



REVISIÓN

ACERCÁNDONOS A LA PRUEBA DE ESFUERZO CARDIOPULMONAR

Approaching the cardiopulmonary exercise test

Autores: Olivares Mendoza MA¹, Chiriboga Sánchez J. G¹, Garrido Solvez M¹, Colomer Delgado R. P¹, López Miguel C. P¹, Godoy R^{1,2}.

1-Servicio de Neumología. Complejo Hospitalario Universitario de Albacete

2-Laboratorio de Estructura Sináptica, Instituto de Investigación Sanitaria de Castilla-La Mancha (IDISCAM), Albacete, Spain

Resumen:

La **prueba de esfuerzo cardiopulmonar (PECP)** es una herramienta clave en la evaluación de la función respiratoria y cardiovascular durante el ejercicio. A diferencia de las pruebas convencionales en reposo, la PECP permite analizar la respuesta integrada de los sistemas pulmonar, cardiovascular, hematopoyético y muscular ante el esfuerzo. Se utiliza en el diagnóstico de disnea de origen desconocido, la valoración de enfermedades crónicas, la rehabilitación cardiopulmonar y la evaluación preoperatoria en cirugía torácica.

El procedimiento mide parámetros como el **consumo de oxígeno (VO₂)**, la **eliminación de dióxido de carbono (VCO₂)**, la **frecuencia cardíaca (FC)** y la **ventilación minuto (VE)**. Además, permite identificar los umbrales aeróbico y anaeróbico, fundamentales para la planificación del entrenamiento físico. Su interpretación requiere experiencia, pero ofrece información valiosa para el manejo clínico de los pacientes con enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

Palabras clave: prueba de esfuerzo, cardiopulmonar, VO₂, VCO₂, disnea, rehabilitación, umbral anaeróbico, ventilación, ergoespirometría.

Resume:

The **cardiopulmonary exercise test (CPET)** is a key tool for assessing respiratory and cardiovascular function during exercise. Unlike conventional resting tests, CPET analyzes the integrated response of the pulmonary, cardiovascular, hematopoietic, and muscular systems to physical exertion. It is used for diagnosing unexplained dyspnea, evaluating chronic diseases, cardiopulmonary rehabilitation, and preoperative risk assessment in thoracic surgery.

This test measures parameters such as **oxygen consumption (VO₂)**, **carbon dioxide elimination (VCO₂)**, **heart rate (HR)**, and **minute ventilation (VE)**. Additionally, it identifies aerobic and anaerobic thresholds, essential for physical training planning. Although its interpretation requires experience, CPET provides valuable insights for managing patients with respiratory and cardiovascular diseases.

Keywords: exercise test, cardiopulmonary, VO₂, VCO₂, dyspnea, rehabilitation, anaerobic threshold, ventilation, cardiopulmonary ergospirometry.

Introducción:

La mayoría de las pruebas de función respiratoria (PFR) que realizamos en Neumología nos dan información del paciente en reposo (espirometría, difusión, pletismografía), pero muchos sufren la limitación con la actividad. Además, la actividad física es un aspecto básico de la vida del paciente y forma parte de un estilo de vida saludable. Por todo esto, conocer cómo afecta su tolerancia al ejercicio y su respuesta funcional nos dará una información muy importante sobre los pacientes y para ello utilizamos los test de ejercicio. Los test de ejercicio de los que disponemos se pueden dividir en simples, que incluyen el test de la marcha de los 6 minutos, la prueba de lanzadera y la prueba de subir escaleras, y los test cardiorrespiratorios, en los que se encuentran la cicloergometría y el tapiz rodante¹. Los primeros permiten obtener una información limitada con un equipo mínimo, mientras que las pruebas de esfuerzo cardiopulmonar (PECP) precisan de una instrumentación más sofisticada que permite una evaluación global de las respuestas integradoras al ejercicio que involucran los

sistemas pulmonar, cardiovascular, hematopoyético, neuropsicológico y del músculo esquelético y que no se reflejan adecuadamente con la medición de la función del sistema individual². El uso del tapiz rodante o cicloergómetro ofrece ciertas ventajas y desventajas, sin haber demostrado superioridad de uno respecto al otro.

La PECP o ergometría permite el análisis del intercambio gaseoso respiratorio (la absorción de oxígeno, la eliminación de dióxido de carbono y la ventilación) y la integración de estos datos con las constantes obtenidas durante la prueba, como son la frecuencia cardíaca (FC), la presión arterial (PA), la potencia alcanzada, los datos del electrocardiograma (ECG), la saturación de oxígeno (StO₂) y los síntomas percibidos por el paciente. Esto nos aporta una descripción global de la fisiología de las respuestas al ejercicio, así como establecer si existe una limitación anormal en alguno de los sistemas implicados³.

Las indicaciones para el uso de la PECP son muy amplias, pero las más frecuentes se podrían resumir en las siguientes^{2,4-6}:

- Determinar la(s) causa(s) y la gravedad de la disnea de esfuerzo y la intolerancia al ejercicio.
- Valoración clínica, funcional y pronóstica en patologías CV y pulmonares crónicas.
- Valoración preoperatoria del riesgo quirúrgico así como las posibles complicaciones posquirúrgicas.
- Medir la respuesta al tratamiento de pacientes en programas de rehabilitación.
- Orientación y seguimiento del entrenamiento físico individual en medicina preventiva y deportiva.
- Evaluación legal de la discapacidad.

Entre las contraindicaciones absolutas se incluyen las relacionadas con enfermedades cardíacas, metabólicas o pulmonares agudas no controladas, como el infarto agudo de miocardio, arritmia no controlada, endocarditis activa, insuficiencia cardíaca o respiratoria aguda, tromboembolismo pulmonar agudo, tuberculosis activa, tirotoxicosis, etc⁴.

Parámetros, fisiología

Antes de comenzar con los parámetros que obtenemos de la realización de la PECP debemos comprender la fisiología que sucede durante el ejercicio.

El oxígeno lo obtenemos de la atmósfera y puede ser utilizado por los músculos gracias a los procesos integrados de ventilación pulmonar, difusión e intercambio de gases entre los alvéolos y la sangre arterial, el transporte de la sangre oxigenada gracias al sistema cardiovascular y finalmente por el intercambio de gases entre el capilar y el músculo. Estos sistemas trabajan acoplados y con el esfuerzo aumenta su función hasta la máxima capacidad de alguno de ellos, ya sea dentro de la normalidad o no⁷.

Por otro lado, la energía en forma de adenosín trifosfato (ATP) necesaria para la movilización del músculo se obtiene principalmente a partir de ácidos grasos y glucosa. Los primeros sufren una lipólisis aeróbica y la segunda puede sufrir glucólisis aeróbica pero también una anaeróbica, en la cual se produce lactato. Estas vías energéticas están activas simultáneamente durante el ejercicio de intensidad creciente, pero en función de cuál predomine se pueden diferenciar tres zonas, ya propuestas en el modelo trifásico de Skinner y McLellan en 1981 (imagen 1). Según este modelo podemos diferenciar una primera zona en la que predomina la oxidación de los ácidos grasos, una fase mixta o de transición, en la que la anaerobiosis comienza a tener importancia y se comienza a producir ácido láctico resultante de este metabolismo, y por último una fase anaeróbica en la que predomina esta forma de glicólisis

con la consecuente acumulación de ácido láctico. Separando estas fases se pueden diferenciar dos umbrales cuya denominación puede variar según la literatura que consultemos, pero en este artículo utilizaremos la nomenclatura dada por Wasserman, que definió el primer umbral como anaeróbico (AT por sus siglas en inglés de “anaerobic threshold”) y al segundo como punto de compensación ventilatoria (RCP por sus siglas en inglés)⁷.

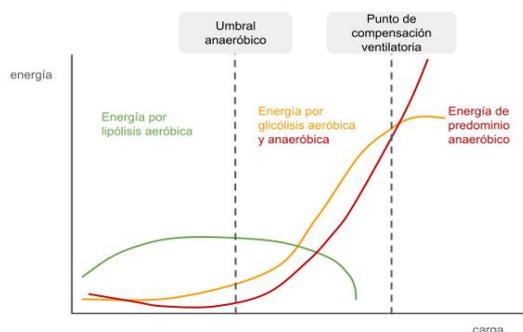


Imagen 1: Modelo trifásico de Skinner y McLellan.

El ácido láctico que se comienza a producir tras el primer umbral es compensado gracias al tampón bicarbonato, generando secundariamente dióxido de carbono (CO₂) que el cuerpo eliminará con el aumento de la ventilación. Tras el segundo umbral la producción de láctico es mucho mayor y el tampón bicarbonato se ha agotado, por lo que el ácido que puede ser eliminado es el volátil, el CO₂, con lo que la ventilación vuelve a aumentar de nuevo y sufre una segunda inflexión. Para mejorar la comprensión de estos fenómenos consultar las imágenes 2 y 3 del material complementario.

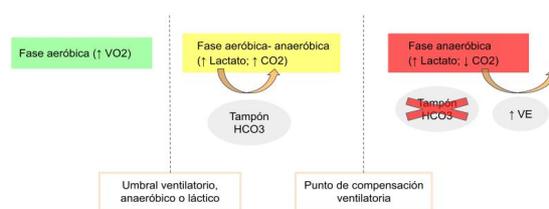


Imagen 2: Modelo trifásico de Skinner y McLellan. VO₂: consumo de oxígeno. CO₂: dióxido de carbono. HCO₃: bicarbonato. VE: ventilación.

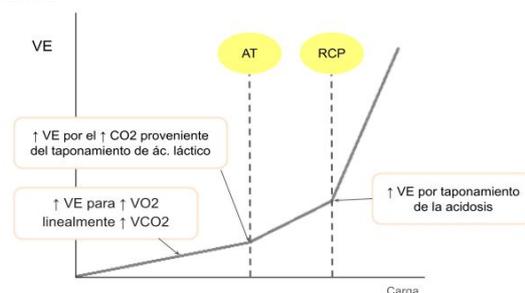


Imagen 3: Inflexiones que sufre la ventilación durante el ejercicio según el modelo trifásico de Skinner y McLellan. VO₂: consumo de oxígeno. CO₂: dióxido de carbono. VCO₂: eliminación de CO₂. AT: anaerobic threshold o umbral anaeróbico. RCP: respiratory

compensation point o punto de compensación ventilatoria. VE: ventilación.

Son muchos los parámetros obtenidos de la realización de la PECP, pero vamos a definir solo algunos de ellos que consideramos básicos para la comprensión de esta prueba^{3,7}:

- consumo de oxígeno (VO₂): es la cantidad de oxígeno por minuto que el organismo extrae de la atmósfera para satisfacer las necesidades metabólicas de sus tejidos. Este puede variar por cuestiones genéticas, edad, composición corporal, sexo y entrenamiento. En circunstancias normales el VO₂ aumenta linealmente conforme aumenta la potencia hasta alcanzar una meseta, momento en el que se alcanza la máxima cantidad de oxígeno que el organismo es capaz de absorber, transportar y consumir por unidad de tiempo y que se denomina consumo máximo de oxígeno (VO₂max). En las ocasiones en las que el paciente no alcanza dicho VO₂máx (baja forma física, comorbilidades, falta de motivación) determinamos el consumo de oxígeno pico (VO₂pico), que es el nivel máximo alcanzado por el paciente. (imagen 4).

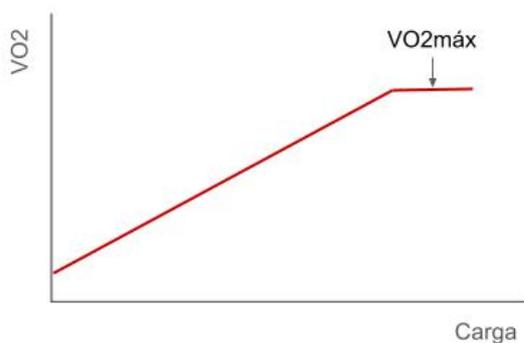


Imagen 4: Consumo de oxígeno (VO₂). VO₂máx: consumo de oxígeno máximo. VO₂pico: consumo de oxígeno pico.

- eliminación de dióxido de carbono (VCO₂): cantidad de dióxido de carbono que elimina el organismo por unidad de tiempo. Está en relación con la ventilación.
- primer umbral, umbral anaeróbico, ventilatorio o láctico (AT): es el nivel de ejercicio a partir del cual la producción energética aeróbica comienza a ser suplementada por mecanismos anaeróbicos, y que se refleja con un incremento de ácido láctico en sangre. Por debajo del umbral se pueden tolerar períodos prolongados de ejercicio, pero por encima aparece en más o menos tiempo la fatiga

muscular. Esto hace que sirva de referencia en programas de entrenamiento. Para su determinación podemos utilizar el método de la “V-Slope”, que consiste en detectar el momento en el que la pendiente de la VCO₂ sufre una inflexión respecto a la VO₂, como consecuencia del inicio de acúmulo de CO₂ (imagen 5).

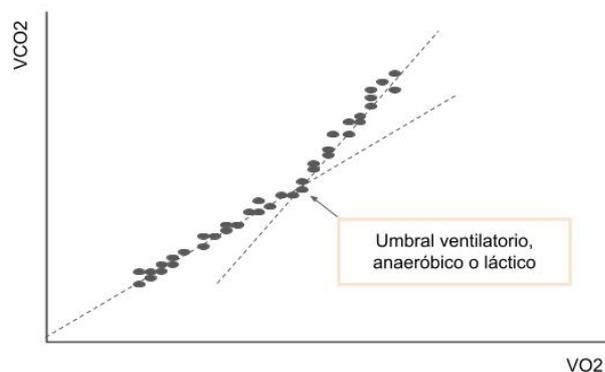


Imagen 5: Método de la “V-Slope”.

- segundo umbral o punto de compensación ventilatoria (RCP): para detectar este momento en el ejercicio utilizamos el método de los equivalentes ventilatorios, que consiste en localizar el momento en el que se produce una hiperpnea secundaria al exceso de CO₂ a consecuencia del taponamiento de lactato porque los equivalentes ventilatorios de oxígeno (VE/VO₂) y de dióxido de carbono (VE/VCO₂) se elevan a la vez (VE/VO₂ y VE/VCO₂ se elevan) (imagen 6).

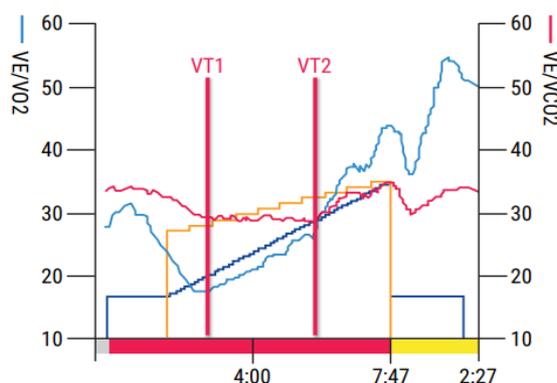


Imagen 6: método de los equivalentes ventilatorios. VE/VO₂: equivalente ventilatorio de oxígeno. VE/VCO₂: equivalente ventilatorio de dióxido de carbono. VT1: primer umbral. VT2: segundo umbral.

- ventilación minuto (VE): como hemos ido exponiendo inicialmente se incrementa de forma lineal en la primera fase, junto con la VO₂ y la VCO₂. Tras el primer umbral sufre una

pequeña inflexión para eliminar el CO₂ resultante del tamponamiento del láctico y tras el RCP la inflexión es mucho más acusada para permitir la excreción del único ácido volátil dada la mayor acumulación de lactato en esta fase.

- cociente respiratorio (RER): es la relación de VO₂ respecto a VCO₂ (VO₂/VCO₂). En reposo su valor normal es de entre 0.75 y 0.95 y aumenta con el ejercicio conforme se acumula el CO₂ en el organismo, superando el valor de 1 cuando se alcanza el umbral anaeróbico. Un valor de RER pico ≥ 1.1 refleja un esfuerzo adecuado durante la prueba, mientras que si es ≤ 1 sin que se objetiven causas de la limitación al ejercicio se suele traducir en un esfuerzo submáximo.
- Equivalentes ventilatorios (VE/VO₂ y VE/VCO₂): son una medida indirecta de la eficiencia ventilatoria y dependen del espacio muerto y de la ventilación. Cuando están por encima de los valores normales se suele deber a problemas cardíacos o respiratorios.
- ventilación voluntaria máxima (MVV): se puede calcular directamente mediante una maniobra de respiraciones rápidas y profundas durante 12-15 segundos o indirectamente con la fórmula FEV₁x35. La reserva respiratoria se calculará por la cercanía de la VE máxima alcanzada durante el ejercicio respecto a la MVV con la siguiente ecuación: (VE_{máx}/MVV) x100. Una reserva menor del 15% puede ser considerada patológica. En pacientes

con patología pulmonar esta reserva suele estar disminuida⁸.

- gasto cardíaco (GC): también se incrementa de forma lineal con la potencia a expensas de la FC y el volumen sistólico, especialmente a raíz de la primera.
- presión arterial (PA) sistémica: la PA sistólica aumenta progresivamente en el ejercicio en personas sanas como respuesta a la disminución de la resistencia vascular en los músculos activos y para permitir la perfusión cerebral, con el aumento de resistencia en los lechos vasculares renal, espláncnicos y cutáneos a la vez que aumenta el GC. La presión diastólica puede disminuir ligeramente o no sufrir cambios.
- Pulso de oxígeno (VO₂/FC): es una medida de la eficiencia cardiovascular, obtenida de los máximos predichos de VO₂ y FC. Este valor será bajo en pacientes con problemas cardíacos, anemia, hipoxemia o miopatías, mientras que estará elevado en personas entrenadas o en tratamiento con betabloqueantes.

Interpretación de los datos

La interpretación de los resultados de la ergoespirometría es complicada, puesto que requiere el análisis de varios valores y patrones gráficos, para lo que es necesario adquirir cierta experiencia hasta alcanzar una comprensión más completa de la prueba. Sin embargo, para iniciarnos en su interpretación podemos comenzar con algoritmos básicos, como el que nos propone A. Berenguel en su artículo⁷ con el que, utilizando solo tres parámetros, podemos valorar el resultado del test (imagen 7).

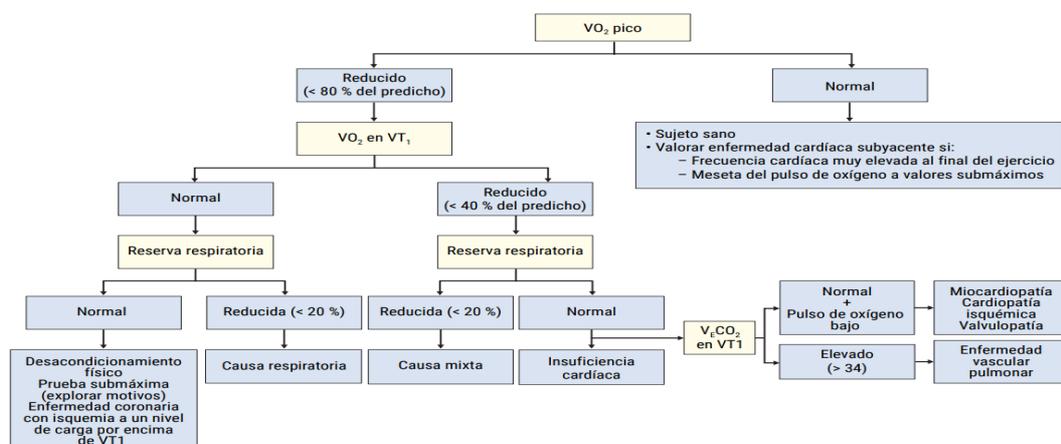


Imagen 7: Algoritmo diagnóstico básico utilizando únicamente tres parámetros: consumo de oxígeno (tanto a nivel de carga máxima como en el primer umbral), reserva respiratoria y equivalente del dióxido de carbono medido en el primer umbral. Como parámetros secundarios, hay que basarse en la frecuencia cardíaca y en el pulso de oxígeno. VCO₂: eliminación de dióxido de carbono; VE/CO₂: equivalente ventilatorio de dióxido de carbono; VO₂: consumo de oxígeno.

Discusión

Ahora que se entiende la fisiología del ejercicio y cómo interpretar los resultados obtenidos mediante la PECP, se va a comentar las indicaciones más frecuentes que nos llevan a solicitar este tipo de prueba y qué nos aporta respecto a otros estudios de función pulmonar. Ya hemos mencionado varias de las indicaciones por las que se realiza este estudio, pero nos vamos a centrar en las más frecuentemente solicitadas en el ámbito de la Neumología: estudio de disnea de causa no aclarada y la intolerancia al ejercicio, evaluación en programas de rehabilitación pulmonar y estudio preoperatorio de resección en cáncer pulmonar.

La disnea es una sensación subjetiva de dificultad para respirar que afecta a miles de pacientes y que puede ser síntoma de múltiples patologías (respiratorias, cardiovasculares, musculares, anemia, etc), aumentándose generalmente durante el ejercicio. El estudio y la determinación de la causa de dicho síntoma es importante, ya que la disnea limita la calidad de vida del paciente. En una revisión sistemática publicada en 2022⁹ concluye que cuando la disnea es de causa desconocida y tras la realización de una adecuada historia clínica, examen físico, pruebas de función pulmonar, exploraciones radiológicas de tórax y ecocardiograma, la PECP queda como un test altamente informativo que nos puede orientar hacia la o las causas de la disnea, indicándonos el o los posibles sistemas disfuncionantes en cada paciente. En otro artículo publicado en la Chest en 2022¹⁰ nos ofrece un enfoque sobre el uso de la PECP para el estudio de la disnea y la limitación al ejercicio en personas con patología respiratoria crónica, indicando que la PECP es el ideal para evaluar el mecanismo fisiopatológico. Además, ofrece una guía con ejemplos sobre cómo interpretar los datos de la ergoespirometría para comprender las causas de las alteraciones subyacentes en estos pacientes.

El efecto beneficioso de la rehabilitación cardiopulmonar está más que demostrado. El estándar para evaluar la capacidad funcional del paciente es la prueba de ejercicio gradual, medida con tapiz rodante, cicloergómetro o test de la marcha. Esta prueba proporciona información para evaluar la seguridad del ejercicio y para desarrollar una prescripción de este¹¹. Por tanto, se puede utilizar tanto un test de esfuerzo simple como una PECP para la evaluación y prescripción de

rehabilitación respiratoria, pero la ergoespirometría nos aporta una información específica que no se puede obtener por otra prueba. Entre los dos umbrales determinados durante la prueba de esfuerzo se encuentra la zona sensible de entrenamiento, que es aquella segura y eficaz para obtener mejoras con la rehabilitación, y la única manera de conocer con fiabilidad esa zona es mediante la ergoespirometría.

La cirugía resectiva en el cáncer de pulmón puede suponer la curación del paciente, pero el riesgo no debe ser mayor que el beneficio, de ahí la importancia de un estudio individualizado. Las últimas guías publicadas a este respecto son la europea, publicada en 2009¹² y la americana, publicada en 2013¹³. Ambas proponen iniciar el estudio evaluando el riesgo cardiovascular, que deberá ser tratado en caso necesario antes de proseguir con otras valoraciones. En caso de que no haya un alto riesgo cardiovascular sugieren realizar espirometría y difusión, calculando el valor predicho postoperatorio del volumen máximo espirado en el primer segundo (ppoFEV1) y la difusión (ppoDLCO). Aunque cada guía marca un límite mínimo diferente para cada uno de estos parámetros, ambas coinciden en la realización de una PECP en caso de que no se alcancen dichos mínimos. A partir de esta prueba se obtiene el cálculo del consumo de oxígeno máximo predicho preoperatorio (ppoVO2máx), con el cual se considera si el riesgo quirúrgico es bajo, moderado o alto según los puntos de corte propuestos en cada guía.

Conclusiones

Como conclusiones podemos extraer que la ergoespirometría es una PECP, y como tal nos aporta una descripción integral de la fisiología de las respuestas al ejercicio y nos permite establecer si existe una limitación anormal en alguno de los sistemas implicados durante el esfuerzo (cardiológico, respiratorio o metabolismo energético muscular). Es fundamental conocer la fisiología del ejercicio para comprenderla y aunque su interpretación es complicada y requiere experiencia, se puede comenzar con algoritmos sencillos que también nos permiten su análisis. Sus utilidades e indicaciones son muy amplias, entre las que queremos destacar el estudio de la disnea de causa desconocida, su aplicación en programas de rehabilitación y en el estudio preoperatorio de pacientes con cáncer de pulmón.

Bibliografía:

1. Manual de Procedimientos SEPAR, 4 by SEPAR - Issuu [Internet]. 2011 [citado 31 de diciembre de 2024]. Disponible en: <https://issuu.com/separ/docs/procedimientos4>
2. ATS/ACCP Statement on Cardiopulmonary Exercise Testing. Am J Respir Crit Care Med. 15 de enero de

2003;167(2):211-77.

3. Maestu LP, Morales MCJ, Castillejo EO. PRUEBA DE EJERCICIO CARDIO-RESPIRATORIO PROGRESIVO.
4. Glaab T, Taube C. Practical guide to cardiopulmonary exercise testing in adults. Respir Res. 12 de enero de 2022;23(1):9.
5. Milani RV, Lavie CJ, Mehra MR, Ventura HO. Understanding the Basics of Cardiopulmonary Exercise Testing. Mayo Clin Proc. 1 de diciembre de

- 2006;81(12):1603-11.
6. Albouaini K, Egred M, Alahmar A. Cardiopulmonary exercise testing and its application. *Postgrad Med J*. noviembre de 2007;83(985):675-82.
 7. MIT6Texto.pdf [Internet]. [citado 30 de enero de 2025]. Disponible en: https://aula.campuspanamericana.com/_Cursos/Curso01623/Temario/MRehab_Cardiaca/MIT6Texto.pdf
 8. Balady GJ, Arena R, Sietsema K, Myers J, Coke L, Fletcher GF, et al. Clinician's Guide to Cardiopulmonary Exercise Testing in Adults. *Circulation*. 13 de julio de 2010;122(2):191-225.
 9. Sunjaya AP, Homaira N, Corcoran K, Martin A, Berend N, Jenkins C. Assessment and diagnosis of chronic dyspnoea: a literature review. *NPJ Prim Care Respir Med*. 8 de marzo de 2022;32:10.
 10. Stickland MK, Neder JA, Guenette JA, O'Donnell DE, Jensen D. Using Cardiopulmonary Exercise Testing to Understand Dyspnea and Exercise Intolerance in Respiratory Disease. *Chest*. junio de 2022;161(6):1505-16.
 11. Louvaris Z, Vogiatzis I. Physiological basis of cardiopulmonary rehabilitation in patients with lung or heart disease. *Breathe*. 3 de junio de 2015;11(2):120-7.
 12. Brunelli A, Charloux A, Bolliger CT, Rocco G, Sculier JP, Varela G, et al. ERS/ESTS clinical guidelines on fitness for radical therapy in lung cancer patients (surgery and chemo-radiotherapy). *Eur Respir J*. 30 de junio de 2009;34(1):17-41.
 13. Brunelli A, Kim AW, Berger KI, Addrizzo-Harris DJ. Physiologic Evaluation of the Patient With Lung Cancer Being Considered for Resectional Surgery: Diagnosis and Management of Lung Cancer, 3rd ed: American College of Chest Physicians Evidence-Based Clinical Practice Guidelines. *CHEST*. 1 de mayo de 2013;143(5):e166S-e190S.