Ergoespirometría

6

A. Berenguel Senén

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

- Familiarizar al alumno con la técnica de la ergoespirometría.
- Conocer las bases fisiológicas para su realización.
- Entender la metodología utilizada para la interpretación sistemática.
- Ser capaz de aplicar los conceptos aprendidos para estratificar el riesgo de los pacientes en los programas de rehabilitación cardíaca, diseñar sus entrenamientos y evaluar los resultados obtenidos tras ellos.

INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS GENERALES

La ergoespirometría es una prueba de esfuerzo cardiopulmonar realizada con una mascarilla acoplada a la boca y la nariz del paciente, de manera que todo el aire respirado sea analizado a través de un analizador de gases (**Fig. 6-1**). De ese modo, junto con el resto de parámetros habitualmente medidos en una ergometría convencional, se puede medir al instante cómo se comporta el sistema cardiovascular y respiratorio, así como el metabolismo energético muscular. Al estar midiendo gases (oxígeno y dióxido de carbono), son importantes las condiciones de la sala donde se realiza la prueba (temperatura, humedad y presión barométrica) o, incluso, la ubicación geográfica (altitud). Además, es imprescindible hacer una serie de calibraciones previas, algunas de ellas efectuadas de forma automática por los equipos y otras, por el operador (calibraciones ambientales, de gases y de flujo o volumen).

La prueba se suele llevar a cabo en tapiz rodante o en cicloergómetro. Los protocolos que habitualmente se utilizan son los incrementales en rampa (con etapas o *steps*, que pueden ir de unos pocos segundos a no más de 1 minuto). Asimismo, es deseable la personalización para cada sujeto, de manera que se utilice en cada caso el protocolo más adecuado con el objetivo de conseguir tiempos de prueba de 8-12 minutos. De este modo, se da tiempo a que los procesos metabólicos y energéticos se vayan produciendo de un modo fisiológico, lo cual se traduce en una adecuada transición entre zonas (aeróbica, mixta y anaeróbica) y en una óptima morfología de las curvas, lo que facilita el proceso de análisis e interpretación de la prueba.

Los parámetros analizados son directos, indirectos o derivados a través de diversas fórmulas y ecuaciones. Además, se refieren los que debiera tener el paciente (valores predichos obtenidos de fórmulas poblacionales). El valor más conocido de todos los analizados es el consumo de oxígeno o VO_2, motivo por el que a esta prueba también se le conoce como *prueba de esfuerzo con consumo de oxígeno*.

! El VO_2 se define como la capacidad de absorber, transportar y consumir una molécula de oxígeno por unidad de tiempo. Dicho de otra manera, es la capacidad para transformar el oxígeno respirado en energía cinética. Su relación depende de la ecuación de Fick (gasto cardíaco × diferencia arteriovenosa de oxígeno), es decir, de un factor central, (volumen sistólico y frecuencia cardíaca) y de uno periférico (absorción, transporte y difusión tisular de oxígeno) (**Fig. 6-2**).

Conceptualmente, se trata de la historia de un viaje de ida y vuelta de una molécula de oxígeno que está flotando en el aire y que debe llegar hasta la mitocondria, la central energética del organismo. Ahí, tras ser utilizada para generar energía y producirse un producto de deshecho (dióxido de carbono), este debe emprender el camino de vuelta para ser expulsado a través de la respiración. En todo ese viaje hay múltiples órganos y sistemas implicados; depende de la integridad de todos ellos que el VO_2 esté preservado y no disminuido.

En la mitocondria es donde tienen lugar las principales reacciones energéticas que generan energía en forma de adenosín trifosfato (ATP) para producir la contracción muscular. Los dos principales sustratos energéticos utilizados en dichas reacciones son los ácidos grasos y la glucosa. Los primeros se introducen en la mitocondria para, mediante la betaoxidación y su conversión en acetilcoenzima A, entrar en el ciclo de Krebs y sufrir una lipólisis aeróbica, lo que genera 106 moléculas de ATP por cada molécula de ácido graso (reacción de lenta combustión y con una alta capacidad de producción de energía). Por su parte, la glucosa, con su conversión en piruvato, entra también en la mitocondria para sufrir un proceso similar (glucólisis aeróbica); en este caso, es una combustión más rápida y con menor liberación de energía: 36 moléculas de ATP por cada molécula de glucosa. Sin embargo, la glucosa también puede generar energía con una glucólisis anaerobia,

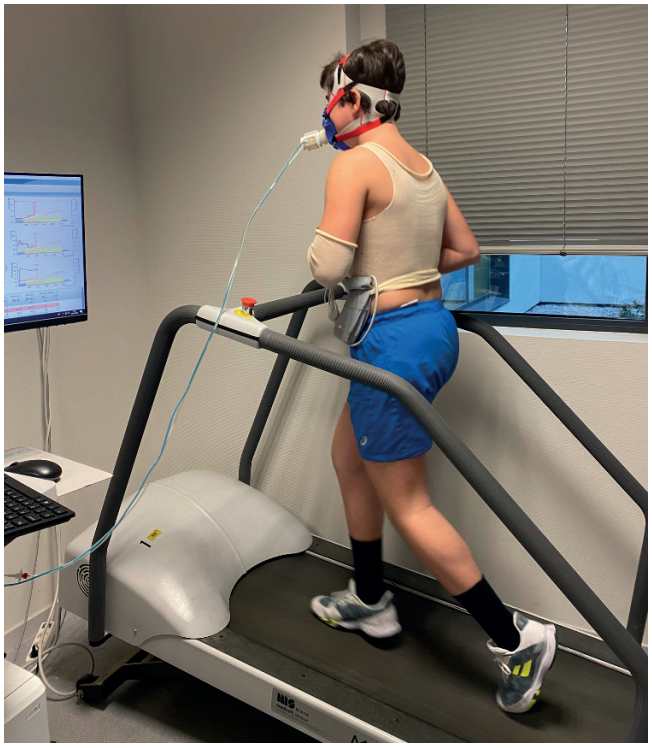

Figura 6-1. Paciente realizando una ergoespirometría en un tapiz rodante.

extramitocondrial o citosólica, mediante la transformación de piruvato en lactato en el citosol celular, lactato que debe ser posteriormente interiorizado en la propia mitocondria a través de los receptores monocarboxilato tipo 1 (MCT_1) con un doble fin: primero, su aprovechamiento como combustible tras su reconversión en piruvato e introducción en el ciclo de Krebs; segundo, el lavado del citosol para evitar su acúmulo en él, que tendría potenciales efectos deletéreos. Esta glucólisis anaerobia y extramitocondrial es la menos eficiente desde un punto de vista energético, ya que únicamente dos moléculas de ATP por cada molécula de glucosa.

$$VO_2 = GC \times dif(a\text{-}v)O_2$$

Factor central: VS × FC

Factor periférico: Difusión, transporte y extracción tisular de O_2

Figura 6-2. Ecuación de Fick.
dif $(a\text{-}v)O_2$: diferencia arterio-venosa de oxígeno; FC: frecuencia cardíaca: GC: gasto cardíaco; VO_2:consumo de oxígeno; VS: volumen sistólico.

En la **figura 6-3** se puede ver el modelo trifásico de Skinner y McLellan, propuesto en 1981, donde se aprecian las diferentes vías energéticas utilizadas durante un ejercicio físico de intensidad creciente. Como se puede apreciar, todas las vías energéticas están activas de manera simultánea, pero en cada fase de ejercicio predominan unas sobre otras. Además, se pueden distinguir tres zonas (aeróbica, anaeróbica y mixta o de transición) separadas por dos umbrales (comúnmente conocidos como umbral aeróbico y anaeróbico). En la primera fase o aeróbica casi toda la energía proviene de la oxidación de ácidos grasos (oxFAT). La máxima capacidad de oxFAT sucede en las inmediaciones del umbral aeróbico (zona de FATmax), punto a partir del cual su combustión empieza a decaer y entra en la fase mixta, donde la energía precisa para mantener la intensidad creciente de energía requerida empieza a ser suministrada por la glucosa, tanto por la vía aeróbica como por la anaeróbica. Ello supone el comienzo del acúmulo de lactato. Finalmente, cuando la mitocondria ya está saturada y es incapaz de mantener las demandas energéticas requeridas por la vía aeróbica, el metabolismo que predomina es el anaeróbico (fase 3 a anaerobia), con metabolismo predominante glucolítico anaeróbico y acúmulo importante y exponencial de lactato. A partir de ese punto (segundo umbral o anaerobio) se produce un mecanismo de compensación respiratoria de la acidosis mediante la hiperventilación, motivo por el que al segundo umbral también se le conoce como punto de compensación respiratoria.

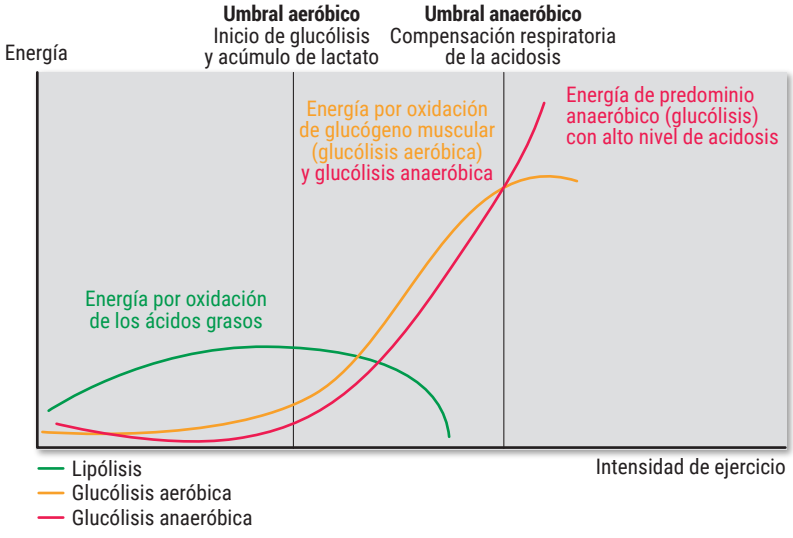

Figura 6-3. Modelo trifásico de Skinner y McLellan (1981).

© EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA

Se ha de hacer siempre una adecuada calibración del equipo y elegir el protocolo en rampa idóneo para cada paciente, de manera que se consigan pruebas de 8-12 minutos de duración.

INTERPRETACIÓN BÁSICA DE UNA ERGOESPIROMETRÍA: LAS GRÁFICAS DE WASSERMAN

Cuando se realiza una ergoespirometría, hay que enfrentarse a una ingente cantidad de datos numéricos de múltiples variables, en diferentes puntos (reposo, ejercicio, umbrales, pico de esfuerzo o recuperación) y reflejados tanto en valores absolutos como en porcentajes de sus valores predichos. El análisis sería lento y farragoso si no se dispusiera todos los datos en un sistema gráfico que ayude en esa tarea. El método universalmente extendido es de las nueve gráficas de Wasserman (**Fig. 6-4**), mediante el cual un ojo experto, de un rápido vistazo, puede establecer un diagnóstico, al igual que un cardiólogo lo hace con un electrocardiograma en cuestión de pocos segundos. Las gráficas se numeran de arriba abajo y de izquierda a derecha. Todas ellas tienen un eje X, habitualmente referido al tiempo o a la carga (W, velocidad, etc.) y uno o dos ejes Y, de manera que si tienen un eje Y, hay una gráfica; si tienen dos ejes Y, hay dos gráficas en una. Algunas de las gráficas se refieren al sistema cardiovascular y la capacidad funcional (gráficas 2, 3 y 5), otras a la ventilación (1, 7 y 8), otras a la eficiencia de la ventilación o intercambio gaseoso (4, 6 y 9) y una de ellas al metabolismo energético (8) (**Fig. 6.5**).

Parámetros cardiológicos

La gráfica 3 (**Fig. 6-6**) tal vez sea la más conocida de todas, ya que en ella se muestra el VO_2 y el VCO_2 (expulsión dióxido de carbono por la respiración) En fases iniciales, el VO_2 es superior al VCO_2, pero llega un momento, como se puede ver en la gráfica 3, en que las líneas se cruzan y el VCO_2 supera al VO_2 por la hiperventilación producida en

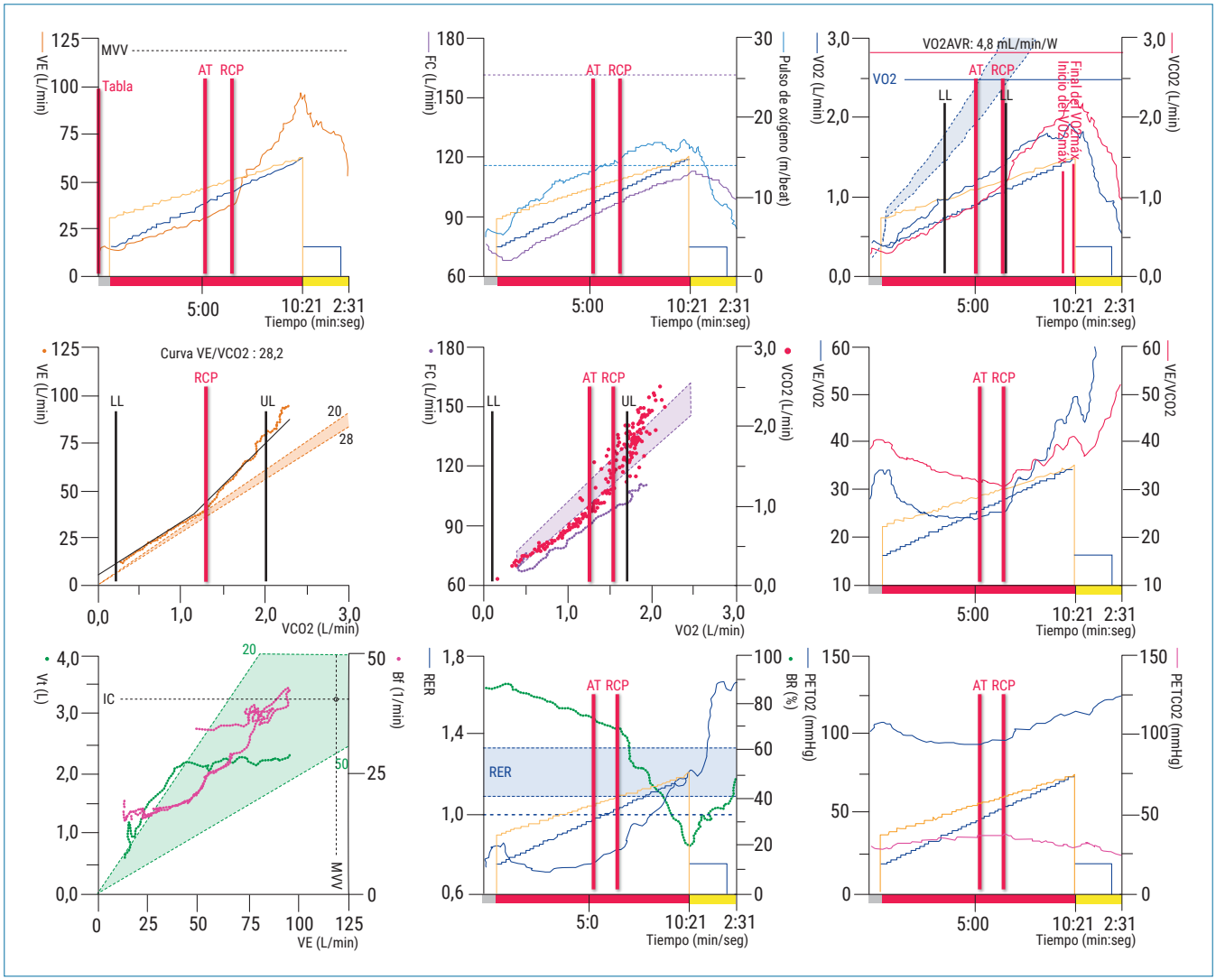

Figura 6-4. Disposición gráfica en nueve paneles propuesto por Wasserman.
AT: *anaerobic treshold*; BR: reserva respiratoria; FC: frecuencia cardíaca; MVV: máxima ventilación voluntaria; $PETCO_2$: presión parcial de dióxido de carbono exhalado; $PETO_2$: presión de oxígeno al final de la espiración; RCP: *respiratory compensation point*; RD: *recovery delay*; RER: *Respiratory Exchange Ratio*; VE: ventilación; VT1: primer umbral de *ventilatory tresholds*.

© EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA

un intento de tamponar la acidosis generada por el acúmulo de lactato, consecuencia de un metabolismo anaerobio. Es importante fijarse no solo en los valores máximos alcanzados de VO_2, sino también en la propia cinética de la curva (presencia de una única pendiente, de dos pendientes, aplanamiento o caída de la curva a altas cargas, etc.), que puede dar pistas acerca de la existencia de diversas condiciones patológicas.

Por otra parte, se ha de diferenciar si el paciente ha conseguido alcanzar un VO_2 máximo (ha alcanzado meseta) o se ha quedado en un VO_2 pico (el VO_2 aún estaba ascendiendo cuando el paciente solicita detener la prueba) (**Fig. 6-7**) Por tanto, la definición de VO_2 pico es la máxima cantidad de oxígeno extraído en una prueba determinada, mientras que el VO_2 máximo es la máxima cantidad de oxígeno que el organismo puede absorber, transportar y consumir por unidad de tiempo. El objetivo es siempre llegar a una meseta (VO_2 máximo), aunque es difícilmente alcanzable, salvo en individuos entrenados. El VO_2 es el mejor indicador de función cardiopulmonar, así como un importante parámetro pronóstico. Siempre se debe comparar con el valor predicho o esperado en ese sujeto en concreto, lo cual depende del peso, la talla, el sexo, la edad y la etnia del paciente. De esta manera, se sabe si la situación funcional para ese individuo se sitúa en rangos normales, por debajo de la normalidad o por encima en caso de personas entrenadas (**Fig. 6-8**). El valor alcanzado de VO_2 depende del grado de entrenamiento, la edad, el sexo, la raza, la genética, la limitación funcional (patologías), la motivación y la decisión del médico de parar. Por tanto, si bien es reproducible, no es totalmente objetivo, excepto en el caso de pruebas consideradas como máximas. Los criterios de maximalidad comúnmente aceptados son:

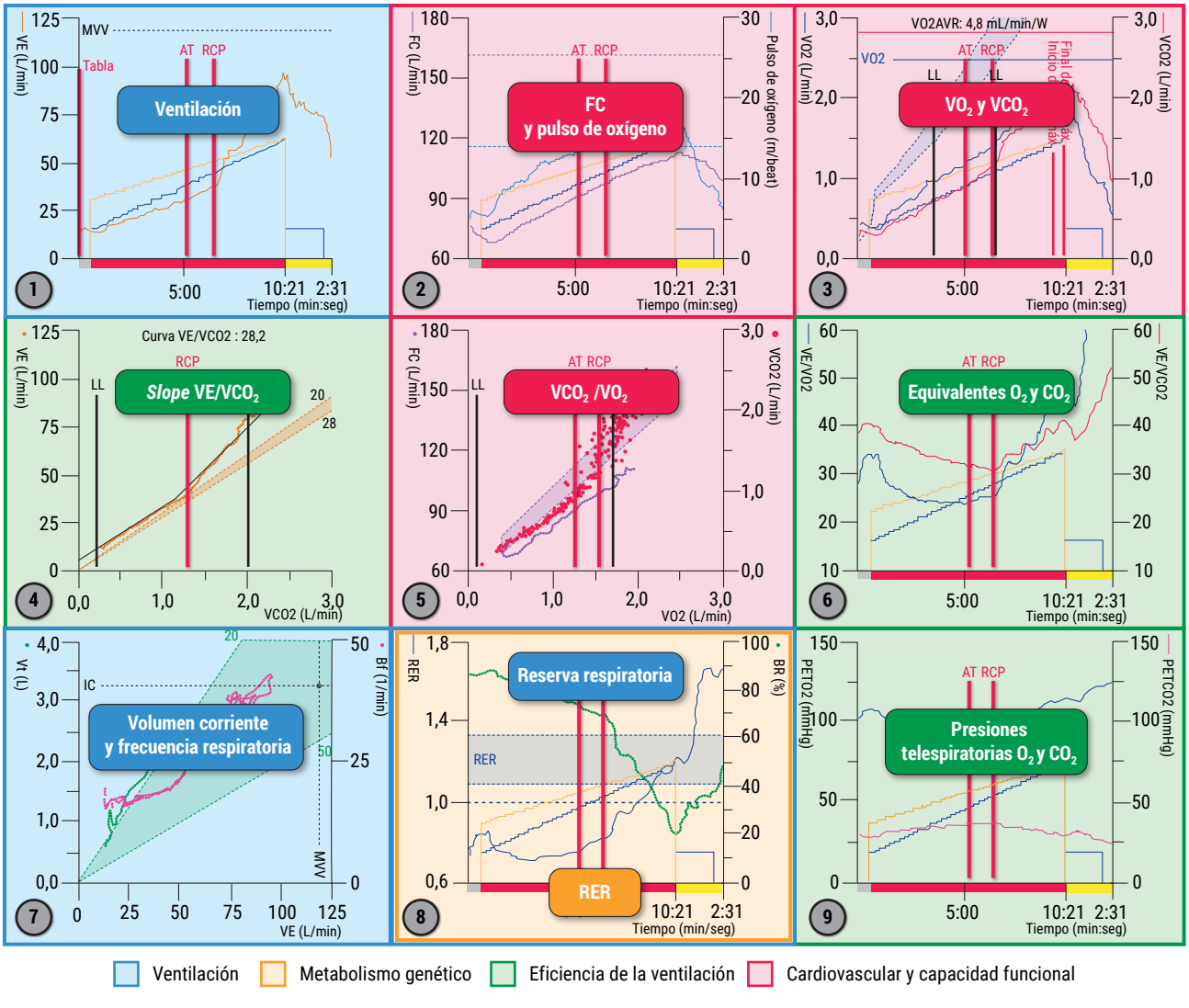

Figura 6-5. Numeración de gráficas, así como agrupación por colores, en función de qué sistema se analiza en cada una de ellas. Algunas de las gráficas se refieren al sistema cardiovascular y la capacidad funcional (gráficas 2, 3 y 5); otras aluden a la ventilación (gráficas 1, 7 y 8), la eficiencia de la ventilación o intercambio gaseoso (gráficas 4, 6 y 9) y una de ellas al metabolismo energético (gráfica 8).
BR: reserva respiratoria; FC: frecuencia cardíaca; $PETCO_2$: presión parcial de dióxido de carbono al final de la espiración; $PETO_2$: presión parcial de oxígeno al final de la espiración; RER: *Respiratory Exchange Ratio*; VE: ventilación; VCO_2: expulsión de dióxido de carbono por la respiración; VO_2: consumo de oxígeno; VT1: primer umbral ventilatorio.

© EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA

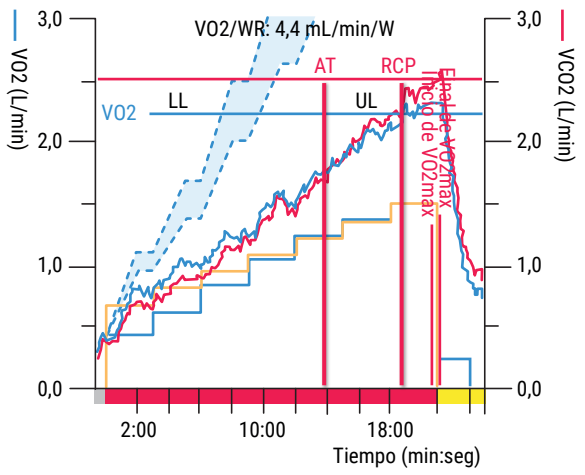

Figura 6-6. Gráfica 3 de Wasserman. Consumo de oxígeno y expulsión de dióxido de carbono (VO_2 y VCO_2).

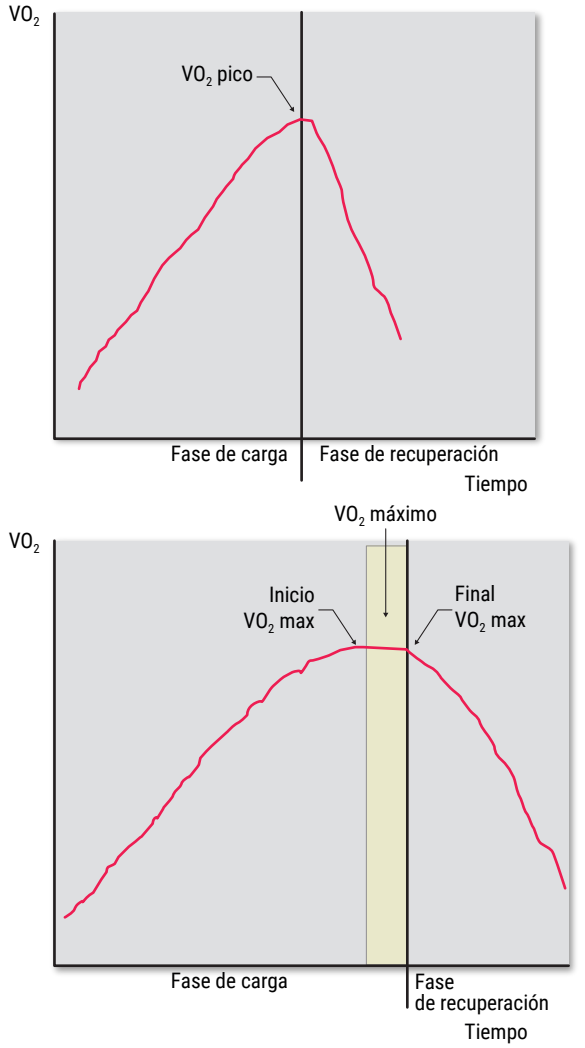

Figura 6-7. Diferencia entre VO_2 pico y VO_2 máximo.
VCO_2: expulsión de dióxido de carbono por la respiración; VO_2: consumo de oxígeno.

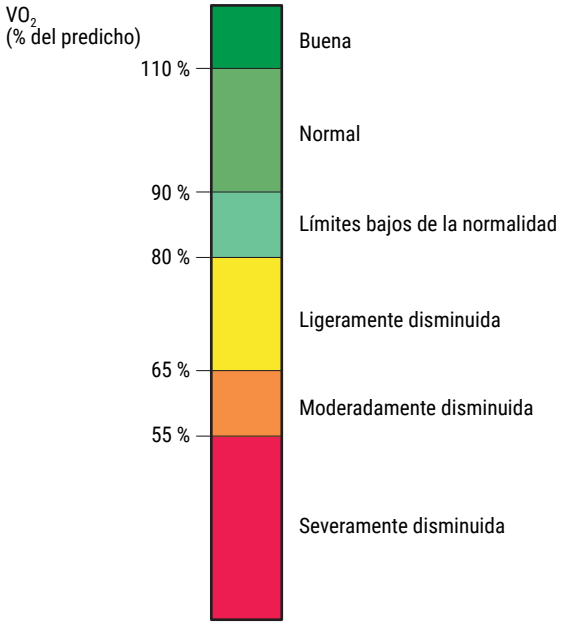

Figura 6-8. Graduación de la capacidad funcional de acuerdo con el porcentaje de VO_2 alcanzado sobre el esperado o predicho.
VO_2: consumo de oxígeno.

- El VO_2 alcanza una meseta (VO_2 máximo).
- Se alcanza la frecuencia máxima teórica, comúnmente calculada como 220-edad.
- Se alcanza una ratio VCO_2/VO_2, conocida como *Respiratory Exchange Ratio* (RER) superior a 1,1 en el máximo esfuerzo.
- Concentración de lactato en sangre superior a 8 mmol/L.

Siempre se debe calcular el VO_2 predicho para cada sujeto en función de su sexo, edad, peso, talla y etnia, pero también según la modalidad de ejercicio que se escoja para la prueba. La inmensa mayoría de las fórmulas predichas existentes están calculadas para pruebas en cicloergómetro. Para hacer la conversión a pruebas en tapiz, se ha de incrementar el valor predicho obtenido en un 10 %, que es el VO_2 extra estimado que se alcanza en tapiz frente al cicloergómetro, ya que se movilizan mayores grupos musculares. Las ecuaciones predichas más conocidas son las de Wasserman, validadas para la población norteamericana, y las de Glaser (estudio *Study of Health in Pomerania* [SHIP]) para la población europea. En función del VO_2 alcanzado y su relación con el valor predicho, se hace una estimación de la capacidad funcional del sujeto. Si se divide el VO_2 alcanzado por 3,5, se obtiene el equivalente metabólico (MET) alcanzados. Cabe destacar que un MET es el equivalente al gasto energético en reposo (3,5 mL/min/kg) Estos MET son los MET directos o reales, al contrario que los MET estimados en una prueba de esfuerzo convencional, que se denominan MET indirectos por haber sido calculados por fórmulas estimativas y no medidos directamente. Los MET indirectos siempre están sobreestimados sobre los reales.

Al igual que hay que fijarse en la cinética de ascenso del VO_2, también es necesario observar la cinética de recuperación, en la que, de manera fisiológica, el VO_2 debe retornar rápidamente a valores basales. Un retraso en la recuperación

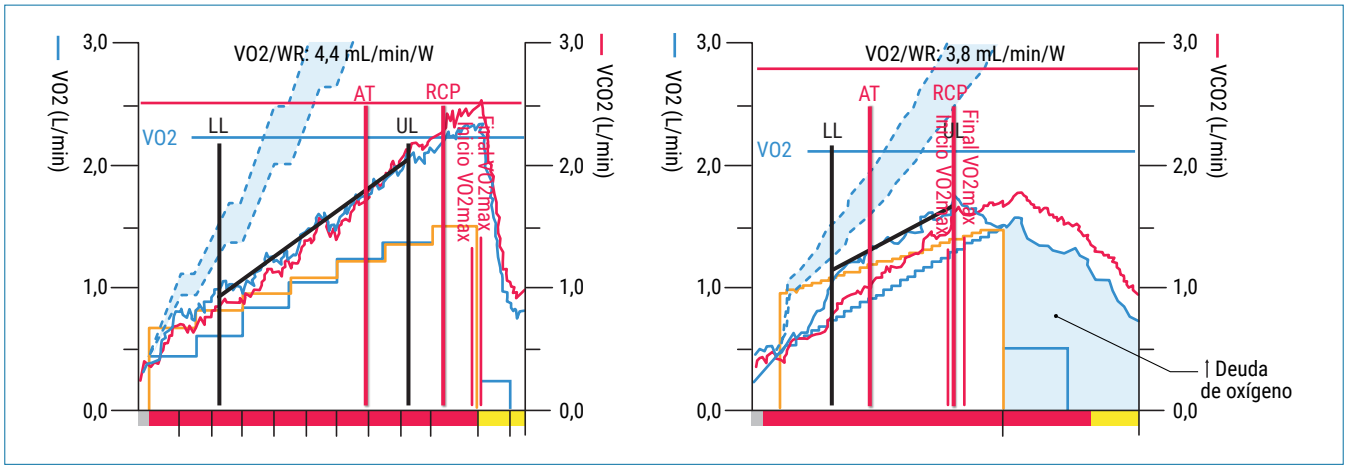

Figura 6-9. Comparación de una buena recuperación del VO_2 con una mala. Se observa una deuda de oxígeno incrementada. VCO_2: expulsión de dióxido de carbono por la respiración; VO_2: consumo de oxígeno.

del VO_2 implica una mayor área bajo la curva, lo que supone un incremento en la deuda de oxígeno (cantidad de oxígeno que se debe utilizar para devolver a todos los sistemas energéticos a una situación de calma), situación relacionada con diversas condiciones patológicas o simplemente con una pobre condición física (**Fig. 6-9**). Se estima que si a los 2 minutos de la recuperación el VO_2 no ha disminuido al menos un 50 % respecto al pico, la deuda de oxígeno está patológicamente elevada. En ocasiones, una vez retirada la carga y ya en la fase de recuperación, el VO_2 no comienza a disminuir de manera inmediata como debería hacer en condiciones de normalidad, sino que hace una meseta o, incluso, un ascenso hasta que comienza efectivamente a descender. Ese retraso o *delay* entre el momento en que se retira la carga y el momento en que el VO_2 comienza a disminuir se denomina VO_2 *recovery delay* y tiene significado pronóstico si supera los 25 segundos en los pacientes con insuficiencia cardíaca, tanto con fracción de eyección del ventrículo izquierdo reducida como con fracción de eyección del ventrículo izquierdo preservada (**Fig. 6-10**).

Una gráfica muy importante desde el punto de vista cardiovascular es la gráfica 2 (v. **Fig. 6-5**), en la que se ve reflejada la frecuencia cardíaca y el pulso de oxígeno, que es el VO_2 consumido por cada ciclo cardíaco, es decir, VO_2/FC, que es un reflejo muy fiel del comportamiento del volumen sistólico. La explicación se desarrolla a continuación:

Según la ecuación de Fick, la definición de VO2 es la siguiente:

$$VO_2 = GC \times \text{dif. (a-v)}$$

A su vez, el gasto cardíaco se puede separar en sus dos componentes (volumen sistólico y frecuencia cardíaca):

$$VO_2 = VS \times FC \times \text{dif. (a-v)}$$

Si se pasa la frecuencia cardíaca al lado izquierdo de la ecuación, queda el pulso de oxígeno en la izquierda:

$$VO_2/FC \text{ (pulso de oxígeno)} = VS \times \text{dif. (a-v)}$$

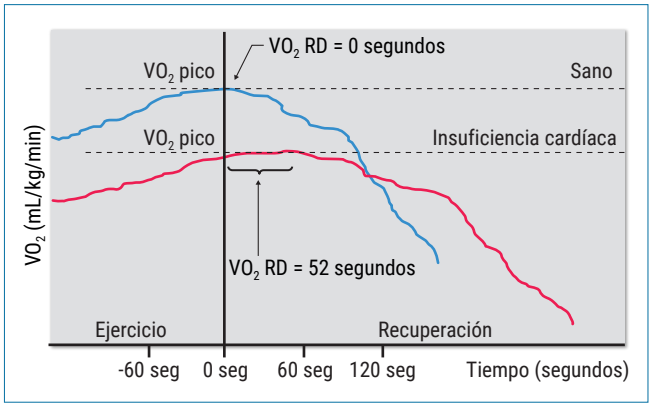

Figura 6-10. En el concepto del VO_2 *recovery delay*, el sujeto sano (azul) presenta una inmediata caída del VO_2 al inicio de la recuperación, mientras que el sujeto con insuficiencia cardíaca (rojo) presenta un retraso de 52 segundos hasta que comienza a descender.

Pero llega un momento en que esa diferencia a-v de oxígeno adquiere un valor relativamente constante, con lo que queda el pulso de oxígeno como un valor relacionado de forma directa con el volumen sistólico.

$$VO_2/FC \text{ (pulso de oxígeno)} = VS \text{ (x una constante)}$$

Con ello, cualquier incremento (o decremento) del pulso de oxígeno está directamente reflejando incrementos (o decrementos) del volumen latido. De ahí su importancia como parámetro que refleja de modo muy fiel el comportamiento del corazón como «bomba».

El volumen sistólico y, por tanto, el pulso de oxígeno, deben incrementarse progresivamente a lo largo del ejercicio o hacer una meseta al final de este. Hay que recordar que es patológica la falta de incremento o incluso su caída, lo cual puede reflejar situaciones en las que no se consigue incrementar el gasto (claudicación del ventrículo izquierdo por isquemia, disfunción ventricular con poca reserva contráctil, obstrucción dinámica del ventrículo izquierdo, estenosis aórtica, etc.). En la **figura 6-11** se puede apreciar un comportamiento normal frente a uno patológico, en este caso, debido a una lesión crítica en la coronaria derecha

© EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA

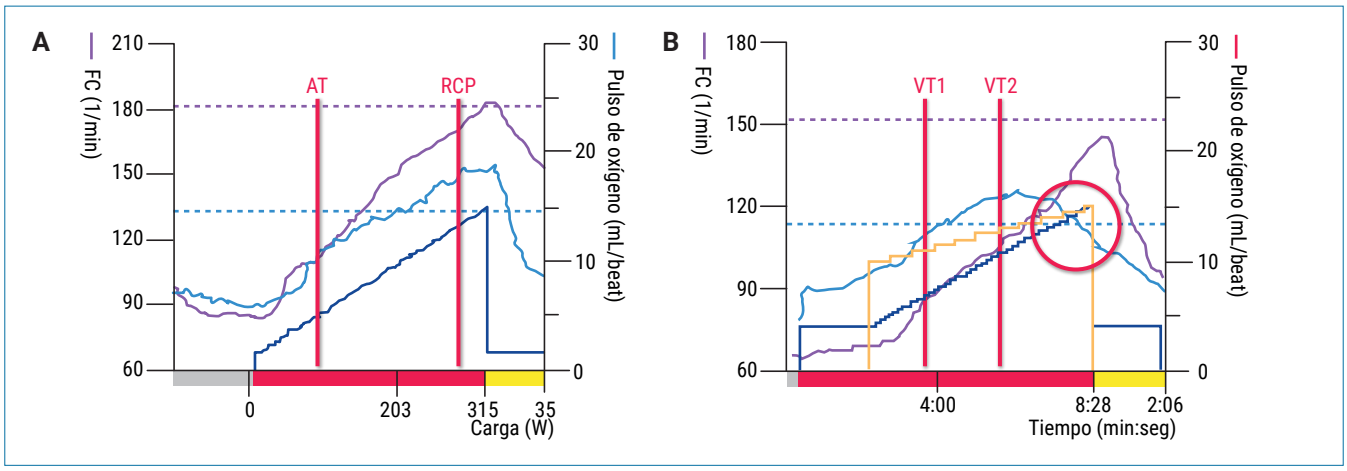

Figura 6-11. Comparación de un pulso de oxígeno normal, que se incrementa hasta el final de la prueba **(A)**, con uno patológico **(B)**, que presenta una caída brusca en la última fase de la prueba (zona rodeada con un círculo rojo).

proximal que ocasiona una disfunción sistólica a altas cargas, con caída del volumen sistólico y, por tanto, del pulso de oxígeno. Cuando se realiza la prueba a pacientes en estudio por dolor torácico, una morfología del pulso de oxígeno de ascenso precoz y posterior meseta mantenida, asociada a una gráfica del VO_2 con una doble pendiente de ascenso, se relaciona con la presencia de isquemia miocárdica, según propuso Belardinelli, sobre todo si el VO_2 pico alcanzado no supera el 90 % del valor predicho (**Fig. 6-12**).

Una manera de analizar la relación entre el VO_2 y el VCO_2, y, por tanto, de valorar en qué fase energética se está, es el RER, cuya representación se puede ver en la gráfica 8 (v. **Fig. 6-5**). Esto ayuda a conocer si el sujeto está en reposo y en condiciones óptimas para iniciar la prueba (RER en reposo < 0,85), así como saber si la prueba ha sido máxima (RER pico > 1,1 o > 1,05 en pacientes con insuficiencia cardíaca). El RER sigue aumentando una vez detenida la prueba, por lo que si este no llega a 1,1 en el pico, pero sí alcanza el valor de 1,09 a los 2 minutos de la recuperación, la prueba también puede considerarse máxima. Por tanto, se considera una gráfica que informa del metabolismo energético, porque en función del RER, con la tabla de Zunt, se puede saber exactamente qué tipo y qué cantidad de sustrato se está usando para generar energía, así como la producción energética total (**Tabla 6-1**).

Una prueba que comience con un RER elevado (por encima de 0,90-0,95) puede suponer una situación de ansiedad o hiperventilación que enturbie el análisis. Igualmente, una prueba que finalice con un RER bajo, sobre todo por debajo de 1 (y que no alcance el 1,09 a los 2 minutos de la recuperación), implica que la prueba es submáxima y se ha de interrogar al paciente acerca de los motivos de detención de la prueba (problemas mecánicos, desadaptación al ergómetro o a la mascarilla, ansiedad, otros motivos voluntarios, como es el caso de los simuladores, etc.), así como hacer un análisis de la prueba en función de los parámetros submáximos.

Dentro de las variables submáximas, una de las más importantes es el OUES (*oxygen uptake efficience slope*), una relación logarítmica entre el VO_2 y la ventilación que hace referencia a cómo se es capaz de aprovechar o utilizar el VO_2 en función de la ventilación a la que este se genera. Su importancia, como variable submáxima, radica en que su valor es el mismo

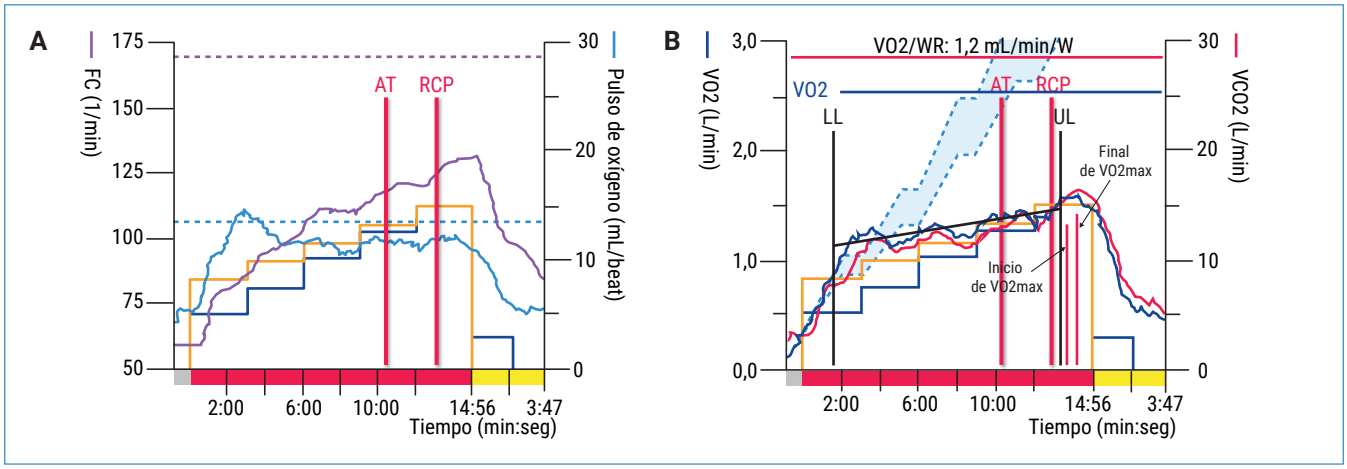

Figura 6-12. Criterios de isquemia definidos por Belardinelli. A la izquierda **(A)**, la gráfica del pulso de oxígeno muestra un ascenso rápido y precoz con una posterior meseta mantenida durante el resto de la prueba. A la derecha **(B)**, la gráfica del VO_2 muestra una doble pendiente, coincidente con el aplanamiento del pulso de oxígeno.
VCO_2: expulsión de dióxido de carbono por la respiración; VO_2: consumo de oxígeno.

© EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA

Tabla 6-1. Tabla de Zunt: equivalente del gasto energético total y sustrato responsable de este en función del *Respiratory Exchange Ratio*

RER	Carbohidratos (g/L de O_2)	Grasas (g/L de O_2)	Energía (Kcal/L de O_2)	RER	Carbohidratos (g/L de O_2)	Grasas (g/L de O_2)	Energía (Kcal/L de O_2)
0,707	0,000	0,496	4,686	0,86	0,621	0,247	4,875
0,71	0,012	0,491	4,690	0,87	0,663	0,230	4,887
0,72	0,051	0,476	4,702	0,88	0,705	0,213	4,899
0,73	0,090	0,460	4,714	0,89	0,749	0,195	4,911
0,74	0,130	0,440	4,727	0,9	0,791	0,178	4,924
0,75	0,170	0,428	4,739	0,91	0,834	0,160	4,936
0,76	0,211	0,412	4,751	0,92	0,877	0,143	4,948
0,77	0,250	0,396	4,764	0,93	0,921	0,125	4,961
0,78	0,290	0,380	4,776	0,94	0,964	0,108	4,973
0,79	0,330	0,363	4,788	0,95	1,008	0,090	4,985
0,8	0,371	0,347	4,801	0,96	1,052	0,072	4,998
0,81	0,413	0,330	4,813	0,97	1,097	0,054	5,010
0,82	0,454	0,313	4,825	0,98	1,142	0,036	5,022
0,83	0,496	0,297	5,838	0,99	1,186	0,018	5,035
0,84	0,537	0,280	4,850	1	1,231	0,000	5,047
0,85	0,579	0,263	4,862	–			

con independencia de en qué momento se acabe la prueba. Disminuye cuando la causa del deterioro funcional es cardíaca o existe un problema en el intercambio gaseoso a nivel alveolocapilar, como en la hipertensión pulmonar (HTP). Sin embargo, en las patologías respiratorias está preservado. Siempre se debe comparar con su valor predicho, pues se trata de un parámetro fuertemente influenciado por el sexo, la edad, el peso, la talla, el tabaquismo, la situación respiratoria basal o el tratamiento con betabloqueantes. Así, ante una prueba submáxima (por ejemplo, con un RER pico 0,88) con un VO_2 bajo (por ejemplo, un 64 % del predicho) sin patología respiratoria, si el OUES se sitúa en un valor del 104 % del valor predicho, significa que la capacidad funcional potencial de ese paciente, en caso de haber conseguido concluir la prueba, es normal, por lo que se tienen que analizar minuciosamente cuáles han sido las causas de detención de la prueba (motivos mecánicos, ansiedad, simuladores, falta de condición física, etcétera).

Ante pruebas submáximas hay que utilizar siempre el análisis de las variables submáximas. Las tres más importantes son el propio OUES, el VO_2 a nivel del primer umbral (que es normal si está por encima del 40 % del VO_2 máximo predicho) y el *slope* o pendiente de la relación VE/dióxido de carbono de la gráfica 4 de Wasermann que se verá posteriormente en los parámetros de eficiencia ventilatoria), que es normal si se sitúa por debajo de 30.

El pulso de oxígeno es un parámetro directamente relacionado con el volumen sistólico o el gasto cardíaco del paciente. Su aplanamiento o caída durante la prueba puede traducir un problema cardiológico (disfunción ventricular, isquemia u obstrucción en la salida de la sangre del ventrículo izquierdo).

Parámetros ventilatorios

En cuanto a la ventilación que se aprecia en la gráfica 1 (v. **Fig. 6-5**), esta refleja los litros por minuto de aire ventilado. Es un producto del volumen corriente por la frecuencia respiratoria, de manera análoga a lo que sucede a nivel cardíaco (gasto cardíaco = volumen sistólico × frecuencia cardíaca) De hecho, ambos sistemas, cardíaco y pulmonar, se comportan de manera análoga ante un esfuerzo físico de intensidad creciente: en fases iniciales se incrementa predominantemente el volumen (sistólico o corriente) y, en fases más avanzadas, cuando el volumen ya puede aumentar muy poco o nada, crece la frecuencia (cardíaca o respiratoria). La ventilación debe incrementarse de manera lineal, con pequeñas inflexiones positivas en los umbrales, sobre todo del segundo (también conocido, por ese motivo, como punto de compensación respiratoria). En condiciones como la insuficiencia cardíaca, puede producirse un incremento de la ventilación de manera oscilatoria (respuesta oscilatoria de la ventilación), con fluctuaciones amplias y cíclicas, sobre

© EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA

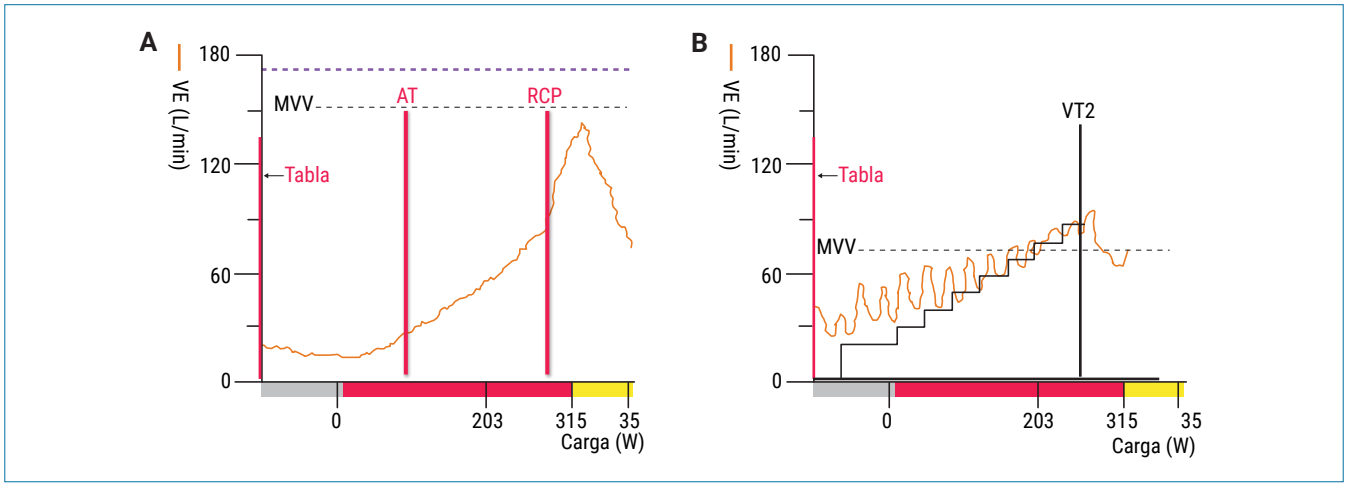

Figura 6-13. Gráfica 1 de Wasserman (ventilación) en un sujeto sano **(A)** con incremento lineal a lo largo del ejercicio; presenta una deflexión positiva en el segundo umbral (punto de compensación respiratoria) en comparación con un sujeto con insuficiencia cardíaca **(B)**, que presenta un patrón oscilatorio (típico signo de gravedad y mal pronóstico).

todo en las primeras etapas de ejercicio, lo cual es patológico y signo de mal pronóstico (**Fig. 6-13**).

En la gráfica 7 (**Fig. 6-14**), se observan desglosados los dos componentes de la ventilación: el volumen corriente y la frecuencia respiratoria. Se aprecia que, de manera análoga a lo que sucede en el corazón, en fases iniciales del ejercicio la ventilación se incrementa merced al incremento del volumen corriente, hasta que, en fases más avanzadas, lo hace sobre todo a expensas de un incremento en la frecuencia respiratoria.

Otra variable respiratoria muy importante es la reserva respiratoria, que se puede apreciar en la gráfica 8 (línea verde) (**Fig. 6-15**), que representa el porcentaje de capacidad ventilatoria que queda por utilizar en cada momento de ejercicio respecto a la máxima ventilación voluntaria, calculada en función del volumen espirado forzado en el 1 segundo (FEV_1) obtenida en la espirometría basal, que siempre debe realizarse antes de hacer la ergoespirometría (multiplicando la FEV_1 por 35 o 40, según el autor). En un sujeto sano, no especialmente entrenado, la reserva respiratoria debe situarse al finalizar la prueba por encima del 20-30 %, mientras que esta se agota en dos tipos de población: sujetos con patología respiratoria o individuos entrenados. Estos son capaces de someterse a altas cargas de trabajo y exprimir su capacidad respiratoria al máximo antes de detener la prueba.

Parámetros de eficiencia de la ventilación o de intercambio gaseoso

Cuando se habla de ventilación pulmonar, se debe distinguir la capacidad de ventilar, que es el total de aire que entra y sale de los pulmones (ventilación), de la capacidad de aprovechar ese aire para que se produzca el intercambio gaseoso (eficiencia de la ventilación), que realmente es la finalidad última de la ventilación. Para que la ventilación sea eficiente, es precisa una adecuada integridad de la membrana alveolocapilar para que se produzca un correcto intercambio gaseoso (absorción de oxígeno y eliminación de dióxido de carbono). Se puede valorar la eficiencia de la ventilación mediante el *slope*

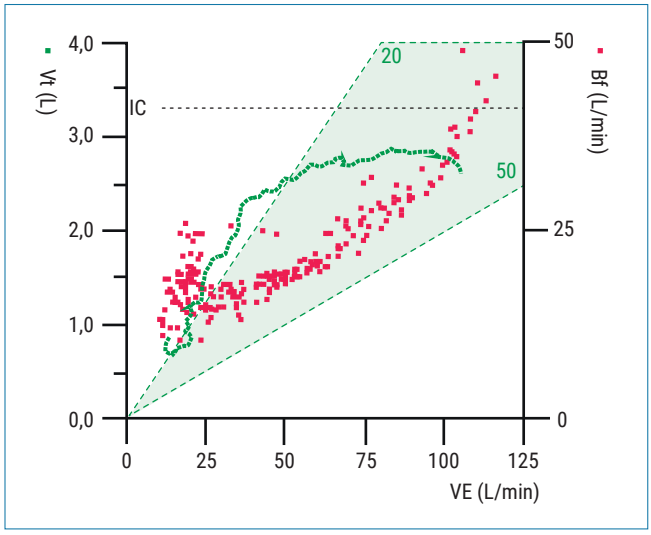

Figura 6-14. Gráfica 7 de Wasserman, con el volumen corriente (verde) y la frecuencia respiratoria (rojo), con un comportamiento fisiológico («en espejo»); se incrementa la ventilación en fases iniciales a expensas del volumen, mientras que, posteriormente, se hace a expensas de la frecuencia.

VE/VCO_2 en la gráfica 4 (v. **Fig. 6-5**), los equivalentes de oxígeno y dióxido de carbono (V_EO_2 y V_ECO_2) en la gráfica 6 (v. **Fig. 6-5**), y las presiones al final de la espiración de oxígeno y CO_2 ($P_{ET}CO_2$ y $P_{ET}O2$) en la gráfica 9 (v. **Fig. 6-5**).

La gráfica 4 (**Fig. 6-16**), refleja un de los parámetros más importantes y con mayor valor diagnóstico y pronóstico en muchas condiciones patológicas, sobre todo en insuficiencia cardiaca (IC) y en HTP, incluso superior al propio valor pronóstico del VO_2. Se establece una relación entre la ventilación (VE) y el VCO_2, que debe ser lineal hasta la aparición del segundo umbral, donde la pendiente se acentúa. Una pendiente mayor implica que para lavar el dióxido de carbono se ha de ventilar más, es decir, que la barrera alveolocapilar no funciona adecuadamente y la ventilación no es todo lo eficiente que debiera: a mayor pendiente, mayor ineficiencia. La pendiente, en condiciones normales, se sitúa

© EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA

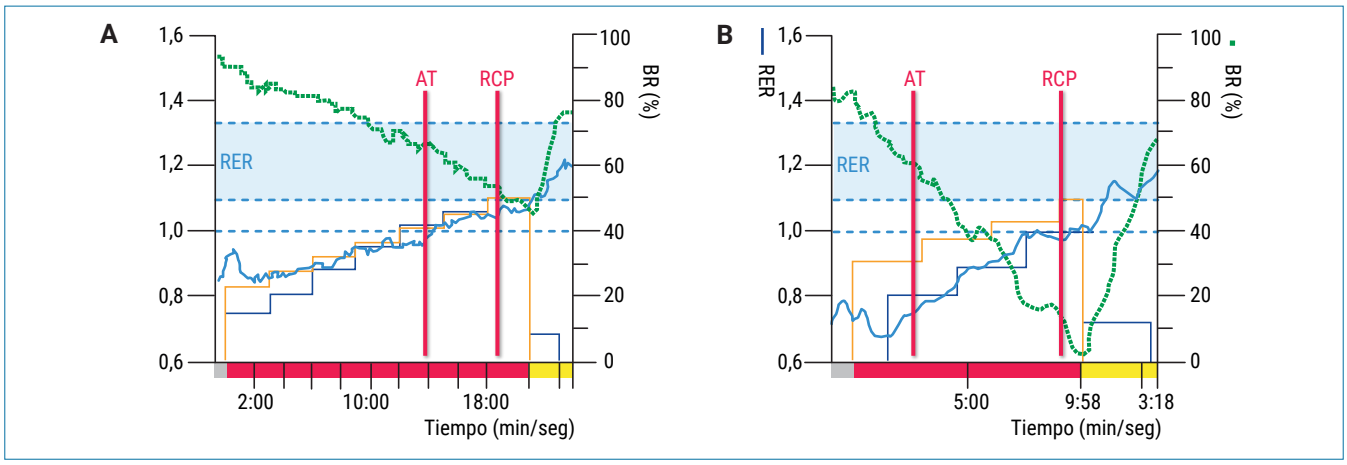

Figura 6-15. Gráfica 8 de Wasserman, donde se puede ver en azul el *Respiratory Exchange Ratio* y en verde la *breathing reserve* o reserva respiratoria. A la izquierda **(A)**, un sujeto sedentario, sin patología respiratoria, que termina la prueba con una *breathing reserve* del 45 % (normal). A la derecha **(B)**, un paciente con enfermedad pulmonar obstructiva crónica que agota su *breathing reserve* de forma precoz, incluso con una prueba submáxima (*Respiratory Exchange Ratio* en el máximo esfuerzo de 1,02).

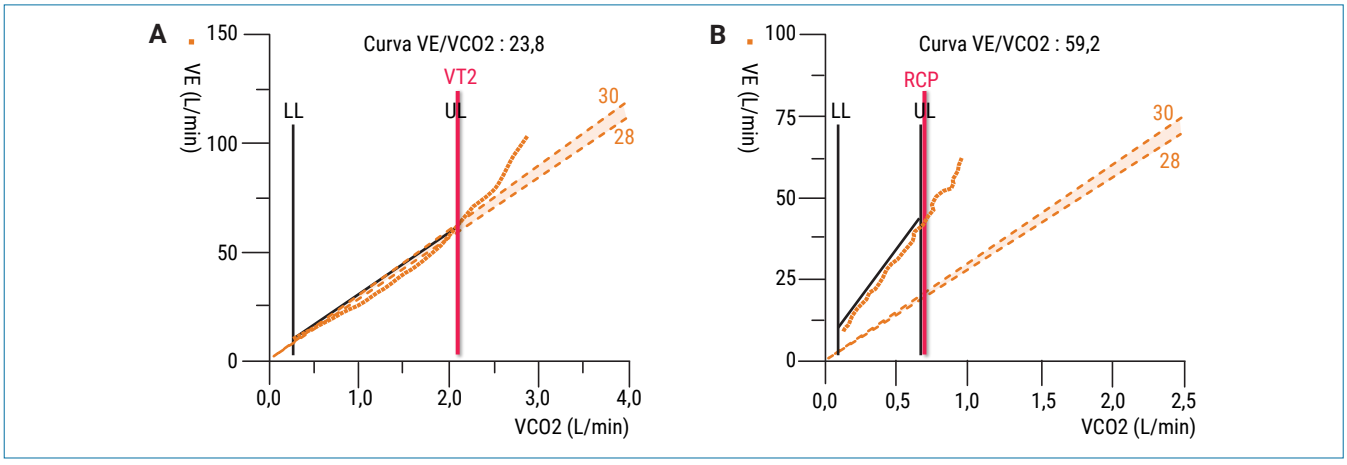

Figura 6-16. Gráfica 4 de Wasserman, donde se muestra la relación VE/VCO_2, cuya pendiente o *slope* es uno de los principales parámetros pronósticos; en condiciones de normalidad, se debe situar por debajo de 30. A la izquierda **(A)**, un sujeto sano (*slope* 23,8); a la derecha **(B)**, un sujeto con hipertensión pulmonar (*slope* 59,2).
VCO_2: expulsión de dióxido de carbono por la respiración; VO_2: consumo de oxígeno.

por debajo de 30. En 2007, Arena estableció su clasificación ventilatoria (de 1 a 4) en función de la pendiente (**Tabla 6-2**). Esta tiene un importante valor pronóstico en IC. La enfermedad paradigmática de la ineficiencia ventilatoria, con alveolos bien ventilados, pero mal perfundidos, es la HTP; es donde se encuentran las pendientes VE/VCO_2 más elevadas.Un caso particular es el que se produce en sujetos con la misma pendiente VE/VCO_2, pero una de ellas se sitúa en un punto más alto de la gráfica (paralela a la del otro sujeto), con lo que corta, por tanto, su virtual prolongación el eje Y en un punto más elevado (**Fig. 6-17**). En este caso, aunque según el *slope* VE/VCO_2 ambos tendrían el mismo grado de ineficiencia ventilatoria, el sujeto con la gráfica más elevada debe ventilar más para lavar el dióxido de carbono (mayor ineficiencia), lo cual es debido a que parte de un punto de hiperinsuflación basal (en reposo) más elevado. Además, tiene también mayor hiperinsuflación con el esfuerzo. Ese punto de corte en el eje Y se conoce como el *y-interceptor* VE/VCO_2. Una manera sencilla de calcularlo es utilizar la ventilación y el VCO_2 que se presenten en un punto cualquiera de la prueba (por ejemplo, en el primer umbral) junto con el *slope* VE/VCO_2 y aplicar la ecuación general de una recta:

$$y = mx + b$$

Tabla 6-2. Clasificación ventilatoria de Arena en la insuficiencia cardíaca

Clase ventilatoria	Pendiente VE/VCO_2	Supervivencia libre de eventos a 2 años
1	≤ 30	97,2 %
2	30-35,9	85,2 %
3	36-44,9	72,3 %
4	≥ 45	44,2 %

VE/VCO_2: Relación entre la ventilación y la expulsión de CO_2.

© EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA

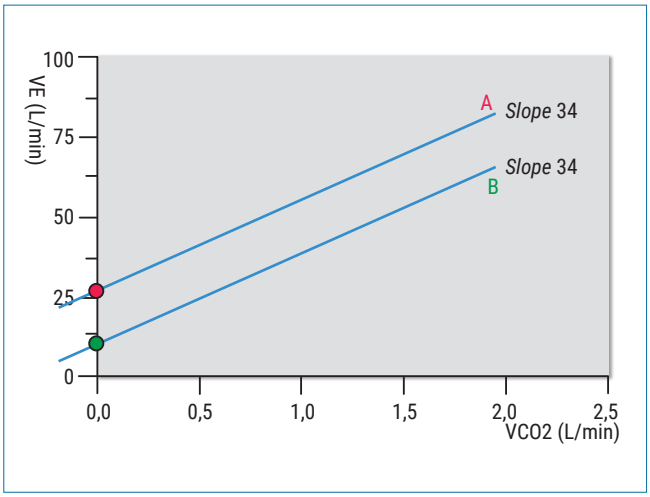

Figura 6-17. Gráfica 4 de Wasserman, donde se muestra la relación VE/VCO2 de dos sujetos (A y B) que tienen la misma pendiente. Sin embargo, el sujeto A tiene un valor mayor de intersección en el eje Y (*y-interceptor*) y, por tanto, mayor ineficiencia ventilatoria. VCO_2: expulsión de dióxido de carbono por la respiración.

Se sustituye cada valor por su correspondiente, con lo que queda de la siguiente manera:

$$VE = \textit{slope}\ VE/VCO_2 \times VCO_2 + \textit{y-interceptor}$$

Si se despeja la ecuación, queda que la fórmula del *y-interceptor* es:

$$\textit{y-interceptor} = VE - \textit{slope}\ VE/VCO_2 \times VCO_2$$

Valores de *y-interceptor* superiores a 4,07 sugieren la presencia de enfermedad pulmonar obstructiva crónica, sobre todo en pacientes con insuficiencia cardíaca con fracción de eyección del ventrículo izquierdo reducida y datos de ineficiencia ventilatoria.

Otro parámetro de eficiencia ventilatoria son los equivalentes (V_EO_2 y V_ECO_2), tanto de oxígeno (cantidad de aire, en mL, que se debe ventilar para consumir 1 mL de oxígeno o dicho de otra manera: VE/VO_2) como de dióxido de carbono (cantidad de aire que se debe ventilar, en mL, para expulsar 1 mL de dióxido de carbono o dicho de otra manera: VE/VCO_2). Así se concluye que a mayores equivalentes, más ineficiencia. En reposo, están algo elevados, pues no es la situación en la que se es más eficiente, desde el punto de vista de la ventilación, pero a medida que se desarrolla un ejercicio, se reclutan unidades alveolares, se dilatan los vasos pulmonares y la eficiencia comienza a aumentar y los equivalentes, por tanto, a disminuir. Posteriormente, según va avanzando el ejercicio, se producen una serie de inflexiones en los equivalentes (primero del V_EO_2 y después del V_ECO_2) que ayudan a situar dónde se encuentran los umbrales, como se verá posteriormente en el cálculo de los umbrales. Un valor de V_ECO_2 superior a 34 en el primer umbral, o en su punto nadir (punto más bajo de la curva), según los autores que se consulten, suele considerarse como dato de ineficiencia ventilatoria.

De manera análoga a los equivalentes se comportan las $P_{ET}CO_2$ y $P_{ET}O_2$. Así, se observa que a mayor eficiencia ventilatoria, más concentración de dióxido de carbono y menos de oxígeno en el aire espirado (ya que se consigue absorber adecuadamente el oxígeno y expulsar el dióxido de carbono). Con ello, $P_{ET}CO_2$ es más elevada y $P_{ET}O_2$, más baja, mientras que una situación de ineficiencia ventilatoria va acompañada de valores de $P_{ET}CO_2$ bajos y $P_{ET}O_2$ altos. Al igual que con los equivalentes, sus inflexiones ayudan a situar los umbrales. En este caso, como datos de ineficiencia ventilatoria, se consideran la presencia de una $P_{ET}CO_2$ en reposo inferior a 33 o la incapacidad de incrementar al menos 3 puntos al llegar al primer umbral.

En la **tabla 6-3** se ve, de manera resumida, cómo están los diversos parámetros de eficiencia ventilatoria (equivalentes, PET [$P_{ET}O_2$ o $P_{ET}CO_2$] y *slope*) en función de la presencia o ausencia de esta.

Hay que distinguir entre la ventilación y la eficiencia de la ventilación. La primera hace referencia a la cantidad de aire movilizado y su alteración puede estar relacionada con problemas pulmonares, mientras que la eficiencia de la ventilación está directamente asociada con el intercambio gaseoso en la membrana alveolo capilar.

Cálculo de los umbrales

A continuación, se profundiza en el concepto de *umbral*, en su significado, las diversas nomenclaturas, que en ocasiones dan lugar a errores de interpretación, y la manera de calcularlo. Los umbrales, como se explicó al inicio, suponen las zonas de transición metabólica-energética. Wasserman llamó al primer umbral *anaerobic treshold* (AT), porque suponía el inicio del metabolismo anaeróbico, y al segundo *respiratory compensation point* (RCP), debido al incremento de la ventilación para tamponar la acidosis láctica. En medicina del deporte, al primer umbral se le suele llamar *umbral aeróbico* y corresponde en la curva de lactato a la presencia de 2 mmol de lactato en sangre; el segundo se denomina *umbral anaeróbico* y se refiere a la presencia en sangre de 4 mmol de lactato. Tal vez, la manera más correcta, y dado que son umbrales basados en hallazgos obtenidos a través de las inflexiones de la venti-

Tabla 6-3. Resumen de los parámetros de eficiencia ventilatoria

Parámetro	Buena eficiencia	Mala eficiencia
V_EO_2	↓	↑
V_ECO_2	↓	↑
$P_{ET}O_2$	↓	↑
$P_{ET}CO_2$	↑	↓
VE/VCO_2	↓	↑

© EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA

lación, es denominarlos umbrales ventilatorios o *ventilatory tresholds* siendo VT_1 el primer umbral y VT_2, el segundo.

> **!** Los métodos más precisos para su cálculo se basan en las inflexiones de las curvas de los equivalentes y las PET, de manera que cuando comienza a incrementarse el V_EO_2 sin que lo haga el V_ECO_2 corresponde al VT_1, mientras que cuando se incrementan ambos (V_EO_2 y V_ECO_2), es el VT_2. En cuanto a las PET, cuando comienza a incrementarse la $P_{ET}O_2$ es el VT_1, mientras que cuando empiece a bajar la $P_{ET}CO_2$ y vuelve a subir la $P_{ET}O_2$ (separación de ambas curvas), es el VT_2. En la **figura 6-18** se puede ver un ejemplo real de cálculo de umbrales mediante el análisis de las gráficas 6 y 9 de Wasserman.

Un método clásico de cálculo, que ha quedado ya como método de apoyo, en este caso solo para el primer umbral (VT_1) es el conocido como método *V-slope*. Es la única utilidad de la que goza la gráfica central, la número 5 (**Fig. 6-19**), en la que se refleja la relación lineal entre VCO_2 y VO_2, linealidad que se rompe, cambiando la pendiente, en el momento en que acontece el primer umbral. Como método de apoyo para VT_2 se puede ver que, en el momento en que se produce el VT_2, en la gráfica 1 (v. **Fig. 6-19**) se incrementa la pendiente de la ventilación, motivo por el que Wasserman lo denominó punto de compensación respiratoria, mientras que en la gráfica 4 de Wasserman incrementa la pendiente de la relación VE/VCO_2 .

Interpretación sistemática mediante diagramas de flujo

Dada la ingente cantidad de datos, es preciso apoyarse para el diagnóstico en diversos diagramas de flujo o *flowchart* que faciliten la interpretación en función de múltiples variables. Wasserman describe en su tratado hasta cinco *flowchart* distintos, a cada cual más complejo, y en los que, aparte de los datos medidos de manera convencional en una ergoespirometría, incluye parámetros obtenidos mediante técnicas invasivas, como gasometrías arteriales o venosas, y que no se realizan en la práctica clínica habitual. A modo de resumen sencillo y práctico, se propone el algoritmo de la **figura 6-20**, basado en muy pocos datos, todos ellos accesibles mediante pruebas convencionales.

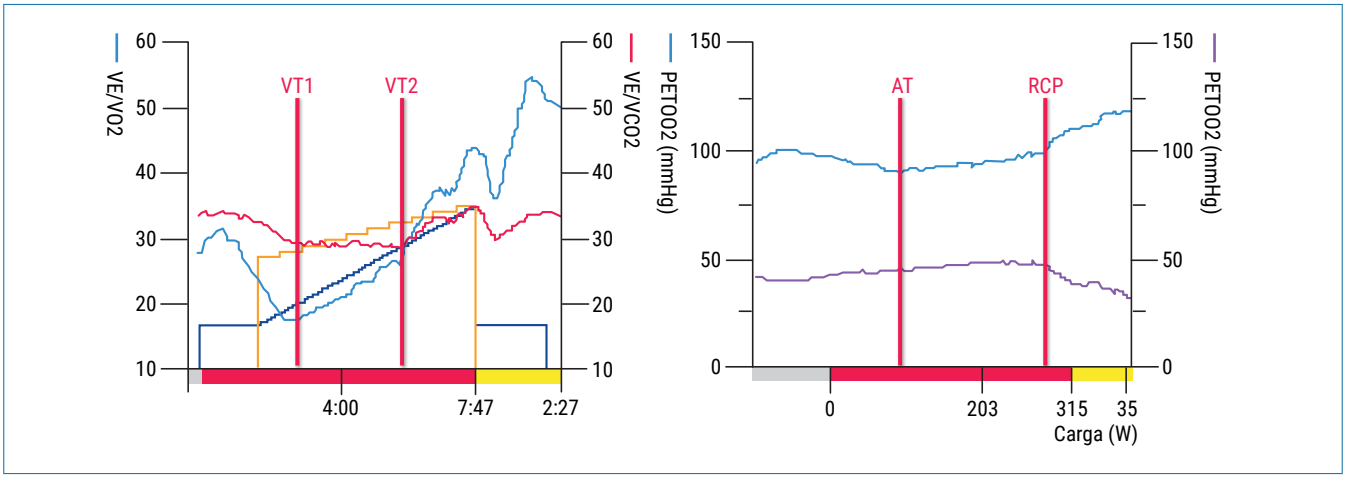

Figura 6-18. Cálculo de los umbrales ventilatorios mediante las inflexiones de las curvas de los equivalentes y las presiones espiratorias de oxígeno y dióxido de carbono.
AT: *Anaerobic treshold*; RCP: *Respiratory composition point*; VT1: *Ventilatory treshold 1*; VT2: *Ventilatory treshold 2*.

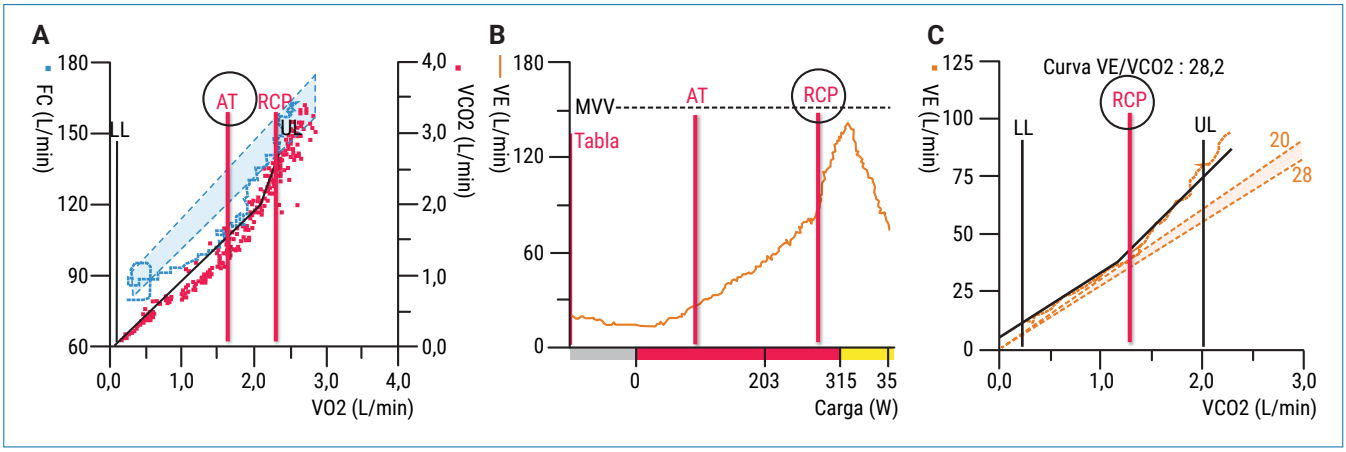

Figura 6-19. Métodos de apoyo al cálculo de los umbrales. A la izquierda **(A)**, mediante el método *V-slope* en la gráfica 5 de Wasserman; en el centro **(B)**, mediante el punto de compensación respiratoria en la gráfica 1 de Wasserman; a la derecha **(C)**, mediante el cambio de pendiente del *slope* de la gráfica 4 de Wasserman.
VCO_2: expulsión de dióxido de carbono por la respiración; VO_2: consumo de oxígeno.

© EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA

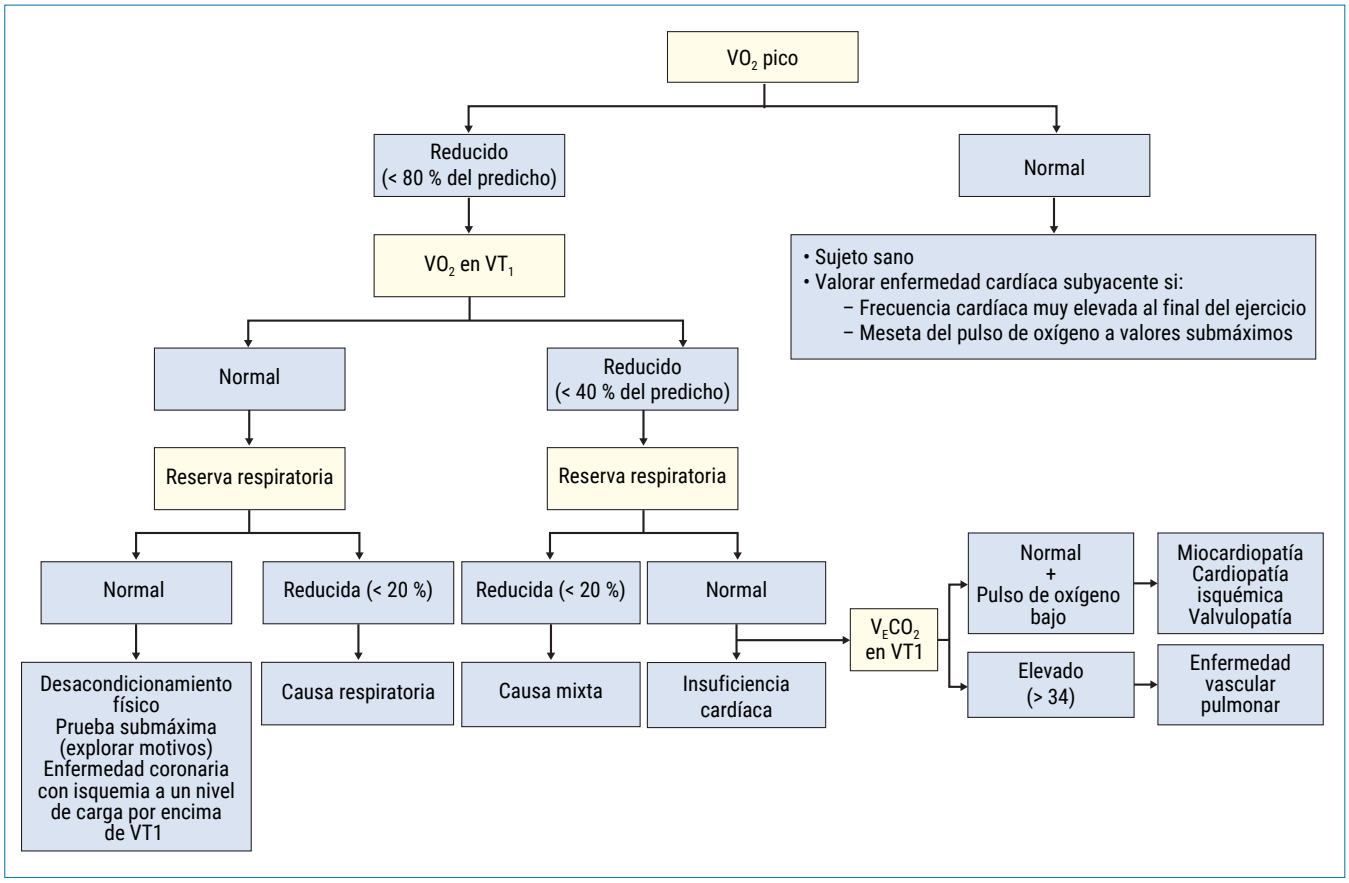

Figura 6-20. Algoritmo diagnóstico básico utilizando únicamente tres parámetros: VO_2 (tanto a nivel de carga máxima como del primer umbral), reserva respiratoria y equivalente del dióxido de carbono medido en el primer umbral. Como parámetros secundarios, hay que basarse en la frecuencia cardíaca y en el pulso de oxígeno.
VCO_2: expulsión de dióxido de carbono por la respiración; V_ECO_2: equivalente de oxígeno; VO_2: consumo de oxígeno.

UTILIDAD DE LA ERGOESPIROMETRÍA EN REHABILITACIÓN CARDÍACA

La utilidad de la técnica durante los programas de rehabilitación cardíaca es incuestionable. Se podría resumir en tres puntos:

- Estratificación del riesgo y selección de los pacientes óptimos.
- Diseño de los programas de entrenamiento.
- Evaluación de resultados.

Estratificación del riesgo y selección de los pacientes óptimos

Las escalas de riesgo clásicas, que proponen tres grupos de riesgo para los pacientes (bajo, intermedio y alto), son eminentemente clínicas, muy focalizadas en el paciente con cardiopatía isquémica, con lo que dejan fuera muchos otros entornos clínicos que hoy en día son una práctica habitual en las unidades de rehabilitación cardíaca. Además, los parámetros funcionales que incluyen, como los MET, están basados en la estimación de estos mediante ergometría indirecta o convencional. Una valoración previa del paciente con ergoespirometría da una visión mucho más completa y transversal del paciente, además de obtener los MET directos o reales. Por otra parte, es mucho más sensible y específica para la detección de la isquemia miocárdica. Finalmente, permite discriminar con certeza el origen del potencial deterioro funcional de los pacientes.

En un trabajo realizado en 2016, por el Dr. Berenguel y su grupo de trabajo, se analizó a 476 pacientes que habían realizado rehabilitación cardíaca. Se observó cómo hasta el 23 % de los sujetos de bajo riesgo clínico tenían una ergoespirometría con criterios de alto riesgo, mientras que en el grupo de alto riesgo clínico hasta un 53 % de los pacientes tenían una ergoespirometría de buen pronóstico. Como función de riesgo ergoespirométrico se utilizó una puntuación agregada de cinco parámetros denominado *Score+* (**Tabla 6-4**). En ella, a los pacientes con un *Score+* de 0 o 1 se les considera de bajo riesgo ergoespirométrico y los pacientes con *Score+* de 4 o 5, de alto riesgo.

Además, una adecuada estratificación del riesgo basal del paciente permite seleccionar mejor los sujetos con más margen de mejoría tras los programas de rehabilitación cardíaca, que, en general, son los más deteriorados. El *Score+* demostró en un trabajo posterior su capacidad para discriminar los pacientes con más potencial de mejoría del VO_2 tras el programa; estos pacientes eran los que presentaban un *Score+* basal de 4 o 5. Más recientemente, el *Score+* ha demostrado en una muestra de más de 1.000 pacientes, con una media de seguimiento de 6,5 años, tener potencial para

© EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA

Tabla 6-4. *Score+* propuesto para estratificar el riesgo en función de la ergoespirometría. Los pacientes con menos de 2 puntos se consideran de bajo riesgo, mientras que con 4 o 5 son de alto riesgo

VO_2 pico < 80 % predicho	1 punto
VO_2 en VT_1 < 40 % predicho	1 punto
Pulso de oxígeno < 12 en varones o < 8 en mujeres	1 punto
Slope VE/VCO_2 > 35,9	1 punto
OUES < 80 % predicho	1 punto

OUES: *oxygen uptake efficience slope*; VE: ventilación; VO_2: consumo máximo de oxígeno; VT_1: primer umbral ventilatorio.

discriminar eventos (reinfarto, hospitalización, necesidad de revascularización y mortalidad), lo que refuerza su valor como función de riesgo.

Otro aspecto relevante es el potencial para detectar la isquemia miocárdica, con una sensibilidad y especificidad muy superior al de la ergometría convencional. Hoy en día, la inmensa mayoría de los pacientes que participan en los programas de rehabilitación cardíaca siguen siendo aquellos con cardiopatía isquémica; no son infrecuentes personas con lesiones coronarias intermedias o incluso graves no revascularizadas. Si se utiliza la ergometría convencional como prueba de detección de isquemia previa al inicio del programa, se tiene un 30-40 % de pacientes que presentan isquemia secundaria a dichas lesiones que no se detecta, mientras que con la ergoespirometría ese porcentaje se reduce a un 10-15 %, sobre todo en lesiones de alguna de las tres coronarias principales.

Los METs estimados con una ergometría convencional son los denominados METs *indirectos*, que siempre sobreestiman la capacidad funcional real. Los METs *directos* se obtienen dividiendo el VO2 pico alcanzado (en mL/kg/min) entre 3,5.

Diseño de los programas de entrenamiento

La ergoespirometría es la prueba de elección a la hora de diseñar y planificar cualquier tipo de entrenamiento, tanto en deportistas de alto rendimiento como en pacientes. La posibilidad de conocer de manera precisa los umbrales y, por tanto, las zonas de entrenamiento, posibilita poder trabajar con pacientes de acuerdo con datos objetivos que maximicen las dos premisas básicas que debe tener todo programa de ejercicio físico terapéutico: seguridad y eficacia. Todos los métodos de cálculo de zonas de entrenamiento que se basan en la ergometría convencional (porcentaje de la frecuencia cardíaca máxima, fórmula de Karvonen, etc.) tratan de estimar de manera indirecta dónde se sitúan esos umbrales. Con la ergoespirometría, se conoce (no estima) dónde están los umbrales así como a su frecuencia cardíaca y carga correspondiente, de manera que se delimita lo que se conoce como *zona sensible de entrenamiento* (situada entre ambos umbrales) (**Fig. 6-21**) De esta forma, se garantiza poder trabajar siempre en la zona deseada en función del tipo de entrenamiento que se lleve a cabo, dado que entrenar por debajo del primer umbral puede resultar poco eficaz para conseguir objetivos, mientras que entrenamientos por encima del segundo umbral pueden resultar poco tolerables para el paciente, incluso poco seguros en determinadas situaciones clínicas.

Si lo que se plantea es un entrenamiento interválico, el diseño de este precisa el conocimiento de la carga (o la frecuencia cardíaca) a la que se alcanza el VO_2 máximo (o pico), dado que los intervalos de carga se diseñan según un porcentaje determinado del VO_2 máximo, dato que solo se puede conocer con seguridad mediante la realización de una ergoespirometría.

La zona sensible de entrenamiento es aquella que se sitúa entre los dos umbrales, que es una zona segura y eficaz para obtener mejorías. La única manera de conocer con fiabilidad esa zona es mediante una ergoespirometría.

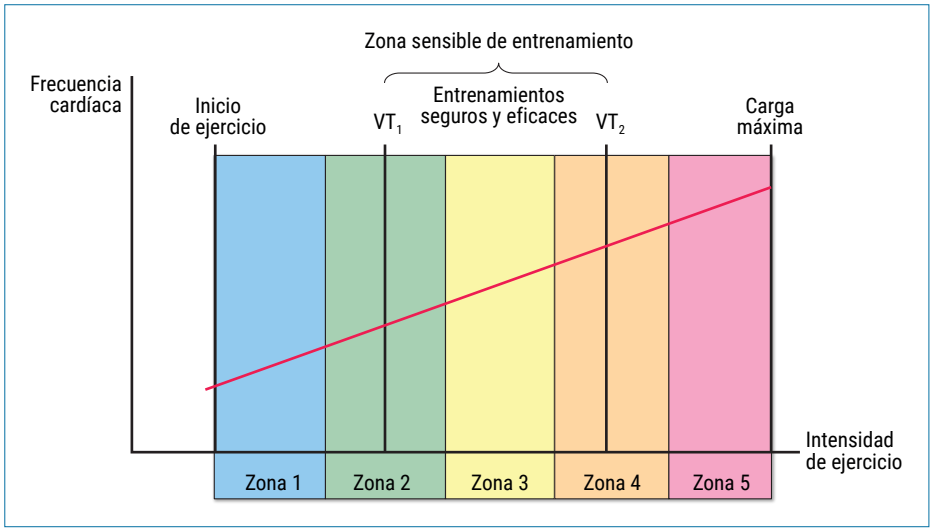

Figura 6-21. Zonas de entrenamiento según el modelo de cinco zonas, con la zona sensible de entrenamiento para pacientes en rehabilitación cardíaca delimitada por ambos umbrales ventilatorios.

© EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA

Figura 6-22. Fórmula de la eficiencia muscular, tanto para pruebas en cicloergómetro como en tapiz rodante.
VO_2: consumo de oxígeno.

$$EM_{tapiz}\ (\%) = \frac{\text{Peso (kg)} \times \text{seno del ángulo de la inclinación} \times \text{velocidad (m/seg)} \times 58.823{,}4}{(4{,}94 \times \text{RER} + 16{,}04) \times (VO_2 \text{ pico en mL/min} - VO_2 \text{ basal en mL/min})} \times 100$$

$$EM_{ciclo}\ (\%) = \frac{\text{Potencia desarrollada (W)} \times 60}{(4{,}94 \times \text{RER} + 16{,}04) \times (VO_2 \text{ pico en mL/min} - VO_2 \text{ basal en mL/min})} \times 100$$

Evaluación de resultados

Para finalizar, en medicina siempre hay que medir resultados y hacerlo de una manera precisa, reproducible y fiable. La ergoespirometría permite medir y comparar múltiples parámetros preintervención y postintervención con el fin de, por una parte, saber si la actuación realizada ha sido eficaz o no y, por otra, para planificar el entrenamiento que hay que hacer durante la fase 3, una vez el paciente abandona la unidad de rehabilitación cardíaca.

El parámetro principal que hay que comparar es el VO_2 pico alcanzado, que es el mejor indicador de capacidad funcional y uno de los principales objetivos de mejoría, pues su incremento se relaciona con un descenso de la mortalidad. Por cada MET real incrementado (3,5 mL/kg/min) la mortalidad se reduce en un 10-15 %. Pero no es el único, ya que tras la rehabilitación se observan mejorías en parámetros ventilatorios, más evidentes si se introducen el fortalecimiento de la musculatura respiratoria en las rutinas de entrenamiento, e incluso en los parámetros de eficiencia ventilatoria. Una mención especial merecen los umbrales, pues conseguir retrasar la aparición de estos, sobre todo el primer umbral, es un claro reflejo de haber sido capaces de inducir una mejoría en el metabolismo mitocondrial y de utilizar el metabolismo oxidativo de los ácidos grasos a mayores cargas de trabajo (incremento de la flexibilidad metabólica), lo cual se refleja indefectiblemente en una mejoría de la calidad de vida del paciente, que es capaz de someterse durante tiempos mayores y con mejor tolerancia a determinados esfuerzos.

En ocasiones, hay pacientes que, tras realizar un buen programa de rehabilitación cardíaca y mejorar clínicamente de manera subjetiva, alcanzan un VO_2 pico en la ergoespirometría posterior similar al previo, mientras que el tiempo de prueba y, por tanto, la carga pico alcanzada son superiores. En estos casos, donde a pesar del incremento de carga no se ha visto incrementado el VO_2, la explicación puede radicar en la mejoría del aprovechamiento de ese VO_2 que se hace a nivel periférico, con lo que es capaz el músculo de, con el «mismo combustible», generar «más energía»; dicho de otra manera, puede mejorar la eficiencia si el músculo aprovecha mejor el oxígeno que recibe. El concepto de eficiencia muscular, conocido ya desde hace años, sobre todo en el campo del rendimiento y para pruebas en el cicloergómetro, no ha sido apenas explorado en el campo clínico asistencial y de la rehabilitación cardíaca, y mucho menos para pruebas en tapiz rodante. El grupo de trabajo del Dr. Berenguel, desarrolló hace unos años una fórmula (**Fig. 6-22**) para calcular la eficiencia muscular, tanto para pruebas en cicloergómetro como en tapiz rodante; tiene como premisa la utilización de exactamente el mismo protocolo preintervención y postintervención para que ambas eficiencias musculares sean comparables. En un trabajo en el que se comparaba entrenamientos hospitalarios con domiciliarios y se estratificaba por riesgo clínico, se pudo observar cómo incluso en aquellos pacientes donde el VO_2 no mejoraba, o lo hacía de una manera más modesta (sobre todo en pacientes de bajo riesgo con entrenamientos domiciliarios), la eficiencia muscular mejoraba de manera muy significativa, si bien no tanto como en aquellos que se entrenaban de manera presencial.

Para finalizar, se pueden utilizar los datos obtenidos de la ergoespirometría (VO_2 y VCO_2) para, mediante la utilización de las fórmulas estequiométricas propuestas por Frayn (**Fig. 6-23**) o con la tabla de Zunt (que utiliza el RER), calcular la tasa de oxidación de grasas y carbohidratos, además de elaborar unos mapas metabólicos que sirvan de medición fácil e indirecta del metabolismo mitocondrial. Si a estas determinaciones le añadimos la medición del lactato, tal y como propusieron Íñigo San Millán y George Brooks en 2017, se obtiene un mapa metabólico de función 100 % mitocondrial (**Fig. 6-24**), pues tanto los ácidos grasos como el lactato se metabolizan exclusivamente en el interior de la mitocondria, mientras que la glucosa también tiene un metabolismo citosólico, extramitocondrial. En función del grado de entrena-

$$\text{oxFAT (mg/min)} = 1{,}67\ VO_2\text{(mL/min)} - 1{,}67\ VCO_2\text{(mL/min)}$$

$$\text{CHO-ox (mg/min)} = 4{,}55\ VCO_2\text{(mL/min)} - 3{,}21\ VO_2\text{(mL/min)}$$

Figura 6-23. Fórmula de Frayn para el cálculo de la tasa de oxidación de grasas y de carbohidratos a través del VO_2 y del VCO_2.
VCO_2: expulsión de dióxido de carbono por la respiración; VO_2: consumo de oxígeno.

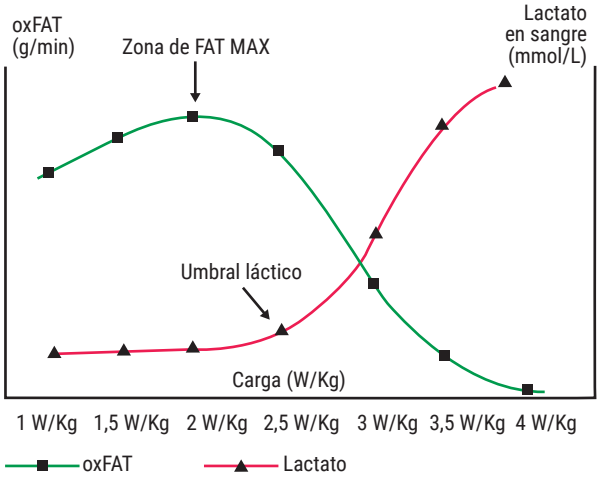

Figura 6-24. Mapa metabólico de función mitocondrial propuesto por San Millán y Brooks (2017).

© EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA

miento y, por tanto, de la flexibilidad metabólica que presente el sujeto, las curvas de oxidación de grasas y lactato varían (Fig. 6-25). Por tanto, la medición de la función mitocondrial mediante esta metodología es una manera rápida y sencilla de valorar la modificación de la flexibilidad metabólica tras una intervención basada en el ejercicio físico, como es el caso de la rehabilitación cardíaca.

Existen varias maneras de evaluar la mejoría tras la rehabilitación; el VO_2 es el principal objetivo (descenso del 10-15 % en la mortalidad por cada MET de mejoría), pero no el único. Parámetros como la eficiencia muscular o la valoración de la flexibilidad metabólica pueden ayudar al leer de una manera más global el resultado de una intervención.

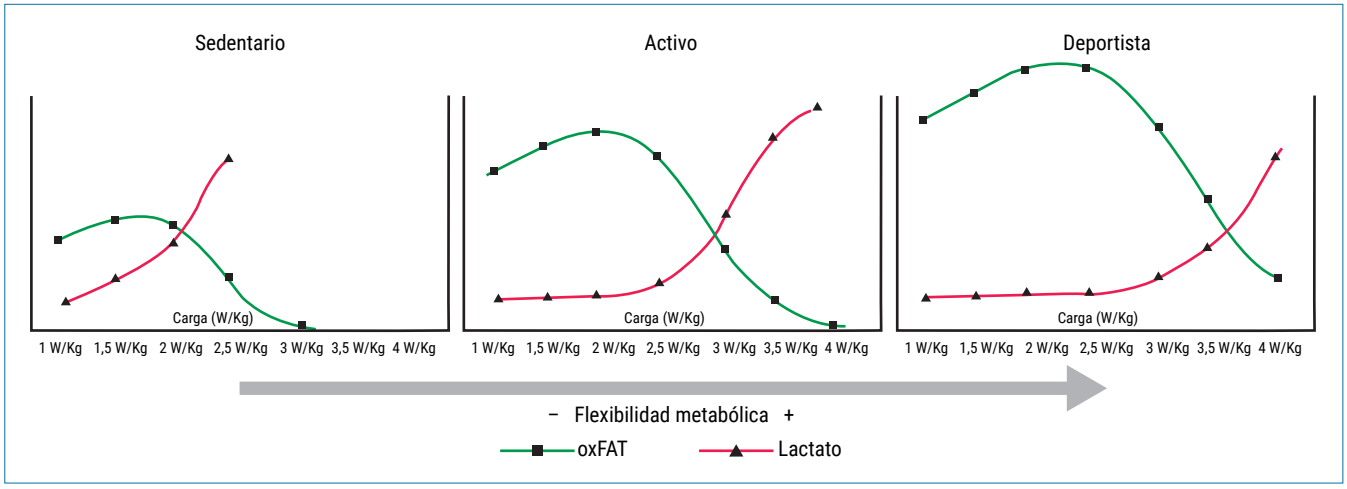

Figura 6-25. Mapas metabólicos en tres individuos (sedentario, activo y deportista) con la modificación de la flexibilidad metabólica. Con mayor flexibilidad, se incrementa la capacidad de oxidar grasas y de aclarar el lactato (se acumula menos y más tarde en sangre).

PUNTOS CLAVE

- La ergospirometría es la prueba de elección para valorar la capacidad funcional de cualquier sujeto, así como para el diagnóstico etiológico del deterioro funcional.
- El análisis de los gases espirados ofrece una visión holística del funcionamiento de los sistemas cardiológicos y respiratorios, así como del metabolismo energético muscular.
- Para la adecuada interpretación de la técnica, es clave el conocimiento del sistema gráfico de nueve paneles de Wasserman, además de la utilización de algoritmos diagnósticos o *flowchart*.
- La utilidad de la ergoespirometría en rehabilitación cardíaca radica en su capacidad para estratificar el riesgo del paciente, su incuestionable utilidad a la hora de diseñar los entrenamientos y la capacidad de medir de una manera objetiva los resultados alcanzados tras la intervención.

BIBLIOGRAFÍA

Agostoni P, Corrà U, Cattadori G, Veglia F, La Gioia R, Scardovi AB, et al. Metabolic exercise test data combined with cardiac and kidney indexes, the MECKI score: a multiparametric approach to heart failure prognosis. Int J Cardiol. 2013;167(6):2710-8.

Arena R, Myers J, Abella J, Peberdy MA, Bensimhon D, Chase P, et al. Development of a Ventilatory Classification System in Patients with Cardiac Failure. Circulation. 2007;115:2410-7.

Bailey CS, Wooster LT, Buswell M, Patel S, Pappagianopoulos PP, Bakken K, et al. Post-Exercise Oxygen Uptake Recovery Delay: A Novel Index of Impaired Cardiac Reserve Capacity in Heart Failure. JACC Heart Fail. 2018;6(4):329-39.

Balady GJ, Arena R, Sietsema K, Myers J, Coke L, Fletcher GF, et al. Clinician's Guide to cardiopulmonary exercise testing in adults. A Scientific Statement From the American Heart Association. Circulation 2010;122(2):191-225.

Barron A, Francis DP, Mayet J, Ewert R, Obst A, Mason M, et al. Oxygen Uptake Efficiency Slope and Breathing Reserve, Not Anaerobic Threshold, Discriminate Between Patients With Cardiovascular Disease Over Chronic Obstructive Pulmonary Disease. JACC Heart Fail. 2016;4(4):252-61.

Belardinelli R, Lacalaprice F, Carle F, Minnucci A, Cianci G, Perna G, et al. Exercise-induced myocardial ischaemia detected by cardiopulmonary exercise testing. Eur Heart J. 2003;24(14):1304-13.

Belardinelli R, Lacalaprice F, Tiano L, Muçai A, Perna GP, et al. Cardiopulmonary exercise test is more accurate than ECG-stress testing in diagnosing myocardial ischemia in subjects with chest pain. Int J Cardiol. 2014;174(2):337-42.

Berenguel A, Lozano MG, Chamón R, Sánchez-Aguilera P, Martínez A, Castillo JI, et al. Mejorando la estratificación de riesgo en rehabilitación cardíaca mediante ergoespirometría: la escala modificada (SCORE+) incrementa la detección de pacientes de alto riesgo. Rev Esp Cardiol. 2018;71(Supl 1):184.

Cahalin LP, Chase P, Arena R, Myers J, Bensimhon D, Peberdy MA, et al. A meta-analysis of the prognostic significance of cardiopulmonary exercise testing in patients with heart failure. Heart Failure Reviews. 2013;18(1):79-94.

Cornelis J, Taeymans J, Hens W, Beckers P, Vrints C, Vissers D. Prognostic respiratory parameters in heart failure patients with and without exercise oscillatory ventilation - a systematic review and descriptive meta-analysis. Int J Cardiol. 2015;182: 476-86.

Cornish AK, Broadbent S, Cheema BS. Interval training for patients with coronary artery disease: a systematic review. Eur J Appl Phisiol. 2011;111(4):579-89.
Guazzi M, Adams V, Conraads V, Halle M, Mezzani A, Vanhees L, et al. Clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assessment in specific patient populations. Eur Heart J. 2012;33(23):2917-27.
Guazzi M, Adams V, Conraads V, Halle M, Mezzani A, Vanhees L, et al. EACPR/AHA Scientific Statement. Clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assessment in specific patient populations. Circulation. 2012;126:2261-74.
Guazzi M, Arena R, Halle M, Piepoli MF, Myers J, Lavie CJ. 2016 focused update: clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assessment in specific patient populations. Eur Heart J. 2016;133(24):e694-711.
Guazzi M, Bandera F, Ozemek C, Systrom D, Arena R. Cardiopulmonary Exercise Testing. What Is its Value? JACC. 2017;70(13):1618-36.
Haykowsky MJ, Timmons MP, Kruge C r, McNeely M, Taylor DA, Clark AM. Meta-analysis of aerobic interval training on exercise capacity and systolic function in patients with heart failure and reduced ejection fraction. Am J Cardiol. 2013:15:111(19);1466-9.
Laethem CV, Bartunek J, Goethals M, Nellens P, Andries E, Vanderheyden M. Oxygen uptake efficiency slope, a new submaximal parameter in evaluating exercise capacity in chronic heart failure patients. Am Heart J. 2005;149(1):175-80.
López Chicharro J, Fernández Vaquero A. Fisiología del Ejercicio. 4ª ed. 2023. Editorial Panamericana.
Mezzani A, Agostoni P, Cohen-Solal A, Corrà U, Jegier A, Kouidi E, et al. Standards for the use of cardiopulmonary exercise testing for the functional evaluation of cardiac patients: a report from the Exercise Physiology Section of the European Association for Cardiovascular Prevention and Rehabilitation. Eur J Cardiovasc Prev and Rehab. 2009;16(3):249-67.
Murphy RM, Shah RV, Malhotra R, Pappagianopoulos PP, Hough SS, Systrom DM, et al. Exercise Oscillatory Ventilation in Systolic Heart Failure: An Indicator of Impaired Hemodynamic Response to Exercise. Circulation. 2011;124(13):1442-51.
Myers J, Oliveira R, Dewey F, Arena R, Guazzi M, Chase P, et al. Validation of a Cardiopulmonary Exercise Test Score in Heart Failure. Circ Heart Fail. 2013;6(2):211-8.
Myers J, Wong M, Adhikarla C, Boga M, Challa S, Abella J, et al. Cardiopulmonary and noninvasive hemodynamic responses to exercise predict outcomes in heart failure. J Card Fail. 2013;19(2):101-7.
Piepoli MF, Conraads V, Corrà U, Dickstein K, Francis DP, Jaarsma T, et al. Exercise training in heart failure: from theory to practice. A consensus document of the Heart Failure Association and the European Association for Cardiovascular Prevention and Rehabilitation. Eur J Heart Failure. 2011;13(4):347-57.
San-Millán I, Brooks GA. Assessment of Metabolic Flexibility by Means of Measuring Blood Lactate, Fat, and Carbohydrate Oxidation Responses to Exercise in Professional Endurance Athletes and Less-Fit Individuals. Sports Med. 2018;48(2):467-79.
Sietsema KE, Sue DY, Stringer WW, Ward S. Wasserman & Whipp´s. Principles of Exercise Testing and Interpretation. 6ª ed. 2021. Wolters Kluwer.
Villelabeitia-Jaureguizar K, Vicente-Campos D, Berenguel-Senen A, Hernández Jiménez V, Ruiz Bautista L, Barrios Garrido-Lestache ME, et al. Mechanical efficiency of high versus moderate intensity aerobic exercise in coronary heart disease patients: A randomized clinical trial. Cardiol J. 2019;26(2):130-7.