

PANORAMA SOBRE LA PRODUCCIÓN, EL TRANSPORTE Y DEPÓSITO DE AEROSOL DE ORIGEN BIOLÓGICO

Claudio F. Pérez^{1,2}, María I. Gassmann^{1,2}, Natalia Tonti^{1,2} y Lucía Curto^{1,2}

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA
²CONICET

(Manuscrito recibido el 13 de julio de 2018, en su versión final el 19 de septiembre de 2018)

RESUMEN

Los aerosoles de origen biológico (bioaerosoles), son una parte importante del complejo de partículas suspendidas en el aire. Los propágulos como: granos de polen, esporas de hongos, algas, quistes de dinoflagelados, además de bacterias y virus, pueden ser transportados largas distancias, provocando enfermedades en plantas, animales y humanos con consecuencias para la agricultura y la salud. Más aún, en su trayecto con frecuencia actúan como núcleos de condensación o glaciológicos, afectando el ciclo hidrológico o el clima. Sin embargo, a pesar de los numerosos trabajos relacionados con estos temas, los procesos por los cuales son emitidos a la atmósfera, interactúan con ésta y se depositan, son poco comprendidos. Este trabajo presenta el estado actual de las técnicas de estudio, los procesos e interacciones entre los bioaerosoles, la atmósfera y las superficies desde las cuales son emitidos o depositados, así como sus efectos en la agricultura, la salud y el papel que juegan en el sistema climático y sus cambios futuros.

Palabras clave: bioaerosol, polen, hongos, transporte atmosférico.

OVERVIEW OF THE PRODUCTION, TRANSPORT AND DEPOSIT OF BIOAEROSOLS

ABSTRACT

Aerosols of biological origin (bioaerosols) are an important fraction of the complex of particles suspended in the air. Propagules such as: pollen grains, fungal spores, algae or dinoflagellates cysts, also with bacteria and viruses, can be transported long distances, causing diseases in plants, animals and humans with consequences for agriculture and health. Moreover, in their atmospheric transit they often act as condensation or ice nuclei, affecting the hydrological cycle or the climate. Despite the numerous works related to these issues, the processes by which they are emitted, interact or are removed from the atmosphere, are poorly understood. This paper presents a comprehensive review about the study techniques, the knowledge of processes and interactions among bioaerosols, atmosphere and surfaces from which they are emitted or deposited, as well as the effects on agriculture, health and the role of bioaerosols in the climate system.

Keywords: bioaerosol, pollen, molds, airborne transport.

1. INTRODUCCIÓN

Los bioaerosoles son un subconjunto de partículas presentes en la atmósfera que comprenden organismos como bacterias o algas unicelulares, unidades reproductivas de dispersión (esporas de hongos, quistes de dinoflagelados, granos de polen) o detritos y fragmentos producidos por plantas y animales. Los diámetros de estas partículas varían desde algunos nanómetros hasta décimas de milímetro (Fig. 1), lo que junto con las condiciones meteorológicas controla su permanencia en suspensión, que varía de horas a semanas (Hirst, 1953; Pöschl, 2005).

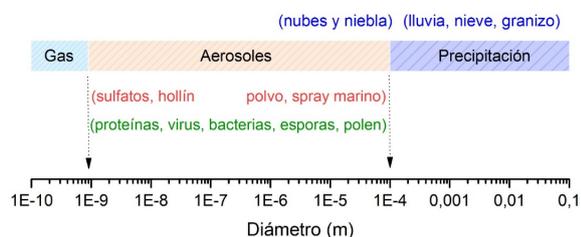


Figure 1: Rangos característicos de tamaño de partículas atmosféricas y bioaerosoles.

El estudio de la génesis, transporte pasivo y depósito de estas biopartículas es abordado por la Aerobiología. Los primeros estudios datan de inicios del siglo XIX (Ehrenberg, 1830; Pasteur, 1860a y b) y desde entonces, muestras de aire recogidas desde globos, aviones y en superficie, han permitido comprobar que las partículas emitidas por la biósfera pueden ser transportadas, incluso a gran altitud más allá de la troposfera y a grandes distancias, cruzando océanos o continentes (Gregory, 1945; Hirst y otros, 1967; Brown y Hovmöller, 2002; Gassmann y Pérez, 2006; Pérez y otros, 2009a; Hallar y otros, 2011; DeLeon-Rodríguez y otros, 2013; Meza Torres y otros, 2014). En el transcurso del transporte, los bioaerosoles están expuestos a estrés por deshidratación, envejecimiento por radiación UV o modificaciones fisicoquímicas por contaminantes presentes en la atmósfera como ozono, óxidos de nitrógeno como NO y NO₂, ácidos, etc., que pueden reducir su viabilidad o

producir su muerte. También, intervienen como núcleos de condensación o glaciológicos, en los cambios de fase de la humedad atmosférica que da origen a las nubes (Amato y otros, 2005; Delort y otros, 2010; Huffman y otros, 2013; Twohy y otros, 2016). Así, el depósito húmedo es el principal fenómeno de remoción de estas partículas durante la precipitación. En cambio, el depósito seco por sedimentación o impacto sobre superficies tiende a ser más importante a nivel local, determinando en parte la calidad del aire.

Muchos bioaerosoles son de importancia en el desarrollo, la dinámica y la evolución de los ecosistemas. Algunos como el polen o las esporas, tienen un papel clave en la dispersión de especies y se sabe que son capaces de franquear barreras geográficas (Brown y Hovmöller, 2002; Pérez y otros, 2009; Womack y otros, 2010; Després y otros, 2012; Meza Torres y otros, 2014) permitiendo el intercambio genético entre poblaciones. En algunos casos el transporte tiene implicancias para la salud pública o la agricultura, cuando se dispersan patógenos o alérgenos (Brown y Hovmöller, 2002; Brodie y otros, 2007; Olabuenaga y otros, 2007; Després y otros, 2012) y aún se debate sobre el impacto potencial del transporte atmosférico de organismos genéticamente modificados por el hombre sobre los ecosistemas (Kawashima y Hama, 2011; Folloni y otros, 2012).

Debido a un creciente interés por estos temas, en 1974 se funda la “International Association for Aerobiology” (IAA) para impulsar los estudios en el campo de la Aerobiología (<https://sites.google.com/site/aerobiologyinternational/home>) y aunar esfuerzos en el monitoreo de bioaerosoles. Es así como en 1988 se establece la “European Aeroallergen Network” (EAN); una red de sitios de medición con posterior colaboración de países de otros continentes, que generan cooperativamente una base de datos sobre concentraciones atmosféricas de polen y esporas de hongos. Actualmente la red

cubre 38 países y más de 600 sitios de medición, 400 de los cuales se encuentran activos (<https://www.ean-net.org/en.html>). Por otro lado, la American Academy of Allergy Asthma & Immunology (AAAAI) a través del National Allergy Bureau (NAB) realiza un trabajo similar en Estados Unidos, Canadá con aporte incipiente de Argentina (<http://www.aaaai.org/global/nab-pollen-counts?ipb=1>).

Estas fuentes de información han permitido en los últimos años, un importante avance en el conocimiento de la aerobiota, sin embargo, aún es mucho lo que se ignora sobre sus interacciones con los ecosistemas en muchos lugares del globo y los avances en la capacidad de pronóstico de su emisión y transporte es aún preliminar.

En las páginas siguientes, intentaremos ofrecer una visión general sobre el estado del arte de la Aerobiología, algunos avances recientes y esbozar perspectivas sobre el estudio de los bioaerosoles en términos de su caracterización, transporte y particularmente interacciones con el clima y la salud.

2. CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS BIOAEROSOLES

Es importante reconocer que las partículas de origen biológico no son residentes estables de la atmósfera, sino que se encuentran en estado de tránsito permanente. La mayoría de ellas son estructuras de resistencia especialmente adaptadas a las condiciones de estrés que imponen factores como la temperatura, la humedad, la oxidación y la radiación que reducen su viabilidad. Así generalmente el transporte se realiza en un estado de suspensión o letargo. En este sentido, se discute si la atmósfera debe considerarse como un posible hábitat, aunque por el momento sólo se han detectado organismos con actividad metabólica en muy pequeña escala dentro de gotitas de nubes (Dimmick y otros, 1975; Amato y otros, 2005; 2007; Vaïtilingom y otros 2013).

Edmonds (1979) establece el concepto de “vía aerobiológica”, que describe un conjunto de procesos que incluye el origen, ascenso, dispersión, transporte y depósito de los aerosoles en superficie (Fig. 2). Esta concepción sistémica, provee el marco conceptual para el desarrollo de diferentes metodologías para el estudio de bioaerosoles; desde distintos métodos para la captura en el aire como el filtrado o el impacto inercial, el reconocimiento a través de técnicas de cultivo y tinción, así como de microscopía óptica y electrónica. Con el avance tecnológico se han incorporado nuevas técnicas como: métodos inmunológicos, espectroscopia óptica y espectrometría de masas, así como análisis de trazadores químicos. La última y más completa revisión de todos estos métodos puede consultarse en Després y otros (2012).

2.1 El muestreo aerobiológico

Además del tamaño, la cantidad y el tipo, los aerosoles biológicos suspendidos en el aire varían de acuerdo al momento del día, la estación y localización geográfica (Hirst, 1953; Lacey y West, 2006). Por este motivo, la ubicación y condiciones micro-meteorológicas del sitio de muestreo, así como el período de monitoreo, deben ser considerados cuidadosamente para asegurar una toma de muestras representativa. Del mismo modo, el tipo de muestreador es importante ya que todos tienen diferentes eficacias de captura y deben ajustarse a los requerimientos del tipo de estudio. En general, los equipos menos complejos presentan pocos inconvenientes técnicos y se ajustan bien a estudios tanto en ambientes interiores como exteriores, pero brindan información con escaso detalle y resolución temporal. Los muestreadores más sofisticados, subsanan algunos de estos inconvenientes: son más confiables y precisos, pueden operarse por períodos prolongados, aunque son propensos a desperfectos que interrumpen la continuidad del monitoreo. Los equipos emplean diferentes técnicas de recolección. Las más sencillas colectan partículas de forma pasiva, por sedimentación sobre cubreobjetos o placas de Petri con medios

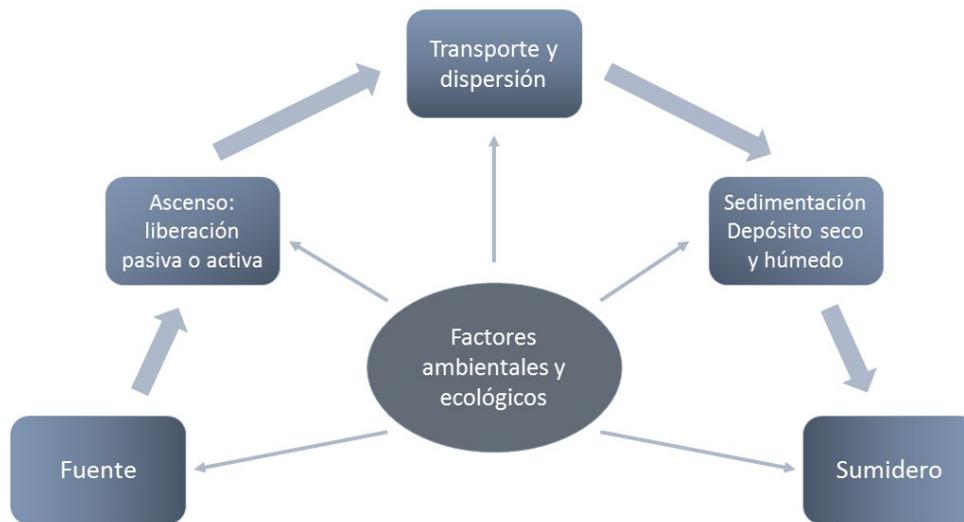


Figure 2: Modelo conceptual de los procesos aerobiológicos y los factores que los regulan. Adaptado de Edmonds, 1979.

adherentes o de cultivo, que permiten obtener flujos de depósito conociendo el tiempo de exposición y el área expuesta (Fig. 3a, b y c). Las de muestreo activo en cambio, emplean el principio de impacto inercial de los aerosoles suspendidos en un flujo forzado y continuo de aire. En estos casos, las partículas se retienen en filtros de tamaño de poro variable, portaobjetos, cajas de Petri perforadas o cintas de acetato recubiertas con filmes adherentes, que luego pueden ser estudiadas al microscopio (Fig. 4a, b y c). Un cálculo sencillo que contempla el tiempo de exposición y el volumen de aire filtrado permite obtener valores de concentración.

La Tabla I resume el conjunto de tipos de muestreo y características de uso común en Aerobiología. Se enumeran aquellas de uso más corriente en el estudio de polen y esporas. La EAN utiliza como método de muestreo estándar el volumétrico isocinético (Hirst, 1952), (Fig. 4c) donde las partículas suspendidas en un flujo constante de $0.6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ se depositan sobre una cinta adhesiva que rota a velocidad constante (2 mm h^{-1}). El muestreo se realiza

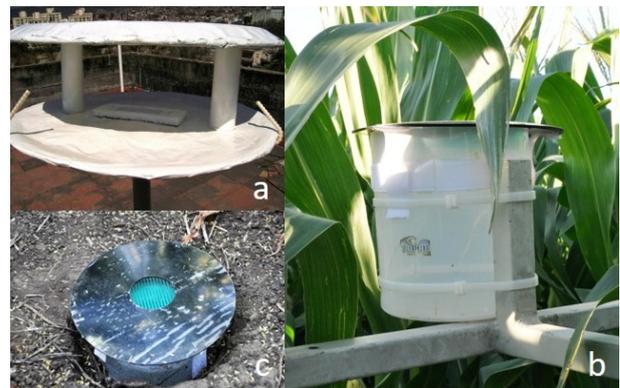


Figure 3: Ejemplo de muestreadores pasivos gravitacionales: a) Trampa Durham: la protección superior previene el lavado por precipitación del material colectado en el cubreobjetos del interior, b) Trampa Tauber colocada dentro de un cultivo de maíz, c) detalle de la parte superior de una trampa Tauber colocada a ras del suelo.

automáticamente con un sistema de relojería y la cinta se reponne semanalmente. Posteriormente, la cinta se secciona en tramos correspondientes a

Tipo de muestreo	Principio de captura	Tipo de muestreador	Resolución temporal	Uso
Pasivo No volumétrico	Gravitacional	Plato de Petri Trampa Durham Trampa Tauber	Diaria, mensual	Polen/esporas
Activo Flujo forzado Volumétrico	Filtrado	Cassette de filtro	Horaria	Esporas
	Impacto inercial	Impactador de cascada	Horaria, diaria, semanal	Esporas
		Brazo rotante (Rotorod)	Diaria	Polen/esporas
		Trampa Burkard o Lanzoni	Horaria, diaria, semanal	Polen/esporas

Table 1: Técnicas, características y principios de acción empleados frecuentemente en el monitoreo aerobiológico de la atmósfera.

1 día de exposición para su estudio microscópico. El NAB por su parte, reporta recuentos de esporas/granos de polen de estaciones que utilizan el muestreo volumétrico isocinético, o impactadores de brazo rotante (Fig. 4a y b). Estos últimos recolectan el material sobre varillas acrílicas untadas con adhesivo que giran a velocidad constante a intervalos regulares. El recambio de las varillas se hace diariamente. La velocidad de giro, el área y el tiempo de exposición permite el cálculo de concentraciones.

2.2 Caracterización biológica

Independientemente del método de captura, las muestras obtenidas contienen una gran diversidad de aerosoles. Sin embargo, no todo lo que se deposita es de interés, por lo que es necesario decidir exactamente qué debe contarse y conocer las especies a que pertenecen (Lacey y West, 2006). Regularmente esta tarea es realizada por personal especialmente entrenado que hace el recuento utilizando microscopía óptica y tinciones sencillas. Salvo en aplicaciones muy específicas, no se hace el recuento completo de la muestra, sino que se realiza un muestreo estadístico de la superficie del preparado para análisis microscópico, que permita inferir las cantidades totales y calcular las concentraciones atmosféricas correspondientes.

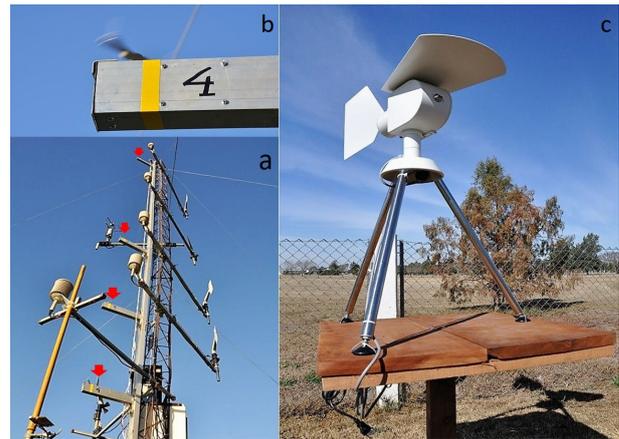


Figure 4: Muestreadores volumétricos de impacto inercial. a) Impactador de brazo rotante tipo Rotorod, en un arreglo para estudio de perfil vertical sobre una estación micrometeorológica. Las flechas rojas indican la posición de los equipos. b) Detalle de un impactador de brazo rotante durante el funcionamiento. c) Muestreador Burkard instalado en la localidad de Sunchales, durante una campaña de estudio de trazadores polínicos de larga distancia.

Determinar y cuantificar bioaerosoles es una tarea compleja y demandante que consume gran cantidad de tiempo. Por este motivo existen grandes esfuerzos para facilitar la obtención de datos utilizando sistemas automatizados. En el caso de los granos de polen, la confiabilidad de estos sistemas es muy buena (entre 90 y 100 %), pero sólo son capaces de reconocer algunas pocas especies (Boucher y otros, 2002; Ronneberger y otros, 2002; Chen y otros, 2006). La mayoría trabaja utilizando imágenes ópticas mejoradas, imágenes láser 3D y/o utilizando tecnología de redes neuronales (France y otros, 2000; Ronneberger y otros, 2002; Li y otros, 2004; Zhang y otros, 2004; Holt y otros, 2011). Las esporas de hongos en cambio requieren la incubación en medios de cultivo para reconocer las especies y contar las colonias formadas, ya que la escasa diferenciación morfológica impide su determinación directa al microscopio. Sin embargo, existen algunos adelantos recientes hacia la automatización que elimina el período de

cultivo previo (Blank y otros, 2015; Tahir y otros, 2017). A pesar de lo alentador de estos intentos, el reconocimiento y recuento de rutina sigue siendo una tarea efectuada por microscopistas experimentados.

Otras técnicas de tinción abren nuevas posibilidades para el estudio de partículas biológicas de origen secundario. Estos análisis pueden ser especialmente útiles en cuestiones relacionadas con la actividad y especificidad de agentes patógenos con injerencia en la salud.

2.3 Caracterización fisicoquímica

Recientemente, se han desarrollado algunas técnicas que permiten determinar fragmentos de partículas biológicas por debajo del límite de resolución de la microscopía óptica (Hell y Kroug, 1995; Cremer, 2012; Best y otros, 2013). Por ejemplo, la combinación de técnicas inmunoquímicas y tinciones fluorescentes, son capaces de identificar partículas de origen biológico y ocasionalmente, la especie a la que pertenecen. Perring y otros (2015) mostraron que los aerosoles así detectados pueden alcanzar fracciones importantes de hasta 24 % del total en suspensión, con diferencias regionales en número y tamaño.

Por otro lado, algunos equipos basados en la emisión de fluorescencia inducida por láser realizan este tipo de cuantificación en tiempo real con resoluciones temporales y de tamaño elevadas (Healy y otros, 2014; Saari y otros, 2014; Perring y otros, 2015; Ziemba y otros, 2016). Estas mejoras permiten obtener parametrizaciones de emisiones de aerosoles diarias, estacionales y anuales, que son útiles en el modelado de transporte atmosférico. Por ejemplo, Hummel y otros (2015) incorporaron una nueva parametrización a un modelo regional a partir de mediciones de aerosoles biológicos fluorescentes de cuatro sitios europeos. La distribución de tamaño con un modo de 3 μm fue dominante y estuvo en correspondencia con el tamaño promedio de las esporas de hongos, por lo que las mejoras fueron eficaces para trazar su dispersión

y transporte.

La vitalidad celular es otro aspecto a tener en cuenta ya que es esencial para los roles biológicos, ecológicos y patológicos de los bioaerosoles (Urbano y otros, 2011). Por ejemplo, algunos resultados indican que las células bacterianas completas constituyen mejores núcleos glaciológicos que fragmentos de ellas o que los extractos de sus proteínas de pared celular (Morris y otros, 2004; Möhler y otros, 2007). De esta manera es probable que la viabilidad de los bioaerosoles juegue un papel importante en algunos procesos atmosféricos.

3. TRANSPORTE DE BIOAEROSOLES

Desde el punto de vista biológico, es importante entender el transporte pues afecta el intercambio genético entre poblaciones y la propagación de especies (Womack y otros, 2010; Morris y otros, 2014a). En algunos casos la dispersión tiene consecuencias socioeconómicas, ampliando la distribución geográfica de plagas y enfermedades agrícolas, o diseminando patógenos de interés en salud humana o sanidad edilicia. Dado que los bioaerosoles son liberados desde las superficies continentales u oceánicas, generalmente son más abundantes en los niveles inferiores de la troposfera, mayormente dentro de la capa límite atmosférica (CLA). Por lo tanto, el estudio del transporte requiere de modelos que representen adecuadamente los procesos de pequeña escala de la CLA, así como la dinámica de la atmósfera a escala regional o global.

3.1 Emisión

Los bioaerosoles entran a la atmósfera en forma pasiva removidos desde la superficie de la fuente por la turbulencia (mecánica o térmica), o de forma activa a través de procesos de eyección como, por ejemplo, la liberación de esporas de hongos (ascomicetes) disparada por el impacto de gotas de lluvia (Gregory, 1973; McCartney y Lacey, 1990; Lacey y West, 2006; Isard y Gage, 2001). Cualquiera sea el mecanismo, la liberación se produce en condiciones meteorológicas

adecuadas, generalmente con baja humedad atmosférica y durante las horas de mayor temperatura, cuando la turbulencia favorece la suspensión y ascenso de las partículas (Lacey y West, 2006; Isard y Gage, 2001).

Para recrear el transporte, los modelos requieren parametrizaciones adecuadas de la tasa de emisión. Sin embargo, las estimaciones de esta variable para bioaerosoles adolecen de grandes incertidumbres (Elbert y otros, 2007). Por ejemplo, Burrows y otros (2009a y b) reportan variaciones entre observaciones y estimaciones entre 80 y 870 %, que tienen origen en procesos biológicos relacionados con los ciclos diarios, estacionales, los ciclos de vida y la variación de la composición de especies. Más aún, los cambios en el uso y cobertura del suelo y sus dependencias climáticas en diversas escalas contribuyen a que las parametrizaciones no sean estables en tiempo y espacio.

Las estimaciones se basan principalmente en observaciones de concentración realizadas dentro de los primeros 50 m sobre el suelo y o en menor medida, desde aeronaves o estaciones ubicadas a gran altura (Matthias-Maser y otros, 2000; DeLeon-Rodriguez y otros, 2013; Ziemba y otros, 2016). La emisión se infiere a partir de estas observaciones haciendo suposiciones sobre la tasa de depósito, por lo que los valores obtenidos son aproximaciones.

Otras formas de medición directas están emparentadas con las metodologías de medición de flujos desarrolladas en meteorología, como, por ejemplo: el método del gradiente o el de covarianzas turbulentas. En el primer caso, se parte del supuesto de que el movimiento vertical de los aerosoles en la CLA es análogo al de otras magnitudes meteorológicas (como la humedad o el calor). Como ejemplo, se pueden citar los trabajos de Lighthart y Shaffer (1994) o Crawford y otros (2014) donde con técnicas derivadas de la relación de Bowen, obtuvieron flujos de bacterias y esporas de hongos en ambientes de chaparral y de bosque de coníferas en el hemisferio norte. En el caso de la técnica

de covarianzas turbulentas, se correlacionan las variaciones de la concentración de un gas con aquellas de la componente vertical del viento (w) para obtener los flujos de interés. Es posible extrapolar la técnica al estudio de aerosoles en tanto tengan tamaños adecuados (generalmente por debajo de $100 \mu\text{m}$). Así, Pryor y otros (2007) y Gallagher y otros (1997) lograron medir flujos de aerosoles sobre superficies boscosas mientras que Carotenuto y otros (2017) midieron flujos verticales de esporas de hongos sobre pasturas con una técnica mixta de covarianzas turbulentas y modelado numérico. Sin embargo, la necesidad de equipo de respuesta rápida (usualmente midiendo a 20 Hz) y gran cantidad de datos para obtener resultados estadísticamente robustos, limitan su aplicación a bioaerosoles. En ausencia de estas condiciones se suele utilizar el método relajado de acumulación de flujos (Desjardins, 1977; Businger y Oncley, 1990; Gaman y otros, 2004; Held y otros, 2003; 2008) que se basa en la acumulación condicional de flujos en función de velocidades verticales positivas o negativas (Businger y Oncley, 1990). Esto permite utilizar equipos de medición de aerosoles con tiempos de respuesta más lentos.

3.2 Transporte atmosférico

Una vez emitidos, el transporte de los aerosoles depende de las características de la CLA y de los procesos atmosféricos que se desarrollen dentro de la troposfera. Dependiendo de la ubicación geográfica y la estación del año, el espesor de la CLA presenta variaciones diurnas desde algunos cientos de metros en la noche hasta 3 km durante el día. Debido a que las emisiones de bioaerosoles ocurre cerca de la superficie, las concentraciones en la atmósfera disminuyen con la altura (Gao y otros, 2015; Jones y Harrison, 2004). Algunos procesos atmosféricos que favorecen el depósito húmedo (formación de nubes bajas o nieblas) contribuyen a disminuir la cantidad de bioaerosoles (Huffman y otros, 2013) limitando parcialmente las distancias de transporte dentro de la CLA. A su vez, la inversión térmica en el tope de la CLA actúa casi como una barrera física, determinando que la concentración

de bioaerosoles en la CLA sea superior a las observadas en la atmósfera libre. Sin embargo, la mezcla producida en esta capa por la interacción entre las térmicas y la atmósfera libre permite un transporte neto pequeño de bioaerosoles dentro de esta última. En consecuencia, la cantidad de partículas que ascienden a la troposfera libre es escasa (Sesartic y otros, 2012). Sin embargo, en algunos casos procesos tales como el ascenso frontal forzado o la convección intensa pueden inyectar partículas biológicas por encima de la inversión, permitiéndoles viajar grandes distancias como parte del flujo troposférico. Es así que puede establecerse como principio básico, que los desplazamientos que tienen lugar dentro de la CLA concluyen en el mismo hábitat donde se originan y contrariamente, cuando éstos sobrepasan la CLA, terminan en ambientes muy distintos al de origen (Isard y Gage, 2001). En la práctica, los primeros son más frecuentes que los segundos. En cuanto a las condiciones atmosféricas, el dominio anticiclónico con vientos débiles o calma y radiación intensa, favorece los movimientos verticales, mientras que la estabilidad neutral, el avance de frentes o la presencia de jets promueven los movimientos horizontales.

El estudio de los procesos físicos y el modelado del transporte de corta y larga distancia surge, por un lado, ante la necesidad de estudiar la dispersión de genes artificialmente introducidos en cultivos (Dupont y otros, 2006) y por otro, debido a la aparición de eventos de “nieve amarilla” en el norte de Europa, que presupone una subestimación de la frecuencia y magnitud del transporte de larga distancia (Bourgeois, 2000). En el primero de los casos, la física de los procesos está vinculada principalmente a la interacción entre la cobertura vegetal y las condiciones atmosféricas dentro de la capa límite generada por la vegetación. Las modelizaciones más empleadas utilizan aproximaciones probabilísticas, gaussianas o eulerianas donde en ausencia de mediciones, es necesario parametrizar los fenómenos asociados a la turbulencia (por ej. Loos y otros, 2003; Dupont y otros, 2006; Klein y otros, 2006).

Menos casos, abordan el modelado a escala regional, donde la distribución geográfica de la cobertura, la topografía y el campo de viento de superficie son de gran importancia (ej. Helbig y otros, 2004; Pérez y otros, 2018). El transporte de larga distancia en cambio considera la dinámica de la atmósfera de mayor escala desde la sinóptica a la circulación general (Pérez y otros, 2018). En estos casos, HYSPLIT (Hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory model, Draxler y Hess, 1998) implementado por el Air Resources Laboratory de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) es por mucho la herramienta de cálculo más utilizada (Šaulienė y Veriankaitė, 2006). HYSPLIT es un modelo híbrido (Lagrangiano - Euleriano) que simula trayectorias simples o complejas de parcelas de aire, así como la dispersión, concentración, transformación química y depósito de aerosoles de distinto origen (Stein y otros, 2015). Las aproximaciones que utiliza limitan su uso al modelado de transporte de largo alcance. Su reciente aplicación al estudio de transporte de aerosoles biológicos ha permitido dilucidar las condiciones sinópticas que favorecen la aparición estacional de polen alérgico de fuentes distantes (Pasken y Pietrowicz, 2005; Makra y Pálfi, 2007; Belmonte y otros, 2008) incluso franqueando barreras geográficas, como continentes, cordilleras y océanos (Gassmann y Pérez, 2006; Rousseau y otros, 2006; Pérez y otros, 2009a; Meza Torres y otros, 2014).

3.3 Depósito

Los procesos de remoción de las partículas en suspensión están relacionados con el cambio de estado del agua en la atmósfera (depósito húmedo), con el impacto sobre obstáculos o la sedimentación (depósito seco). Los bioaerosoles desempeñan un papel importante en la formación de gotas de nubes y cristales de hielo y, por consiguiente, en la precipitación (Amato y otros, 2007; Sesartic y otros, 2012; Huffman y otros, 2013; Morris y otros, 2014b). Por su tamaño (Fig. 1), las bacterias, algas, esporas de hongos o granos de polen son considerados núcleos de

condensación gigantes (NCG) (ej. Bauer y otros, 2003; Delort y otros, 2010; Després y otros, 2012; Hassett y otros, 2015). Sin embargo, a pesar de que los NCG representan una pequeña fracción de las partículas en suspensión (0.001 - 0.01 %, Posselt y Lohmann, 2008), revisten especial importancia dado que inician la condensación con bajos niveles de saturación de humedad (Bauer y otros, 2003). Según los resultados de algunos modelos globales, la incorporación de núcleos de condensación gigantes acelera la precipitación y, en consecuencia, se acumula menos agua condensada en la atmósfera (Posselt y Lohmann, 2008). Además, se ha demostrado que, en condiciones húmedas los granos de polen pueden liberar material citoplasmático, formando partículas sub-micrométricas que también pueden actuar como núcleos de condensación (Taylor y otros, 2002; 2004; Steiner y otros, 2015).

Por otro lado, el polen, las algas, las bacterias, los hongos y el plancton son núcleos glaciológicos muy eficientes, (Schnell y Vali, 1976; Vali y otros, 1976; von Blohn y otros, 2005; Després y otros, 2012) debido a que son capaces de iniciar la congelación a temperaturas superiores a -15°C cuando para partículas minerales el límite típico es por debajo de -20°C (Morris y otros, 2014b). Por ejemplo, algunos experimentos muestran que el polen de abedul induce la congelación de gotas de agua sobreenfriada a temperaturas de -9°C (Diehl y otros, 2002), mientras que hongos como: *Hemileia vastatrix* (Morris y otros, 2013), *Puccinia* spp. (Haga y otros, 2013; Morris y otros, 2013) o *Ustilago nigra* (Haga y otros, 2014) lo hacen a temperaturas superiores a -20°C . El caso extremo es el de las bacterias, cuyas proteínas adheridas al exterior de la membrana celular son capaces de iniciar la nucleación a temperaturas tan altas como -1.5°C (Lindow, 1989; Kozloff y otros, 1991). También es posible identificar bacterias y fitoplancton como núcleos glaciológicos de origen marino liberados a la atmósfera por el spray emitido desde la superficie del agua (Knopf y otros, 2010; Alpert y otros, 2011a y b). A pesar de estas evidencias, aún es una pregunta abierta si la

cantidad de bioaerosoles es suficiente para afectar la formación y evolución de las nubes en las altitudes a las que éstas se desarrollan.

El depósito seco, consiste en la remoción de las partículas en suspensión por contacto con la superficie (impacto) o sedimentación por gravedad. Las aproximaciones más sencillas incluyen el modelado de la sedimentación utilizando la Ley de Stokes, de uso corriente en el estudio del depósito de polen. Si bien esta ley es válida para partículas pequeñas moviéndose a velocidades bajas, supone condiciones atmosféricas con números de Reynolds bajos (condiciones de flujo laminar) que difícilmente se observan en la atmósfera, por lo que las aproximaciones que consideran condiciones turbulentas serían más realistas. La interacción de la atmósfera con la vegetación genera turbulencia que puede organizarse en estructuras con forma de rotores horizontales llamadas “estructuras coherentes”. Estas estructuras son altamente eficientes transportando tanto energía (calor y cantidad de movimiento), como intercambiando masa con la cobertura vegetal (Katul y otros, 2006; Thomas y Foken, 2007). Los modelos numéricos más utilizados para describir este proceso son las simulaciones de grandes torbellinos (Large Eddy Simulation - LES) (Weil y otros, 2004; Chamecki y otros, 2009; Maldaner y otros, 2013) que permiten caracterizar la periodicidad temporal y escala espacial de hundimientos y eyecciones de las estructuras coherentes. La metodología LES recientemente ha tomado impulso, estudiando la dispersión y depósito de partículas, entre las cuales se puede considerar el material aerobiológico suspendido en el aire como esporas de hongos o granos de polen (Chamecki y otros, 2009; Tallapragada y otros, 2011; Maldaner y otros, 2013).

4. APLICACIONES DEL ESTUDIO DE BIOAEROSOLES

4.1 Patógenos y alérgenos

Una de las mayores motivaciones para el estudio de los bioaerosoles es su potencialidad para

producir infecciones, efectos tóxicos o alérgicos sobre los organismos vivos impactando en la salud y la agricultura. Muchos patógenos causantes de la roya o el mildiú son responsables de enormes pérdidas económicas en todo el mundo (Aylor y Taylor, 1982; Brown y Hovmøller, 2002) como, por ejemplo, la roya causada por el hongo *Hemileia vastatrix* sobre el cultivo de café (Lucas y otros, 1992) o el tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*) responsable de la gran hambruna de 1840. También las enfermedades infecciosas de humanos como la tuberculosis, la gripe o el sarampión pueden ser dispersados por bacterias o virus aerotransportados (Riley, 1974). Los hongos constituyen casos excepcionales. Por ejemplo, la inhalación de algunos patógenos como *Aspergillus*, *Cryptococcus* y *Pneumocystis* spp., pueden producir infecciones pulmonares con tasas de mortalidad de hasta 95% en individuos con función inmune comprometida (Lin y otros, 2001; Brown y otros, 2012). La actividad humana, especialmente en ambientes interiores, puede alterar las concentraciones de bioaerosoles, lo que es un desafío permanente para la salud hospitalaria (Schaal, 1991; Hoffman y otros, 1999). Las concentraciones suelen elevarse debido a la falta de ventilación, por el solo efecto de respirar, estornudar, toser, hablar y moverse, así como por la resuspensión del polvo al transitar (Bhangar y otros, 2014; 2015; Adams y otros, 2015). El depósito en el tracto respiratorio depende de las características de las partículas y la morfología de las vías respiratorias (Hofmann, 2011; Hussain y otros, 2011). En general, las partículas mayores de 0.5 μm son retenidas por impacto y sedimentación en las vías respiratorias superiores, mientras que las de diámetro menor, pueden alcanzar las vías inferiores por mecanismos de difusión (Hussain y otros, 2011; Nazaroff, 2015). La respuesta patogénica no depende de la viabilidad, puesto que las células muertas, fragmentos de ellas o excreciones pueden causar efectos adversos en la salud. Entre este tipo de partículas podemos encontrar componentes de la pared celular y metabolitos secundarios de las bacterias (exotoxinas y endotoxinas respectivamente)

o metabolitos fúngicos (micotoxinas). La exposición a micotoxinas es frecuente en ambientes rurales, construcciones afectadas por humedad o industrias relacionadas con la agricultura (Rylander, 2002; Nielsen, 2003; Spaan y otros, 2006) y presentan el mayor índice de toxicidad, tanto en humanos como en animales. En cuanto a los alérgenos, los más importantes provienen de la dispersión del polen de árboles y hierbas, hifas y esporas de hongos, o los ácaros del polvo doméstico (Esch y otros, 2001; Green y otros, 2003; D'Amato y otros, 2007; Vara y otros, 2016). Las alergias y sus afecciones respiratorias concomitantes son un serio desafío sanitario que está en aumento, donde la polinosis afecta hasta el 40% de la población de los países industrializados (D'Amato y otros, 2007) y casi 30% de la población asintomática está sensibilizada a uno o más alérgenos de origen fúngico (Esch y otros, 2001). Más aún, el problema parece relacionarse sinérgicamente con altos niveles de contaminación, aunque los mecanismos subyacentes de esta relación son poco claros (D'Amato y otros, 2007; 2013).

4.2 Bioaerosoles y agricultura

Otro desarrollo importante del estudio de los bioaerosoles es su aplicación en la agricultura. Además del monitoreo de las fuentes potenciales de enfermedades de los cultivos, existen desarrollos hacia el pronóstico de la producción en base a las concentraciones de polen en el aire (García-Mozo, 2011). Las fases fenológicas de la floración proporcionan un indicador macroscópico de diferentes procesos endógenos, algunos de los cuales son de difícil observación. El análisis aerobiológico, particularmente en especies anemófilas (plantas que utilizan el viento como agente de la polinización) permite detectar polen en el aire, proporcionando información sobre estas fases. Aunque la polinización es solo uno de los muchos eventos que tienen lugar durante el ciclo reproductivo de los cultivos, es determinante para el rendimiento. La llegada de una cantidad suficiente de granos de polen a los estigmas receptivos, es uno de los factores que influyen en el éxito de la fertilización,

más aún en las plantas anemófilas donde el mecanismo de dispersión es relativamente ineficaz y requiere grandes cantidades de polen para garantizar la polinización adecuada (Faegri y Van der Pijl, 1979; Frenguelli, 1998). Así, el conteo elevado de polen en el aire es la base para el desarrollo de los métodos de predicción de cosecha en base a técnicas aerobiológicas. Cour y Van Campo (1980) fueron los primeros en demostrar la relación existente entre la polinización y el rendimiento en especies anemófilas, que luego fue aplicada a otros cultivos no necesariamente anemófilos como, por ejemplo, la vid y el olivo. Así, Muñoz-Rodríguez y otros (2011) investigan la dinámica de la polinización de la vid mientras que Fernández-González y otros (2011) relacionan su rendimiento y producción anual con recuentos polínicos atmosféricos y la fenología. Por otro lado, los estudios realizados principalmente en España de la concentración polínica de olivo y distintas variables meteorológicas, permitieron establecer la relación entre estas variables (Galán y otros, 2001) y formular modelos de rendimiento en base a la cantidad de polen emitido y las condiciones atmosféricas reinantes durante el período de polinización (Galán y otros, 2004; García-Mozo y otros, 2008). Los estudios para otras especies de polinización anemófila, como en el caso del maíz, han abordado con especial interés el análisis de la polinización cruzada, dirigidos a establecer controles del flujo de genes transgénicos, generalmente sujetos a patentes comerciales. Por ejemplo, Jarosz y otros (2003), estudian la potencialidad de entrecruzamiento y la calidad de semillas en función de las concentraciones polínicas en el aire y las tasas de depósito. Angevin y otros (2008), utilizan modelos numéricos de dispersión polínica para relacionar el transporte con el tamaño del lote de producción, la geomorfología del paisaje y las fechas de floración mientras que otros investigadores proponen modelos estocásticos lagrangianos de pronóstico (Aylor y Bohem, 2006) y un modelo de red de monitoreo de transporte de polen para este cultivo (Aylor y otros, 2003).

Estas investigaciones conducen a la optimización del manejo de cultivos y al pronóstico de volumen de cosechas brindando herramientas esenciales para la producción racional y la comercialización eficiente. La estimación anticipada permite que los productores adopten estrategias para compensar las variaciones interanuales, y tomen decisiones informadas para planificar sus ventas.

5. LA EXPERIENCIA ARGENTINA EN AEROBIOLOGÍA

En nuestro país, los estudios se encaminaron siguiendo dos vertientes claramente diferenciadas. Los primeros trabajos se enfocaron en ambientes urbanos con objetivos puramente aplicados. La mayoría consiste en calendarios polínicos útiles para la prevención de alergias respiratorias (ej. Cuadrado, 1978; 1979; Borromei y Quattrocchio, 1990; García, 1990; 1992; 1993; 2010; Bianchi, 1992; 1994; Majas y otros, 1992; Romero y otros, 1992; Noetinger, 1993; Noetinger y otros, 1994; Latorre y Pérez, 1997; Ramón y otros, 2000; 2001; Nitiu y Romero, 2001; Nitiu y otros, 2003; Bianchi y otros, 2004; Bianchi y Olabuenaga, 2006; Nitiu, 2009; Benedetti y otros, 2014; Caramuti y otros, 2014) aunque pocos analizaron la potencialidad alergénica del polen encontrado (Nitiu y Mallo, 2002) y existe un único antecedente que relaciona la presencia atmosférica de polen con estudios epidemiológicos utilizando tests de sensibilización (Olabuenaga y otros, 2007). El estudio de las esporas fúngicas es de desarrollo reciente (Nitiu y otros, 2010; Mallo y otros, 2011; Nitiu y Mallo, 2011), en algunos casos destinados a problemas de conservación (Mallo y otros, 2017). Actualmente existen algunas estaciones aerobiológicas ubicadas en centros urbanos (Fig. 5) que regularmente reportan concentraciones de polen y esporas de hongos, que son publicadas online (ej. <http://www.aaaai.org/global/nab-pollen-counts/argentina>, <http://lillo.org.ar/inicio>, <https://www.alergia.org.ar/index.php>).

El estudio de ambientes naturales es menos frecuente (Ej. Majas y Romero, 1992; Naab, 1999;

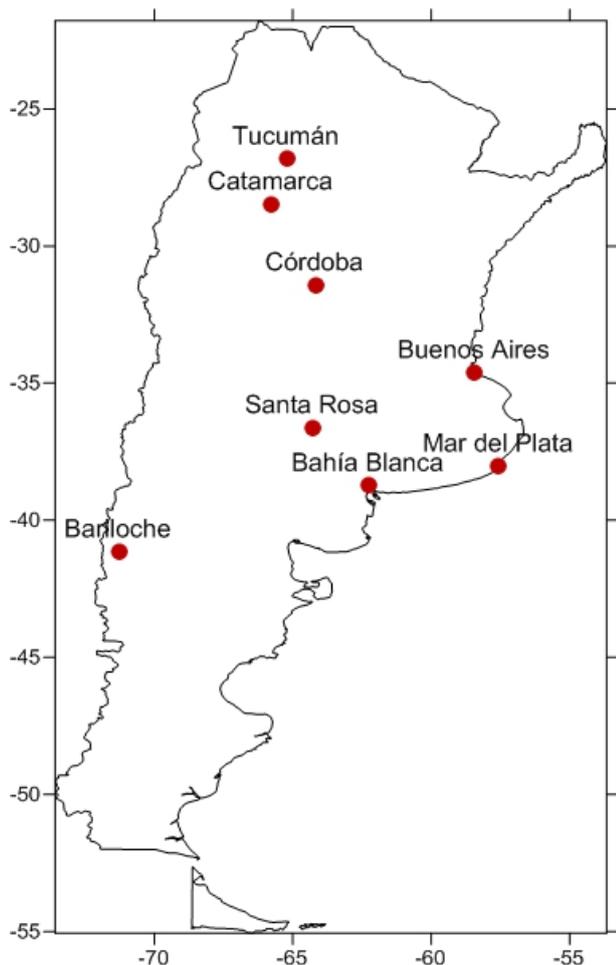


Figure 5: Ciudades argentinas con monitoreo continuo de bioaerosoles.

Vega y otros, 1999; Fontana, 2003; García, 2006; Latorre y Caccavari, 2007; Murray y otros, 2007; 2008; Torres y otros, 2014; Nuñez Otaño y otros, 2015; Muñoz y otros, 2017) y en su mayoría se destinan al reporte de tasas de depósito en relación con la vegetación.

La segunda vertiente analiza los patrones (de tiempo y espacio) y los procesos que dan origen a la variabilidad del registro aerobiológico. Existen dos fuentes principales que determinan estos cambios. Por un lado, las condiciones meteorológicas influyen sobre la emisión y el depósito de biopartículas (Gassmann y Gardiol, 2007; Latorre y Caccavari, 2009; Pérez y otros, 2009b; Murray y Galán, 2016) que una vez en suspensión, pueden ser transportadas miles

de kilómetros, incluso franqueando barreras geográficas como la cordillera de los Andes o el océano Atlántico (Gassmann y Pérez, 2006; Pérez y otros, 2009a; Meza Torres y otros, 2014) o bien, ser capturadas por sistemas locales como las brisas que recirculan el contenido de partículas (Gassmann y otros, 2002). Por otro, los cambios en la vegetación (fenología) determina el momento de actividad de las fuentes, influyendo sobre la riqueza de especies presentes en el aire de una localidad (Latorre y Bianchi, 1997; 1998; Latorre, 1997; 1999; Latorre et al., 2008). Estas dos fuentes a su vez interactúan determinando patrones temporales diario y estacional (Latorre y Bianchi, 1997; Noetinger y Romero, 1997; Pérez y Paez, 1998; Pérez y otros, 2001a, b; 2003; 2009c; Nitui, 2003; 2004; 2006; Murray y otros, 2002; 2010). La complejidad de las interacciones en múltiples escalas confiere características caóticas al registro aerobiológico que impide el desarrollo de modelos de pronóstico a largo plazo (Bianchi y otros, 1992).

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

Los aerosoles están entre los forzantes que la meteorología considera que afectan el tiempo y el clima de la Tierra. Existen dos mecanismos dominantes por los cuales éstos interactúan con la atmósfera: la interacción aerosoles - radiación y la interacción aerosoles - nubes. La primera aparece como consecuencia de la dispersión y absorción que provocan los aerosoles alterando los balances de radiación de la atmósfera y la superficie, mientras que la segunda se relaciona con la capacidad de actuar como núcleos de condensación y glaciológicos en la formación de nubes. Ambas se combinan para desencadenar cambios capaces de alterar los patrones de precipitación y los fenómenos meteorológicos de tiempo severo. Dependiendo de las variables afectadas, los cambios pueden ser negativos o positivos, lo que plantea mayores incertidumbres en el forzamiento del sistema climático pudiendo producir retroalimentaciones en el clima (Andreae y Rosenfeld, 2008; Morris y otros, 2014b). Todas estas incertidumbres han

obstaculizado considerablemente la capacidad de proyectar cambios climáticos futuros y hacer predicciones numéricas precisas. (Li y otros, 2017).

Por otro lado, el cambio de uso de la tierra altera el equilibrio de cantidad y calidad de bioaerosoles en suspensión. Además, no está claro cómo los cambios en la biodiversidad afectarán la abundancia y las propiedades de bioaerosoles que afecten la propagación de enfermedades agrícolas o humanas y, en consecuencia, la economía mundial o regional. Ya existen antecedentes de cambios inducidos en la fisiología y la distribución de plantas y hongos (Reid y Gamble, 2009; Cecchi y otros, 2010). En algunos casos, el aumento de la temperatura y la concentración de CO² puede afectar los patrones de fructificación de estos últimos (Klironomos y otros, 1997; Gange y otros, 2007; Wolf y otros, 2010), los períodos de polinización y producción de polen de las plantas (Zhang y otros, 2014a y b) o el contenido de alérgenos y sus patrones de distribución (Reid y Gamble, 2009; Cecchi y otros, 2010; Lang-Yona y otros, 2013).

Los problemas enumerados están estrechamente vinculados con preguntas de relevancia social sobre cómo la agricultura y otros tipos de uso de la tierra deben adaptarse para mitigar los daños producidos por la actividad humana. Es un desafío científico brindar respuestas a estos interrogantes, y ofrecer herramientas en base a un entendimiento sistémico para establecer políticas de gestión sustentable de cara al cambio previsto para el milenio.

Acknowledgments: Deseamos agradecer la colaboración del Dr. Gonzalo Torres, al suministrar desinteresadamente la imagen de la figura 3a, reproducida en este trabajo. Agradecemos muy especialmente al comité editorial de Meteorológica, por invitarnos a publicar este artículo de revisión y a los revisores que permitieron enriquecer este trabajo con sus valiosos comentarios.

REFERENCES

- Adams, R. I., Bhangar, S., Pasut, W., Arens, E. A., Taylor, J. W., Lindow, S. E., Nazaroff, W. W. y Bruns, T. D., 2015: Chamber bioaerosol study: outdoor air and human occupants as sources of indoor airborne microbes. *PLoS ONE* 10, e0128022.
- Alpert, P. A., Aller, J. Y. y Knopf, D. A., 2011a: Ice nucleation from aqueous NaCl droplets with and without marine diatoms. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, 5539–5555.
- Alpert, P. A., Aller, J. Y. y Knopf, D. A., 2011b: Initiation of the ice phase by marine biogenic surfaces in supersaturated gas and supercooled aqueous phases. *Physical Chemistry Chemical Physics* 13, 19882–19894.
- Angevin, F., Klein, E. K., Choimet, C., Gauffreteau, A., Lavigne, C., Messéan, A., y Meynard, J. M., 2008: Modelling impacts of cropping systems and climate on maize cross-pollination in agricultural landscapes: The MAPOD model. *European Journal of Agronomy* 28, 471–484.
- Amato, P., Ménager, M., Sancelme, M., Laj, P., Mailhot, G. y Delort, A.-M., 2005: Microbial population in cloud water at the Puy de Dôme: implications for the chemistry of clouds. *Atmospheric Environment* 39, 4143–4153.
- Amato, P., Parazols, M., Sancelme, M., Laj, P., Mailhot, G. y Delort, A.-M., 2007: Microorganisms isolated from the water phase of tropospheric clouds at the Puy de Dôme: major groups and growth abilities at low temperatures. *FEMS Microbiology Ecology* 59, 242–254.
- Andreae, M. O. y Rosenfeld, D., 2008: Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth-Science Reviews* 89, 13–41.
- Aylor, D. E. y Taylor, G. S., 1982: Aerial dispersal and drying of *Peronospora tabacina* conidia in tobacco shade tents. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America* 79, 697–700.
- Aylor, D. E., Schultes, N. P. y Shields, E. J., 2003: An aerobiological framework for assessing cross-pollination in maize. *Agricultural and*

- Forest Meteorology 11, 111–129.
- Aylor, D. E. y Boehm, M. T., 2006: Quantifying aerial concentrations of maize pollen in the atmospheric surface layer using remote-piloted airplanes and Lagrangian stochastic modeling. *Journal of applied meteorology and climatology* 45, 1003 – 1015.
- Bauer, H., Giebl, H., Hitzemberger, R., Kasper-Giebl, A., Reischl, G., Zibuschka, F. y Puxbaum, H., 2003: Airborne bacteria as cloud condensation nuclei. *Journal of Geophysical Research* 108, 1-5.
- Benedetti, G. M., Sastre, B. S. y Campo, A. M., 2014: Calendario polínico de especies potencialmente alergógenas y su relación con parámetros meteorológicos en Villa Ventana, provincia de Buenos Aires. *Boletín Geográfico* 36, 85 - 99.
- Belmonte, J., Alarcón, M., Avila, A., Scialabba, E. y Pino, D., 2008: Long-range transport of beech (*Fagus sylvatica* L.) pollen to Catalonia (north-eastern Spain). *International Journal of Biometeorology* 52, 675–687.
- Best, G., Amberger, R. y Cremer, C., 2013: Super-resolution microscopy: interference and pattern techniques. Ch9. En: Kubitscheck, U. (Ed.), *Fluorescence Microscopy: from Principles to Biological Applications*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Bhangar, S., Huffman, J. A. y Nazaroff, W. W., 2014: Size-resolved fluorescent biological aerosol particle concentrations and occupant emissions in a university classroom. *Indoor Air* 24, 604–617.
- Bhangar, S., Adams, R. I., Pasut, W., Huffman, J. A., Arens, E. A., Taylor, J. W., Bruns, T. D. y Nazaroff, W. W., 2015: Chamber bioaerosol study: human emissions of size-resolved fluorescent biological aerosol particles. *Indoor Air* 26, 193 - 206.
- Bianchi, M. M., 1992: Calendario polínico de la ciudad de Mar del Plata (agosto 1987 - agosto 1989). *Archivos Argentinos de Alergia e Inmunología* 23, 73-86.
- Bianchi, M. M., 1994: El muestreo aerobiológico en Mar del Plata: Aportes de una nueva metodología al análisis de polen. Su aplicación en el diagnóstico de la polinosis. Academia Nacional de Ciencias, Buenos Aires, Monografía N°10.
- Bianchi, M. M. y Olabuenaga, S., 2006: A 3-year airborne pollen and fungal spores record in San Carlos de Bariloche, Patagonia, Argentina. *Aerobiologia* 22, 247 - 257.
- Bianchi, M. M., Olabuenaga, S., Dzendoletas, M. A. y Civelli, E., 2004: El registro polínico de San Carlos de Bariloche. Septiembre 2001 – septiembre 2002. *Revista del Museo de Ciencias Naturales N. S.* 6, 1-7.
- Blank, R., Vinayaka, P. P., Tahir, M. W., Vellekoop, M. J. y Lang, W., 2015: Optical sensor system for the detection of mold: Concept for a fully automated sensor system for the detection of airborne fungal spores. *Proceedings IEEE Sensors*, 1-4.
- Borromei, A. M. y Quattrocchio, M., 1990: Dispersión del polen actual en el área de Bahía Blanca (Buenos Aires, Argentina). *Anales de la Asociación de Palinólogos de la Lengua Española* 5, 39 - 52.
- Boucher, A., Hidalgo, P. J., Thonnat, M., Belmonte, J., Galán, C., Bonton, P. y Tomczak, R., 2002: Development of a semi-automatic system for pollen recognition. *Aerobiologia* 18, 195- 201.
- Bourgeois, J. C., 2000: Seasonal and interannual pollen variability in snow layers of arctic ice caps. *Review of Palaeobotany and Palynology* 108, 17–36.
- Brodie, E. L., DeSantis, T. Z., Parker, J. P. M., Zubieta, I. X., Piceno, Y. M. y Andersen, G. L., 2007: Urban aerosols harbor diverse and dynamic bacterial populations. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America* 104, 299–304.
- Brown, J. K. M. y Hovmøller, M. S., 2002: Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease. *Science* 297, 537–541.
- Brown, G. D., Denning, D. W., Gow, N. A. R., Levitz, S. M., Netea, M. G. y White, T. C., 2012: Hidden killers: human fungal infections. *Science Translational Medicine* 4, 1-9.
- Burrows, S. M., Butler, T., Jöckel, P., Tost, H., Kerkweg, A., Pöschl, U. y Lawrence, M. G., 2009a: Bacteria in the global atmosphere –

- part 2: modeling of emissions and transport between different ecosystems. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 9281–9297.
- Burrows, S. M., Elbert, W., Lawrence, M. G. y Pöschl, U., 2009b: Bacteria in the global atmosphere – part 1: review and synthesis of literature data for different ecosystems. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 9263–9280.
- Businger, J. A. y Oncley, S. P., 1990: Flux measurement with conditional sampling. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 7, 349–352.
- Caramuti, V. E., Naab, O.A. y Murray, M.G. 2014: First report of airborne pollen in Santa Rosa, La Pampa, Argentina: a 2-year survey. *Aerobiologia* 30, 1 - 13.
- Carotenuto, F., Georgiadis, T., Gioli, B., Leyronas, C., Morris, C., Nardino, M., Wohlfahrt, G. y Miglietta, F., 2017: Ecosystem-atmosphere exchange of microorganisms in a Mediterranean grassland: new insights into microbial flux through a combined experimental-modeling approach. *Atmospheric Chemistry and Physics*. En revisión.
- Cecchi, L., D'Amato, G., Ayres, J. G., Galan, C., Forastiere, F., Forsberg, B., Gerritsen, J., Nunes, C., Behrendt, H., Akdis, C., Dahl, R. y Annesi-Maesano, I., 2010: Projections of the effects of climate change on allergic asthma: the contribution of aerobiology. *Allergy* 65, 1073–1081.
- Chamecki, M., Meneveau, C. y Parlange, M. B., 2009: Large eddy simulation of pollen transport in the atmospheric boundary layer. *Journal of Aerosol Science* 40, 241–255.
- Chen, C., Hendriks, E. A., Duin, R. P. W., Johan, H. C., Reiber, J. H. C., Hiemstra, P. S., de Weger, L. A. y Stoel, B. C., 2006: Feasibility study on automated recognition of allergenic pollen: grass, birch and mugwort. *Aerobiologia* 22, 275–284.
- Cour, P. y Van Campo, M., 1980: Prévisions de récoltes à partir de l'analyse du contenu pollinique de l'atmosphère. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris* 290, 1043–1046.
- Cremer, C., 2012: Optics far beyond the diffraction limit. *Springer Handbook of Lasers and Optics*. Springer.
- Crawford, I., Robinson, N. H., Flynn, M. J., Foot, V. E., Gallagher, M. W., Huffman, J. A., Stanley, W. R. y Kaye, P. H., 2014: Characterisation of bioaerosol emissions from a Colorado pine forest: results from the BEACHON-RoMBAS experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14, 8559–8578.
- Cuadrado, G. A., 1978: Polen atmosférico de la ciudad de Corrientes (Argentina). *Facena* 2, 55 - 68.
- Cuadrado, G. A., 1979: Calendario polínico preliminar para Corrientes (Argentina). *Facena* 3, 63 - 83.
- D'Amato, G., Baena-Cagnani, C. E., Cecchi, L., Annesi-Maesano, I., Nunes, C., Ansotegui, I., D'Amato, M., Liccardi, G., Sofia, M. y Canonica, W. G., 2013: Climate change, air pollution and extreme events leading to increasing prevalence of allergic respiratory diseases. *Multidisciplinary Respiratory Medicine* 8, 1-9.
- D'Amato, G., Cecchi, L., Bonini, S., Nunes, C., Annesi-Maesano, I., Behrendt, H., Liccardi, G., Popov, T. y van Cauwenberge, P., 2007: Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy* 62, 976–990.
- DeLeon-Rodriguez, N., Lathem, T. L., Rodríguez-R, L. M., Barazesh, J. M., Anderson, B. E., Beyersdorf, A. J., Ziemba, L. D., Bergin, M., Nenes, A. y Konstantinidis, K. T., 2013: Microbiome of the upper troposphere: species composition and prevalence, effects of tropical storms, and atmospheric implications. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America* 110, 2575–2580.
- Delort, A.-M., Vaïtilingom, M., Amato, P., Sancelme, M., Parazols, M., Mailhot, G., Laj, P. y Deguillaume, L., 2010: A short overview of the microbial population in clouds: potential roles in atmospheric chemistry and nucleation processes. *Atmospheric Research* 98, 249–260.
- Desjardins, R. L., 1977: Description and

- evaluation of a sensible heat flux detector. *Boundary Layer Meteorology* 11: 147 - 154. En: Thomas Foken, *Micrometeorology*, 2008, Springer - Verlag.
- Després, V. R., Huffman, J. A., Burrows, S. M., Hoose, C., Safatov, A. S., Buryak, G., Fröhlich-Nowoisky, J., Elbert, W., Andreae, M. O., Pöschl, U. y Jaenicke, R., 2012: Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review. *Tellus series B: Chemical and Physical Meteorology* 64, 1-40.
- Diehl, K., Matthias-Maser, S., Jaenicke, R. y Mitra, S. K., 2002: The ice nucleating ability of pollen: part II. Laboratory studies in immersion and contact freezing modes. *Atmospheric Research* 61, 125–133.
- Dimmick, R. L., Straat, P. A., Wolochow, H., Levin, G. V., Chatigny, M. A. y Schrot, J. R., 1975: Evidence for metabolic activity of airborne bacteria. *Journal of Aerosol Science* 6, 387–393.
- Dupont, S., Brunet, Y. y Jarosz, N., 2006: Eulerian modelling of pollen dispersal over heterogeneous vegetation canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 141, 82 - 104.
- Després, V.R., Huffman, J.A., Burrows, S.M., Hoose, C., Safatov, A.S., Buryak, G., Fröhlich-Nowoisky, J., Elbert, W., Andreae, M.O., Pöschl, U. y Jaenicke, R., 2012: Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review. *Tellus B* 64.
- Draxler, R. R. y Hess, G. D., 1998: An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition. *Australian Meteorological Magazine* 47, 295–308.
- Edmonds, R. L. (ed.), 1979: *Aerobiology: The Ecological Systems Approach*. US/IBP Synthesis Series 10. Dowden, Hutchinson & Ross, Inc.
- Ehrenberg, C. G., 1830: Neue Beobachtungen über blutartige Erscheinungen in Aegypten, Arabien und Sibirien, nebst einer Übersicht und Kritik der früher bekannten. *Annual Review of Physical Chemistry* 94, 477–514.
- Elbert, W., Taylor, P. E., Andreae, M. O. y Pöschl, U., 2007: Contribution of fungi to primary biogenic aerosols in the atmosphere: wet and dry discharged spores, carbohydrates, and inorganic ions. *Atmospheric Chemistry and Physics* 7, 4569–4588.
- Esch, R. E., Hartsell, C. J., Crenshaw, R. y Jacobson, R. S., 2001: Common allergenic pollens, fungi, animals, and arthropods. *Clinical Reviews in Allergy and Immunology* 21, 261–292.
- Faegri, K. y Van der Pijl, L., 1979: *The principles of pollination ecology*. Pergamon Press, Oxford, New York.
- Fernández-González, M., Rodríguez-Rajo, F. J., Jato, V., Escuredo, O. y Aira, M. J., 2011: Estimation of yield 'Loureira' variety with an aerobiological and phenological model. *Grana* 50, 63-72.
- Folloni, S., Kagkli, D.-M., Rajcevic, B., Guimarães, N. C. C., van Droogenbroeck, B., Valicente, F. H., van den Eede, G. y van den Bulcke, M., 2012: Detection of airborne genetically modified maize pollen by real-time PCR. *Molecular Ecology Resources* 12, 810–821.
- Fontana, S., 2003: Pollen deposition in coastal dunes, south Buenos Aires Province, Argentina. *Review of Palaeobotany and Palynology* 126, 17 - 37.
- France, I., Duller, A. W. G., Duller, G. A. T. y Lamb, H. F., 2000: A new approach to automated pollen analysis. *Quaternary Science reviews* 19, 537-546.
- Frenguelli, G., 1998: The contribution of Aerobiology to Agriculture. *Aerobiologia* 14, 95–100.
- Galán, C., Cariñanos, P., García-Mozo, H., Alcázar, P. y Domínguez-Vilches, E., 2001: Model for forecasting *Olea europaea* L. airborne pollen in South-West Andalusia, Spain. *International Journal of Biometeorology* 45, 59–63.
- Galán, C., Vázquez, L., García-Mozo, H. y Domínguez, E., 2004: Forecasting olive (*Olea europaea*) crop yield based on pollen emission. *Field Crops Research* 86, 43–51.
- Gaman, A., Rannik, Ü., Aalto, P., Pohja, T., Siivola, E., Kulmala, M. y Vesala, T., 2004: Relaxed eddy accumulation

- system for size-resolved aerosol particle flux measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 21, 933–943.
- Gange, A. C., Gange, E. G., Sparks, T. H. y Boddy, L., 2007: Rapid and recent changes in fungal fruiting patterns. *Science* 316, 71-71.
- Gao, M., Qiu, T., Jia, R. Han, M., Song, Y. y Wang, X., 2015: Concentration and size distribution of viable bioaerosols during non-haze and haze days in Beijing. *Environmental Science and Pollution Research* 2, 6, 4359-4368.
- García, M. E., 1990: Aeropalinología de Santiago del Estero I. *Archivos Argentinos de Alergia e Inmunología Clínica* 22, 6-12.
- García, M. E., 1992: Aeropalinología de Santiago del Estero. *Asociación Paleontológica Argentina* N° 2, 59-62.
- García, M. E., 1993: Aeropalinología de Santiago del Estero II. *Archivos Argentinos de Alergia e Inmunología Clínica* 24, 76-78.
- García, M. E., 2006: Lluvia polínica en Selvas Montanas de la provincia de Tucumán (Argentina). *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales* 8, 159-164.
- García, M. E., 2010: Aeropalinología de la ciudad de Yerba Buena, provincia de Tucumán, Argentina. *Acta Botánica Malacitana* 35, 95-111.
- García-Mozo, H., 2011: The use of aerobiological data on agronomical studies. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 18, 1–6.
- García-Mozo, H., Perez-Badía, R. y Galán, C., 2008: Aerobiological and meteorological factors' influence on olive (*Olea europaea* L.) crop yield in Castilla-La Mancha (Central Spain). *Aerobiologia* 24, 13–18.
- Gassmann, M. I., Pérez, C. F. y Gardiol, J. M., 2002: Sea-land breeze in a coastal city and its effect on pollen transport. *International Journal of Biometeorology* 46, 118-25.
- Gassmann, M. I. y Pérez, C. F., 2006: Trajectories associated to regional and extra-regional pollen transport in the southeast of Buenos Aires province, Mar del Plata (Argentina). *International Journal of Biometeorology* 50, 280–291.
- Gassmann, M. I. y Gardiol, J. M., 2007: Weather conditions associated with the potential for pollen recirculation in a coastal area. *Meteorological Applications* 48, 39-48.
- Green, B. J., Zinovia Mitakakis, T. y Tovey, E. R., 2003: Allergen detection from 11 fungal species before and after germination. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 111, 285–289.
- Gregory, P. H., 1945: The dispersion of air-borne spores. *Transactions of the British Mycological Society* 28, 26–72.
- Gregory, P. H., 1973: *The Microbiology of the Atmosphere*. Second Edition. Leonard Hill.
- Haga, D., Burrows, S., Iannone, R., Wheeler, M., Mason, R., Chen, J., Polishchuk, E., Pöschl, U. y Bertram, A., 2014: Ice nucleation by fungal spores from the classes Agaricomycetes, Ustilaginomycetes, and Eurotiomycetes, and the effect on the atmospheric transport of these spores. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14, 8611–8630.
- Haga, D. I., Iannone, R., Wheeler, M. J., Mason, R., Polishchuk, E. A., Fetch, T., van der Kamp, B. J., McKendry, I. G. y Bertram, A. K., 2013: Ice nucleation properties of rust and bunt fungal spores and their transport to high altitudes, where they can cause heterogeneous freezing. *Journal of Geophysical Research Atmosphere* 118, 7260–7272.
- Hallar, A. G., Chirokova, G., McCubbin, I., Painter, T. H., Wiedinmyer, C. y Dodson, C., 2011: Atmospheric bioaerosols transported via dust storms in the western United States. *Geophysical Research Letters* 38, 2–7.
- Hassett, M. O., Fischer, M. W. F. y Money, N. P., 2015: Mushrooms as rainmakers: how spores act as nuclei for raindrops. *PLoS ONE* 10, e0140407.
- Healy, D. A., Huffman, J. A., O'Connor, D. J., Pöhlker, C., Pöschl, U. y Sodeau, J. R., 2014: Ambient measurements of biological aerosol particles near Killarney, Ireland: a comparison between real-time fluorescence and microscopy techniques. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14, 8055–8069.
- Helbig, N., Vogel, B., Vogel, H. y Fiedler, F., 2004: Numerical modelling of pollen dispersion

- on the regional scale. *Aerobiologia* 3, 3 - 19.
- Held, A., Zerrath, A., McKeon, U., Fehrenbach, T., Niessner, R., Plass-Dimer, C., Kaminski, U., Berresheim, H. y Pöschl, U., 2008: Aerosol size distributions measured in urban, rural and high-alpine air with an electrical low pressure impactor (ELPI). *Atmospheric Environment* 42, 8502–8512.
- Hell, S. W. y Kroug, M., 1995: Ground-state-depletion fluorescence microscopy: a concept for breaking the diffraction resolution limit. *Applied Physics B Lasers and Optics* 60, 495–497.
- Hirst, J. M., 1952: An automatic volumetric spore trap. *Annals of Applied Biology* 39, 259 - 265.
- Hirst, J. M., 1953: Changes in atmospheric spore content: diurnal periodicity and the effects of weather. *Transactions of the British Mycological Society* 36, 375 - 393.
- Hirst, J. M., Stedman, O. J. y Hurst, G. W., 1967: Long-distance spore transport: vertical sections of spore clouds over the sea. *Journal of Genetical Microbiology* 48, 357–377.
- Hoffman, P. N., Bennett, A. M. y Scott, G., 1999: Controlling airborne infections. *Journal of Hospital Infection* 43, 203–210.
- Hofmann, W., 2011: Modelling inhaled particle deposition in the human lung—a review. *Journal of Aerosol Science* 42, 693–724.
- Holt, K., Allen, G., Hodgson, R., Marsland, S. y Flenley, J., 2011: Progress towards an automated trainable pollen location and classifier system for use in the palynology laboratory. *Review of Palaeobotany and Palynology* 167, 175–183.
- Huffman, J. A., Prenni, A. J., DeMott, P. J., Pöhlker, C., Mason, R. H., Robinson, N. H., Fröhlich-Nowoisky, J., Tobo, Y., Després, V. R., Garcia, E., Gochis, D. J., Harris, E., Müller-Germann, I., Ruzene, C., Schmer, B., Sinha, B., Day, D. A., Andreae, M. O., Jimenez, J. L., Gallagher, M., Kreidenweis, S. M., Bertram, A. K. y Pöschl, U., 2013: High concentrations of biological aerosol particles and ice nuclei during and after rain. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 6151–6164.
- Hummel, M., Hoose, C., Gallagher, M., Healy, D. A., Huffman, J. A., O'Connor, D., Pöschl, U., Pöhlker, C., Robinson, N. H., Schnaiter, M., Sodeau, J. R., Stengel, M., Toprak, E. y Vogel, H., 2015: Regional-scale simulations of fungal spore aerosols using an emission parameterization adapted to local measurements of fluorescent biological aerosol particles. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 6127–6146.
- Hussain, M., Madl, P. y Khan, A., 2011: Lung deposition predictions of airborne particles and the emergence of contemporary diseases, Part-I. *Health* 2, 51–59.
- Isard, S. A. y Gage, S. H., 2001: Flow of life in the atmosphere. An airscape approach to understanding invasive organisms. Michigan State University Press.
- Jarosz, N., Loubet, B., Durand, B., McCartney, A., Foueillassar, X. y Huber, L., 2003: Field measurements of airborne concentration and deposition rate of maize pollen. *Agricultural and Forest Meteorology* 119, 37–51.
- Jones, A. M. y Harrison, R. M., 2004: The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations—a review. *Sciences of the Total Environment* 326, 151–180.
- Katul, G., Poggi, D., Cava, D. y Finnigan, J., 2006: The relative importance of ejections and sweeps to momentum transfer in the atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology* 120, 367–375.
- Kawashima, S. y Hama, T., 2011: Pollen dispersal and hybridization model for risk assessment of genetically modified crops. En: Steyn, D. G., Trini Castelli, S. (Eds.), *Air Pollution Modeling and Its Application XXI*, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer.
- Klein, E. K., Lavigne, C., Picault, M. R. y Gouyon, P-H., 2006: Pollen dispersal of oilseed rape: estimation of the dispersal function and effects of field dimension. *Journal of Applied Ecology* 43, 141–151.
- Klironomos, J. N., Rillig, M. C., Allen, M. F., Zak, D. R., Pregitzer, K. S. y Kubiske, M. E., 1997: Increased levels of airborne fungal spores in response to *Populus tremuloides* grown

- under elevated atmospheric CO². Canadian Journal of Botany 75, 1670–1673.
- Knopf, D. A., Alpert, P. A., Wang, B. y Aller, J. Y., 2010: Stimulation of ice nucleation by marine diatoms. Nature Geoscience 4, 88–90.
- Kozloff, L. M., Turner, M. A. y Arellano, F., 1991: Formation of bacterial membrane ice-nucleating lipoglycoprotein complexes. Journal of Bacteriology 173, 6528–6536.
- Lacey, M. E. y West, J. S., 2006: The Air Spora. A manual for catching and identifying airborne biological particles. Springer.
- Lang-Yona, N., Levin, Y., Dannemiller, K. C., Yarden, O., Peccia, J. y Rudich, Y., 2013: Changes in atmospheric CO² influence the allergenicity of *Aspergillus fumigatus*. Global Change Biology 19, 2381–2388.
- Latorre, F., 1997: Comparison between phenological and aerobiological patterns of some arboreal species of Mar del Plata (Argentina). Aerobiologia 13, 49 - 59.
- Latorre, F., 1999: Differences between airborne pollen and flowering phenology of urban trees with reference to production, dispersal and interannual climate variability. Aerobiologia 15, 131–141.
- Latorre, F. y Bianchi, M. M., 1997: Relación entre aeropolen y vegetación arbórea en Mar del Plata (Argentina). Polen 8, 43–59.
- Latorre, F. y Pérez, C. F., 1997: One year of airborne pollen sampling in Mar del Plata (Argentina). Grana 36, 49 - 53.
- Latorre, F. y Bianchi, M. M., 1998: Relationships between flowering development of *Ulmus pumila* and *Fraxinus excelsior* and their airborne pollen. Grana 37, 233–238.
- Latorre, F. y Caccavari, M. A., 2007: Depositación polínica anual en el Parque Nacional Pre-Delta (Entre Ríos, Argentina). Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales 8, 195–200.
- Latorre, F. y Caccavari, M. A., 2009: Airborne pollen patterns in Mar del Plata atmosphere (Argentina) and its relationship with meteorological conditions. Aerobiologia 25, 297–312.
- Latorre, F., Romero, E. J. y Mancini, V., 2008: Comparative study of different methods for capturing airborne pollen, and effects of vegetation and meteorological variables. Aerobiologia 24, 107–120.
- Li, Z., Rosenfeld, D. y Fan, J., 2017: Aerosols and their Impact on Radiation, Clouds, Precipitation & Severe Weather Events. Oxford University Press.
- Li, P., Treloar, W. J., Flenley, J. R. y Empson, L., 2004: Towards automation of palynology 2: the use of texture measures and neural network analysis for automated identification of optical images of pollen grains. Journal of Quaternary Science 19, 755–762.
- Lighthart, B. y Shaffer, B. T., 1994: Bacterial flux from chaparral into the atmosphere in midsummer at a high desert location. Atmospheric Environment 28, 1267–1274.
- Lin, S.-J., Schranz, J. y Teutsch, S. M., 2001: Aspergillosis case-fatality rate: systematic review of the literature. Clinical Infectious Diseases 32, 358–366.
- Lindow, S. E., 1989: Localization of ice nucleation activity and the iceC gene product in *Pseudomonas syringae* and *Escherichia coli*. Molecular Plant-Microbe Interactions 2, 262–272.
- Loos, C., Seppelt, R., Meier-Bethke, S., Schiemann, J. y Richter, O., 2003: Spatially explicit modelling of transgenic maize pollen dispersal and cross-pollination. Journal of Theoretical Biology 22, 241–255.
- Lucas, G. B., Campbell, C. L. y Lucas, L. T., 1992: Diseases Caused by Airborne Fungi, En: Introduction to Plant Diseases. Springer.
- Majas, F. D. y Romero, E. J., 1992: Aeropalynological research in the Northeast of Buenos Aires Province, Argentina. Grana 31, 143 - 153.
- Majas, F. D., Noetinger, M., Romero, E. J., 1992: Airborne pollen and spores monitoring in Buenos Aires city: A preliminary report. Part I: Trees and shrubs. (AP). Aerobiologia 8, 285–296.
- Makra, L., Pálfi, S., 2007: Intra-regional and long-range ragweed pollen transport over southern Hungary. Acta Climatologica et chorologica 40-41, 69 - 77.
- Maldaner, S., Degrazia, G. A., Rizza, U.,

- Moreira, V. S., Puhales, F. S., Acevedo, O. C., Alves, I. y Carvalho, J. da C., 2013: Derivation of third-order vertical velocity turbulence moment in the convective boundary layer from large eddy simulation data: an application to the dispersion modeling. *Atmospheric Pollution Research* 4, 191–198.
- Mallo, A. C., Nitiu, D. S. y Gardella Sambeth, M. C., 2011: Airborne fungal spore content in the atmosphere of the city of La Plata, Argentina. *Aerobiologia* 27, 77–84.
- Mallo, A. C., Eliades, L. A., Nitiu, D. S. y Saparrat, M. C. N., 2017: Fungal monitoring of the indoor air of the Museo de La Plata Herbarium, Argentina *Revista Iberoamericana de Micología* 34, 99-105.
- Matthias-Maser, S., Reichert, K. y Jaenicke, R., 2000: Primary biological aerosol particles at the high alpine site of Jungfraujoch/Switzerland. *Journal of Aerosol Science* 31 (Suppl. 1), 955–956.
- McCartney, H. A. y Lacey, M. E., 1990: The production and release of ascospores of *Pyrenopeziza brassicae* on oilseed rape. *Plant Pathology* 39, 17 - 32.
- Meza Torres, E. I., Cerne, B., Ulke, A. G. y Morbelli, M. A., 2014: Distribution of *Ophioglossum reticulatum* L. in South America. A case of long-distance jump dispersal? *International Journal of Biometeorology* 59, 137 - 150.
- Möhler, O., De Mott, P. J., Vali, G. y Levin, Z., 2007: Microbiology and atmospheric processes: the role of biological particles in cloud physics. *Biogeosciences* 4, 1059–1071.
- Morris, C. E., Georgakopoulos, D. G. y Sands, D. C., 2004: Ice nucleation active bacteria and their potential role in precipitation. *Journal de Physique Archives IV* 121, 87–103.
- Morris, C. E., Sands, D. C., Glaux, C., Samsatly, J., Asaad, S., Moukahel, A. R., Gonçalves, F. L. T. y Bigg, E. K., 2013: Urediospores of rust fungi are ice nucleation active at N-10 °C and harbor ice nucleation active bacteria. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 4223–4233.
- Morris, C. E., Leyronas, C. y Nicot, P. C., 2014a: Movement of bioaerosols in the atmosphere and its consequences on climate and microbial evolution. En: Colbeck, I., Mihalís, L. (Eds.), *Aerosol Science: Technology and Applications*. John Wiley & Sons.
- Morris, C. E., Conen, F., Huffman, J. A., Phillips, V., Pöschl, U. y Sands, D. C., 2014b: Bioprecipitation: a feedback cycle linking Earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere. *Global Change Biology* 20, 341–351.
- Muñoz, N. E., Di Pasquo, M., Biganzoli, F. y Batista, W. B., 2017: Análisis aeropalínológico en tres áreas de vegetación dentro del Parque Nacional El Palmar (Colón, Entre Ríos) y su relación con la vegetación local y regional. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 52, 473 - 496.
- Muñoz-Rodríguez, A. F., Tormo, R. y Silva, M. I., 2011: Pollination dynamics in *Vitis vinifera* L. *American Journal of Enology and Viticulture* 62, 113 - 117.
- Murray, M. G., Sonaglioni, M. I. y Villamil, C. B., 2002: Annual variation of airborne pollen in the city of Bahía Blanca, Argentina. *Grana* 4, 183-189.
- Murray, M. G., Scofield, R. L., Galán, C. y Villamil, C. B., 2007: Airborne pollen sampling in a Wildlife Reserve in the south of Buenos Aires province, Argentina. *Aerobiologia* 23, 107-117.
- Murray, M. G., Galán C. y Villamil, C. B., 2008: Aeropalynological research in Salitral de la Vidriera, Buenos Aires province, Argentina. *Aerobiologia* 24, 181 - 190.
- Murray, M. G., Galán, C., Villamil, C. B., 2010: Airborne pollen in Bahía Blanca, Argentina: seasonal distribution of pollen types. *Aerobiologia* 26, 195–20.
- Murray, M. G. y Galán, C., 2016: Effect of the meteorological parameters on the *Olea europaea* L. pollen season in Bahía Blanca (Argentina). *Aerobiologia* 32, 541–553.
- Naab, O. A., 1999: Lluvia polínica actual en el Parque Nacional Nacional Lihue-Calel, La Pampa, Argentina. *Asociación Paleontológica Argentina. Publicación Especial* 6, 85 - 89.

- Nazaroff, W. W., 2015: Indoor bioaerosol dynamics. *Indoor Air* 61–78.
- Nielsen, K. F., 2003: Mycotoxin production by indoor molds. *Fungal Genetics and Biology* 39, 103–117.
- Nitiu, D. S., 2003: Annual, daily and intradiurnal variation of *Celtis* pollen in the city of La Plata, Argentina. *Aerobiologia* 19, 71–78.
- Nitiu, D. S., 2004: Intradiurnal fluctuation of pollen in La Plata, Argentina. Part I, herbaceous pollen types. *Aerobiologia* 20, 69–74.
- Nitiu, D. S., 2006: Aeropalynologic analysis of La Plata City (Argentina) during a 3-year period. *Aerobiologia* 22, 79–87.
- Nitiu, D. S., 2009: Estudio del polen atmosférico y su relación con la vegetación local. La Plata, Argentina. *Acta Botanica Malacitana* 34, 1–11.
- Nitiu, D. S. y Mallo, A. C., 2002: Incidence of allergenic pollen of *Acer* spp., *Fraxinus* spp. and *Platanus* spp. in the city of La Plata, Argentina: preliminary results. *Aerobiologia* 18, 65 - 71.
- Nitiu, D. S. y Mallo, A. C., 2011: Variaciones en la estacionalidad de polen y esporas fúngicas en la atmósfera de la ciudad de La Plata (Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 46, 297–304.
- Nitiu, D. S., Mallo, A. C., Gardella Sambeth, M. C. y Morbelli, M. A., 2010: Contribución a la identificación de esporas del Reino Fungi en la atmósfera de La Plata, Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 45, 301 - 308.
- Nitiu, D. S., Mallo, A. C. y Romero, E. J., 2003: Quantitative aeropalynology in the atmosphere of Buenos Aires city, Argentina. *Aerobiologia* 19, 1–10.
- Nitiu, D. S. y Romero, E. J., 2001: Contenido polínico en la atmósfera de la ciudad de La Plata. *Polen* 11, 79–85.
- Noetinger, M., 1993: Tres años de monitoreo de la lluvia polínica en la ciudad de Buenos Aires. *Archivos Argentinos de Alergia e Inmunología Clínica* 24, 2 - 14.
- Noetinger, M. y Romero, E. J., 1997: Monitoreo diario y volumétrico del polen atmosférico en la ciudad de Buenos Aires. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 32, 185–194.
- Noetinger, M., Romero, E. J. y Majas, F. D., 1994: Airborne pollen and spores monitoring in Buenos Aires city: A preliminary report Part II. Herb, weeks (NAP) and spores. General discussion. *Aerobiologia* 10, 129–139.
- Núñez Otaño, N. B., Di Pasquo, M., Muñoz, N. E., 2015: Airborne fungal richness: proxies for floral composition and local climate in three sites at the El Palmar National Park (Colón, Entre Ríos, Argentina). *Aerobiologia* 15, 537–547.
- Olabeuena, S., Bianchi, M. M., Vacchino, M., Ozores, C. C. y Fainstein, B., 2007: Polen y polinosis en San Carlos de Bariloche. Desde la Patagonia: difundiendo saberes 4, 42 - 47.
- Pasken, R. y Pietrowicz, J. A., 2005: Using dispersion and mesoscale meteorological models to forecast pollen concentrations. *Atmospheric Environment* 39, 7689–7701.
- Pasteur, L., 1860a: Expériences relatives aux générations dites spontanées. *Comptes Rendus Hebdomadaires Seances De L'Academie Des Sciences* 50, 303–307.
- Pasteur, L., 1860b: Suite à une précédente communication relative aux générations dites spontanées. *Comptes Rendus Hebdomadaires Seances De L'Academie Des Sciences* 51, 675–678.
- Pérez, C. F., Bianchi, M. M., Gassmann, M. I., Tonti, N. y Pizzo, I., 2018: A case study of anisotropic airborne pollen transport in Northern Patagonia using a Lagrangian particle dispersion model. *Review of Palaeobotany and Palynology* 258, 215 – 222.
- Pérez, C. F., Castañeda, M. E., Gassmann, M. I. y Bianchi, M. M., 2009a: A statistical study of *Weinmannia* pollen trajectories across the Andes. *Advances in Geosciences* 22, 79–84.
- Pérez, C. F., Gardiol, J. M. y Paez, M. M., 2001a: Difusión atmosférica de polen en el sistema urbano-rural de la ciudad de Mar del Plata (Argentina), en los tres últimos meses del año 1995. *Polen* 11, 87–98.
- Pérez, C. F., Gardiol, J. M. y Paez, M. M., 2001b: Comparison of intradiurnal variations of

- airborne pollen in Mar del Plata (Argentina). Part I Non-arboreal pollen. *Aerobiologia* 17, 151–153.
- Pérez, C. F., Gardiol, J. M. y Paez, M. M., 2003. Comparison of diurnal variation of airborne pollen in Mar del Plata (Argentina). 2. Arboreal pollen. *Grana* 42, 1–7.
- Pérez, C. F., Gassmann, M. I. y Covi, M., 2009b: An evaluation of the airborne pollen–precipitation relationship with the superposed epoch method. *Aerobiologia* 25, 313–320.
- Pérez, C. F., Latorre, F., Stutz, S. y Pastorino, S., 2009c: A two-year report of pollen influx into Tauber traps in Mar Chiquita coastal lagoon, Buenos Aires, Argentina. *Aerobiologia* 25:167–181.
- Pérez, C. F. y Paez, M. M., 1998: Seasonal airborne pollen pattern in Mar del Plata city, Argentina. *Aerobiologia* 14, 383–389.
- Perring, A. E., Schwarz, J. P., Baumgardner, D., Hernandez, M. T., Spracklen, D. V., Heald, C. L., Gao, R. S., Kok, G., McMeeking, G. R., McQuaid, J. B. y Fahey, D. W., 2015: Airborne observations of regional variation in fluorescent aerosol across the United States. *Journal of Geophysical Research Atmosphere* 120, 1153–1170.
- Pöschl, U., 2005: Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie International Edition English* 44, 7520–7540.
- Posselt, R., Lohmann, U., 2008: Influence of Giant CCN on warm rain processes in the ECHAM5 GCM. *Atmospheric Chemistry and Physics* 8, 3769–3788.
- Ramón, G. D., Ramón, F. M., Murray, M. G., Sonaglioni, M. I., Villamil, C. B. y Apphatie, S. A., 2000: Polinosis por árboles en la ciudad de Bahía Blanca. *Archivos Argentinos de Alergia e Inmunología Clínica* 31 (Supl.1), S45.
- Ramón, G. D., Murray, M. G., Sonaglioni, M. I., Villamil, C. B. y Ramón, F. M., 2001: Relevamiento de pólenes aéreos en época de polinosis en la ciudad de Bahía Blanca. *Archivos de Alergia e Inmunología Clínica* 32 (Supl.2), S66.
- Reid, C. E. y Gamble, J. L., 2009: Aeroallergens, allergic disease, and climate change: impacts and adaptation. *EcoHealth* 6, 458–470.
- Riley, R. L., 1974: Airborne infection. *American Journal of Medicine* 57, 466–475.
- Romero, E., Majas, F. D. y Noetinger, M., 1992: Polen aéreo en la ciudad de Buenos Aires. *Archivos Argentinos de Alergia e Inmunología Clínica* 23, 4 - 14.
- Ronneberger, O., Schultz, E. y Burkhardt, H., 2002: Automated pollen recognition using 3D volume images from fluorescence microscopy. *Aerobiologia* 18, 107 - 115.
- Rousseau, D.-D., Schevin, P., Duzer, D., Cambon, G., Ferrier, J., Jolly, D. y Poulsen, U., 2006: New evidence of long distance pollen transport to southern Greenland in late spring. *Review of Palaeobotany and Palynology* 141, 277–286.
- Rylander, R., 2002: Endotoxin in the environment–exposure and effects. *Journal of Endotoxin Research* 8, 241–252.
- Saari, S., Reponen, T. y Keskinen, J., 2014: Performance of two fluorescence-based real-time bioaerosol detectors: BioScout vs. UVAPS. *Aerosol Science Technology* 48, 371–378.
- Šaulienė, I. y Veriankaitė, L., 2006: Application of backward air mass trajectory analysis in evaluating airborne pollen dispersion. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 3, 113 - 120.
- Schaal, K. P., 1991: Medical and microbiological problems arising from airborne infection in hospitals. *Journal of Hospital Infection* 18, 451–459.
- Schnell, R. C. y Vali, G., 1976: Biogenic ice nuclei: part I. Terrestrial and marine sources. *Journal of Atmospheric Science* 33, 1554–1564.
- Sesartic, A., Lohmann, U. y Storelvmo, T., 2012: Bacteria in the ECHAM5-HAM global climate model. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 8645–8661.
- Spaan, S., Wouters, I. M., Oosting, I., Doekes, G. y Heederik, D., 2006: Exposure to inhalable dust and endotoxins in agricultural industries. *Journal of Environmental Monitoring* 8,

- 63–72.
- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D. y Ngan, F., 2015: NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*. December 2015, 2059 - 2077.
- Steiner, A. L., Brooks, S. D., Deng, C., Thornton, D. C. O., Pendleton, M. W. y Bryant, V., 2015: Pollen as atmospheric cloud condensation nuclei. *Geophysics Research Letters* 42, 3596–3602.
- Tahir, M. W., Zaidi, N. A., Blank, R., Vinayaka, P. P., Vellekoop, M. J. y Lang, W., 2017: Fungus Detection Through Optical Sensor System Using Two Different Kinds of Feature Vectors for the Classification. *IEEE Sensors Journal* 17, 1-3.
- Tallapragada, P., Ross, S. D. y Schmale, D. G., 2011: Lagrangian coherent structures are associated with fluctuations in airborne microbial populations. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 21, 1-16.
- Taylor, P. E., Flagan, R. C., Miguel, A. G., Valenta, R. y Glovsky, M. M., 2004: Birch pollen rupture and the release of aerosols of respirable allergens. *Clinical and Experimental Allergy* 34, 1591–1596.
- Taylor, P. E., Flagan, R. C., Valenta, R., Glovsky, M. M., 2002: Release of allergens as respirable aerosols: a link between grass pollen and asthma. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 109, 51–56.
- Thomas, C. y Foken, T., 2007: Flux contribution of coherent structures and its implications for the exchange of energy and matter in a tall spruce canopy. *Boundary-Layer Meteorology* 123, 317–337.
- Torres, G. R., Pérez, C. F., Lupo, L. C. y Martínez, O. G., 2014: Registro preliminar del depósito atmosférico anual de esporas de helechos de las yungas sobre un gradiente ambiental en la cuenca media del río Perico (Jujuy, Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 49, 503-512.
- Twohy, C. H., McMeeking, G. R., DeMott, P. J., McCluskey, C. S., Hill, T. C. J., Burrows, S. M., Kulkarni, G. R., Tanarhte, M., Kafle, D. N. y Toohey, D. W., 2016: Abundance of fluorescent biological aerosol particles at temperatures conducive to the formation of mixed phase and cirrus clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16, 8205–8225.
- Urbano, R., Palenik, B., Gaston, C. J., Prather, K. A., 2011: Detection and phylogenetic analysis of coastal bioaerosols using culture dependent and independent techniques, *Biogeosciences* 8, 301-309.
- Vaïtilingom, M., Deguillaume, L., Vinatier, V., Sancelme, M., Amato, P., Chaumerliac, N. y Delort, A.-M., 2013: Potential impact of microbial activity on the oxidant capacity and organic carbon budget in clouds. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 559–564.
- Vali, G., Christensen, M., Fresh, R. W., Galyan, E. L., Maki, L. R. y Schnell, R. C., 1976: Biogenic ice nuclei. Part II: bacterial sources. *Journal of Atmospheric Sciences* 33, 1565–1570.
- Vara, A., Fernández-González, M., Aira, M. J. y Rodríguez-Rajo, F. J., 2016: *Fraxinus* pollen and allergen concentrations in Ourense (South-western Europe). *Environmental Research* 147, 241–248.
- Vega, L., Bianchi, M. M. y Nordestrom, G., 1999: Airborne pollen and allergy in the Río Negro and Neuquén Upper valley, North Patagonia: a preliminary approach. *Allergy Supplement* 50: 7.
- von Blohn, N., Mitra, S. K., Diehl, K. y Borrmann, S., 2005: The ice nucleating ability of pollen: part III: new laboratory studies in immersion and contact freezing modes including more pollen types. *Atmospheric Research* 78, 182–189.
- Weil, J. C., Sullivan, P. P. y Moeng, C. H., 2004: The Use of Large-Eddy Simulations in Lagrangian Particle Dispersion Models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61, 2877–2887.
- Wolf, J., O'Neill, N. R., Rogers, C. A., Muilenberg, M. L. y Ziska, L. H., 2010: Elevated atmospheric carbon dioxide concentrations amplify *Alternaria alternata*

- sporulation and total antigen production. *Environmental Health Perspectives* 118, 1223–1228.
- Womack, A. M., Bohannan, B. J. M. y Green, J. L., 2010: Biodiversity and biogeography of the atmosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 365, 3645–3653.
- Zhang, R., Duhl, T., Salam, M. T., House, J. M., Flagan, R. C., Avol, E. L., Gilliland, F. D., Guenther, A., Chung, S. H., Lamb, B. K. y Van Reken, T. M., 2014a: Development of a regional-scale pollen emission and transport modeling framework for investigating the impact of climate change on allergic airway disease. *Biogeosciences* 11, 1461–1478.
- Zhang, Y., Fountain, D. W., Hodgson, R. M., Flenley, J. R., Gunetileke, S., 2004: Towards automation of palynology 3: pollen pattern recognition using Gabor transforms and digital moments. *Journal of Quaternary Science* 19, 763–768.
- Zhang, Y., Bielory, L. y Georgopoulos, P. G., 2014b: Climate change effect on *Betula* (birch) and *Quercus* (oak) pollen seasons in the United States. *International Journal of Biometeorology* 58, 909–919.
- Ziamba, L. D., Beyersdorf, A. J., Chen, G., Corr, C. A., Crumeyrolle, S. N., Diskin, G., Hudgins, C., Martin, R., Mikoviny, T., Moore, R., Shook, M., Thornhill, K. L., Winstead, E. L., Wisthaler, A. y Anderson, B. E., 2016: Airborne observations of bioaerosol over the Southeast United States using a Wideband Integrated Bioaerosol Sensor (WIBS-4 A). *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 121, 8506–8524.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.