

El aire: hábitat y medio de transmisión de microorganismos

M. C. DE LA ROSA, M. A. MOSSO y C. ULLÁN*

RESUMEN

La atmósfera no tiene una microbiota autóctona pero es un medio para la dispersión de muchos tipos de microorganismos (esporas, bacterias, virus y hongos), procedentes de otros ambientes. Algunos han creado adaptaciones especializadas que favorecen su supervivencia y permanencia. Los microorganismos dispersados por el aire tiene una gran importancia biológica y económica. Producen enfermedades en plantas, animales y humanos, causan alteración de alimentos y materiales orgánicos y contribuyen al deterioro y corrosión de monumentos y metales. La Microbiología del aire comienza en el siglo XIX, con Pasteur y Miquel que diseñaron métodos para estudiar los microorganismos en el aire y descubrir la causa de algunas enfermedades. Desde entonces numerosos investigadores han trabajado en este campo tanto en el aire exterior como en recintos cerrados. Las enfermedades transmitidas por el aire, producidas por bacterias, virus y hongos, son las respiratorias (neumonía, tosferina, tuberculosis, legionelosis, resfriado, gripe), sistémicas (meningitis, sarampión, varicela, micosis) y alérgicas.

PALABRAS CLAVE: Microorganismos del aire, Supervivencia, Enfermedades.

* Departamento de Microbiología II. Facultad de Farmacia. UCM.

INTRODUCCIÓN

La atmósfera no tiene una microbiota autóctona, pero es un medio para la dispersión rápida y global de muchos tipos de microorganismos. Además hay una importante transferencia de ellos y de sus metabolitos gaseosos entre la atmósfera, la hidrosfera y la litosfera. Aunque la atmósfera es un ambiente hostil para los microorganismos, en la troposfera inferior se encuentran un gran número de ellos.

Determinadas localizaciones temporales de la troposfera pueden ser hábitats adecuados para el crecimiento de los microorganismos. Las nubes poseen agua, intensidad de luz y concentración de CO₂ suficiente para permitir el crecimiento de los microorganismos fotoautótrofos. En zonas industriales, puede haber, incluso, la suficiente concentración de sustancias orgánicas en la atmósfera que permita el crecimiento de algunos microorganismos heterótrofos. Sin embargo, la «vida en el aire» es sólo una posibilidad fascinante sin ninguna prueba concluyente y su importancia en la práctica es pequeña (Atlas y Bartha, 2002).

Los microorganismos pueden ser transportados rápidamente, en forma de bioaerosoles, a través de grandes distancias con el movimiento del aire que representa el mejor camino de dispersión. Algunos han creado adaptaciones especializadas que favorecen su supervivencia y su dispersión en la atmósfera. El transporte se realiza sobre partículas de polvo, fragmentos de hojas secas, piel, fibras de la ropa, en gotas de agua o en gotas de saliva eliminadas al toser, estornudar o hablar.

Los microorganismos dispersados en el aire tienen una considerable importancia biológica y económica. Numerosas enfermedades de plantas son causadas por hongos y algunas por virus y bacterias que se transmiten por el aire, produciendo graves pérdidas en las cosechas (Waggoner, 1983). Varias enfermedades del hombre y los animales, víricas, bacterianas y fúngicas se transmiten por la atmósfera y a menudo se producen brotes epidémicos. Los microorganismos presentes en el aire también pueden contaminar los alimentos y materiales orgánicos (cuero, textiles, papel) produciendo su alteración. Además, los microorganismos por su metabolismo o transformando la materia orgánica, son la fuente principal de los gases producidos biológicamente en la atmósfera: amoníaco, óxido nítrico, óxido nitroso, sulfhídrico, anhídrido carbónico. Aunque las cantidades emitidas son insignificantes con respecto a las emitidas por el hombre o la industria, pueden contribuir a producir deterioros en algunos ambientes y materiales, como pinturas y el mal de la piedra de los monumentos o corrosión de metales (Stetzenbach, 1997).

DESARROLLO HISTÓRICO DE LA MICROBIOLOGÍA DEL AIRE

La existencia de una multitud de corpúsculos en el aire fue observada desde la antigüedad. Lucretius (55 a.C.) observó las partículas de polvo brillando en un rayo de sol en una habitación oscura y concluyó que su movimiento se debía al bombardeo de innumerables e invisibles átomos en el aire, aunque fue necesario esperar al descubrimiento del microscopio para ver que en el aire había microorganismos vivos. Las esporas de los hongos fueron vistas por un botánico napolitano, Valerius Cordus, en el siglo XVI, pero fue Micheli (1679-1737) quien primero las dibujó observando las esporas de los mohos que se transmitían por el aire (Miquel y Cambert, 1901). Leeuwenhoek (1722) observa y describe por primera vez las bacterias en distintos ambientes y supone que *«estos animálculos pueden ser transportados por el viento mediante el polvo que flota en el aire»*.

Un siglo después, Ehrenberg, en sus numerosas memorias publicadas de 1822 a 1858, demostró que tanto las partículas atmosféricas del interior de las casas y hospitales como las del aire exterior de elevadas montañas estaban compuestas de esporas criptogámicas. En esta misma época en Francia, Gaultier de Claubry (1855), inaugura la investigación científica estudiando las partículas atmosféricas mediante un procedimiento que las retiene haciendo borbotear el aire en agua destilada. Pero fue Pasteur el que perfeccionó los procedimientos empleados por este investigador y realizó los primeros estudios precisos de las bacterias del aire, cuando demostró la no existencia de la generación espontánea. El método utilizado consistió en hacer pasar un volumen determinado de aire con ayuda de un aspirador por algodón-pólvora colocado en un tubo de vidrio, que posteriormente se disolvía en alcohol-éter. En el líquido se depositaban todas las partículas del aire, entre ellas esporas de mohos y de bacterias. En 1862 escribe:

«Hay constantemente en el aire un número variable de corpúsculos cuya forma y estructura anuncian que son organizados. Sus dimensiones se encuentran alrededor de 1:100 mm. Unos son esféricos, otros ovoides, muchos son translúcidos y parecen esporas de mohos» (Pasteur, 1862).

En aquella época, uno de los motivos que propiciaron el estudio de los microorganismos del aire fue descubrir la causa de algunas enfermedades. Así sucedió durante la epidemia de cólera que apareció en Europa en 1847 y 1848. Ehrenberg en Berlín, Swagne, Brittan y Budd en Inglaterra, Robin y Pouchet en Francia, realizaron diversas investigaciones para descubrir en el aire de los hospitales los «gérmenes» causantes de esta enfermedad (Miquel y Cambert, 1901). También en la siguiente epidemia de cólera, Thompson (1855) intentó descubrir el agente causante utilizando el método de Claubry,

observando vibrios y mohos. Otros investigadores como Selmi en Italia y Salisbury en EEUU (1866), estudiaron el aire de los pantanos con el fin de conocer la causa de la fiebre intermitente y la malaria. El método que usaron estos primeros investigadores fue muy simple: consistía en explorar el aire con un portaobjetos con un líquido viscoso como la glicerina.

El aeroscopio sustituyó con ventaja a estos métodos. Inventado por Pouchet en 1860, consistía en un tubo grueso cilíndrico unido por uno de sus extremos a una tubuladura por el cual se aspiraba el aire, y por el otro extremo se colocaba una lámina de vidrio recubierta de una sustancia viscosa como glicerina, que podía observarse al microscopio. Cunningham lo reformó en 1872 y Miquel lo unió a una veleta y posteriormente a una bomba aspiradora para poder realizar análisis cuantitativos (1879). Hesse (1884) diseñó un sistema para contar los microorganismos, consistente en un tubo grueso recubierto en su interior de gelatina. El aire penetraba mediante un tubo unido a un aspirador a través de un orificio realizado en la membrana de caucho que recubría un extremo del tubo. A partir de este aparato, Miquel diseñó un modelo más práctico consistente en un matraz cónico con una tubuladura lateral, por la que entraba el aire a través de un tubo capilar inmerso en un medio de gelatina.

Pierre Miquel fue sin duda el investigador que más estudió los microorganismos del aire, en el observatorio de Montsouris en París, desde 1879 y durante más de 25 años, realizó numerosos ensayos creando y perfeccionando una gran variedad de métodos. Además del aeroscopio, empleó un procedimiento basado en el fraccionamiento de los cultivos para determinar el número de hongos y bacterias, consistente en dirigir el aire en tubos de bolas y posteriormente (1880), en un matraz de borboteo, conteniendo líquidos nutritivos estériles.

A partir de 1882 se generalizan los análisis microbiológicos del aire, estudiándose el número y tipo presentes en diversos ambientes. Miquel fue el que realizó los

estudios más numerosos y variados. Analizó tanto el aire confinado de casas y hospitales como la atmósfera de diversas calles de París, de los parques, el cementerio de Mont Parnasse, e incluso las alcantarillas. No sólo determinó el número por m³ presente en cada uno de estos ambientes, sino su naturaleza y propiedades patógenas, así como la influencia de los diversos factores (temperatura, lluvia, corrientes de aire, altitud, número de personas, etc.) y la posibilidad de transmisión por el aire de enfermedades contagiosas (Miquel y Cambert, 1901). Son de interés algunas de sus conclusiones:

—«Los sitios abiertos y con árboles, como el cementerio de Mont Parnasse y parques, tienen entre 6 y 7 veces menos microorganismos que las calles de París» (1881).

—«Se observa un aumento del número de bacterias de las calles de París de Febrero a Julio, disminuyendo de Agosto a Enero».

—«Hay una variación diurna con dos máximos (6-8 de la mañana y 8-9 de la tarde) y dos mínimos (2 de la mañana y 2 de la tarde)».

—«Es más impuro el aire de las casas de las ciudades que las del campo, y el de las casas antiguas que el de las nuevas».

—«En una habitación cerrada en ausencia de personas el aire es puro y en los hospitales mal ventilados, el aire está más cargado de bacterias en invierno que en verano».

En 1882 demostró que a medida que aumenta la altitud, disminuye el número de microorganismos, en los análisis que realizó desde el tejado del Panteón de París (82 m). Posteriormente, otros investigadores corroboraron esta afirmación. Así, en 1883 y 1884, Freudenberg, estudiando el aire de diversos picos de los Alpes, concluyó que a 300 m hay muy pocos microorganismos y que por encima de 4.000 la pureza era absoluta. También Cristiani en 1893, obtiene los mismos resultados en unos experimentos realizados en globo.

Además Miquel, junto con Moreau, estudiaron el aire de diversos mares como Atlántico y Mediterráneo en investigaciones que duraron dos años (1884-86) donde tomaron muestras que les llevó desde Burdeos a Río de la Plata (Argentina) y de Marsella a Alejandría y Odessa (Turquía). En ellas observan que el número de bacterias y hongos es alto en las costas, mientras que es prácticamente puro a sólo 100 Km.

Otros investigadores también estudiaron el aire de las ciudades. El primero fue Cunningham que en 1872 realizó una serie de experiencias en la atmósfera libre y el aire de las alcantarillas de Calcuta, con el fin de descubrir el agente causante del cólera y de otras fiebres. También Albert Levi (1883) estudió el aire de las alcantarillas de París, Carnelly *et al.* (1887) el aire de Dundee, Roster (1889) el de Florencia y Pereira (1895) el de Oporto (Miquel y Cambert, 1901). Otros estudiaron el aire de las regiones polares, demostrando que era de una gran pureza (Levin, 1899; Ekelöf, 1907).

Mucho más difícil fue determinar en aquella época, el tipo de bacterias presentes en el aire. Miquel y Cambert (1901) afirman que la mayoría son saprofitas y proceden del suelo, encontrando una gran variedad, siendo las más frecuentes las bacterias cromógenas, los bacilos esporulados y los cocos. Resultados semejantes obtuvieron Grace y Frankland (1887) en Londres y Dyar (1895) en Nueva York.

Otro aspecto que hemos comentado anteriormente fue la sospecha desde antiguo de que diversas enfermedades podían transmitirse por el aire. Los filósofos y médicos de la antigüedad difundieron la creencia de que las enfermedades eran debidas a «*miasmas*», efluvios venenosos por conjunciones planetarias y, hasta que no se demostró la existencia de los microorganismos en

el siglo XIX, se siguió pensando que eran debidas al aire envenenado. Varron (116-26 a. C) fue uno de los primeros que intuyó la presencia en el aire de organismos vivos. Esta idea la vuelven a retomar Roger Bacon, en el siglo XIII y Fracastorio de Verona, en el XVI, el cual indica en su obra «*De contagionibus*» (1546) que las enfermedades infecciosas eran producidas por un «*contagium vivum*» y que podían transmitirse a través del aire «*ad distans*» (Bulloch, 1938). La hipótesis de la existencia de bacterias patógenas en el aire, llevó a Lister en 1867 a la utilización de pulverizaciones del aire con ácido carbólico para evitar la infección de las heridas quirúrgicas, comenzando así la época de la antisepsia en la cirugía. Posteriormente se demostró la presencia en el aire de varias bacterias patógenas como *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes*, *Mycobacterium tuberculosis*, etc. y que, por tanto, a través de él podían transmitirse enfermedades infecciosas como la escarlatina, tuberculosis, tosferina y rubéola (Macé, 1913). La presencia en el aire confinado de estreptococos de la boca, hizo sugerir a Gordon (1904) que estas bacterias podían usarse como índice de contaminación respiratoria del aire. En aquella época se pensó que la transmisión no era posible a través de grandes distancias, ni siquiera de un barrio a otro dentro de una misma ciudad, sino que era necesaria una gran proximidad, y que el contagio se debía a secreciones respiratorias de una persona enferma a otra sana (Flügge, 1897).

En el siglo XX, el estudio de los microorganismos del aire sufre grandes altibajos. En los primeros años se continuaron analizando diversos ambientes, siguiendo la línea de los investigadores del siglo XIX, siendo los más novedosos los realizados en el Metro de Londres por Andrews en 1902 y Forbes en 1924, y en Nueva York por Soper en 1908 (Gregory, 1961).

Ya en los años treinta, aparecen los trabajos de Wells, que realizó en numerosos ambientes de Nueva York como las calles, hospitales o escuelas. Tuvo gran importancia el descubrimiento de los «núcleos goticulares», demostrando que algunos microorganismos patógenos podían transmitirse a grandes distancias y sobrevivir en el ambiente durante semanas o meses. Igualmente interesante fue la introducción del método de centrifugación para la detección de los microorganismos del aire (1933) y la utilización de las radiaciones ultravioletas en los ambientes cerrados para el control de estos microorganismos, demostrando que eran efectivos tanto contra bacterias como contra virus (1936). También en estos años y debido al uso común de los aviones, varios investigadores estudiaron los microorganismos que aparecían en el aire a diversas alturas, tanto en los Estados Unidos como en Europa, siendo de destacar los realizados por el coronel Lindberg en sus vuelos sobre el Círculo Polar Ártico (Proctor, 1935).

En los años cuarenta se realizaron numerosos estudios por Bourdillon y sus colaboradores. Son muy amplios y comprenden desde aires confinados

como casas, hospitales (1946) y fábricas (1948), hasta la investigación de la supervivencia de las bacterias (1948) y el descubrimiento de nuevos aparatos y métodos como el muestreador de rendija (1941). También en esta época otros investigadores utilizan nuevos métodos para la detección de microorganismos en el aire, como la precipitación electrostática (Berry, 1941; Luckiesh *et al.*, 1946) y el impacto en «cascada» (May, 1945), y resurge el uso de desinfectantes químicos para el control de estos microorganismos, tanto en el laboratorio como en el campo (Lidwell, 1990).

Durante la Segunda Guerra Mundial hubo un gran interés en conocer cómo se propagaban las infecciones respiratorias, especialmente en instalaciones militares estadounidenses y se realizaron numerosos estudios sobre *Streptococcus pyogenes* (Hamburger *et al.*, 1945) y *S. pneumoniae* (Hodges *et al.*, 1946). Un trabajo curioso realizado en esta época, fue el análisis del aire de barcos de guerra, incluidos submarinos, que resultaron relativamente puros (Ellis y Raimond, 1948).

La década de los años cincuenta se caracterizó por la aparición de una Ciencia multidisciplinar, la Aerobiología, en la que se estudian los microorganismos del aire desde todos sus aspectos: identidad, comportamiento, movimientos y supervivencia, así como sus implicaciones con otros microorganismos, el hombre, los animales y la vegetación. Uno de sus principales cultivadores fue Philip Gregory, botánico inglés que durante más de veinte años realizó numerosas investigaciones sobre la propagación de esporas de los hongos, así como cursos monográficos especializados (Gregory, 1961). También fue importante el grupo de la Universidad Mc Gill de Montreal, que realizó numerosos estudios de la atmósfera de las regiones árticas (Polunin y Kelly, 1952) y del Océano Atlántico (Pady y Kelly, 1954), utilizando aeroplanos, en los que describen los numerosos géneros de bacterias y hongos identificados.

Otro aspecto en el que se realizan grandes innovaciones fue en la tecnología. Se diseñaron diversos aparatos para facilitar la toma de muestras en el campo, como el muestreador volumétrico automático de Hirst (1952), el transportable de Gregory (1954) o el de Andersen (1958). Todos ellos son por impacto, pero con mejores ventajas que los anteriores, de fácil transporte, mayor volumen de aire analizado y mejor recuperación de los microorganismos. También en estos años empiezan a utilizarse los filtros de celulosa (Millipore) adaptándolos para el análisis del aire (Goetz, 1953).

Varios autores estudian la supervivencia de los microorganismos en los aerosoles, tanto bacterias: *Bacillus* (Harper *et al.*, 1952), *Escherichia coli* y *Pseudomonas* (Brown, 1953), *Corynebacterium*, *Micrococcus*, *Serratia* y *Mycobacterium* (Ferry *et al.*, 1958), *Staphylococcus* (Webb, 1959); como hongos: *Aspergillus*, *Pestalotia* (Mazur y Weston, 1955); o virus: influenza (Schechmeister, 1950).

La investigación de los virus presentes en el aire se desarrolla en los años sesenta con la búsqueda de métodos de detección e identificación. Los más satisfactorios eran los que utilizaban un muestreador que retenía los virus en un medio líquido como leche, que se inoculaba en tejidos o embrión de pollo (Harper, 1961). En 1965 se introdujeron las técnicas de fluorescencia para identificar rápidamente las células infectadas por virus (Hahon, 1965). Mediante estos métodos, varios investigadores estudiaron la presencia, supervivencia y posibilidad de transmisión de numerosos virus animales como el de la viruela, gripe, encefalomiелitis equina, poliomielitis, sarampión, coxsackie y glosopeda (Gregory y Monteith, 1967). Debido a la dificultad de aislamiento de los virus animales, también fueron investigados los bacteriófagos, con la finalidad de poderlos utilizar como modelos de virus (Dahlgren *et al.*, 1961).

Un avance importante para el control de los microorganismos en ambientes cerrados, fue la utilización de los filtros para el aire de fibra vidrio de alta eficacia (HEPA) (Lidwell, 1990), ampliamente utilizados hoy en hospitales e industria farmacéutica para conseguir salas o zonas asépticas.

En la década de los años sesenta y debido al lanzamiento de satélites y naves al espacio, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) promueve un programa para el estudio de los microorganismos de la estratosfera y del espacio. Sus objetivos fueron: mantener la esterilidad de los aparatos para evitar la contaminación de la atmósfera, determinar la supervivencia de los microorganismos en las condiciones del espacio y conocer la posible existencia de microorganismos extraterrestres capaces de transmitir vida entre planetas (Gregory y Monteith, 1967). La NASA realizó varias investigaciones en condiciones de laboratorio sobre el efecto de las radiaciones ultravioletas y el alto vacío sobre la viabilidad de las esporas microbianas demostrando que no eran destruidas (Silverman *et al.*, 1964). También se realizaron estudios en satélites y naves en vuelo donde concluyeron que las condiciones del espacio no causan la total inactivación de la micropoblación terrestre (Hotchin *et al.*, 1965).

Gregory en 1961, había pronosticado que el futuro de la Aerobiología era el espacio exterior, incluso había profetizado: «*El tiempo es corto. Antes de que nos demos cuenta tendremos la Luna en nuestro umbral y Marte en nuestras manos*». La profecía se cumplió, ya que en Julio de 1969 el hombre pisaba la Luna.

La aparición, en 1976 en Filadelfia, de una epidemia de una enfermedad respiratoria denominada «de los legionarios» y el conocimiento posterior de una nueva bacteria (*Legionella pneumophila*) como agente etiológico y de su transmisión por aerosoles procedentes del aire acondicionado, supuso un resurgimiento del estudio de los microorganismos que se transmiten por el aire (Fraser *et al.*, 1977).

Así mismo, en estos años se observa una mayor preocupación por el control del aire de los ambientes cerrados, principalmente en los hospitales, industrias farmacéuticas y alimentarias. Así por ejemplo, en 1969, la OMS dicta las primeras normas recomendadas para la fabricación y la inspección de la calidad de los medicamentos en los que se incluye el control microbiano del aire de los locales (Anónimo, 1969). Desde entonces el estudio microbiológico de estos ambientes ha ido en aumento, siendo actualmente práctica habitual e incluso obligatoria (Anónimo, 1985), el efectuar recuentos y controles periódicos del aire de las zonas estériles y limpias de hospitales (Denyer, 1992) e industrias farmacéuticas (Anónimo, 1996; de la Rosa *et al.*, 2000). También suelen controlarse otros ambientes cerrados, como fábricas de aparatos electrónicos, escuelas y edificios de oficinas. Este último caso, se debe a que, en los últimos años, se ha descrito una nueva enfermedad «el síndrome del edificio enfermo» que se produce en los ocupantes de determinados edificios. El origen de los síntomas, irritación de las membranas mucosas, dolor de cabeza, erupciones y dificultad respiratoria, no está aún muy claro, pero entre las posibles causas se citan factores ambientales (temperatura, humedad), químicos (adhesivos, pinturas) y microorganismos (hongos y bacterias) (Stetzenbach, 1997).

Como hemos visto, a lo largo del siglo xx el interés por la Microbiología del aire ha sido variable, alternándose épocas de entusiasmo con otras de escepticismo. Actualmente, nos encontramos en un período de renovación de este interés en todos los ambientes lo que ha supuesto un resurgimiento de la Aerobiología y un desarrollo de la actividad investigadora en este campo.

ORIGEN DE LOS MICROORGANISMOS

En el aire hay microorganismos, aunque no se puede asegurar que existe un verdadero «aeroplankton» que viven, se alimentan y se reproducen permanentemente en él. Muchos microorganismos que viven en la hidrosfera y litosfera pueden encontrarse en el aire. Son microbios alóctonos, procedentes del suelo, agua y seres vivos que pueblan estos ambientes. Los movimientos del aire y de los seres vivos son los que sitúan a los microorganismos en la atmósfera. Junto al suelo hay una capa laminar de aire que impide el fácil paso de microorganismos del suelo al aire. Para que pasen se necesita una fuerte corriente de aire que levante polvo del suelo o agua de sus depósitos (mares, ríos...). También las plantas los lanzan en sus movimientos de dehiscencia y disseminación (polen, esporas...) y los animales en los actos respiratorios normales y anormales (estornudos, gotas de Pflügge...).

A menudo, tanto las esporas como los microorganismos vegetativos entran en la atmósfera como bioaerosoles, que pueden formarse por muchas causas:

lluvia, movimiento del agua en los ríos y mar, tratamiento de aguas residuales, aspersores de riego, aire acondicionado o secreciones respiratorias del hombre y de los animales. Ésta última es muy importante en la dispersión de bacterias patógenas y virus animales. Los microorganismos también pueden encontrarse en el aire sobre partículas de polvo o en el suelo (Atlas y Bartha, 2002).

TIPOS DE MICROORGANISMOS

El aire contiene en suspensión diferentes tipos de microorganismos, especialmente bacterias y hongos. La presencia de uno u otro tipo depende del origen, de la dirección e intensidad de las corrientes de aire y de la supervivencia del microorganismo.

Algunos microorganismos se encuentran en forma de células vegetativas, pero lo más frecuente son las formas esporuladas, ya que las esporas son metabólicamente menos activas y sobreviven mejor en la atmósfera porque soportan la desecación. Las producen hongos, algas, líquenes, algunos protozoos y algunas bacterias. En el aire se aíslan frecuentemente bacterias esporuladas de los géneros *Bacillus*, *Clostridium* y Actinomicetos (Underwood, 1992).

Entre las bacterias también son muy frecuentes los bacilos pleomórficos Gram positivos (*Corynebacterium*) y los cocos Gram positivos (*Micrococcus* y *Staphylococcus*). Los bacilos Gram negativos (*Flavobacterium*, *Alcaligenes*) se encuentran en menor proporción y disminuyen con la altura (Gregory, 1973; Pelczar *et al.*, 1993).

Cladosporium es el hongo que predomina en el aire, tanto sobre la tierra como sobre el mar, aunque también es frecuente encontrar otros mohos, como *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria* y *Mucor* (Takahashi, 1997) y la levadura *Rhodotorula* (Underwood, 1992).

Los virus también pueden encontrarse en el aire y ser transportados por él. Numerosos virus humanos (Orto y Paramixovirus, Poxvirus, Picornavirus) se transmiten por vía respiratoria, principalmente en ambientes cerrados, y pueden formarse bioaerosoles de virus entéricos en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Por otro lado, pueden encontrarse virus de vegetales en aerosoles procedentes de plantas infectadas.

Se han descrito numerosos géneros de algas aisladas del aire procedentes del suelo y de lagos eutróficos. Así mismo, amebas de vida libre como *Naegleria* y *Acanthamoeba* pueden ser aerolizadas de forma natural (lagos, manantiales termales) o artificial (sistema de aire acondicionado o humidificadores) (Stetzenbach, 1997).

NÚMERO Y DISTRIBUCIÓN DE MICROORGANISMOS

El número de microorganismos de la atmósfera cambia según la altura ($10\cdot 10^4$ por m^3), obteniéndose el más alto junto al suelo, sobre todo en los dos metros inferiores, que constituyen el microclima del hombre, disminuyen hasta los 200 metros y luego se hacen más escasos hasta los 5.000 metros, su presencia es rara hasta el límite de la troposfera y no se encuentran en la estratosfera.

El número de microorganismos del aire en las zonas pobladas depende de la actividad en esa zona, tanto industrial o agrícola, como de los seres vivos y la cantidad de polvo. El número de microorganismos es mayor en las zonas pobladas y después en el mar, cerca de las costas. En las zonas desérticas no hay más que lo que aportan los vientos de las zonas habitables próximas y en los casquetes polares no hay nada.

En las zonas con clima seco, el aire contiene numerosos microorganismos y el número desciende después de la lluvia debido a que ésta los arrastra por lavado del aire.

Hay variaciones estacionales en el número de microorganismos en la atmósfera. Los hongos son típicamente más abundantes en verano que en el resto del año, mientras que las bacterias son más abundantes en primavera y otoño debido a factores como la temperatura, humedad relativa del aire, exposición a la luz solar, etc... (Bovallius *et al.*, 1978).

PERMANENCIA

El tiempo que permanecen los microorganismos en el aire depende de la forma, tamaño y peso del microorganismo y de la existencia y potencia de las corrientes aéreas que los sostengan y los eleven. Son factores adversos los obstáculos, que al oponerse a los vientos, disminuyen su velocidad y su potencia de arrastre, y las precipitaciones, que arrastran al suelo las partículas suspendidas.

La sedimentación de los microorganismos por gravedad sólo es importante en el aire en calma. Generalmente, hay demasiadas turbulencias para que esto suceda, excepto en zonas de vegetación densa, donde la velocidad del viento disminuye, o en condiciones estables durante la noche, cuando la capa laminar limitante alcanza varios metros de altura.

El impacto que sufren las partículas del aire cuando encuentran un obstáculo, es mayor cuando partículas grandes inciden a altas velocidades hacia objetos pequeños. Así, las esporas de hongos patógenos de plantas, como *Puccinia* o *Helminthosporium* son grandes e impactan eficazmente contra las

hojas, mientras que los de hongos del suelo como *Penicillium*, son pequeños y se depositan por otros sistemas. Incluso aunque el impacto de las esporas sea eficiente, no siempre quedan retenidos y pueden volver al aire. Las superficies húmedas o viscosas retienen mejor las partículas y una vez depositadas, no son resuspendidas fácilmente.

El movimiento browniano producido por las moléculas de gas en el aire es importante para microorganismos menores de 0,1 μ m, por lo que es de interés en la deposición de los virus.

El lavado del aire por la lluvia termina rápidamente con el proceso de dispersión, siendo diez veces más eficiente que la sedimentación y la impactación. Su eficacia está en función del radio de las gotas de lluvia y de las velocidades terminales de la gota y de la partícula. El tamaño óptimo de las gotas de lluvia es el mismo para todos los tamaños de partículas, y se ha calculado menor de 2 mm (Starr y Mason, 1966) pero la eficacia de la deposición decrece con el tamaño de la partícula. La lluvia disminuye exponencialmente la concentración de partículas del aire con respecto al tiempo, tardando más las de mayor tamaño. Gregory y Monteith (1967) demostraron que el 72 % de las partículas de 4 μ m permanecían en el aire después de 120 minutos.

Se denomina *Curva de Persistencia* a la curva porcentual que se traza alejándose radialmente del punto de origen de la carga microbiana. Se observa que el número de microorganismos que persiste en el aire disminuye rápidamente al alejarse del origen, siendo más acusada la disminución cuanto más bajo está el centro de diseminación. Este hecho es importante sanitariamente para enfermedades transmitidas por el aire, por el alcance de difusión de los microorganismos causantes de la infección.

Algunos microorganismos, incluidos bacterias, virus y hongos, son capaces de viajar grandes distancias sin perder viabilidad. Es el caso de *Puccinia graminis* ya que se encontraron esporas a 970 Km del origen, y de *Cladosporium* que formando una nube de esporas llegó a Dinamarca procedente de Inglaterra a través del mar del Norte (Gregory y Monteith, 1967). Virus animales como el de la glosopeda, pseudorrabia y el de la enfermedad de Newcastle, produjeron brotes en cerdos y pollos, respectivamente, a varios kilómetros del origen siguiendo la dirección de los vientos. También se ha demostrado el transporte intercontinental de virus humanos por dispersión atmosférica, lo que podía explicar las pandemias de gripe (Sattar e Ijaz, 1997). Un ejemplo parecido es el de la bacteria *Coxiella burnetii* que es capaz de transmitirse por el viento hasta 12 Km. Así, en 1996, produjo una epidemia de fiebre Q entre los residentes de la localidad alemana de Rollshausen y ciudades vecinas, a través de la inhalación de polvos y aerosoles contaminados, procedentes de las granjas cercanas de bovinos, ovejas y cabras. El principio de la epidemia correspondió con un período excepcionalmente seco y el vien-

to contribuyó soplando en la dirección de la granja hacia la ciudad (Lyytikäinen *et al.*, 1997). También se produjo una epidemia de fiebre Q en la localidad francesa de Briançon, causada por la dispersión de aerosoles contaminados producida por un helipuerto cercano a las granjas (Armengaud *et al.*, 1997).

SUPERVIVENCIA

Las condiciones físico-químicas de la atmósfera no favorecen el crecimiento ni la supervivencia de los microorganismos por lo que la mayoría solo pueden sobrevivir en ella durante un breve período de tiempo.

Las esporas son las formas de vida con mayor supervivencia y tienen varias propiedades que contribuyen a su capacidad para sobrevivir en la atmósfera, principalmente su metabolismo bajo, por lo que no requieren nutrientes externos ni agua para mantenerse durante largos períodos de tiempo. Además poseen otras adaptaciones que aumentan su capacidad de sobrevivir en este ambiente. Algunas esporas tienen paredes gruesas que las protegen de la desecación y otras son pigmentadas, lo que las ayuda contra las radiaciones ultravioleta. Su escasa densidad les permite permanecer suspendidas en el aire sin sedimentar. Algunas son muy ligeras e incluso contienen vacuolas de gas y otras tienen formas aerodinámicas que les permite viajar por la atmósfera (Gregory, 1973). Además, las esporas se producen en número muy elevado y aunque muchas mueran en la atmósfera, el éxito de unas pocas asegura la supervivencia y dispersión de los microorganismos.

Los virus son en general, más resistentes que las bacterias en las condiciones ambientales. No se inactivan con el oxígeno, siendo los virus desnudos más estables a humedades relativas altas y los envueltos a las bajas (Mohr, 1997).

La supervivencia de las bacterias es variable, debido a su diversidad estructural y metabólica. En general, las bacterias Gram positivas son más resistentes que las Gram negativas ya que su pared celular es más gruesa. Por ejemplo, en aire seco algunas especies de *Bacillus* y *Clostridium* son capaces de sobrevivir más de 200 años, *Mycobacterium* un mes y *Salmonella* sólo diez minutos (Potts, 1994).

Se llama *Curva de Supervivencia* a la curva porcentual de microorganismos vivos respecto del total de los persistentes en el aire. Se mantiene al principio, descendiendo posteriormente cuando los diversos factores adversos han actuado el tiempo necesario para matar los microorganismos. Es muy difícil que llegue a ser cero, porque siempre hay algunos microorganismos que son capaces de sobrevivir.

Los principales factores que intervienen, son: Humedad relativa, temperatura, oxígeno, materia orgánica y radiaciones.

— Humedad relativa:

Es el factor más importante. Cuando la humedad relativa del aire decrece, disminuye el agua disponible para los microorganismos, lo que causa deshidratación y por tanto la inactivación de muchos de ellos. La desecación puede causar una pérdida de viabilidad en las capas más bajas de la atmósfera, especialmente durante el día. A mayores altitudes, las condiciones son más favorables por la evaporación y algunas esporas pueden germinar en las nubes. La humedad relativa de la atmósfera varía de un 10-20 % en las regiones desérticas. El límite menor para el crecimiento de hongos es del 65 %. Las bacterias requieren una mayor humedad. Las Gram negativas resisten peor la desecación que las positivas; esto se refleja en que existe poca evidencia de transmisión por el aire de bacterias Gram negativas, con la excepción de *Legionella* (Lidwell, 1990).

— Temperatura:

Está muy relacionada con la humedad relativa, por lo que es difícil separar los efectos que producen ambas. La temperatura en la troposfera varía de 40° C cerca de la superficie, a -80° C en las capas altas, alcanzándose temperaturas de congelación entre 3-5 Km. La congelación no destruye los microorganismos pero no pueden multiplicarse. Diversos estudios muestran que el incremento de la temperatura disminuye la viabilidad de los microorganismos (Mohr, 1997).

— Oxígeno:

Se ha observado una correlación negativa entre la concentración de oxígeno y la viabilidad, que aumenta con la deshidratación y el tiempo de exposición. La causa de la inactivación podría ser los radicales libres de oxígeno.

— Materia orgánica:

La atmósfera contiene muy poca concentración de materia orgánica, y en la mayoría de los casos, es insuficiente para permitir el crecimiento heterotrófico. El agua disponible es escasa por lo que, incluso el crecimiento de microorganismos autótrofos está limitado.

— Radiaciones:

La inactivación que producen en los microorganismos depende de la longitud de onda e intensidad de la radiación. Las de longitud de onda corta (rayos X, rayos γ) contienen más energía, son ionizantes y alteran o destruyen el DNA de los microorganismos. Otros factores, como la humedad relativa, concentración de oxígeno y la presencia de otros gases, influyen en el efecto que producen las radiaciones sobre los microorganismos. La forma de interacción es poco conocida, pero la desecación y congelación pueden proteger a los organismos de las radiaciones.

La exposición a radiaciones de corta longitud de onda, como la luz ultravioleta, es la principal causa de pérdida de viabilidad de los microorganismos que entran en la atmósfera. Las radiaciones ultravioletas aumentan con la altura, debido a una menor retención, lo que causa mutaciones y la muerte de los microorganismos. Algunos se protegen de los efectos letales de la radiación por los pigmentos que producen, así como por el polvo y las gotas de saliva y moco, debido al escaso poder de penetración de la luz ultravioleta.

En la estratosfera hay una capa con una gran concentración de ozono que mata a los microorganismos, pero al mismo tiempo, actúa absorbiendo la radiación ultravioleta. Por todas estas razones, la estratosfera constituye una barrera para los microorganismos vivos procedentes de la troposfera (Atlas y Bartha, 2002).

— Otros factores:

Diversos estudios mostraron que el aire atmosférico producía un mayor grado de inactivación que el aire inerte obtenido en el laboratorio. La causa podría ser las reacciones entre el ozono y las olefinas debido a una combinación de factores que incluyen concentración de contaminantes e iones en el aire, humedad y fluctuaciones de la presión, al conjunto de los cuales se les llama factores del aire abierto (Mohr, 1997).

MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN DE LOS MICROORGANISMOS

El estudio de los microorganismos del aire depende de las técnicas desarrolladas para la toma de muestras. Desde que en el siglo XIX comenzaron las investigaciones sobre estos microorganismos, se han diseñado diversos aparatos, muchos de ellos con una aplicación limitada, algunos de los cuales hemos citado anteriormente.

Los primeros métodos de muestreo de aire ya fueron recogidos por Miquel y Cambert (1901) y los desarrollados en el siglo xx fueron revisados por du Buy *et al.* (1945), posteriormente por Gregory (1961) y Lynch y Poole (1979).

Actualmente, existen una gran cantidad de métodos e instrumentos para detectar los microbios del aire, de los que citamos los más útiles y usuales. Las técnicas utilizadas son diversas, de las cuales, la sedimentación, filtración, el impacto sobre distintas superficies sólidas y el borboteo en medios líquidos, son las más importantes (Buttner *et al.*, 1997).

— Técnica de sedimentación por gravedad:

El método de sedimentación en placa Petri ha sido el más ampliamente utilizado desde que Frankland y Hart lo emplearan por primera vez en 1887. Las placas con medio de cultivo estéril, permanecen abiertas durante determinados períodos de tiempo, permitiendo la sedimentación de los microorganismos. Este método es sencillo y económico. Tiene la ventaja de que se pueden identificar de los cultivos los microorganismos viables, pero su interpretación es difícil porque no pueden relacionarse con el volumen de aire muestreado. La deposición varía con el tamaño y forma de los microorganismos, la velocidad y la turbulencia del aire. El método no es cualitativa ni cuantitativamente exacto y nos detecta principalmente los microorganismos que más persisten en el aire, no detectándose, sin embargo, los microorganismos más pequeños.

— Filtración:

La filtración se realiza a través de un material poroso, fibra de vidrio, alginato o filtros de membrana (éstos son los más utilizados en la actualidad). Los filtros recogen los microorganismos por sedimentación, impacto, difusión o atracción electrostática, dependiendo del tipo. Los filtros de membrana utilizados son de policarbonato, ésteres de celulosa o cloruro de polivinilo, con un diámetro de poro desde 0,01 a 10 μm , según la naturaleza de los bioaerosoles.

Para realizar la filtración se han diseñado aparatos portátiles con una bomba de vacío y un flujo de aire de 1 a 50 litros por minuto (Millipore). Entre los problemas que destacan, encontramos la pérdida de viabilidad de las células vegetativas debido a la desecación durante el muestreo. En las muestras obtenidas en los filtros de membrana se pueden estudiar los microorganismos por microscopía o por cultivo, colocando los filtros en medios de cultivo sólidos, para determinar el número de colonias.

— Impacto sobre superficies sólidas:

Esta técnica es la más usada en la actualidad, los microorganismos se separan de la corriente de aire utilizando la inercia para forzar su sedimentación sobre las superficies sólidas. El proceso de impacto depende de las propiedades de inercia de la partícula (tamaño, densidad y velocidad) y de las propiedades físicas del aparato tales como las dimensiones de la boquilla y el recorrido del flujo de aire.

Se han diseñado una gran variedad de aparatos que difieren por el número de boquillas o impactores, y por el tamaño, así como el número de pasos o etapas por las que pasa el aire. En la mayoría de ellos, los microorganismos quedan retenidos sobre un medio de cultivo sólido contenido en: placas de Petri de distinto tamaño, 65 o 90 mm (bioMérieux), 100 mm (Andersen y Burkard) y 150 mm (Casella), en tiras de plástico (Biotest) y en placas de contacto de 55 ó 84 mm (SAS y Microflow). Después de la incubación, podemos hacer el recuento e identificación de los microorganismos. Basados en estas técnicas, actualmente existen en el mercado aparatos fácilmente transportables que se alimentan con pilas para tomar muestras de campo, como el muestreador centrífugo *Reuter RCS Plus (Biotest)*, el *Air Ideal (bioMérieux)* o los sistemas *SAS y Microflow*. El flujo de aire varía en los distintos aparatos, desde 10 hasta 700 litros por minuto (Buttner *et al.*, 1997).

— Borboteo en líquidos:

El fundamento es similar al impacto sobre medios sólidos y la fuerza de inercia es esencial para separar los microorganismos contenidos en el aire y que se depositen en el medio líquido. El flujo de aire puede ser de 12,5 ó 20 litros por minuto. Este método también requiere una bomba de vacío.

Estos dispositivos, también llamados de «trampa líquida», hacen pasar el aire mediante un aspirador, a través de líquidos (generalmente soluciones tampón diluidas) que retienen los microorganismos. Este líquido puede sembrarse en placa para determinar el número de microorganismos, examinarse microscópicamente (May y Harper, 1957) o analizarlo con ensayos bioquímicos para determinar endotoxinas (LAL), sondas genéticas, reacción en cadena de la polimerasa (PCR) inmunoensayo y por citometría de flujo (Buttner *et al.*, 1997).

No existe un método de muestreo de aire ideal para todas las necesidades, por lo que para elegir uno deberemos considerar qué queremos investigar y qué información necesitamos, es decir, deberemos determinar previamente si nos interesa saber el número total de microorganismos o sólo el de viables, si deseamos identificarlos y cultivarlos o sólo observar su morfología microscó-

picamente, si queremos detectar todos los presentes o sólo los patógenos, etc. En función de estas premisas, elegiremos el más adecuado a nuestras necesidades, por lo que es muy frecuente la utilización de varios métodos para poder alcanzar el objetivo propuesto.

ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR EL AIRE

Gran número de infecciones humanas y animales se transmiten por el aire y causan enfermedad, principalmente, en el aparato respiratorio. Las enfermedades respiratorias tienen una gran importancia socio económica ya que se transmiten fácilmente a través de las actividades normales del hombre, son las más frecuentes en la comunidad y el motivo más importante de absentismo laboral y escolar. No hay que olvidar que una persona, a lo largo de su vida, respira varios millones de m³ de aire, gran parte del cual contiene microorganismos. Se calcula que se inhalan al día una media de diez mil microorganismos, pero el hombre posee eficaces mecanismos de defensa para evitar que invadan el aparato respiratorio. Sin embargo, el control de estas enfermedades es difícil porque los individuos que las padecen suelen seguir realizando sus actividades cotidianas y además, en algunas de ellas, no se dispone de agentes terapéuticos ni vacunas eficaces. Se caracterizan por su tendencia a causar epidemias, siendo mas frecuentes durante el otoño y el invierno, cuando las personas se reúnen en recintos cerrados. Los microorganismos causales se transmiten por las secreciones de la nariz y la garganta y son diseminados por la tos, los estornudos y la conversación pudiendo alcanzar una velocidad de 300 km/h. Una persona puede expulsar una media de 500 partículas en la tos y de 1.800 a 20.000 en un estornudo, de los cuales la mitad son menores de 10 µm. El tamaño de las partículas tiene una gran importancia, las más pequeñas penetran mejor y las más grandes tienen mayor supervivencia. La mayoría de los virus y muchas bacterias que causan infecciones respiratorias se encuentran en gotas grandes de 20 µm ya que si son pequeñas se evaporan y se inactivan por desecación. Sin embargo *Mycobacterium tuberculosis*, *Bacillus anthracis* y los Orto y Paramixovirus pueden sobrevivir en gotas de 3 µm y producir infecciones del tracto respiratorio inferior ya que penetran fácilmente en los alveolos.

Conviene recordar que la transmisión aérea de enfermedades no es exclusiva de microorganismos que salen de las vías respiratorias. En algunos casos se forman bioaerosoles procedentes de animales y sus productos que se resuspenden en el aire y pueden ser inhaladas, como heces desecadas y plumas de aves (*Chlamydophila psittaci*, *Cryptococcus neoformans*, *Histoplasma capsulatum*), placenta (*Coxiella burnetii*), lana, piel y marfil (*Bacillus anthracis*). Casos especiales son: *Legionella* que se encuentra en el agua y se

transmite por los aerosoles que se forman en los distintos sistemas y aparatos o *Coccidioides immitis* y *Aspergillus fumigatus* cuyas esporas, procedentes del suelo y estiércol, son diseminadas sobre el polvo y trasportadas por el viento (Benenson, 1997)

La inhalación de forma continúa de partículas de contaminantes químicos, incrementa la susceptibilidad a las infecciones respiratorias. Esto ocurre en los mineros, por inhalación de sílice y carbón, y en trabajadores de diversas industrias que producen materiales como la piedra arenisca, en los que hay una predisposición a la tuberculosis. Además, el aire de las grandes ciudades, contaminado con derivados de la combustión de hidrocarburos, incrementan la gravedad de las infecciones respiratorias (Mims, 2001).

Hay numerosas enfermedades bacterianas transmitidas por el aire que se resumen en la tabla 1. Están producidas, principalmente, por bacterias Gram positivas debido a su mayor supervivencia en el aire. Afectan al tracto respiratorio superior (faringitis, epiglotitis, difteria) e inferior (bronquitis, neumonías, toserina, tuberculosis) o, desde éste pasan a sangre y otros órganos (meningitis, carbunco pulmonar, fiebre Q, peste).

Tabla 1
ENFERMEDADES BACTERIANAS TRANSMITIDAS POR EL AIRE

Enfermedades	Géneros y especies
Amigdalitis, faringitis, bronquitis, escarlatina	<i>Streptococcus pyogenes</i>
Difteria	<i>Corynebacterium diphtheriae</i>
Neumonía clásica	<i>Streptococcus pneumoniae</i> <i>Staphylococcus aureus</i> <i>Klebsiella pneumoniae</i>
Neumonía atípica, bronquitis	<i>Mycoplasma pneumoniae</i> <i>Chlamydophila pneumoniae</i> <i>Chlamydophila psittaci</i>
Meningitis	<i>Neisseria meningitidis</i>
Meningitis, epiglotitis, neumonía	<i>Haemophilus influenzae</i>
Tosferina	<i>Bordetella pertussis</i>
Tuberculosis	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>
Legionelosis	<i>Legionella pneumophila</i>
Actinomicosis	<i>Actinomyces israelii</i>
Nocardiosis	<i>Nocardia asteroides</i>
Fiebre Q	<i>Coxiella burnetii</i>
Carbunco pulmonar	<i>Bacillus anthracis</i>
Peste	<i>Yersinia pestis</i>

Los ejemplos más ilustrativos son la tuberculosis, la legionelosis y el carbunco pulmonar. La tuberculosis pulmonar producida por *Mycobacterium tuberculosis*, se transmite por los bioaerosoles desde una persona infectada a otra sana. Por su baja dosis infecciosa (menos de 10) y su gran supervivencia debido a los lípidos de su pared celular, es un problema de salud pública en todo el mundo, no habiendo sido posible su erradicación ni siquiera en los países desarrollados, e incluso se ha producido un aumento de casos en los últimos años, principalmente en personas inmunodeprimidas. Otras micobacterias no tuberculosas también han sido asociadas con enfermedades respiratorias en estas personas (Jensen, 1997).

Legionella pneumophila es la bacteria causante de dos formas de infección respiratoria: la enfermedad de los legionarios y la fiebre de Pontiac. La primera es la más grave y ha producido numerosos casos aislados y varios brotes con elevada mortalidad. El primero, ocurrido en Filadelfia en 1976, terminó con 239 casos y 49 muertes. En España el primer brote, identificado retrospectivamente, tuvo lugar en Benidorm en 1973 con 89 casos (Pelaz y Martín, 1993). Desde entonces se han producido varios brotes epidémicos siendo los más importantes los de Alcalá de Henares, en 1996 (224 casos), Alcoy (96 casos) y Barcelona (40 casos), en 2000 (Anónimo, 2000) y Murcia en 2001 (689 casos) que ha sido la mayor epidemia registrada hasta ahora en el mundo según los datos del Centro Nacional de Epidemiología. Estos brotes han supuesto un problema sanitario en algunos lugares, por lo que, en 1986, se creó el Sistema de Vigilancia Europeo de legionelosis para el estudio y control de los casos asociados a viajes (Lever y Joseph, 2001) y en España la Red de Vigilancia epidemiológica, en 1996, dictándose, recientemente, normas para la prevención y control de esta enfermedad (Anónimo, 2001). *Legionella* es muy ubicua y puede encontrarse en distintos ambientes acuáticos de donde pasa a la red de abastecimiento y a las instalaciones de refrigeración. El mecanismo de transmisión, como hemos indicado anteriormente, es la inhalación de aerosoles menores de 5 µm, generadas por distintos aparatos y equipos tanto en espacios abiertos como en recintos cerrados (torres de refrigeración, fuentes ornamentales, duchas, piscinas termales, baños de burbujas, humidificadores, aparatos de ventiloterapia), no existiendo evidencia de transmisión de persona a persona (Fields, 1997).

El carbunco pulmonar, producido por la inhalación de esporas de *Bacillus anthracis*, es una enfermedad grave, con una elevada mortalidad. Conocida desde antiguo, ha sido causa de brotes epidémicos y casos esporádicos entre diversos grupos de trabajadores (ganaderos, cardadores de lana, curtidores, artesanos del marfil) y en laboratorios de investigación en guerra bacteriológica (Evans y Brachman, 1998). Los sucesos acaecidos en Estados Unidos, a finales del año 2001, en el que se produjeron varios casos, con cinco muertes,

por la inhalación de esporas enviadas por correo, ha puesto de actualidad este microorganismo y su empleo como arma biológica (CDC, 2001).

Un tema de interés actual es los efectos perjudiciales (fiebre, problemas cardiovasculares) producidos por la inhalación de las endotoxinas, constituidas por el lipopolisacárido de la pared celular de las bacterias Gram negativas, que permanecen estables en el polvo de determinados ambientes agrícolas (graneros, pajares, almacenes de tabaco y algodón), ganaderos (porquerizas, gallineros, granjas) y urbanos (oficinas, bibliotecas) (Olenchok, 1997).

También numerosas enfermedades víricas humanas se transmiten a través del aire, produciendo infecciones en el aparato respiratorio superior (resfriado, faringitis) e inferior (laringitis, gripe, bronquitis, neumonías) o afectando a otros órganos y tejidos (sarampión, paperas, rubeola, viruela, varicela, poliomielitis) (Tabla 2). Además, estudios de algunos brotes de gastroenteritis producidas por el virus de Norwalk y Rotavirus, indican que, aparte de la transmisión oral- fecal podía existir transmisión aérea, mediante los bioaerosoles formados durante el vómito (Chadwick *et al.* , 1994). La rabia también se ha transmitido a espeleólogos en grutas, por la inhalación de aerosoles procedentes de murciélagos infectados con el virus. La transmisión de los virus causan-

Tabla 2
ENFERMEDADES VÍRICAS TRANSMITIDAS POR EL AIRE

Enfermedades	Virus	
	Familia	Género
Resfriado común	<i>Picornaviridae</i>	<i>Rhinovirus</i>
	<i>Adenoviridae</i>	<i>Mastadenovirus</i>
Gripe	<i>Orthomyxoviridae</i>	<i>Influenzavirus</i>
Bronquitis, neumonia	<i>Paramyxoviridae</i>	<i>Pneumovirus</i>
	<i>Adenoviridae</i>	<i>Mastadenovirus</i>
	<i>Bunyaviridae</i>	<i>Hantavirus</i>
Sarampión	<i>Paramyxoviridae</i>	<i>Morbillivirus</i>
Parotiditis	<i>Paramyxoviridae</i>	<i>Rubulavirus</i>
Poliomielitis	<i>Picornaviridae</i>	<i>Enterovirus</i>
Viruela	<i>Poxviridae</i>	<i>Orthopoxvirus</i>
Varicela	<i>Herpesviridae</i>	<i>Varicellovirus</i>
Rubeola	<i>Togaviridae</i>	<i>Rubivirus</i>
Rabia	<i>Rhabdoviridae</i>	<i>Lyssavirus</i>
Gastroenteritis	<i>Reoviridae</i>	<i>Rotavirus</i>
	<i>Caliciviridae</i>	<i>Virus Norwalk</i>

tes de fiebres hemorrágicas con elevada mortalidad no se conoce con certeza, pero en algunos casos (virus Lassa y Sabia) la inhalación de aerosoles infecciosos ha producido brotes en hospitales y laboratorios de investigación (Sattar y Ijaz, 1997).

En la tabla 3 se encuentran las enfermedades fúngicas transmitidas por el aire. Ciertos hongos levaduriformes (*Cryptococcus*, *Coccidioides*, *Blastomyces*, *Histoplasma*) son responsables de enfermedades pulmonares, desde donde pueden invadir otros tejidos y producir una enfermedad sistémica. Por otra parte las esporas de varios mohos causan reacciones de hipersensibilidad que puede ser: inmediata o alergia que afecta al aparato respiratorio superior causando rinitis y asma, producida por partículas de 30µm como las esporas de *Puccinia*, *Alternaria* y *Cladosporium* y retardada, que afecta al aparato respiratorio inferior produciendo alveolitis y neumonitis, debida a partículas menores de 5µm, principalmente esporas de *Aspergillus* y *Penicillium* y de bacterias como los actinomicetos termófilos. Estudios epidemiológicos han demostrado que la inhalación de las esporas de algunos hongos son la causa de los problemas respiratorios asociados al «síndrome del edificio enfermo» y otras enfermedades ocupacionales bien conocidas de agricultores, vinateros, cerveceros y carpinteros. Algunos hongos producen micotoxinas que afectan al hombre y a los animales cuando se ingieren, pero también se han producido casos de micotoxicosis por inhalación de esporas de hongos toxigénicos como *Aspergillus*, *Fusarium* y *Stachybotrys*, en ambientes cerrados (Yang y Johanning, 1997).

Tabla 3
ENFERMEDADES FUNGICAS TRANSMITIDAS POR EL AIRE

Enfermedades	Hongos
Neumonias	— <i>Pneumocystis carinii</i>
Micosis sistémicas	— <i>Cryptococcus neoformans</i> — <i>Blastomyces dermatitidis</i> — <i>Histoplasma capsulatum</i> — <i>Coccidioides immitis</i> — <i>Aspergillus fumigatus</i>
Hipersensibilidad	— <i>Alternaria</i> — <i>Botrytis</i> — <i>Aspergillus</i> — <i>Puccinia</i> — <i>Penicillium</i> — <i>Serpula</i> — <i>Cladosporium</i> — <i>Mucor</i>
Micotoxicosis	— <i>Aspergillus</i> — <i>Fusarium</i> — <i>Stachybotrys</i>

Así mismo muchas enfermedades de los animales domésticos se deben a microorganismos que se transmiten por el aire, lo cual tiene una indudable importancia económica. Entre los más importantes están la coriza infecciosa de las aves, producida por *Haemophilus paragallinarum*, la tuberculosis aviar y vacuna debida a *Mycobacterium avium* y *M. bovis*, la psitacosis y ornitosis de las aves causada por *Chlamydophila psittaci* y que puede transmitirse al hombre, la neumoencefalitis que se debe al virus de Newcastle, la peste bovina y el moquillo de los perros por *Morbillivirus*, la pseudorrabia de los cerdos por *Herpesvirus* y la glosopeda o fiebre aftosa producida por *Aphthovirus* (Parker y Collier, 1990). Esta última que afecta a mamíferos de pezuña hendida (bovinos, ovinos, caprinos, porcinos) tiene una gran capacidad para dispersarse por el aire a grandes distancias y ha producido un importante brote epidémico en el Reino Unido en el año 2001 que hizo a la FAO recomendar medidas de control a todos los países expuestos (Samuel y Knowles, 2001).

En resumen, en los últimos años se ha incrementado el interés por los microorganismos que se transmiten por el aire, en diferentes ámbitos (sanitarios, urbanos, agrícolas, industriales). La causa se debe a la capacidad de estos microorganismos para producir efectos perjudiciales tanto en el medio ambiente como en la salud de las personas y de los animales, cuando se exponen a bioaerosoles originados en el aire exterior o en recintos cerrados. Las importantes consecuencias sanitarias y económicas que esto supone ha originado una renovada actividad investigadora en este campo de la Microbiología.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSEN, A. A. (1958): «New sampler for the collection, sizing and enumeration of viable airborne particles». *Journal of Bacteriology*, 76, 471-484.
- ANÓNIMO (1969): *Inspección de la calidad de los medicamentos*. Organización Mundial de la Salud (OMS). Servicio de Información Técnica 418, Anexo 12. Parte 1.
- ANÓNIMO (1985): Orden de 19 de Abril por la que se establecen las normas de correcta fabricación y control de calidad de los medicamentos. Ministerio de Sanidad y Consumo. BOE. 30-4-1985, 103, 11997-12000.
- ANÓNIMO (1996): *Programa de control microbiológico ambiental en zonas de producción*. Ed. Asociación Española de Farmacéuticos de la Industria (AEFI), Madrid.
- ANÓNIMO (2000): «Brotos de legionelosis notificados en España en el año 2000». *Boletín Epidemiológico Semanal*, 8, 18, 204.
- ANÓNIMO (2001): Real Decreto de 27 de julio por la que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. Ministerio de Sanidad y Consumo. BOE. 20-7-2001, 180, 27750-27759.

- ARMENGAUD, A.; KESSALIS, N.; DESENCLOS, J. C.; BROUSSE, P.; BROUQUI, P.; OBADIA, Y., y PROVENSALE, P. (1997): «Urban outbreak of Q fever, Briançon, France». *Eurosurveillance*, 2, 12-13.
- ATLAS, R., y BARTHA, R. (2002): *Ecología microbiana y Microbiología ambiental*. Ed. Pearson Educación, Madrid.
- BENENSON, A. S. (1997): *Manual para el control de las enfermedades transmisibles*. 16.^a edic. Ed. Organización Panamericana de la Salud, Washington.
- BERRY, C. M. (1941): «An electrostatic method for collecting bacteria from air». *Public Health Reports Washington*, 56, 2044-2051.
- BOURDILLON, R. B.; LIDWELL, O. M., y THOMAS, J. C. (1941): «Asht sampler for collecting and counting air-borne bacteria». *Journal of Hygiene Cambridge*, 41, 197-224.
- BOURDILLON, R. B. y COLEBROOK, L. (1946): «Air hygiene in dressing-rooms for burns or mayor wounds». *Lancet*, I, 561-165.
- BOURDILLON, R. B.; LIDWELL, O. M., y LOVELOCK, J. E. (1948): «Studies in air hygiene». *Medical Research Council Special Reports Series*, N.º 262. HMSO, London.
- BOVALLIUS, A.; BUTCH, B.; ROFFEY, R., y ANAS, P. (1978): «Three-year investigation of the natural airborne bacterial flora at four locations in Sweden». *Applied and Environmental Microbiology*, 35, 847-852.
- BROWN, A. D. (1953): «The survival of airborne microorganisms». *Australian Journal of Biology Sciences*, 6, 463-470.
- BULLOCH, W. (1938): *The history of bacteriology*. Ed. Oxford University Press, London.
- BUTTNER, M. P.; WILLEKE, K., y GRINSHHPUN, S. A. (1997): «Sampling and analysis of airborne microorganisms». En: Hurst, C. J. et al. (ed). *Manual of environmental microbiology*. Ed. American Society for Microbiology, Washington.
- BUY, H. G. Du; HOLLAENDER, A., y LACKEY, M. D. (1945): «A comparative study of sampling device for air-borne microorganisms». *Public Health Report Washington*, 184, 40.
- CENTERS FOR DISEASE CONTROL (CDC): «Investigation of bioterrorism-related anthrax and adverse events from antimicrobial prophylaxis». *Morbidity and Mortality Weekly Report*. 50, 973-976.
- CHADWICK, P. K.; WALKER, M., y REES, A. E. (1994): «Airborne transmission of a small round structured virus». *Lancet*, 343, 171.
- CLAUBRY, G. (1855): «Communication à la Société Philomathique en 1832». *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, XLI, 645.
- CRISTIANI, H. (1893): «Analyse bactériologique de l'air des hauteurs puisé pendant un voyage en ballon». *Annales de l'Institut Pasteur*, VII, 665-671
- CUNNINGHAM, D. (1873): *Microscopic examination of air*. Ed. Government Printer, Calcuta.
- DAHLGREN, C. M.; DECKER, H. M., y HARSTAD, J. B. (1961): «A slitsampler for collecting T₃ bacteriophage and venezuelan equine encephalomyelitis virus I». *Journal of Applied Microbiology*, 9, 103.
- DE FREUDENREICH (1884): *Archives des Sciences physical et medical*, 3.^o periodo, VII, 365.

- DE LA ROSA, M. C.; ULLÁN, C.; PRIETO, M. P., y MOSSO, M. A. (2000): «Calidad microbiológica del aire de una zona limpia en una industria farmacéutica». *Anales de la Real Academia de Farmacia*, 66, 213-228.
- DENYER, S. P. (1992): «Factory and hospital hygiene and good manufacturing practice». En: Hugo, W. B. and Russell, A. D. (ed). *Pharmaceutical microbiology*. 5.^a Edic. Ed. Blackwell Scientific Publications, London.
- DYAR (1895): *Annual of the New York Academy of Sciences*, VIII, 347.
- EKELÖF (1907): «Studien über den Bakteriengehalt der luft und des Erdbodens der antarktischen Gegenden ausgeführt während der schwedischen Süd-polar Expedition, 1901-1904». *Zeitschrift für Hygiene und Infektionskrankheiten*, LVI, 344-370.
- EHRENBERG, C. G. (1849): *Passatstaub und Blutregen. Übersicht der seit 1847 forgesetzten Untersuchungen über das von Atmosphäre unrichtbar getragene reich organische Leben*. Berlin.
- ELLIS, F. P. y RAYMOND, W. F. (1948): «Air hygiene in H. M. ships under wartime conditions». En: Bourdillon, R. B.; Lidwell, O. M. and Lovelock, J. E. (ed). *Studies in air hygiene*. London.
- EVANS, A. S., y BRACHMAN, PH. S. (1998): «Bacterial infections of humans». *Epidemiology and control*. 3.^a edic. Ed. Plenum Medical Book Comp., New York.
- FERRY, R. M.; GROWN, W. F., y DAMOND, E. B. (1958): «Studies of the loss of viability of bacterial aerosols II and III». *Journal of Hygiene Cambridge*, 56, 125-389.
- FIELDS, B. S. (1997): «Legionellae and legionnaires' disease». En: Hurst, C. J. et al. (ed.). *Manual of environmental microbiology*. Ed. American Society for Microbiology, Washington.
- FLÜGGE, C. (1897): «Über Luftinfektion». *Zeitschrift für Hygiene und Infektionskrankheiten* XXV, 179-224.
- FRANKLAND, P. F., y HART, T. G. (1887): «Further experiments on the distribution of microorganisms in air (by Hesse's method)». *Proceeding of the Royal Society of London*, 42, 267-282.
- FRASER, D. W.; TSAI, T. R.; ORENSTEIN, W. et al. (1977): «Legionnaires' disease. Description of an epidemic of pneumonia». *New England Journal of Medicine*, 297, 1189-1197.
- GOETZ, A. (1953): «Application of molecular filter membranes to the analysis of aerosols». *American Journal of Public Health*, 43, 150-159.
- GORDON, M. H. (1904): *Report of the Medical Officer of the Local Government Board for the year 1902-3*. HMSO, London.
- GRACE y FRANKLAND, P. (1887): *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, CLXXVIII, 278.
- GREGORY, P. H. (1954): «The construction and use of a portable volumetric spore trap». *Transactions of the British Mycology Society*, 37, 390-404.
- GREGORY, P. H. (1961): *The microbiology of the atmosphere*. Ed. Leonard Hill Ltd, London.
- GREGORY, P. H. (1973): *The microbiology of the atmosphere*. Ed. John Wiley and Sons, New York.
- GREGORY, P. H., y MONTEITH, J. L. (1967): *Airborne microbes*. Ed. Cambridge University Press, Cambridge.

- HAHON, N. (1965): «Assay of Variola virus by the fluorescent cell counting technique». *Journal of Applied Microbiology*, 13, 865.
- HAMBURGER, M.; GREEN, M. J., y HAMBURGER, V. G. (1945): «The problem of the “dangerous carrier” of hemolytic streptococci». *Journal of Infectious Diseases*, 77, 68.
- HARPER, G. J. (1961): «Airborne micro-organisms: survival tests with four viruses». *Journal of Hygiene Cambridge*, 59, 479-486.
- HARPER, G. J., y MORTON, J. D. (1952): «*Bacillus subtilis* spores labelled with radiophorus». *Journal of General Microbiology*, 7, 98.
- HESSE, W. (1884): «Ueber quantitative Bestimmung der in der Luft enthaltenen Mikroorganismen». *Mitth aus dem Kaiserl. Gesundheitsamte* II, 182-207.
- HIRST, J. M. (1952): «An automatic volumetric spore trap». *Annales of Applied Biology*, 39, 257-265.
- HODGES, R. G., y MAC LEOD, C. M. (1946): «Epidemic pneumococcal pneumoniae. The influence of population characteristics and environment». *American Journal of Hygiene*, 44, 193.
- HOTCHIN, J.; LORENZ, P., y HEMENWAY, C. (1965): «Survival of micro-organisms in space». *Nature*, 206, 442.
- JENSEN, P. (1997): «Airborne *Mycobacterium* spp». En: Hurst, C. J. *et al.* (ed). *Manual of environmental microbiology*. Ed. American Society for Microbiology, Washington.
- LEEUWENHOECK, A. (1722): «Opera omnia». *Anatomia et contemplationes*, I, 31.
- LEVER, F., y JOSEPH, C. A. (2001): «La legionellose associaie aux voyages en Europe en 1999». *Eurosurveillance*, 6, 53-60.
- LEVIN (1899): «Les microbes dans les régions artiques». *Annales d'Institut Pasteur*, XIII, 558.
- LIDWELL, O. M. (1990): «The microbiology of air». En: Linton, A. and Dick, H. M. (ed). *Topley and Wilson's. Principles of bacteriology, virology and immunity*, I. 8.^a Edic. Ed. Edward Arnold, London.
- LISTER, J. (1867): *1871 in Collected Papers 1909*. Ed. Clarendon Press, Oxford.
- LJUNQVIST, B., y REINMÜLLER, B. (1998): «Active sampling of airborne viable particles in controlled environments: a comparative study of common instruments». *European Journal of Parenteral Sciences*, 3, 59-62.
- LUCKIESH, M.; TAYLOR, A. H., y HOLLADAY, L. L. (1946): «Sampling devices for airborne bacteria». *Journal of Bacteriology*, 52, 55-65.
- LYNCH, J. M., y POOLE, N. J. (1979): *Microbial Ecology: a conceptual approach*. Ed. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- LYYTIKÄINEN, O.; ZIESE, T.; MATZDORFF, P.; BURGER, C., y KRUG, W. (1997): «Outbreak of Q fever in Lohra-Rollshausen, Germany, in spring 1996». *Eurosurveillance*, 2, 9-11.
- MACÉ, E. (1913): *Traité pratique de bacteriologie*. 6.^a Edic. Ed. J. B. Baillièrre et fils, Paris.
- MATHEWS, M. M., y SISTROM, W. R. (1959): «Function of carotenoid pigments in non photosynthetic bacteria». *Nature*, 184, 1892-1895.
- MAY, K. R. (1945): «The cascade impactor: an instrument for sampling coarse aerosols». *Journal of Sciences Instruments*, 22, 187-95.

- MAY, K. R., y HARPER, G. J. (1957): «The efficiency of various liquid impinger samplers in bacterial aerosols». *Journal of Industrial Medical*, 14, 287.
- MAZUR, P., y WESTON, W. H. (1955): «Effects of spray drying on the viability of fungous spores». *Journal of Bacteriology*, 71, 257.
- MIMS, C.; NASH, A., y STEPHEN, J. (2001): *Mims' pathogenesis of infectious disease*. 5.^a edic. Ed. Academic Press. San Diego.
- MIQUEL, M. P. (1879): *Annales de l'Observatoire de Montsouris*, 452.
- MIQUEL, P., y CAMBERT, R. (1901): *Traité de bacteriologie pure et appliquée*. Ed. Masson et Cia, Paris.
- MIQUEL, M. P., y MOREAU (1884): «Des organismes microscopiques de l'air de la mer». *Semaine Médicale*, 6 mars.
- MOHR, A. J. (1997): «Fate and transport of microorganisms in air». En: Hurst, C. J. et al. (ed). *Manual of environmental microbiology*. Ed. American Society for Microbiology, Washington.
- OLENCHOCK, S. (1997): «Airborne endotoxin». En: Hurst, C. J. et al. (ed). *Manual of environmental microbiology*. Ed. American Society for Microbiology, Washington.
- PADY, S. M., y KELLY, C. D. (1954): «Aerobiological studies of fungi and bacteria over the Atlantic Ocean». *Canadian Journal of Botany*, 32, 202-212.
- PARKER, M. T., y COLLIER, L. H. (1990): *Topley and Wilson's. Principles of bacteriology, virology and immunity*. 8.^a Edic. Vol 2, 4. Ed. Edward Arnold. London.
- PASTEUR, L. (1862): «Memoire sur les corpuscles organisés qui existent dans l'atmosphère». En: Radot PV (ed) *1922 Ouvres de Pasteur*. Vol. 2. Ed. Masson, Paris.
- PELAZ, C., y MARTÍN, C. (1993): *Legionellosis*. Datos de España, diagnóstico de laboratorio y recomendaciones para su prevención y control en instalaciones de edificios. Ed. Instituto de Salud Carlos III. Ministerio de Sanidad y Consumo, Madrid.
- PELCZAR, M. J.; CHAN, E. C. S., y KRIEG, N. R. (1993): *Microbiology: concepts and applications*. 1.^a Edic. Ed. Mc Graw-Hill, New York.
- POLUNIN, N., y KELLY, C. D. (1952): «Artic aerobiology. Fungi and bacteria caught in the air during flights over the geographical North Pole». *Nature*, 170, 314-316.
- POTTS, M. (1994): «Desiccation tolerance of prokaryotes». *Microbiological Reviews*, 58, 755:805.
- PROCTOR, B. (1935): «The microbiology of the upper air. II». *Journal of Bacteriology*, 30, 363-375.
- SALISBURY, J. H. (1866): «On the cause of intermittent and remittent fevers, with investigations which tend to prove that these affections are caused by certain species of *Palmella*». *American Journal of Medicine Sciences*, 51-65.
- SAMUEL, A. R., y KNOWLES, N. J. (2001): «Foot and mouth disease virus: cause of the recent crisis for the livestock industry». *Trends Genetic*, 17, 421-424.
- SATTAR, S. A., y IJAZ, K. (1997): «Airborne virus». En: Hurst, C. J. et al. (ed). *Manual of environmental microbiology*. Ed. American Society for Microbiology, Washington.
- SCHNECHMEISTER, I. L. (1950): «Certain aspects of the behaviour of type A influenza virus as an air-borne cloud». *Journal of Infectious Diseases*, 87, 128.

- SILVERMAN, G. J.; DAVIS, N. S., y KELLER, W. H. (1964): «Exposure of microorganisms to simulated extraterrestrial space ecology». *Life Sciences and Space Research*, 2, 372.
- STARR, J. R., y MASON, B. J. (1966): «The capture of airborne particles by water drops and simulated snow crystals». *Quarterly Journal Review Meteorology Association*, 92, 490-499.
- STETZENBACH, L. (1997): «Introduction to aerobiology». En: Hurst, C.J. *et al.* (ed). *Manual of environmental microbiology*. Ed. American Society for Microbiology, Washington.
- TAKAHASHI, T. (1997): «Airborne fungal colony-forming units in outdoor and indoor environments in Yokohama, Japan». *Mycopathologia*, 139, 23-33.
- THOMPSON, D. (1885): «Appendix to report of the Commitee for scientific Inquires in relation to the colera epidemic of 1854». *General Board of the Ileal. Medical Council*, 121.
- UNDERWOOD, E. (1992): «Ecology of microorganisms as it affects the pharmaceutical industry». En: Hugo, W. B. and Russell, A. D. (ed). *Pharmaceutical microbiology*. 5.^a Edic. Ed. Blackwell Scientific Publication, London.
- WAGONER, P. E. (1983): «The aerial dispersal of the pathogens of plant disease». En : Brooksby, J. B. (ed). *The aerial transmission of disease*. Ed. The Royal Society, London.
- WEBB, S. J. (1959): «Factors affecting the viability of airborne bacteria I». *Canadian Journal of Microbiology*, 5, 649.
- WELLS, W. F. (1933): «Apparatus for study of bacterial behaviour of air». *American Journal of Public Health*, 23, 58-99.
- WELLS, W. F., y WELLS, M. W. (1936): «Air-borne infection». *Journal of the American Medical Association*, 107, 1805-1809.
- YANG, C. S., y JOHANNING, E. (1997): «Airborne fungi and mycotoxins». En: Hurst, C.J. *et al.* (ed). *Manual of environmental microbiology*. Ed. American Society for Microbiology, Washington.