

# PRUEBA DE EJERCICIO CARDIO-RESPIRATORIO PROGRESIVO

*Luis Puente Maestu, M<sup>a</sup> Carmen Juárez Morales, Elena Ojeda Castillejo*

## RESUMEN

La fatiga y la disnea de esfuerzo son síntomas muy frecuentes cuya presencia es percibida por muchos sujetos como una merma significativa de su calidad de vida. En la práctica clínica, es frecuente que lleven a investigaciones exhaustivas sin conclusiones definitivas para determinar el origen o, incluso, la existencia del síntoma. Las pruebas de esfuerzo clínicas, al hacer posible la reproducción de dichos síntomas en el laboratorio mientras se mide la respuesta fisiológica, permiten objetivar y cuantificar la intolerancia al ejercicio y detectar o descartar anomalías en los sistemas implicados. El principal interés clínico, y en ocasiones médico-legal, de las pruebas de ejercicio cardio-pulmonar (CPET) es que su uso apropiado simplifica el diagnóstico y evaluación de la intolerancia al esfuerzo. Otro aspecto interesante de las pruebas de esfuerzo es que determinadas variables tienen valor pronóstico, tanto con carácter general como específicamente en determinadas enfermedades respiratorias, como la EPOC, la hipertensión pulmonar primaria y la fibrosis quística. Las pruebas de esfuerzo son también la mejor forma para evaluar la seguridad y de prescribir correctamente el ejercicio en programas de entrenamiento en sujetos mayores de 45 años y en pacientes en programas de rehabilitación. En definitiva, las pruebas de esfuerzo permiten el seguimiento de intervenciones o la progresión de enfermedades.

## INTRODUCCIÓN

La mayoría de las actividades de la vida diaria requieren sólo una pequeña cantidad de esfuerzo muscular y no obligan a grandes exi-

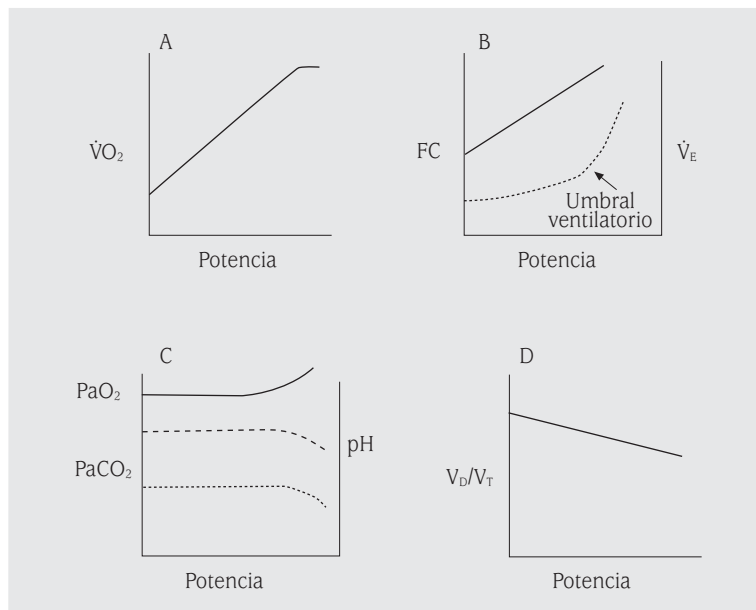
gencias a los sistemas respiratorio y cardiovascular. Ejemplos de estas actividades incluyen levantarse de una silla, asearse o andar a un ritmo moderado. Sin embargo, los ejercicios vigorosos, como correr, subir escaleras o completar una prueba de esfuerzo máximo, exigen una estrecha integración de los sistemas involucrados en el transporte de oxígeno, la generación de fuerza y el movimiento de las extremidades. La disfunción de cualquiera de estos sistemas deteriora la capacidad de ejercicio. Las pruebas de esfuerzo obligan a aumentar su función a los órganos que los componen, llevándolos a sus límites funcionales y así permiten poner en evidencia pérdidas de función que no son detectables en reposo.

En este capítulo, nos centraremos en la prueba de ejercicio cardio-pulmonar (CPET), pues a lo largo de los años se ha revelado como el formato que reúne el mejor compromiso entre información fisiológica y parsimonia. Describimos brevemente la respuesta normal, así como las respuestas anormales que se encuentran en las principales enfermedades que causan disnea. También hacemos una concisa descripción de nuestra propuesta de análisis de la prueba, que se basa fundamentalmente en los consensos internacionales<sup>(1,2)</sup> así como en el libro de los profesores Karlmann Wasserman y Briam Whipp y sus colaboradores de la UCLA, a quienes queremos rendir homenaje en estas páginas por su indispensable contribución en este campo<sup>(3)</sup>.

## PRINCIPIOS FISIOLÓGICOS

### Consumo máximo de oxígeno

El consumo de oxígeno ( $\dot{V}O_2$ ) es la cantidad de oxígeno por minuto que un ser vivo extrae



**FIGURA 1.** Patrón de respuesta al ejercicio en personas normales.  $\dot{V}O_2$ : consumo de oxígeno; FC: frecuencia cardiaca;  $\dot{V}_E$ : ventilación minuto;  $PaO_2$ : presión arterial de oxígeno;  $PaCO_2$ : presión arterial de anhídrido carbónico;  $V_D/V_T$ : fracción del espacio muerto sobre la ventilación.

de la atmósfera para satisfacer las necesidades metabólicas de sus tejidos. El consumo máximo de oxígeno ( $\dot{V}O_{2max}$ ) es una medida de la máxima capacidad de los sistemas de transporte de oxígeno a las células<sup>(1,2,4-6)</sup>. Para entender lo que determina este parámetro, tenemos que examinar los componentes de la ecuación de Fick:

$$\dot{V}O_2 = \dot{Q} \times (CaO_2 - CvO_2) \quad (1)$$

donde  $\dot{Q}$  es el gasto cardíaco y  $CaO_2$  y  $CvO_2$  los contenidos arterial y venoso de oxígeno, respectivamente ( $1,39 [Hb] SO_2 + 0,003 PaO_2$ , siendo  $[Hb]$  la concentración de hemoglobina y  $SO_2$  la saturación de oxígeno de la sangre).

La magnitud que alcance del  $\dot{V}O_{2max}$  depende de la capacidad funcional y la integración de varios sistemas<sup>(1,2,4-6)</sup>: 1) un intercambio de gases suficiente para mantener la saturación arterial de oxígeno ( $SaO_2$ ), incluyendo la adecuada ventilación para renovar el gas alveolar; 2) una capacidad normal de transporte de oxígeno por sangre, lo que básicamente depende de una hemoglobina sin alteraciones cualitativas ni cuantitativas; 3) un gasto cardíaco proporcionado a las demandas de oxígeno de los tejidos; y 4) una extracción

periférica ajustada a las necesidades metabólicas de los músculos, lo que, en parte, depende de la capacidad mitocondrial para utilizarlo y generar ATP. Aproximadamente, el 90% del oxígeno que se consume durante el ejercicio es utilizado por los músculos activos. El  $\dot{V}O_{2max}$  puede variar de individuo a individuo: Así, mientras que en un sujeto normal de unos 30 años de edad puede ser de 35-40  $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ , en un ciclista de élite como Miguel Indurain puede llegar a 85  $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ . Los pacientes con enfermedades cardíacas o respiratorias suelen tener un  $\dot{V}O_{2max}$  de 15  $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$  o incluso menor, lo que supone una importante limitación para realizar actividades normales de la vida diaria. El  $\dot{V}O_{2max}$  disminuye con la edad, aunque este declive se retrasa considerablemente en los sujetos físicamente activos<sup>(1,2,4-6)</sup>.

En circunstancias normales, el  $\dot{V}O_2$  aumenta en forma lineal con la potencia (Fig. 1A). En ocasiones, cuando un sujeto realiza un ejercicio máximo, se observa una meseta de  $\dot{V}O_2$ , indicativa de que el transporte de oxígeno ha alcanzado su límite pero, en otros muchos casos, se interrumpe el ejercicio por síntomas

sin alcanzar tal meseta<sup>(1,2,4-6)</sup>. El factor limitante, en estos sujetos sin enfermedades conocidas, parece ser la capacidad del sistema cardiocirculatorio<sup>(1,2,4-6)</sup>. Debido a que existe una relación lineal entre el  $\dot{V}O_2$  y la potencia, a veces se utiliza la potencia para cuantificar la capacidad aeróbica, pero debe tenerse en cuenta que la potencia máxima puede variar para un mismo  $\dot{V}O_{2max}$ , dependiendo de la velocidad del incremento de la carga en los protocolos progresivos<sup>(1,2,4-6)</sup>.

### Gasto cardíaco

También aumenta de forma lineal con la potencia, a expensas del incremento del volumen sistólico (SV) y de la frecuencia cardíaca (FC)<sup>(1,2,4-6)</sup>. El SV aumenta al comienzo del ejercicio, principalmente debido al incremento de la precarga por la movilización de la sangre estancada en los vasos venosos de las piernas, secundario al aumento del tono simpático que disminuye sensiblemente su distensibilidad<sup>(1,2,4-6)</sup>. Durante el ejercicio en posición vertical, la combinación de la contracción rítmica de los músculos y las válvulas venosas, actúan como una bomba enviando sangre a la vena cava que facilita la acción del corazón. La mayor parte del incremento del gasto cardíaco, sin embargo, se consigue elevando la FC, que lo hace de forma lineal con la potencia y el  $\dot{V}O_2$ <sup>(1,2,4-6)</sup> (Fig. 1B).

### Presión arterial sistémica

Durante el ejercicio, la resistencia vascular en los músculos activos disminuye drásticamente pero, para mantener la presión de perfusión de la circulación cerebral y coronaria hay un aumento reflejo de la resistencia en los lechos vasculares renal, espláncnicos y cutáneos que, sumado al aumento del gasto cardíaco, hacen que en personas normales la presión sistólica aumenta progresivamente con la intensidad del ejercicio<sup>(1,2,4-6)</sup>, a veces hasta alcanzar 200 mm Hg en el máximo esfuerzo, mientras que la presión diastólica disminuye ligeramente o no cambia<sup>(1,2,4-6)</sup>.

### Presión arterial pulmonar

La presión arterial pulmonar aumenta sólo ligeramente con el ejercicio máximo, debido a la capacidad de los pulmones sanos para reclutar y dilatar los vasos pulmonares en respuesta al aumento del flujo sanguíneo pulmonar y, por lo tanto, disminuir las resistencias vasculares<sup>(7)</sup>.

### Difusión

El reclutamiento capilar tiene dos consecuencias. Por un lado, aumenta la superficie efectiva de intercambio gaseoso de unos 28 m<sup>2</sup> a casi 120 m<sup>2</sup> y, por otro, trata de mantener bajo el tiempo de tránsito capilar de los hematíes<sup>(6-8)</sup>. Este fenómeno, junto al aumento del volumen medio pulmonar, induce un aumento de la difusión de oxígeno, lineal con el gasto cardíaco y con el  $\dot{V}O_2$ , que pasa de unos 30 ml · min<sup>-1</sup> · mmHg<sup>-1</sup> (10 mmol · min<sup>-1</sup> · kPa<sup>-1</sup>), en condiciones basales, hasta 70 ml · min<sup>-1</sup> · mmHg<sup>-1</sup> (23 mmol · min<sup>-1</sup> · kPa<sup>-1</sup>). En ejercicios máximos, se puede observar un incremento del gradiente alveolo-arterial, sobre todo en sujetos entrenados, pero no se aprecia desaturación (Fig. 1C). Por tanto, no parece que la difusión limite la capacidad máxima de oxígeno<sup>(6-8)</sup>.

### La ventilación minuto ( $\dot{V}E$ )

Los factores de los que depende la ventilación minuto se describen con la fórmula<sup>(5,6,9)</sup>:

$$\dot{V}E \text{ (BTPS)} =$$

$$863 \cdot \dot{V}CO_2 \text{ (STPD)} / [PaCO_2 \cdot (1 - V_D/V_T)]$$

Inicialmente, la  $\dot{V}E$  aumenta de forma lineal a medida que asciende el  $\dot{V}O_2$ , tanto a expensas de un aumento de la frecuencia respiratoria como del volumen corriente. En el umbral láctico, se produce un aumento de la tasa de excreción de CO<sub>2</sub> ( $\dot{V}CO_2$ ), al sumarse al producido metabólicamente el resultante del tamponamiento del lactato por el bicarbonato de la sangre (Fig. 1D). En este punto (umbral ventilatorio), la  $\dot{V}E$  sigue a la  $\dot{V}CO_2$ . Se produce una nueva inflexión cuando se agota el tampón y la única forma de neutralizar el lactato (ácido fijo) es reducir la carga de ácido volátil (ácido

carbónico), disminuyendo la concentración de CO<sub>2</sub> del organismo (hiperventilado). Este segundo punto se denomina punto de compensación ventilatoria<sup>(5,6,9)</sup>. El resultado es que la morfología de la ventilación sigue aproximadamente una curva exponencial creciente con el incremento de potencia (Fig. 1D)<sup>(5,6,9)</sup>. En el ejercicio máximo, la frecuencia respiratoria es normalmente de 30-40 respiraciones por minuto, mientras que el volumen corriente por lo general se eleva hasta suponer cerca del 60 % de la capacidad vital. En individuos normales, la  $\dot{V}_E$  máxima está, por lo general, muy por debajo de la máxima ventilación voluntaria (MVV). Algunos atletas, sin embargo, llegan a alcanzar una  $\dot{V}_E$  máxima igual o cercana a su MVV<sup>(1,5,6,9,10)</sup>.

### **Presión parcial arterial de oxígeno y dióxido de carbono**

Permanecen relativamente constantes hasta que se alcanza el umbral ventilatorio. En este punto, la presión arterial de oxígeno aumenta<sup>(5,11)</sup>. Con el desarrollo de acidosis metabólica, se produce un nuevo aumento de la PaO<sub>2</sub>, acompañado esta vez de una caída de la PaCO<sub>2</sub> (alcalosis respiratoria compensatoria)<sup>(5,11,12)</sup>.

### **pH arterial**

Se mantiene constante hasta que se agota la capacidad tampón del bicarbonato sanguíneo. Después, generalmente, empieza a descender, porque la hiperventilación no es suficiente para compensar completamente el desarrollo de acidosis metabólica<sup>(5,11,12)</sup> (Fig. 1C).

## **FUNDAMENTOS TÉCNICOS**

### **Calibración**

Los equipos deben ser calibrados a diario y antes de cada prueba. Si los analizadores son suficientemente lineales, es suficiente una calibración en dos puntos: aire (20,93 % de O<sub>2</sub> y 0,04 % de CO<sub>2</sub>) y un gas con 15-16 % de O<sub>2</sub> y 5 % de CO<sub>2</sub>. Para la calibración del medidor de flujo, se usan jeringas calibradas de 3 litros.

Es importante disponer de un registro de las calibraciones (lo proporcionan la mayoría de los *software*) así como recopilar todas las incidencias del equipo de medición<sup>(13,14)</sup>.

### **Muestras arteriales**

En las pruebas de ejercicio realizadas para la evaluación de la disnea, muchas veces es necesario tomar muestras de sangre arterial para realizar una gasometría. Para ello, o bien se coloca un catéter intra-arterial o bien se realizan dos punciones, una basal (preferiblemente con la mascarilla o pieza bucal puestas) y otra unos segundos antes de alcanzar el ejercicio máximo<sup>(13,14)</sup>.

### **Personal**

En la mayoría de las circunstancias, la CPET puede ser realizada por un técnico con la presencia del médico. Ambos deben estar familiarizados con la fisiología del ejercicio, de forma que identifiquen las respuestas normales y las anormales<sup>(13,14)</sup>.

### **Seguridad**

Las pruebas de esfuerzo son bastante seguras. En una encuesta que incluía más de 500.000 pruebas de esfuerzo realizadas en 1.375 centros, se declararon un 0,36% de infartos, un 0,48% de arritmias graves y 1 muerte por cada 5.000 pruebas. El total de complicaciones graves fue de 8,86 por 10.000 pruebas. Para reducir el riesgo, se deben conocer los antecedentes cardiorrespiratorios y los factores de riesgo coronario de los pacientes y todos los sujetos sometidos a una CPET deben disponer de un ECG de 12 derivaciones en reposo. Obviamente, se deben respetar las contraindicaciones de la prueba (Tabla 1). En sujetos con riesgo cardiovascular alto (prácticamente todos los pacientes mayores de 45 años), es recomendable la presencia de un médico, un adecuado entrenamiento del técnico y del médico en reanimación cardio-pulmonar (RCP) y la disponibilidad de medios para RCP avanzada o de un procedimiento definido de acceso rápido a la misma<sup>(13-15)</sup>.

**TABLA 1. Circunstancias en las que se debe detener una prueba de esfuerzo**

1. Síntomas y signos generales
  - 1.1. Dolor torácico sugestivo de angina
  - 1.2. Disnea grave
  - 1.3. Vértigo
  - 1.4. Confusión mental o falta de coordinación
  - 1.5. Aparición brusca de:
    - Palidez extrema
    - Sudoración fría
    - Cianosis
2. Signos electrocardiográficos
  - 2.1. Extrasistolia ventricular (más de 6/ minuto o racha de 3)
  - 2.2. Fibrilación auricular que no existía en reposo
  - 2.3. Bloqueo A-V de 2º o 3º grado
  - 2.4. Cambios sugestivos de isquemia miocárdica
  - 2.5. Aparición de bloqueo de rama interventricular
3. Alteraciones de la presión arterial (PA)
  - 3.1. Toda disminución del valor basal de PA
  - 3.2. Disminución de la PA sistólica > 20 mmHg, tras el incremento inicial
  - 3.3. PA sistólica > 300 mmHg o PA diastólica > 140 mm Hg

### Información

El paciente debe ser informado de forma clara sobre las características de la prueba, los beneficios y riesgos, las alternativas, sus responsabilidades, sobre la confidencialidad de los resultados y quién va a tener acceso a ellos, si a los datos se les van a dar usos distintos a los clínicos y sobre la libertad de preguntar o de negarse sin que se deriven perjuicios. Además, es importante indicarle que si se presentan ciertos síntomas, debe avisar inmediatamente al responsable de la prueba para interrumpirla. Es necesario un consentimiento por escrito.

### DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO

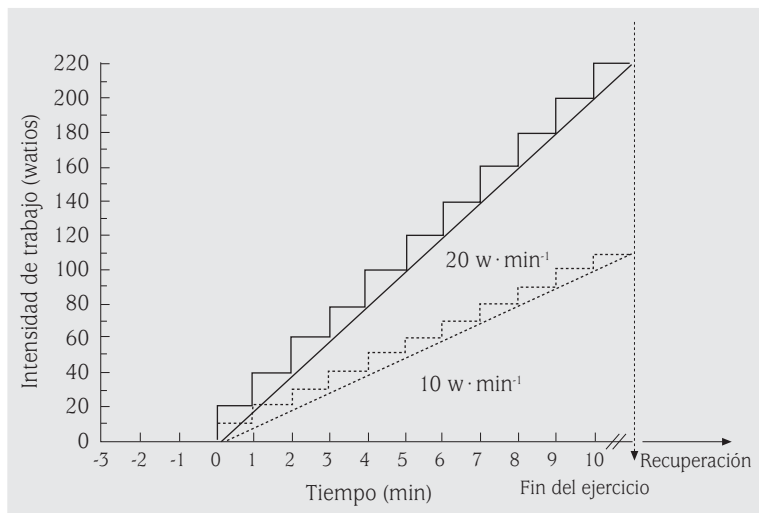
#### Pruebas progresivas máximas

Pueden realizarse tanto en una bicicleta ergométrica (Fig. 2) o en un tapiz rodante y se consideran las pruebas estándar para el análisis de la respuesta al ejercicio. Normalmente, tras realizar mediciones en reposo durante aproximadamente 3 minutos, viene una fase de calentamiento que consiste en pedalear sin carga o andar a baja velocidad ( $1-2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) y 0% de pendiente, para permitir al sujeto acomodarse al equipo. En caso de utilizar un ciclo-ergómetro, se debe instar al paciente para que mantenga una frecuencia de pedaleo constante, entre 50 y 70  $\text{min}^{-1}$ . Inmediatamente después, comienza la fase de ejercicio en la que la carga se aumenta de 10-30 w o la pendiente un 2-3% a 3-5  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  cada minuto (o si el sistema lo permite, de forma continua) hasta que el paciente pare por síntomas, no pueda mantener la marcha o un pedaleo superior a 40  $\cdot \text{min}^{-1}$  o hasta que aparezcan algunas de las circunstancias enumeradas en la tabla 2. Finalmente, hay una fase de recuperación, de un mínimo de tres minutos de duración, en la que se debe seguir registrando datos, especialmente la monitorización cardiaca y la tensión arterial<sup>(1,2,4,14,16,17)</sup>.

#### Pruebas de potencia constante

El sujeto realiza el esfuerzo a una potencia constante durante un periodo de tiempo. La potencia puede ser inferior al umbral láctico (intensidad ligera o moderada) o estar por encima del mismo (intensidad elevada). Las aplicaciones fundamentales de estos protocolos son la valoración de la tolerancia al esfuerzo submáximo o para inducir broncoespasmo (intensidad elevada)<sup>(1,2,4,14,18)</sup>.

Otros usos son las mediciones de la cinética de la respuesta al ejercicio, el gasto cardíaco, la respuesta de los senos carotídeos al oxígeno, la titulación de oxígeno u otras medidas que requieran una situación fisiológica estable por un cierto tiempo (intensidad baja)<sup>(1,2,4,14,18)</sup>.



**FIGURA 2.** Esquema del protocolo de carga en una prueba progresiva.

## PRINCIPALES PARÁMETROS Y SU SIGNIFICADO

### Consumo o captación máxima de oxígeno

También se define como capacidad aeróbica máxima. En el contexto clínico, es el mayor valor de  $\dot{V}O_2$  que se alcanza en una prueba progresiva limitada por síntomas. En sistemas con cámara de mezcla, es el máximo valor recogido en los últimos 30 segundos. Cuando la medición se hace respiración a respiración, es recomendable utilizar un método de promediado. Aunque el promediado por respiraciones parece más racional, la experiencia adquirida se ha obtenido con promediados por tiempo, y la recomendación de la ATS es promediar cada 30 s<sup>(1,2)</sup>. Como esto neutraliza las ventajas del uso de sistemas respiración-a-respiración, es razonable hacer promedios de 20 o 10 segundos. Si hacemos esto, hay que eliminar las respiraciones anómalas (+3 desviaciones estándar la tendencia media). Muchos aparatos llevan sistemas de filtros para obtener una señal fiable y, antes de analizar el estudio, se debe evaluar detenidamente la posibilidad de respiraciones espurias, ya que la mayoría de los equipos ponen los valores máximos en la hoja de análisis, aunque sean valores fuera de rango.

Las unidades SI del  $\dot{V}O_2$ , son los  $\text{mmol} \cdot \text{s}^{-1}$ , pero habitualmente se mide en  $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$  ( $\sim 16,7 \text{ mmol} \cdot \text{s}^{-1}$ ). En ocasiones, se estandariza por peso o referido a un valor arbitrario llamado MET o *metabolic unit* ( $\text{MET} = 3,5 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ), pero la estandarización por peso es difícil de interpretar en sujetos obesos, por lo que la mejor manera de valorar el  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  es compararlo con los valores de referencia, cuya variabilidad es del 5-7% en poblaciones habituales<sup>(1,2,4,5,19)</sup>. Si se utilizan valores de referencia, es preciso tener en cuenta que las muestras de las que se derivan no suelen incluir extremos de edad ni de estatura.

Se considera que el  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  está significativamente disminuido cuando alcanza valores inferiores al 80% del valor teórico. Cifras por debajo del 71% representan descensos moderados y, por debajo del 50%, importantes<sup>(20,21)</sup>.

### Relación $\dot{V}O_{2\text{max}}$ -potencia

Su valor oscila entre 9 y 11  $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ , manteniéndose notablemente constante. Aunque tiene algún valor en la interpretación, su principal utilidad radica en la detección de errores técnicos<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>. Si está fuera del rango mencionado, es posible que la potencia o el consumo de oxígeno no se estén midiendo bien.

**TABLA 2. Contraindicaciones de las pruebas de esfuerzo**

**Absolutas**

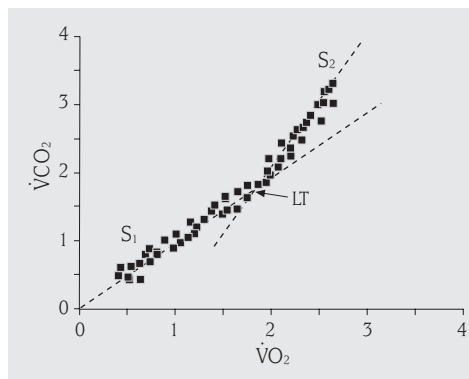
- IAM reciente(3-5 días)
- Angina inestable
- Arritmias no controladas que produzcan compromiso hemodinámico
- Endocarditis activa
- Miocarditis o pericarditis aguda
- Estenosis aórtica grave sintomática
- Fallo cardiaco incontrolado
- TEP agudo
- Enfermedad febril aguda
- Trombosis de extremidades inferiores

**Relativas**

- Estenosis valvular cardiaca moderada
- Alteraciones electrolíticas
- HTA no tratada (PAS > 200 mmHg o PAD > 120 mmHg)
- Hipertensión pulmonar
- Taquiarritmias o bradiarritmias
- Cardiopatía hipertrófica
- Falta de cooperación
- Bloqueo A-V grave

**$\dot{V}O_2$  en el umbral del ácido láctico ( $\dot{V}O_2 \theta_l$ )**

Corresponde al nivel de esfuerzo por encima del cual se produce un incremento sostenido en la concentración de ácido láctico en sangre arterial. El  $\theta_l$  marca dos situaciones bien diferentes de ejercicio. Por debajo, el ejercicio se puede tolerar durante períodos prolongados. Por el contrario, si se realiza ejercicio por encima del umbral de ácido láctico, inexorablemente aparece la fatiga muscular en más o menos tiempo. También sirve como referencia del nivel de ejercicio que se debe prescribir en programas de entrenamiento para obtener efectos fisiológicos. Se dispone de diversos métodos para determinar el umbral láctico<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>:



**FIGURA 3.** Método de la *V-slope* para calcular el umbral láctico.

**Métodos invasores**

Mediante la medición directa de lactato o el bicarbonato en sangre arterial o venosa arterializada<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

**Método de la “V-Slope”**

Tras unos dos minutos de ejercicio, en los que se acumula  $CO_2$  en el organismo, la relación  $\dot{V}CO_2 - \dot{V}O_2$  se acerca de forma bastante consistente a una pendiente de 1 ( $S_1$ ) en sujetos que no estén en ayuno prolongado. Cuando se comienza a acumular el ácido láctico, la pendiente se hace más acusada ( $S_2$ ) debida al  $CO_2$  añadido por el tamponamiento del ácido láctico. En una prueba en la que la potencia aumente de forma apropiada para las características físicas del sujeto, suele ser fácil identificar el punto ajustando dos líneas rectas (Fig. 3)<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

**Método de los equivalentes ventilatorios**

Coincidiendo con el aumento de la tasa de tamponamiento de ácido láctico se produce una hiperpnea secundaria al exceso  $CO_2$  que podemos identificar porque la  $\dot{V}E$  se despega de la  $\dot{V}O_2$  pero no de la  $\dot{V}CO_2$ . Esto determina el aumento del equivalente ventilatorio de  $O_2$  mientras que el de  $CO_2$  sigue bajando o permanece estable<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

Si el  $\dot{V}O_2 \theta_l$  es inferior al 40% suele deberse a una enfermedad significativa. Valores entre



40-50 % pueden ser atribuidos a problemas cardíacos o musculares incipientes o a la falta de entrenamiento.

### Tiempo de respuesta medio de la captación de oxígeno (MRT)

Al iniciar un ejercicio constante, el  $\dot{V}O_2$  aumenta con un patrón monoexponencial, según el cual en 1 MRT se alcanza el 63 % de la respuesta y en 4 MRT's el 98 %. Para poder medir el MRT, se realiza una prueba constante de baja intensidad de 6-10 minutos de duración y se necesita un *software* de ajuste exponencial como el que presentan algunos sistemas o exportar el archivo a un programa de gráficos. Un adulto joven sano tiene un MRT entre 30 y 40 s, sujetos mayores y enfermos pueden tener valores de 50 s o superiores. Cambios de más de 10 segundos en el MRT son significativos<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

### Cociente de intercambio respiratorio

Es la relación entre la  $\dot{V}CO_2$  y el  $\dot{V}O_2$ . En reposo, suele alcanzar valores entre 0,75 y 0,95. En ejercicio poco o moderadamente intenso, tras un periodo de unos dos minutos en el que se acumula  $CO_2$  en los depósitos del organismo, se aproxima a 1, para superar 1 cuando se alcanza el  $\theta_L$ . Valores sostenidos  $< 0,7$  o  $> 1$  en reposo indican mal funcionamiento del sistema<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

### Frecuencia cardiaca máxima ( $FC_{max}$ )

Es el mayor número de latidos por minuto que se llega a alcanzar en una prueba progresiva limitada por síntomas. Se puede obtener del monitor de ECG o por métodos telemétricos. Se evalúa comparándola con los valores teóricos ( $220 - edad \pm 10$  lpm). Cuando la limitación al ejercicio no sea de origen cardiovascular, la  $FC_{max}$  estará a más de 15 lpm del valor teórico.

### Pendiente $FC/\dot{V}O_2$

Sigue una relación lineal que puede definirse como  $(FC_{max} - FC_{reposito}) / (\dot{V}O_{2max} - \dot{V}O_2 \text{ reposo})$ . Sus valores son 42-43 latidos<sup>-1</sup> en varones y

63-71 latidos<sup>-1</sup> en mujeres. El gráfico de  $FC/\dot{V}O_2$ , particularmente si tiene dibujadas las líneas de los máximos de ambos, proporciona una excelente impresión visual de si la FC aumenta adecuadamente en relación al  $\dot{V}O_2$ <sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

### Pulso de oxígeno ( $\dot{V}O_2/FC$ ) y volumen sistólico

Es una medida de la eficiencia cardiovascular. A diferencia de la pendiente  $FC/\dot{V}O_2$ , es un valor instantáneo. El valor de referencia se obtiene de los máximos predichos de  $\dot{V}O_2$  y FC con un límite inferior del intervalo de confianza de  $4 \text{ ml} \cdot \text{latido}^{-1}$ . Se registra un pulso de oxígeno bajo en pacientes con problemas cardíacos o con anemia, carboxihemoglobine-ma o hipoxemia. En raras ocasiones, un pulso de oxígeno disminuido es debido a problemas de extracción periférica (miopatías). El pulso de oxígeno está elevado en sujetos entrenados o tratados con betabloqueantes. Del puso de oxígeno máximo, se puede estimar el volumen sistólico máximo ( $SV_{max}$ ) con determinadas asunciones, que en personas sedentarias corresponde a  $8,3 \cdot \dot{V}O_2 / FC$ . El SV basal suele estar en 70-90 ml y subir a 100-120 con ejercicio<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

### Electrocardiograma (ECG)

La monitorización del ECG de tres derivaciones es necesaria. Es recomendable el registro de 12 derivaciones en sujetos de riesgo cardiovascular elevado (muchos de los pacientes)<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

### Presión arterial sistémica

Se mide manualmente o con un esfigmomanómetro automático. La normal es que el ejercicio origine un incremento de la presión arterial sistólica de 50-70 mmHg y un ligero descenso de la presión diastólica (si el ejercicio es de miembros inferiores). La respuesta hipertensiva (presión sistólica  $> 200$  mmHg) es un factor de riesgo para el desarrollo de hipertensión arterial. Una presión arterial superior a 240/115 mmHg se considera indicación para interrumpir la prueba. Una caída



de la presión arterial sistólica superior a 20 mmHg, si se verifica, indica disfunción cardíaca<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

### Ventilación máxima ( $\dot{V}E_{\max}$ )

Es el mayor valor de ventilación que puede medirse en una prueba máxima. Se debe utilizar la misma técnica de promediado que con el  $\dot{V}O_{2\max}$ . Se mide en  $L \cdot \text{min}^{-1}$ . Se suele comparar con la ventilación voluntaria máxima (MVV) en 12-15 s o estimada a partir del  $FEV_1$ , habitualmente multiplicándolo por 35 o 40. Rara vez un individuo normal supera el 85 % de su MVV o para el ejercicio con una reserva ventilatoria menor de  $11 L \cdot \text{min}^{-1}$ <sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

### Volumen corriente ( $V_T$ )

Es el volumen de una sola respiración. En las pruebas de esfuerzo, se mide como volumen espirado en litros. Es preciso hacer notar que el  $V_T$  se ve afectado por el espacio muerto del aparato. En las pruebas máximas, suele aumentar hasta un valor igual al 50-60 % de la capacidad vital. Aunque en reposo, sobre todo al principio, pueda fluctuar, en ejercicio tiende a ser más regular. Un patrón errático persistente suele ser manifestación de ansiedad y, con frecuencia, se asocia a hiperventilación. En pacientes con enfermedades respiratorias, el  $V_T$  suele estar disminuido<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

### Frecuencia respiratoria (FR)

Es el número de respiraciones por minuto, que se mide en  $\text{min}^{-1}$ . Salvo en atletas, en sujetos sanos, normalmente alcanza 30-40  $\text{min}^{-1}$  y raramente excede los 50  $\text{min}^{-1}$ . Una frecuencia respiratoria superior sólo se registra en enfermedades restrictivas o en trastornos de ansiedad<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

### Relación entre tiempo inspiratorio y tiempo espiratorio ( $T_I/T_E$ )

Normalmente es superior a 0,8, tanto en reposo como en ejercicio. Se acorta en las alteraciones ventilatorias obstructivas<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

### Equivalentes ventilatorios ( $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ y $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ )

Dependen tanto del espacio muerto como de la hiperventilación. En ausencia de esta última, son una medida indirecta de la eficiencia ventilatoria. En condiciones normales, los  $\dot{V}E/\dot{V}O_2$  y  $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$  mínimos deben ser menores de 30 y 33, respectivamente. Su aumento se relaciona con problemas cardíacos o respiratorios<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

### Pendiente $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$

Tiene el mismo significado que un equivalente ventilatorio de  $CO_2$  alto. Si es superior a 35, es un factor pronóstico negativo en insuficiencia cardíaca crónica e hipertensión pulmonar primaria<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

### Presiones de gases arteriales ( $PaO_2$ y $PaCO_2$ )

La  $PaO_2$  tiende a mantenerse constante o a aumentar durante el ejercicio, por el incremento de la presión alveolar de  $O_2$ , al aumentar el cociente de intercambio respiratorio o durante la alcalosis respiratoria compensadora. La  $PaCO_2$  es similar a la basal mientras no se produzca acidemia láctica, que suele compensarse con hiperventilación. La elevación de la  $PaCO_2$  (o la ausencia de hiperventilación cuando hay acidemia láctica) pueden apreciarse en pacientes con EPOC moderada-grave y, alguna vez, en los trastornos de la respuesta de los centros respiratorios. También puede ocurrir cuando se parte de una hiperventilación basal por ansiedad o dolor<sup>(1,2,4,5,19-21)</sup>.

### Diferencia alveolo-arterial de oxígeno [ $D(A-a)O_2$ ]

Es un índice de la eficiencia del intercambio de oxígeno. Su valor en reposo varía con la edad, ya que  $D(A-a)O_2 = (0,33 \cdot \text{edad}) - 2 \pm 5$ , y aumenta aproximadamente un 20 % en el ejercicio máximo. En ejercicio, no suele superar los 35 mmHg, salvo en atletas. Su aumento es característico de cardiopatías con cortocircuito derecha-izquierda o de enfermedades pulmonares. Suelen identificarse

aumentos llamativos del gradiente alveolo-arterial de oxígeno en ejercicio en procesos con marcada afectación vascular pulmonar (tanto en enfermedades intersticiales como vasculares) o *shunt*. En algunos sujetos obesos o con afectación de la pequeña vía aérea, se observa una disminución (mejora) con el ejercicio de la  $D(A-a)O_2$ <sup>(1,2,4,5,19,21)</sup>.

### Relación espacio muerto-volumen corriente ( $V_D/V_T$ )

Su valor estimado, como hacen algunos sistemas, tiene poca utilidad. La única manera de medirlo correctamente es con gasometría arterial simultánea. El límite superior del rango de referencia es 0,45 en reposo, 0,33 en el  $\theta_L$  y 0,3 en ejercicio máximo. Hay un valor de referencia para ejercicio máximo =  $0,4 \cdot \text{edad} \pm 0,07\%$ . Es un parámetro sensible pero inespecífico, que se afecta en muchos procesos y con la taquipnea excesiva ( $> 50 \text{ resp} \cdot \text{min}^{-1}$ )<sup>(1,2,4,5,19,21)</sup>.

### Lactato ( $La$ ) y amonio ( $NH_3$ )

El lactato en reposo está entre 0,5 y 2,2  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  y con el ejercicio aumenta hasta 4,5-10  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ . El momento de la extracción debe estandarizarse porque la concentración sigue elevándose durante los 2 minutos siguientes a finalizar el ejercicio. Si no aumenta con el ejercicio, es indicativo de poco esfuerzo o enfermedad de McArdle. Un aumento excesivo ( $> 7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) asociado a un  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  bajo sugiere enfermedad cardiovascular. Su monitorización seriada permite detectar el  $\theta_L$  en casos en que sea necesario y no se pueda hacer indirectamente. Una concentración de amonio en el ejercicio superior a 200  $\mu\text{g} \cdot \text{dl}^{-1}$  (120  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), particularmente a potencias bajas, es sugestivo de miopatía mitocondrial<sup>(6)</sup>.

### Puntuación de síntomas

Aunque la escala de Borg se diseñó para medir la intensidad de esfuerzo percibido y no para medir la disnea, una modificación de la misma se usa extensivamente para este fin. También se emplean escalas visuales analó-

gicas (VAS). En la escala de Borg, la disnea suele llegar a 6-8 (50-90 mm en la VAS) en el esfuerzo máximo. Valores de 9-10 son raros y sugieren una percepción exagerada de los síntomas. La fatiga de piernas se mide igual. Aunque el enfermo indique que es la causa limitante del esfuerzo, suele puntuarla con valores algo más bajos (4-7) en la escala de Borg<sup>(1,2,5,19,20)</sup>.

## INTERPRETACIÓN DE LA PRUEBA DE ESFUERZO

### Metodología

A diferencia de otras pruebas de laboratorio, en las que normalmente se evalúan en función de un único índice y de su intervalo de confianza, la interpretación de la prueba de esfuerzo requiere el análisis simultáneo de varios índices y patrones gráficos. Se parece más a la interpretación de una radiografía y esto hace que se requiera una cierta experiencia y un profundo conocimiento de la fisiología y fisiopatología del ejercicio, lo que hasta la fecha limita su popularidad<sup>(1-4,20,21)</sup>.

Para el análisis de la prueba es conveniente disponer de diversa información, parte de la cual no se recoge directamente en la misma prueba, por lo que es conveniente seguir un método. Nosotros recomendamos los siguientes pasos<sup>(1-4,20,21)</sup>: 1) *Razón de la prueba*. Quien interprete la prueba debería conocer los motivos para hacerla y disponer de un resumen de la historia clínica, con síntomas, datos de función respiratoria y un ECG. Si se dispone de ciertos parámetros sanguíneos (gasometría basal, hemoglobina o carboxihemoglobina) también debieran considerarse; 2) *Calidad técnica*. En cada prueba, se debe comprobar que la calibración y las variables antropométricas son correctas y que no se han registrado parámetros con valores extraños o imposibles, también si hay irregularidades en la respiración o frecuencia cardiaca que hayan influido en que los valores máximos que proporciona el informe del sistema sean artefactos; 3) *Parámetros de capacidad aeróbica*. Un  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  y un  $\dot{V}O_2$   $\theta_L$  por encima del límite inferior de normali-

dad indican una capacidad aeróbica normal; 4) *Respuesta cardiovascular*. Deben establecerse si hay evidencia de limitación cardiovascular o si hay alternaciones del patrón de respuesta cardiovascular. La limitación cardiovascular sin alteración de la capacidad aeróbica puede ser normal; 5) *Respuesta ventilatoria*: se debe identificar si hay evidencia de limitación ventilatoria y si hubiera trastornos del patrón ventilatorio; 6) *Intercambio de gases*. Cuando se considera apropiado hacer gasometría de esfuerzo, las anomalías de la  $D(A-a)O_2$  indican problemas parenquimatosos o vasculares pulmonares y el cociente  $V_b/V_T$  es un marcador sensible de disfunción, pero no permiten discernir entre procesos que afectan a los pulmones o la taquipnea por ansiedad<sup>(1-4,20,21)</sup>; 7) *Metabolismo muscular*. Si se sospechen alteraciones musculares, puede tener sentido medir la CPK basal y el La y amonio en ejercicio; 8) *Percepción de síntomas*. Permite identificar la causa de finalización y si los síntomas son apropiados; 9) *Análisis de los gráficos*. Tanto la representación de nueve como de ocho gráficos son útiles para detectar errores, hacerse idea de los patrones de cambio y de los niveles alcanzados de las variables ( $\dot{V}_E$ ,  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ , R, FC,  $V_T$ ,  $PE_{T}O_2$  y  $PTCO_2$ , equivalentes, pulso de oxígeno); y 10) *Conclusiones*, tratando de responder a la cuestión que motivó la prueba. Mi recomendación es no utilizar jerga, atenernos a lo que podemos concluir con seguridad y ser resolutivo evitando los subjuntivos y las conclusiones de suma 0 (“podría ser esto pero no puedo descartar lo contrario”) desgraciadamente tan frecuentes en los informes de pruebas complementarias.

## Patrones

### **Limitación cardiocirculatoria**

Se considera que existe cuando el sujeto alcanza un valor de frecuencia cardiaca que supera el límite inferior del intervalo de confianza de la ecuación de predicción (15 latidos  $\cdot$  min<sup>-1</sup> por debajo del valor predicho). Si se acompaña de un  $\dot{V}O_{2max}$  normal o alto, es la causa esperable de limitación en sujetos sanos. Si se asocia

a un  $\dot{V}O_{2max}$  bajo, es indicativo de limitación cardiocirculatoria. El conocimiento de si el paciente tiene anemia o carboxihemoglobinemia alta ayudará a definir mejor el origen de la limitación. La puntuación de síntomas también es útil para interpretar si el origen es central o periférico<sup>(1,3,4,21,22)</sup>.

### **Patrón de respuesta cardiovascular anormal**

Una relación  $FC/\dot{V}O_2$  elevada y pulso de oxígeno bajo sugieren el origen cardiovascular, aunque en cierta medida este patrón también se detecta en el desentrenamiento. También permite identificar las formas de limitación circulatoria con FC baja por betabloqueantes, enfermedad del seno o en trasplantados de corazón. Algunos patrones específicos como el pulso de oxígeno que disminuye tras aumentar o descenso tras una elevación inicial de la tensión arterial indican disfunción sistólica relacionada con el ejercicio<sup>(1,3,4,21,22)</sup>.

### **Limitación ventilatoria**

Se considera que ocurre cuando el sujeto llega a más del 85% o a menos de 11 respiraciones  $\cdot$  min<sup>-1</sup> de su MVV. Indica enfermedad respiratoria, salvo si se trata de atletas de élite<sup>(1,3,4,21,22)</sup>.

### **Patrón de respuesta ventilatoria anormal**

Se debe valorar la eficiencia ventilatoria (equivalente de  $CO_2$ , relación  $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$  espacio muerto) y el patrón ventilatorio (fundamentalmente, el  $V_T$ , la FR y el  $T_i/T_E$ ). Un  $V_T$  inferior al 50% de la capacidad vital teórica es anormal, pero no discrimina entre restricción y obstrucción. Aparentemente, un  $V_T > 70\%$  de la capacidad inspiratoria o una  $FR > 50$  min<sup>-1</sup> diferencia los pacientes restrictivos de los obstructivos, aunque las pruebas funcionales en reposo son mejores para distinguir entre ambos tipos de alteraciones ventilatorias<sup>(1,3,4,21,22)</sup>.

### **Anomalías del control respiratorio**

La hiperventilación por ansiedad se manifiesta normalmente por irregularidades del patrón ventilatorio o taquipnea superficial, que

TABLA 3. Indicaciones de la prueba de ejercicio cardiopulmonar en Neumología

1. Valoración de la tolerancia al ejercicio y de los factores limitantes del mismo
  - 1.1. Objetivación de la limitación de la capacidad de esfuerzo
  - 1.2. Análisis de los factores limitantes de la capacidad de esfuerzo
  - 1.3. Distinción entre disnea de origen respiratorio o cardiaco
  - 1.4. Estudio de una disnea no explicable por las pruebas en reposo
2. Valoración funcional y pronóstica y detección de alteraciones que se producen o empeoran acusadamente con el ejercicio en enfermedades pulmonares crónicas
  - EPOC
  - Enfermedades intersticiales
  - Fibrosis quística
  - Hipertensión pulmonar primaria
3. Valoración de la discapacidad en enfermedades respiratorias
4. Prescripción de ejercicio en rehabilitación
5. Diagnóstico de broncoespasmo inducido por esfuerzo
6. Valoración pre- y postoperatoria en el trasplante pulmonar
7. Valoración preoperatoria en la cirugía resectiva pulmonar
8. Valoración de los efectos de intervenciones terapéuticas

tienden a desaparecer cuando el ejercicio se hace moderado, lo que se identifica por una elevación de la  $PETCO_2$ , partiendo de valores bajos en reposo y una elevación de la  $PaCO_2$  con respecto a la cifra de reposo, a veces a pesar de acidemia metabólica. También suele encontrarse una percepción exagerada de la disnea ( $> 8$  en la escala de Borg). La hipoventilación se aprecia en trastornos importantes de la mecánica pulmonar o anomalías del control de la respiración<sup>(1,3,4,21,22)</sup>.

### **Alteraciones del intercambio de gases**

Se identifican determinando la eficiencia ventilatoria (equivalentes, relación  $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$  espacio muerto), la  $PaO_2$  y la  $D(A-a)O_2$ . En sujetos en los que las cardiopatías congénitas son poco probables, el deterioro marcado de la  $D(A-a)O_2$  sugiere procesos con afectación vascular pulmonar como el enfisema, las enfermedades intersticiales y vasculares pulmonares. Además, en estas últimas, se pueden identificar signos de limitación circulatoria o un patrón cardiovascular anormal<sup>(1,3,4,21,22)</sup>.

### **Esfuerzo subóptimo**

Es razonable pensar que el paciente no ha llegado a sus límites fisiológicos cuando la capacidad aeróbica máxima medida es baja y no son evidentes otras anomalías. Si además se acompaña de un  $\dot{V}O_{2L} > 40\%$  es muy probable que haya finalizado el ejercicio sin alcanzar sus límites. La impresión de colaboración del sujeto y la disnea y cansancio de piernas alcanzados también pueden ayudar a distinguir la falta de colaboración<sup>(1,3,4,21,22)</sup>.

### **APLICACIÓN CLÍNICA DE LAS PRUEBAS DE ESFUERZO**

Como hemos mencionado al inicio del capítulo, las aplicaciones en Neumología de las pruebas de ejercicio cardiopulmonar son múltiples (Tabla 3)<sup>(1,4,23,24)</sup>:

#### **Evaluación de síntomas desproporcionados**

En algunos casos, es necesario objetivar y analizar las causas de la intolerancia al ejercicio, particularmente cuando los pacientes tienen unos síntomas desproporcionados a

las pruebas en reposo. Se piensa en un origen multifactorial (por ejemplo, un 20% de los pacientes con sarcoidosis y disnea tienen limitación circulatoria) y es clínicamente importante identificar la contribución de cada sistema o cuando no se ha alcanzado la mejoría de la disnea esperable con el tratamiento<sup>(1,4,23,24)</sup>.

### Valoración del deterioro en las enfermedades pulmonares crónicas

#### *Enfermedad pulmonar obstructiva crónica*

El  $\dot{V}O_{2\max}$  y la caída de la frecuencia cardíaca en el primer minuto tienen un valor pronóstico de mortalidad independientemente de las variables de función pulmonar. También permite detectar hipoxemia inducida por el ejercicio y determinar el nivel de esfuerzo al que ocurre. Están indicadas también en la evaluación previa a la rehabilitación<sup>(1,2,4,23-26)</sup>.

#### *Enfermedades intersticiales*

En estas enfermedades, las CPET permiten detectar hipoxemia significativa y potencialmente peligrosas para el paciente y el nivel de esfuerzo al que se producen. En fases precoces, el deterioro del intercambio de gases durante el ejercicio puede ser la única alteración identificada<sup>(1,2,4,23,24)</sup>.

#### *Enfermedades pulmonares vasculares*

Pueden ser útiles para evaluar la respuesta al tratamiento y establecer el pronóstico (clase funcional)<sup>(1,2,4,23,24,27)</sup>.

#### *Fibrosis quística*

Existen estudios que demuestran que la prueba de esfuerzo proporciona variables con capacidad pronóstica en estos pacientes<sup>(1,4,23,24,28)</sup>.

### Valoración de discapacidad

Aunque la legislación vigente permite el uso de pruebas de función respiratoria en reposo (espirometría y difusión de CO), también incluye al  $\dot{V}O_{2\max}$  (RD 1971/1999, de 23 de diciembre, de procedimiento para el reconocimiento, declaración y calificación del grado de

*minusvalía*). Además, el  $\dot{V}O_{2\max}$  es un estimador más válido para determinar si la colaboración del sujeto ha sido buena<sup>(1,4,23,24,28)</sup>.

### Programas de rehabilitación

Las pruebas de esfuerzo son fundamentales para establecer la seguridad del entrenamiento, para la correcta prescripción del ejercicio y en la evaluación de los resultados<sup>(1,2,4,23,24,27,29)</sup>.

### Broncoconstricción inducida por el ejercicio

Aparece hasta en un 80% de los pacientes diagnosticados de asma bronquial. Sin embargo, su indicación se restringe a niños, a sujetos con sospecha de asma en lo que no se presente otra sintomatología o a personas asmáticas cuyos trabajos exijan una gran demanda física, como militares, bomberos, etc.<sup>(1,2,4,23,24,27)</sup>.

### Valoración preoperatoria en la cirugía de resección pulmonar

Las pruebas de esfuerzo ayudan a decir la operabilidad de los pacientes con riesgo elevado y se consideran actualmente el estándar en la valoración preoperatoria de la cirugía con resección pulmonar<sup>(1,2,4,23,24,27,30,31)</sup>.

### Valoración pre- y postoperatoria en el trasplante cardio-pulmonar

Las pruebas de esfuerzo ayudan a decidir la indicación del trasplante y también permiten indicar y seguir la rehabilitación previa. En el postoperatorio, son útiles para evaluar los resultados funcionales del trasplante<sup>(1,2,4,23,24,27)</sup>.

**Valoración de intervenciones terapéuticas** sobre la disnea, la hipertensión pulmonar o la hiperinsuflación dinámica en el ejercicio<sup>(1,2,4,18,23,24,27,29)</sup>.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ATS/ACCP Statement on cardiopulmonary exercise testing. Am J Respir Crit Care Med. 2003; 167: 211-77.
2. Palange P, Ward SA, Carlsen KH, Casaburi R, Gallagher CG, Gosselink R, et al. Recommen-

- dations on the use of exercise testing in clinical practice. *Eur Respir J.* 2007; 29: 185-209.
3. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer W, Whipp BJ. Principles of interpretation: a flow-chart approach. En: Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ, eds. Principles of exercise testing and interpretation. Fourth ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2005. p. 183-96.
  4. Cardiopulmonary exercise tests. *Arch Bronconeumol.* 2001; 37: 247-68.
  5. Cooper CB, Storer TW. Response variables. En: Cooper CB, Storer TW, eds. Exercise Testing and Interpretation: A practical Approach. First ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2001. p. 93-149.
  6. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ. Physiology of exercise. En: Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ, eds. Principles of exercise testing and interpretation. Fourth ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2005. p. 10-65.
  7. Brower R, Permutt S. Exercise and the pulmonary circulation. En: Whipp BJ, Wasserman K, eds. Exercise: Pulmonary Physiology and Pathophysiology. First ed. New York: Marcel Dekker Inc; 1991. p. 201-21.
  8. Hughes JMB. Diffusive gas exchange. En: Whipp BJ, Wasserman K, eds. Exercise: Pulmonary Physiology and Pathophysiology. 1st ed. New York: Marcel Dekker Inc; 1991. p. 143-66.
  9. Whipp BJ, Wasserman K. Coupling of ventilation to pulmonary gas exchange during exercise. En: Whipp BJ, Wasserman K, eds. Exercise: Pulmonary Physiology and Pathophysiology. 1st ed. New York: Marcel Dekker Inc; 1991. p. 271-309.
  10. Hansen JE, Sue DY, Wasserman K. Predicted values for clinical exercise testing. *Am Rev Respir Dis.* 1984; 129: S49-S55.
  11. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ. Changes in blood gases and pH during exercise. En: Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ, eds. Principles of exercise testing and interpretation. Fourth ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2005. p. 66-75.
  12. Wasserman K, Casaburi R. Acid-base regulation during exercise. En: Whipp BJ, Wasserman K, eds. Exercise: Pulmonary Physiology and Pathophysiology. First ed. New York: Marcel Dekker Inc; 1991. p. 405-49.
  13. Cooper CB, Storer TW. Instrumentation. En: Cooper CB, Storer TW, eds. Exercise testing and interpretation: a practical approach. First ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2001. p. 15-51.
  14. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ. Clinical exercise testing. En: Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ, eds. Principles of exercise testing and interpretation. Fourth ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2005. p. 133-60.
  15. Stuart RJ, Jr., Ellestad MH. National survey of exercise stress testing facilities. *Chest.* 1980; 77: 94-7.
  16. Stringer WW, Whipp BJ, Wasserman K, Porszasz J, Christenson P, French WJ. Non-linear cardiac output dynamics during ramp-incremental cycle ergometry. *Eur J Appl Physiol.* 2005; 93: 634-9.
  17. Porszasz J, Casaburi R, Somfay A, Woodhouse LJ, Whipp BJ. A treadmill ramp protocol using simultaneous changes in speed and grade. *Med Sci Sports Exerc.* 2003; 35: 1596-603.
  18. Puente-Maestu L, Villar F, de Miguel J, Stringer WW, Sanz P, Sanz ML, et al. Clinical relevance of constant power exercise duration changes in COPD. *Eur Respir J.* 2009; 34: 340-5.
  19. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ. Measurements during integrative cardiopulmonary. En: Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ, eds. Principles of exercise testing and interpretation. Fourth ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2005. p. 76-106.
  20. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ. Normal values. En: Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ, eds. Principles of exercise testing and interpretation. Fourth ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2005. p. 160-82.
  21. Cooper CB, Storer TW. Data integration and interpretation. En: Cooper CB, Storer TW, eds. Exercise testing and interpretation: a practical approach. First ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2001. p. 149-81.
  22. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ. Pathophysiology of disorders limiting exercise. En: Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ, eds. Principles of exercise testing and interpretation. Fourth ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2005. p. 111-29.
  23. Cooper CB, Storer TW. Purpose. En: Cooper CB, Storer TW, eds. Exercise testing and interpreta-



- tion: a practical approach. First ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2001. p. 1-15.
24. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ. Clinical applications of cardiopulmonary exercise testing. En: Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ, eds. Principles of exercise testing and interpretation. Fourth ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2005. p. 198-214.
  25. Maddox TM, Ross C, Ho PM, Masoudi FA, Magid D, Daugherty SL, et al. The prognostic importance of abnormal heart rate recovery and chronotropic response among exercise treadmill test patients. *Am Heart J*. 2008; 156: 736-44.
  26. Oga T, Nishimura K, Tsukino M, Sato S, Hajiro T. Analysis of the factors related to mortality in chronic obstructive pulmonary disease: role of exercise capacity and health status. *Am J Respir Crit Care Med*. 2003; 167: 544-9.
  27. Wensel R, Opitz CF, Anker SD, Winkler J, Hoffken G, Kleber FX, et al. Assessment of survival in patients with primary pulmonary hypertension: importance of cardiopulmonary exercise testing. *Circulation*. 2002; 106: 319-24.
  28. Ortega F, Montemayor T, Sánchez A, Cabello F, Castillo J. Role of cardiopulmonary exercise testing and the criteria used to determine disability in patients with severe chronic obstructive pulmonary disease. *Am J Respir Crit Care Med*. 1994; 150: 747-51.
  29. Armstrong L, Balady GJ, Berry MJ, Davis SE, Davy KP, Davy BM, et al. Other clinical conditions influencing exercise prescription. En: Whaley MH, Brubaker PH, Otto RM, eds. ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription. Seventh ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2006. p. 205-31.
  30. 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*. 2009; 34: 17-41.
  31. Puente-Maestu L, Villar F, González-Casurran G, Moreno N, Martínez Y, Simon C, et al. Early and long-term validation of an algorithm assessing fitness for surgery in patients with postoperative FEV and diffusing capacity of the lung for carbon monoxide < 40%. *Chest*. 2011; 139: 1430-8.