

Prueba cardiopulmonar de ejercicio. Recomendaciones y procedimiento

Cardiopulmonary exercise testing. Procedure and recommendations

Silvia Cid-Juárez,* José Luis Miguel-Reyes,* Arturo Cortés-Télles,* Laura Gochicoa-Rangel,*
Uri de Jesús Mora-Romero,* Mónica Silva-Cerón,* Luis Torre-Bouscoulet*

*Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas, Ciudad de México.

RESUMEN. La prueba cardiopulmonar de ejercicio (PCPE) es una herramienta que permite la evaluación de la respuesta fisiológica tanto en ejercicio submáximo como máximo, brinda información acerca del proceso metabólico, muscular, neurosensorial, cardiovascular y ventilatorio; aunque su uso clínico es cada vez mayor debido a las ventajas clínicas que ofrece en muchos escenarios clínicos y a que los avances en la tecnología han facilitado y agilizado la realización como la interpretación de la prueba, en nuestro medio sigue siendo una prueba poco conocida y no es considerada para el abordaje de los pacientes con intolerancia al ejercicio. El objetivo de este artículo es ofrecer a los neumólogos una visión general de los aspectos prácticos de los principios, de la realización y de la interpretación de la prueba, con la intención de que sea incluida como abordaje de los padecimientos en beneficio de los pacientes.

Palabras clave: Cardiopulmonar, ejercicio, fisiología respiratoria, cardiovascular.

ABSTRACT. Cardiopulmonary exercise testing (CPET) makes it possible to evaluate, simultaneously, the physiological integration of the cardiovascular, respiratory, metabolic, musculoskeletal and neurosensory systems during exercise. CPET provides a physiological response profile that is useful for diagnosis and follow-up of patients in diverse clinical scenarios. Technological advances have facilitated the performance and interpretation of this test; however, in Mexico it is still little-utilized, in part because it is not widely-known. The objectives of this document are, first, to present a general view of the practical aspects of CPET to pneumologists and the medical community as a whole, and, second, to describe the standard procedure for successful test performance. Finally, the text elucidates basic aspects of the interpretation of test results.

Keywords: Cardiopulmonary, exercise, respiratory physiology, cardiovascular.

Abreviaturas:

Bloqueo AV: Bloqueo auriculoventricular
CO₂: Bióxido de carbono
EELV: Volumen pulmonar al final de la espiración
EKG: Electrocardiograma
EPID: Enfermedad pulmonar intersticial difusa
EPOC: Enfermedad pulmonar obstructiva crónica
FC: Frecuencia cardíaca
FeCO₂: Fracción espirada de bióxido de carbono
FeO₂: Fracción espirada de oxígeno
FiO₂: Fracción inspirada de oxígeno
H₂O: Agua
IC: Capacidad inspiratoria
ICC: Insuficiencia cardíaca crónica

L: Litros
mmHg: Milímetros de mercurio
Mseg: Milisegundos
N₂: Nitrógeno
O₂: Oxígeno
O₂/FC: Pulso de oxígeno
°C: Grados centígrados
PAD: Presión arterial diastólica
paO₂: Presión arterial de oxígeno
PAS: Presión arterial sistólica
Pb: Presión barométrica
PECP: Prueba cardiopulmonar de ejercicio
PETCO₂: CO₂ al final de la espiración
PH₂O: Presión de agua
RPM: Revoluciones por minuto
SaO₂: Saturación arterial de oxígeno (medición directa: gasometría arterial)
SpO₂: Saturación arterial de oxígeno (medición indirecta: oximetría de pulso)
T: Tiempo
Vd/Vt: Espacio muerto
VE: Ventilación minuto
VE/VVM-1: Reserva ventilatoria
VI: Volumen inspirado
VO₂: Consumo de oxígeno
VO₂ máx.: Consumo máximo de oxígeno
VO₂ pico: Consumo pico de oxígeno
VVM: Ventilación voluntaria máxima

Correspondencia:

Dr. Luis Torre-Bouscoulet

Subdirector de Investigación Clínica, Instituto Nacional de
Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas.
Calzada de Tlalpan Núm. 4502,
Colonia Sección XVI, 14080, Ciudad de México.
Teléfono 54 87 17 00, extensión 5360
Correo electrónico: luistorreb@gmail.com

Trabajo recibido: 25-IX-2015; aceptado: 08-X-2015.

INTRODUCCIÓN

La prueba cardiopulmonar de ejercicio (PCPE) permite evaluar la integración fisiológica al ejercicio de los sistemas cardiovascular, respiratorio, metabólico, musculoesquelético y neurosensorial. Desde el punto de vista clínico, la PCPE nos permite cuantificar la capacidad de ejercicio que tiene un individuo ya sea en condiciones de salud o de enfermedad, explorar los factores limitantes al ejercicio, llevar a cabo el seguimiento funcional de los pacientes mediante la tolerancia al ejercicio, evaluar el pronóstico y la respuesta a las intervenciones realizadas; además, la PCPE permite definir con precisión el riesgo quirúrgico y seleccionar a los candidatos para trasplante de corazón; mediante esta prueba se planifican los programas de rehabilitación cardíaca y pulmonar.^{1,2} La PCPE ofrece un perfil de respuesta al ejercicio y en raras ocasiones permite establecer un diagnóstico nosológico. Los diagnósticos nosológicos que se pueden establecer en esta prueba incluyen al asma inducido por ejercicio, cardiopatía isquémica e insuficiencia arterial periférica. En el resto de los casos, los resultados de la PCPE deben ser analizados a la luz de los antecedentes del paciente así como de examen físico y de las pruebas fisiológicas obtenidas en condiciones de reposo. Es el conjunto de pruebas diagnósticas lo que más ayuda para integrar el diagnóstico definitivo. Salvo en casos que se desee conocer la capacidad de ejercicio, la PCPE no debe ser considerada una prueba de escrutinio para enfermedad cardíaca o pulmonar. Este manuscrito tiene el propósito de ofrecer al lector aspectos prácticos acerca de la PCPE. Es relevante que el neumólogo moderno conozca las indicaciones de esta prueba y aspectos sencillos de interpretación. Creemos que de esta manera, la PCPE será utilizada de forma más extensa en beneficio de los pacientes y se extenderá el conocimiento acerca de la fisiología dinámica pulmonar en su interacción con la función cardiovascular. Al final del documento presentamos el procedimiento a seguir para llevar a cabo la PCPE. Aunque ya existen recomendaciones internacionales, nosotros aclaramos algunos aspectos poco definidos en guías internacionales lo que podría facilitar la realización de la prueba. A lo largo de este documento observamos la metodología y los procesos de estandarización utilizados a nivel global.

Las indicaciones para realizar una PCPE se resumen a continuación

Evaluación de la disnea no explicada por pruebas funcionales estáticas. Aunque las pruebas de función respiratoria y cardíaca en reposo son útiles en el abordaje inicial de la disnea de esfuerzo, no predicen el rendimiento físico ni la capacidad funcional de una persona; además, correlacionan mal con la sintomatología asociada

al esfuerzo. Realizar esta prueba permitiría la detección oportuna de algunas enfermedades cardíacas o respiratorias que de otra manera no podrían ser diagnosticadas en reposo. La PCPE es de utilidad para conocer mecanismos fisiopatológicos como isquemia cardíaca, hipertensión arterial reactiva, hiperreactividad bronquial asociada al ejercicio, atrapamiento aéreo, hiperinflación dinámica, anomalías en el intercambio gaseoso (hipoxemia durante el ejercicio) y acidosis metabólica temprana.³ En la esfera psicológica, la PCPE permite evaluar estados de hiperventilación, pánico o ansiedad durante el ejercicio. El desacondicionamiento físico se puede documentar durante la PCPE. Si la PCPE es normal, se garantiza la integridad de la respuesta fisiológica al ejercicio y hace innecesario realizar otros estudios complementarios.

Evaluación funcional en enfermedad cardiovascular.

Es recomendable que, siempre y cuando estén compensados, todos los pacientes con insuficiencia cardíaca (IC) de cualquier causa sean sometidos a esta prueba debido a que el consumo máximo de oxígeno (VO_2max) es el mejor predictor de mortalidad. La PCPE ayuda a seleccionar a los candidatos a trasplante de corazón.^{4,5} La prueba es útil en la prescripción y evaluación de la respuesta a los programas de rehabilitación cardíaca y respiratoria. Al igual que la prueba de esfuerzo «clásica» (en banda sin fin con protocolo de Bruce o Bruce modificado), la PCPE también es útil para demostrar isquemia miocárdica.

Evaluación funcional en enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC). Una proporción significativa de pacientes con EPOC mueren de causas diferentes a la insuficiencia respiratoria; más del 20% fallecen por enfermedades cardiovasculares. Cuando los síntomas asociados al esfuerzo son desproporcionados al daño estructural y funcional estático (GOLD B), la PCPE es ideal para detectar enfermedades coexistentes que estén contribuyendo con la disnea y, en consecuencia, con la limitación funcional.⁶ Algunos de dichos factores incluyen, isquemia miocárdica, alteración vasculopulmonar o disfunción musculoesquelética. La PCPE permite conocer si la hipoxemia contribuye a la disminución de la capacidad funcional al esfuerzo y permite cuantificar de forma precisa la necesidad de O_2 suplementario, también permite evaluar la respuesta de la enfermedad a los tratamientos instituidos.⁶⁻⁸

Evaluación funcional en ejercicio en otras enfermedades respiratorias

Asma: La evaluación funcional durante el ejercicio en pacientes con asma puede ser útil para alentar una mayor actividad física y prescribir un programa de ejercicio específico. En quienes se sospecha clínicamente de asma, pero que tienen espirometría en reposo normal, el diag-

nóstico podrá realizarse si se documenta broncoespasmo, atrapamiento aéreo y obstrucción al flujo aéreo posterior al ejercicio; sin embargo, una respuesta negativa no debe excluir el diagnóstico.⁹ En tales casos se debe de realizar una prueba de reto con metacolina.

Enfermedad pulmonar intersticial difusa (EPID): La detección temprana de alteraciones en el intercambio gaseoso durante el ejercicio, aun cuando las pruebas de función respiratoria estática sean normales, debe de hacernos sospechar en este diagnóstico y realizar estudios complementarios como lo es la tomografía computada de tórax de alta resolución. En pacientes con EPID, las anomalías en el intercambio de gases, muchas veces sólo evidentes durante la PCPE, suelen preceder a las anomalías de la mecánica de la respiración. En el seguimiento de los pacientes con EPID, la PCPE es de utilidad debido a que permite analizar la respuesta a las intervenciones terapéuticas y proporciona valor pronóstico.

Enfermedad vascular pulmonar: En pacientes con hipertensión arterial pulmonar, el VO_2max correlaciona con la disminución del gasto cardíaco y con la cantidad del lecho vascular pulmonar que está «disponible». Por lo tanto, el VO_2max estima la gravedad de la enfermedad.¹⁰ La eficiencia ventilatoria expresada como el cociente VE/VCO_2 es otro indicador de gravedad y pronóstico en pacientes con hipertensión arterial pulmonar. Mientras mayor es el cociente, mayor es la presión pulmonar y la probabilidad de morir.¹¹ La hipertensión pulmonar no es, como lo era hace algunos años, una contraindicación para realizar la PCPE.

Cirugía pulmonar (cáncer pulmonar, reducción de volumen pulmonar, trasplante pulmonar): El VO_2max es el principal predictor de complicaciones postoperatorias.¹²⁻¹⁴ El objetivo de realizar la PCPE en pacientes quirúrgicos es someter a estrés al sistema cardiopulmonar para estimar la reserva fisiológica disponible tras la resección quirúrgica; por lo tanto, esta prueba provee de información que no se puede obtener de los estudios en reposo (espirometría y DLCO).

Foramen oval permeable: Este defecto congénito, que cursa con cortocircuito de derecha a izquierda, puede ser diagnosticado cuando el paciente cursa con hipoxemia durante el ejercicio y no mejora tras la administración de oxígeno al 100%.^{4,5}

Las contraindicaciones para la realización de la PCPE se pueden clasificar en absolutas y relativas,^{3,15,16} éstas se muestran en la *Tabla 1*. La *Tabla 2* muestra las causas de interrupción de la prueba.

Aspectos técnicos acerca de la prueba

Modalidades de la prueba

Existen **dos modalidades** de la PCPE comúnmente empleadas: la cinta de correr (banda sin fin) y la bicicleta ergométrica (cicloergómetro) (*Figura 1*). En la mayoría de los casos, el cicloergómetro es el modo preferido de ejercicio; sin embargo, dependiendo de las razones por las que se solicite la PCPE y la disponibilidad del equipo, la

Tabla 1: Contraindicaciones para realizar la prueba cardiopulmonar de ejercicio.

Absolutas	Relativas
<p>Infarto agudo del miocardio (3-5 días)</p> <p>Angina inestable</p> <p>Arritmia no controlada sintomática o con compromiso hemodinámico</p> <p>Síncope</p> <p>Endocarditis, pericarditis o miocarditis activas</p> <p>Estenosis aórtica grave sintomática</p> <p>Insuficiencia cardíaca no controlada</p> <p>Tromboembolia pulmonar aguda o infarto pulmonar</p> <p>Trombosis en miembros inferiores</p> <p>Sospecha de disección aórtica</p> <p>Asma no controlada</p> <p>Edema pulmonar</p> <p>Insuficiencia respiratoria aguda</p> <p>SpO_2 en reposo <85% (sólo se realizará si cuenta con O_2 suplementario)</p> <p>Enfermedades agudas no cardiopulmonares que puedan afectar el resultado de la prueba o puedan agravarse por el esfuerzo (procesos infecciosos, insuficiencia renal o hepática, tirotoxicosis)</p> <p>Alteraciones mentales que no permitan la colaboración del paciente</p> <p>Epilepsia no tratada o mal controlada</p>	<p>Enfermedad coronaria</p> <p>Enfermedad valvular moderada</p> <p>Hipertensión arterial grave no controlada (PAS > 200 mmHg, PAD > 120 mmHg)</p> <p>Taquiarritmias o bradiarritmias</p> <p>Bloqueo A-V de alto grado (3:1, 4:1, etc.) o 3º grado</p> <p>Cardiomiopatía hipertrófica</p> <p>Hipertensión pulmonar grave</p> <p>Embarazo avanzado o complicado</p> <p>Desequilibrio electrolítico</p> <p>Alteración ortopédica que impida realizar el ejercicio</p>

Bloqueo A-V: Bloqueo auriculoventricular, PAD: Presión arterial diastólica, PAS: Presión arterial sistólica, SpO_2 : Saturación de oxígeno, O_2 : Oxígeno.

Tabla 2: Motivos para interrumpir la prueba cardiopulmonar de ejercicio.

Dolor torácico sugestivo de isquemia cardíaca
Cambios en el EKG sugestivos de isquemia
Arritmia compleja
Bloqueo A-V de segundo o tercer grado
Disminución > 20 mmHg en la PAS del valor más alto alcanzado durante la prueba
Hipertensión arterial (PAS > 250 mmHg o PAD > 120 mmHg)
Inicio súbito de palidez o diaforesis
Confusión mental o incoordinación
Signos de insuficiencia respiratoria
Desaturación de O ₂ grave (< 80%) cuando se acompañe de signos y síntomas de hipoxemia
Signos de falla respiratoria
Fatiga, debilidad o claudicación

Bloqueo A-V: Bloqueo auriculoventricular, EKG: Electrocardiograma, PAS: Presión arterial sistólica, O₂: Oxígeno.

banda sin fin puede llegar a ser una alternativa aceptable. En casos particulares, en que esta prueba esté indicada para la evaluación del ejercicio en situaciones especiales (alteraciones en extremidades inferiores o deportistas), se puede disponer de ergómetros específicos (ergómetro de brazos, PCPE portátil, etc.); sin embargo, estas últimas modalidades tienen menor sensibilidad para detectar limitación cardiopulmonar.^{3,14-16} En la *Tabla 3* se mencionan las principales diferencias entre ambas modalidades.

PCPE en banda sin fin:

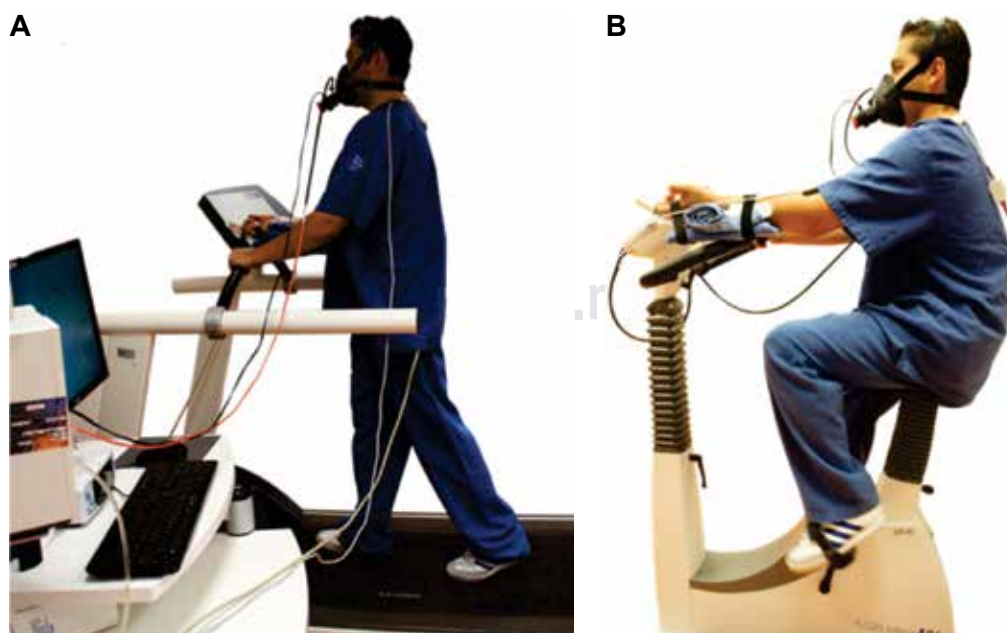
Consiste en una cinta sin fin que es movida por un motor eléctrico sobre la cual el paciente debe caminar a distintas velocidades e inclinación según el protocolo usado.

Ventajas: El caminar es una actividad más familiar que el ciclismo, es más fisiológico, no requiere de aprendizaje

Tabla 3: Principales diferencias entre las modalidades de la prueba cardiopulmonar de ejercicio.

Banda sin fin	Cicloergómetro
Caminar/correr es la actividad más cotidiana	Requiere coordinación de piernas
Mayor masa muscular es sometida a mayor trabajo	Se requiere mayor esfuerzo para mover las piernas
Mayor VO ₂ pico (> 5-10%)	VO ₂ pico menor
Difícil cuantificar con precisión el trabajo, (por lo tanto, el VO ₂ pico es un estimado)	La velocidad a la que se realiza el trabajo es fácilmente cuantificada
Más artefactos en las mediciones	Menos artefactos en las mediciones
Más costosa y ocupa más espacio	Más barata y menor espacio

VO₂: Consumo de oxígeno.

**Figura 1:**

Modalidades más comunes utilizadas en la clínica para la prueba cardiopulmonar de ejercicio:

- A) Banda sin fin,
B) Cicloergómetro.

previo y permite movilizar una mayor masa muscular. El consumo pico de oxígeno (VO_2 pico) suele ser 5-10% más alto en comparación con el obtenido en un cicloergómetro. Es una modalidad altamente recomendada en pacientes con obesidad y cardiopatía.

Desventajas: Existe un mayor riesgo de artefacto en el registro del ECG y de la tensión arterial. Algunos pacientes pueden sentirse inseguros y aferrarse a las barandillas lo que podría subestimar la capacidad de ejercicio. Es más costosa y requiere mayor espacio.^{3,14-16}

PCPE en cicloergómetro:

Es una bicicleta estática cuya carga de trabajo puede ser regulada. Es recomendado que durante la prueba se mantenga un «pedaleo» constante entre 55-65 revoluciones por minuto (rpm). El cicloergómetro puede tener dos tipos de frenado:

Freno electromecánico: Se aplica una resistencia fija al pedaleo regulando la potencia mediante fricción de bandas ajustables. Es un sistema barato, fácil de manejar y de calibrar y permite un registro nítido del electrocardiograma; sin embargo, es difícil cuantificar la carga porque requiere un ritmo constante de pedaleo (próximo a 55-65 rpm).^{3,14-16}

Freno electromagnético: Aplica una resistencia precisa y controlada de forma electromagnética. Permite mantener constante la potencia la cual es independiente de la fre-

cuencia de pedaleo. La medición del trabajo es más fiable porque depende poco de la colaboración del paciente. Es más costoso y difícil de calibrar.

Ventajas del cicloergómetro: Se puede cuantificar fácilmente la carga de trabajo. Genera pocos artefactos en la medición de la presión arterial, oximetría de pulso y el registro del EKG. Ocupa poco espacio y relativamente de menor costo que la banda sin fin.³

Desventajas del cicloergómetro: Requiere coordinación motora en las piernas; las personas no familiarizadas con el uso de la bicicleta, pueden mostrar dificultades para mantener un pedaleo constante. Implica esfuerzo para mover las piernas, especialmente en pacientes obesos. Se obtiene un VO_2 pico menor comparado con la banda sin fin.

Medición del flujo de aire (sensores de flujo)

Los sensores de flujo comprenden una gama de dispositivos que son colocados cerca de la boca y detectan el flujo aéreo de manera bidireccional. En las *Tablas 4 y 5* se mencionan los diferentes tipos de sensores de flujo y las diferencias entre ellos.

Las características principales de estos dispositivos son: ligeros, con pequeño espacio muerto, de baja resistencia al flujo durante el ejercicio y resistentes a los efectos del vapor de agua o la saliva que pueda llegar a acumularse.³

Analizadores de gases: Son instrumentos que miden la composición del gas inspirado y espirado durante la prueba

Tabla 4: Diferentes tipos de sensores de flujo.

Neumotacógrafo	Anemómetro de hilo caliente	Tubo pitot	Turbina de volumen
Mide la diferencia de presión a través de la resistencia conocida al flujo que ofrece una malla	Analiza la diferencia de temperatura entre dos filamentos metálicos colocados en la dirección del flujo	Mide la diferencia de presión entre orificios que reciben el flujo (frontal y perpendicular respecto a la dirección del flujo aéreo)	Lector de impulsos luminosos colocado en la corriente del flujo, cuenta el número de interrupciones del destello de luz. Calcula el volumen por un sistema computarizado

Tabla 5: Diferencias entre los tipos de sensores de flujo.

	Neumotacógrafo	Anemómetro de hilo caliente	Tubo pitot	Turbina de volumen
Saliva	Cambia la resistencia	Cambia la conductividad	No es afectada	Si se impacta en el lector cambia la inercia
Limpieza	Moderada	Moderada	Desechable	Moderada
Viscosidad del gas	Cambia la calibración	Independiente	Cambia la calibración	Independiente
Densidad del gas	Cambia la calibración	Independiente	Cambia la calibración	Independiente
Vapor de agua	La condensación cambia la resistencia	Condensación cambia la conductividad al calor	Se afecta poco	Condensación puede alterar la masa

y por lo tanto permiten la evaluación del intercambio de gases. Sus requerimientos son la estabilidad y la rapidez en la respuesta; esta última, a su vez, depende de dos componentes: el retraso en el transporte (tiempo requerido para que el gas llegue desde el lugar de muestreo al analizador) y de la respuesta del análisis (la cinética de la respuesta al cambio en la composición del gas introducido en el analizador). Ambos retrasos deberían tenerse en cuenta para el cálculo del retraso o rapidez de la señal. Actualmente el software del equipo permite compensar por retraso de transporte de gas (de 0.2 a 0.4 segundos).³ Los analizadores de gases son de dos tipos:

- **Espectrómetro de masas:** Es un instrumento que analiza la composición de los diferentes elementos químicos del aire (O_2 , CO_2 , incluso N_2). Se prefiere por su exactitud, gran precisión, alta estabilidad y rapidez de respuesta (20-50 mseg). Puede ser configurado para «ignorar» la presión de vapor de agua (proporcionando concentraciones de gas en condiciones de $PH_2O=0$ mmHg). Tiene un alto costo económico.
- **Analizadores independientes de O_2 y CO_2 :** Son comercialmente los más usados. Los más comunes son: para la medición del CO_2 , los analizadores de absorción de luz infrarroja; y para la medición del O_2 los paramagnéticos y los electroquímicos. Para eliminar el artefacto del vapor de agua, se utiliza un tubo de muestreo fabricado con polímero Nafion (sus grupos sulfidrilos absorben el vapor de agua sin retrasar el análisis de las señales de O_2 y CO_2).

Medición del intercambio respiratorio de gases

Implica la medición del volumen de O_2 y CO_2 que entra y sale de los pulmones durante un período dado de tiempo (generalmente intervalos de 1 minuto). El consumo de O_2 y la producción de CO_2 pueden ser medidos por la diferencia de O_2 y CO_2 que existe entre el aire inspirado y espirado.³ Los métodos usados para esta medición son:

Bolsa meteorológica: Es la técnica más simple para medir la fracción espirada de O_2 y CO_2 (FEO_2 y $FECO_2$) a través de la recolección de muestras de gas espirado. Al conocer la FiO_2 , la medición de FEO_2 , $FECO_2$ y del volumen ventilado, permite el cálculo del $\dot{V}O_2$ y $\dot{V}CO_2$:

$$\dot{V}O_2 = VI (FiO_2) - VE (FEO_2)/t$$

$$\dot{V}CO_2 = FE CO_2 (VE)/t$$

La desventaja que tiene es que el cálculo es inadecuado para aquel protocolo de ejercicio con incrementos rápidos de carga. Este método sólo se usa como una técnica de validación.³

Caja de mezclas: Es una caja de 6 L que permite el muestreo del gas espirado y la medición del VE, con la monitorización continua del $\dot{V}O_2$ y $\dot{V}CO_2$. Es adecuado para la medición de gases en un estado estacionario, pero en protocolo de tipo incremental tiene limitaciones para el análisis detallado de los gases respiratorios.

Técnica de respiración a respiración

Es un sistema automatizado que mide el $\dot{V}O_2$ sin la necesidad de reunir grandes volúmenes de gas o de realizar cualquier análisis o cálculo a mano. Utiliza un esquema para el procesamiento de las tres principales señales utilizadas en la PCPE: flujo, concentración de O_2 (%) y concentración de CO_2 (%). Con cada espiración, el tiempo espiratorio es dividido en segmentos (cada uno de 10 mseg de duración) y se mide por segmento el VE, $\dot{V}O_2$ y $\dot{V}CO_2$; posteriormente los valores de todos los segmentos se suman para obtener la VE, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ de la respiración, al final el resultado es extrapolado a un minuto de respiración.³

EKG

Durante la prueba se recomienda el registro de:

EKG de 12 derivaciones (en pacientes con sospecha o diagnóstico de enfermedad cardiovascular) para la detección de la enfermedad isquémica (depresiones del segmento ST y cambios en la onda T propios de la isquemia miocárdica) y arritmias secundarias al ejercicio.

EKG de 3 derivaciones (en pacientes jóvenes sin factores de riesgo o antecedentes de enfermedad cardíaca) para el registro de la frecuencia cardíaca y establecer el nivel de tolerancia del ejercicio, pero no para explorar la existencia de enfermedad.

Los electrodos deben ser colocados utilizando adhesivos resistentes al sudor y el diseño del circuito electrónico debe estar preparado para evitar los artefactos generados por los movimientos durante el ejercicio. El software debe permitir una monitorización continua de los complejos del EKG en la pantalla durante la PCPE.

Baumanómetro: La toma de la presión arterial suele ser imprecisa durante el transcurso de la prueba de ejercicio debida al incremento del ruido ambiental. Siendo más difícil de medir con la auscultación que con la palpación. Idealmente se debería de colocar un catéter arterial.

Oximetría de pulso: Es útil para la monitorización continua de la SpO_2 . El error de medición es de $\pm 3\%$ (pobre perfusión, pigmentación de la piel y movimientos del sensor). No puede medirse la PaO_2 , por lo que al presentarse una caída de la PaO_2 no necesariamente se reflejaría en una desaturación. Se recomienda que en caso de desaturación significativa (caída $> 5\%$), debería confirmarse con gasometría arterial.

Aunque el oxímetro de pulso tiene un papel central en la monitorización durante el ejercicio, no es útil para estimar los valores de PaO_2 arterial. Aunque no forma parte del estándar, en nuestro laboratorio colocamos catéter arterial con fines de realizar un análisis preciso del intercambio de gases.

Otros aditamentos

- Escala de Borg: Ésta debe de ser de un tamaño apropiado para que pueda ser de utilidad para pacientes con limitaciones visuales.
- Hoja de recolección de datos.
- Una silla de descanso o cama de exploración para el reposo y vigilancia del paciente posterior a la prueba de esfuerzo cardiopulmonar.
- Desfibrilador externo automático y carro rojo.
- Acceso a teléfono para casos de emergencia.

I. METODOLOGÍA

Control de calidad y calibración

El fabricante debe demostrar la calidad de las mediciones y la información sobre los métodos de medición; sin embargo, el usuario es el responsable de la calibración diaria del equipo. Siempre se debe de disponer de un libro de registro de las calibraciones e incidencias del equipo de medición o cambios en los procedimientos.

Durante el proceso de calibración debe:

- Registrar diariamente las condiciones ambientales (Presión barométrica, temperatura y vapor de H_2O).
- Se debe calibrar:
 - El medidor de flujo o volumen con una jeringa de precisión de 3 L.
 - Los analizadores de O_2 y CO_2 en tanques con mezclas de gases de alta precisión, como mínimo en 2 puntos (0 y 8% para CO_2 ; 13 y 21% para O_2).
 - El cicloergómetro se debe calibrar (revoluciones por minuto) cada 6 meses o cada vez que se traslade; la banda sin fin también debería ser calibrada, tanto en las revoluciones por minuto como en su grado de inclinación.
 - Las mediciones de ventilación y de los gases respiratorios se realizarán mediante la colección de bolsas de gas espirado mezclado (esta calibración puede ser muy laboriosa). La precisión para las variables básicas VO_2 , VCO_2 y VE debe ser de aproximadamente un 2-3%.
 - Para los transductores de presión deberá usarse un manómetro.

II. METODOLOGÍA

Aspectos del personal

El personal que trabajará en los cuidados del equipo y en la realización de las pruebas, debe contar con conocimientos básicos sobre la fisiología del ejercicio. Además, debe estar entrenado de forma adecuada para llevar a cabo la prueba y conocer las técnicas de resucitación cardiopulmonar. Un médico entrenado debe evaluar al paciente antes de la prueba, siempre supervisar la prueba e interpretar los resultados. El grado de supervisión durante la PCPE será determinado por el estado clínico del paciente y las características del protocolo de ejercicio.

III. METODOLOGÍA

Selección del protocolo de ejercicio

El objetivo de la prueba es la de provocar un incremento de los requerimientos energéticos mediante una carga de trabajo controlada para evaluar la reserva funcional de los órganos y sistemas involucrados en la respuesta al ejercicio; a esta forma sistemática de realizar ejercicio se le denomina «*protocolo*». Los protocolos en la prueba de ejercicio se clasifican de acuerdo con el trabajo realizado en: ***protocolo incremental*** (que puede ser incremental en rampa o incremental en escalera), ***protocolo de carga constante*** y ***protocolo interválico o discontinuo***.

Protocolo incremental

Es el protocolo más usado, consiste en un incremento progresivo de la carga de trabajo hasta llegar al límite de la tolerancia del paciente que está determinada por la presencia de síntomas; esto permite la evaluación de la respuesta a un amplio espectro de intensidades de ejercicio durante un período relativamente corto de tiempo. Este protocolo está recomendado para evaluar, tanto el perfil de la respuesta biológica durante el ejercicio submáximo como en ejercicio máximo.^{3,15-18} Este protocolo puede ser llevado a cabo en las distintas modalidades de la prueba:

- a. En cicloergómetro, el incremento se logra aumentando la resistencia impuesta a través del pedal. En esta modalidad, el protocolo consta de 4 etapas (Tabla 6).
- b. En banda sin fin, el incremento se logra aumentando la velocidad y la inclinación. En caso de utilizar esta modalidad se aconseja, por su simplicidad, el protocolo modificado de Balke, que consiste en el mantenimiento de una velocidad constante del tapiz (entre 3 y 5.3 km/h) y la programación de incrementos de pendiente (entre el 1 y 2% por minuto) hasta alcanzar la presencia de síntomas limitantes.

Tabla 6: Etapas del protocolo incremental.

Etapa	Característica	Duración	Mediciones
Reposo	Ausencia total de pedaleo	3 minutos	Presión arterial, SpO ₂ , BORG para disnea y fatiga al final de la etapa Gasometría arterial si cuenta con línea arterial
Calentamiento	Pedaleo sin carga o mínima carga	3 minutos	Presión arterial, SpO ₂ , BORG para disnea y fatiga al final de la etapa
Incremental	Incremento en rampa de la resistencia al pedaleo (5-25] Watts/min dependiendo de las características del paciente)	Variable (8-10 minutos), depende del estado funcional del paciente	Presión arterial, SpO ₂ , BORG para disnea y fatiga cada 2 minutos y cuando el paciente alcance umbral anaeróbico y esfuerzo máximo Gasometría arterial si cuenta con línea arterial en el umbral anaeróbico y esfuerzo máximo
Recuperación	Se retira la resistencia del cicloergómetro, permitiendo que el paciente se recupere y los signos vitales regresen de forma paulatina a niveles de reposo	Al menos 5 minutos	Presión arterial, SpO ₂ , BORG para disnea y fatiga al minuto, a los 3 y a los 5 minutos

SpO₂: saturación de oxígeno.

En cardiología, los protocolos incrementales son utilizados para evaluar pacientes con sospecha de cardiopatía isquémica. Los protocolos se clasifican dependiendo de la carga implementada, la inclinación y la duración de la prueba. Algunos son: Protocolo de Bruce, Bruce modificado, Balke o Naughton. La descripción detallada de estos protocolos sale del objetivo de este manuscrito.^{4,5}

Protocolos a carga constante

Cuando un sujeto realiza ejercicio a una carga constante de intensidad moderada, inferior al umbral láctico, suele alcanzar un VO₂ estable (estado estacionario) y puede prolongar la duración del ejercicio. Este protocolo consiste en aumentar la carga hasta un nivel a partir del cual se mantiene estable durante un tiempo preestablecido o el tiempo que el paciente tolere. Se mide el tiempo que el paciente «resiste» hacer ejercicio ante una carga constante de trabajo. La utilidad de este tipo de protocolos con carga constante es la de evaluar si el sujeto es capaz de sostener un determinado nivel de ejercicio submáximo durante un período relativamente prolongado de tiempo y la de monitorizar la respuesta a la intervención (rehabilitación cardiopulmonar, broncodilatadores, dispositivos médicos). Mientras más eficaz es la intervención, mayor será el tiempo de «resistencia». Para realizar el protocolo de carga constante, es necesario haber realizado una PCPE con protocolo incremental; así, cuando se realice el protocolo de carga constante, el trabajo máximo al que se someterá al paciente corresponderá al 50-70% del alcanzado durante el protocolo incremental.^{3,14-18}

IV. METODOLOGÍA

Preparación del paciente

Antes de empezar a preparar al paciente, deberán tomarse en cuenta algunos aspectos:

1. Se debe contar con el equipo y material adecuado:

- Equipo de ejercicio: En nuestro laboratorio es el equipo Oxycon Pro (Jaeger, Germany). El equipo debe tener instalado el sensor de flujo así como los analizadores de CO₂ y O₂
- Equipo de medición del intercambio de gases (bolsa meteorológica, técnica de respiración a respiración o caja de mezclas)
- Cicloergómetro (calibrado para trabajo en Watts y velocidad)
- Oxímetro de pulso
- Baumanómetro y estetoscopio
- Desfibrilador y carro de emergencia disponibles y funcionales
- Jeringas de 1 mL
- Heparina
- Agujas 25 o 27 G
- Escala de disnea y fatiga Borg
- Boquillas
- Mascarilla con arnés
- Electrodos y software de EKG
- Gasas
- Bata de examen médico
- Escala de Borg de tamaño apropiado para que pue-

da ser de utilidad para pacientes con limitaciones visuales

- q. Hoja de recolección de datos
- r. Una silla de descanso o cama de exploración para el reposo y vigilancia del paciente posterior a la prueba
- s. Acceso a teléfono para casos de emergencia
- t. En aquellos casos en quienes sea necesario analizar gases sanguíneos por gasometría arterial se requiere:
 - i. Gasómetro disponible y calibrado
 - ii. Personal entrenado y capacitado
 - iii. Jeringas de insulina
 - iv. Jeringas de 3 mL
 - v. Algodón con alcohol
 - vi. Guantes
 - vii. Catéter arterial No. 18 (color verde)
 - viii. Heparina
 - ix. Lidocaína
 - x. Soporte de brazos
 - xi. Campos estériles
 - xii. Adaptador del catéter para la toma de muestras
 - xiii. Cinta adhesiva transpore M3

2. Indicaciones al paciente previo al estudio:

- a. Deberá vestir ropa cómoda y ligera, con zapatos adecuados para realizar ejercicio.
- b. Si la prueba se realiza por la mañana o por la tarde, el paciente puede ingerir una comida ligera previamente, pero debe cumplir un ayuno de 2 horas.
- c. Debe evitar tabaquismo activo o pasivo y bebidas alcohólicas, al menos 4 horas antes de la prueba.
- d. Debe utilizar sus medicamentos de base en la forma habitual.
- e. El paciente no deberá haber realizado ejercicio vigoroso un día previo al procedimiento.

3. Prepare al paciente para la prueba:

- 1. El médico y el técnico que realizarán la prueba reciben y se presentan con el paciente. **Nota:** La prueba es segura; el riesgo de muerte es de 2-5 por cada 100,000 pruebas realizadas y el riesgo está relacionado con la enfermedad subyacente. Siempre debe estar un médico presente durante la realización de la prueba.
- 2. El médico debe:
 - a. Confirmar que el nombre completo coincida con la solicitud médica y con el número de registro.
 - b. Registrar el (los) diagnóstico (s) y las razones por las cuales solicitan el examen.
 - c. Realizar un breve interrogatorio y exploración física tratando de identificar posibles contrain-

dicaciones o datos clínicos de exacerbación de enfermedad que no permitan realizar la prueba.

- d. Registrar el uso de medicamentos (broncodilatores, antihipertensivos y beta bloqueadores), de estudios paramédicos (función pulmonar, gases arteriales, radiografía del tórax, química sanguínea, etc.) y de síntomas actuales (dolor en tórax, disnea, sibilancias, etc.)
- e. Explicar brevemente el procedimiento y responder las inquietudes del paciente, entregándose consentimiento informado (describiendo en forma exacta el procedimiento con sus potenciales riesgos incluyendo la muerte) para que sea firmado por el paciente en presencia de uno o dos testigos. La explicación debe incluir:
 - i. Información sobre la prueba y del equipo utilizado
 - ii. Instrucciones de cómo comunicarse con el personal
 - iii. Los motivos de interrupción de la prueba
 - iv. Ilustrar cómo efectuar el pedaleo en el cicloergómetro, manteniendo un pedaleo durante toda la prueba y a una velocidad constante (55-65 rpm).
- 3. Se registra el peso, la estatura y la edad en años cumplidos al día de la prueba.
- 4. Debe realizarse en reposo una espirometría forzada de acuerdo con los estándares ATS/ERS 2005 y se debe de medir la capacidad inspiratoria y la ventilación voluntaria máxima.
- 5. Se colocarán los electrodos de 12 derivaciones con la modificación del electrocardiograma estándar de Mason-Likar que consiste en colocar los electrodos de las extremidades al tórax con la finalidad de reducir los artefactos por movimiento. Los electrodos de los brazos se colocarán en el punto más lateral de las fosas infraclaviculares y los electrodos de las piernas deben quedar por arriba de la cresta ilíaca anterior y por debajo de la caja costal. Los electrodos precordiales se colocarán en la forma habitual del electrocardiograma. Se requiere de una colocación meticulosa de los electrodos para disminuir la interferencia.
- 6. Se colocará catéter arterial en arteria radial de la mano no dominante siempre y cuando la prueba de Allen sea positiva (*Figura 2*).
- 7. Se le pedirá al paciente que suba al cicloergómetro; verificando que la altura del asiento sea la adecuada y que los pies se encuentren sujetos firmemente a los pedales. Se le pide al paciente que realice una práctica breve con el cicloergómetro antes de iniciar la prueba para que se sienta confortable en el cicloergómetro.

8. Coloque el brazalete del esfigmomanómetro y oxímetro de pulso y registre las mediciones en reposo.
9. Es importante mencionar que la medición de la presión arterial se puede realizar de forma directa por método invasivo a través del catéter intraarterial conectado a un transductor de presión calibrado para la medición continua.
10. Coloque la boquilla con su correspondiente mascarilla, ajustándola para evitar fugas y solicitará al paciente que respire normalmente (Figura 3).

4. *Explique la prueba antes de iniciar con el procedimiento:*

- a. El propósito del estudio: es una prueba de esfuerzo máximo limitada por síntomas (fatiga, disnea, dolor torácico, dolor de piernas o no poder mantener el pedaleo constante). Se debe insistir en la necesidad de alcanzar el objetivo del examen: lograr frecuencia cardíaca máxima, trabajo máximo o desarrollo de síntomas limitantes.
- b. Todo el tiempo de la prueba se respirará por la boquilla (o mascarilla) en la que han realizado las otras pruebas.
- c. Se enseñará la Escala de Borg y registrará los valores de reposo para disnea y fatiga de miembros inferiores; se explicará que estas mediciones serán obtenidas también durante el ejercicio.
- d. Se le recordará por último la importancia de mantener el pedaleo constante (55-65 rpm).

5. *Seleccione el protocolo de ejercicio a realizar:*

El protocolo de carga incremental es el utilizado actualmente en el Laboratorio de Fisiología Respiratoria (INER) y consta de las siguientes etapas y mediciones (Tabla 6):



Figura 2: Colocación de la línea arterial, posterior a una prueba de Allen positiva.



Figura 3: Preparación del paciente previo al inicio de la PCPE.

6. *Inicie la prueba:*

- a. Pasada la etapa de reposo (3 minutos) y de pedaleo sin carga (3 minutos) se inicia el ejercicio con carga progresiva.
- b. Debe revisarse permanentemente la conexión de los cables, la adecuada posición de la mascarilla y velocidad de pedaleo.
- c. Para obtener el esfuerzo máximo del paciente, constantemente se le debe estar motivando para que continúe la prueba.
- d. Una vez finalizado el examen se debe permitir que el paciente descanse y se recupere en la silla de descanso o cama de exploración. Comprobando que la tensión arterial, saturación de O₂, ritmo y frecuencia cardíaca sean normales o recuperen los valores de reposo antes de permitir su salida. Se recomienda observación por 1 hora.

Informe

En el informe final debe contar con el nombre del paciente y los datos antropométricos, características específicas de la prueba (modalidad y protocolo) y debe contar con la información de las variables en valores absolutos, por-

centaje del predicho así como los gráficos de las pruebas respiratorias estáticas así como de la PECP en las diferentes etapas del ejercicio.

Aunque la evaluación de los resultados debe ser siempre sistemática y minuciosa, la interpretación debe estar enfocada al motivo por el cual se indicó el estudio, a los antecedentes patológicos y farmacológicos del paciente.

Para la interpretación de la prueba es importante contar con los datos señalados en la *Tabla 7*.

PRINCIPIOS DE INTERPRETACIÓN DE LA PCPE

Son múltiples los factores responsables de la limitación al ejercicio. Lo importante es lograr identificar cuáles de ellos son los responsables y qué importancia tienen en la respuesta al ejercicio. Tradicionalmente se puede clasificar la limitación como cardiovascular, respiratoria, o incluso de los dos tipos. De la misma forma muchos pacientes se

Tabla 7: Parámetros utilizados en el análisis del trabajo, ventilación, función cardiovascular y función muscular para la interpretación de la prueba cardiopulmonar de ejercicio.

Trabajo realizado	Ventilación e intercambio gaseoso	Función cardiovascular	Función muscular
Carga de ejercicio (Watts)	Ventilación minuto (VE)	Frecuencia cardíaca máxima (FC máxima)	Acidosis metabólica
Umbral anaeróbico (UA)	Frecuencia respiratoria (FR)	Pulso de O ₂ (VO ₂ /FC)	Lactato
Tasa de intercambio respiratorio (RER)	Reserva respiratoria (VE/V _M)	Reserva cardíaca	BORG fatiga en piernas
VO ₂ máximo o pico (L)	Eficiencia de la ventilación (EqCO ₂ y EqO ₂)	EKG	
VO ₂ /kg/min	SpO ₂ , PaO ₂ , PaCO ₂	Respuesta presora	
FC máxima	Espacio muerto (V _d /V _t) Volúmenes pulmonares dinámicos (EELV, IC) BORG para disnea		

EELV: Volumen al final de la espiración, EKG: Electrocardiograma, EqCO₂: Equivalente de bióxido de carbono, EqO₂: Equivalente para oxígeno, FC: Frecuencia cardíaca, FR: Frecuencia respiratoria, IC: Capacidad inspiratoria, RER: Índice de intercambio respiratorio, SpO₂: Saturación de oxígeno, UA: Umbral anaeróbico, V_d: Volumen muerto, VE: Ventilación minuto, VO₂: Consumo de oxígeno, V_t: Volumen corriente, V_M: Ventilación voluntaria máxima.

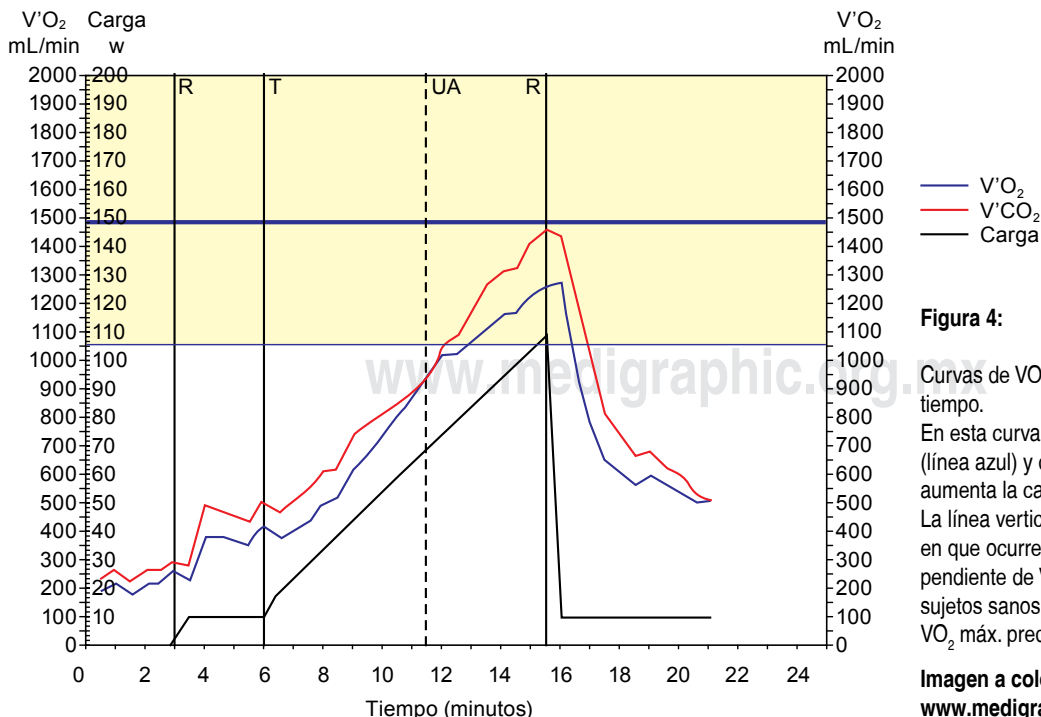


Figura 4:

Curvas de VO₂ y VCO₂ en relación con el tiempo. En esta curva se observa el incremento de VO₂ (línea azul) y de la VCO₂ (línea roja) conforme aumenta la carga impuesta (línea negra). La línea vertical punteada indica en el momento en que ocurre el umbral anaeróbico (ambas pendiente de VO₂ y de VCO₂ se cruzan). En sujetos sanos debe estar entre el 40-60% del VO₂ máx. predicho.

Imagen a color en:
www.medigraphic.com/neumologia

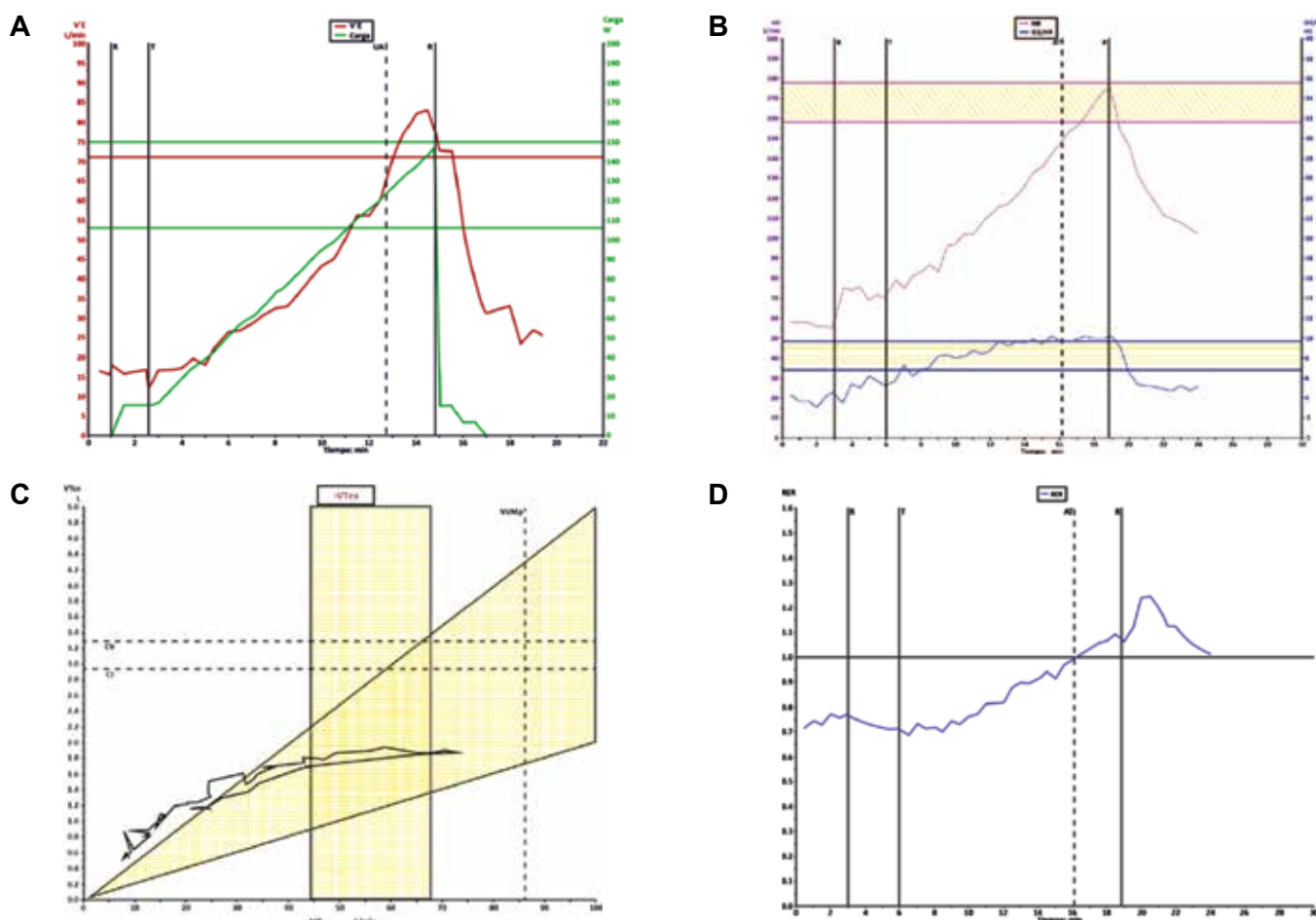


Figura 5: Gráficas que se reportan en la PCPE. **A)** Relación de la carga (Watts) y la VE con el tiempo. **B)** Parámetros cardíacos (HR y VO_2/HR) en relación con el tiempo. **C)** Vt en relación con la VE. **D)** UA evaluado por RER (línea vertical punteada).

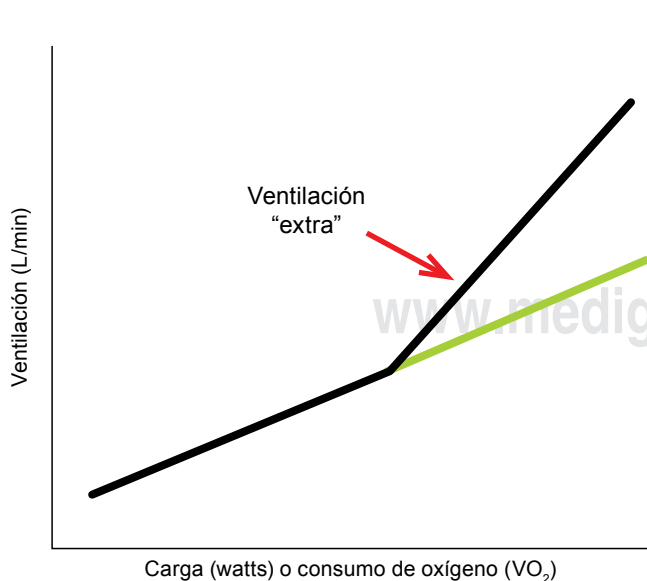


Figura 6: La ventilación minuto (Ve) en respuesta al trabajo impuesto (Watts) o al consumo de oxígeno logrado (VO_2).

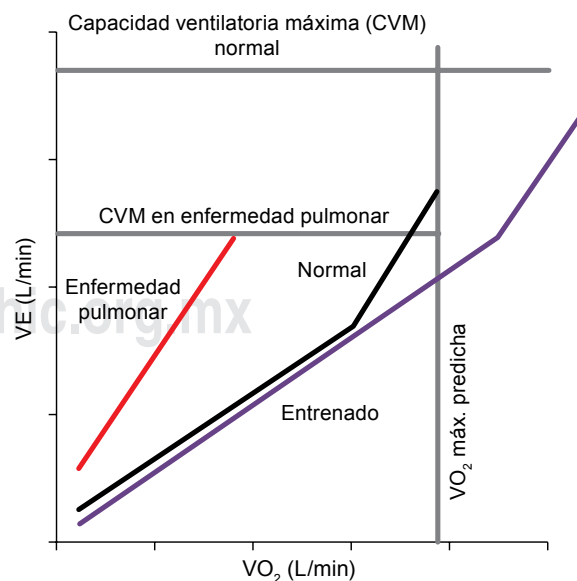


Figura 7: Respuesta respiratoria durante el ejercicio en diferentes situaciones clínicas.

limitarán por síntomas y suspenderán el ejercicio antes de alcanzar alguno de estos límites fisiológicos.

Una visión integrada de las variables que intervienen en la respuesta normal al ejercicio es por lo tanto necesaria y se resaltan algunos puntos que deben tenerse en cuenta en el momento de interpretar la prueba:

1. Determinar la razón por la cual se solicita la prueba.
2. Revisión de la información clínica y los exámenes previos del paciente.
3. Evalúe la calidad de la prueba, el esfuerzo realizado por el paciente y la razón de suspensión de la prueba.
4. Evalúe las variables claves VO_2 , carga, FC, VE, SpO_2 , etcétera.
5. Evalúe las variables numérica y gráficamente (*Figuras 4-7*).
6. Ponga especial atención a las tendencias o características de las respuestas fisiológicas (respuesta máxima o submáxima).
7. Compare los valores medidos con los de referencia.

8. Determine el tipo de limitación al ejercicio (fisiológica o no fisiológica).
9. Considere qué condiciones clínicas se relacionan con las características de la respuesta al ejercicio.
10. Finalmente correlacione el resultado con el estado funcional del paciente.

Patrones de respuesta al ejercicio

Aunque la respuesta al ejercicio se modifica por varios factores, se han descrito algunos patrones usuales de comportamiento durante el ejercicio en diversas condiciones clínicas que pueden ser de utilidad en la interpretación de esta prueba^{1-3,15-18} y que se muestran en la *Tabla 8*.

CONCLUSIONES

La PCPE es la mejor herramienta disponible para evaluar la capacidad de ejercicio tanto en condiciones de salud como de enfermedad. El consumo máximo de oxígeno es

Tabla 8: Patrones básicos de la función cardiopulmonar.

	Sano	Enfermedad cardíaca	Enfermedad obstructiva	Enfermedad intersticial	Enfermedad vascular	Neuromuscular	Desacondicionamiento	Obeso
VO_2 máx.	N	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓ (normal para el peso ideal)
O_2/HR	N	↓	↓	No ↓	↓	↓	↓	N
FC pico	N	Variable, norma en leve	Variable, norma en leve	↓	↓	No baja	No ↓	N
Reserva cardíaca	Ausente (< 20 lpm)	Ausente o pequeño (20 lpm)	Grande (> 30 lpm)	Ausente o pequeño (20 lpm)	Ausente o pequeño (20 lpm)	Grande (> 30 lpm)	Grande (> 30 lpm)	N
VE máx./VVM	< 0.8	< 0.8	> 0.8	< 0.8	< 0.8	< 0.8	< 0.8	< 0.8
UA	Presente (40-60% de VO_2 máx. predicho)	Variable (< 30% de VO_2 máx. predicho)	Variable (40-60% de VO_2 máx. predicho)	Presente (40-60% de VO_2 máx. predicho)	Presente (40-60% de VO_2 máx. predicho)	Presente (40-60% de VO_2 máx. predicho)	Presente (40-60% de VO_2 máx. predicho)	Presente (40-60% de VO_2 máx. predicho)
VD/VT	↓	↓	↓	↑ o sin cambio	↑ o sin cambio	↓	↓	↓
SaO_2	N	N	↓	↓	↓	N	N	N
PaO_2	N	N	Variable	↓	↓	N	N	N
PETCO ₂	↓	↓	↑ o sin cambio	↓	↓	↓	↑ sin cambio	↑ o sin cambio
GA-a	N	N	↑	↑	↑	N	N	No ↓

VO_2 máx. (consumo máximo de O_2), O_2/HR (pulso de O_2), FC pico (frecuencia cardíaca pico), VE máx./VVM (reserva ventilatoria), UA (umbral ventilatorio), VD/VT (espacio muerto), SaO_2 (Saturación de O_2), PaO_2 (Presión arterial de O_2), PETCO₂ (CO_2 al final de la espiración), GA-a (gradiente alvéolo-arterial de O_2).
N: normal, ↑: aumentado, ↓: disminuido, lpm: latidos por minuto.

un sólido predictor de mortalidad de cualquier causa, especialmente, en pacientes con enfermedades cardiovasculares o respiratorias. La estandarización de la PCPE permite obtener mediciones fisiológicas confiables que permitan analizar el pronóstico y la respuesta a los tratamientos instituidos. Consideramos que el especialista en medicina respiratoria debe contar con las habilidades y destrezas para realizar e interpretar apropiadamente la PCPE.

REFERENCIAS

1. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Whipp BJ, Casaburi R. *Principles of exercise testing and interpretation: including pathophysiology and clinical applications*. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 1999.p.xv.
2. Forman DE, Myers J, Lavie CJ, Guazzi M, Celli B, Arena R. *Cardiopulmonary exercise testing: relevant but underused*. Postgrad Med 2010;122(6):68-86. doi: 10.3810/pgm.2010.11.2225.
3. American Thoracic Society; American College of Chest Physicians. *ATS/ACCP Statement on cardiopulmonary exercise testing*. Am J Respir Crit Care Med 2003;167(2):211-277.
4. Gibbons RJ, Balady GJ, Beasley JW, et al. *ACC/AHA Guidelines for Exercise Testing. A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (Committee on Exercise Testing)*. J Am Coll Cardiol 1997;30(1):260-311.
5. Stelken AM, Younis LT, Jennison SH, et al. *Prognostic value of cardiopulmonary exercise testing using percent achieved of predicted peak oxygen uptake for patients with ischemic and dilated cardiomyopathy*. J Am Coll Cardiol 1996;27(2):345-352.
6. Hamilton AL, Killian KJ, Summers E, Jones NL. *Muscle strength, symptom intensity, and exercise capacity in patients with cardiorespiratory disorders*. Am J Respir Crit Care Med 1995;152(6 Pt 1):2021-2031.
7. Gallagher CG. *Exercise limitation and clinical exercise testing in chronic obstructive pulmonary disease*. Clin Chest Med 1994;15(2):305-326.
8. Carlin BW, Clausen JL, Ries AL. *The effects of exercise testing on the prescription of oxygen therapy*. Chest 1994;106(2):361-365.
9. Garfinkel SK, Kesten S, Chapman KR, Rebuck AS. *Physiologic and nonphysiologic determinants of aerobic fitness in mild to moderate asthma*. Am Rev Respir Dis 1992;145(4 Pt 1):741-745.
10. Sun XG, Hansen JE, Oudiz RJ, Wasserman K. *Exercise pathophysiology in patients with primary pulmonary hypertension*. Circulation 2001;104(4):429-435.
11. Rubin LJ. *Primary pulmonary hypertension*. Chest 1993;104(1):236-250.
12. Bolliger CT, Jordan P, Soler M, et al. *Exercise capacity as a predictor of postoperative complications in lung resection candidates*. Am J Respir Crit Care Med 1995;151(5):1472-1480.
13. Bolliger CT, Perruchoud AP. *Functional evaluation of the lung resection candidate*. Eur Respir J 1998;11(1):198-212.
14. Morice RC, Peters EJ, Ryan MB, Putnam JB, Ali MK, Roth JA. *Redefining the lowest exercise peak oxygen consumption acceptable for lung resection of high risk patients*. Chest 1996;110(4 Suppl):161S.
15. Cooper BCh, Storer WT. *Exercise testing and interpretation: a practical approach*. UK: Cambridge University Press; 2001.p.149-180.
16. Roca RRJ. *Clinical exercise testing*. Eur Respir Mon 2005;31:146-165.
17. Mezzani A, Agostoni P, Cohen-Solal A, 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 Rehabil 2009;16(3):249-267. doi: 10.1097/HJR.0b013e32832914c8.
18. Luks AM, Glenny RW, Robertson HT. *Introduction to cardiopulmonary exercise testing*. 2nd Ed. USA: Springer-Verlag; 2013.p.1-10.

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.