervillé, A. (1997). Le statut d'hybride de *Platanus acerifolia* confirmé et celui de *P. densicoma* mis en évidence à l'aide de marqueurs génétiques moléculaires conséquences. *Acta Botanica Gallica*, 144(2), 243–251. <https://doi.org/10.1080/12538078.1997.10515772>
- Visez, N., Ivanovsky, A., Roose, A., Gosselin, S., Sénéchal, H., Poncet, P., & Choël, M. (2019). Atmospheric particulate matter adhesion onto pollen: a review. *Aerobiologia*, 9. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09616-9>
- Ziello, C., Sparks, T. H., Estrella, N., Belmonte, J., Bergmann, K. C., Bucher, E., ... Menzel, A. (2012). Changes to Airborne Pollen Counts across Europe. *PLoS ONE*, 7(4), e34076. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034076>

Ziska, L. H., Makra, L., Harry, S. K., Bruffaerts, N., Hendrickx, M., Coates, F., ... 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, e124–e131. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30015-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30015-4)

2. Objetivos

El objetivo general de esta Tesis Doctoral es analizar las concentraciones de polen del tipo polínico *Platanus* y de su alérgeno mayor Pla a 1 en el aire, así como analizar los factores antrópicos y las variables meteorológicas más influyentes para generar modelos de predicción de las concentraciones de polen en el aire y con ello el riesgo alérgico para la población. Este objetivo general se desglosa en los objetivos específicos que se plantean en los tres capítulos que se describen a continuación:

Capítulo I. Impacto de la abundancia del arbolado de plátano de sombra sobre las variaciones temporales y espaciales de la concentración de polen.

1. Analizar las tendencias en la dinámica y el comportamiento del polen del género *Platanus* en diferentes ciudades del centro de la península Ibérica (región de Castilla-La Mancha, España).
2. Estudiar la evolución en la plantación del número de árboles de plátano de sombra en los espacios verdes urbanos de la ciudad de Toledo durante las dos últimas décadas.
3. Relacionar las tendencias observadas en la concentración atmosférica del polen de *Platanus* en el aire con la evolución del número de árboles presentes en los espacios verdes como significado del efecto antrópico en la exposición polínica.

Capítulo II. La predicción de las concentraciones de polen atmosférico de plátano de sombra, una herramienta para evaluar el riesgo de alergia de los espacios verdes urbanos.

4. Estudiar la serie histórica de datos de polen atmosférico de *Platanus* mediante análisis de series temporales para establecer patrones deterministas a largo plazo como son los comportamientos estacionales y cíclicos de la curva de polen.
5. Analizar la influencia de las variables meteorológicas (temperatura máxima y mínima, precipitación y humedad relativa) sobre las concentraciones diarias de polen de *Platanus*.

6. Diseñar modelos de predicción de la concentración polínica de *Platanus* combinando el comportamiento estacional de la curva de polen (largo plazo) y la estimación de las variaciones diarias en los niveles polínicos en función de las variables meteorológicas (corto plazo).

Capítulo III. Patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

7. Determinar la correspondencia entre las concentraciones atmosféricas de polen de plátano de sombra, gramíneas y olivo (tipos polínicos *Platanus*, Poaceae y *Olea*), y la concentración de sus alérgenos mayores (Pla a 1, Phl p 1, Phl p 5 y Ole e 1).
8. Detectar los episodios de discordancia entre la medida de concentración de polen y alérgenos y clasificar estas discordancias en función del grado de anomalía con respecto a la relación general polen-alérgeno.
9. Interpretar el grado de discordancia entre la concentración de polen y alérgenos mediante el análisis de las variables meteorológicas que afectan a esta relación.

3. Consideraciones metodológicas

3.1. Área de estudio

El área de estudio de los trabajos realizados en esta Tesis Doctoral se enmarca principalmente en el centro de la península Ibérica, en concreto en la región de Castilla-La Mancha. Las ciudades objeto de estudio son Albacete, Ciudad Real, Cuenca, Guadalajara, Talavera de la Reina y Toledo estando así representadas todas las provincias de la región. Además, en el tercer capítulo de la Tesis el estudio incluye también la ciudad de Évora (Portugal).

Todas las ciudades de estudio son importantes núcleos urbanos y áreas de influencia dentro de la región. Albacete es la ciudad con mayor población con 173.050 habitantes, seguido por Guadalajara, Toledo y Talavera que presentan una población similar con 84.910, 84.873 y 83.417 habitantes, respectivamente. Después se encuentra Ciudad Real con 74.743 habitantes y Cuenca es la ciudad de menor población con 54.690 habitantes (JCCM, 2019).

Además de los residentes, estas ciudades son visitadas por miles de personas al año debido a la importancia turística de la región de Castilla-La Mancha que cuenta con una relevancia histórica que se refleja en su patrimonio, variada gastronomía, tradición vitivinícola y olivarera, gran artesanía y fiestas de Interés Turístico Internacional. Esto unido al creciente interés del turismo rural hace que durante el año 2019 las ciudades de Albacete y Toledo hayan registrado más de 76.000 viajeros con pernoctaciones, seguido por Cuenca con más de 61.000 viajeros, Guadalajara con 59.199 viajeros y Ciudad Real con casi 40.000 viajeros (INE, 2019).

Desde el punto de vista climático, todas las ciudades de estudio presentan un clima mediterráneo con tendencia continental caracterizado por presentar temperaturas extremas debido a la sucesión de veranos calurosos e inviernos fríos. Además, se registra un periodo de sequía estival durante los meses de verano. El bioclima se clasifica como mediterráneo pluvioestacional-oceánico y posee en la mayoría de las ciudades un termotipo mesomediterráneo de ombrotipo seco, que presenta un marcado déficit hídrico. Salvo en la ciudad de Cuenca, caracterizada por un termotipo supramediterráneo y ombrotipo subhúmedo (AEMET, 2010; Rivas-Martínez, Penas, del Río, Díaz González, & Rivas-Sáenz, 2017; Rivas-Martínez, Rivas-Sáenz, & Penas-Merino, 2011).

Los puntos donde se ubican los captadores para el muestreo de polen y alérgenos se encuentran dentro del entramado urbano por lo que, con el fin de conocer las fuentes potenciales emisoras de polen procedente de la vegetación, se han cartografiado los usos del suelo en un radio de 30 km desde la ubicación del captador en las diferentes ciudades estudiadas, utilizando un gráfico de anillos (Figura 8). La caracterización de los usos del suelo muestra como a medida que nos alejamos de la ubicación del captador el uso del suelo urbano y de espacios verdes da paso a las áreas ocupadas por la agricultura y por áreas de bosque u otro tipo de vegetación natural como matorrales y pastizales.

En general, en la Figura 8 se pone de manifiesto la gran vocación agrícola en el entorno de la mayor parte de las ciudades con más del 50% más allá del primer kilómetro alrededor de la ubicación de los captadores. Esta cifra es además ampliamente superada por ciudades como Albacete y Toledo con importantes superficies cubiertas por cultivos de herbáceas y olivo. Por otro lado, las ciudades de Cuenca y Talavera de la Reina son las que mayor superficie cubierta por áreas forestales poseen, concretamente por bosques de coníferas, en el caso de Cuenca, y por bosques de frondosas y dehesas (área agroforestal), en el caso de Talavera (Figura 8).

La superficie artificial de tejido urbano y unidades industriales, comerciales y de transporte principalmente se localizan en los primeros kilómetros alrededor de los captadores, es decir, del casco urbano de las ciudades. Sin embargo, en ciudades como Toledo y Guadalajara, la influencia de este tipo de superficies artificiales se extiende en toda la superficie considerada, debido a la influencia del área cercana a la ciudad de Madrid con mayor abundancia de infraestructuras industriales y núcleos de población más extensos. Obviamente a medida que existe una mayor distancia desde el captador polínico en el centro de las ciudades, aumenta la cobertura destinada a cultivos y aumenta la diversidad de bosques y áreas seminaturales.

La proporción de superficie cubierta por espacios verdes urbanos es muy pequeña con respecto al resto de categorías y, por lo tanto, sólo se hace evidente en el primer kilómetro alrededor de las ciudades de Albacete, Ciudad Real y Toledo. Sin embargo, la comparativa a este nivel espacial (píxel de 100x100 m) no es sensible a superficies tan reducidas como los espacios verdes y, por lo tanto, las superficies en esta categoría no pueden ser comparables entre ciudades. Otras unidades muy poco representadas por la pequeña superficie ocupada en el territorio son las láminas de agua, sólo presentes en

Ciudad Real (río Guadiana), y en Talavera y Toledo (río Tajo), así como los hábitats especiales que albergan áreas de vegetación natural de hábitats de determinada particularidad como roquedos o vegetación halófila de saladares (Figura 8).

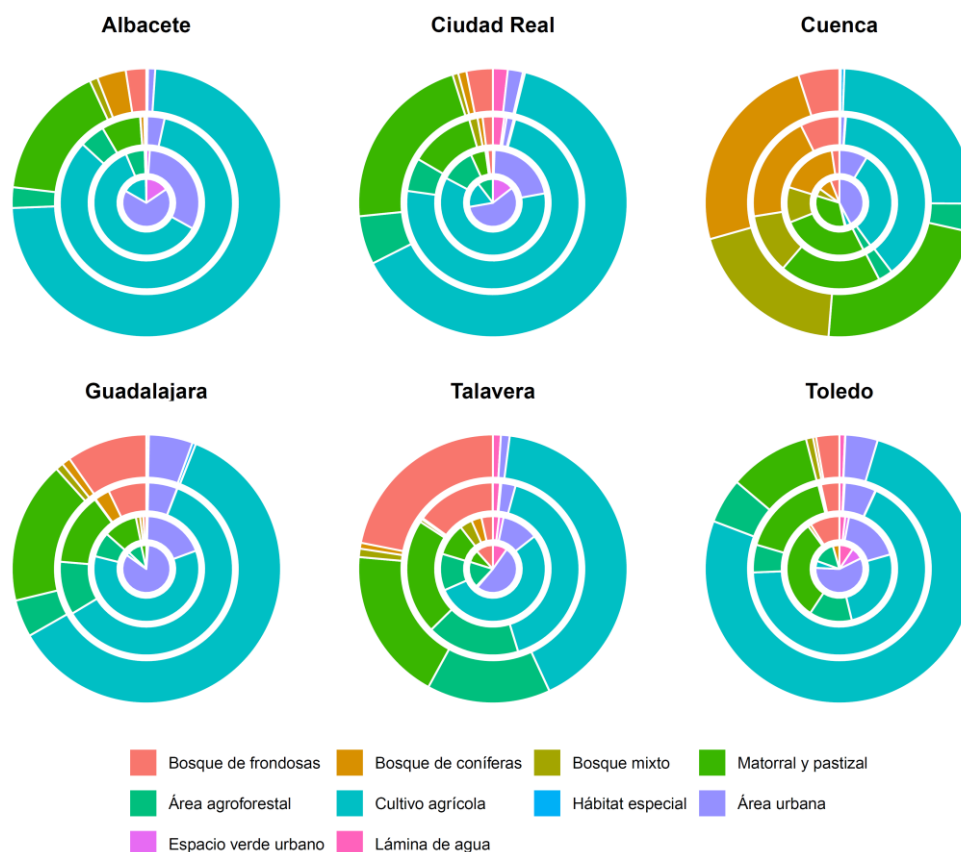


Figura 8. Caracterización de las fuentes potenciales de emisión de polen a partir de las coberturas de uso del suelo del CORINE Land Cover project (resolución espacial de 100x100 m como tamaño de píxel). Se han considerado anillos concéntricos de 1, 5, 15 y 30 km de radio alrededor de los captadores.

3.2. Estudio aerobiológico

Existen diferentes aparatos y métodos para el muestreo y la captura de bioaerosoles. La utilización de unos u otros dependerá de los objetivos planteados. A grandes rasgos, los métodos se pueden dividir en métodos volumétricos y no volumétricos, en función de si permiten conocer o no el volumen de aire muestreado y, además, se pueden clasificar en pasivos u activos en función de que fuercen o no la entrada de aire (Henningson & Ahlberg, 1994; West & Kimber, 2015). Esta Tesis Doctoral sigue las directrices respecto a los muestreos aerobiológicos de la Red de Aerobiología de Castilla-La Mancha (www.polencastillalalamanca.com) basadas en el consenso internacional de la utilización

para el muestreo de polen y esporas en el aire de captadores activos de tipo volumétrico, obteniendo medidas de concentración por volumen de aire muestreado. Los sistemas volumétricos están basados en un sistema de aspiración continuo de flujo de aire determinado, desde el exterior al interior del aparato producido por diferentes mecanismos.

Se ha utilizado un captador volumétrico tipo Hirst (Hirst, 1952) (Figura 9) donde las partículas son recogidas mediante su impacto en una cinta recubierta con sustancia adherente que gira a una velocidad de 2 mm/hora, lo que permite el recuento horario de las partículas adheridas. Este captador posee un flujo continuo de 10 L/min. La toma de muestras y el recuento polínico se ha llevado a cabo siguiendo la metodología propuesta por la Red Española de Aerobiología y cumpliendo los requerimientos mínimos propuestos por la Asociación Internacional de Aerobiología (Galán, Cariñanos, Alcázar, & Domínguez, 2007; Galán et al., 2014).



Figura 9. Captador tipo Hirst ubicado en la estación de Toledo.

El captador polínico de la ciudad de Albacete se localiza en el Parque Científico y Tecnológico de Castilla-La Mancha ($38^{\circ} 58' N$ $1^{\circ} 51' W$), el de la ciudad de Ciudad Real se sitúa en la Comisaría Provincial ($38^{\circ} 59' N$ $3^{\circ} 55' W$), el Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha es el emplazamiento del captador polínico en la ciudad de Cuenca ($40^{\circ} 4' N$ $2^{\circ} 07' W$), en Guadalajara la estación se localiza en la Diputación Provincial ($40^{\circ} 37' N$ $3^{\circ} 10' W$), mientras que en Talavera el captador polínico se encuentra en la

Universidad de Castilla-La Mancha (39° 57' N 4° 50' W) y en Toledo en el Campus Universitario de Fábrica de Armas (39° 51' N 4° 02' W). Todas las estaciones de seguimiento aerobiológico forman parte de la Red de Aerobiología de Castilla-La Mancha (AEROCAM), que se integra en la Red Española de Aerobiología (REA) que a su vez forma parte de la European Aeroallergen Network (EAN). Por otro lado, de manera complementaria, en la ciudad de Évora (Portugal) se ha realizado el muestreo con un captador polínico situado en la Universidad de Évora (38° 34' N 7° 55' W). Los datos procedentes de Évora se utilizan exclusivamente en el Capítulo III, en el cual se explican los detalles sobre la ubicación y la metodología de muestreo de esta localidad.

Por otro lado, el muestreo del aerosol para la cuantificación de aeroalérgenos se ha realizado utilizando un ciclón Multi-Vial (Figura 10), situado al lado del captador tipo Hirst de la estación de Toledo. Se trata de un muestreador volumétrico de tipo ciclónico que emplea un flujo de 16,5 L/min que fuerza las masas de aire a moverse en trayectoria de espiral y discrimina las partículas por la fuerza centrífuga, que precipitan en tubos Eppendorf de 1,5 ml. En una localización adicional en la ciudad de Évora (Portugal), el muestreo de bioaerosol se realizó mediante un muestreador ChemVol (Butracó, Son, The Netherlands), impactador en cascada de alto volumen (800 L/min). Como ya se ha comentado, los datos procedentes de Évora se utilizan exclusivamente en el Capítulo III.



Figura 10. Ciclón Multi-Vial ubicado en la estación de Toledo.

La extracción de aeroalérgenos se ha realizado siguiendo el método descrito por Takahashi et al. (2001) con las modificaciones propuestas por Moreno-Grau et al. (2006). La cuantificación se ha realizado utilizando la técnica ELISA (Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay) que consiste en la captura del antígeno y posterior detección gracias a que uno de los anticuerpos específicos está enlazado a una enzima capaz de generar un producto detectable que permite la lectura de absorbancia. Más detalles sobre esta técnica son expuestos en el Capítulo III de esta Tesis Doctoral.

Referencias

- AEMET. (2010). Guía resumida del clima en España 1981-2010. Retrieved from www.aemet.es.
- Galán, C., Cariñanos, P., Alcázar, P., & Domínguez, E. (2007). Manual de calidad y gestión de la Red Española de Aerobiología. Córdoba: Servicio de publicaciones de la Universidad de Córdoba.
- Galán, C., Smith, M., Thibaudon, M., Frenguelli, G., Oteros, J., Gehrig, R., ... Brandao, R. (2014). Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia*, 30, 385–395. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9335-5>
- Henningson, E. W., & Ahlberg, M. S. (1994). Evaluation of microbiological aerosol samplers: A review. *Journal of Aerosol Science*, 25(8), 1459–1492. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90219-4](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90219-4)
- Hirst, J. M. (1952). An automatic volumetric spore trap. *Annals of Applied Biology*, 39, 527–265.
- INE (2019). Instituto Nacional de Estadística. Encuesta de ocupación en alojamientos de turismo rural.
- JCCM (2019). Estadísticas de Castilla-La Mancha. Información Municipal.
- Moreno-Grau, S., Elvira-Rendueles, B., Moreno, J., García-Sánchez, A., Vergara, N., Asturias, J. A., ... Suárez-Cervera, M. (2006). Correlation between *Olea europaea* and *Parietaria judaica* pollen counts and quantification of their major allergens Ole e 1 and Par j 1-Par j 2. *Annals of Allergy, Asthma and Immunology*, 96(6), 858–864. [https://doi.org/10.1016/S1081-1206\(10\)61350-6](https://doi.org/10.1016/S1081-1206(10)61350-6)
- Rivas-Martínez, S., Penas, Á., del Río, S., Díaz González, T. E., & Rivas-Sáenz, S. (2017). Bioclimatology of the Iberian Peninsula and the Balearic Islands. In *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (pp. 29–80). https://doi.org/10.1007/978-3-319-54784-8_2
- Rivas-Martínez, S., Rivas-Sáenz, S., & Penas-Merino, A. (2011). Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, 1, 1–638. <https://doi.org/10.5616/gg110001>

Takahashi, Y., Ohashi, T., Nagoya, T., Sakaguchi, M., Yasueda, H., & Nitta, H. (2001). Possibility of real-time measurement of an airborne *Cryptomeria japonica* pollen allergen based on the principle of surface plasmon resonance. *Aerobiologia*, 17, 313–318.

West, J. S., & Kimber, R. B. E. (2015). Innovations in air sampling to detect plant pathogens. *Annals of Applied Biology*, 166, 4–17. <https://doi.org/10.1111/aab.12191>

**4. Capítulo I. Impacto de la abundancia
del arbolado de plátano de sombra en
las variaciones temporales y espaciales
de la concentración de polen**

Capítulo I. Impacto de la abundancia del arbolado de plátano de sombra en las variaciones temporales y espaciales de la concentración de polen

Impact of plane tree abundance on temporal and spatial variations in pollen concentration

Abstract

Many ornamental species growing in cities have considerable allergenic potential and pose a risk to allergy sufferers. Such species include members of the genus *Platanus*, or London plane tree, which is increasingly prevalent in a number of southern European cities. Analysis of airborne pollen concentrations enables biological air quality to be assessed, and also provides information on the local distribution of vegetation. The aim of this study was to analyze trends in annual *Platanus* pollen concentrations in central Spain and to determine the extent to which they are linked to the presence of this species in urban green spaces. The results point to a correlation between the growing number of plane trees and an increase both in the Annual Pollen Index and in the number of days on which allergy sufferers are at risk. Analysis suggests that variations in the diversity and abundance of allergenic ornamental species in urban green spaces may account for the trends observed in the dynamics and behavior of airborne pollen from these species. The results obtained in studies of this kind should be reflected in urban green-space management plans, in order to decrease the allergenic load and thus both reduce exposure to allergenic pollen and improve air quality in these spaces.

1. Introduction

Urban green spaces promote the quality of life of local residents thanks to the well-being associated with having a place to relax, socialize and undertake sporting activities (Fischer et al., 2018; Sugiyama, Carver, Koohsari, & Veitch, 2018; Wood, Hooper, Foster, & Bull, 2017). However, urban green spaces also pose a number of public-health problems, including increased exposure to allergenic pollen from certain ornamental species (Dadvand et al., 2014; Eisenman et al., 2019; Rufo, Paciência, & Ribeiro, 2019).

The quality of urban green spaces depends on both intrinsic factors (design, accessibility, biodiversity and infrastructure) and external factors linked to the area in which they are located (Adinolfi, Suárez-Cáceres, & Cariñanos, 2014). Due to the complex physiology and ecological functioning of plant species, efforts to select ornamental species offering certain social and economic advantages (increased shade, rapid growth) may lead to undesirable side-effects for local allergy-sufferers, including increased aeroallergen production (Vogt et al., 2017). Thus, key questions remain in urban design and planning with regard to how to invest in green urban infrastructure in ways which incorporate the large body of

scientific understanding (Salmond et al., 2014), particularly given the need to prioritize public health (van den Bosch & Ode Sang, 2017).

Airborne pollen records provide valuable information on biological air quality, and on the distribution of local vegetation (Rojo, Rapp, Lara, Fernández-González, & Pérez-Badia, 2015). The identification of pollen sources and the quantification of their contribution to overall pollen concentrations are tools enabling a more efficient design of urban parks and gardens in terms of the choice of species (Borycka & Kasprzyk, 2018; Cariñanos, Adinolfi, Díaz de la Guardia, De Linares, & Casares-Porcel, 2016; Charalampopoulos, Lazarina, Tsiripidis, & Vokou, 2018; Maya-Manzano, Tormo-Molina, Fernández-Rodríguez, Silva-Palacios, & Gonzalo-Garijo, 2017; Rojo et al., 2015). Moreover, pollen records provide information on the nature and magnitude of variations occurring as a result of changes in flora and vegetation (Charalampopoulos et al., 2018; García-Mozo, Oteros, & Galán, 2016).

Urban aerobiological research is now incorporating new tools linked to 3D simulation, mapping and urban planning for the study of pollen exposure (Pecero-Casimiro et al., 2019; Peel, Kennedy,

Smith, & Hertel, 2014; Weinberger et al., 2018). Furthermore, it has been suggested that aerobiological data should be borne in mind in the design and construction of buildings, since the spatial configuration of the urban fabric directly influences the airborne dispersal of bioaerosols (Fernández-Rodríguez, Cortés-Pérez, Muriel, Tormo-Molina, & Maya-Manzano, 2018).

Prediction models are currently being developed for ornamental species, with a view to assessing the allergy risk in urban green spaces (Lara, Rojo, Fernández-González, & Pérez-Badia, 2019), and recent research has focused on evaluating the risk posed by urban green spaces as a function of the presence and abundance of certain species (Jochner-Oette, Stitz, Jetschni, & Cariñanos, 2018; Kasprzyk, Ćwik, Kluska, Wójcik, & Cariñanos, 2019; Maya-Manzano, Tormo-Molina, et al., 2017).

A leading contributor to the risk associated with allergenic ornamental species is the prevalence of monospecific tree stands. Increasing the diversity of species growing in cities would help not only to lower the number of allergenic species but also to reduce the amount of pollen generated by monospecific stands (Cariñanos et al., 2017). In many

Mediterranean cities, urban green spaces are characterized by the overabundance of a limited number of species, including poplars (*Populus* spp.), willows (*Salix* spp.), elms (*Ulmus* spp.), cypresses (*Cupressus* spp.) and plane trees (*Platanus* spp.) (Cariñanos & Casares-Porcel, 2011). During the main pollen season, these species simultaneously release large amounts of pollen into the atmosphere; as a result, pollen from ornamental species is among the most prevalent in the pollen spectrum in Mediterranean cities (Pérez-Badia, Vaquero, Sardinero, Galán, & García-Mozo, 2010; Picornell, Recio, Trigo, & Cabezudo, 2019; Puljak, Mamić, Mitić, Hrga, & Hruševar, 2016; Tosunoglu, Saatcioglu, Bekil, Malyer, & Bicakci, 2018).

There are a number of reasons for choosing the London plane tree (*Platanus* spp.) as an ornamental species in cities: rapid growth, resistance to drought and a wide crown providing shade, these being criteria of interest in terms of urban tree planning and management (Vogt et al., 2017). This species has a considerable impact in large Mediterranean cities (D'Amato et al., 2007); in Spain, for example, plane trees are planted extensively in the green spaces, streets and avenues of both Madrid and Barcelona (Cariñanos & Casares-Porcel, 2011;

Gabarra, Belmonte, & Canela, 2002). At a local level, the abundance of plane trees, together with their marked allergenicity, requires an assessment of the environmental health risk and an improvement in the planning and design of urban green spaces (Maya-Manzano, Fernández-Rodríguez, et al., 2017). Airborne *Platanus* pollen concentrations in cities, and thus the exposure of local residents to their allergenic pollen, vary both in time and in space. It is therefore essential to analyze spatial-temporal patterns and identify the causes of variations when constructing models to predict pollen concentrations (Nowosad et al., 2015).

A number of studies report that increased pollen production by allergenic species in cities is prompted by rising temperatures, as a result of climate change and increased urban pollution, including higher atmospheric CO₂ concentrations (Koti, Reddy, Reedy, Kakani, & Zhao, 2005; Lake et al., 2017; Zhang et al., 2015; Ziello et al., 2012; Ziska et al., 2019). However, it is hard to evaluate the impact of environmental factors on pollen production in ornamental species such as the plane tree, since the effect of anthropic management needs to be clearly distinguished. Water availability plays a major role in the reproductive development

of ornamental flora in cities, and irrigation patterns and other management practices such as pruning may also influence pollen production and release by ornamental species (Fam, Lopes, Morison, & Connellan, 2008; Firon, Nepi, & Pacini, 2012; Gabarra et al., 2002)

For all these reasons, this study sought to analyze the dynamics and behavior of airborne *Platanus* pollen and to chart possible correlations with the presence and abundance of plane trees in a number of cities in central Spain. The primary aims were: to determine the causes of observed variations in pollen concentrations over the period 2003-2019; and to test the hypothesis that changes in urban land use, and especially the increased planting of plane trees in urban green spaces in certain Mediterranean cities, are a key contributor to increased exposure of *Platanus* pollen allergy-sufferers.

2. Material and methods

2.1. Study area

The Spanish region of Castilla-La Mancha is located in the center of the Iberian Peninsula. With an area of 79,409 km², it accounts for 15.7% of Spain's territory and is the country's third largest region. The climate is Mediterranean with continental influence, characterized by extreme temperatures due to the alternation

of hot summers and cold winters. Drought is common during the summer months (AEMET, 2010).

The following cities in the region of Castilla-La Mancha were studied: Albacete, Ciudad Real, Cuenca, Guadalajara, Talavera de la Reina and Toledo (Fig. 1).

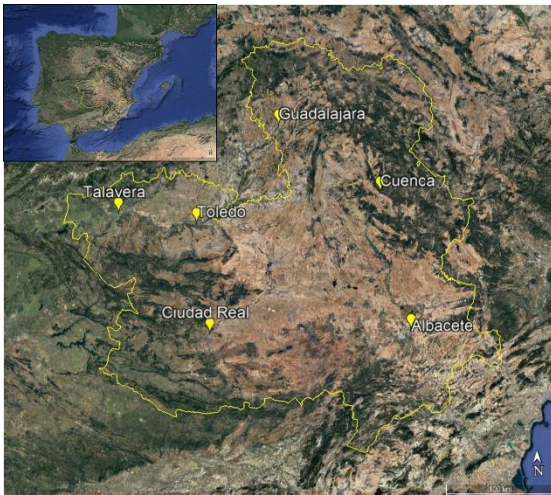


Fig. 1. Location of the studied cities

2.2. Aerobiological data

Airborne *Platanus* pollen was collected daily at sampling stations located in each study city (Fig. 1), using a Hirst-type volumetric sampler (Hirst, 1952). Sampling and pollen counting were performed in accordance with the Minimum Recommendations proposed by the International Association for Aerobiology (Galán et al., 2014).

The aerobiological data set used comprised daily pollen concentrations expressed as the daily average number of

pollen grains per cubic meter of air (grains/m^3). All days on which daily pollen concentrations exceeded 50 grains/m^3 were classified as allergen risk days (Pérez-Badía, Rapp, Vaquero, & Fernández-González, 2011). Average daily concentrations over the year were added together to give the Annual Pollen Integral (Galán et al., 2017).

2.3. Inventory of individuals and tree cover

Vegetation analysis included counting individual trees and estimating the crown cover of *Platanus orientalis* L. var. *acerifolia* Dryand. (the only species of the genus *Platanus* present in the study cities) in circular plots of 25 m radius. For larger parks, one plot was sampled per hectare, sample plots being randomly distributed over the total surface area of the park. Parks smaller than one hectare were inventoried in their entirety.

In a more exhaustive study to determine the contribution of trees lining streets and avenues, all plane trees in the cities of Toledo and Cuenca were georeferenced in the course of 2019. Toledo was selected as representative of cities where plane trees are widely planted in streets and avenues, whereas Cuenca represented those where planes were less common outside urban green spaces.

The current number of plane trees of Toledo was compared with the number recorded on orthophotos in previous years (2003, 2006, 2009, 2012 and 2015). Given that the number of trees influences pollen concentrations over subsequent years, correlations were sought between variations in average annual total *Platanus* pollen concentrations over the following 5 years and variations in the number of plane trees observed in the orthophotos. This comparison was made only in Toledo, since the city's pollen database spanned the entire study period (2003-2019).

2.4. Statistical analysis

Pollen data were subjected to temporal (trends in time series) and spatial analysis (comparison between cities). Trends in pollen-season parameters were studied for those cities with a historical database going back more than 8 years (Albacete, Cuenca, Guadalajara and Toledo). Calculation of pollen-season parameters and trend analysis were performed with the AeRobiology software package (Rojo, Picornell, & Oteros, 2019), using linear regression to detect significant trend patterns. Year-on-year variations in airborne pollen concentrations in Toledo were additionally analyzed in conjunction with variations in the city's plane-tree population over the study period; a robust

correlation test (Winsorized correlation) was used for this purpose, since classical statistics could not be applied due to the paucity of available data.

For spatial analysis purposes, plane-tree distribution and cover with respect to the sampler were compared for all study cities. In order to examine the relationship between spatial distribution and airborne pollen concentrations, plane-tree cover in the area surrounding the sampler was analyzed using the concentric ring method (Devadas et al., 2018; Oteros et al., 2017; Rojo et al., 2016): taking the sampler as the point of reference, percentage plane-tree cover was calculated for concentric rings at 500-metre intervals. Results were plotted on a ring chart using R Software (R Core Team, 2019).

3. Results

The long-term temporal analysis of pollen load and pollen risk of *Platanus* pollen was carried out using a linear regression analysis of the pollen time-series (Figs. 2 and 3). Analysis of total annual *Platanus* concentrations (Annual Pollen Integral) revealed a significant positive trend in Albacete, Cuenca and Toledo (Fig. 3). The greatest slope was shown in Toledo, the longest historical time-series (slope = 301). This means that in general terms, every year an increase of

300 pollen grains/m³ is revealed in the annual pollen amounts in Toledo.

A significant positive trend was also observed for number of allergenic risk days (over 50 pollen grains/m³) in Albacete, Cuenca, Guadalajara and Toledo (Fig. 3). In the last studied year (2019), the number of allergenic risk days was the maximum observed for the entire study period in each station.

Therefore, the *Platanus* pollen risk in Castilla-La Mancha is becoming higher regarding to the number of risk days. In addition, during the year 2019, the risk threshold (50 pollen grains/m³) was

exceeded on more than 15 days in Guadalajara and Toledo, and did not exceed 8 days in Cuenca, although the slope of the trends was very similar for all pollen stations ranging from 0.6 to 1.1 in number of risk days per year (Fig. 3).

Tests to determine the relationship between increased plane-tree populations and rising total annual *Platanus* pollen concentrations in Toledo over the period 2003-2019 (Fig. 4), revealed a significant positive correlation between the two variables ($\rho_w = 0.92$, $p < 0.05$) as well as a statistically-significant increasing trend fitting an exponential function (Fig. 4).

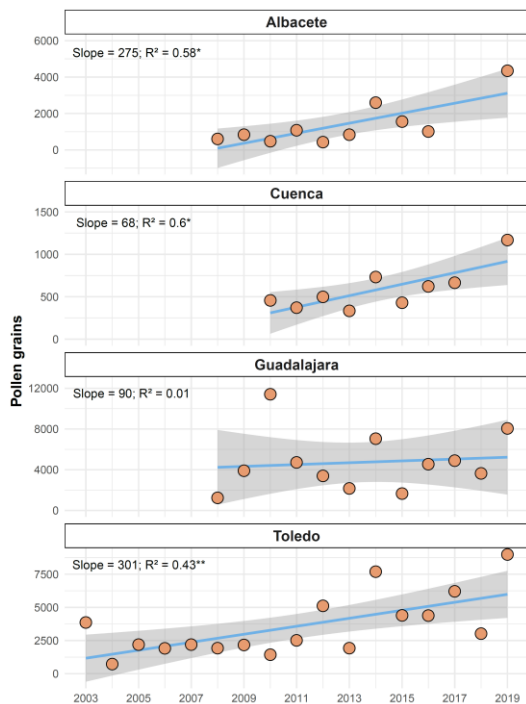


Fig. 2. Trends of the Annual Pollen Integral of *Platanus* pollen. Levels of significance: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

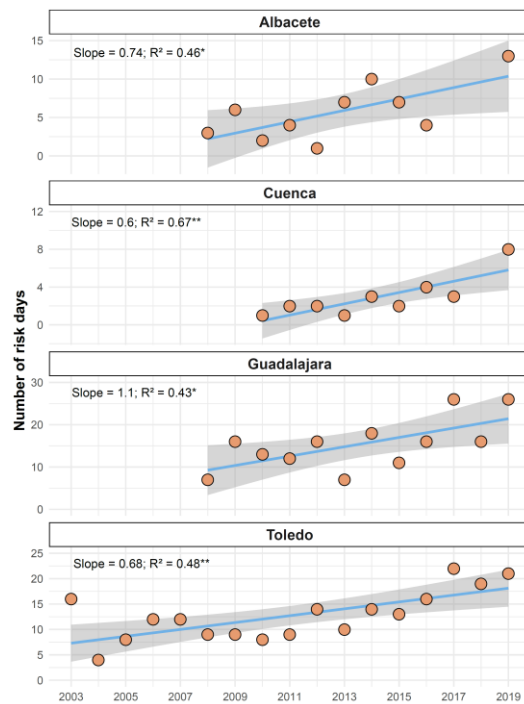


Fig. 3. Trends of number of risk days of *Platanus* pollen (> 50 pollen grains/m³). Levels of significance: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

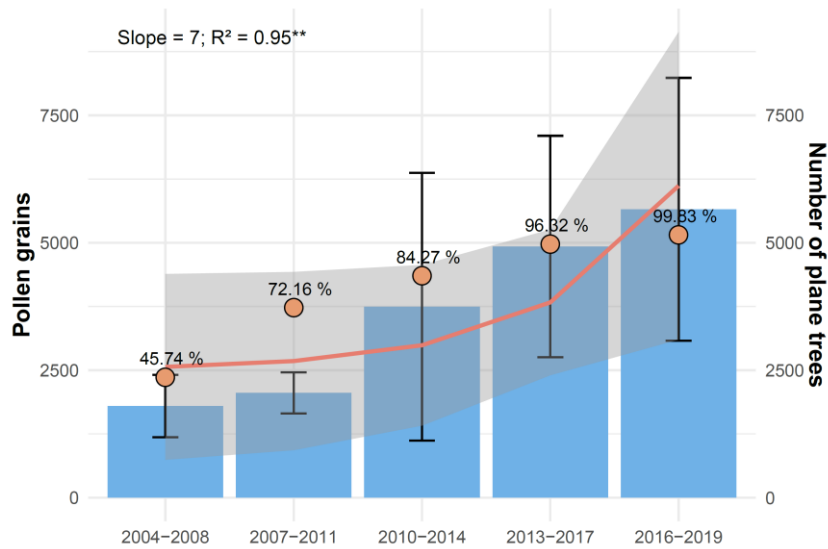


Fig. 4. Mean and standard deviation of the Annual total pollen of *Platanus* (bars) and number of plane trees (points). The value above points represent the percentage respect de number of trees counted in 2019.

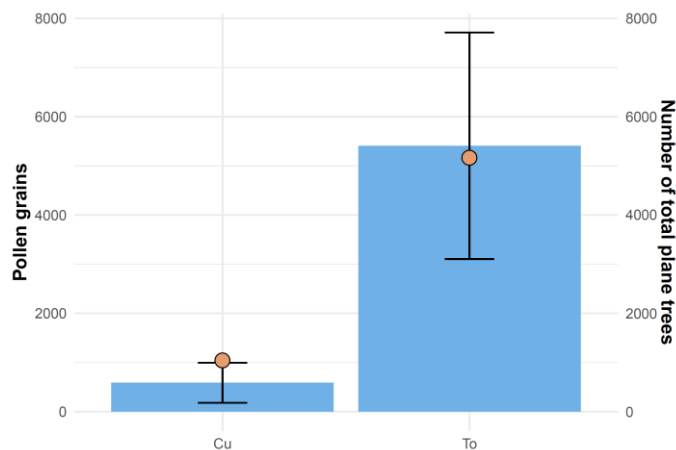


Fig. 5. Annual total pollen (bars) and number of total plane trees (points) in the cities of Cuenca (Cu) and Toledo (To).

Therefore, a clear significant relationship has been demonstrated between the rise of the pollen load and the increase of plane trees in the city of Toledo during the last 15 years.

Comparisons of total trees of the species *Platanus orientalis* var. *acerifolia* both in urban green spaces at all study sites and in the streets and avenues of Cuenca and Toledo, together with total annual pollen

concentrations, are shown in Figure 5. Higher pollen concentrations, and larger plane-tree populations, were recorded in Toledo than in Cuenca. Specifically, a mean Annual Pollen Integral of 5,407 pollen grains/m³ was related to 5,168 individuals of plane tree in the city of Toledo. However, a considerable reduction of mean Annual Pollen Integral was found in Cuenca (588 pollen grains/m³), and this city is characterized by a number of individuals of plane tree of 1,044 trees accounted for in the year 2019 (current situation).

Spatial analysis of plane-tree abundance (%) inside the green urban spaces revealed that the cities with the highest plant cover of plane tree in the vicinity of the sampler were Ciudad Real and Talavera de la Reina (Fig. 6). Both are the cities with the greatest annual pollen amounts that as mean values were 17,711 and 7,192 pollen grains/m³, respectively. But not only, in the vicinities of these cities the plant cover of plane tree is higher than in the rest of pollen stations, also in the most of concentric rings (1000, 1500, 2000 m around the pollen trap) are covered by plane tree, being the reason for the higher pollen load (Fig. 6).

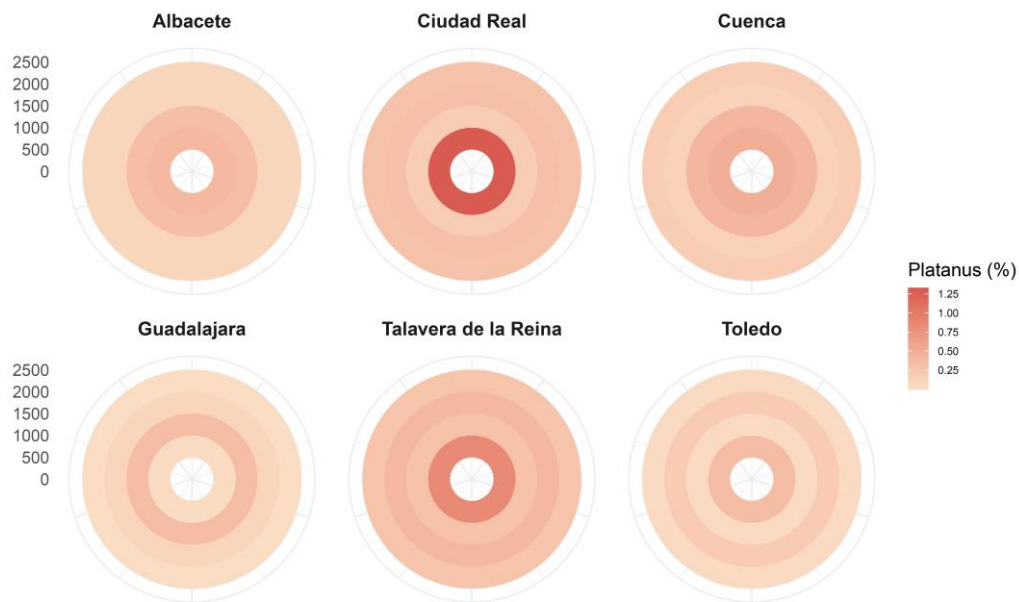


Fig. 6. Concentric ring showing the percentage of the surface of Platanus in the main urban green zones for the studied cities.

4. Discussion

Pollen release and dispersal patterns are influenced by biotic and abiotic factors, which have been the subject of extensive aerobiological research. However, given the ornamental character of the plane tree, pollen release patterns are determined to a large extent by anthropic factors, which were assessed in this study. Trends observed in the dynamics and behavior of ornamental species such as the plane tree are linked to local changes attributable mainly to the action of man, as shown here, and to a lesser extent to environmental factors (Zhang et al., 2015; Ziello et al., 2012; Ziska et al., 2019).

Time-series analysis confirmed a clear trend towards rising annual *Platanus* pollen concentrations as well as a progressive increase in the number of allergenic risk days in the study cities, all located in the center of the Iberian Peninsula. Research in other Spanish cities has revealed a similar increase in plane pollen concentrations: studies in Jaén (southern Spain) report a clearly significant rising trend over the period 1994-2016 (Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018). Indeed, a significant increase in total annual *Platanus* pollen concentrations has been noted for all Andalusian cities with the exception of Seville (Alcázar et al.,

2011). Data for Badajoz confirm a significant year-on-year increase in *Platanus* pollen levels in April, the peak pollination month (Tormo-Molina, Gonzalo-Garijo, Silva-Palacios, & Muñoz-Rodríguez, 2010).

Elsewhere in Europe, research has highlighted a significant positive trend in the Annual Pollen Index for *Platanus* pollen (Ziello et al., 2012). To date, however, there has been no direct measurement of urban plane-tree populations as a potential anthropic cause of increased airborne pollen concentrations. The present study indicates a direct correlation between rising annual *Platanus* pollen levels and increasing plane-tree populations in urban areas of the Mediterranean region.

These findings highlight a clear link between the increased planting of plane trees and overall increased exposure to pollen from ornamental flora in cities (Hjort et al., 2016). In Toledo (Fig. 4), for example, plane-tree populations increased by 20% between 2003 and 2019, while annual *Platanus* pollen concentrations doubled over the same period.

Moreover, data for Albacete, Cuenca, Toledo and Guadalajara showed a significant positive trend in the number of allergenic risk days for local residents

allergic to *Platanus* pollen; this finding has unquestionable implications in the field of public health in urban areas (Alcázar et al., 2004). In most central Spanish cities, the number of risk days for residents sensitized to aeroallergens is rising.

With regard to the spatial distribution of pollen exposure, the presence and abundance of ornamental species is largely governed by urban development plans – which determine the size and number of urban green spaces – and more directly by the species selected when designing urban parks and gardens (Vogt et al., 2017). The results obtained here indicate that plane-tree cover is not always greater in the immediate vicinity of the pollen sampler: while this was the case in Ciudad Real and Talavera, where plane stands are very old, it was not so in the other cities, where plane plantations are more recent. There is evidence that other factors may influence the relationship between pollen release and the abundance of cover in the vicinity of the sampler, including the size and maturity of individual trees, and the impact of environmental factors (e.g. wind) on pollen release and dispersal patterns (Charalampopoulos et al., 2018; Maya-Manzano, Fernández-Rodríguez, et al., 2017).

Due to the local provenance of plane-tree pollen – as distinct from pollen generated by vegetation growing outside cities – dispersal takes place over shorter distances (Gonzalo-Garijo, Tormo-Molina, Muñoz-Rodríguez, & Silva-Palacios, 2006; Rojo, Oteros, et al., 2019). This is especially relevant in the case of large urban areas containing monospecific stands of an allergenic ornamental species, which will pose an enormous risk to allergic citizens making use of these green spaces (Jochner-Oette et al., 2018). Major influential factors therefore include not only the number of individual trees constituting major sources of pollen, but also the distribution of these trees within cities. Here, however, the results for Toledo and Cuenca showed a direct positive correlation between the total number of plane trees and total annual *Platanus* pollen concentrations, regardless of distribution; similar findings have been reported by other authors (Maya-Manzano, Tormo-Molina, et al., 2017).

Pollen types from species abundant in urban environments, such as ornamental species, may exhibit vertical distribution profiles different from those of species growing mainly outside urban areas (Rojo, Oteros, et al., 2019). Research shows that pollen is deposited within a few hours of its release, and that more than 88% of pollen

is deposited within a range of less than 3 km from its source (Adams-Groom, Skjøth, Baker, & Welch, 2017), with the highest deposition being recorded in the first few hundred meters from the point of release (Bricchi, Frenguelli, & Mincigrucci, 2000; Nowak, Szymańska, & Grewling, 2012).

By analyzing pollen concentrations for allergenic species frequently planted in urban green spaces in Mediterranean cities, such as the plane tree, we can estimate the allergy risk posed by the green spaces themselves; this is of particular importance for the quality of life of allergy sufferers in urban areas (Weinberger et al., 2018). Aerobiological research aimed at identifying the sources of airborne pollen concentrations and quantifying their contribution to overall pollen levels enables specific recommendations to be made regarding the most suitable ornamental species, and is thus an essential step in ensuring a more efficient design of urban parks and gardens (Churkina, Grote, Butler, & Lawrence, 2015; Rojo et al., 2015; Vogt et al., 2017).

5. Conclusions

This study revealed a rising trend both in total annual *Platanus* pollen concentrations and in the number of risk days for allergy sufferers over recent years. This increase was linked to the number and

percentage cover of plane trees growing in urban green spaces.

The findings confirm, once again, that essential changes in land use in urban areas, and equally-essential planning decisions made regarding the choice of ornamental species for green spaces have unfortunately lead – at least in Spain – to an increase both in plane tree pollen concentrations and in the number of risk days for people sensitive to this pollen type.

The results derived from aerobiological research of this kind should be taken into account in management plans for urban green spaces, in order to help reduce the exposure of people sensitive to pollen produced by ornamental species. The findings should be borne in mind when applying nature-based solutions in existing green areas, and above in when deciding on future municipal development plans in areas of urban expansion.

References

- Adams-Groom, B., Skjøth, C. A., Baker, M., & Welch, T. E. (2017). Modelled and observed surface soil pollen deposition distance curves for isolated trees of *Carpinus betulus*, *Cedrus atlantica*, *Juglans nigra* and *Platanus acerifolia*. *Aerobiologia*, 33, 407–416. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9479-1>
- Adinolfi, C., Suárez-Cáceres, G. P., & Cariñanos, P. (2014). Relation between visitors' behaviour and characteristics of green spaces in the city of Granada, south-eastern Spain. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), 534–542. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.007>
- AEMET. (2010). *Guía resumida del clima en España 1981-2010*. Retrieved from www.aemet.es.
- Alcázar, P., Cariñanos, P., De Castro, C., Guerra, F., Moreno, C., Domínguez-Vilches, E., & Galán, C. (2004). Airborne plane-tree (*Platanus hispanica*) pollen distribution in the city of Córdoba, South-western Spain, and possible implications on pollen allergy. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 14(3), 238–243.
- Alcázar, P., García-Mozo, H., Trigo, M. del M., Ruiz, L., González-Minero, F. J., Hidalgo, P., ... Galán, C. (2011). *Platanus* pollen season in Andalusia (southern Spain): trends and modeling. *Journal of Environmental Monitoring*, 13, 2502. <https://doi.org/10.1039/c1em10355e>
- Borycka, K., & Kasprzyk, I. (2018). Do the threats of alder and birch allergenic pollen differ within an urban area? *Urban Forestry & Urban Greening*, 34, 281–293. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.07.013>
- Bricchi, E., Frenguelli, G., & Mincigrucchi, G. (2000). Experimental results about *Platanus* pollen deposition. *Aerobiologia*, 16, 347–352.
- Cariñanos, P., Adinolfi, C., Díaz de la Guardia, C., De Linares, C., & Casares-Porcel, M. (2016). Characterization of Allergen Emission Sources in Urban Areas. *Journal of Environment Quality*, 45, 244. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.02.0075>
- Cariñanos, P., & Casares-Porcel, M. (2011). Urban green zones and related pollen allergy: A review. Some guidelines for designing spaces with low allergy impact. *Landscape and Urban Planning*, 101, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.006>
- Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., Díaz de la Guardia, C., Aira, M. J., Belmonte, J., Boi, M., ... 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>
- Charalampopoulos, A., Lazarina, M., Tsiropidis, I., & Vokou, D. (2018). Quantifying the relationship between airborne pollen and vegetation in the urban environment.

Capítulo I. Impacto de la abundancia del arbolado de plátano de sombra en las variaciones temporales y espaciales de la concentración de polen

- Aerobiologia*, 34, 285–300. <https://doi.org/10.1007/s10453-018-9513-y>
- Churkina, G., Grote, R., Butler, T. M., & Lawrence, M. (2015). Natural selection? Picking the right trees for urban greening. *Environmental Science & Policy*, 47, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.10.014>
- Dadvand, P., Villanueva, C. M., Font-Ribera, L., Martínez, D., Basagaña, X., Belmonte, J., ... Nieuwenhuijsen, M. J. (2014). Risks and Benefits of Green Spaces for Children: A Cross-Sectional Study of Associations with Sedentary Behavior, Obesity, Asthma, and Allergy. *Environmental Health Perspectives*, 122(12), 1329–1335. <https://doi.org/10.1289/ehp.1308038>
- Devadas, R., Huete, A. R., Vicendese, D., Erbas, B., Beggs, P. J., Medek, D., ... Davies, J. M. (2018). Dynamic ecological observations from satellites inform aerobiology of allergenic grass pollen. *Science of The Total Environment*, 633, 441–451. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.191>
- Eisenman, T. S., Churkina, G., Jariwala, S. P., Kumar, P., Lovasi, G. S., Pataki, D. E., ... Whitlow, T. H. (2019). Urban trees, air quality, and asthma: An interdisciplinary review., 187, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.02.010>
- Fam, D., Lopes, A. M., Morison, J., & Connellan, G. J. (2008). Irrigation of Urban Green Spaces: a review of the Environmental, Social and Economic benefits Societal Perceptions and Acceptability of Remediation Technologies (SPART) View project RBG Melbourne Water Efficient Landscapes View project. In *CRC for Irrigation Futures Technical*.
- Fernández-Rodríguez, S., Cortés-Pérez, J. P., Muriel, P. P., Tormo-Molina, R., & Maya-Manzano, J. M. (2018). Environmental impact assessment of Pinaceae airborne pollen and green infrastructure using BIM. *Automation in Construction*, 96, 494–507. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.011>
- Firon, N., Nepi, M., & Pacini, E. (2012). Water status and associated processes mark critical stages in pollen development and functioning. *Annals of Botany*, 109, 1201–1214. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs070>
- Fischer, L. K., Honold, J., Botzat, A., Brinkmeyer, D., Cvejić, R., Delshammar, T., ... Kowarik, I. (2018). Recreational ecosystem services in European cities: Sociocultural and geographical contexts matter for park use. *Ecosystem Services*, 31, 455–467. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.01.015>
- Gabarra, E., Belmonte, J., & Canela, M. (2002). Aerobiological behaviour of *Platanus* L. pollen in Catalonia (North-East Spain). *Aerobiologia*, 18, 185–193.
- Galán, C., Ariatti, A., Bonini, M., Clot, B., Crouzy, B., Dahl, A., ... Sofiev, M. (2017). Recommended terminology for aerobiological studies. *Aerobiologia*, 33(3),

- 293–295. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9496-0>
- Galán, C., Smith, M., Thibaudon, M., Frenguelli, G., Oteros, J., Gehrig, R., ... Brandao, R. (2014). Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia*, 30, 385–395. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9335-5>
- García-Mozo, H., Oteros, J. A., & Galán, C. (2016). Impact of land cover changes and climate on the main airborne pollen types in Southern Spain. *Science of The Total Environment*, 548–549, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.005>
- Gonzalo-Garijo, M. A., Tormo-Molina, R., Muñoz-Rodríguez, A. F., & Silva-Palacios, I. (2006). Differences in the spatial distribution of airborne pollen concentrations at different urban locations within a city. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 16(1), 37–43.
- Hirst, J. M. (1952). An automatic volumetric spore trap. *Annals of Applied Biology*, 39, 527–265.
- Hjort, J., Hugg, T. T., Antikainen, H., Rusanen, J., Sofiev, M., Kukkonen, J., ... Jaakkola, 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>
- Jochner-Oette, S., Stitz, T., Jetschni, J., & Cariñanos, P. (2018). The Influence of Individual-Specific Plant Parameters and Species Composition on the Allergenic Potential of Urban Green Spaces. *Forests*, 9, 284. <https://doi.org/10.3390/f9060284>
- Kasprzyk, I., Ćwik, A., Kluska, K., Wójcik, T., & Cariñanos, P. (2019). Allergenic pollen concentrations in the air of urban parks in relation to their vegetation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 46, 126486. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126486>
- Koti, S., Reddy, K. R., Reedy, V. R., Kakani, V. G., & Zhao, D. (2005). Interactive effects of carbon dioxide, temperature, and ultraviolet-B radiation on soybean (*Glycine max* L.) flower and pollen morphology, pollen production, germination, and tube lengths. *Journal of Experimental Botany*, 56(412), 725–736. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri044>
- Lake, I. R., Jones, N. R., Agnew, M., Goodess, C. M., Giorgi, F., Hamaoui-Laguel, L., ... 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>

Capítulo I. Impacto de la abundancia del arbolado de plátano de sombra en las variaciones temporales y espaciales de la concentración de polen

- 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 Forestry & Urban Greening*, 27, 352–362. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.09.009>
- Maya-Manzano, J. M., Tormo-Molina, R., Fernández-Rodríguez, S., Silva-Palacios, I., & Gonzalo-Garijo, Á. (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>
- Nowak, M., Szymanńska, A., & Grewling, Ł. (2012). Allergic risk zones of plane tree pollen (*Platanus* sp.) in Poznan. *Postepy Dermatologii i Alergologii*, 29(3), 156–160.
- Nowosad, J., Stach, A., Kasprzyk, I., Grewling, Ł., Latałowa, M., Puc, M., ... Uruska, A. (2015). Temporal and spatiotemporal autocorrelation of daily concentrations of *Alnus*, *Betula*, and *Corylus* pollen in Poland. *Aerobiologia*, 31, 159–177. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9354-2>
- Oteros, J., Valencia, R. M., del Río, S., Vega, A. M., García-Mozo, H., Galán, C., ... Fernández-González, D. (2017). Concentric Ring Method for generating pollen maps. *Quercus* as case study. *Science of The Total Environment*, 576, 637–645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.121>
- Pecero-Casimiro, R., Fernández-Rodríguez, S., Tormo-Molina, R., Monroy-Colín, A., Silva-Palacios, I., Cortés-Pérez, J. P., ... 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. *Science of The Total Environment*, 693, 133576. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.382>
- Peel, R. G., Kennedy, R., Smith, M., & Hertel, O. (2014). Do urban canyons influence street level grass pollen concentrations? *International Journal of Biometeorology*, 58, 1317–1325. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0728-x>
- Pérez-Badía, R., Rapp, A., Vaquero, C., & Fernández-González, F. (2011). Aerobiological Study in East-Central Iberian Peninsula: pollen diversity and dynamics for mayor taxa. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 18, 99–111.
- Pérez-Badía, R., Vaquero, C., Sardinero, S., Galán, C., & García-Mozo, H. (2010). Intradial variations of allergenic tree pollen in the atmosphere of Toledo (central Spain). *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 17(2), 269–275.
- 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>
- Puljak, T., Mamić, M., Mitić, B., Hrga, I., & Hruševar, D. (2016). First aerobiological study in Mediterranean part of Croatia (Dalmatia): pollen spectrum and seasonal dynamics in the air of Split. *Aerobiologia*, 32, 709–723. <https://doi.org/10.1007/s10453-016-9444-4>
- R Core Team. (2019). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <https://www.R-project.org/>.
- Rojo, J., Oteros, J., Pérez-Badia, R., Cervigón, P., Ferencova, Z., Gutiérrez-Bustillo, A. M., ... Buters, J. (2019). Near-ground effect of height on pollen exposure. *Environmental Research*, 174, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.027>
- Rojo, J., Picornell, A., & Oteros, J. (2019). AeRobiology: the computational tool for biological data in the air. *Methods in Ecology and Evolution*, 10, 2041–210X.13203. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13203>
- 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. *Science of The Total Environment*, 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-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, 130. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5129-2>
- Rufo, J. C., Paciência, I., & Ribeiro, A. I. (2019). Green Environments and Allergic Diseases in Children: a Scoping Review. *Current Epidemiology Reports*, 6, 442–448. <https://doi.org/10.1007/s40471-019-00218-0>
- Ruiz-Valenzuela, L., & Aguilera, F. (2018). Trends in airborne pollen and pollen-season-related features of anemophilous species in Jaen (south Spain): A 23-year perspective. *Atmospheric Environment*, 180, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.012>
- Salmond, J. A., Tadaki, M., Vardoulakis, S., Arbuthnott, K., Coutts, A., Demuzere, M., ... Wheeler, B. W. (2014). Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environmental Health*. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0103-6>
- Sugiyama, T., Carver, A., Koohsari, M. J., & Veitch, J. (2018). Advantages of public green spaces in enhancing population health. *Landscape and Urban Planning*, 178, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.05.019>

Capítulo I. Impacto de la abundancia del arbolado de plátano de sombra en las variaciones temporales y espaciales de la concentración de polen

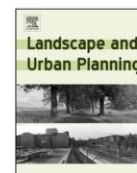
- Tormo-Molina, R., Gonzalo-Garijo, M. A., Silva-Palacios, I., & Muñoz-Rodríguez, A. F. (2010). General Trends in Airborne Pollen Production and Pollination Periods at a Mediterranean Site (Badajoz, Southwest Spain). *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology* (Vol. 20).
- Tosunoglu, A., Saatcioglu, G., Bekil, S., Malyer, H., & Bicakci, A. (2018). Atmospheric pollen spectrum in Stone City, Mardin; the northern border of Mesopotamia/SE-Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 635. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7014-7>
- van den Bosch, M., & Ode Sang, Å. (2017). Urban natural environments as nature-based solutions for improved public health – A systematic review of reviews. *Environmental Research*, 158, 373–384. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.040>
- Vogt, J., Gillner, S., Hofmann, M., Tharang, A., Dettmann, S., Gerstenberg, T., ... Roloff, A. (2017). Citree: A database supporting tree selection for urban areas in temperate climate. *Landscape and Urban Planning*, 157, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.06.005>
- Weinberger, K. R., Kinney, P. L., Robinson, G. S., Sheehan, D., Kheirbek, I., Matte, T. D., & Lovasi, G. S. (2018). Levels and determinants of tree pollen in New York City. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 28(2), 119–124. <https://doi.org/10.1038/jes.2016.72>
- Wood, L., Hooper, P., Foster, S., & Bull, F. (2017). Public green spaces and positive mental health – investigating the relationship between access, quantity and types of parks and mental wellbeing. *Health & Place*, 48, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2017.09.002>
- 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, 1581–1589. <https://doi.org/10.1111/gcb.12755>
- Ziello, C., Sparks, T. H., Estrella, N., Belmonte, J., Bergmann, K. C., Bucher, E., ... Menzel, A. (2012). Changes to Airborne Pollen Counts across Europe. *PLoS ONE*, 7(4), e34076. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034076>
- Ziska, L. H., Makra, L., Harry, S. K., Bruffaerts, N., Hendrickx, M., Coates, F., ... 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, e124–e131. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30015-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30015-4)

5. Capítulo II. La predicción de las concentraciones de polen atmosférico de plátano de sombra, una herramienta para evaluar el riesgo de alergia de los espacios verdes urbanos



Contents lists available at ScienceDirect

Landscape and Urban Planning

journal homepage: www.elsevier.com/locate/landurbplan

Research Paper

Prediction of airborne pollen concentrations for the plane tree as a tool for evaluating allergy risk in urban green areas



Beatriz Lara, Jesús Rojo*, Federico Fernández-González, Rosa Pérez-Badia

University of Castilla-La Mancha, Institute of Environmental Sciences (Botany), Avda. Carlos III s/n. E-45071, Toledo, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Plane tree pollen
Allergy risk
Meteorological variables
Forecasting model
Time series analysis

ABSTRACT

The different species of the genus *Platanus*, commonly known as plane trees, are widely grown as an ornamental species in Mediterranean cities over recent years. The pollen of these species is a major source of allergens. However, surprisingly little published research has addressed methods for predicting the allergy risk prompted by this pollen. In this work, we developed models for predicting airborne *Platanus* pollen concentrations constructed using data from central Spain. Predictions are very useful to alert citizens and give allergy patients advanced warning of expected high airborne pollen concentrations. The prediction models indicate that airborne *Platanus* pollen concentrations can be forecasted up to seven days (one week) in advance, using a method which combines the analysis of long-term aerobiological data (in this case, over the eleven-year study period), in order to detect seasonal trends within time-series, with the modelling of short-term fluctuations in airborne pollen concentrations prompted by daily changes in meteorological variables and pollen concentrations over the previous days. The meteorological variables studied were maximum and minimum temperature, rainfall and relative humidity. The results of the validation of prediction models yielded a coefficient of correlation between observed and predicted values of $R = 0.7$, indicating that these models predict most of the pollen peaks in the airborne pollen curve.

1. Introduction

In large cities, urban green areas often constitute the residents' main opportunity to interact with the natural environment. They benefit human health as well as providing a venue for outdoor recreational and sporting activities (Adinolfi, Suárez-Cáceres, & Cariñanos, 2014; Fernández-Rodríguez et al., 2016a, 2016c, 2016b). They also perform a number of air-quality services including air pollution removal by intercepting particulate matter and pollutants on plant surfaces (Nowak, Hirabayashi, Doyle, McGovern, & Pasher, 2018). At the same time, however, ornamental flora in urban green areas are a major source of aeroallergens (Cariñanos & Casares-Porcel, 2011; Maya-Manzano, Tormo-Molina, Fernández-Rodríguez, Silva-Palacios, & Gonzalo-Garijo, 2017). The chief ornamental species grown in Mediterranean countries include plane trees, particularly the European species *Platanus orientalis* L. and its North American counterpart *Platanus occidentalis* L. In Spain, most of the plane trees planted correspond to the species *Platanus orientalis* L. var. *acerifolia* Dryand in Aiton. (López-González, 2007), but some authors have considered that the origin of the plane trees planted are a hybrid species from *Platanus orientalis* and *Platanus occidentalis*

(*Platanus hispanica* Mill. ex Munchh. = *Platanus hybrida* Brot) (Rocha Afonso, 1990).

The *Platanus* pollen season runs from March to May, and pollen grains are a primary source of allergens (D'Amato et al., 2007) and is regarded as an important cause of allergy in Spain (Enrique et al., 2002; Moral-de Gregorio et al., 2016; Varela et al., 1997). A significant impact has been reported in both Madrid and Barcelona (Díaz de la Guardia et al., 1999; Gabarra, Belmonte, & Canela, 2002), where *Platanus* populations have been estimated at 60,000 and 150,000, respectively (Cariñanos & Casares-Porcel, 2011) and where 37–38% of allergy patients are sensitive to this pollen type (Puiggròs et al., 2015; Subiza Garrido-Lestache, Pola Pola, Feo Brito, & Moral de Gregorio, 2007). Besides, in central Spain, *Platanus* pollen is the third largest (Guadalajara) and fourth largest (Toledo) contributor to overall airborne pollen levels for woody species, accounting for 13% and 5%, respectively, of the total pollen count (Pérez-Badia et al., 2010; Rojo et al., 2016).

Continuous monitoring of airborne pollen concentrations yields data series providing valuable information on plant phenology and productivity; this information is particularly useful for agricultural, ecological (Fernández-Llamazares, Belmonte, Boada, & Fraixedas,

* Corresponding author.

E-mail addresses: beatriz.lara@uclm.es (B. Lara), jesus.rojo@uclm.es (J. Rojo), federico.fdez@uclm.es (F. Fernández-González), rosa.perez@uclm.es (R. Pérez-Badia).<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.05.002>Received 2 November 2018; Received in revised form 29 April 2019; Accepted 4 May 2019
0169-2046/ © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

Capítulo II. La predicción de las concentraciones de polen atmosférico de plátano de sombra, una herramienta para evaluar el riesgo de alergia de los espacios verdes urbanos

2014; García-Mozo, 2011) and public-health purposes. Aerobiological research of special relevance for public-health applications includes studies aimed at monitoring pollen concentrations and phenology (Galán et al., 2016; García-Mozo, Yaezel, Oteros, & Galán, 2014), identifying the main potential sources of pollen (Katz, Connor Barrie, & Carey, 2014; Maya-Manzano, Fernández-Rodríguez, et al., 2017), analysing the meteorological variables which most influence variations in pollen concentrations (Rojo, Rapp, Lara, Fernández-González, & Pérez-Badía, 2015), and constructing models to predict both phenological parameters during the pollen season and daily or cumulative pollen concentrations (Silva-Palacios et al., 2016; Tseng, Kawashima, Kobayashi, Takeuchi, & Nakamura, 2018).

Platanus pollen has previously been studied from an aeropalynological point of view (Alcázar et al., 2011; Gabarra et al., 2002; Iglesias, Rodríguez-Rajo, & Méndez, 2007; Sánchez-Reyes, Rodríguez de la Cruz, Sanchís-Merino, & Sánchez-Sánchez, 2009). The allergenicity of this pollen has promoted the analysis of the relationship between pollen exposure and the symptoms for people allergic to this pollen type (Alcázar et al., 2004; Osborne et al., 2017; Ribeiro et al., 2009), as well as the study of the presence of *Platanus* pollen allergens in the atmosphere (Fernández-González et al., 2010; Fernández-González, Guedes, Abreu, & Rodríguez-Rajo, 2013; Sedghy et al., 2017). Besides, some authors have studied the abundance and distribution of plane trees in the cities and afterwards have related the results to the content of airborne pollen (García-Mozo, Oteros, & Galán, 2016; Maya-Manzano, Fernández-Rodríguez, et al., 2017; Maya-Manzano, Tormo Molina, et al., 2017).

From the point of view of long-term time series of *Platanus* pollen, Ruiz-Valenzuela and Aguilera (2018) studied the trend in airborne pollen and pollen season in relation with the trends of the climatic changes. Other studies have documented the effect of meteorological variables on the pollen content of the cities, including *Platanus* pollen as a relevant pollen type in the urban pollen spectrum (Alba & Díaz de la Guardia, 1998; Damialis, Gioulekas, Lazopoulou, Balafoutis, & Vokou, 2005; Aira, Rodríguez-Rajo, Fernández-González, & Jato, 2011; Rojo et al., 2015). Weather-based models for predicting the date of flowering of plane trees have previously been generated (Chuine, Cour, & Rousseau, 1999).

A number of published papers report on models to predict daily pollen levels for genera and species whose pollen is regarded as allergenic, such as grasses, Cupressaceae species and the olive tree (Fernández-Rodríguez et al., 2016a, 2016c; Silva-Palacios et al., 2016). The statistical techniques used to construct these models include linear regression, partial least squares (PLS) regression (Rojo, Rivero, Romero-Morte, Fernández-González, & Pérez-Badía, 2017), neural networks (Iglesias-Otero et al., 2015), classification trees (Pérez-Badía, Bouso, Rojo, Vaquero, & Sabariego, 2013), time-series analysis using ARIMA models (Rodríguez-Rajo et al., 2006), as well as other multivariate techniques (Voukantis et al., 2010). However, few prediction models have focussed on pollen concentrations from plane tree (Iglesias et al., 2007; Sabariego Ruiz, Gutiérrez Bustillo, & Cervigón Morales, 2008). As it has already mentioned, this pollen is a major source of allergens and these trees are widely grown as an ornamental species in Mediterranean parks, gardens and boulevards.

The aim of this study was to develop models to predict airborne *Platanus* pollen concentrations, and for these models to be applied as far in advance as possible. For this purpose, aerobiological data series was used in models which combined analysis of the long-term behaviour of the pollen curve with the prediction of daily variations in pollen levels as a function of meteorological variables (maximum temperature, minimum temperature, rainfall and relative humidity). Short- and long-term patterns of variation were identified using a decomposition procedure based on LOESS smoothing. This technique was applied to airborne *Platanus* pollen data for the city of Toledo (central Spain) recorded over a period of eleven years (2005–2015).

The results of these models can be incorporated into air quality

information systems in the cities. This information can be used to give allergy patients advanced warnings (Karatzas, 2009; Berger et al., 2013), so that they can begin preventive treatment and avoid urban green areas containing large number of plane trees during days on which high concentrations are expected.

2. Material and methods

2.1. Study area

The city of Toledo lies in the centre of the Iberian Peninsula (39° 51' N, 4° 02' W) at a mean altitude of 529 m above sea level. Given its location and historical importance, it receives several million tourists every year. It has a Mediterranean climate with continental influence. The annual mean temperature is 15.8 °C; January is the coldest month, with a mean temperature of 6.4 °C, and July the hottest (mean 26.8 °C). Mean annual rainfall is 342 mm, mainly concentrated in the periods April-May and November-December (AEMET, 2017). According to Rivas-Martínez et al. (2011), the bioclimate is classified as Mediterranean pluviseasonal-oceanic with a meso-Mediterranean thermotype and a dry ombroclimate, characterised by a marked water deficit.

The ornamental flora in Toledo's urban green areas comprises mainly elms (*Ulmus minor* Mill., *U. pumila* L.), nettle trees (*Celtis australis*), pines (*Pinus halepensis* Mill., *P. pinea* L.), cypresses (*Cupressus sempervirens* L., *C. arizonica* Greene), plane trees (*Platanus orientalis* L. var. *acerifolia* Dryand in Aiton), mulberry (*Morus alba* L., *M. nigra* L.), leguminous tree species (*Robinia pseudoacacia* L., *Gleditsia triacanthos* L., *Sophora japonica* L.), broad-leaf privets (*Ligustrum lucidum* Aiton) and even olive trees (*Olea europaea* L.); trees are often planted in stands and clumps, or lining streets and avenues. Toledo's parks and gardens also contain cedars (*Cedrus deodara* (D. Don) G. Don, *C. atlantica* (Endl.) Carrière) and various kinds of palms (*Trachycarpus fortunei* (Hook.) H.Wendl., *Phoenix canariensis* Chabaud), as well as other species (Lara et al., 2017).

The most important parks and gardens in Toledo are: the historical garden on the University Campus, with a surface area of 12.21 ha, the *Tres Culturas* park (9.56 ha), *Safont* park (8.56 ha), *La Vega* park (3.94 ha) and the *Circo Romano* park (2.65 ha) (Fig. 1). Plane trees account for between 8.3% and 20.7% of the total tree cover of these green areas, except for *La Vega* park, where they account for only 4.7% (Lara et al., 2017). Of all the trees growing in the city's green areas, this species – together with the Cupressaceae – has the greatest allergenic potential (Cariñanos, Casares-Porcel, & Quesada-Rubio, 2014).

2.2. Aerobiological data

Airborne *Platanus* pollen was collected daily throughout the period 2005–2015, using a Hirst-type volumetric trap (Hirst, 1952) installed at 17 m above ground level on the top of a building of the University of Castilla-La Mancha in Toledo. Sampling and pollen concentrations were carried out in accordance with the protocol developed by the Spanish Aerobiology Network (Galán, Cariñanos, Alcázar, & Domínguez, 2007). The aerobiological data series comprised daily pollen concentrations, expressed as the daily average number of pollen grains per cubic meter of air (pollen grains/m³). Pollen data were obtained for the period 2005–2015; data for eight years (2005–2012) were used for model calibration, while data for the remaining three years (2013–2015) were used for independent validation of models.

The pollen season start-date was calculated using the method recommended by García-Mozo et al. (1999) for other tree species: the start of the Main Pollen Season (MPS) was defined as the day on which 1 pollen grain/m³ was reached whenever 5 subsequent days recorded 1 or more pollen grains/m³.

Meteorological data were obtained from the Toledo city weather station, belonging to the Spanish Meteorological Agency (AEMET, 2017), located at a distance of 2.24 km from the pollen station and an

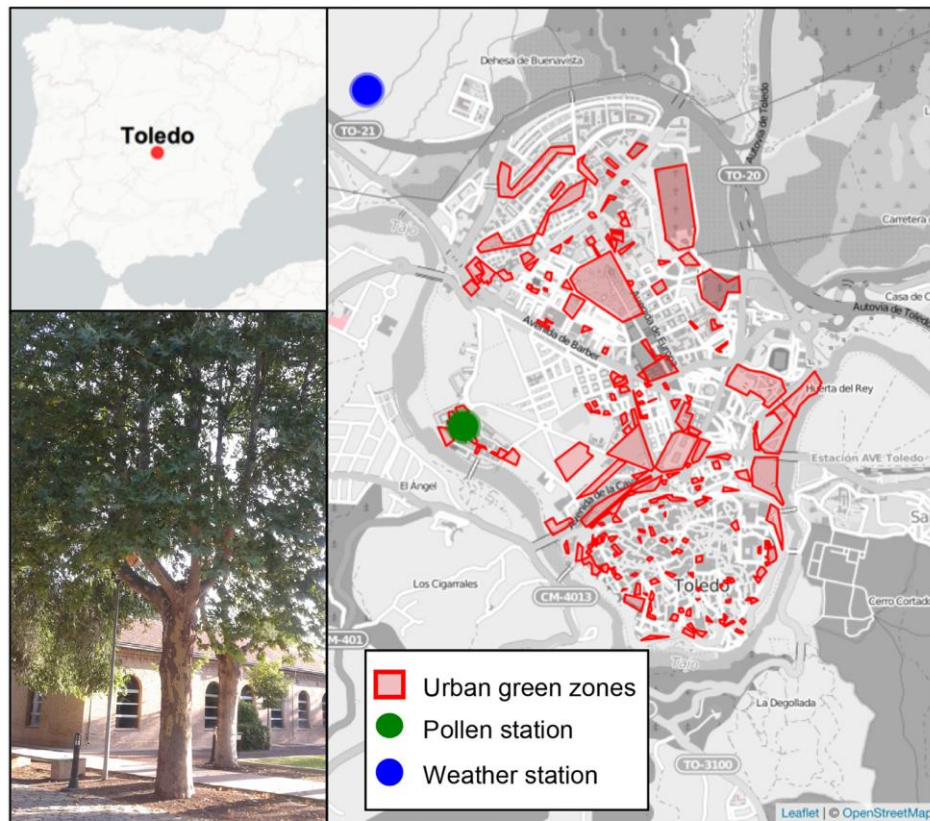


Fig. 1. Location of the study area (Toledo). Distribution of the urban green zones in the city with respect to the pollen and weather stations and plane tree photography. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

altitude of 515 m above sea level. The following meteorological variables were analysed: maximum temperature (°C), minimum temperature (°C), total daily rainfall (mm) and relative humidity (%).

The allergy thresholds used in this study were those recommended by Galán et al. (2007), which sets the “moderate risk” threshold for *Platanus* pollen at a daily concentration of 51–200 grains/m³ and the “high risk” threshold at over 200 pollen grains/m³.

2.3. Prediction models

2.3.1. Decomposition of the time series

The prediction method used here, previously outlined by Rojo et al. (2017), is based on the assumption that variation patterns (short- and long-term) in a pollen-data time series are governed by meteorological variables measured over different time scales (García-Mozo et al., 2014; Petropavlovskikh, Evans, McConville, Manney, & Rieder, 2015). These variation patterns are termed components within a time series. The components shaping medium- to long-term variations in behaviour patterns in the data series – seasonality and trend – determine the behaviour of the time series on a time scale greater than one year. Once these components have been removed from the time series, the resulting short-term variations (i.e. time scale less than one year) form the so-called “residual component” and may be linked to daily variations in meteorological variables (Rojo et al., 2017).

The relationship between the components of a time series can be modelled in various ways; the most common is the additive model, in which the data series results from the summation of the three components discussed above (Harvey & Peters, 1990):

$$Z_t = M_t + S_t + R_t \quad t = 1, \dots, T$$

where Z_t is the daily pollen count, i.e. the summation of the three components over the time period (t), M_t is trend, S_t is seasonality, and R_t the residual.

The first step in the development of prediction models involved decomposing the time series using a seasonal-trend decomposition procedure based on LOESS (STL). Pollen data used to construct the model were obtained for a 40-day period from the start of the pollen season for each year, since the analysis of data as a time series requires a constant periodicity (Brockwell & Davis, 1997). A 40-day period was the maximum period over which the highest pollen concentrations were recorded during the *Platanus* pollen season (accounting, on average, for 95% of total annual pollen; Table 1).

STL decomposition enables seasonality and trend to be extracted, thus isolating the residual component of the aerobiological data series. It is based on a sequence of smoothing procedures using a locally-weighted regression, commonly known as LOESS. The time-series is fitted iteratively until trend and seasonality stabilize, in a multi-step process in which moving averages alternate with LOESS smoothing (Cleveland, Cleveland, McRae, & Terpenning, 1990). Trend and seasonality obtained from the decomposition of data for the period 2005–2012 were used as repeated constant components for the prediction models. In order to define the period best fitted to the seasonality component, models were predicted for 1-year (model A) and 3-year periods (model B), with a view to achieving the best pattern-length for predicting daily pollen concentrations. The residual component was subsequently modelled using daily pollen-count data and meteorological data for the previous days, and was then added to the

Table 1
Characteristics of the *Platanus* Pollen Season. SD Standard Deviation. *Percentage of pollen with respect to the total.

Year	Start of the pollen season	Peak date	Peak value ± SD (pollen grains/m ³)	Total pollen grains ± SD	Pollen grains during the 40-days period considered* (%)	Number of days with allergy risk (high risk)
2005	21/03/2005	01/04/2005	402	2065	94.34	8(4)
2006	24/03/2006	04/04/2006	400	1903	99.69	11(2)
2007	12/03/2007	25/03/2007	292	2142	93.05	11(2)
2008	18/03/2008	30/03/2008	331	1843	96.23	9(2)
2009	15/03/2009	24/03/2009	273	1988	91.57	9(3)
2010	27/03/2010	05/04/2010	248	1361	97.01	8(2)
2011	20/03/2011	01/04/2011	645	2479	96.72	9(3)
2012	23/03/2012	01/04/2012	679	5053	98.83	14(11)
2013	28/03/2013	11/04/2013	282	1897	80.72	10(2)
2014	16/03/2014	01/04/2014	3710	7642	99.53	14(8)
2015	23/03/2015	01/04/2015	767	4355	99.20	13(7)
Mean	21-mar	01-abr	730 ± 1005	2975 ± 1922	95.17	11(4)

seasonality and trend components in order to generate the predicted data (2013–2015).

2.3.2. Modelling the residual component

Models to predict the residual component were developed by partial least squares regression (PLSR), using a nonlinear kernel algorithm and data for the period 2005–2012 (calibration data). The predictor variables used for modelling purposes were daily *Platanus* pollen concentrations and meteorological variables measured in the prior days (from 1 to 9 days prior to the day to be predicted). Models were constructed using three different prior periods: the predictor variables for the first model (1) were *Platanus* pollen concentrations, maximum and minimum temperature, total daily rainfall and relative humidity over the previous one, two and three days; for the second model (2), the prior period was extended to four, five and six days; for the third model (3), it was extended to seven, eight and nine days. The results of the calibration for all considered models (coefficient of determination R^2 , Root Mean Squared Error *RMSE* and Mean Absolute Error *MAE*) were compared.

Standardised regression coefficients and VIP (Variable Importance in Projection) values show, respectively, the degree of influence and the cumulative weighting of each variable included in the PLS regression models (Mehmood, Liland, Snipen, & Sæbø, 2012). The PLS regression models were performed using the “*plsdepot*” package (Sánchez, 2016) and R software (R Core Team, 2016).

2.3.3. Time series recomposition and model validation

As indicated earlier, data prediction models are obtained by adding the seasonality and trend components to the residual component obtained using daily meteorological data. Prediction models were validated using pollen concentrations data for 2013–2015 which have not been used for calibration purposes. Correlations between observed and predicted *Platanus* pollen concentrations were determined using the Spearman test and the Wilcoxon signed-rank test for paired samples.

Specifically, prediction models were obtained by combining the decomposition of 1-year (model A) and 3-year (model B) time series with the use of meteorological variables and pollen concentrations over the previous 1–3 days (model 1), 4–6 days (model 2) and 7–9 days (model 3). This gave rise to a total of 6 models (A1, A2, A3, B1, B2 and B3).

3. Results

The *Platanus* pollen season in Toledo generally started in the latter half of March, and the daily maximum concentration (peak day) tended to be recorded in late March or early April (Table 1). Pollen concentration on the peak day varied from year to year over the study period, the lowest value being recorded in 2010 (248 pollen grains/m³) and the highest by far in 2014 (3710 pollen grains/m³). Peak values in 2012 and 2015 (679 and 767 pollen grains/m³) were also considerably higher than those recorded in other study years. Regarding allergy risk to *Platanus* pollen, the number of days of risk allergy to *Platanus* pollen were 14 days in 2012 and 2014, 10 days in 2013 and 13 in 2015 (Table 1).

The pollen time series for *Platanus* pollen concentrations over the period 2005–2012 considering both 1-year and 3-year seasonal component are shown in Fig. 2. The decomposition procedure applied to the pollen time series showed that pollen daily data considering a 3-year period exhibited a clear cyclical pattern, two years of high concentrations followed by a third year of lower concentrations (Fig. 3B, seasonal + trend figure).

The calibration of prediction models carried out using a seasonal pattern of 1-year period (models A), showed that 47% of variance ($R^2 = 0.47$) was explained by predictor variables measured over the prior 3 days (model A1), or over the prior 7–9 days (model A3; Fig. 4). When the decomposition procedure was applied using a seasonal

Capítulo II. La predicción de las concentraciones de polen atmosférico de plátano de sombra, una herramienta para evaluar el riesgo de alergia de los espacios verdes urbanos

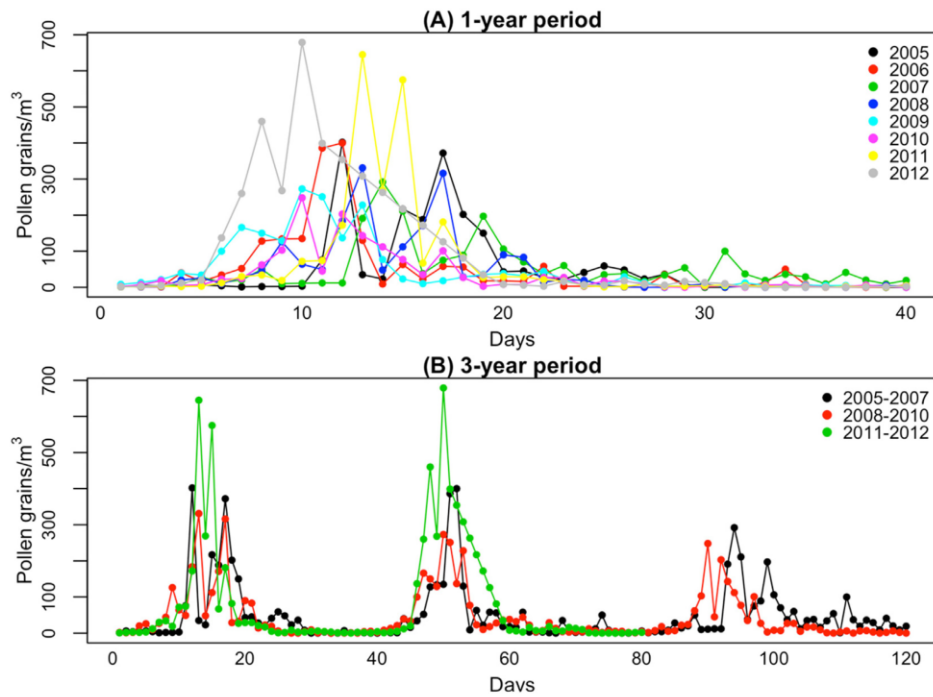


Fig. 2. Seasonal pattern of the *Platanus* pollen concentrations considering a one-year period (A) and a three-year period (B).

pattern of three-year periods (models B), prediction models displayed a considerably better fit, accounting in all cases for roughly 70% of the variation in *Platanus* pollen concentrations. RMSE and MAE values for the calibration of the prediction models are shown in Fig. 4.

The predictor variables included in the models (Fig. 5) mostly had the same sign regardless of the period used for decomposing the time series (1-year vs. 3-years). The most important variables in models A1 and B1 were *Platanus* pollen concentration and maximum temperature one day prior, for which a positive correlation was recorded. In model B1, besides this, a significant negative correlation was found for pollen

concentration and minimum temperature one day earlier. A negative correlation was also found for rainfall and relative humidity one day earlier, but both variables exerted positive influence over longer prior periods.

For models A2 and B2, the most influential variables were pollen concentration and minimum temperature over the previous 5–6 days. Here, relative humidity also had a positive effect on all prior days (Fig. 5). For models A3 and B3, prior pollen concentration had less effect than in the other models, the most influential variables being maximum and minimum temperature. In this model, based on a 7-day

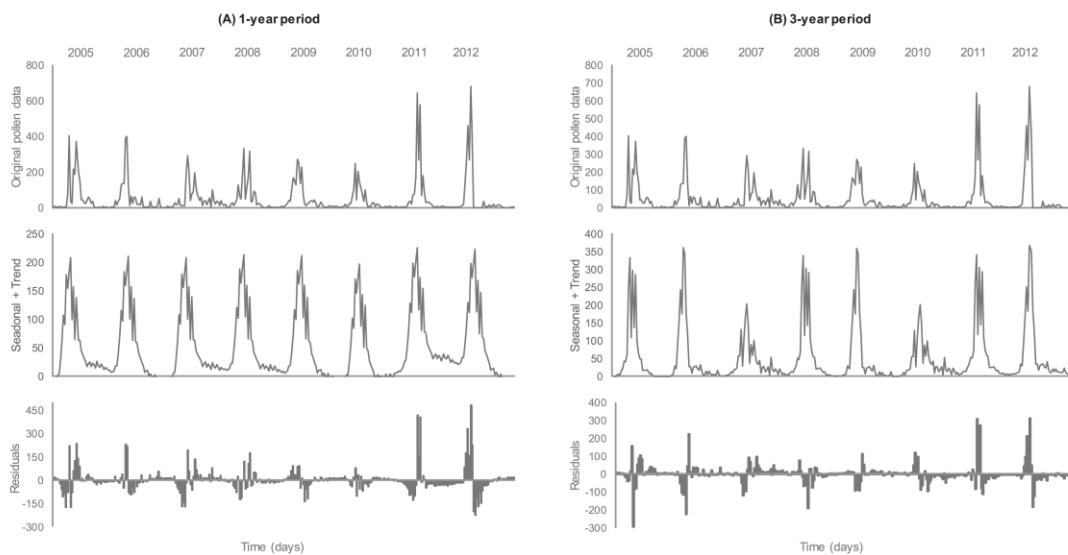


Fig. 3. Seasonal-trend decomposition of *Platanus* pollen time series for the period 2005–2012. (A) 1-year period. (B) 3-year period.

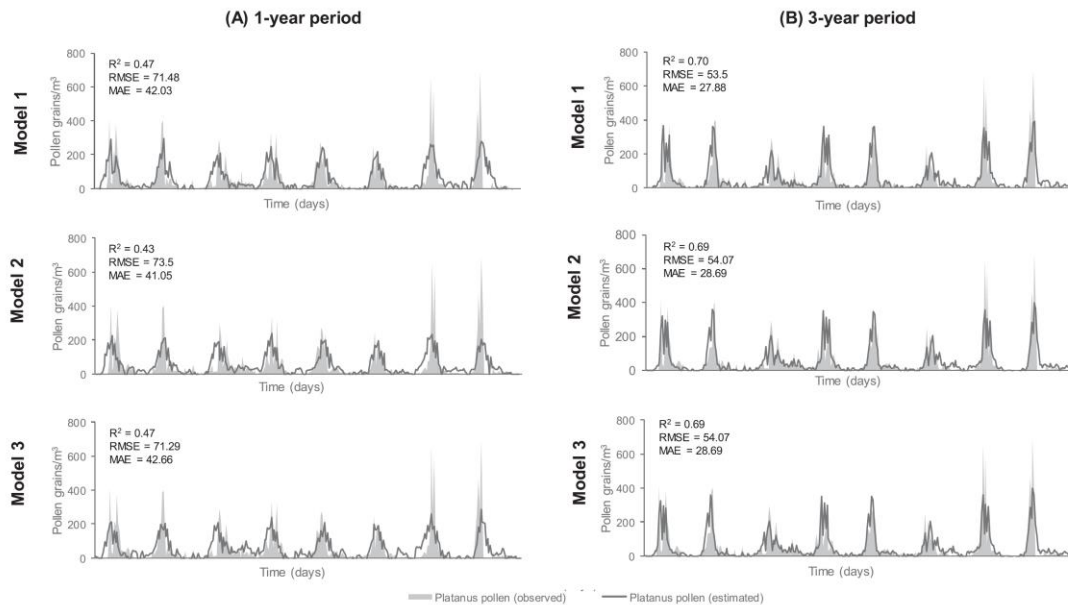


Fig. 4. Calibration of the models obtained by adding the deterministic component (seasonal + trend) to the estimated residual component during the period 2005–2012. (A) 1-year period models. (B) 3-year period models. The predictor variables considered for constructing the models were the following: data for the previous 1–3 days (Model 1), data for the previous 4–6 days (Model 2), data for the previous 7–9 days (Model 3). RMSE Root Mean Squared Error; MAE Mean Absolute Error.

prior period, both rainfall and relative humidity exerted greater influence, mainly positive (Fig. 5).

Results for the validation of all models using data for 2013–15 are shown in Fig. 6. Spearman's correlation test yielded a coefficient (R) of between 0.5 and 0.73, which was significant ($p < 0.01$) in all cases, suggesting a quite similar pattern of variation for observed and predicted pollen curves; the main pollen peaks also coincided. Wilcoxon's test showed no significant difference ($p > 0.05$) between observed and predicted data for each model, indicating that predicted values did not deviate significantly from observed values.

Of the models obtained by decomposition of the series for a 1-year period (models A), the best in terms of the correlation of observed and predicted values was also the model using predictive variables over the shortest "prior period", of 1–3 days (model A1, $R = 0.73$). In contrast, of the models constructed using a 3-year period (models B), the best correlation between observed and predicted values was obtained for the model using predictive variables over the longest "prior period", i.e. 7–9 days (model B3, $R = 0.68$).

4. Discussion

The *Platanus* pollen season is characterised by intense, explosive flowering, leading to high airborne pollen concentrations over a short period of time (González-Minero & Candau, 1997). The determination of the start-date of the pollen season using the method recommended by García-Mozo et al. (1999) is a useful means of identifying the right moment to apply prediction models. Other methods are not suitable because the start-date can only be accurately identified once the season is over (Andersen, 1991; Ribeiro, Cunha, & Abreu, 2007), and in that case predictions could not be made in real time.

Predictions were made for the first 40 days from the start of the pollen season for each year, thus enabling the seasonality of the series to be clearly defined and allowing the use of the most appropriate methods for analysing time series. The 40-day period covered virtually the whole pollen season; on average 95% of the year's pollen is recorded over that period. Obviously, the length of the pollen season

varies depending on the method used to define it (Jato et al., 2006; Kasprzyk, 2009).

The plane tree pollen season is short but intense, i.e., very elevated peaks are usually recorded in Toledo, since this species is mostly grown in the city in urban parks and gardens (Maya-Manzano, Fernández-Rodríguez, et al., 2017). This species is selected as ornamental plant because it is a rapidly growing species which has adapted well to a wide range of characteristic climate and soil conditions (Sánchez de Lorenzo and Cáceres, 2000), and it is remarkable for its resistance and good response to pruning, cutting and pollarding (García-Gómez, Pérez-Badía, & Moral-de Gregorio, 2015). The short plane tree pollen season contrasts with the long seasons reported for other pollen types including Poaceae and *Quercus*, which include pollen grains of various species whose geographical and ecological range is also highly-varied, leading to longer pollen seasons (García-Mozo et al., 2006; Puc & Wolski, 2013). Even within a single species such as *Olea*, the length of the pollen season may vary as a function of topographic gradient, which gives rise to staggered flowering (Aguilera & Ruiz-Valenzuela, 2012; Oteros et al., 2013).

Certain features of the pollen season such as length and presence of peak days are of considerable predictive value. The emission of pollen by a wide variety of grass species growing in different ecological environments, for example, gives rise to a long and complex pollen curve for Poaceae; the presence of numerous peaks corresponding to different sources of emission inevitably hinders prediction (Fernández-Rodríguez et al., 2016a; Rojo et al., 2017). Drawbacks to the prediction of daily *Platanus* pollen concentrations include the shortness of the pollen season, which considerably limits statistical potential (fewer cases), and the very sudden presence of elevated concentrations following low or moderate levels over the previous days.

Naturally, a prediction model using pollen concentrations over previous days as a variable will be unable to forecast a sudden, sharp increase in concentrations, particularly since peak levels may differ by an order of magnitude from those recorded on previous and following days. Anomalous (i.e. very elevated) peaks cannot easily be forecast by prediction models. Here, the peak pollen concentrations for 2014 were

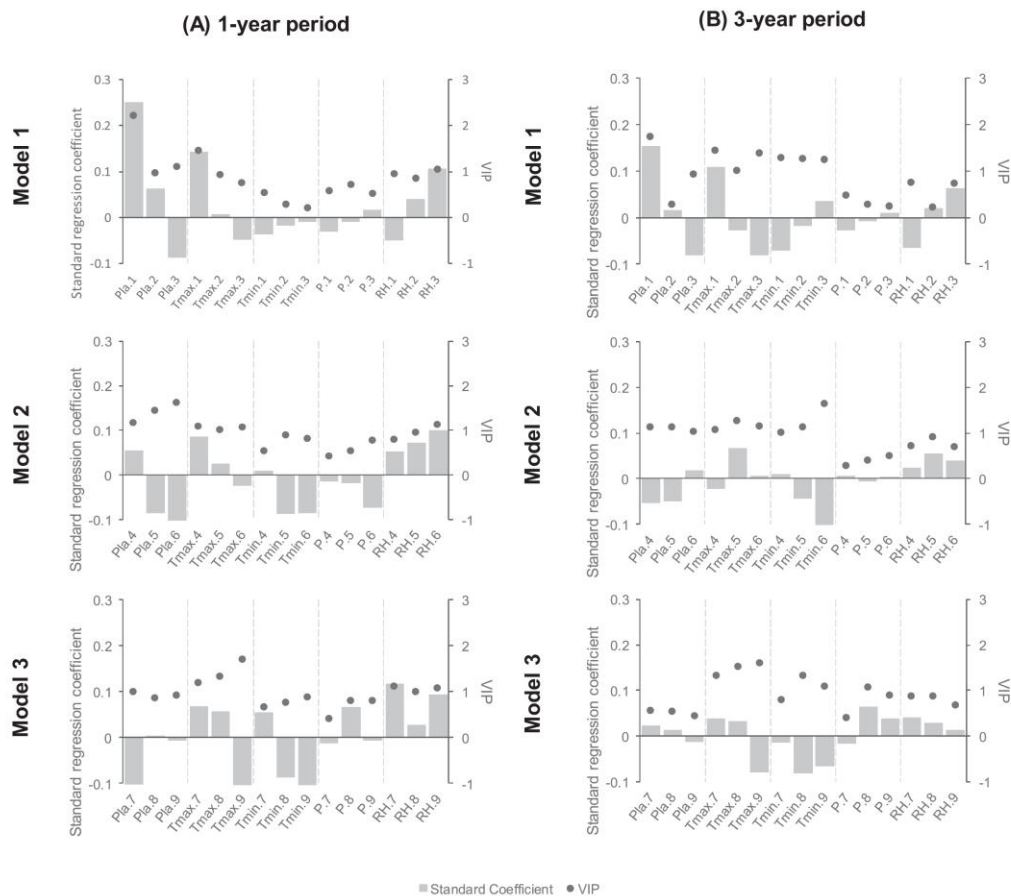


Fig. 5. Standard regression coefficients and Variable Importance in Projection (VIP) of the predictor variables considered for modeling of the residual component. (A) 1-year period models. (B) 3-year period models. The predictor variables considered for constructing the models were the following: data for the previous 1–3 days (Model 1), data for the previous 4–6 days (Model 2), data for the previous 7–9 days (Model 3). Predictors: *Pla* Platanus pollen concentrations, *Tmax* Maximum temperature, *Tmin* Minimum temperature, *P* Rainfall, *RH* Relative humidity.

1047 and 3710 pollen grains/m³ (2 and 3 April, respectively). These values were far higher than those observed over the prior 7 days, which ranged from 5 to 210 pollen grains/m³, and also higher than the peak concentration for other years. These constraints have also been reported in other studies (Pérez-Badia et al., 2013). Fernández-Rodríguez et al. (2016b) also attributed errors in forecasting *Quercus* pollen levels using prediction models to the marked difference in pollen levels on peak days compared to previous and following days.

Given these sudden variations in daily pollen concentrations, the advance forecasting of peaks in the pollen curve is a major objective of aerobiological modelling. Strikingly, the three models yielding the best external validation results (i.e. highest coefficients in the Spearman test) in the present study were the two obtained using data for predictive variables over a prior period of 1–3 days, and the model constructed using a 3-year cycle and predictive variables over a prior period 7–9 days. These models adequately identified pollen peaks, albeit in some cases underestimating them (due to the limitations noted above). Even so, predicted concentrations for peak days in all cases lay above the threshold of 200 pollen grains/m³, which is the level required for a large proportion of allergy patients to display symptoms; values exceeding that threshold trigger a maximum alert according to the Spanish Aerobiology Network (Galán et al., 2007). These prediction models are thus of proven value for identifying periods of allergy risk, enabling sensitised residents to be given early warning of upcoming

high *Platanus* pollen concentrations (Fernández-González et al., 2010).

The plane tree is widely grown as an ornamental in urban parks, gardens and boulevards both in Spain and elsewhere in the Mediterranean (Cariñanos et al., 2017). Pollen production varies as a function both of weather conditions and of human intervention, in terms of the management of urban tree masses. Over the study period, the *Platanus* time series displayed no significant trend which might need to be separately addressed. Studies in other Spanish cities have also failed to observe any overall trends in the annual pollen amounts for *Platanus* over time (Galán et al., 2016). Interestingly, however, pollen concentration on peak days were noticeably higher in some years than in others. A trend towards rising peak daily concentration has also been reported in other Spanish cities, including Córdoba (Alcázar et al., 2004). In Toledo, moreover, years with high peak *Platanus* pollen concentrations (2011, 2012, 2014 and 2015) were interspersed with low-peak years (2010 and 2013); pollen curve behaviour proved more irregular in the latter years of the study.

The data series analysed here fitted a 3-year cyclical pattern, in which two years of high concentrations were followed by a third year of lower concentrations. A 2-year cycle was reported earlier for the plane tree by González-Minero and Candau (1997), who attributed fluctuations to rainfall over the year. Here, the 3-year cyclical pattern observed may more likely be linked to management techniques such as periodical pruning of *Platanus orientalis* var. *acerifolia* tree stands in Toledo's urban

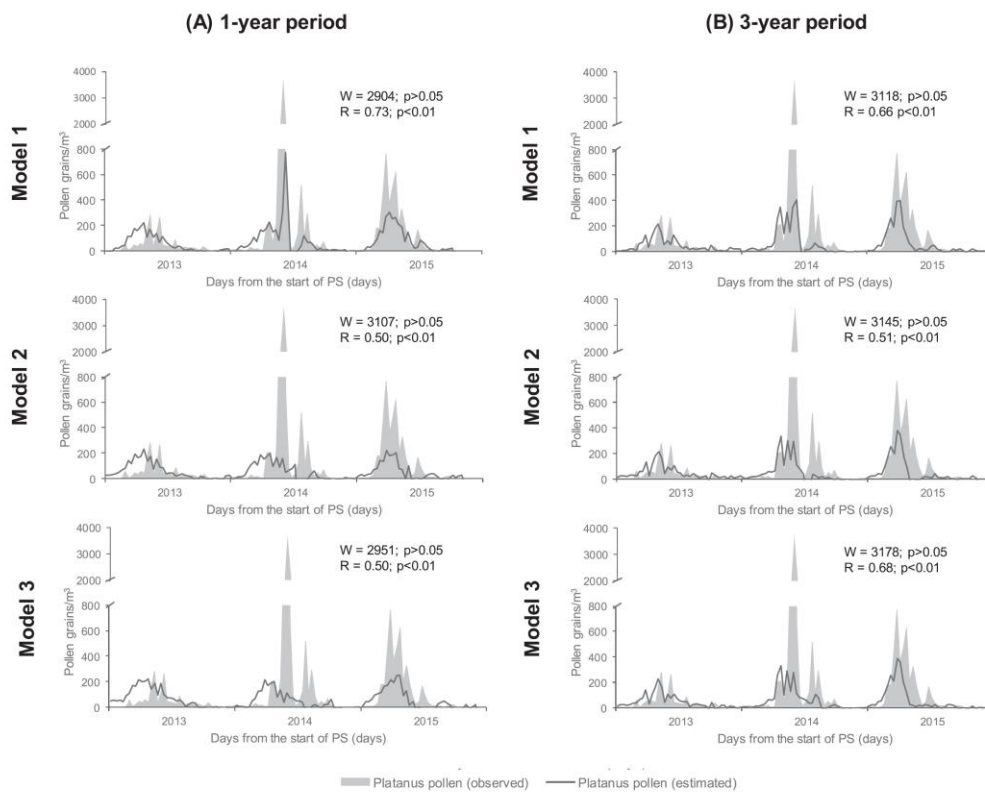


Fig. 6. External validation for the period (2013–2015). Estimated *Platanus* pollen concentrations obtained by adding the deterministic component (seasonal + trend) to the estimated residual component. *R* Spearman correlation coefficient. *W* Wilcoxon signed-rank statistic. (A) 1-year period models. (B) 3-year period models. The predictor variables considered for constructing the models were the following: data for the previous 1–3 days (Model 1), data for the previous 4–6 days (Model 2), data for the previous 7–9 days (Model 3). *PS* Pollen season.

green areas. Pruning, as a means of managing flower and fruit production in agricultural, forest and ornamental species (Alejano et al., 2008; Jianan, Zhiyun, Hua, Xiaoke, & Hong, 2007), may give rise to year-on-year variations in aerobiological records (Alcázar et al., 2004). In the case of the plane tree, the measure most widely recommended with a view to limiting the allergenic impact of pollen is pruning during the winter months, prior to flowering, which radically reduces the production and release of pollen grains (Cariñanos et al., 2017; García-Gómez et al., 2015).

The models calibrated using a three-year period displayed a better fit than those obtained with a 1-year period; in all cases, the variance explained was 20%–30% higher for 3-year models. Rojo et al. (2017) used the same methodology but based on 1-year period decomposition because grass pollen did not show any relevant periodicity as observed in this case for *Platanus*. Moreover, the coefficient of determination obtained for the model constructed using data for the longest prior period (predictor variables measured over the previous 7–9 days) was similar to that recorded for the model with the shortest prior period (1–3 days). This would suggest that calibration models based on a 3-year period are more stable, and enable the use of longer prior periods, without sacrificing goodness of fit. This highlights the importance of analysing time series of aerobiological data in order to improve forecasting by using known patterns which periodically repeat. Thus, the maximum amount of variance (60–70%) has been explained using predictor variables measured over the previous 7–9 days, while the previous researches used the pollen concentration of the previous or two previous days to achieve this variance for *Platanus* pollen (Iglesias et al., 2007; Sabariego Ruiz et al., 2008). Validation of the prediction

models showed that, while all the models could be classed as adequate in that they forecasted most peaks in the *Platanus* pollen curve, some models performed better than others in terms of accuracy, precision and scope for early warning.

The most influential meteorological variables in the prediction models obtained were maximum and minimum temperature, largely because plants with spring phenology display an intense response to temperature changes, and earlier-flowering species such as *Platanus* are more sensitive to this variable (Chuine et al., 1999). The influence of temperature on airborne *Platanus* pollen concentrations has also been reported in other areas of Spain, including Ourense and Cartagena (Rodríguez-Rajo et al., 2011; Fernández-González et al., 2013), Jaen (Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018) as well as Valladolid (Sánchez-Reyes et al., 2009). Temperature is therefore the meteorological variable most commonly included in *Platanus* prediction models, both where the start-date and duration of the pollen season is estimated (Alcázar et al., 2011; Iglesias et al., 2007) and where airborne pollen concentrations are estimated (Sabariego Ruiz et al., 2008).

The most significant effect on *Platanus* pollen concentrations was observed for maximum temperature one day earlier, which positively influenced pollen release (Dahl et al., 2013). When values for prior days were included, the influence of temperature proved more difficult to interpret (Iglesias et al., 2007), due to the need to take into account not only pollen emission at that time but also the effect of earlier temperatures on pollen dispersal as well as the time during which pollen grains are suspended in the air (Kuparinen, Katul, Nathan, & Schurr, 2009). Relative humidity and rainfall over the prior 1–2 days exerted an inverse influence, due to their negative impact on pollen release in the

Capítulo II. La predicción de las concentraciones de polen atmosférico de plátano de sombra, una herramienta para evaluar el riesgo de alergia de los espacios verdes urbanos

B. Lara, et al.

Landscape and Urban Planning 189 (2019) 285–295

anther (Cresti & Linskens, 2000; Rojo et al., 2015). Using a longer prior period, however, this effect varied, and the influence of these variables increased, reflecting their impact on airborne pollen dispersal and the transport of resuspended pollen (Jones & Harrison, 2004).

The results obtained here represent an important advance in the construction of prediction models, allowing pollen levels to be forecast up to one week in advance. In earlier studies of *Platanus* (Sabariego Ruiz et al., 2008), *Cupressus* (Silva-Palacios et al., 2016) and *Olea* pollen (Fernández-Rodríguez et al., 2016c), predictions were possible only three days in advance. In future research, forecasting could be fine-tuned using other models to predict the pollen season start-date or predicting the total amount of pollen recorded over the pollen season (Tseng et al., 2018), in order to better understand other aspects of plane tree pollen emission in urban green areas. The present results allow high pollen levels to be forecasted in advance, so that allergy patients can be given early warning of forthcoming periods during which it would be advisable to avoid areas of the city in which plane tree is abundant.

5. Conclusions

The best prediction model enabled *Platanus* pollen concentrations to be forecasted one week in advance, and for this reason it was a relevant contribution for forecasting daily pollen concentrations. Use of a cyclical pattern, in this case a 3-year period – possibly linked to the periodical pruning of this ornamental species – improved goodness of fit and enabled concentrations to be predicted earlier. Using this model, allergy patients could be given early warning of forthcoming high pollen concentrations associated with greater allergy risk, enabling them to take preventive measures before a sudden, sharp increase in pollen concentrations characteristic of the plane tree. These results highlight the need for extensive, complete historical data series on airborne pollen concentrations.

This statistical methodology is appropriate to be applied to generate prediction models for the most abundant pollen types in the atmosphere of other cities. However, the weight of each predictor variable in the model can be different for different places as well as the periodic pattern observed in the time-series, therefore the calibration phase of the models must be independently conducted. Likewise, the method used here could be applied to other urban scenarios as pollen types coming from other important ornamental species such as Cupressaceae species very commonly used in the Mediterranean cities, or Betulaceae species used also in green zones besides being important wild species in cities under temperate climate.

Acknowledgements

This study was supported by the “Consejería de Agricultura, Medio Ambiente y Desarrollo Rural” of the Castilla-La Mancha Regional Government, and by the University of Castilla-La Mancha through the “Plan Propio de I + D + I”. The authors are grateful to all the members of the Castilla-La Mancha Aerobiology Network (AEROCAM) for their contributions during the implementation of the present study, and thank to the Castilla-La Mancha Regional Government for a research staff training grant to the lead author of this paper.

References

Adinolfi, C., Suárez-Cáceres, G. P., & Cariñanos, P. (2014). Relation between visitors' behaviour and characteristics of green spaces in the city of Granada, south-eastern Spain. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), 534–542. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.007>.

AEMET. (2017). Guía resumida del clima en España 1981-2010. Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Retrieved from www.aemet.es.

Aguilera, F., & Ruiz-Valenzuela, L. (2012). Altitudinal fluctuations in the olive pollen emission: An approximation from the olive groves of the south-east Iberian Peninsula. *Aerobiología*, 28(3), 403–411. <https://doi.org/10.1007/s10453-011-9244-9>.

Aira, M. J., Rodríguez-Rajo, F. J., Fernández-González, M., & Jato, V. (2011). Airborne

pollen of ornamental tree species in the NW of Spain. *Environmental Monitoring and Assessment*, 173(1–4), 765–775. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1421-8>.

Alba, G., & Díaz de la Guardia, C. (1998). The effect of air temperature on the starting dates of the Ulmus, Platanus and Olea pollen season in the SE Iberian Peninsula. *Aerobiología*, 14, 191–194. <http://www.scopus.com/scopus/inward/record.url?eid=2-s2.0-0031772134&partnerID=40&rel=R6.5.0>.

Alcázar, P., Cariñanos, P., De Castro, C., Guerra, F., Moreno, C., Domínguez-Vilches, E., & Galán, C. (2004). Airborne plane-tree (*Platanus hispanica*) pollen distribution in the city of Córdoba, South-western Spain, and possible implications on pollen allergy. *Journal of Investigational Allergology & Clinical Immunology*, 14(3), 238–243. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15552719>.

Alcázar, P., García-Mozo, H., Trigo, M. D. M., Ruiz, L., González-Minero, F. J., Hidalgo, P., ... Galán, C. (2011). Platanus pollen season in Andalusia (southern Spain): Trends and modeling. *Journal of Environmental Monitoring*, 13, 2502–2510. <https://doi.org/10.1039/c1em10355e>.

Alejano, R., Tapias, R., Fernández, M., Torres, E., Alaejos, J., & Domingo, J. (2008). Influence of pruning and the climatic conditions on acorn production in holm oak (*Quercus ilex* L.) dehesas in SW Spain. *Annals of Forest Science*, 65(2), <https://doi.org/10.1051/forest:2007092> 209–209.

Andersen, T. B. (1991). A model to predict the beginning of the pollen season. *Grana*, 30(1), 269–275. <https://doi.org/10.1080/00173139109427810>.

Berger, U., Karatzas, K., Jaeger, S., Voukantsis, D., Sofiev, M., Brandt, O., ... Bergmann, K. C. (2013). Personalized pollen-related symptom-forecast information services for allergic rhinitis patients in Europe. *Allergy*, 68(8), 963–965. <https://doi.org/10.1111/all.12181>.

Brockwell, P. J., & Davis, R. A. (1997). Introduction to time series and forecasting. *Technometrics*, 39(4), 426. <https://doi.org/10.2307/1271510>.

Cariñanos, P., & Casares-Porcel, M. (2011). Urban green zones and related pollen allergy: A review. Some guidelines for designing spaces with low allergy impact. *Landscape and Urban Planning*, 101(3), 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.006>.

Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., Díaz de la Guardia, C., Aira, M. J., Belmonte, J., Boi, M., ... Vega Maray, A. M. (2017). Assessing allergenicity in urban parks: A nature-based solution to reduce the impact on public health. *Environmental Research*, 155(September 2016), 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.02.015>.

Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., & Quesada-Rubio, J. M. (2014). Estimating the allergenic potential of urban green spaces: A case-study in Granada, Spain. *Landscape and Urban Planning*, 123, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.009>.

Chuine, I., Cour, P., & Rousseau, D. D. (1999). Selecting models to predict the timing of flowering of temperate trees: Implications for tree phenology modelling. *Plant, Cell and Environment*, 22, 1–13. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00395.x>.

Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E., & Terpenning, I. (1990). A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*.

Cresti, M., & Linskens, H. F. (2000). Pollen-allergy as an ecological phenomenon: A review. *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 134(3), 341–352. <https://doi.org/10.1080/11263500012331350495>.

D'Amato, G., Cecchi, L., Bonini, S., Nunes, C., Annesi-Maesano, I., Behrendt, H., & van Cauwenberge, P. (2007). Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy*, 62(9), 976–990. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2007.01393.x>.

Dahl, Å., Galán, C., Hajkova, L., Pauling, A., Sikoparija, B., Smith, M., & Vokou, D. (2013). The onset, course and intensity of the pollen season. In M. Sofiev, & K. C. Bergmann (Eds.), *Allergenic Pollen* (pp. 29–70). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4881-1_3.

Damialis, A., Gioulekas, D., Lazopoulou, C., Balafoutis, C., & Vokou, D. (2005). Transport of airborne pollen into the city of Thessaloniki: The effects of wind direction, speed and persistence. *International Journal of Biometeorology*, 49(3), 139–145. <https://doi.org/10.1007/s00484-004-0229-z>.

Díaz de la Guardia, C., Sabariego, S., Alba, F., Ruiz, L., García Mozo, H., Toro Gil, F. J., ... Cervigón, P. (1999). Aeropalynological study of the genus platanus L. in the Iberian peninsula. *Polen*, 10, 89–97. <http://hdl.handle.net/10396/11246>.

Enrique, E., Cisteró-Bahíma, A., Bartolomé, B., Alonso, R., San Miguel-Moncín, M., Bartra, J., & Martínez, A. (2002). Platanus acerifolia pollinosis and food allergy. *Allergy*, 57(4), 351–356. <https://doi.org/10.1034/j.1398-9995.2002.1s3509.x>.

Fernández-González, D., González-Parrado, Z., Vega-Maray, A. M., Valencia-Barrera, R. M., Camazón-Izquierdo, B., De Nuntius, P., & Mandrioli, P. (2010). Platanus pollen allergen, Pla a 1: Quantification in the atmosphere and influence on a sensitizing population. *Clinical & Experimental Allergy*, 40(11), 1701–1708. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2010.03595.x>.

Fernández-González, M., Guedes, A., Abreu, I., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2013). Pla a 1 aeroallergen immunodetection related to the airborne Platanus pollen content. *Science of The Total Environment*, 463–464, 855–860. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.062>.

Fernández-Llamazares, Á., Belmonte, J., Boada, M., & Fraixedas, S. (2014). Airborne pollen records and their potential applications to the conservation of biodiversity. *Aerobiología*, 30, 111–122. <https://doi.org/10.1007/s10453-013-9320-4>.

Fernández-Rodríguez, S., Durán-Barroso, P., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J. M., & Gonzalo-Garijo, Á. (2016a). Forecast model of allergenic hazard using trends of Poaceae airborne pollen over an urban area in SW Iberian Peninsula (Europe). *Natural Hazards*, 84(1), 121–137. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2411-0>.

Fernández-Rodríguez, S., Durán-Barroso, P., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J. M., & Gonzalo-Garijo, Á. (2016b). Quercus long-term pollen season trends in the southwest of the Iberian Peninsula. *Process Safety and Environmental Protection*, 101, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.11.008>.

Fernández-Rodríguez, S., Durán-Barroso, P., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J. M., & Gonzalo-Garijo, Á. (2016c). Regional forecast model for the Olea

Capítulo II. La predicción de las concentraciones de polen atmosférico de plátano de sombra, una herramienta para evaluar el riesgo de alergia de los espacios verdes urbanos

B. Lara, et al.

Landscape and Urban Planning 189 (2019) 285–295

- pollen season in Extremadura (SW Spain). *International Journal of Biometeorology*, 60(10), 1509–1517. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1141-z>.
- Gabarra, E., Belmonte, J., & Canela, M. (2002). Aerobiological behaviour of *Platanus L.* pollen in Catalonia (North-East Spain). *Aerobiologia*, 18(3–4), 185–193. <https://doi.org/10.1023/A:1021370724043>.
- Galán, C., Alcázar, P., Oteros, J., García-Mozo, H., Aira, M. J., Belmonte, J., ... Domínguez-Vilches, E. (2016). Airborne pollen trends in the Iberian Peninsula. *Science of The Total Environment*, 550, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.069>.
- Galán, C., Cariñanos, P., Alcázar, P., & Domínguez, E. (2007). *Manual de calidad y gestión de la Red Española de Aerobiología*. Córdoba: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba.
- García-Gómez, E., Pérez-Badía, R., & Moral-de Gregorio, Á. (2015). El plátano como árbol de sombra. *La Cultura Del Árbol*, 70, 29–35.
- García-Mozo, H. (2011). The use of aerobiological data on agronomical studies. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 18, 1–6. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9515.1992.tb00383.x>.
- García-Mozo, H., Galán, C., Cariñanos, P., Alcázar, P., Méndez, J., Vendrell, M., ... Domínguez, E. (1999). Variations in the *Quercus sp.* pollen season at selected sites in Spain. *Polen*, 10, 59–69.
- García-Mozo, H., Galán, C., Jato, V., Belmonte, J., Díaz de la Guardia, C., Fernández, D., ... Domínguez-Vilches, E. (2006). *Quercus* pollen season dynamic in the Iberian Peninsula: Response to meteorological parameters and possible consequences of climate change. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 13, 209–224. <https://doi.org/10.1089/rej.2015.1684>.
- García-Mozo, H., Oteros, J. A., & Galán, C. (2016). Impact of land cover changes and climate on the main airborne pollen types in Southern Spain. *Science of The Total Environment*, 548–549, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.005>.
- García-Mozo, H., Yaezel, L., Oteros, J., & Galán, C. (2014). Statistical approach to the analysis of olive long-term pollen season trends in southern Spain. *Science of The Total Environment*, 473–474, 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.142>.
- González-Minero, F. J., & Candau, P. (1997). Study on *Platanus hispanica* Miller pollen content in the air of Seville, southern Spain. *Aerobiologia*, 13, 109–115. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02694426.pdf>.
- Harvey, A. C., & Peters, S. (1990). Estimation procedures for structural time series models. *Journal of Forecasting*, 9(2), 89–108. <https://doi.org/10.1002/for.3980090203>.
- Hirst, J. M. (1952). An automatic volumetric spore trap. *Annals of Applied Biology*, 39, 527–1265.
- Iglesias-Otero, M. A., Fernández-González, M., Rodríguez-Caride, D., Astray, G., Mejuto, J. C., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2015). A model to forecast the risk periods of *Plantago* pollen allergy by using the ANN methodology. *Aerobiologia*, 31(2), 201–211. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9357-z>.
- Iglesias, I., Rodríguez-Rajo, F. J., & Méndez, J. (2007). Behavior of *Platanus hispanica* pollen, an important spring aeroallergen in northwestern Spain. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 17(3), 145–156.
- Jato, V., Rodríguez-Rajo, F. J., Alcázar, P., De Nuntis, P., Galán, C., & Mandrioli, P. (2006). May the definition of pollen season influence aerobiological results? *Aerobiologia*, 22, 13–25. <https://doi.org/10.1007/s10453-005-9011-x>.
- Jianan, X., Zhiyun, O., Hua, Z., Xiaoke, W., & Hong, M. (2007). Allergenic pollen plants and their influential factors in urban areas. *Acta Ecologica Sinica*, 27(9), 3820–3827. [https://doi.org/10.1016/S1872-2032\(07\)60082-1](https://doi.org/10.1016/S1872-2032(07)60082-1).
- Jones, A. M., & Harrison, R. M. (2004). The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations—a review. *Science of The Total Environment*, 326(1–3), 151–180. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.11.021>.
- Karatzas, K. D. (2009). Informing the public about atmospheric quality: Air pollution and pollen. *Allergo Journal*, 18(3), 212–217. <https://doi.org/10.1007/BF03362059>.
- Kasprzyk, I. (2009). Forecasting the start of *Quercus* pollen season using several methods – The evaluation of their efficiency. *International Journal of Biometeorology*, 53, 345–353. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0221-8>.
- Katz, D. S. W., Connor Barrie, B. T., & Carey, T. S. (2014). Urban ragweed populations in vacant lots: An ecological perspective on management. *Urban Forestry and Urban Greening*, 13(4), 756–760. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.06.001>.
- Kuparinen, A., Katul, G., Nathan, R., & Schurr, F. M. (2009). Increases in air temperature can promote wind-driven dispersal and spread of plants. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1670), 3081–3087. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.0693>.
- Lara, B., Rojo, J., Blanco, J. J., Cardador, C., Serrano, J. I., Soriano, D., & Pérez-Badía, R. (2017). Flora ornamental y potencial alergénico de los espacios verdes urbanos. Comparativa en parques de la ciudad de Toledo. Ornamental Flora and Allergenic Potential in Urban Green Spaces. Comparison in Parks of the Town of Toledo. *Revista de Salud Ambiental*, 17(2), 176–186.
- López-González, G. (2007). *Guía de árboles y arbustos de la Península Ibérica y Baleares (3ª edición)*. Madrid: Mundiprensa.
- Maya-Manzano, J. M., Fernández-Rodríguez, S., Monroy-Colín, A., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., & Gonzalo-Garjón, Á. (2017). Allergenic pollen of ornamental plane trees in a Mediterranean environment and urban planning as a prevention tool. *Urban Forestry & Urban Greening*, 27, 352–362. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.09.009>.
- Maya-Manzano, J. M., Tormo-Molina, R., Fernández-Rodríguez, S., Silva-Palacios, I., & Gonzalo-Garjón, Á. (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>.
- Mehmoed, T., Liland, K. H., Snipen, L., & Sæbø, S. (2012). A review of variable selection methods in Partial Least Squares Regression. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 118, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2012.07.010>.
- Moral-de Gregorio, Á., Senent-Sánchez, C. J., García-Gómez, E., & Pérez-Badía, R. (2016). *Manual de Alergopatología. Plantas. Pólenes y Proteína*. Madrid: Diater. Retrieved from <https://www.actasanitaria.com/manual-aleropatologia-plantas-polenes-proteina/>.
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M., & Pasher, J. (2018). Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.10.019>.
- Osborne, N. J., Alcock, I., Wheeler, B. W., Hajat, S., Sarran, C., Clewlow, Y., ... Fleming, L. E. (2017). Pollen exposure and hospitalization due to asthma exacerbations: Daily time series in a European city. *International Journal of Biometeorology*, 61, 1837–1848. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1369-2>.
- Oteros, J., García-Mozo, H., Vázquez, L., Mestre, A., Domínguez-Vilches, E., & Galán, C. (2013). Modelling olive phenological response to weather and topography. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 179, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.07.008>.
- Pérez-Badía, R., Bouso, V., Rojo, J., Vaquero, C., & Sabariego, S. (2013). Dynamics and behaviour of airborne *Quercus* pollen in central Iberian Peninsula. *Aerobiologia*, 29(3), 419–428. <https://doi.org/10.1007/s10453-013-9294-2>.
- 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://doi.org/10.1089/rej.2015.1684>.
- Petropavlovskikh, I., Evans, R., McConville, G., Manney, G. L., & Rieder, H. E. (2015). The influence of the North Atlantic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation on mean and extreme values of column ozone over the United States. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(3), 1585–1598. <https://doi.org/10.5194/acp-15-1585-2015>.
- Puc, M., & Wolski, T. (2013). Forecasting of the selected features of *Poaacea* (R. Br.) Barnh., *Artemisia L.* and *Ambrosia L.* pollen season in Szczecin, North-Western Poland, using Gumbel's distribution. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 20(1), 36–47.
- Puiggròs, A., Muñoz-Cano, R., Roger, R. A., Raga, E., Belmonte, J., & Valero, A. (2015). Prevalence of sensitization to pollen from trees planted in Barcelona city. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 25(2), 133–162. <http://www.jiacci.org/summary/vol25-issue2-num1217>.
- R Core Team (2016). *A language and environment for statistical computing and graphics*. R Foundation for Statistical Computing.
- Ribeiro, H., Cunha, M., & Abreu, I. (2007). Definition of main pollen season using a logistic model. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 14, 259–264.
- Ribeiro, H., Oliveira, M., Ribeiro, N., Cruz, A., Ferreira, A., Machado, H., ... Abreu, I. (2009). Pollen allergenic potential nature of some trees species: A multidisciplinary approach using aerobiological, immunochemical and hospital admissions data. *Environmental Research*, 109(3), 328–333. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.11.008>.
- Rivas-Martínez, S., Aguiar, C., Aguilera, A., Alonso, R., Alvarez, M., Amich, F., ... Bartolome, C. (2011). Map of series, geoseries and geomaseries of vegetation in Spain. *Itineraria Geobotanica*, 18(II), 1–764.
- Roche Afonso, M. L. (1990). *Platanus L.* In S. Castroviejo, M. Laínz, G. López-González, P. Montserrat, F. Muñoz Garmendia, J. Paiva, & L. Villar (Eds.). *Flora iberica*. Madrid: Real Jardín Botánico, CSIC.
- Rodríguez-Rajo, F. J., Jato, V., González-Parrado, Z., Elvira-Rendueles, B., Moreno-Grau, S., Vega-Maray, A., ... Suárez-Cervera, M. (2011). The combination of airborne pollen and allergen quantification to reliably assess the real pollenosis risk in different bioclimatic areas. *Aerobiologia*, 27, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10453-010-9170-2>.
- Rodríguez-Rajo, F. J., Valencia-Barrera, R. M., Vega-Maray, A. M., Suárez, F. J., Fernández-González, D., & Jato, V. (2006). Prediction of airborne *Alnus* pollen concentration by using ARIMA models. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 13, 25–32. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16841868>.
- 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. *Science of The Total Environment*, 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. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 130. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5129-2>.
- Rojo, J., Rivero, R., Romero-Morte, J., Fernández-González, F., & Pérez-Badía, R. (2017). Modeling pollen time series using seasonal-trend decomposition procedure based on LOESS smoothing. *International Journal of Biometeorology*, 61(2), 335–348. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1215-y>.
- Ruiz-Valenzuela, L., & Aguilera, F. (2018). Trends in airborne pollen and pollen-season-related features of anemophilous species in Jaen (south Spain): A 23-year perspective. *Atmospheric Environment*, 180, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.012>.
- Sabariego Ruiz, S., Gutiérrez Bustillo, A. M., & Cervigón Morales, P. (2008). Forecasting airborne *Platanus* pollen in the Madrid region. *Graça*, 47(3), 234–240. <https://doi.org/10.1080/00173130802218574>.
- Sánchez-Reyes, E., Rodríguez de la Cruz, D., Sanchís-Merino, M. E., & Sánchez-Sánchez, J. (2009). First results of *Platanus* pollen airborne content in the middle-west of the Iberian Peninsula. *Aerobiologia*, 25, 209–215. <https://doi.org/10.1007/s10453-009-9126-6>.
- Sánchez de Lorenzo Cáceres, J. M. (2000). *Flora ornamental Española. Las plantas cultivadas en la España peninsular e insular. Tomo I. Magnoliaceae a Casuarinaceae*. Spain: Artes Gráficas Novograf, S.A.
- Sánchez, G. (2016). The plsdepot package: partial least squares (PLS) data analysis methods. Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/plsdepot/>

Capítulo II. La predicción de las concentraciones de polen atmosférico de plátano de sombra, una herramienta para evaluar el riesgo de alergia de los espacios verdes urbanos

B. Lara, et al.

Landscape and Urban Planning 189 (2019) 285–295

- [plsdepot.pdf](#).
- Sedghy, F., Sankian, M., Moghadam, M., Ghasemi, Z., Mahmoudi, M., & Varasteh, A.-R. (2017). Impact of traffic-related air pollution on the expression of *Platanus orientalis* pollen allergens. *International Journal of Biometeorology*, 61(1), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1186-z>.
- Silva-Palacios, I., Fernández-Rodríguez, S., Durán-Barroso, P., Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J. M., & Gonzalo-Garijo, Á. (2016). Temporal modelling and forecasting of the airborne pollen of Cupressaceae on the southwestern Iberian Peninsula. *International Journal of Biometeorology*, 60, 297–306. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1026-6>.
- Subiza Garrido-Lestache, F. J., Pola Pola, J., Feo Brito, F., & Moral de Gregorio, A. J. (2007). Pólenes de interés en alergología en nuestro medio. *Tratado de Alergología*, 15, 425–447.
- Tseng, Y.-T., Kawashima, S., Kobayashi, S., Takeuchi, S., & Nakamura, K. (2018). Algorithm for forecasting the total amount of airborne birch pollen from meteorological conditions of previous years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.021>.
- Varela, S., Subiza, J., Subiza, J. L., Rodríguez, R., García, B., Jerez, M., ... Panzani, R. (1997). Platanus pollen as an important cause of pollinosis. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 100, 748–754. [https://doi.org/10.1016/S0091-6749\(97\)70268-9](https://doi.org/10.1016/S0091-6749(97)70268-9).
- Voukantsis, D., Niska, H., Karatzas, K., Riga, M., Damialis, A., & Vokou, D. (2010). Forecasting daily pollen concentrations using data-driven modeling methods in Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Environment*, 44, 5101–5111. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.006>.

6. Capítulo III. Patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

Capítulo III. Patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

Resumen

Las redes de vigilancia de la calidad biológica del aire que monitorizan polen y esporas representan una herramienta muy importante para la caracterización de los periodos de riesgo de exposición a los principales aeroalérgenos. Para apoyar la eficacia de estas redes se analiza la correspondencia entre la concentración atmosférica de granos de polen de tres tipos polínicos de gran interés alérgico en la península Ibérica como son *Platanus*, *Poaceae* y *Olea* y sus alérgenos principales, Pla a 1, Phl p 1, Phl p 5 y Ole e 1, respectivamente. Este estudio se ha llevado a cabo en dos ciudades de la península Ibérica, Toledo en España y Évora en Portugal. Los resultados indican en general una adecuada correspondencia entre las concentraciones de polen y alérgenos con una correlación significativa ($R = 0,65$; $p < 0,05$ en todos los casos). Se concluye que los sistemas de alerta sanitaria que emiten las redes de vigilancia son efectivos empleando los niveles de concentración de polen alérgico como índice de riesgo. Además, los resultados de este trabajo permiten interpretar las medidas de discordancia entre la relación alérgeno y polen, basados en el estudio de los patrones de variables meteorológicas observadas con varios días de antelación al registro de polen y alérgeno. Los tipos polínicos estudiados han mostrado diferentes respuestas en cuanto a la influencia de la humedad relativa y temperatura que se atribuyen a la incidencia de estas variables meteorológicas sobre las distintas fases del proceso aerobiológico. En concreto, la carga alérgica del plátano de sombra se relacionó de manera positiva con la humedad relativa en los días inmediatamente previos al registro de partículas. Sin embargo, la relación polen-alérgeno fue más dependiente de las variables meteorológicas durante los 4-6 días previos, asociadas al proceso de emisión y dispersión, en un polen de gran capacidad dispersiva como es el del olivo.

1. Introducción

Los aeroalérgenos inhalados procedentes de polen y esporas son la principal causa de enfermedades alérgicas (Lake et al., 2017). Más de un cuarto de la población de países industrializados sufre algún tipo de alergia según la European Academy of Allergy and Clinical Immunology (European Academy of Allergy and Clinical & Immunology, 2015). Además, la incidencia de enfermedades respiratorias relacionadas con reacciones alérgicas se ha incrementado durante las últimas décadas y sigue mostrando una tendencia creciente (Barnes, 2018; Cecchi et al., 2010; Reinmuth-Selzle et al., 2017), lo que ha provocado que la alergia sea considerada como un principal problema de salud pública para la Organización Mundial de la Salud (Pawankar, Walter Canonica, Holgate, Lockey, & Blaiss, 2013).

Las redes de vigilancia de la calidad biológica del aire representan una herramienta muy importante para caracterizar los periodos de riesgo de exposición a los principales aeroalérgenos por parte de la población alérgica (Karatzas, 2009; Pérez-Badia et al., 2010). Sin embargo, debido a que la cuantificación de proteínas alérgicas en el aire resulta muy laboriosa desde el punto

de vista metodológico y costosa en términos económicos, la concentración de polen y esporas se ha empleado como medida indirecta de riesgo alérgico (Pfaar et al., 2019). Como consecuencia, desde finales del siglo XX las estaciones de monitorización de polen y esporas se han extendido por todo el mundo (Buters et al., 2018).

En general, la presencia de polen y la carga alérgica presentan una dinámica paralela (Buters et al., 2012; De Linares, Díaz de la Guardia, Nieto Lugilde, & Alba, 2010; Fernández-González, Ribeiro, Pereira, Rodríguez-Rajo, & Abreu, 2019b; Vara, Fernández-González, Aira, & Rodríguez-Rajo, 2016). Sin embargo, en función de los tipos polínicos estudiados se encuentran ciertas discrepancias entre la concentración de polen y alérgeno, lo cual debe ser estudiado para desvelar las relaciones entre ambas medidas y la influencia de patrones ambientales. En estudios previos se han observado discrepancias entre las medidas de alérgeno y polen que se atribuyen a factores meteorológicos, transporte de alérgenos libres tras su liberación desde el grano de polen y/o reactividad cruzada con alérgenos homólogos (Buters et al., 2015; Fernández-González et al., 2011; González-Parrado et al., 2014; Plaza,

Alcázar, Hernández-Ceballos, & Galán, 2016; Rodríguez-Rajo et al., 2011).

La presencia de grandes cantidades de polen en el aire aumenta considerablemente la probabilidad de encontrar niveles elevados de proteínas alergénicas o alérgenos, sin embargo, los aeroalérgenos también pueden viajar libres o asociados a otras partículas una vez liberados del grano de polen (Visez et al., 2015). Los aeroalérgenos libres están presentes en la atmósfera en un rango de tamaño de partículas incluidos en la fracción fina $PM_{2.5}$ los cuales pueden unirse a otras partículas finas, como las partículas residuales de la combustión del diésel, otros contaminantes e incluso partículas biológicas submicrónicas (Fröhlich-Nowoisky et al., 2016; Sénéchal et al., 2015; Visez et al., 2019).

Los tipos principales de polen causantes de polinosis en la región Mediterránea son gramíneas, como principal causa de alergia en todo el mundo (García-Mozo, 2017), y olivo en toda la cuenca Mediterránea como consecuencia de la amplia distribución de este cultivo agrícola (D'Amato et al., 2007). Mientras que el olivo es uno de los tipos polínicos más abundantes del espectro aerobiológico en el sur y centro de la península Ibérica, las gramíneas constituyen uno de los tipos procedente de

especies herbáceas más abundantes en toda la península. En el centro de la península Ibérica el polen de olivo y gramíneas, representan en torno al 6-11% del polen total. El periodo de riesgo alergénico para estas especies se produce entre los meses de mayo a junio con la superación frecuente de los umbrales de riesgo establecidos (Pérez-Badia et al., 2010; Pérez-Badia, Rapp, Vaquero, & Fernández-González, 2011; Rojo et al., 2016).

En el caso de las gramíneas, los alérgenos integrados en los grupos 1 y 5 son los predominantes y están presentes en las gramíneas de la subfamilia *Pooideae* a la que pertenecen las especies más alergénicas de la familia (los alérgenos del grupo 1 son glicoproteínas que además se encuentran de manera más amplia en todas las subfamilias de las gramíneas) (Smith, Ong, Knox, & Singh, 1994). Ambos grupos se consideran alérgenos mayores a los cuales más del 50% de alérgicos a gramíneas poseen sensibilización. En concreto los alérgenos de *Phleum pratense*, Phl p 1 y Phl p 5, desencadenan reacciones alérgicas en más de 90% y en el 65-85% de las personas sensibles a gramíneas, respectivamente (García-Mozo, 2017). En el caso del olivo, Ole e 1 es el principal alérgeno con el 80% de los alérgicos al olivo sensibilizados a este alérgeno (Asam,

Hofer, Wolf, Aglas, & Wallner, 2015). Ole e 1 es una glicoproteína que se localiza en el retículo endoplasmático durante las últimas etapas de desarrollo del polen y que se acumula masivamente durante la dehiscencia del polen debido a que está involucrada en la hidratación y germinación del polen (Alché et al., 1999).

Otros tipos polínicos con gran relevancia alérgica se corresponden con los procedentes del polen de la flora ornamental de las ciudades, tipos polínicos que debido a la abundancia y cercanía de las fuentes de emisión de polen se encuentran entre los más abundantes del espectro polínicos en las ciudades (Cariñanos & Casares-Porcel, 2011; Lara, Rojo, Fernández-González, & Pérez-Badia, 2019; Maya-Manzano et al., 2017). El plátano de sombra es una de estas especies cuyo cultivo se ha extendido en ciudades de Europa occidental y cuyo periodo de riesgo alérgico se produce entre los meses de marzo y abril (Pérez-Badia et al., 2010; Rojo et al., 2016). Pla a 1 es el principal alérgeno mayor del plátano de sombra con un grado de sensibilización del 90% en pacientes alérgicos a plátano, y es una proteína inhibidora de la invertasa que presenta actividad enzimática relacionada con el proceso de germinación (Asam et al., 2015). El proceso de liberación del alérgeno Pla a 1 está

asociado a condiciones de hidratación del grano de polen (Suárez-Cervera et al., 2005).

Los objetivos principales de este trabajo son (1) analizar la correspondencia entre la concentración de granos de polen de tres tipos polínicos de gran interés alérgico en la península Ibérica como son *Platanus*, Poaceae y *Olea* y sus alérgenos principales, Pla a 1, Phl p 1, Phl p 5 y Ole e 1, respectivamente; e (2) interpretar episodios de discordancia entre la medida de polen y alérgenos en relación a los patrones ambientales de las variables meteorológicas que influyen en las distintas fases del proceso aerobiológico.

2. Material y método

2.1. Área de estudio

Este trabajo se ha llevado a cabo en dos ciudades de la península Ibérica como es Toledo en el centro (región de Castilla-La Mancha, España) y Évora en el oeste de la península Ibérica (región de Alentejo, Portugal). Toledo se encuentra a una altitud media de 529 m sobre el nivel del mar y Évora a una altitud de unos 300 m sobre el nivel del mar, por lo que existen importantes diferencias bioclimáticas entre estas dos ciudades mediterráneas.

Desde el punto de vista climático, Toledo (España) presenta una temperatura

media anual de 15,8°C y una precipitación media anual de 342 mm. El bioclima se clasifica como mediterráneo pluvioestacional-oceánico, de termotipo mesomediterráneo y ombrotipo seco con un marcado déficit hídrico estival. En el caso de Évora (Portugal), el bioclima también se corresponde con el mediterráneo pluvioestacional-oceánico (Rivas-Martínez et al., 2011), sin embargo, la temperatura media anual alcanza los 16,5°C situándose entre los pisos meso y termomediterráneo, y en condiciones más húmedas con una precipitación anual de 580 mm.

2.2. Seguimiento aerobiológico

Las muestras de bioaerosol han sido obtenidas empleando sistemas de captación diferentes. Por un lado, para la toma de muestras de polen en el aire se utilizó un captador volumétrico de impacto tipo Hirst (Hirst, 1952). El análisis de las muestras, la identificación y la cuantificación de los granos de polen se han llevado a cabo cumpliendo con los requerimientos mínimos propuestos por la International Association for Aerobiology (Galán et al., 2014). Las concentraciones de polen en el aire se han cuantificado diariamente en unidades de granos de polen/m³.

Por otro lado, paralelamente se obtuvieron muestras de materia particulada destinadas al análisis de alérgenos en el aire, para lo cual se emplearon dos tipos de captador volumétrico diferente en las ciudades de Toledo y Évora. En la ciudad de Toledo (España), un muestreador ciclónico Multi-Vial (Burkard Manufacturing Co Ltd. Hertfordshire, UK) fue empleado para el muestreo del bioaerosol (16,5 L/min) (Plaza, Alcázar, Velasco-Jiménez, & Galán, 2017). En cambio, en la ciudad de Évora (Portugal), el muestreo del bioaerosol se ha realizado utilizando un ChemVol (Butraco, Son, The Netherlands), impactador en cascada de alto volumen (800 L/min), equipado con filtros para la recogida de partículas de más de 10 µm (PM > 10) y partículas mayores a 2,5 µm (10 > PM > 2,5) (Buters et al., 2015). El periodo de muestreo se extiende desde 2009-2011 en la ciudad de Évora para polen y alérgenos de gramíneas, y durante 2011-2013 en la ciudad de Toledo para polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

2.3. Extracción de aeroalérgenos

Los aeroalérgenos presentes en las muestras obtenidas del captador de cascada (ChemVol), fueron extraídas en bicarbonato amónico (0,1 mol/L) con 0,1%

BSA en rotación a 100 rpm durante 4 horas (Buters et al., 2015).

Las muestras de materia particulada recogidas en el muestreador ciclónico fueron extraídas siguiendo el método descrito por Takahashi et al. (2001) con las modificaciones propuestas por Moreno-Grau et al., (2006). Las muestras fueron extraídas en 120 µl de tampón fosfato en rotación durante 2 horas. El extracto es separado de la materia particulada mediante centrifugación a 4000 rpm durante 10 minutos.

2.4. Cuantificación de aeroalérgenos mediante ELISA

Los alérgenos de los extractos fueron cuantificados utilizando anticuerpos específicos. En Évora, se cuantificó el grupo 5 de alérgenos de Poaceae (Phl p 5) mientras que, en Toledo; Ole e 1, Pla a 1 y el grupo 1 de alérgenos de Poaceae (Phl p 1) fueron cuantificados. Las concentraciones de alérgenos en el aire se han cuantificado diariamente en unidades de pg/m³.

Las placas de microtitulación para ELISA fueron incubadas durante la noche a 4°C utilizando el anticuerpo monoclonal específico correspondiente. Los pocillos recubiertos fueron bloqueados realizando una incubación con PBS-BSA-T con 1%

BSA y 0,05% Tween 20. Después de la incubación, las placas fueron incubadas con el anticuerpo natural específico (curva de calibrado), los extractos problema y los controles. Seguidamente, las placas fueron incubadas con anticuerpo de conejo específico para alérgenos marcado con biotina (biotin-labeled allergen-specific rabbit antiserum). Todas las incubaciones tuvieron lugar durante 1 hora a 37°C y 3 lavados con PBS-T se realizaron entre cada paso. A continuación, se realizó una incubación con 3,3',5,5'-Tetramethylbenzidine (TMB) en oscuridad y con agitación a 300 rpm durante 10 minutos. Por último, la reacción se detuvo adicionando H₂SO₄ 3N y la absorbancia fue medida a 450 nm.

2.5. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos de la ciudad de Évora fueron proporcionados por el Atmospheric Sciences Observatory en la Universidad de Évora (ICT) (38° 34' N, 7° 54' W) ubicada a 293 m sobre el nivel del mar. En Toledo, los datos meteorológicos proceden de la estación meteorológica de Toledo (39° 53' N; 04°03' W) situada a una altitud de 515 m sobre el nivel del mar y que pertenece a la Agencia Estatal de Meteorología (www.aemet.es).

Las variables meteorológicas analizadas han sido la temperatura máxima (°C), la

temperatura mínima (°C), la precipitación acumulada diaria (mm) y la humedad relativa (%).

2.6. Análisis estadístico

Las concentraciones de alérgenos se han comparado con las concentraciones de polen empleando rectas de regresión lineal entre ambas medidas para cada tipo polínico. En ningún caso, las concentraciones de alérgeno entre las dos ciudades, Évora y Toledo, han sido comparadas debido a que se emplearon diferentes métodos de captación para la obtención de la muestra de materia particulada. La recta de regresión trazada entre las medidas de polen y alérgeno posee un significado de la potencia alérgica general existente para los distintos tipos polínicos, es decir, la concentración de alérgenos en correspondencia con la concentración de polen para cada día. Los residuos de este análisis de regresión, es decir, los datos situados fuera del intervalo de confianza del 99% construido sobre la recta de regresión, nos permitieron analizar los casos anómalos. Estos casos fuera del intervalo de confianza se pueden dar en dos direcciones, por un lado, días en los que la concentración de alérgeno supera la correspondiente concentración de polen (casos 'High') y, por otro lado, días en los

que la concentración de polen supera la correspondiente concentración de polen según el intervalo de confianza del 99% (casos 'Low'). El resto de los análisis estadísticos se basaron en la interpretación de los residuos de la curva de regresión (anomalías +/- respecto a 0 que se corresponde con la correspondencia ideal entre polen y alérgeno).

Los residuos obtenidos de la curva de regresión correspondiente a la relación entre polen y alérgenos se relacionaron con los datos de las variables meteorológicas de días previos. Las variables meteorológicas fueron desestacionalizadas, de manera que los residuos de la correspondencia polen-alérgeno también se relacionaron con los residuos de las variables meteorológicas, que dan información acerca de la anomalía meteorológica (+/-) con respecto al comportamiento estacional de la variable. La desestacionalización de la serie temporal de datos meteorológicos se ha realizado siguiendo un procedimiento de descomposición basado en el algoritmo LOESS, este tipo de descomposición permite extraer la estacionalidad y la tendencia como parte determinista de la serie para después extraer la componente residual de la serie de datos (Cleveland, Cleveland, McRae, & Terpenning, 1990). Además, este procedimiento permite correlacionar datos desde dos series

temporales, asegurando la independencia temporal de los datos diarios (Rojo, Rapp, Lara, Fernández-González, & Pérez-Badia, 2015).

La relación entre residuos del análisis de regresión y los residuos de las series de tiempo de variables meteorológicas fue estudiada utilizando el test de correlación de Spearman, empleando los valores previos de las variables estudiadas, retardos (hasta 9 días antes), y aplicando una media móvil de 3 días para suavizar el efecto a muy corto plazo. Todos los análisis estadísticos se han realizado con el software R (R Core Team, 2019).

3. Resultados

La estación polínica de los tres tipos polínicos estudiados, *Platanus*, Poaceae y *Olea*, se produce entre los meses de marzo y agosto, en los cuales se registra prácticamente la totalidad del polen que emiten a la atmósfera las especies que producen este polen (Fig. 1). Sin embargo, el plátano de sombra muestra una estación polínica mucho más temprana que gramíneas y olivo, transcurriendo entre los meses de marzo y abril. Durante este periodo se produce una paulatina subida de las temperaturas que de media ronda los 13°C y una humedad relativa media en el ambiente en torno a 50-75%. La estación polínica de Poaceae y *Olea* es bastante

coincidente en el tiempo, observándose las principales cantidades de estos tipos polínicos entre los meses de mayo y junio, aunque el pico máximo de gramíneas se produce con antelación al de olivo. Durante este periodo de finales de primavera e inicios del verano, aumenta el ritmo de incremento de la temperatura media y la humedad relativa media desciende hasta aproximadamente 25-50% (Fig. 1).

El análisis de regresión de residuos de las concentraciones de polen de *Platanus*, Poaceae y *Olea* y de las concentraciones de sus respectivos alérgenos analizados muestra unos coeficientes de determinación entre el polen *Platanus* y el alérgeno Pla a 1 de $R^2 = 0,57$ ($p < 0,01$) (Fig. 2). Por otro lado, los coeficientes de determinación de las regresiones entre las concentraciones de polen de *Olea* y el alérgeno Ole e 1 es de $R^2 = 0,35$ ($p < 0,01$) y, para el polen de Poaceae y la concentración de alérgeno Phl p 5 y Phl p 1 de $R^2 = 0,59$ ($p < 0,01$) y $R^2 = 0,32$ ($p < 0,01$), respectivamente. Aunque, en general, el grado de correlación entre la concentración de polen y la concentración de alérgenos es buena, en todos los casos significativa ($p < 0,05$) y con un coeficiente de correlación superior a 0,65 (Fig. 2), existen muchos casos que se alejan de la correspondencia ideal entre polen y alérgeno (curva de regresión).

Capítulo III. Patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

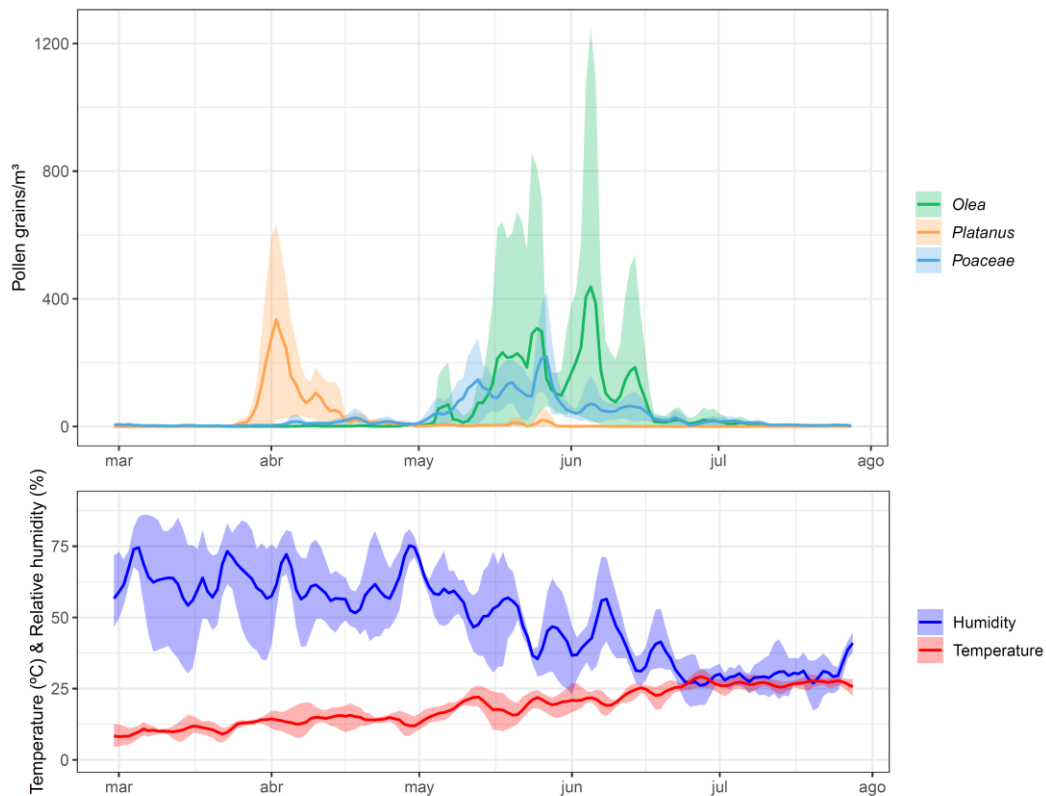


Fig. 1. (A) Concentración de polen para *Olea*, *Platanus* y *Poaceae* (granos/m³), y (B) variables meteorológicas de temperatura media (°C) y humedad relativa (%). Promedio (línea) y su amplitud (área) durante el periodo 2011-2013 en Toledo, España.

Las figuras 3 y 4 muestran la relación existente entre el polen de *Platanus* y el alérgeno Pla a 1 (Fig. 3A), el polen de olivo y el alérgeno Ole e 1 (Fig. 3B), el polen de *Poaceae* y el alérgeno Phl p 1 (Fig. 4A) y el polen de *Poaceae* y el alérgeno Phl p 5 (Fig. 4B).

La correlación existente entre las concentraciones de polen de *Olea* y de alérgeno Ole e 1 son elevadas todos los años (coeficiente de correlación > 0,80, $p < 0,001$), es decir, existe una gran correspondencia entre los niveles de polen y alérgeno coincidiendo los picos máximos

anuales para ambas medidas (Fig. 3B). En el caso del polen de *Platanus* y su correspondencia con el alérgeno Pla a 1, aunque el grado de correlación es menor para los años 2011 y 2013 ($R = 0,60$, $p < 0,01$ y $R = 0,54$, $p < 0,05$, respectivamente), los picos de máxima concentración en ambos casos siguen coincidiendo de manera adecuada (Fig. 3A).

La correspondencia entre la concentración de polen de *Poaceae* y la concentración de alérgeno Phl p 1 en Toledo y Phl p 5 en Évora también es buena, aunque el grado de correlación ha

sido mayor en Évora con un coeficiente de correlación de 0,874 ($p < 0,001$) (Fig. 4B), con respecto a Toledo (coeficiente de correlación de 0,68, $p < 0,001$) (Fig. 4A). En el caso de gramíneas, un mayor número de días han mostrado una mayor concentración de alérgenos Phl p 1 y Phl p 5 en relación a la concentración de polen de Poaceae y la relación mostrada entre ambas (Fig. 2, casos 'High' según el análisis de residuos).

Las correlaciones entre los datos de los residuos de la relación polen-alérgeno y las variables meteorológicas (anomalías calculadas mediante los residuos de la

desestacionalización) muestran que existe una correlación positiva de la humedad relativa y la precipitación en el caso del plátano de sombra (Fig. 5). Es decir, la relación alérgeno-polen es mayor cuando aumenta la humedad, mientras que la temperatura se comporta de manera contraria mostrando una relación negativa con el plátano. También se observa que la intensidad de las correlaciones va disminuyendo a medida que se introducen los datos de las variables de días previos (retardos) y aumenta este número de retardos, hasta que el efecto desaparece o incluso cambia de signo en el caso de la precipitación.

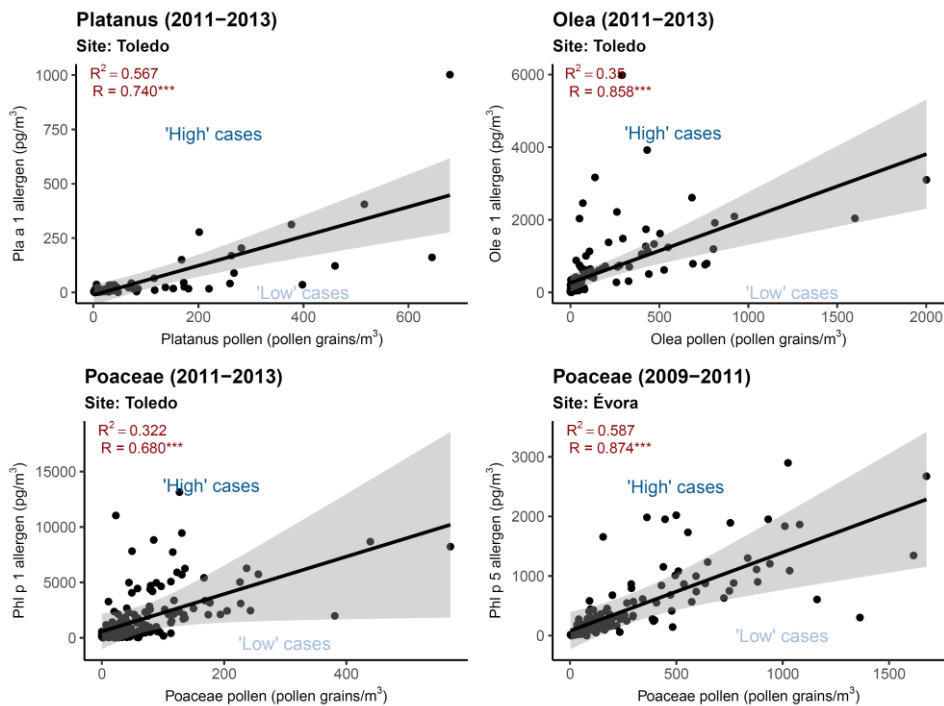


Fig. 2. Análisis de regresión entre las concentraciones de polen y su respectivo alérgeno para (A) *Platanus*-Pla a 1 en Toledo, (B) *Olea*-Ole e 1 en Toledo, (C) *Poaceae*-Phl p 1 en Toledo y (D) *Poaceae*-Phl p 5 en Évora.

Capítulo III. Patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

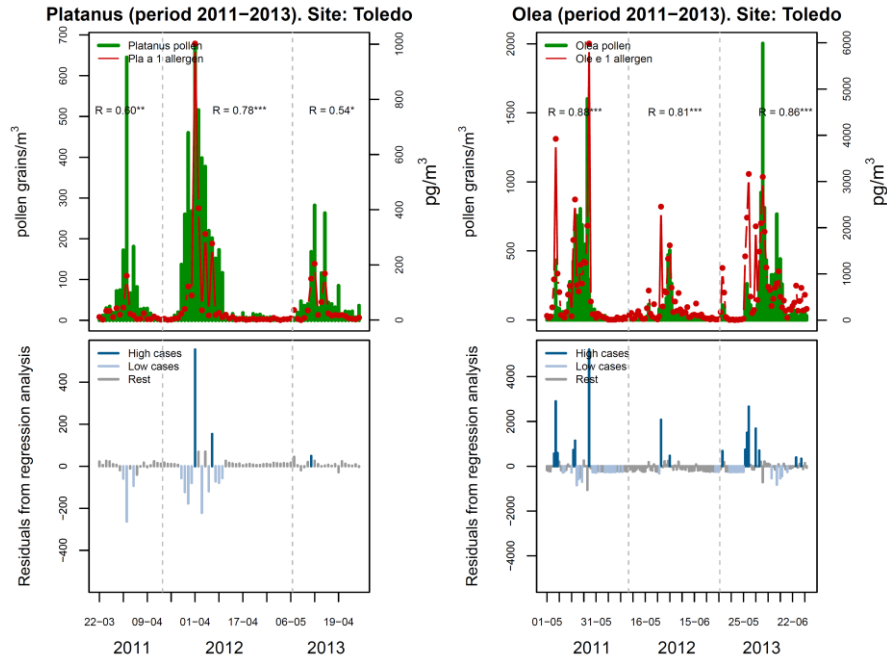


Fig. 3. Relación entre (A) las concentraciones de polen de *Platanus* y *Pla a 1*, y (B) las concentraciones de polen de *Olea* y *Ole e 1* en Toledo (España). Casos especiales fuera del intervalo de confianza del 99% del análisis de regresión (Fig. 1), 'High' casos correspondientes a los residuos positivos y 'Low' casos correspondientes a los residuos negativos.

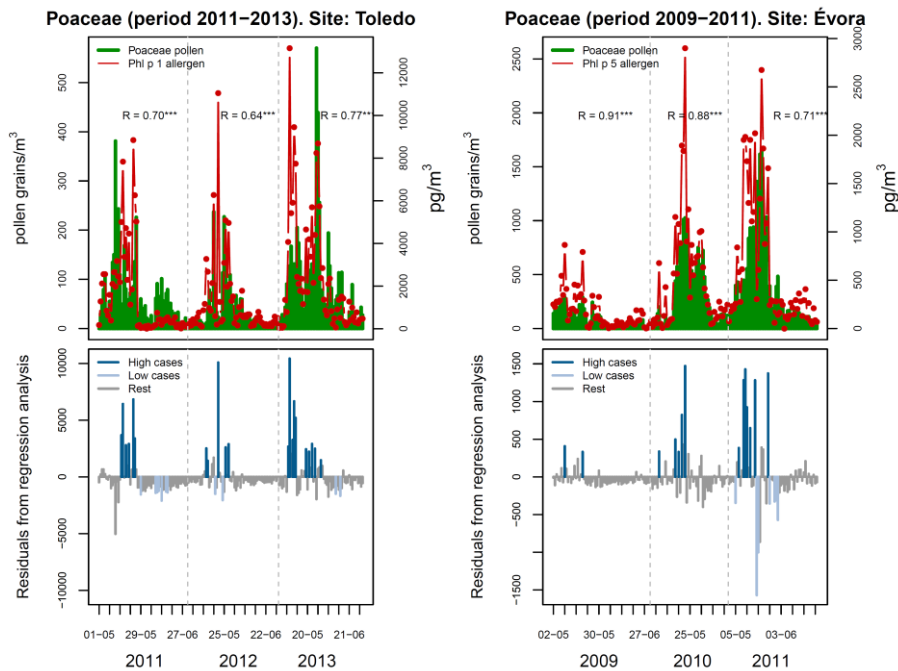


Fig. 4. Relación entre (A) las concentraciones de polen de *Poaceae* y *Phl p 1* en Toledo (España), y (B) las concentraciones de polen de *Poaceae* y *Phl p 5* en Évora (Portugal). Casos especiales fuera del intervalo de confianza del 99% del análisis de regresión (Fig. 1), 'High' casos correspondientes a los residuos positivos y 'Low' casos correspondientes a los residuos negativos.

Cuando se compara esta misma relación entre el polen y el alérgeno de Poaceae y *Olea* con las variables meteorológicas de días previos, se observa un cambio de patrón con respecto al plátano de sombra. En el caso de gramíneas y olivo, la correlación de la humedad relativa y la precipitación con la relación polen-alérgeno es muy baja durante el día previo y es máxima para 3-6 días antes, aunque en este caso con signo negativo al contrario que ocurre con el plátano de sombra. Es decir, una menor humedad relativa durante 3-6 días previos se relaciona con un aumento de la relación alérgeno/polen para

gramíneas y olivo, efecto que se va reduciendo con mayor número de retardos (Fig. 5).

Resulta llamativo además como los resultados de las correlaciones entre las variables meteorológicas (humedad relativa y precipitación) y la relación polen-alérgeno sigue un mismo patrón similar para el estudio de ambos alérgenos en gramíneas Phl p 1 y Phl p 5, en Toledo (España) y Évora (Portugal), respectivamente (Fig. 6). En ambas ciudades se observa el mismo patrón de correlación a lo largo de los retardos de

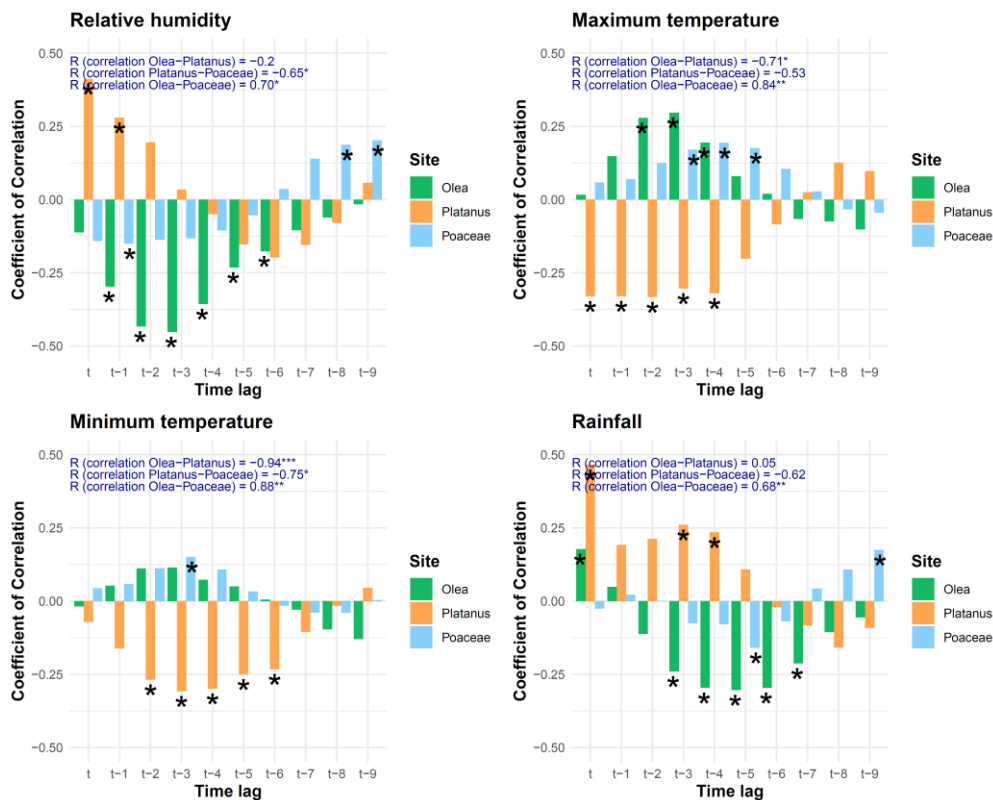


Fig. 5. Test de correlación de Spearman entre los residuos de los datos del análisis de regresión entre las concentraciones de polen y alérgenos estudiadas en Toledo y las variables meteorológicas considerando diferentes retardos (media móvil de 3 días aplicada).

tiempo, aunque esta sincronía no se cumple para el caso de la temperatura.

Cuando analizamos en detalle el efecto de la humedad relativa sobre la relación alérgeno/polen para los tipos de polen y alérgenos estudiados, se obtienen los mismos resultados observados anteriormente. La mayoría de los días que muestran una relación alérgeno/polen dentro del coeficiente de confianza 99% se relacionan con un rango bajo de anomalías

en la humedad relativa (media de 0 con respecto al residuo de la humedad, Fig. 7). Sin embargo, los días considerados como casos 'High' (concentración de alérgeno mayor que la correspondiente a la concentración de polen) en gramíneas y olivo muestran una relación con días de anomalías negativas para la humedad relativa en el día previo, es decir, días con una relevante disminución de la humedad dentro del comportamiento estacional, al contrario que los casos 'Low' (Fig. 7).

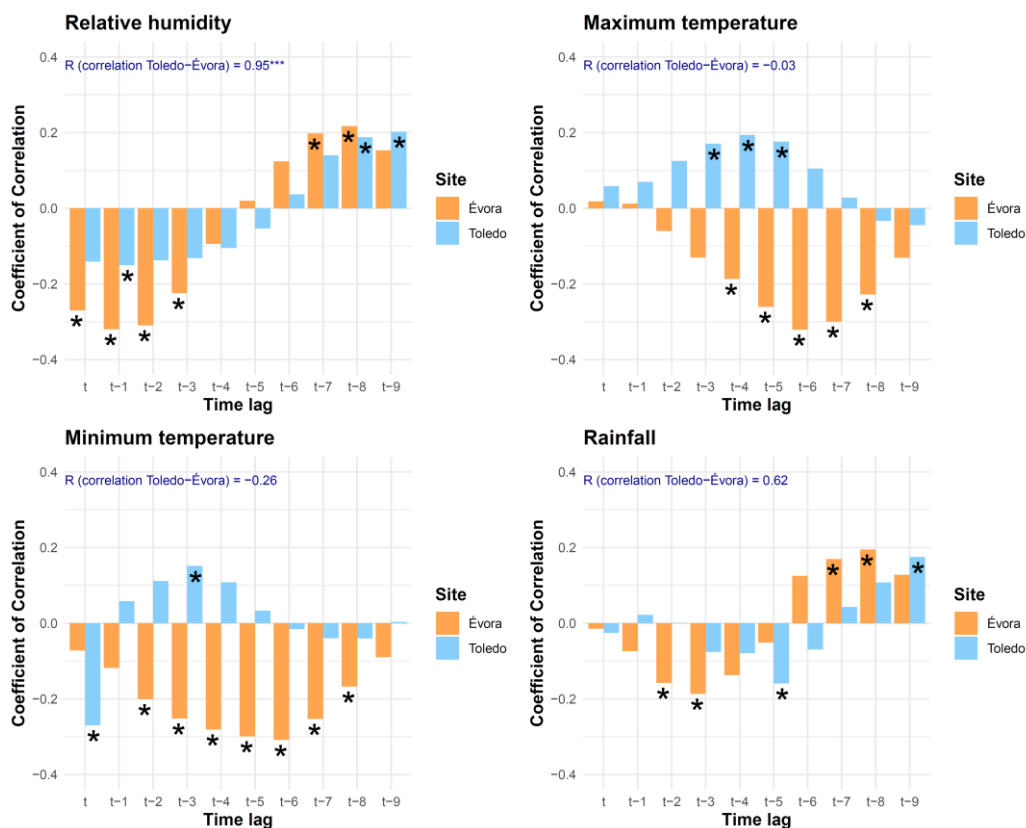


Fig. 6. Test de correlación de Spearman entre todos los residuos de los datos del análisis de regresión de Poaceae (concentraciones de polen y alérgenos) y las variables meteorológicas considerando diferentes retardos en Toledo y Évora (media móvil de 3 días aplicada).

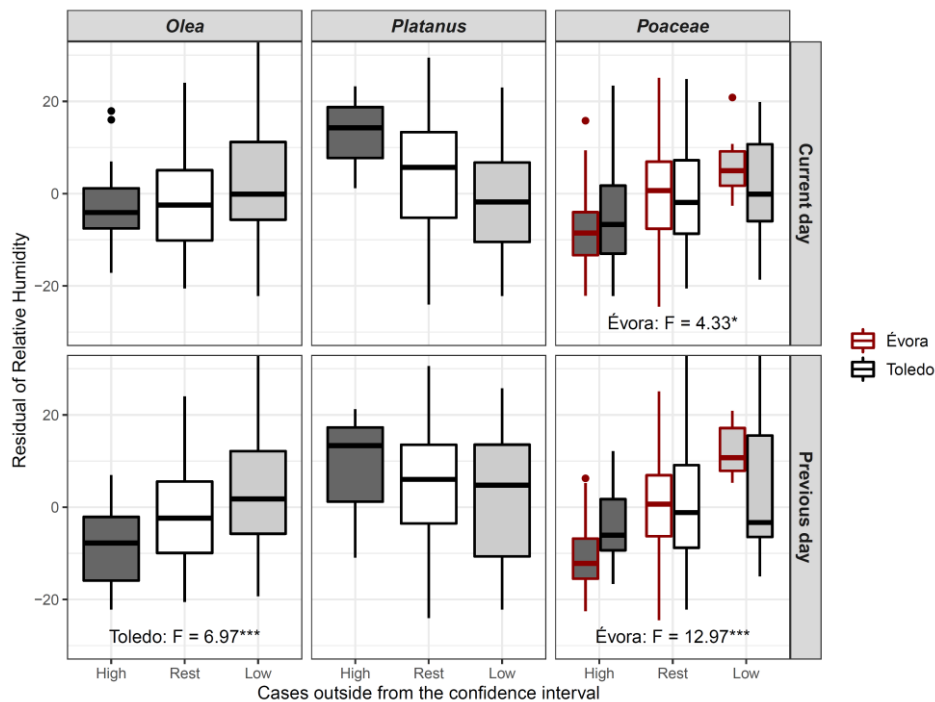


Fig. 7. Efecto de las anomalías de las variables meteorológicas con respecto a los residuos de los datos del análisis de regresión entre las concentraciones de polen y alérgenos. 'High' representa los casos con mayor concentración de alérgeno y 'Low' representa los casos con menor concentración de alérgeno que la relación normal polen-alérgeno (análisis de regresión, Fig. 1)

En el caso del plátano de sombra la relación es al contrario que en los casos anteriores, poniendo de nuevo de manifiesto las diferencias entre los tipos polínicos de *Poaceae* y *Olea* con respecto a *Platanus*. Los casos 'High' se observaron en días con anomalías positivas de humedad relativa, i.e. humedad relativa mayor que el valor medio estacional, aunque en ningún caso con diferencias significativas entre grupos (Fig. 7).

4. Discusión

Las concentraciones de polen alérgico registradas por las redes de

monitorización aerobiológica se han utilizado ampliamente como indicadores de los niveles de riesgo de alergia en todo el mundo (Buters et al., 2018). Sin embargo, ciertas dudas se han planteado acerca de la correspondencia directa entre el número de granos de polen y la concentración de proteínas alérgicas en el aire, responsables de la reacción alérgica en las personas con polinosis (Buters et al., 2012; Plaza et al., 2016). Los resultados derivados de la comparación de concentraciones de polen y alérgenos en nuestro trabajo indican en general una adecuada correspondencia entre ambas

medidas y, en cualquier caso, los sistemas de alerta sanitaria pueden utilizar los niveles de exposición polínica en el aire de las ciudades como índice de riesgo (Alcázar, Galán, Torres, & Domínguez-Vilches, 2015; Pfaar et al., 2019). Como prueba de ello, numerosos trabajos previos han relacionado el grado de síntomas en pacientes alérgicos con la exposición al polen de especies alérgicas como las gramíneas (Damialis et al., 2019; Durham et al., 2014; Jones et al., 2019; Qazi, Iqbal, & Khan, 2019).

Desde nuestro punto de vista, las concentraciones de polen y alérgenos en el aire no son equivalentes, pero sí equiparables como ha sido demostrado por otros autores (De Linares, Alcázar, Valle, Díaz de la Guardia, & Galán, 2019; Vara et al., 2016). Ambas medidas poseen una naturaleza muy diferente, con sistemas de captación y análisis muy diversos entre sí. En este sentido, la presencia de grandes cantidades de polen en el aire aumentará considerablemente la probabilidad de encontrar niveles elevados de alérgeno, sin embargo, los alérgenos también pueden viajar libres o asociados a otras partículas una vez liberados del grano de polen (Sénéchal et al., 2015; Spieksma & Nikkels, 1999).

Por lo tanto, los esfuerzos por explicar de forma detallada la carga alérgica con las concentraciones polínicas se complica con importantes discordancias entre ambas variables con concentraciones de partículas de naturaleza diferente y con unidades de medida distintas (Moreno-Grau et al., 2006; Plaza, Alcázar, & Galán, 2016). En este trabajo, además de la potencia alérgica diaria (Buters et al., 2015; Plaza et al., 2017), nosotros planteamos una nueva medida de discordancia entre concentraciones de polen y alérgenos como es el valor de los residuos de una regresión lineal para caracterizar la correspondencia entre polen y alérgeno. Proponemos esta nueva metodología para definir los casos de mayor discrepancia fuera del intervalo de confianza que caracteriza la correspondencia entre polen y alérgeno durante todo el periodo de estudio, es decir, los casos anómalos donde existe una mayor cantidad de alérgeno respecto a polen ('High' cases) o mayor cantidad de polen respecto a alérgeno ('Low' cases).

El uso de las concentraciones de polen para definir los periodos de riesgo alérgico en vez de las concentraciones de alérgeno presenta diversas ventajas relacionadas con el costoso y más laborioso análisis de proteínas alérgicas llevado a cabo mediante técnicas moleculares de reconocimiento antígeno-anticuerpo. Por

otro lado, la metodología actualmente empleada en el campo de la aerobiología comenzó a implantarse a partir de la mitad del siglo XX (Galán et al., 2014; Hirst, 1952), cuyo análisis y cuantificación de bioaerosoles también resulta laborioso, pero sin embargo con un relativo bajo coste económico. Esta metodología de análisis aerobiológico se expandió a finales de siglo por las redes de vigilancia de calidad biológica del aire de toda Europa y otras partes del mundo, consensuándose un procedimiento unitario para la captación y cuantificación de las concentraciones de polen en el aire (CEN/TS 16868, 2015; Galán et al., 2014). Por estos motivos, el análisis de los niveles de polen ha predominado con respecto al estudio específico de la carga alérgica en el aire. Esta tendencia puede que se perpetúe aún más, ya que se abre una nueva perspectiva con el diseño de sistemas automáticos de captación y análisis de las concentraciones de polen que se están desarrollando para proporcionar información de riesgo alérgico a tiempo real (Crouzy, Stella, Konzelmann, Calpini, & Clot, 2016; Oteros et al., 2015).

Por tanto, es importante determinar cuáles son los factores involucrados en la relación entre las concentraciones de polen y alérgeno en el aire, y estudiar en detalle el comportamiento de esta relación según

diversos patrones ambientales. En concreto, resulta de gran interés identificar las causas de las mayores discrepancias entre el polen y la carga alérgica (Alan et al., 2018; Plaza, Alcázar, & Galán, 2016). Nuestros resultados evidencian una clara influencia de las variables meteorológicas como la humedad relativa, la temperatura o la precipitación en la relación entre polen y alérgeno.

La complejidad del efecto de los patrones ambientales en la relación entre el polen y el alérgeno es muy elevada. Por un lado, el registro de partículas biológicas en un determinado momento depende de las condiciones meteorológicas acontecidas durante una serie de días previos y, por otro lado, las diferentes variables meteorológicas pueden influir de diferente manera en el proceso aerobiológico de cada partícula, polen o alérgeno (Cresti & Linskens, 2000; Rojo et al., 2015). Nuestros resultados muestran una clara respuesta gradual a las condiciones meteorológicas de días previos y, en general, la mayor influencia de variables como la humedad, la temperatura y la precipitación se observó desde el día actual y hasta los 6 días anteriores del registro de polen y alérgeno. No obstante, no todos los tipos polínicos reaccionan de la misma manera.

El tipo polínico *Platanus* mostró una mayor influencia de las variables meteorológicas del día actual y el día previo, mientras en los casos de Poaceae y *Olea*, la mayor influencia se produce con las variables meteorológicas de 2-4 días previos. En este sentido, presenta una gran relevancia el origen de las partículas biológicas y el tiempo de dispersión hasta su captación en los muestreadores. En el caso del plátano de sombra las partículas biológicas proceden de cultivos ornamentales muy localizados dentro de las ciudades por lo que se presupone que el tiempo de transporte sea muy corto con un gran efecto de las condiciones ambientales locales (Adams-Groom, Skjøth, Baker, & Welch, 2017; Rojo et al., 2019). En el caso contrario se encuentra el olivo. Así, en Toledo, el olivo se distribuye ampliamente en cultivos alejados del núcleo urbano de la ciudad siendo un tipo de polen con una alta capacidad dispersiva (Moreno-Grau et al., 2016; Rojo et al., 2016), por lo tanto, el tiempo de transporte del polen y alérgenos en la atmósfera será superior y la mayor influencia se corresponderá con varios días anteriores durante la emisión polínica.

Pero las diferencias observadas entre el plátano de sombra y las gramíneas y olivo no sólo indican divergencias en el periodo de mayor influencia, sino que también el signo de la influencia de variables como la

humedad relativa y la temperatura, son distintos para uno y otros tipos polínicos. La humedad relativa que provoca la hidratación del polen fomenta la liberación de proteínas alérgicas durante los procesos de dispersión y deposición de los granos de polen, lo que puede tener un efecto positivo en la carga alérgica libre (Buters et al., 2015; Motta, Marliere, Peltre, Sterenberg, & Lacroix, 2006). Por otro lado, la emisión polínica se encuentra favorecida por unas elevadas temperaturas y una baja humedad relativa que favorece el proceso de dehiscencia de las anteras (Cresti & Linskens, 2000). Y en ambos casos, la precipitación posee un efecto lavado de la atmósfera produciendo la sedimentación de la materia particulada durante los momentos posteriores a los episodios de precipitación (Pérez, Gassmann, & Covi, 2009).

En el caso de la humedad relativa, el mayor efecto sobre el alérgeno de plátano de sombra según nuestros resultados podría darse durante la dispersión y deposición del grano de polen, donde una mayor carga alérgica se produciría respecto a la concentración polen gracias a un incremento de la humedad ambiental, como ha sido demostrado para *Platanus* y otros tipos de polen (Buters et al., 2015; Fernández-González et al., 2019). El alérgeno Pla a 1 es una proteína

involucrada en el desarrollo del tubo polínico y la fecundación que es liberada rápidamente del grano de polen bajo condiciones de hidratación (Suárez-Cervera et al., 2005). El efecto liberador de la humedad relativa sobre el alérgeno Pla a 1 del polen de plátano de sombra ha sido demostrado mediante ensayos in vitro donde la influencia de diversos parámetros puede ser analizada por separado (Aloisi et al., 2018). Sin embargo, la compleja interacción entre las variables ambientales no permite discernir claramente este efecto, encontrando frecuentemente un efecto negativo de la humedad sobre la concentración de alérgeno, indicando en realidad un efecto negativo sobre la producción de polen (Fernández-González, Guedes, Abreu, & Rodríguez-Rajo, 2013).

Los tipos polínicos Poaceae y *Olea* comparten características que pueden justificar que presenten la misma relación con la humedad relativa. La estación polínica de Poaceae y *Olea* se solapa en el tiempo y transcurre durante los meses de mayo y junio, cuando la temperatura comienza a incrementarse más rápidamente y la humedad relativa disminuye considerablemente hasta un nivel medio de 25-50%. Durante este periodo, la influencia de las variables meteorológicas podía estar más relacionada con el proceso de emisión

polínica que se vería favorecido por una baja humedad y unas elevadas temperaturas (Cresti & Linskens, 2000; D'Amato & Cecchi, 2008; Rojo et al., 2015). Estas condiciones meteorológicas fomentarían un incremento del alérgeno incluso varios días más tarde, retardo que se muestra más evidente en el caso del olivo relacionado con transportes de media y larga distancia desde las fuentes de polen situadas a varias decenas de kilómetros (Oteros et al., 2015; Rojo et al., 2016).

La misma relación entre la correspondencia polen-alérgeno y las variables meteorológicas se ha encontrado en dos áreas muy diferentes desde el punto de vista bioclimático, como son Toledo (España) y Évora (Portugal). Además, este mismo patrón observado con la humedad relativa y la precipitación es especialmente relevante debido a que el sistema de captación de materia particulada en ambos casos fue diferente, aunque como han demostrado Plaza et al. (2017), ambos sistemas de captación son adecuados para la cuantificación de alérgenos en el aire. A la luz de estos resultados, pensamos que los hallazgos observados en relación al polen y alérgenos de las gramíneas presentan una solidez con independencia del lugar, el periodo o el sistema de muestreo.

5. Conclusiones

Las concentraciones de polen en el aire son comúnmente empleadas como una medida de alerta de riesgo alérgico para la población alérgica. Las redes de vigilancia de la calidad biológica del aire se basan en la medida de exposición a polen debido a la facilidad para el muestreo y análisis, además del menor coste económico, con respecto a la

cuantificación de proteínas alergénicas en el aire. Aunque los resultados muestran gran correspondencia entre la carga alérgica y las concentraciones de polen en el aire, es importante analizar con mayor detalle las discordancias entre ambas medidas y así, los resultados de este trabajo permiten interpretar el grado de discordancia entre polen y alérgeno, basándose en el estudio de los patrones de las variables meteorológicas.

Referencias

- Adams-Groom, B., Skjøth, C. A., Baker, M., & Welch, T. E. (2017). Modelled and observed surface soil pollen deposition distance curves for isolated trees of *Carpinus betulus*, *Cedrus atlantica*, *Juglans nigra* and *Platanus acerifolia*. *Aerobiologia*, 33, 407–416. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9479-1>
- Alan, Ş., Şahin, A. A., Sarışahin, T., Şahin, S., Kaplan, A., & Pinar, N. M. (2018). The effect of geographical and climatic properties on grass pollen and Phl p 5 allergen release. *International Journal of Biometeorology*, 62, 1325–1337. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1536-0>
- Alcázar, P., Galán, C., Torres, C., & Domínguez-Vilches, E. (2015). Detection of airborne allergen (Plat a 1) in relation to *Platanus* pollen in Córdoba, South Spain. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 22(1), 96–101. <https://doi.org/10.5604/12321966.1141376>
- Alché, J., Castro, A. J., Olmedilla, A., Fernández, M., Rodríguez, R., Villalba, M., & Rodríguez-García, I. (1999). The major olive pollen allergen (Ole e 1) shows both gametophytic and sporophytic expression during anther development, and its synthesis and storage takes place in the RER. *Journal of Cell Science*, 112, 2501–2509.
- Aloisi, I., Del Duca, S., De Nuntiis, P., Vega Maray, A. M., Mandrioli, P., Gutiérrez, P., & Fernández-González, D. (2018). Behavior of profilins in the atmosphere and in vitro, and their relationship with the performance of airborne pollen. *Atmospheric Environment*, 178, 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.01.051>
- Asam, C., Hofer, H., Wolf, M., Aglas, L., & Wallner, M. (2015). Tree pollen allergens - An update from a molecular perspective. *Allergy: European Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 70(10), 1201–1211. <https://doi.org/10.1111/all.12696>
- Barnes, C. S. (2018). Impact of Climate Change on Pollen and Respiratory Disease. *Current Allergy and Asthma Reports*, 18(11), 59. <https://doi.org/10.1007/s11882-018-0813-7>
- Buters, J., Prank, M., Sofiev, M., Pusch, G., Albertini, R., Annesi-Maesano, I., ... Cecchi, L. (2015). Variation of the group 5 grass pollen allergen content of airborne pollen in relation to geographic location and time in season. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 136, 87–95.e6. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2015.01.049>
- Buters, J. T. M., Antunes, C., Galveias, A., Bergmann, K. C., Thibaudon, M., Galán, C., ... Oteros, J. (2018). Pollen and spore monitoring in the world. *Clinical and Translational Allergy*, 8:9. <https://doi.org/10.1186/s13601-018-0197-8>
- Buters, J. T. M., Thibaudon, M., Smith, M., Kennedy, R., Rantio-Lehtimäki, A., Albertini, R., ... Cecchi, L. (2012). Release of Bet v 1 from birch pollen from 5 European

Capítulo III. Patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

- countries. Results from the HIALINE study. *Atmospheric Environment*, 55, 496–505. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.054>
- Cariñanos, P., & Casares-Porcel, M. (2011). Urban green zones and related pollen allergy: A review. Some guidelines for designing spaces with low allergy impact. *Landscape and Urban Planning*, 101, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.006>
- Cecchi, L., D'Amato, G., Ayres, J. G., Galan, C., Forastiere, F., Forsberg, B., ... Annesi-Maesano, I. (2010). Projections of the effects of climate change on allergic asthma: the contribution of aerobiology. *Allergy*, 65, 1073–1081. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2010.02423.x>
- CEN/TS 16868. (2015). Ambient air - Sampling and analysis of airborne pollen grains and fungal spores for networks related to allergy - Volumetric Hirst method.
- Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E., & Terpenning, I. (1990). STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, Vol. 6, pp. 3–73. <https://doi.org/citeulike-article-id:1435502>
- Cresti, M., & Linskens, H. F. (2000). Pollen-allergy as an ecological phenomenon: A review. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 134(3), 341–352. <https://doi.org/10.1080/11263500012331350495>
- Crouzy, B., Stella, M., Konzelmann, T., Calpini, B., & Clot, B. (2016). All-optical automatic pollen identification: Towards an operational system. *Atmospheric Environment*, 140, 202–212. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.062>
- D'Amato, G., Cecchi, L., Bonini, S., Nunes, C., Annesi-Maesano, I., Behrendt, H., ... van Cauwenberge, P. (2007). Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy*, 62(9), 976–990. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2007.01393.x>
- D'Amato, Gennaro, & Cecchi, L. (2008). Effects of climate change on environmental factors in respiratory allergic diseases Clinical and Experimental Allergy. *Clinical and Experimental Allergy*, 38, 1264–1274. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2008.03033.x>
- Damialis, A., Häring, F., Gökkaya, M., Rauer, D., Reiger, M., Bezold, S., ... Traidl-Hoffmann, C. (2019). Human exposure to airborne pollen and relationships with symptoms and immune responses: Indoors versus outdoors, circadian patterns and meteorological effects in alpine and urban environments. *Science of The Total Environment*, 653, 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.366>

Capítulo III. Patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

- De Linares, C., Díaz de la Guardia, C., Nieto Lugilde, D., & Alba, F. (2010). Airborne Study of Grass Allergen (Lol p 1) in Different-Sized Particles. *International Archives of Allergy and Immunology*, 152, 49–57. <https://doi.org/10.1159/000260083>
- De Linares, Concepción, Alcázar, P., Valle, A. M., Díaz de la Guardia, C., & Galán, C. (2019). *Parietaria* major allergens vs pollen in the air we breathe. *Environmental Research*, 176, 108514. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.05.045>
- Durham, S. R., Nelson, H. S., Nolte, H., Bernstein, D. I., Creticos, P. S., Li, Z., & Andersen, J. S. (2014). Magnitude of efficacy measurements in grass allergy immunotherapy trials is highly dependent on pollen exposure. *Allergy*, 69, 617–623. <https://doi.org/10.1111/all.12373>
- European Academy of Allergy and Clinical & Immunology. (2015). The European Academy of Allergy and Clinical Immunology (EAACI) Advocacy Manifesto Tackling the Allergy Crisis in Europe- Concerted Policy Action Needed.
- Fernández-González, D., Rodríguez Rajo, F. J., González Parrado, Z., Valencia Barrera, R. M., Jato, V., & Moreno-Grau, S. (2011). Differences in atmospheric emissions of Poaceae pollen and Lol p 1 allergen. *Aerobiologia*, 27, 301–309. <https://doi.org/10.1007/s10453-011-9199-x>
- Fernández-González, M., Guedes, A., Abreu, I., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2013). Pla a_1 aeroallergen immunodetection related to the airborne *Platanus* pollen content. *Science of The Total Environment*, 463–464, 855–860. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.062>
- Fernández-González, M., Ribeiro, H., Pereira, J. R. S., Rodríguez-Rajo, F. J., & Abreu, I. (2019a). Assessment between *Platanus* pollen and Pla a 1 allergen in two cities of North-western Iberian Peninsula. *Aerobiologia*, 35(3), 463–475. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09576-0>
- Fernández-González, M., Ribeiro, H., Pereira, J. R. S., Rodríguez-Rajo, F. J., & Abreu, I. (2019b). Assessment of the potential real pollen related allergenic load on the atmosphere of Porto city. *Science of The Total Environment*, 668, 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.345>
- Fröhlich-Nowoisky, J., Kampf, C. J., Weber, B., Huffman, J. A., Pöhlker, C., Andreae, M. O., ... Pöschl, U. (2016). Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions. *Atmospheric Research*, 182, 346–376. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.018>
- Galán, C., Smith, M., Thibaudon, M., Frenguelli, G., Oteros, J., Gehrig, R., ... Brandao, R. (2014). Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia*, 30, 385–395. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9335-5>

Capítulo III. Patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

- García-Mozo, H. (2017). Poaceae pollen as the leading aeroallergen worldwide: A review. *Allergy*, 72, 1849–1858. <https://doi.org/10.1111/all.13210>
- González-Parrado, Z., Fernández-González, D., Camazón, B., Valencia-Barrera, R., Vega-Maray, A., Asturias, J. A., ... Mandrioli, P. (2014). Molecular aerobiology – *Plantago* allergen Pla 1 in the atmosphere. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 21(2), 282–289. <https://doi.org/10.5604/1232-1966.1108592>
- Hirst, J. M. (1952). An automatic volumetric spore trap. *Annals of Applied Biology*, 39, 527–265.
- Jones, N. R., Agnew, M., Banic, I., Grossi, C. M., Colón-González, F. J., Plavec, D., ... Lake, I. R. (2019). Ragweed pollen and allergic symptoms in children: Results from a three-year longitudinal study. *Science of The Total Environment*, 683, 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.284>
- Karatzas, K. D. (2009). Informing the public about atmospheric quality: air pollution and pollen. *Allergo Journal*, 18, 212–217. <https://doi.org/10.1007/BF03362059>
- Lake, I. R., Jones, N. R., Agnew, M., Goodess, C. M., Giorgi, F., Hamaoui-Laguel, L., ... 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-Badia, 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>
- 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 Forestry & Urban Greening*, 27, 352–362. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.09.009>
- Moreno-Grau, S., Aira, M. J., Elvira-Rendueles, B., Fernández-González, M., Fernández-González, D., García-Sánchez, A., ... Rodríguez-Rajo, F. J. (2016). Assessment of the *Olea* pollen and its major allergen Ole e 1 concentrations in the bioaerosol of two biogeographical areas. *Atmospheric Environment*, 145, 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.040>
- Moreno-Grau, S., Elvira-Rendueles, B., Moreno, J., García-Sánchez, A., Vergara, N., Asturias, J. A., ... Suárez-Cervera, M. (2006). Correlation between *Olea europaea* and *Parietaria judaica* pollen counts and quantification of their major allergens Ole e 1 and Par j 1-Par j 2. *Annals of Allergy, Asthma and Immunology*, 96(6), 858–864.

Capítulo III. Patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

- [https://doi.org/10.1016/S1081-1206\(10\)61350-6](https://doi.org/10.1016/S1081-1206(10)61350-6)
- Motta, A. C., Marliere, M., Peltre, G., Sterenberg, P. A., & Lacroix, G. (2006). Traffic-Related Air Pollutants Induce the Release of Allergen-Containing Cytoplasmic Granules from Grass Pollen. *International Archives of Allergy and Immunology*, 139, 294–298. <https://doi.org/10.1159/000091600>
- Oteros, J., García-Mozo, H., Alcázar, P., Belmonte, J., Bermejo, D., Boi, M., ... Galán, C. (2015). A new method for determining the sources of airborne particles. *Journal of Environmental Management*, 155, 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.037>
- Oteros, J., Pusch, G., Weichenmeier, I., Heimann, U., Möller, R., Röseler, S., ... Buters, J. T. M. (2015). Automatic and Online Pollen Monitoring. *International Archives of Allergy and Immunology*, 167, 158–166. <https://doi.org/10.1159/000436968>
- Pawankar, R., Walter Canonica, G., Holgate, S. T., Lockey, R. F., & Blaiss, M. S. (2013). World Allergy Organization (WAO). White Book on Allergy: Update 2013.
- Pérez-Badia, R., Rapp, A., Morales, C., Sardinero, S., Galán, C., & García-Mozo, H. (2010). Pollen spectrum and risk of pollen allergy in central Spain. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 17, 139–151.
- Pérez-Badia, R., Rapp, A., Vaquero, C., & Fernández-González, F. (2011). Aerobiological Study in East-Central Iberian Peninsula: pollen diversity and dynamics for mayor taxa. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 18, 99–111.
- Pérez, C. F., Gassmann, M. I., & Covi, M. (2009). An evaluation of the airborne pollen–precipitation relationship with the superposed epoch method. *Aerobiologia*, 25, 313–320. <https://doi.org/10.1007/s10453-009-9135-5>
- Pfaar, O., Karatzas, K., Bastl, K., Berger, U., Buters, J., Darsow, U., ... 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.14111. <https://doi.org/10.1111/all.14111>
- Plaza, M. P., Alcázar, P., & Galán, C. (2016). Correlation between airborne *Olea europaea* pollen concentrations and levels of the major allergen Ole e 1 in Córdoba, Spain, 2012–2014. *International Journal of Biometeorology*, 60, 1841–1847. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1171-6>
- Plaza, M. P., Alcázar, P., Hernández-Ceballos, M. A., & Galán, C. (2016). Mismatch in aeroallergens and airborne grass pollen concentrations. *Atmospheric Environment*, 144, 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.008>

Capítulo III. Patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

- Plaza, M. P., Alcázar, P., Velasco-Jiménez, M. J., & Galán, C. (2017). Aeroallergens: a comparative study of two monitoring methods. *Aerobiologia*, 33, 363–373. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9475-5>
- Qazi, S., Iqbal, J., & Khan, J. A. (2019). Assessment of the health impact of paper mulberry (*Broussonetia papyrifera* L.), an invasive plant species in Islamabad, Pakistan. *Geospatial Health*, 14(727), 340–350. <https://doi.org/10.4081/gh.2019.727>
- R Core Team. (2019). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <https://www.R-project.org/>.
- Reinmuth-Selzle, K., Kampf, C. J., Lucas, K., Lang-Yona, N., Fröhlich-Nowoisky, J., Shiraiwa, M., ... Pöschl, U. (2017). Air Pollution and Climate Change Effects on Allergies in the Anthropocene: Abundance, Interaction, and Modification of Allergens and Adjuvants. *Environmental Science & Technology*, 51, 4119–4141. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04908>
- Rivas-Martínez, S., Aguiar, C., Aguilera, A., Alonso, R., Alvarez, M., Amich, F., ... Bartolome, C. (2011). Map of series, geoseries and geopermaseries of vegetation in Spain. *Itinera Geobotanica*, 18(II), 1–764.
- Rodríguez-Rajo, F. J., Jato, V., González-Parrado, Z., Elvira-Rendueles, B., Moreno-Grau, S., Vega-Maray, A., ... Suárez-Cervera, M. (2011). The combination of airborne pollen and allergen quantification to reliably assess the real pollinosis risk in different bioclimatic areas. *Aerobiologia*, 27, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10453-010-9170-2>
- Rojo, J., Orlandi, F., Pérez-Badia, R., Aguilera, F., Ben Dhiab, A., Bouziane, H., ... Fornaciari, M. (2016). Modeling olive pollen intensity in the Mediterranean region through analysis of emission sources. *Science of The Total Environment*, 551–552, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.193>
- Rojo, J., Oteros, J., Pérez-Badia, R., Cervigón, P., Ferencova, Z., Gutiérrez-Bustillo, A. M., ... Buters, J. (2019). Near-ground effect of height on pollen exposure. *Environmental Research*, 174, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.027>
- 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. *Science of The Total Environment*, 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-Badia, R. (2016). Characterisation of the airborne pollen spectrum in Guadalajara (central Spain) and estimation of the potential allergy risk. *Environmental Monitoring and*

Capítulo III. Patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

- Assessment*, 188, 130. 101–112. <https://doi.org/10.1007/s00497-005-0002-4>
<https://doi.org/10.1007/s10661-016-5129-2>
- Sénéchal, H., Visez, N., Charpin, D., Shahali, Y., Peltre, G., Biolley, J.-P., ... Sutra, J.-P. (2015). A Review of the Effects of Major Atmospheric Pollutants on Pollen Grains, Pollen Content, and Allergenicity. *The Scientific World Journal*, 2015, 1–29. <https://doi.org/10.1155/2015/940243>
- Smith, P. M., Ong, E. K., Knox, R. B., & Singh, M. B. (1994). Immunological relationships among group I and group V allergens from grass pollen. *Molecular Immunology*, 31(6), 491–498. [https://doi.org/10.1016/0161-5890\(94\)90068-X](https://doi.org/10.1016/0161-5890(94)90068-X)
- Spieksma, F. T. M., & Nikkels, A. H. (1999). Similarity in seasonal appearance between atmospheric birch-pollen grains and allergen in paucimicronic, size-fractionated ambient aerosol. *Allergy*, 54, 235–241. <https://doi.org/10.1034/j.1398-9995.1999.00817.x>
- Suárez-Cervera, M., Asturias, J. A., Vega-Maray, A., Castells, T., López-Iglesias, C., Ibarrola, I., ... Seoane-Camba, J. A. (2005). The role of allergenic proteins Pla a 1 and Pla a 2 in the germination of *Platanus acerifolia* pollen grains. *Sexual Plant Reproduction*, 18, 101–112. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09616-9>
- Takahashi, Y., Ohashi, T., Nagoya, T., Sakaguchi, M., Yasueda, H., & Nitta, H. (2001). Possibility of real-time measurement of an airborne *Cryptomeria japonica* pollen allergen based on the principle of surface plasmon resonance. *Aerobiologia*, 17, 313–318.
- Vara, A., Fernández-González, M., Aira, M. J., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2016). Fraxinus pollen and allergen concentrations in Ourense (South-western Europe). *Environmental Research*, 147, 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.014>
- Visez, N., Chassard, G., Azarkan, N., Naas, O., Sénéchal, H., Sutra, J.-P., ... Choël, M. (2015). Wind-induced mechanical rupture of birch pollen: Potential implications for allergen dispersal. *Journal of Aerosol Science*, 89, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.07.005>
- Visez, N., Ivanovsky, A., Roose, A., Gosselin, S., Sénéchal, H., Poncet, P., & Choël, M. (2019). Atmospheric particulate matter adhesion onto pollen: a review. *Aerobiologia*, 9. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09616-9>

7. Discusión general

En esta Tesis Doctoral se realiza un análisis detallado de los factores que determinan la incidencia del polen y alérgenos de una especie ornamental ampliamente cultivada en los espacios verdes urbanos, el plátano de sombra (*Platanus orientalis* var. *acerifolia*).

En este contexto, el estudio de la flora ornamental de las ciudades se puede llevar a cabo desde diversos puntos de vista. La flora y la vegetación de los espacios verdes en el interior de las ciudades proporcionan importantes servicios que favorecen la calidad de vida de los ciudadanos (Escobedo, Kroeger, & Wagner, 2011; Fischer et al., 2018; Sugiyama, Carver, Koohsari, & Veitch, 2018) y una adecuada selección de las especies botánicas empleadas para el diseño de parques y jardines es muy importante (Churkina, Grote, Butler, & Lawrence, 2015; Vogt et al., 2017). En cambio, la elección de determinadas especies puede provocar aspectos negativos como son los costes económicos asociados a la limpieza de los residuos generados por las plantas ornamentales, problemas ecológicos producidos por flora invasora o problemas de salud pública derivados de la emisión de aeroalérgenos y compuestos orgánicos volátiles (Cariñanos, Calaza-Martínez, O'Brien, & Calfapietra, 2017; Eisenman et al., 2019; Potgieter et al., 2017; Ren et al., 2017).

Desde el punto de la salud pública, el estudio del riesgo de alergia asociado a los aeroalérgenos procedentes de especies ornamentales está tomando mayor relevancia (Rufo, Paciência, & Ribeiro, 2019) y, este aspecto, ha sido incluido como directriz para la gestión y el diseño de nuevas zonas verdes en las ciudades (Cariñanos, Casares-Porcel, et al., 2017). Desde la visión más científica del problema, diversos aspectos de la abundancia y la biología reproductiva de la flora ornamental pueden ser analizados para evaluar el riesgo alérgico de especies tan extendidas en los parques y jardines como es el plátano de sombra (*Platanus orientalis* var. *acerifolia*). Estos aspectos se listan a continuación:

- Abundancia y distribución de la flora que constituye la fuente de emisión polínica (en este caso ejemplares de plátano de sombra) en los espacios verdes urbanos.
- Variaciones a largo plazo de las concentraciones de polen en el aire producidas por los cambios en los usos del territorio y, en concreto, en la planificación urbana y de los espacios verdes, así como en la tasa de producción de polen por parte del arbolado dependiendo de su estructura, edad, etc.

- Estacionalidad de las concentraciones de polen de plátano de sombra y oscilaciones a corto plazo de estas concentraciones producidas por la existencia de variaciones en las variables meteorológicas que influyen en la emisión y dispersión polínica.
- Contenido alergénico del polen de plátano de sombra, así como el estudio de la influencia de los patrones ambientales en relación a las concentraciones de polen y la carga alergénica atmosférica.

En las últimas décadas se ha observado una tendencia creciente en las concentraciones de polen atmosférico de determinadas especies, incluidos algunos taxones alergénicos. El aumento en las concentraciones de polen, con su consecuente aumento de la exposición de las personas sensibles a los alérgenos del polen, implica graves consecuencias para la salud pública. En general, se ha observado una tendencia creciente en la mayoría de los países europeos para la producción polínica de la mayoría de especies arbóreas anemófilas como el plátano de sombra, cupresáceas, betuláceas, fagáceas u oleáceas (Galán et al., 2016; Ziello et al., 2012). En el caso de especies herbáceas, las concentraciones polínicas no muestran una clara tendencia de cambio global, aunque localmente han podido observarse cambios significativos en la producción de polen de gramíneas, amarantáceas u otras especies (Bruffaerts et al., 2018; Fernández-Rodríguez et al., 2016a; Galán et al., 2016; García-Mozo et al., 2010; Oduber et al., 2019; Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018).

La tendencia observada en la producción de polen de especies arbóreas puede atribuirse a factores climáticos, como es la considerable subida de las temperaturas como consecuencia del cambio climático (Ziska et al., 2019), pero también a cambios en las actividades humanas. La alteración de las condiciones ambientales fomenta diferentes procesos endógenos de adaptación al clima para las plantas, que se encuentran relacionados con la sincronización entre los ciclos de vida de las especies y los patrones ambientales, y cambios en las tasas vegetativas y reproductoras que tienen un efecto significativo en la producción y emisión de polen a la atmósfera (Fu et al., 2015; Ziska, Epstein, & Schlesinger, 2009). Por otra parte, las especies agronómicas y ornamentales pueden mostrar tendencias más influenciadas por el uso antrópico del territorio y los cambios en la superficie vegetal (García-Mozo, Oteros, & Galán, 2016; Hjort et al., 2016), y no tanto por cambios en las condiciones climáticas. En este sentido, diferentes usos del suelo pueden dar lugar al predominio de diferentes especies y tipos de vegetación que dan

lugar a espectros polínicos localmente característicos (Rojo et al., 2020; Rojo, Rapp, Lara, Fernández-González, & Pérez-Badía, 2015).

El polen de plátano de sombra presenta una clara tendencia creciente tanto en relación con el polen total anual (API) como en relación con el número de días de riesgo alérgico (días con más de 50 granos de polen/m³) en el centro de la península Ibérica (Capítulo I). La relación entre esta tendencia de aumento de las cantidades de polen observada en nuestros resultados y las variaciones en cuanto a la superficie ocupada por el arbolado fue estudiada mediante el análisis de la evolución en el número de árboles de plátano de sombra en la ciudad de Toledo durante las últimas dos décadas. Este trabajo ha permitido contrastar la hipótesis de que el incremento del riesgo alérgico al polen de *Platanus* está principalmente relacionado con la evolución en el incremento del número de árboles de plátano de sombra en las ciudades. Este argumento ya había sido puesto de manifiesto previamente (Alcázar et al., 2011; Cariñanos & Casares-Porcel, 2011), aunque no apoyado por resultados empíricos como es el inventario del número de árboles como se documenta en este trabajo (Capítulo I). Además, se deben considerar otros factores relevantes que pueden influir en la concentración polínica como son el tamaño y la madurez del arbolado o factores ambientales que afectan a los patrones de emisión y dispersión polínica (Alcázar et al., 2011; Charalampopoulos, Lazarina, Tsiripidis, & Vokou, 2018; Maya-Manzano et al., 2017).

En el caso de las especies ornamentales como el plátano de sombra, el estudio de los cambios en el uso del suelo de las zonas verdes urbanas unido al análisis de la concentración polínica de esa especie permite interpretar el riesgo potencial de los espacios verdes urbanos a lo largo del tiempo (Hjort et al., 2016). Esto permite identificar las zonas donde se encuentran las fuentes emisoras para plantear recomendaciones específicas y obtener un diseño de los nuevos espacios verdes más eficiente y menos perjudicial para los ciudadanos alérgicos (Churkina et al., 2015; Vogt et al., 2017).

La naturaleza ornamental que presenta el plátano de sombra en el área de Europa occidental confiere a esta especie un carácter muy local dentro de las ciudades y con una dispersión del polen que se produce a cortas distancias a escala urbana (Adams-Groom, Skjøth, Baker, & Welch, 2017; Gonzalo-Garijo, Tormo-Molina, Muñoz-Rodríguez, & Silva-Palacios, 2006; Rojo et al., 2019). Además, las extensiones monoespecíficas de esta especie son muy comunes en las ciudades ocupando grandes superficies dominadas por

el plátano de sombra o formando alineaciones en paseos y avenidas. Lara et al. (2017) destacaron la baja diversidad florística de los parques y jardines de la ciudad de Toledo, donde el 50% del volumen vegetal de los principales parques pertenecía a un máximo de tres familias taxonómicas. Además, una de las especies más abundantes en los principales parques y jardines de Toledo es el plátano de sombra, la cual destacó por su importante contribución al riesgo alérgico potencial de estos espacios verdes (Lara et al., 2017). Esta gran abundancia de plátanos de sombra en el centro de la península Ibérica unido al carácter alérgico del polen de *Platanus* que supone un relevante riesgo alérgico, provoca que la adecuación de la especie del plátano de sombra para el diseño y la planificación de los espacios verdes urbanos deba ser tratada (Jochner-Oette, Stitz, Jetschni, & Cariñanos, 2018).

Sin embargo, como se deriva de nuestros resultados, el incremento de riesgo alérgico de la flora ornamental ya es evidente (Capítulo I) y, por lo tanto, se debe hacer frente a los problemas derivados de las plantaciones ya existentes. Cariñanos et al. (2017) plantearon diversas soluciones relacionadas con la gestión de la flora urbana para la reducción de la alergenidad potencial en los espacios verdes urbanos. Una de las principales prácticas de gestión, que son realizadas sobre los especímenes de plátano de sombra presentes en los espacios verdes urbanos, es la realización de podas periódicas (Aronson et al., 2017; Nowak, 1990). Este tipo de actuaciones permite evitar el crecimiento excesivo de determinadas especies y eliminar ramas muertas o en descomposición para evitar los riesgos asociados a la posible caída. Sin embargo, los patrones de poda también repercuten en los patrones de emisión polínica por lo que conocer cuándo y dónde se realizan es importante para la interpretación de los datos aerobiológicos y el desarrollo de los modelos de predicción de la concentración polínica como se verá a continuación (Capítulo II).

La importancia del análisis de la evolución en el número de individuos de especies alérgicas en las zonas verdes urbanas y la gestión que se realiza sobre esas especies queda evidenciada en la tendencia creciente en la cantidad de polen de *Platanus* (Capítulo I). Además de esta tendencia positiva, en la dinámica polínica del plátano de sombra se observó un patrón cíclico cada tres años en la emisión polínica relacionado con la periodicidad de las podas realizadas en la ciudad de Toledo. Este patrón fue caracterizado por la presencia de dos años de elevada concentración polínica seguido por un año con

menor concentración que creemos asociado a años con intensa actividad de poda en los plátanos de sombra de la ciudad.

Las concentraciones de polen en el aire están gobernadas por la oscilación diaria de variables meteorológicas como la temperatura, la humedad relativa, la precipitación, la dirección del viento, etc. (Rojo et al., 2015; Voukantsis et al., 2010), las cuales se encuentran involucradas en los procesos de emisión y dispersión del polen (Cresti & Linskens, 2000; Jones & Harrison, 2004). En ese sentido, en el capítulo II se ha estudiado la relación entre las variables meteorológicas y las variaciones diarias en la concentración polínica para realizar modelos de predicción del riesgo alérgico de plátano de sombra (Sabariego, Cuesta, Fernández-González, & Pérez-Badia, 2012; Silva-Palacios et al., 2016).

En especies anemófilas, elevadas temperaturas junto con la baja humedad ambiental y una moderada velocidad del viento favorece el proceso de deshidratación pasiva que fomenta el proceso de antesis y la liberación del polen en las anteras (Dahl et al., 2013). Según los resultados de nuestro trabajo (Capítulo II), la temperatura máxima y mínima, la precipitación y la humedad relativa registradas durante los días previos son las variables que mayor relación presentan con las variaciones diarias en las concentraciones de polen de plátano de sombra en la ciudad de Toledo. Sin embargo, en general existe una influencia gradual que disminuye en intensidad cuando el retardo se establece con un mayor número de días.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se han desarrollado diferentes modelos de predicción de la concentración diaria de polen de *Platanus* realizando un procedimiento de descomposición de series temporales basado en el algoritmo LOESS en combinación con la predicción de las variaciones a corto plazo basadas en las variables meteorológicas. Aplicar la descomposición de series temporales en el diseño de modelos de predicción polínica es una herramienta eficaz para analizar los factores biológicos y ambientales que influyen en las concentraciones de polen en el aire (Lara, Rojo, Fernández-González, & Pérez-Badia, 2019; Rojo, Rivero, Romero-Morte, Fernández-González, & Pérez-Badia, 2017). Entre las ventajas de combinar un análisis de series temporales con un análisis de inferencia mediante un método de regresión para la predicción de la concentración polínica, se encuentra la posibilidad de agrupar en un mismo modelo características de variación estacional a largo y medio plazo relacionadas con cambios producidos a corto

plazo como consecuencia de variaciones meteorológicas (María Fernández-González, Ramos-Valcárcel, Aira, & Rodríguez-Rajo, 2016; Iglesias-Otero et al., 2015).

En ocasiones resulta adecuado combinar factores biológicos y meteorológicos en la construcción de modelos de predicción (Dahl et al., 2013). En el caso de especies ornamentales, pueden además incorporarse factores antrópicos como el manejo de las plantaciones debido a que estas especies están menos expuestas a los procesos adaptativos naturales (estrategias fenológicas y fisiológicas) desencadenados frente a factores de estrés (disponibilidad de agua, temperaturas extremas...) (Cariñanos, Galan, Alcázar, & Domínguez, 2004). La visión integradora del modelo de regresión que aquí se presenta permite considerar el patrón cíclico observado cada tres años que caracteriza la estación polínica de plátano de sombra en Toledo (Capítulo II). Este patrón trienal que muy posiblemente está asociado a un manejo humano con un patrón de podas periódicas, no podría ser considerado sin incluir características propias de la serie temporal de datos como es la estacionalidad.

Una muestra de las ventajas de utilizar este tipo de aproximación estadística fue que los modelos de predicción que mejores resultados obtuvieron fueron indistintamente los obtenidos con un ciclo anual y variables predictoras de 1-3 días previos o con el ciclo trienal y variables predictoras de 7-9 días previos (Capítulo II). Esto destaca la eficacia del análisis de series temporales de datos aerobiológicos para mejorar los modelos de predicción mediante el uso de patrones periódicos conocidos y así obtener predicciones con antelación suficiente para alertar a la población sensible para que tome las medidas adecuadas para minimizar el impacto de las concentraciones de polen (Lara et al., 2019). Los modelos de predicción de concentraciones polínicas frecuentemente utilizan como variable predictora la propia concentración de polen de días anteriores. Esto provoca limitaciones en la disponibilidad de datos debido a que no es posible su obtención en tiempo real y es necesario que trascorra al menos 1 día para la realización del recuento polínico. Por ello, una de las bondades de los modelos de predicción de riesgo alérgico es su aplicación con la mayor antelación posible (Fernández-Rodríguez et al., 2016b; Voukantsis et al., 2010; Wozniak & Steiner, 2017).

Considerando que el principal objetivo de la modelización aerobiológica es la estimación anticipada de las variaciones diarias y la representatividad de los picos polínicos de elevada concentración, estos modelos permiten identificar adecuadamente

los periodos de mayor riesgo alérgico. Hay que tener en cuenta que es frecuente encontrar limitaciones en la predicción de concentraciones inusualmente elevadas que suelen quedar subestimadas por los modelos de predicción ya que no pueden ser explicadas por las condiciones de días previos (Fernández-Rodríguez et al., 2016b). En nuestra serie de datos, durante el año 2014 se registró una concentración máxima de polen de *Platanus* de 3710 granos de polen/m³, precedida por un pico de concentración de 1047 granos de polen/m³. Estos valores, muy superiores a las concentraciones de polen registradas durante los 7 días anteriores (rango de 5-210 granos de polen/m³), son los más elevados de la serie histórica de datos. Sin embargo, las concentraciones estimadas por nuestros modelos superan el umbral de 200 granos de polen/m³ (Capítulo II), nivel de máximo riesgo alérgico para el polen de plátano de sombra, permitiendo identificar correctamente los días en los que una gran proporción de pacientes sensibles desencadenan síntomas alérgicos.

Como se pone de manifiesto en los capítulos I y II de esta Tesis Doctoral, importantes esfuerzos son llevados a cabo para estudiar la dinámica polínica y generar modelos de predicción de riesgo de especies alérgicas basados en índices polínicos. Sin embargo, los síntomas de los pacientes alérgicos se encuentran asociados directamente a la concentración de aeroalérgenos, responsables directos de la sensibilización y de las enfermedades alérgicas (Buters et al., 2012). La presencia de grandes cantidades de polen aumentará considerablemente la probabilidad de encontrar niveles elevados de alérgenos en el aire, sin embargo, los aeroalérgenos también pueden viajar libres o asociados a partículas submicrónicas, una vez que han sido liberados del grano de polen (Fröhlich-Nowoisky et al., 2016; Sénéchal et al., 2015; Visez et al., 2015, 2019). Este hecho puede provocar importantes discordancias entre la concentración polínica y la carga alérgica del aire, además de otros factores como los relacionados con patrones meteorológicos con diferente influencia en polen y alérgenos y problemas metodológicos debido a la reactividad cruzada con alérgenos homólogos (Alan et al., 2018; Buters et al., 2010; Fernández-González et al., 2011; González-Parrado et al., 2014; Moreno-Grau et al., 2016).

En general, la presencia de polen en la atmósfera y la carga alérgica presentan una dinámica paralela (Fernández-González, Ribeiro, Pereira, Rodríguez-Rajo, & Abreu, 2019; Vara, Fernández-González, Aira, & Rodríguez-Rajo, 2016). En nuestro caso, los resultados obtenidos para el polen de plátano de sombra y el alérgeno mayor Pla a 1

muestran una adecuada correspondencia entre las concentraciones de polen y alérgeno (Capítulo III). De la misma manera, los demás tipos polínicos estudiados, olivo y el alérgeno Ole e 1 y gramíneas y los alérgenos Phl p 1 y Phl p 5, muestran una buena correspondencia, lo que evidencia que los niveles de exposición polínica en el aire son útiles como índice de riesgo para los sistemas de alerta sanitaria (Alcázar, Galán, Torres, & Domínguez-Vilches, 2015; Pfaar et al., 2019).

Sin embargo, se ha evidenciado que, aunque las curvas de polen y alérgeno siguen patrones muy similares, se desconoce si los recuentos polínicos estiman la exposición a alérgenos de una manera equivalente (De Linares, Alcázar, Valle, Díaz de la Guardia, & Galán, 2019; Vara et al., 2016). Según nuestro punto de vista, las medidas de polen y alérgenos poseen una naturaleza muy diferente, con sistemas de captación y análisis muy diversos entre sí y, por lo tanto, no se pueden considerar equivalentes. De hecho, con frecuencia se observan importantes discordancias entre la concentración polínica y la carga alérgica en el aire (Buters et al., 2010). No obstante, sí consideramos que ambas medidas son equiparables, lo que permite utilizar la concentración polínica como media de índice de riesgo alérgico. Diversos trabajos previos han demostrado una correlación muy evidente entre la concentración de polen en el aire y los síntomas en personas con cuadros alérgicos (Damialis et al., 2019; Pfaar et al., 2019). Sin embargo, sigue siendo importante estudiar la presencia de alérgenos en el aire con el fin de identificar los patrones ambientales que influyen en la liberación de alérgenos del grano de polen y en su posterior proceso de dispersión y transporte (Capítulo III).

Con el objetivo de estudiar la relación entre las concentraciones de polen y alérgeno, así como analizar los factores meteorológicos que influyen en las divergencias entre las concentraciones de polen y alérgeno se ha desarrollado una metodología novedosa para destacar las diferencias entre la medida de polen y alérgeno compatible con la medida de potencia alérgica (Buters et al., 2015; Plaza, Alcázar, Velasco-Jiménez, & Galán, 2017). Esta metodología se basa en la caracterización de los días a partir de los residuos del análisis de regresión, es decir, los datos situados fuera del intervalo de confianza del 99% de un análisis de regresión entre la situación ideal de correspondencia entre el polen y el alérgeno (Capítulo III). De esta manera, se identifican los casos anómalos fuera del intervalo de confianza de la curva de regresión. La identificación de los casos en los que la concentración de alérgeno es muy superior a la esperada en base a las concentraciones de polen es muy importante desde el punto de vista sanitario pues esos casos implican un

riesgo para las personas sensibles, que puede estar subestimado por los modelos de predicción de polen atmosférico. Además, analizar los factores meteorológicos relacionados con esos casos puede ayudar a aumentar el conocimiento sobre la presencia y dispersión de alérgenos en el aire.

Las variables meteorológicas con clara influencia sobre los casos discrepantes entre polen y alérgenos son la temperatura, la precipitación y la humedad relativa. Sin embargo, hay que considerar la elevada complejidad de la relación entre el polen y el alérgeno cuya presencia en la atmósfera se ve influida por las condiciones meteorológicas registradas durante los días previos y que afectan a las distintas fases del proceso aerobiológico y que, además, puede ser de diferente intensidad para cada partícula (Cresti & Linskens, 2000; Rojo et al., 2015). La mayor influencia de las variables meteorológicas sobre el alérgeno del plátano de sombra, Pla a 1, parece darse durante las etapas de dispersión y deposición del grano de polen (Capítulo III). En estas fases, la humedad relativa juega un papel fundamental en la liberación de proteínas alérgicas del grano de polen de plátano de sombra, al igual que se ha documentado para otros tipos polínicos (Buters et al., 2015; Fernández-González, Ribeiro, Pereira, Rodríguez-Rajo, & Abreu, 2019b; Motta, Marliere, Peltre, Sterenberg, & Lacroix, 2006). El alérgeno Pla a 1 es una proteína involucrada en el desarrollo del tubo polínico y la fecundación y es liberada rápidamente del grano de polen bajo condiciones de hidratación (Aloisi et al., 2018; Suárez-Cervera et al., 2005). Además, en plátano de sombra se ha observado que la mayor influencia meteorológica se produce durante el día de registro del bioaerosol con una disminución gradual hasta pocos días previos. Esto implica un tiempo de transporte muy corto con una gran influencia de las condiciones ambientales locales (Adams-Groom et al., 2017; Rojo et al., 2019).

El patrón de influencia de variables meteorológicas ha sido muy diferente en tipos polínicos procedentes de especies que abundan fuera de las ciudades como es el olivo y las gramíneas. Las diferencias más evidentes observadas en olivo mostraron una mayor influencia de variables como la humedad relativa o la temperatura durante 2-4 días antes del registro de bioaerosol. El polen de olivo se distribuye ampliamente en cultivos alejados del núcleo urbano y posee un polen con elevada capacidad dispersiva haciendo que sea necesario un transporte más largo (Moreno-Grau et al., 2016; Rojo et al., 2016).

Por otro lado, la baja humedad relativa durante el proceso de producción y emisión polínica estaría relacionada con la liberación de polen desde las anteras (D'Amato & Cecchi, 2008; Jones & Harrison, 2004) y, por tanto, una baja humedad relativa puede favorecer en el momento de la emisión una mayor concentración de polen con respecto a la carga alérgica. La complejidad en el efecto de las variables meteorológicas puede dar lugar a resultados contradictorios respecto a la influencia de la humedad sobre la carga alérgica del aire (Alcázar et al., 2015; Buters et al., 2015; Fernández-González et al., 2019a), como hemos encontrado en nuestros resultados entre los tipos polínicos *Platanus*, *Poaceae* y *Olea* (Capítulo III). Por otro lado, la precipitación favorece un proceso de lavado de la atmósfera que provoca la sedimentación de la materia particulada que se mantiene hasta momentos posteriores a los episodios de precipitación (Pérez, Gassmann, & Covi, 2009).

Los tipos polínicos *Poaceae* y *Olea* comparten características que pueden justificar sus similitudes en la respuesta ante los mismos patrones ambientales (Capítulo III). En ambos casos, la estación polínica tiene lugar durante los meses de mayo y junio. Estos meses se caracterizan por un rápido incremento de la temperatura y una disminución de la humedad relativa, factores que favorecen la emisión polínica y la dispersión, aumentando la fracción alérgica (Cresti & Linskens, 2000; D'Amato & Cecchi, 2008; Oteros, García-Mozo, et al., 2015; Rojo et al., 2015, 2016). En gramíneas, la solidez de los resultados se ha puesto de manifiesto al observar el mismo patrón de respuesta a variables meteorológicas para diferentes alérgenos Phl p 1 y Phl p 5; en dos áreas bioclimáticas diferentes, Toledo (España) y Évora (Portugal), y empleando dos sistemas de captación de materia particulada diferentes, captador ciclónico y captador de cascada.

Como conclusión, los resultados derivados de la comparación de concentraciones de polen y alérgenos en nuestro trabajo indican, en general, una adecuada correspondencia entre ambas medidas y, en cualquier caso, los sistemas de alerta sanitaria pueden ser gestionados empleando los datos de concentración polínica en el aire de las ciudades como índice de riesgo (Jones et al., 2019; Qazi, Iqbal, & Khan, 2019). El análisis de las concentraciones de polen permite establecer directrices de riesgo en menos tiempo y de una manera más sencilla y con un menor coste económico, con respecto al estudio específico de la carga alérgica en el aire. Estas ventajas se verían incrementadas en un futuro cuando las redes de monitorización de las concentraciones de polen implanten sistemas automáticos de captación y análisis de las concentraciones de polen en tiempo

real (Crouzy, Stella, Konzelmann, Calpini, & Clot, 2016; Oteros, Pusch, et al., 2015). Los resultados de este trabajo permiten interpretar las medidas de discordancia entre polen y alérgeno, basándonos en el estudio de los patrones de las variables meteorológicas hasta varios días de antelación. El reto en adelante se basará en aplicar los resultados obtenidos entre la relación polen-alérgeno en los modelos de predicción de polen atmosférico y conseguir la validación con las reacciones sintomáticas de los alérgicos. De esta manera se podrán realizar predicciones más reales de riesgo alérgico a plátano de sombra u otros tipos de polen alérgico (Pfaar et al., 2019).

Referencias

- Adams-Groom, B., Skjøth, C. A., Baker, M., & Welch, T. E. (2017). Modelled and observed surface soil pollen deposition distance curves for isolated trees of *Carpinus betulus*, *Cedrus atlantica*, *Juglans nigra* and *Platanus acerifolia*. *Aerobiologia*, 33, 407–416. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9479-1>
- Alan, Ş., Şahin, A. A., Sarışahin, T., Şahin, S., Kaplan, A., & Pınar, N. M. (2018). The effect of geographical and climatic properties on grass pollen and Phl p 5 allergen release. *International Journal of Biometeorology*, 62, 1325–1337. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1536-0>
- Alcázar, P., Galán, C., Torres, C., & Domínguez-Vilches, E. (2015). Detection of airborne allergen (Plata 1) in relation to *Platanus* pollen in Córdoba, South Spain. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 22(1), 96–101. <https://doi.org/10.5604/12321966.1141376>
- Alcázar, P., García-Mozo, H., Trigo, M. del M., Ruiz, L., González-Minero, F. J., Hidalgo, P., ... Galán, C. (2011). *Platanus* pollen season in Andalusia (southern Spain): trends and modeling. *Journal of Environmental Monitoring*, 13, 2502. <https://doi.org/10.1039/c1em10355e>
- Aloisi, I., Del Duca, S., De Nuntiis, P., Vega Maray, A. M., Mandrioli, P., Gutiérrez, P., & Fernández-González, D. (2018). Behavior of profilins in the atmosphere and in vitro, and their relationship with the performance of airborne pollen. *Atmospheric Environment*, 178, 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.01.051>
- Aronson, M. F. J., Lepczyk, C. A., Evans, K. L., Goddard, M. A., Lerman, S. B., MacIvor, J. S., ... Vargo, T. (2017). Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(4), 189–196. <https://doi.org/10.1002/fee.1480>
- Bruffaerts, N., De Smedt, T., Delcloo, A., Simons, K., Hoebeke, L., Verstraeten, C., ... Hendrickx, M. (2018). Comparative long-term trend analysis of daily weather conditions with daily pollen concentrations in Brussels, Belgium. *International Journal of Biometeorology*, 62, 483–491. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1457-3>

- Buters, J., Prank, M., Sofiev, M., Pusch, G., Albertini, R., Annesi-Maesano, I., ... Cecchi, L. (2015). Variation of the group 5 grass pollen allergen content of airborne pollen in relation to geographic location and time in season. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 136, 87-95.e6. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2015.01.049>
- Buters, J. T. M., Thibaudon, M., Smith, M., Kennedy, R., Rantio-Lehtimäki, A., Albertini, R., ... Cecchi, L. (2012). Release of Bet v 1 from birch pollen from 5 European countries. Results from the HIALINE study. *Atmospheric Environment*, 55, 496–505. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.054>
- Buters, J. T. M., Weichenmeier, I., Ochs, S., Pusch, G., Kreyling, W., Boere, A. J. F., ... Behrendt, H. (2010). The allergen Bet v 1 in fractions of ambient air deviates from birch pollen counts. *Allergy*, 65(7), 850–858. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2009.02286.x>
- Cariñanos, P., Calaza-Martínez, P., O'Brien, L., & Calfapietra, C. (2017). The Cost of Greening: Disservices of Urban Trees. In D. Pearlmutter, C. Calfapietra, R. Samson, L. O'Brien, S. Krajter Ostoić, G. Sanesi, & R. Alonso del Amo (Eds.), *The Urban Forest* (pp. 79–87). https://doi.org/10.1007/978-3-319-50280-9_9
- Cariñanos, P., & Casares-Porcel, M. (2011). Urban green zones and related pollen allergy: A review. Some guidelines for designing spaces with low allergy impact. *Landscape and Urban Planning*, 101, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.006>
- Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., Díaz de la Guardia, C., Aira, M. J., Belmonte, J., Boi, M., ... 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., Galan, C., Alcázar, P., & Domínguez, E. (2004). Airborne pollen records response to climatic conditions in arid areas of the Iberian Peninsula. *Environmental and Experimental Botany*, 52, 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2003.11.008>
- Charalampopoulos, A., Lazarina, M., Tsiropidis, I., & Vokou, D. (2018). Quantifying the relationship between airborne pollen and vegetation in the urban environment. *Aerobiologia*, 34, 285–300. <https://doi.org/10.1007/s10453-018-9513-y>

- Churkina, G., Grote, R., Butler, T. M., & Lawrence, M. (2015). Natural selection? Picking the right trees for urban greening. *Environmental Science & Policy*, 47, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.10.014>
- Cresti, M., & Linskens, H. F. (2000). Pollen-allergy as an ecological phenomenon: A review. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 134(3), 341–352. <https://doi.org/10.1080/11263500012331350495>
- Crouzy, B., Stella, M., Konzelmann, T., Calpini, B., & Clot, B. (2016). All-optical automatic pollen identification: Towards an operational system. *Atmospheric Environment*, 140, 202–212. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.062>
- D'Amato, G., & Cecchi, L. (2008). Effects of climate change on environmental factors in respiratory allergic diseases. *Clinical and Experimental Allergy*, 38, 1264–1274. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2008.03033.x>
- Dahl, Å., Galán, C., Hajkova, L., Pauling, A., Sikoparija, B., Smith, M., & Vokou, D. (2013). The Onset, Course and Intensity of the Pollen Season. In M. Sofiev & K.-C. Bergmann (Eds.), *Allergenic Pollen* (pp. 29–70). https://doi.org/10.1007/978-94-007-4881-1_3
- Damialis, A., Häring, F., Gökkaya, M., Rauer, D., Reiger, M., Bezold, S., ... Traidl-Hoffmann, C. (2019). Human exposure to airborne pollen and relationships with symptoms and immune responses: Indoors versus outdoors, circadian patterns and meteorological effects in alpine and urban environments. *Science of The Total Environment*, 653, 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.366>
- De Linares, C., Alcázar, P., Valle, A. M., Díaz de la Guardia, C., & Galán, C. (2019). *Parietaria* major allergens vs pollen in the air we breathe. *Environmental Research*, 176, 108514. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.05.045>
- Eisenman, T. S., Churkina, G., Jariwala, S. P., Kumar, P., Lovasi, G. S., Pataki, D. E., ... Whitlow, T. H. (2019). Urban trees, air quality, and asthma: An interdisciplinary review. *Landscape and Urban Planning*, 187, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.02.010>
- Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159, 2078–2087. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010>

- Fernández-González, D., Rodríguez Rajo, F. J., González Parrado, Z., Valencia Barrera, R. M., Jato, V., & Moreno-Grau, S. (2011). Differences in atmospheric emissions of Poaceae pollen and Lol p 1 allergen. *Aerobiologia*, 27, 301–309. <https://doi.org/10.1007/s10453-011-9199-x>
- Fernández-González, M., Ribeiro, H., Pereira, J. R. S., Rodríguez-Rajo, F. J., & Abreu, I. (2019a). Assessment between *Platanus* pollen and Pla a 1 allergen in two cities of North-western Iberian Peninsula. *Aerobiologia*, 35(3), 463–475. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09576-0>
- Fernández-González, M., Ribeiro, H., Pereira, J. R. S., Rodríguez-Rajo, F. J., & Abreu, I. (2019b). Assessment of the potential real pollen related allergenic load on the atmosphere of Porto city. *Science of The Total Environment*, 668, 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.345>
- Fernández-González, María, Ramos-Valcárcel, D., Aira, M., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2016). Prediction of biological sensors appearance with ARIMA models as a tool for Integrated Pest Management protocols. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 23(1), 129–137. <https://doi.org/10.5604/12321966.1196868>
- Fernández-Rodríguez, S., Durán-Barroso, P., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J. M., & Gonzalo-Garijo, Á. (2016a). Forecast model of allergenic hazard using trends of Poaceae airborne pollen over an urban area in SW Iberian Peninsula (Europe). *Natural Hazards*, 84, 121–137. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2411-0>
- Fernández-Rodríguez, S., Durán-Barroso, P., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J. M., & Gonzalo-Garijo, Á. (2016b). Regional forecast model for the *Olea* pollen season in Extremadura (SW Spain). *International Journal of Biometeorology*, 60, 1509–1517. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1141-z>
- Fischer, L. K., Honold, J., Botzat, A., Brinkmeyer, D., Cvejić, R., Delshammar, T., ... Kowarik, I. (2018). Recreational ecosystem services in European cities: Sociocultural and geographical contexts matter for park use. *Ecosystem Services*, 31, 455–467. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.01.015>
- Fröhlich-Nowoisky, J., Kampf, C. J., Weber, B., Huffman, J. A., Pöhlker, C., Andreae, M. O., ... Pöschl, U. (2016). Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem

- interactions. *Atmospheric Research*, 182, 346–376. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.018>
- Fu, Y. H., Zhao, H., Piao, S., Peaucelle, M., Peng, S., Zhou, G., ... Janssens, I. A. (2015). Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 526, 104–107. <https://doi.org/10.1038/nature15402>
- Galán, C., Alcázar, P., Oteros, J., García-Mozo, H., Aira, M. J., Belmonte, J., ... Domínguez-Vilches, E. (2016). Airborne pollen trends in the Iberian Peninsula. *Science of The Total Environment*, 550, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.069>
- García-Mozo, H., Galán, C., Alcázar, P., de la Guardia, C. D., Nieto-Lugilde, D., Recio, M., ... Domínguez-Vilches, E. (2010). Trends in grass pollen season in southern Spain. *Aerobiologia*, 26, 157–169. <https://doi.org/10.1007/s10453-009-9153-3>
- García-Mozo, H., Oteros, J. A., & Galán, C. (2016). Impact of land cover changes and climate on the main airborne pollen types in Southern Spain. *Science of The Total Environment*, 548–549, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.005>
- González-Parrado, Z., Fernández-González, D., Camazón, B., Valencia-Barrera, R., Vega-Maray, A., Asturias, J. A., ... Mandrioli, P. (2014). Molecular aerobiology – *Plantago* allergen Pla 1 in the atmosphere. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 21(2), 282–289. <https://doi.org/10.5604/1232-1966.1108592>
- Gonzalo-Garijo, M. A., Tormo-Molina, R., Muñoz-Rodríguez, A. F., & Silva-Palacios, I. (2006). Differences in the spatial distribution of airborne pollen concentrations at different urban locations within a city. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 16(1), 37–43.
- Hjort, J., Hugg, T. T., Antikainen, H., Rusanen, J., Sofiev, M., Kukkonen, J., ... Jaakkola, 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>
- Iglesias-Otero, M. A., Fernández-González, M., Rodríguez-Caride, D., Astray, G., Mejuto, J. C., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2015). A model to forecast the risk periods of *Plantago* pollen allergy by using the ANN methodology. *Aerobiologia*, 31(2), 201–211. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9357-z>

- Jochner-Oette, S., Stitz, T., Jetschni, J., & Cariñanos, P. (2018). The Influence of Individual-Specific Plant Parameters and Species Composition on the Allergenic Potential of Urban Green Spaces. *Forests*, 9, 284. <https://doi.org/10.3390/f9060284>
- Jones, A. M., & Harrison, R. M. (2004). The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations—a review. *Science of The Total Environment*, 326, 151–180. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.11.021>
- Jones, N. R., Agnew, M., Banic, I., Grossi, C. M., Colón-González, F. J., Plavec, D., ... Lake, I. R. (2019). Ragweed pollen and allergic symptoms in children: Results from a three-year longitudinal study. *Science of The Total Environment*, 683, 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.284>
- Lara, B., Rojo, J., Blanco, J. J., Cardador, C., Serrano, J. I., Soriano, D., & Pérez-Badía, R. (2017). Flora ornamental y potencial alergénico de los espacios verdes urbanos. Comparativa en parques de la ciudad de Toledo. *Revista de Salud Ambiental*, 17(2), 176–186.
- 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>
- 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 Forestry & Urban Greening*, 27, 352–362. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.09.009>
- Moreno-Grau, S., Aira, M. J., Elvira-Rendueles, B., Fernández-González, M., Fernández-González, D., García-Sánchez, A., ... Rodríguez-Rajo, F. J. (2016). Assessment of the *Olea* pollen and its major allergen Ole e 1 concentrations in the bioaerosol of two biogeographical areas. *Atmospheric Environment*, 145, 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.040>
- Motta, A. C., Marliere, M., Peltre, G., Sterenberg, P. A., & Lacroix, G. (2006). Traffic-Related Air Pollutants Induce the Release of Allergen-Containing Cytoplasmic Granules

- from Grass Pollen. *International Archives of Allergy and Immunology*, 139, 294–298. <https://doi.org/10.1159/000091600>
- Nowak, D. J. (1990). Street tree pruning and removal needs. *Journal of Arboriculture*, 16(12), 309–315.
- Oduber, F., Calvo, A. I., Blanco-Alegre, C., Castro, A., Vega-Maray, A. M., Valencia-Barrera, R. M., ... Fraile, R. (2019). Links between recent trends in airborne pollen concentration, meteorological parameters and air pollutants. *Agricultural and Forest Meteorology*, 264, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.023>
- Oteros, J., García-Mozo, H., Alcázar, P., Belmonte, J., Bermejo, D., Boi, M., ... Galán, C. (2015). A new method for determining the sources of airborne particles. *Journal of Environmental Management*, 155, 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.037>
- Oteros, J., Pusch, G., Weichenmeier, I., Heimann, U., Möller, R., Röseler, S., ... Buters, J. T. M. (2015). Automatic and Online Pollen Monitoring. *International Archives of Allergy and Immunology*, 167, 158–166. <https://doi.org/10.1159/000436968>
- Pérez, C. F., Gassmann, M. I., & Covi, M. (2009). An evaluation of the airborne pollen–precipitation relationship with the superposed epoch method. *Aerobiologia*, 25, 313–320. <https://doi.org/10.1007/s10453-009-9135-5>
- Pfaar, O., Karatzas, K., Bastl, K., Berger, U., Buters, J., Darsow, U., ... Bergmann, K. C. (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.14111. <https://doi.org/10.1111/all.14111>
- Plaza, M. P., Alcázar, P., Velasco-Jiménez, M. J., & Galán, C. (2017). Aeroallergens: a comparative study of two monitoring methods. *Aerobiologia*, 33, 363–373. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9475-5>
- Potgieter, L. J., Gaertner, M., Kueffer, C., Larson, B. M. H., Livingstone, S. W., O'Farrell, P. J., & Richardson, D. M. (2017). Alien plants as mediators of ecosystem services and disservices in urban systems: a global review. *Biological Invasions*, 19, 3571–3588. <https://doi.org/10.1007/s10530-017-1589-8>

- Qazi, S., Iqbal, J., & Khan, J. A. (2019). Assessment of the health impact of paper mulberry (*Broussonetia papyrifera* L.), an invasive plant species in Islamabad, Pakistan. *Geospatial Health*, 14(727), 340–350. <https://doi.org/10.4081/gh.2019.727>
- Ren, Y., Qu, Z., Du, Y., Xu, R., Ma, D., Yang, G., ... Chang, J. (2017). Air quality and health effects of biogenic volatile organic compounds emissions from urban green spaces and the mitigation strategies. *Environmental Pollution*, 230, 849–861. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.049>
- Rojo, J., Oteros, J., Pérez-Badia, R., Cervigón, P., Ferencova, Z., Gutiérrez-Bustillo, A. M., ... Buters, J. (2019). Near-ground effect of height on pollen exposure. *Environmental Research*, 174, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.027>
- Rojo, J., Oteros, J., Picornell, A., Ruëff, F., Werchan, B., Werchan, M., ... Buters, J. (2020). Land-Use and Height of Pollen Sampling Affect Pollen Exposure in Munich, Germany. *Atmosphere*, 11(2), 145. <https://doi.org/10.3390/ATMOS11020145>
- 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. *Science of The Total Environment*, 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-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, 130. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5129-2>
- Rojo, J., Rivero, R., Romero-Morte, J., Fernández-González, F., & Pérez-Badia, R. (2017). Modeling pollen time series using seasonal-trend decomposition procedure based on LOESS smoothing. *International Journal of Biometeorology*, 61, 335–348. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1215-y>
- Rufo, J. C., Paciência, I., & Ribeiro, A. I. (2019). Green Environments and Allergic Diseases in Children: a Scoping Review. *Current Epidemiology Reports*, 6, 442–448. <https://doi.org/10.1007/s40471-019-00218-0>
- Ruiz-Valenzuela, L., & Aguilera, F. (2018). Trends in airborne pollen and pollen-season-related features of anemophilous species in Jaen (south Spain): A 23-year perspective.

-
- Atmospheric Environment*, 180, 234–243.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.012>
- Sabariego, S., Cuesta, P., Fernández-González, F., & Pérez-Badia, R. (2012). Models for forecasting airborne Cupressaceae pollen levels in central Spain. *International Journal of Biometeorology*, 56, 253–258. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0423-8>
- Sénéchal, H., Visez, N., Charpin, D., Shahali, Y., Peltre, G., Biolley, J.-P., ... Sutra, J.-P. (2015). A Review of the Effects of Major Atmospheric Pollutants on Pollen Grains, Pollen Content, and Allergenicity. *The Scientific World Journal*, 2015, 1–29. <https://doi.org/10.1155/2015/940243>
- Silva-Palacios, I., Fernández-Rodríguez, S., Durán-Barroso, P., Tormo-Molina, R., Maya-Manzano, J. M., & Gonzalo-Garijo, Á. (2016). Temporal modelling and forecasting of the airborne pollen of Cupressaceae on the southwestern Iberian Peninsula. *International Journal of Biometeorology*, 60, 297–306. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1026-6>
- Suárez-Cervera, M., Asturias, J. A., Vega-Maray, A., Castells, T., López-Iglesias, C., Ibarrola, I., ... Seoane-Camba, J. A. (2005). The role of allergenic proteins Pla a 1 and Pla a 2 in the germination of *Platanus acerifolia* pollen grains. *Sexual Plant Reproduction*, 18, 101–112. <https://doi.org/10.1007/s00497-005-0002-4>
- Sugiyama, T., Carver, A., Koohsari, M. J., & Veitch, J. (2018). Advantages of public green spaces in enhancing population health. *Landscape and Urban Planning*, 178, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.05.019>
- Vara, A., Fernández-González, M., Aira, M. J., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2016). *Fraxinus* pollen and allergen concentrations in Ourense (South-western Europe). *Environmental Research*, 147, 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.014>
- Visez, N., Chassard, G., Azarkan, N., Naas, O., Sénéchal, H., Sutra, J.-P., ... Choël, M. (2015). Wind-induced mechanical rupture of birch pollen: Potential implications for allergen dispersal. *Journal of Aerosol Science*, 89, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.07.005>
- Visez, N., Ivanovsky, A., Roose, A., Gosselin, S., Sénéchal, H., Poncet, P., & Choël, M. (2019). Atmospheric particulate matter adhesion onto pollen: a review. *Aerobiologia*, 9. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09616-9>

- Vogt, J., Gillner, S., Hofmann, M., Tharang, A., Dettmann, S., Gerstenberg, T., ... Roloff, A. (2017). Citree: A database supporting tree selection for urban areas in temperate climate. *Landscape and Urban Planning*, 157, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.06.005>
- Voukantsis, D., Niska, H., Karatzas, K., Riga, M., Damialis, A., & Vokou, D. (2010). Forecasting daily pollen concentrations using data-driven modeling methods in Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Environment*, 44, 5101–5111. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.006>
- Wozniak, M. C., & Steiner, A. L. (2017). A prognostic pollen emissions model for climate models (PECM1.0). *Geoscientific Model Development*, 10, 4105–4127. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4105-2017>
- Ziello, C., Sparks, T. H., Estrella, N., Belmonte, J., Bergmann, K. C., Bucher, E., ... Menzel, A. (2012). Changes to Airborne Pollen Counts across Europe. *PLoS ONE*, 7(4), e34076. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034076>
- Ziska, L. H., Epstein, P. R., & Schlesinger, W. H. (2009). Rising CO₂, Climate Change, and Public Health: Exploring the Links to Plant Biology. *Environmental Health Perspectives*, 117(2), 155–158. <https://doi.org/10.1289/ehp.11501>
- Ziska, L. H., Makra, L., Harry, S. K., Bruffaerts, N., Hendrickx, M., Coates, F., ... 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, e124–e131. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30015-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30015-4)

8. Conclusiones generales / General conclusions

Capítulo 1. Impacto de la abundancia del arbolado de plátano de sombra sobre las variaciones temporales y espaciales de la concentración de polen.

1. El índice polínico anual y el número de días en los que las concentraciones superan el umbral de riesgo de alergia al polen de *Platanus* presentan una tendencia creciente. Estos resultados tienen graves repercusiones en cuanto a salud pública pues evidencian que las personas alérgicas están cada vez más expuestas a los aeroalérgenos de este tipo polínico. Este riesgo implica una mayor incidencia de la alergia en las personas sensibles y un posible aumento en el futuro del número de alérgicos al tipo polínico *Platanus*.
2. La cobertura de plátano de sombra en los espacios verdes urbanos muestra la amplia presencia de esta especie en las ciudades estudiadas. La evolución en el número de ejemplares de *Platanus orientalis* var. *acerifolia* en la ciudad de Toledo durante las dos últimas décadas indica el uso creciente de este árbol como especie ornamental pese a su elevado potencial alergénico.
3. La evolución en el número de ejemplares de plátano de sombra se correlaciona de forma positiva y significativa con la evolución de las concentraciones polínicas registradas, por tanto, en este caso el factor antrópico es la principal causa de las tendencias observadas. Este hecho evidencia la importancia de analizar los cambios que se producen en los espacios verdes de las ciudades cuando se estudian las tendencias en la dinámica y comportamiento aerobiológico de las especies ornamentales.

Capítulo 2. La predicción de las concentraciones de polen atmosférico de plátano de sombra, una herramienta para evaluar el riesgo de alergia de los espacios verdes urbanos.

4. La dinámica del polen de tipo *Platanus* en Toledo presenta un patrón cíclico que se repite cada tres años. Estas variaciones en el comportamiento del polen las asociamos al efecto de las podas. Por lo tanto, para analizar las variaciones del contenido polínico atmosférico de las especies ornamentales, es muy importante considerar las actuaciones, en cuanto a tratamientos y podas, que se realizan en las ciudades.

5. El modelo de predicción de las concentraciones de polen de plátano de sombra en Toledo incluye el patrón estacional observado cada tres años que caracteriza la estación polínica y las variaciones diarias de las variables meteorológicas como la temperatura, la humedad relativa o la precipitación.
6. La combinación de un análisis de series temporales y de regresión PLS de la componente residual, ha permitido obtener un modelo capaz de predecir la concentración polínica de *Platanus* con una antelación de 7 días. Este modelo constituye una herramienta eficaz que permite alertar a la población sensible con suficiente antelación para tomar las medidas oportunas y minimizar el impacto de las reacciones alérgicas.

Capítulo 3. Patrones ambientales de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos de plátano de sombra, gramíneas y olivo.

7. La comparativa de las concentraciones atmosféricas de polen y alérgenos estudiados muestra una buena correspondencia, constatando que los sistemas de información y alerta sanitaria basados en la medida de las concentraciones de polen alergénico en el aire son buenos indicadores de los niveles de riesgo para los alérgicos.
8. El análisis de las discrepancias observadas entre las concentraciones diarias de polen y alérgenos en el aire se ha realizado empleando una nueva metodología basada en la caracterización de los días anómalos fuera del intervalo de confianza de la curva de regresión que representa la situación ideal de correspondencia entre las concentraciones de polen y alérgeno.
9. El análisis de la influencia de los patrones ambientales en la relación polen-alérgeno, indica una gran complejidad debido a que esta relación está influida por las condiciones meteorológicas registradas durante los días previos y que afectan a las distintas fases del proceso aerobiológico. Los resultados de este trabajo permiten interpretar el grado de discordancia entre polen y alérgeno, basándose en el estudio de los patrones de las variables meteorológicas registradas varios días antes.

Chapter 1. Impact of plane tree abundance on temporal and spatial variations in pollen concentration

1. The annual pollen index and the number of days in which the concentrations exceed the risk threshold for allergy to *Platanus* pollen show an increasing trend. This fact has serious repercussions in terms of public health because it shows that allergic people are increasingly exposed to aeroallergens of this pollen type. This risk implies a higher incidence of allergy in sensitive people and a possible increase in the future of the number of people with allergy to the *Platanus* pollen type.
2. The plane tree cover in urban green spaces shows the wide presence of this species in the studied cities. The evolution in the number of specimens of *Platanus orientalis* var. *acerifolia* in the city of Toledo during the last two decades indicates the increasing use of this tree as an ornamental species despite its high allergenic potential.
3. The evolution in the number of plane tree specimens is positively and significantly correlated with the evolution of the recorded pollen concentrations, therefore in this case, the anthropic factor is the main cause of the observed trends. This confirms the importance of analyzing changes that occur in the green spaces of the cities when studying trends in the dynamics and aerobiological behaviour of ornamental species.

Chapter 2. Prediction of airborne pollen concentrations for the plane tree, as a tool for evaluating allergy risk in urban green areas.

4. The dynamics of the *Platanus* pollen type in Toledo presents a cyclical pattern that is repeated every three years. These variations in pollen behaviour are associated with the effect of pruning. Therefore, to analyze the variations in the atmospheric pollen content of ornamental species, it is very important to consider the actions, in terms of treatments and pruning that are carried out in the cities.
5. The prediction model of *Platanus* pollen concentrations in Toledo includes the seasonal pattern observed every three years that characterizes the pollen season

and the daily variations of meteorological variables such as temperature, relative humidity or precipitation.

6. The combination of a time series analysis and PLS regression of the residual component has allowed us to obtain a model capable of predicting the *Platanus* pollen concentration 7 days in advance. This model is an effective tool to alert the sensitive population well in advance so that they can take appropriate measures and minimize the impact of allergic reactions.

Chapter 3. Environmental patterns and their relationships with atmospheric pollen and allergen concentrations of plane tree, grasses and olive tree.

7. The comparison between the atmospheric pollen and allergen concentrations studied shows a good correspondence, confirming that health information and alert systems based on the measurement of airborne pollen concentrations are good indicators of the risk levels for allergic people.
8. The analysis of the discrepancies observed between the daily concentrations of pollen and allergens in the air has been carried out using a new methodology based on the characterization of the anomalous days outside the confidence interval of the regression curve that represents the situation ideal correspondence between pollen and allergen concentrations.
9. The analysis of the influence of environmental patterns in the pollen-allergen relationship indicates a great complexity because this relationship is influenced by the weather conditions recorded during the previous days and that affects the different phases of the aerobiological process. The results of this work allow us to interpret the degree of disagreement between allergen and pollen, based on the study of the patterns of the meteorological variables recorded several days before.

“Un país sin investigación es un país sin desarrollo”

Margarita Salas