

Introducción a las Pruebas de Esfuerzo

Dr. Orlando R. López Jové

Laboratorio Pulmonar

Hospital del Tórax "Dr. Antonio A. Cetrángolo"

Miembro del Comité de Selección y Evaluación de la Carrera de Médico Especialista en Neumonología de la Universidad de Buenos Aires (Ex Director Asociado)

Las PE pueden ayudar a descubrir enfermedades coexistentes, son útiles para evaluar la tolerancia del paciente al esfuerzo, y la saturación de oxígeno que no puede ser predicha por otros tests de función pulmonar.

Las pruebas de esfuerzo (PE) en su conjunto tienen la particularidad de poner en juego las reservas del sujeto, fundamentalmente cardiovascular y respiratoria, pero también sanguínea y metabólica. Han sido pensadas para evaluar aspectos que escapan a las pruebas de reposo en sus diferentes modalidades. Tienen diferente grado de complejidad, y miden magnitudes que reflejan distintos aspectos de la fisiología.

Hay conceptos básicos que es conveniente definir en forma precisa:

La **actividad física** es definida como cualquier movimiento producido por la contracción muscular esquelética, que resulta en un consumo energético más allá del consumo de reposo.

El **ejercicio** es un tipo de actividad física que es planeada, estructurada, repetitiva, y a propósito en el sentido de mejorar o mantener el entrenamiento físico.

El **entrenamiento físico** es una fase posterior o avanzada del sujeto entrenado mediante ejercicio adecuado, en la cual también está implícita la práctica de actividades deportivas que generan una adaptación del individuo. La combinación de **frecuencia, intensidad y duración del ejercicio** continuado ha sido efectiva para producir el efecto de entrenamiento. La interacción de estos factores provee el estímulo de sobrecarga. En general, mientras más bajo sea el estímulo, menor será el efecto de entrenamiento, y mientras más alto sea el estímulo, mayor será dicho efecto, hasta un punto más allá del cual el exceso puede resultar perjudicial. El individuo entrenado es aquel que ante el ejercicio máximo puede experimentar cambios de gran magnitud tanto metabólicos, respiratorios, circulatorios y endócrinos. Todas estas adaptaciones son reversibles, si la persona deja de entrenar pierde todas estas adaptaciones; Es decir que la fuerza muscular y la capacidad cardiorrespiratoria dependen del ejercicio. Mantener un hábito sedentario lleva al **desacondicionamiento** físico.

Bases fisiológicas: Durante la actividad física, el consumo de O₂ (V'O₂) necesario para la oxidación de diferentes sustratos metabólicos (ciclo de Krebs) da lugar a la síntesis de moléculas con alto contenido energético (adenosín-trifosfato –ATP- y fosfocreatina –PCr-) que se utilizan para el desarrollo de la contracción muscular y el mantenimiento de la actividad metabólica celular. Los productos catabólicos resultantes de la respiración mitocondrial son esencialmente: CO₂ y agua.

La **actividad física** implica un aumento de la demanda celular de O₂, que determina una rápida respuesta fisiológica de todas las funciones implicadas en el transporte de O₂ desde la atmósfera a la mitocondria con el objetivo de aumentar el aporte de O₂: a) en el aparato respiratorio (ventilación e intercambio de gases); b) en el aparato cardiocirculatorio aumentando el

débito cardíaco, y mejorando la microcirculación del músculo esquelético para aumentar la extracción de O₂.

Durante la **actividad física intensa** el organismo puede producir energía de forma transitoria y menos eficiente a través de la glucólisis anaeróbica, con producción creciente de ácido láctico. Este será tamponado con bicarbonato de sodio, con producción de lactato de sodio, y ácido carbónico; éste se disocia en agua y dióxido de carbono, de lo que resulta una fuente adicional de CO₂. y mayor ventilación (V'E), de utilidad para detectar el llamado umbral de lactato o umbral anaeróbico.

Podemos clasificar las pruebas de esfuerzo (PE) para su estudio según su grado de complejidad, desde las más simples, que son las pruebas de caminata (de seis minutos, shuttle test), pasando por la más difundida prueba ergométrica graduada con monitoreo electrocardiográfico continuo, hasta la más compleja que es la prueba de esfuerzo cardiopulmonar o cardiorrespiratoria, con colocación de catéteres intravasculares (para medición de gases en sangre de la arteria radial, o presión, p.ej., en la arteria pulmonar), o sin ellos. Nos referiremos a la prueba de caminata de 6 minutos, a la prueba de esfuerzo cardiopulmonar, y a la prueba de provocación bronquial por esfuerzo, que son las más difundidas en neumonología. La prueba ergométrica graduada o ergometría tiene amplia aplicación en cardiología como "puerta de entrada a la cardiopatía isquémica".

Según el tipo de esfuerzo realizado, las PE pueden agruparse en **máximas** (con un esfuerzo máximo, sea éste determinado por síntomas, "no da más", o por parámetros funcionales que lo definen como el máximo consumo de O₂ que puede alcanzar el sujeto), o **submáximas** (con un esfuerzo submáximo determinado previamente hasta alcanzar, p.ej., una frecuencia cardíaca dada). Las PE pueden también clasificarse según el tipo de protocolo utilizado (Incremental/ de carga constante, Escaleriforme/ en rampa, etc.), el dispositivo (cicloergómetro/ cinta ergométrica), etc., descripciones que exceden el objetivo de esta exposición.

No se deben realizar las pruebas de esfuerzo en las siguientes situaciones:

Tabla 1

Contraindicaciones Absolutas de las pruebas de esfuerzo en general

1. Angor inestable o IAM en el mes previo.
2. HTA inestable (PAS >180 PAD >100).
3. Arritmia no controlada o frecuencia cardíaca basal > 120/min.

Contraindicaciones Relativas

1. Dificultad en la comprensión del test y falta de colaboración.
2. Trastornos musculoesqueléticos que dificulten la realización del esfuerzo.

Pruebas de caminata o marcha

Las pruebas de caminata o marcha consisten sencillamente en caminar cubriendo la mayor distancia posible en el tiempo dado, asimilándolas al Test de Cooper de los deportistas. Comenzaron a utilizarse en la década de 1970 como test de 12 min. Cuando se compararon las diferentes pruebas minutadas, se comprobó que la de 6 minutos es mejor tolerada por los pacientes, permite su repetición, y es más confiable que la de 2 minutos, reflejando mejor las actividades diarias.

La medición de la distancia durante la prueba de caminata o prueba de marcha de 6 minutos (PM6M) es una forma simple y reproducible de determinar tolerancia al ejercicio. Las principales ventajas de las pruebas de caminata, son su simplicidad, y los mínimos requerimientos tecnológicos: un pasillo llano, un supervisor y un oxímetro de pulso. Por lo tanto resulta económico y de gran aplicación, utilizando una actividad cotidiana y que puede ser llevada a cabo por casi todos los pacientes, salvo los más comprometidos. El caminar se considera, junto con el respirar, oír, ver, y el hablar, una de las cinco actividades más importantes de la vida.

Al realizar el ejercicio ponemos a prueba simultáneamente todos los aparatos involucrados para ello, por ende se evalúa en forma global e integrada la respuesta de los mismos, principalmente el respiratorio y el cardiovascular (circulación central y periférica), metabolismo y sistema musculoesquelético.

El ejercicio realizado es submáximo; esto implica que no hay un parámetro que refleje la máxima capacidad del sujeto, como el Consumo de Oxígeno máximo ($V'O_2max$), pero en contraparte, refleja más adecuadamente las limitaciones para las actividades habituales.

Existen ecuaciones para obtener valores de referencia de los metros caminados en adultos sanos.

Las principales desventajas de estos estudios son que requieren motivación del paciente y del supervisor, la falta de estandarización, y la gran dependencia cuantitativa de la distancia recorrida.

Se deben considerar los factores que generan variabilidad de la prueba:

1)Reducen la distancia recorrida: Edad avanzada, Sexo femenino, obesidad, baja talla, enfermedad pulmonar, cardiovascular y musculoesquelética, deterioro cognitivo, pasillo corto (la longitud más adecuada es entre 20 y 30m).

2)Incrementan la distancia recorrida: Talla alta, sexo masculino, alta motivación, experiencia previa en el test, pasillo largo, suplementación de oxígeno en pacientes con hipoxemia inducida por el esfuerzo.

Indicaciones:

Las indicaciones del test de 6 minutos son dirigidas fundamentalmente a evaluar respuesta al tratamiento y como predictor de morbi-mortalidad, en pacientes con enfermedad pulmonar o cardíaca, moderada a severa. (Tabla 2)

Tabla 2

Indicaciones del Test de 6 minutos

- 1) Pacientes con EPOC, Enfermedades del intersticio pulmonar (fibrosis, sarcoidosis, toxicidad por drogas, enfermedades ocupacionales), secuelas pulmonares.
 - a) Evaluar desaturación con el esfuerzo,
 - b) Titular requerimiento de O₂,
 - c) Evaluar respuesta al tratamiento ,
 - d) Predictor de morbimortalidad
- 2) Insuficiencia Cardíaca
 - a) Evaluar respuesta al tratamiento,
 - b) Predictor de morbi-mortalidad
- 3) Evaluación preoperatoria (Predictor de morbimortalidad, Evaluar respuesta al tratamiento) de cirugía
 - a) de resección pulmonar,
 - b) de reducción volumétrica del enfisema pulmonar, y
 - c) pretransplante
- 4) Programas de rehabilitación cardiopulmonar (variable relacionada con sobrevida)
- 5) Enfermedad vascular periférica
- 6) Hipertensión pulmonar primaria (Evaluar respuesta a tratamiento)
- 7) Evaluar compromiso pulmonar en colagenopatías.

Tabla 3

Contraindicaciones del Test de 6 minutos.

- Las Contraindicaciones son las de las pruebas de esfuerzo en general, y cuando existe una saturación de reposo de O₂ < 90 %

Interrupción del test

1. Dolor precordial
2. Disnea intolerable
3. Imposibilidad para continuar la marcha
4. Caída de la saturación arterial por debajo de 86%.

Prueba de Esfuerzo Cardiopulmonar

En la Prueba de Esfuerzo Cardiopulmonar (PECP) o con evaluación del intercambio gaseoso, medimos continuamente durante todo el esfuerzo, a través de una pieza bucal o máscara, la ventilación ($V'E$), y la concentración fraccional de O_2 (FeO_2) y CO_2 ($FeCO_2$) en el gas exhalado. Calculando la diferencia entre la concentración fraccional inhalada (FiO_2) y exhalada, y el volumen de gas (a través de $V'E$), podemos hallar el consumo de O_2 ($V'O_2$) y la producción de CO_2 ($V'CO_2$), y la relación entre ambos llamada Cociente Respiratorio (R, RQ o $V'CO_2/V'O_2$). También la relación entre los dos primeros y la $V'E$ llamados respectivamente equivalente ventilatorio del oxígeno ($V'E/V'O_2$) y equivalente ventilatorio del dióxido de Carbono ($V'E/V'CO_2$). **Esto se agrega a las determinaciones obtenidas en una prueba ergométrica graduada con monitoreo electrocardiográfico continuo:** Trabajo (W), frecuencia cardíaca (fc) a través del monitor ECG, y presión arterial (PA). Correlacionando las variables previas con estas derivamos, entre otras, el Pulso de Oxígeno ($V'O_2/fc$), que tiene una relación directa con el volumen sistólico del VI.

Tabla 4

Determinaciones primarias:

$V'E$: ventilación minuto

FeO_2 : concentración fraccional de O_2 en el gas exhalado

$FeCO_2$: concentración fraccional de CO_2 en el gas exhalado

Fc: frecuencia cardíaca ECG

W : Trabajo

PA : presión arterial

Derivadas:

$V'O_2$: consumo de O_2 expresado en ml/minuto o en ml/minuto/Kg de peso corporal

$V'CO_2$: producción de CO_2

R, RQ o $V'CO_2/V'O_2$: relación entre $V'CO_2$ y $V'O_2$ llamada Cociente Respiratorio.

$V'E/V'O_2$: relación entre la $V'E$ y $V'O_2$ llamado equivalente ventilatorio del oxígeno :

$V'E/V'CO_2$: relación entre $V'E$ y $V'CO_2$ llamado equivalente ventilatorio del dióxido de Carbono.

$V'O_2/fc$: Pulso de Oxígeno

Midiendo continuamente estas variables desde la situación de reposo y durante un esfuerzo cuya carga se incrementa en forma constante (incremental) hasta que el paciente no lo tolera más, observaremos cuándo el metabolismo comienza a tener un importante componente anaeróbico (umbral anaeróbico, umbral láctico), y cuál es el máximo $V'O_2$ que el sujeto puede alcanzar ($V'O_{2,pico}$), como puntos sobresalientes entre un conjunto considerable de datos.

La PECP es considerada el “patrón oro” en la evaluación de las causas de limitación al ejercicio. El Consumo Pico de Oxígeno ($V'O_{2,pico}$ asimilable en general al Consumo Máximo de Oxígeno, $V'O_{2,max}$) no puede ser predicho

desde las variables fisiológicas de reposo (FEV_1 ; DL,CO; Fracción de Eyección calculada por ecocardiograma; o IMC). El $V'O_{2,max}$ tiene gran valor como predictor de complicaciones en cirugía de resección pulmonar, y para determinar el momento óptimo para el trasplante cardíaco, y el análisis sistemático de todos los datos obtenidos permite en la mayoría de las situaciones aclarar la causa de disnea en pacientes en quienes las pruebas de función pulmonar y cardiovasculares efectuadas en condiciones de reposo no han llegado a esclarecerla.

Tabla 5

La PECP tiene indicaciones claras dado que:

- Revela anormalidades específicas que sólo se ponen de manifiesto al exigir un determinado sistema.
- Provee un marco de referencia funcional para dirigir intervenciones y evaluarlas
- Evalúa cualitativa y cuantitativamente la limitación a la tolerancia al esfuerzo y determinar su causa.
- Provee una evaluación funcional y pronóstica de la Enfermedades Pulmonares y Cardiovasculares (EPOC, EPID, Insuficiencia Cardíaca, Fibrosis Quística, HTPP)
- Permite la detección de BIE (“Asma inducida por ejercicio”) (ver más adelante)

Tabla 6

Indicaciones de la PECP:

1-Evaluación Preoperatoria:

- De cirugía del cáncer de pulmón (cirugía resectiva) con pruebas de función pulmonar de reposo en límite.
- de cirugía de reducción de volumen del enfisema pulmonar.

2-Evaluación pretrasplante cardíaco

- En pacientes apropiados, un $V'O_{2,pico} < 10$ mL/kg/min con alcance de metabolismo anaerobio, es una de las indicaciones absolutas.

3-Evaluación de la limitación de la tolerancia al ejercicio

- Identificación de la causa de la limitación(cardíaca vs. pulmonar, y otras)
- Estudio de la disnea de causa no aclarada

4- Otras

- Evaluación Deportológica de Alto Rendimiento
- Evaluación de Incapacidad Laboral y Aptitud para una tarea dada.

Prueba de Provocación Bronquial por Esfuerzo

La Prueba de Provocación Bronquial por Esfuerzo (PPBE) se funda en el hecho que la mayoría de los asmáticos presentarán estrechamiento de las vías respiratorias al realizar una actividad física lo bastante intensa, llamado Broncoconstricción Inducida por el Esfuerzo (BIE), y permite tomar en dichos pacientes decisiones terapéuticas. Es útil para demostrar hiperreactividad bronquial (HRB), aunque menos sensible para esto que otras pruebas de provocación bronquial.

La causa de la BIE en individuos predispuestos es el cambio osmolar en la mucosa bronquial por la deshidratación provocada por el incremento de la ventilación (V'E) que se produce con el esfuerzo. Por tal motivo se recomienda realizar la prueba en condiciones de ambiente seco (como el logrado con el acondicionador de aire) y con broche nasal emplazado.

La PPBE es una prueba tipo dosis respuesta, en la que el estímulo es el esfuerzo físico, y la respuesta medida será básicamente el FEV₁. Por ello, no debe practicarse en sujetos que no son capaces de realizar una espirometría de buena calidad.

El material requerido es simple:

(Tabla)

- un espirómetro
- un saturómetro y/o monitor ECG (dependiendo del riesgo del paciente) para asegurarse alcanzar una frecuencia cardíaca adecuada (80-90% del teórico), y
- el dispositivo para el esfuerzo (cinta, cicloergómetro, o espacio para carrera libre).

Luego de una espirometría el sujeto realiza calentamiento y un esfuerzo cercano al máximo, en total unos 8 minutos. Se repite la espirometría a los 1, 5, 10, 15, 20, y 30'. Se considera positiva una prueba en la que se demuestra una caída del FEV₁ de al menos un 10% respecto del basal.

Indicaciones para la PPBE:

Tabla 7

- Pacientes con disnea durante y/o después del esfuerzo, sospechados de padecer BIE ("Asma inducida por ejercicio")
- Pacientes asmáticos que presentan disnea durante y/o después del esfuerzo
- Pacientes asmáticos que realizan tareas de las que puede depender la vida de otros (policías, bomberos) sospechados de padecer BIE
- Para determinar la eficacia del tratamiento del BIE y evaluar el efecto de diferente fármacos utilizados con éste fin.

Lecturas recomendadas:

- <http://www.aamr.org.ar/cms/archivos/secciones/fisiopatologia/prueba6minut.doc>
- *Normativas Separ: Prueba de Ejercicio Cardiopulmonar* - Arch Bronconeumol 2001; 37: 247-268 www.archbronconeumol.org
- *Recommendation on the use of exercise testing in clinical practice* - Eur Respir J 2007; 29: 185–209 www.ersnet.org
- <http://www.msal.gov.ar/htm/Site/pngcam/normas/2002-432.htm>
- En www.atsjournals.org:
 - *ATS/ACCP Statement on Cardiopulmonary Exercise Testing* - Am J Respir Crit Care Med Vol 167. pp 211–277, 2003
 - *Guidelines for Methacholine and Exercise Challenge Testing*-1999. Am J Respir Crit Care Med Vol 161. pp 309-329, 2000
 - Exercise-induced Bronchoconstriction. Am J Respir Crit Care Med Vol 187, Iss. 9, pp 1016–1027, May 1, 2013.
- EACPR/AHA Joint Scientific Statement Clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assessment in specific patient populations. European Heart Journal. September 5, 2012

Apéndice:

Algoritmo de interpretación de la PECP para el estudio de la disnea

Definiciones norm: normal. ↑: elevada. ↓: disminuida. ?: no determinado

EPID: Enfermedades parenquimatosas difusas. EPOC: Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica

PFP: Pruebas de Función Pulmonar

ECG: Electrocardiograma (Complementado en la evaluación inicial con Ecocardiograma)

HRR: Reserva de Frecuencia Cardíaca=FC Máx Calculada – FC Máx Hallada
FC Máx Calculada: 220-Edad

P_{ET}CO₂: concentración fraccional de CO₂ de fin de la espiración

AT: Consumo de O₂ en el Umbral Anaeróbico o Umbral de Lactato

VR: Reserva Ventilatoria =MVV - V'E máx

V'E máx: Ventilación minuto en el máximo esfuerzo

MVV: Ventilación voluntaria máxima, medida en reposo en 12" de máximo esfuerzo ventilatorio o calculada =FEV₁ x 35

Historia Clínica. Examen Físico, PFP, ECG, Esfuerzo, Síntomas Asociados. Escala de Borg

$V'O_2$ máx.

NORMAL

BAJO

Observar FC, $V'E$, SaO_2
Síntomas Limitantes

Patrones de respuesta

Normal

Obesidad: $\downarrow V'O_2/kg$

Enfermedad
cardiopulmonar
incipiente

Hiperven./Ansiedad:
Anormalidades del
patrón ventilatorio,
 $\downarrow P_{ET}CO_2$

Algoritmo de interpretación de la PECP para el estudio de la disnea

Dr.Orlando R. López Jové – Lab Pulmonar – Htal “Dr. A.A. Cetrángolo”
(Modificado de Am J Respir Crit Care Med Vol 167. pp 211–277, 2003)

Patrones de respuesta

VR norm/ \uparrow , HRR \uparrow , SaO_2
norm, AT norm/ \downarrow /?

Pobre Esfuerzo

Enfermedad Coronaria

Neuromuscular

VR norm/ \uparrow , HRR norm/ \uparrow ,
 SaO_2 norm, \downarrow AT

Desacondicionamiento

Cardiovascular

Miopatía Mitocondrial

VR norm, HRR norm/ \downarrow ,
 $\downarrow SaO_2$, \downarrow AT

Enfermedad Pulmonar
Vascular

VR norm/ \downarrow , HRR norm/ \uparrow ,
 SaO_2 \downarrow , AT \downarrow

EPID

VR \downarrow , HR \uparrow R, SaO_2 norm/ \downarrow
AT norm/ \downarrow /?

EPOC