

Fisiología respiratoria: Nuevos conocimientos, mejor diagnóstico

Editores
Raffaele Dellacà
y Andrea Aliverti

Redactor jefe
Peter M.A. Calverley

Este libro forma parte de una serie de Monografías de la ERS (European Respiratory Society). Cada número individual ofrece una visión completa de un área clínica específica de la salud respiratoria, comunicando información sobre las técnicas y sistemas más avanzados necesarios para la investigación en este campo. La obra proporciona detalles científicos útiles y basados en hechos, recurriendo a estudios de casos específicos y examinando el diagnóstico y el tratamiento de pacientes concretos.

Las Monografías de la ERS están disponibles en línea en books.ersjournals.com y los ejemplares impresos en www.ersbookshop.com.

Junta editorial: Christian B. Laursen (Subdirector editorial; Odense, Dinamarca), Francesco Bonella (Essen, Alemania), Dorina Esendagli (Ankara, Turquía), Daniela Gompelmann (Viena, Austria), David S. Hui (Hong Kong), María Molina Molina (Cataluña, España)

Redactora jefe: Rachel Gozzard

European Respiratory Society, 442 Glossop Road, Sheffield, S10 2PX, Reino Unido

Tel: 44 114 2672860 | E-mail: monograph@ersnet.org

Producción y edición: Caroline Ashford-Bentley, Clarissa Charles, Claire Marchant, Catherine Pumphrey y Kay Sharpe

Publicado y editado por European Respiratory Society ©2025

Abril 2025

Impreso ISBN: 978-1-84984-187-0

Online ISBN: 978-1-84984-188-7

EPUB ISBN: 978-1-84984-189-4

ISSN impreso: 2312-508X

En línea ISSN: 2312-5098

Todo el material es copyright de la European Respiratory Society y no puede reproducirse de ninguna manera, incluidos los medios electrónicos, sin el permiso expreso de la sociedad.

Las afirmaciones contenidas en este volumen reflejan la opinión de los autores y no necesariamente la de la European Respiratory Society, los editores o las casas editoriales.



STM Member 2024



Edición española de GRUPO AULA MÉDICA, S. L.



Grupo Aula Médica, S. L.

C/Gandía, 1 - Local 9-A

28007 MADRID

Delegación y almacén:

Río Jarama, 132 - Oficina 3.06

Polígono Industrial Santa María de Benquerencia

45007 Toledo

www.grupoaulamedica.com

ISBN 978-84-7885-747-0

Depósito Legal: M-16380-2026

Traducción: Arcadio García de León (goodwords@cim.es)

Todos los derechos reservados. Prohibida la reproducción, almacenamiento, transmisión, difusión, etc., total o parcial, del contenido de esta obra en cualquier formato y soporte sin consentimiento previo de los titulares del copyright.

Copyright 2026, de la traducción al español, GRUPO AULA MÉDICA, S. L.

Todos los derechos reservados

Impreso en España

Contenido

Fisiología respiratoria: nuevos conocimientos, mejor diagnóstico	Número 107 Abril 2025
Prefacio	vii
Editores invitados	ix
Introducción	xi
Lista de abreviaturas	xiv
Consideraciones sobre el paciente	
1. Fisiología respiratoria: la perspectiva del paciente <i>Michaela Senek, Pippa Powell, Clare Williams, Lisa McNeil, Ilaria Galetti, Dominique Hamerlijnck y Janette Rawlinson</i>	1
Avances en fisiología y fisiología aplicada	
2. Avances en fisiología y fisiopatología del intercambio gaseoso <i>R. Hopkins, G. Kim Prisk y Peter D. Wagner</i>	12
3. Avances en fisiología y patobiología de las vías respiratorias y el parénquima <i>Béla Suki, Hadi T. Nia, Peter B. Noble, Graham M. Donovan, Chun Y. Seow, Riccardo Pellegrino y Vito Brusasco</i>	32
4. Avances en fisiología del ejercicio y fisiopatología <i>Dimitrios Megaritis, Emily Hume, Andrea Aliverti e Ioannis Vogiatzis</i>	53
Técnicas de evaluación funcional	
5. Espirometría y pletismografía corporal <i>Stephen Milne, Sabine C. Zimmermann, Katrina O. Tonga y Bruce R. Thompson</i>	67
6. Oscilometría: fundamentos teóricos <i>Raffaele Dellacà y Ramon Farré</i>	79
7. Oscilometría: importancia clínica y aplicaciones <i>Shannon Simpson, Charles G. Irvin, Gregory G. King y Chiara Veneroni</i>	100

8.	Técnicas de lavado con gas <i>Paul D. Robinson y Sylvia Verbanck</i>	119
9.	Avances recientes en fisiología y evaluación de los músculos respiratorios <i>Andrea Aliverti</i>	135
10.	Análisis del aliento para el control de la salud y aplicaciones clínicas <i>Tommaso Lomonaco, Pritam Sukul, Cristina E. Davis, Fabio Di Francesco y Wolfram Miekisch</i>	154
11.	Prueba de esfuerzo cardiopulmonar <i>Karl Peter Sylvester y Piergiuseppe Agostoni</i>	172
12.	Monitorización de la fisiología respiratoria durante el soporte ventilatorio no invasivo <i>Annalisa Carlucci, Maria Laura Vega Pittao y Lara Pisani</i>	182
Imágenes funcionales		
13.	Medición de la estructura y función pulmonar mediante imágenes de rayos X <i>Sam Bayat</i>	204
14.	Imágenes por resonancia magnética funcional de la enfermedad pulmonar crónica <i>Ali Mozaffaripour, Sam Tchner, Joshua Peters, Yvette Young, Omar Rahman, Olivia Gater y Grace Parraga</i>	224
Factores que influyen en la fisiología respiratoria		
15.	Diferencias entre sexos en la función respiratoria <i>Paolo B. Dominelli, A. William Sheel y Antonella LoMauro</i>	246
16.	La exposición ambiental y el envejecimiento pulmonar <i>Claudia A. Staab-Weijnitz y Mareike Lehmann</i>	259
Conclusiones		
17.	Fisiología, tecnología y diagnóstico de las enfermedades respiratorias <i>Peter M.A. Calverley</i>	277

Prefacio

Peter M. A. Calverley 

Siempre me ha fascinado observar el funcionamiento de las cosas y, como médico, la fisiología. En la universidad escocesa a la que asistí, la fisiología se conocía como «Fundamentos de la medicina», lo que reflejaba su papel central a la hora de explicar cómo la estructura se traduce en función. La fisiología respiratoria ha tenido un gran éxito en este campo: nuestro conocimiento actual sobre los intercambios gaseosos pulmonares surgió de la necesidad de garantizar la seguridad de los vuelos a gran altitud durante la Segunda Guerra Mundial, mientras que el de la mecánica pulmonar se remonta a las primeras mediciones de la presión pleural realizadas en pacientes tuberculosos tratados con neumotórax artificial. Estos comienzos poco prometedores dieron forma a nuestra comprensión actual del funcionamiento de los pulmones y, gracias a ingeniosas aplicaciones tecnológicas, una amplia gama de pruebas y procedimientos diagnósticos nos permiten ahora caracterizar la disfunción pulmonar y tanto controlar como predecir la progresión de la enfermedad.



La fisiología respiratoria estuvo a la vanguardia del progreso médico desde la década de los 50 hasta finales de la de los 80 del siglo pasado, pero a partir de entonces se tuvo la sensación de que todos los problemas habían sido resueltos. Esto fue un error, ya que la llegada de la informática moderna y la gestión de datos permitió que ideas que en el pasado habían sido meros experimentos teóricos se convirtieran en herramientas prácticas para el cuidado de los pacientes.

Teniendo en cuenta estos nuevos avances en el diagnóstico, nos pareció oportuno dedicar un número de la *Monografía* a ofrecer al lector una visión accesible de este nuevo y apasionante mundo de mejora en el diagnóstico y la comprensión de las enfermedades pulmonares. En este empeño, hemos tenido la suerte de contar con dos distinguidos bioingenieros (y miembros veteranos de la Sociedad Respiratoria Europea) interesados en la fisiología respiratoria como editores invitados. Raffaele Dellacà y Andrea Aliverti, a su vez, han reclutado a un grupo muy distinguido de médicos y científicos para estudiar este campo en rápida evolución. Los capítulos que aquí se presentan abordan los aspectos fisiológicos más básicos, como el intercambio gaseoso y la mecánica pulmonar, pero también analizan la teoría y la práctica que subyacen a procedimientos diagnósticos tanto conocidos como novedosos, así como la aplicación de la fisiología para

comprender el impacto de la contaminación y el soporte ventilatorio asistido. Vale la pena leer todos y cada uno de los capítulos, ya que ofrecen una perspectiva inesperada sobre lo que creemos saber ya y lo que necesitaremos saber en el futuro.

Este número de la *Monografía* muestra por qué la comprensión de la fisiología respiratoria sigue siendo el núcleo de nuestra disciplina y por qué es probable que siga siéndolo a medida que avanza el siglo XXI. ¡Así que, adelante con la lectura y disfruten del viaje!

Declaración de intereses: P.M.A. Calverley declara haber recibido becas, honorarios personales y apoyo no financiero de empresas farmacéuticas que fabrican medicamentos para tratar enfermedades respiratorias. Esto incluye el reembolso de actividades educativas y trabajos de asesoramiento, así como el apoyo para asistir a reuniones.

Editores invitados

Raffaele Dellacà

Raffaele Dellacà es profesor titular del Departamento de Electrónica, Información y Bioingeniería de la Universidad Politécnica de Milán (Milán, Italia) y director del programa de doctorado en bioingeniería. Es responsable del Laboratorio de Tecnologías para la Respiración (TechRes) y cofundador de Restech s.r.l. (Milán), una empresa derivada de la Universidad Politécnica de Milán que desarrolla y produce dispositivos innovadores para pruebas de función pulmonar.



Raffaele Dellacà obtuvo un máster en ingeniería de ciencias de control en 1997 en la Universidad Politécnica de Milán. Posteriormente, en 2001, obtuvo un doctorado en ingeniería biomédica en la misma institución.

Los principales intereses de investigación de Raffaele se centran en la bioingeniería del sistema respiratorio y los dispositivos médicos, con especial atención a la fisiología respiratoria, la mecánica respiratoria, la modelización de las propiedades mecánicas del sistema respiratorio, el desarrollo de nuevas tecnologías para el análisis de la respiración, la ventilación mecánica y la anestesia en adultos y recién nacidos.

En 2005, Raffaele ingresó como miembro de la Sociedad Respiratoria Europea (ERS) y fue profesor visitante Raine en la Universidad de Australia Occidental (Perth, Australia) en 2016. Ha sido investigador principal, coinvestigador principal o colaborador en varios proyectos de investigación patrocinados por organismos públicos, fundaciones y empresas. Es autor de más de 150 artículos publicados en revistas internacionales revisadas por pares y tiene 19 patentes, la mayoría de las cuales son utilizadas por empresas comerciales que fabrican dispositivos médicos.

Andrea Aliverti



Andrea Aliverti es profesor titular del Departamento de Electrónica, Información y Bioingeniería de la Universidad Politécnica de Milán (Milán, Italia), donde es director delegado de transferencia tecnológica desde 2023. Andrea también es responsable del Lares (Laboratorio de Análisis Respiratorio) del Laboratorio de Tecnología Biomédica (TBMLab) de la misma universidad.

Andrea obtuvo un máster en ingeniería electrónica y un doctorado en ingeniería biomédica por la Universidad Politécnica de Milán en 1992 y 1997, respectivamente.

Sus principales intereses de investigación incluyen la bioingeniería del sistema respiratorio, las mediciones fisiológicas, la instrumentación biomédica, las imágenes funcionales del pulmón, la mecánica respiratoria, los sensores y tecnologías portátiles para la salud digital, y la inteligencia artificial aplicada a datos, señales e imágenes fisiológicas.

Miembro activo de la Sociedad Respiratoria Europea (ERS), Andrea fue secretario y presidente del grupo de Estructura y Función Respiratoria, y secretario y jefe de las asambleas de Fisiología Clínica, Sueño y Circulación Pulmonar. Es miembro honorario de la ERS desde 2020.

Andrea también es miembro activo del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) y, desde 2023, es presidente general de la Conferencia Internacional IEEE-STAR (Deporte, Tecnología e Investigación).

Andrea es autor de más de 300 artículos, editor de cuatro libros y tiene 15 patentes. Recibió el premio ERS COPD en 2004, el premio Vertex Innovation en 2018 y el premio Andrew P. Sage de IEEE Transactions on Human-Machine Systems en 2021.

Introducción

Raffaele Dellacà  y Andrea Aliverti

Departamento de Electrónica, Información y Bioingeniería, Universidad Politécnica de Milán, Milán, Italia.

Autor para correspondencia: Raffaele Dellacà (raffaele.dellaca@polimi.it)

@ERSpublications

Esta *Monografía* repasa la rápida evolución de la fisiología respiratoria, destacando cómo los avances tecnológicos y los enfoques interdisciplinarios han transformado nuestra comprensión de la función pulmonar, el intercambio gaseoso y la mecánica ventilatoria. <https://bit.ly/ERSM107intro>

Copyright ©ERS 2025. ISBN impreso: 978-1-84984-187-0. ISBN en línea: 978-1-84984-188-7. ISSN impreso: 2312-508X. ISSN en línea: 2312-5098 (edición original en lengua inglesa).

El desarrollo de la fisiología respiratoria se ha caracterizado por una fase inicial lenta seguida de un desarrollo mucho más rápido, en su mayor parte durante los últimos 70 años. Los avances más significativos se vieron facilitados por nuevas tecnologías que permitieron realizar nuevas observaciones y mediciones de estructuras y variables relevantes. Por ejemplo, el microscopio permitió a Marcello Malpighi descubrir los alvéolos y los capilares en 1661 («De pulmonibus observationes anatomicae»). Pero no fue hasta 250 años después cuando August y Marie Krogh pudieron comprender y demostrar la difusión de O₂ en el pulmón realizando mediciones precisas con nuevos dispositivos que ellos mismos crearon: el microtonómetro y el espirómetro de Krogh.

Durante muchos años, el desarrollo de la fisiología respiratoria estuvo garantizado por científicos capaces de combinar una excelente habilidad técnica con la fisiología, lo que les permitió crear nuevos dispositivos y métodos para abordar sus temas de investigación. Este enfoque interdisciplinario impulsó avances significativos que transformaron nuestra comprensión de la función pulmonar, el intercambio de gases, la mecánica respiratoria y las interacciones entre los sistemas respiratorio y cardiovascular. Estos avances han dado lugar a mejores herramientas de diagnóstico, un fenotipado más preciso de las enfermedades y mejores intervenciones clínicas. Las contribuciones de fisiólogos como John West, Hermann Rahn, Jere Mead, Peter Macklem y Joseph Milic-Emili han avanzado significativamente nuestra comprensión de la función pulmonar. Los recientes avances técnicos en sensores, procesamiento de datos, técnicas de imagen, modelos informáticos y biología molecular han impulsado nuestra capacidad para evaluar e interpretar la función respiratoria a niveles sin precedentes. Curiosamente, la mayor complejidad de los métodos y técnicas ha ampliado las disciplinas y competencias implicadas, de modo que la investigación en fisiología respiratoria cuenta hoy en día con la participación de ingenieros biomédicos, físicos y bioquímicos, además de fisiólogos.

La fisiología respiratoria es un ámbito clínico clave que afecta directamente a la atención al paciente. La capacidad de evaluar la función pulmonar de forma precisa y eficaz tiene implicaciones fundamentales en el diagnóstico, la monitorización y la planificación del tratamiento de una amplia gama de afecciones respiratorias. Históricamente, las pruebas de función pulmonar, como la espirometría y la pletismografía corporal, han sido fundamentales para diagnosticar trastornos respiratorios, pero las nuevas tecnologías han proporcionado una visión más profunda de la mecánica pulmonar y el intercambio gaseoso. Por ejemplo, la oscilometría se ha convertido en una

técnica no invasiva que permite evaluar con precisión la obstrucción de las vías respiratorias, incluso en afecciones que afectan a las vías respiratorias pequeñas. Por otro lado, las técnicas de lavado gaseoso son una herramienta muy útil para evaluar la distribución de la ventilación y detectar los primeros signos de enfermedad pulmonar. Estas nuevas metodologías han perfeccionado la evaluación de la enfermedad, permitiendo definir fenotipos más detallados y proporcionando herramientas clínicas que recopilan información más completa sobre el sistema respiratorio y el estado del paciente. Las tecnologías que permiten la medición detallada de la cinemática de la pared torácica, como la pletismografía optoelectrónica, han mejorado nuestra comprensión de la mecánica de la pared torácica en varios trastornos respiratorios.

El impacto del ejercicio en la función respiratoria ha sido otra área de gran interés en las últimas décadas. La integración de la CPET (prueba de esfuerzo cardiopulmonar o ergoespirometría) en la práctica clínica ha transformado la evaluación de la intolerancia al ejercicio, especialmente en pacientes con enfermedades respiratorias crónicas como la EPOC, la EPI y la hipertensión pulmonar. La mejora de las tecnologías y la interpretación de los resultados de estas pruebas no solo aumentan el éxito del diagnóstico, sino que también sirven de base para las estrategias de rehabilitación y las intervenciones terapéuticas destinadas a mejorar la capacidad funcional y la calidad de vida.

Las técnicas de imagen han desempeñado durante mucho tiempo un papel fundamental en la fisiología respiratoria, y los recientes avances técnicos han tenido un impacto especial en este campo y han ampliado sus capacidades. La radiografía de tórax tradicional y la TC han sido indispensables para evaluar la estructura pulmonar, pero las modalidades emergentes, como la TC con radiación sincrotrón y la RM funcional, están creando nuevas oportunidades para comprender mejor las relaciones entre estructura y función, ya que proporcionan información detallada sobre la ventilación pulmonar, la perfusión y los cambios microestructurales. La integración de las imágenes con las mediciones fisiológicas está allanando el camino hacia un enfoque más integral del diagnóstico respiratorio, en el que las anomalías estructurales pueden correlacionarse con el deterioro funcional para mejorar la toma de decisiones clínicas.

La evolución continua de la fisiología respiratoria está impulsada por una combinación de innovación tecnológica, colaboración interdisciplinaria y un creciente énfasis en la medicina personalizada. A medida que profundizamos en nuestra comprensión de la función pulmonar, el potencial para desarrollar terapias específicas y planes de tratamiento individualizados se vuelve más alcanzable. Esta *Monografía* tiene como objetivo proporcionar una visión general actualizada y completa de la fisiología respiratoria, integrando conceptos clásicos con los últimos avances. En ella se destacan las técnicas de diagnóstico más avanzadas y su aplicación en la medicina respiratoria, y tiende un puente entre la fisiología básica y la práctica clínica, ofreciendo una visión de cómo los principios fisiológicos influyen en el diagnóstico y el tratamiento de las enfermedades. También se exploran los nuevos retos y las líneas de investigación, incluyendo el impacto de las exposiciones ambientales, el envejecimiento y las diferencias relacionadas con el sexo en la función pulmonar. Por último, este trabajo sirve como recurso educativo para médicos, investigadores y estudiantes de medicina pulmonar, fisiología y otros campos relacionados.

Esta *Monografía* se estructura en cuatro secciones que abordan: 1) nuevos conocimientos; 2) avances en tecnología y métodos para medir la función pulmonar; 3) el estado actual de la técnica en el mundo en rápida evolución de las técnicas de imagen funcional respiratoria; y 4) conocimientos actuales sobre la forma en que factores como el sexo y la exposición ambiental influyen en la fisiología respiratoria.

Una comprensión adecuada de todos estos elementos es fundamental para mejorar la precisión diagnóstica, mejorar los resultados de los pacientes y fundamentar las estrategias de tratamiento en medicina respiratoria. Al integrar los principios clásicos con los avances contemporáneos, y los principios fundamentales con los conceptos emergentes, esperamos que esta *Monografía* constitu-

ya un recurso único para médicos, investigadores, profesionales sanitarios y personas dedicadas a la medicina y la investigación respiratoria, con el objetivo último de mejorar la precisión diagnóstica, fomentar los descubrimientos científicos y, en última instancia, mejorar los resultados para los pacientes con trastornos respiratorios.

Declaración de intereses: R. Dellacà informa de lo siguiente, al margen del trabajo presentado: patentes sobre aplicaciones de oscilometría propiedad de la Universidad Politécnica de Milán y cedidas bajo licencia a Vyaire y Restech; accionista y miembro del Consejo de Administración de Restech s.r.l., una empresa derivada de la Universidad Politécnica de Milán; y subvenciones de investigación a la Universidad Politécnica de Milán por parte de Vyaire y Chiesi. A. Aliverti es inventor de varias patentes relacionadas con la pletismografía optoelectrónica, las oscilaciones forzadas y los sistemas portátiles para la monitorización respiratoria.

ChatGPT-4o se utilizó como asistente básico de redacción en la composición de este capítulo, durante enero de 2025..

Lista de abreviaturas

FQ	fibrosis quística
CO	monóxido de carbono
CO ₂	dióxido de carbono
CPET	prueba de esfuerzo cardiopulmonar
CT	tomografía computerizada
D_{LCO}	capacidad de difusión pulmonar del monóxido de carbono
VEF ₁	volumen espiratorio forzado en 1 segundo
FRC	capacidad residual funcional
CVF	capacidad vital forzada
EPI	enfermedad pulmonar intersticial
MRI/RM	imagen por resonancia magnética/resonancia magnética
O ₂	oxígeno
VD	volumen residual
$\dot{V}_{\text{CO}_2}$	producción de dióxido de carbono
$\dot{V}_{\text{O}_2}$	consumo de oxígeno