

Perspectiva Neumológica

BOLETÍN BIMESTRAL DE LA FUNDACIÓN NEUMOLÓGICA COLOMBIANA

ISSN 01234-8124

TARIFA POSTAL REDUCIDA N° 798

UTILIDAD CLÍNICA DE LA PRUEBA DE EJERCICIO CARDIOPULMONAR

(Evaluación de la función cardiopulmonar durante el ejercicio)

Mauricio González García, MD*

Darío Maldonado Gómez, MD**

Introducción

La disnea de esfuerzo y la limitación de la capacidad para el ejercicio físico son manifestaciones comunes de la enfermedad respiratoria o cardiovascular y con menor frecuencia de otras patologías. La valoración funcional hecha en reposo con pruebas como la curva de flujo-volumen, los gases arteriales, la capacidad de difusión del monóxido de carbono, el electrocardiograma y el ecocardiograma no permite predecir adecuadamente el desempeño durante el ejercicio ni determinar con claridad las alteraciones funcionales que lo limitan. La prueba de ejercicio cardiopulmonar, que es el instrumento apropiado para valorar la capacidad funcional global de la persona y las causas y mecanismos involucrados en la limitación de su capacidad para el ejercicio físico, se usa, cada vez con mayor frecuencia, para el estudio del paciente con disnea, para predecir su comportamiento en situaciones de estrés, como la cirugía torácica mayor (neumonectomía o resección extensa) y en la evaluación inicial y del resultado de la rehabilitación cardiopulmonar. En este número de Perspectiva Neumológica, hacemos una discusión práctica de lo que es la prueba de ejercicio cardiopulmonar, sus indicaciones y su interpretación. Al final, presentamos algunos casos ilustrativos de nuestra propia experiencia, en los cuales, esta prueba fue muy útil para orientar el diagnóstico y el manejo de los pacientes.

Técnica y mediciones

En la prueba de ejercicio cardiopulmonar, que debe realizarse cumpliendo los requisitos de técnica y seguridad establecidos (Sociedad Europea de Enfermedades Respiratorias), el paciente realiza un ejercicio de intensidad progresiva en una bicicleta ergométrica en el cual se incrementa progresivamente el trabajo (carga) o en un trotador o banda sin fin en el cual se incrementan la velocidad y la inclinación hasta llegar a un nivel de ejercicio máximo que se determina cuando el paciente alcanza un consumo máximo de oxígeno, los síntomas que presenta no son tolerados (limitación por síntomas) o se presentan determinadas alteraciones fisiológicas, como inversión de la onda T o arritmias (indicación clínica). Durante toda la prueba se miden la ventilación minuto (\dot{V}_E), la frecuencia respiratoria (FR), el consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$), la producción de CO_2 ($\dot{V}CO_2$), la frecuencia cardíaca (FC), el electrocardiograma (ECG), la saturación de oxígeno por pulso-oximetría (SpO_2) y los gases arteriales.

Consumo de oxígeno máximo ($\dot{V}O_{2max}$). Define la capacidad aeróbica alcanzada durante un esfuerzo máximo

y es la medición más importante en la evaluación de la capacidad para realizar ejercicio. Un valor normal descarta anomalía funcional significativa. La disminución del $\dot{V}O_{2max}$ (complementada con el umbral láctico) permite calificar el nivel de incapacidad funcional del paciente. Como la determinación del $\dot{V}O_{2max}$ requiere demostrar que el $\dot{V}O_2$ no aumenta aunque se incremente la carga y este nivel es difícil de alcanzar, se utiliza en la práctica el $\dot{V}O_2$ máximo alcanzado al que algunos denominan $\dot{V}O_2$ "pico", purismo semántico que consideramos exagerado.

Oxígeno latido. Es la relación entre el consumo de oxígeno y la frecuencia cardíaca ($\dot{V}O_2/FC$); es una medida indirecta del volumen sistólico ($\dot{V}S$) derivada de la ecuación de Fick ($\dot{V}O_2 = (\dot{V}S \times FC) \times (CaO_2 - CvO_2)$). Cuando la diferencia arteriovenosa ($CaO_2 - CvO_2$) es normal la disminución del oxígeno latido indica alteración de la función sistólica del ventrículo izquierdo.

Umbral láctico (UL). Anteriormente llamado umbral anaerobio (UA), se define por el nivel de ejercicio ($\dot{V}O_2$) en que se inicia la producción de ácido láctico. Normalmente se presenta cuando el $\dot{V}O_2$ es $> 40\%$ del $\dot{V}O_{2max}$ y en un atleta bien entrenado puede ser 80 a 90% del $\dot{V}O_{2max}$. Un UL $< 40\%$ sugiere enfermedad cardiovascular o mal estado físico. El UL se puede medir por métodos invasivos (lactato en sangre) o no invasivos (variables ventilatorias o del intercambio gaseoso) y se utiliza para la prescripción de programas de entrenamiento o rehabilitación que deben realizarse a una intensidad igual o ligeramente inferior al umbral láctico.

Reserva respiratoria. Es la relación entre la ventilación voluntaria máxima (VVM) y la ventilación máxima alcanzada durante el ejercicio ($\dot{V}E_{max}$). Se considera normal cuando la $VVM - \dot{V}E_{max}$ es ≥ 11 L. La relación $\dot{V}E_{max}/VVM$ (índice de disnea) $> 75\%$ es normal. Un valor inferior a estas cifras indica que hay una limitación ventilatoria para el ejercicio. Como la VVM no siempre es un indicador confiable de la capacidad ventilatoria máxima, en la actualidad se está utilizando la comparación de las curvas de flujo-volumen (CFV) en reposo y durante el ejercicio como un método adicional para estudiar los mecanismos de la limitación ventilatoria durante el ejercicio y cuantificar el grado de limitación.

Equivalente respiratorio para el CO_2 ($\dot{V}E/\dot{V}CO_2$). Es la relación entre el volumen minuto y la producción de CO_2 . Es útil para estimar el espacio muerto y determinar que tan apropiada es la ventilación minuto durante el ejercicio. Su medición se realiza durante el umbral láctico cuando la $PaCO_2$ es estable, evitando el efecto de la acidosis láctica o la ansiedad (hiperventilación).

Espacio muerto/volumen corriente (VD/VT): Es la relación entre el espacio muerto fisiológico y el volu-

COORDINACIÓN EDITORIAL

Darío Maldonado Gómez
Carlos Arturo Torres Duque

FUNDACIÓN NEUMOLÓGICA COLOMBIANA

Neumología - Medicina Interna

Darío Maldonado G.
Alejandro Casas H.
Carlos Arturo Torres D.
Sylvia Páez M.
Mauricio González G.
Abraham Alf M.

Neumología Pediátrica

Oscar Barón P.

Radiología

Humberto Varón A.

Patología Pulmonar

Paulina Ojeda L.

Cirugía Torácica

Alvaro Casallas G.
Luis Jaime Téllez R.

* Internista - Neumólogo, Fundación Neumológica Colombiana

** Director, Fundación Neumológica Colombiana

men corriente. Su medición durante el ejercicio es útil para identificar anomalías de la relación ventilación-perfusión (V/Q). Su aumento indica un incremento de la ventilación del espacio muerto (ventilación ineficiente).

Gases arteriales. Durante el ejercicio máximo ($\dot{V}O_2$ max) es normal la disminución del pH y el bicarbonato por acidosis láctica y de la $PaCO_2$ por hiperventilación alveolar secundaria a esta acidosis. La PaO_2 es normal aunque se observa un ligero aumento de la $P(A-a)O_2$. La SpO_2 puede ser normal o disminuir ligeramente por el efecto de la acidosis sobre la posición de la curva de disociación de la hemoglobina.

Indicaciones

Las indicaciones más importantes de la prueba de ejercicio cardiopulmonar se resumen en la tabla No 1.

1. Evaluación de la capacidad al ejercicio aeróbico y sus factores limitantes
 - a. Identificación de la intolerancia al ejercicio y las alteraciones funcionales responsables
 - b. Diferenciación entre la disnea de origen cardiaco (tabla No 2) o pulmonar (tabla No 5 y 6)
 - c. Evaluación de la disnea no explicada por las pruebas funcionales respiratorias básicas en reposo
2. Evaluación de la limitación funcional al ejercicio en la enfermedad pulmonar crónica
 - a. Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (tabla No 5)
 - b. Fibrosis quística
 - c. Enfermedad pulmonar intersticial (tabla No 6)
 - d. Enfermedad vascular pulmonar (tabla No 3)
 - e. Determinar la presencia de enfermedad cardiaca oculta (tabla No 2)
3. Diagnóstico del asma inducida por ejercicio
4. Clasificación funcional de la falla cardiaca congestiva (tabla No 4)
5. Programas de rehabilitación pulmonar y cardiaca
 - a. Evaluación de pacientes y prescripción del nivel de ejercicio
6. Evaluación de la respuesta al tratamiento y pronóstico del paciente
7. Evaluación preoperatoria
 - a. Cirugía de resección en cáncer pulmonar
 - b. Cirugía de reducción de volumen pulmonar en enfisema
8. Evaluación pre y post-operatoria en al trasplante pulmonar y corazón pulmón.
9. Evaluación del grado de incapacidad funcional

Tabla No 1. Indicaciones de la prueba de ejercicio cardiopulmonar

Interpretación de la prueba de ejercicio cardiopulmonar

La limitación al ejercicio se clasifica en tres grandes categorías:

- **Limitación cardiovascular:** Producida por alteraciones en el transporte de oxígeno por enfermedades del corazón, la circulación pulmonar, la circulación sistémica o la sangre (anemia p.e.)
- **Limitación respiratoria:** Producida por alteraciones (mecánicas) de la ventilación o del intercambio gaseoso
- **Limitación neuromuscular:** Producida por alteración de los mecanismos de utilización de oxígeno y de la contracción muscular

Un $\dot{V}O_2$ max normal indica una capacidad normal para el ejercicio físico y descarta la presencia de alteraciones funcionales significativas. Un $\dot{V}O_2$ max inferior al esperado (submáximo) indica la presencia de alguna alteración funcional que se identifica por el análisis de las otras mediciones realizadas durante la prueba.

Limitación cardiovascular (tabla No 2). Se observa disminución del trabajo máximo y del $\dot{V}O_2$ max con UL temprano ($\dot{V}O_2 < 40\%$ del $\dot{V}O_2$ max y oxígeno latido bajo) (o que no aumenta progresivamente al aumentar el nivel de ejercicio). El espacio muerto y los equivalentes respiratorios en el punto del umbral láctico pueden estar elevados. La reserva respiratoria es normal. La PaO_2 puede ser normal (en ocasiones puede disminuir ligeramente) y la $P(A-a)O_2$ generalmente es normal. En los pacientes con mal estado físico (desacondicionamiento) se observa una respuesta similar durante el ejercicio lo cual dificulta su diferenciación con la limitación cardiovascular leve; para ello son muy importantes una historia clínica cuidadosa y la respuesta al ejercicio después de un programa de entrenamiento aeróbico. En la enfermedad vascular pulmonar (tabla No 3) se observa acidosis metabólica (láctica) temprana con disminución significativa del umbral láctico y del oxígeno latido. Los equivalentes respiratorios y el espacio muerto se encuentran aumentados y hay hipoxemia durante el ejercicio.

- a. Anormalidades en el electrocardiograma
 1. Depresión del segmento ST
 2. Arritmias
- b. Respuesta presora anormal
- c. Consumo máximo de oxígeno bajo
- d. Oxígeno latido bajo
- e. Umbral anaeróbico temprano
- f. Disminución de la relación $\dot{V}O_2/W$
- g. Reserva respiratoria normal
- h. $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ y VD/VT pueden estar elevados
- i. PaO_2 y saturación usualmente normales

Tabla No 2. Limitación por enfermedad cardiovascular

- a. Consumo de oxígeno máximo bajo
- b. Umbral anaeróbico temprano
- c. Oxígeno latido bajo
- d. Reserva respiratoria normal
- e. $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ alto
- f. VD/VT elevado
- g. PaO_2 y saturación disminuida
- h. $P(A-a)O_2$ aumentada

Tabla No 3. Limitación por enfermedad vascular pulmonar

La prueba de ejercicio cardiopulmonar permite hacer una clasificación funcional de los pacientes con falla cardiaca tal como aparece en la tabla No. 4.

Clase	Severidad	$\dot{V}O_2$ max mL/kg/min	Umbral láctico mL/kg/min	Índice cardíaco max L/min/m ²
A	Ninguna o leve	>20	>14	>8
B	Leve a moderada	16-20	11-14	6-8
C	Moderada a severa	10-15	8-11	4-6
D	Severa	6-9	5-8	2-4
E	Muy severa	<6	3-4	<2

Tomado de Weber, KT, Janicki, JS. Cardiopulmonary exercise testing. Physiologic principles and clinical applications. WB Saunders, Philadelphia, 1986

Tabla No 4. Clasificación funcional de los pacientes con falla cardiaca congestiva Clase

Limitación respiratoria (tablas No 5 y 6): El consumo de oxígeno alcanzado ("pico") es inferior al máximo esperado (submáximo) pero la reserva respiratoria está disminuida y la $\dot{V}E$ y los equivalentes respiratorios aumentados lo cual indica ventilación ineficiente por alteración de la relación ventilación/perfusión con aumento del espacio muerto. Generalmente hay hipoxemia con el ejercicio y aumento de la $P(A-a)O_2$ y la $PaCO_2$. En la enfermedad pulmonar intersticial difusa son distintivos la disminución de la reserva respiratoria, el aumento del volumen minuto por aumento de la frecuencia respiratoria con volumen corriente bajo, hipoxemia, desaturación y aumento de la $P(A-a)O_2$ que se incrementan durante el ejercicio.

- a. Consumo de oxígeno máximo bajo
- b. Umbral anaeróbico normal, bajo o indeterminado
- c. Reserva respiratoria disminuida
- d. Oxígeno latido normal
- e. $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ alto
- f. VD/VT elevado
- g. PaO_2 normal o disminuida
- h. $PaCO_2$ normal o aumentada
- i. $P(A-a)O_2$ aumentada usualmente

Tabla No 5. Limitación durante el ejercicio en EPOC

- a. Consumo de oxígeno máximo bajo
- b. Umbral láctico normal o bajo
- c. Reserva respiratoria disminuida
- d. Frecuencia respiratoria > 50x'
- e. $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ alto
- f. VD/VT elevado
- g. PaO_2 y saturación disminuida
- h. $P(A-a)O_2$ aumentada

Tabla No 6. Limitación durante el ejercicio en EPID

Curva de flujo-volumen y volumen corriente durante el ejercicio: En los pacientes con EPOC es característica la limitación al flujo espiratorio que está limitada por el flujo espiratorio máximo definido por la curva de flujo volumen en reposo por lo cual el paciente debe respirar durante el ejercicio en una posición cercana a la capacidad pulmonar total lo cual lo obliga a aumentar el volumen pulmonar al final de la espiración. La comparación de la CFV y el VC durante el ejercicio es de gran utilidad en el estudio de pacientes con alteración obstructiva moderada. Su utilidad es limitada en el paciente normal o en el paciente con alteración funcional muy severa (figuras No. 1 y 2).

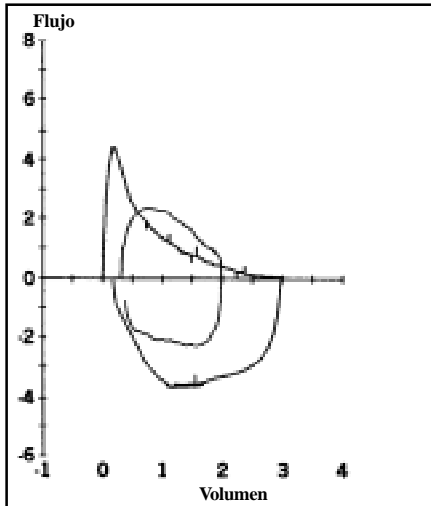


Figura No 1. Curva de flujo-volumen durante el ejercicio (caso 3). Explicación en el texto.

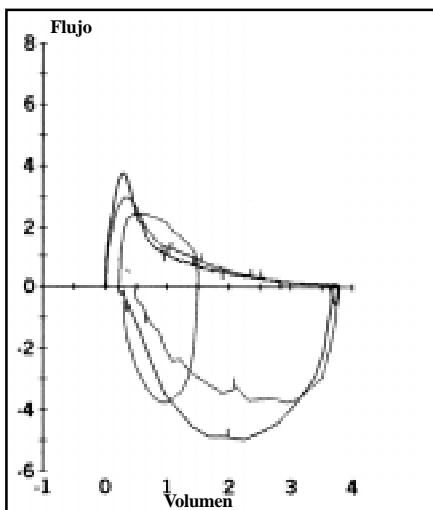


Figura No 2. Curva de flujo-volumen durante el ejercicio (caso 4). Explicación en el texto.

Presentación de casos

Caso 1. ECC. Hombre de 67 años e IMC de 20. Antecedente de enfermedad coronaria y cirugía de revascularización miocárdica ventrículo izquierdo dilatado y fracción de eyección prequirúrgica del 25%. Manejo con enalapril, ASA, lanitop y furosemida, a pesar de lo cual presenta disnea de esfuerzo (grado II). Es referido por cardiología para evaluación inicial a un programa de rehabilitación. Se realizó prueba de ejercicio cardiopulmonar inicial la cual fue submáxima, umbral láctico temprano, oxígeno latido bajo y sin limitación ventilatoria al ejercicio conclusiva de limitación cardiovascular. Se prescribió ejercicio y completó el programa de rehabilitación pulmonar. La prueba de ejercicio post rehabilitación es también submáxima pero con mejoría de 152 mL de consumo de oxígeno

(14%), umbral láctico normal, menor aumento de la frecuencia cardiaca y normalización del oxígeno latido.

Comentario: Paciente con clara limitación cardiovascular al ejercicio donde la prueba fue de utilidad en confirmar esta limitación, en la prescripción del ejercicio y en la monitorización del programa de rehabilitación pulmonar.

Caso 2. ETV. Hombre de 61 años con disnea de esfuerzo grado II y enfermedad pulmonar obstructiva crónica por tabaquismo. Valorado por cardiología con electrocardiograma y ecocardiograma en reposo normales por lo cual remiten a neumología. La curva de flujo volumen con alteración ventilatoria obstructiva leve. Considerando que sus pruebas funcionales en reposo no explicaban la disnea del paciente, se realizó una prueba de ejercicio cardiopulmonar la cual fue submáxima por consumo de oxígeno con frecuencia cardiaca máxima. El umbral láctico fue temprano y el oxígeno latido se encontró bajo sin aumento durante el ejercicio. La reserva respiratoria fue normal y en los gases en ejercicio muestran adecuada disminución de la PaCO₂ con leve disminución de la PaO₂. El paciente fue remitido a cardiología con diagnóstico de disnea de origen cardiaco. Se realizó prueba de esfuerzo con isonitrilos que fue positiva para enfermedad coronaria, por lo cual se realizó cateterismo cardiaco y cirugía de revascularización miocárdica.

Comentario: Paciente con patología pulmonar y cardiovascular en quien la reserva respiratoria normal y el comportamiento de los gases arteriales durante el ejercicio descarta limitación respiratoria. El umbral láctico temprano y el oxígeno latido bajo confirman la limitación cardiovascular como causa de su disnea.

Caso 3. AIR. Mujer de 57 años e IMC de 30. Antecedente de EPOC por humo de leña. Disnea de esfuerzo grado II, tos y expectoración escasa. Manejo con broncodilatadores. Curva de flujo volumen con alteración ventilatoria obstructiva moderada. Se realizó una prueba de ejercicio cardiopulmonar, la cual fue submáxima con umbral anaeróbico no determinado, oxígeno latido normal, reserva respiratoria e índice de disnea normales. En los gases arteriales en ejercicio máximo presentó hipoxemia sin disminución de la PaCO₂. Se realizaron curvas de flujo volumen durante el ejercicio demostrando aumento progresivo del volumen al final de la espiración indicativo de atrapamiento aéreo con flujos espiratorios durante el ejercicio máximo excediendo de forma importante los de la curva de flujo volumen en reposo (figura No 1).

Comentario: En esta paciente a pesar de una reserva respiratoria normal, la presencia de hipoxemia sin disminución adecuada de la PaCO₂ sugiere limitación respiratoria, la cual es confirmada por los hallazgos de las curvas de flujo volumen durante el ejercicio.

Caso 4. JE. Paciente con enfisema por tabaquismo y nódulo pulmonar sugestivo de neoplasia. Refiere disnea de esfuerzo grado II-III y la curva de flujo volumen mostró una alteración obstructiva severa. Se realiza prueba para evaluar riesgo prequirúrgico de lobectomía. La prueba fue submáxima con umbral anaeróbico normal, oxígeno latido bajo, reserva respiratoria e índice de disnea anormales, equivalentes respiratorios muy elevados, retención CO₂ e hipoxemia severas con el ejercicio. El consumo de oxígeno por peso fue de 12mL/kg/min por lo que se considero alto riesgo de complicaciones en el postoperatorio. Las curvas de flujo volumen durante el ejercicio confirmaron la limitación severa ventilatoria para el ejercicio (figura No 2).

Comentario: Paciente con un comportamiento durante el ejercicio típico de limitación respiratoria, tanto por la reserva respiratoria, como por el comportamiento de los gases arteriales, así como de las curvas de flujo volumen durante el ejercicio. La utilidad de la prueba en este paciente fue la predicción del alto riesgo quirúrgico.

Caso 5. Hombre de 70 años e IMC de 23 en estudio por disnea y alteración ventilatoria restrictiva. La TAC del tórax no fue conclusiva de enfermedad intersticial. Se realizó la prueba de ejercicio cardiopulmonar que fue submáxima con umbral láctico temprano y oxígeno latido bajo. La reserva respiratoria fue baja con aumento del volumen minuto por frecuencia respiratoria alta (43x'). Hubo elevación leve de equivalente respiratorio para el CO₂ con espacio muerto elevado que no disminuyó

con el ejercicio. En los gases arteriales hubo mayor hipoxemia sin disminución de la PaCO₂ y con aumento de la P(A-a)O₂.

Comentario: La limitación ventilatoria al ejercicio por enfermedad restrictiva con alteración severa del intercambio gaseoso que sugiere enfermedad intersticial pul-

monar. El oxígeno latido bajo con equivalentes y espacio muerto elevados indica posible hipertensión pulmonar asociada.

Resumen de casos. La tabla No 7 presenta un resumen de los hallazgos en la prueba de ejercicio cardiopulmonar de los 5 pacientes descritos.

	Caso 1 pre	Caso 1 post	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
CVF (%)	83	83	98	105	83	44
VEF ₁ (%)	73	73	81	69	42	44
VEF ₁ /CVF	70	70	66	54	38	78
Trabajo (W)	70	85	57	92	68	86
VO ₂ máx. (%)	60	69	45	77	46	58
VO ₂ umbral (%)	37	54	37	ND	40	35
VO ₂ /Kg.	19.6	21.6	12.1	15.8	12.4	15.4
FC máx. (%)	93	75	94	93	75	92
O ₂ latido (%)	61	88	42	94	48	60
VE máx. (L)	45	41	70.8	50	56.6	49.4
VVM-VE	42	46	45.2	20	10	11
VE /VVM	52	47	61	71	84	81
VE/CO ₂	36	34	55	43	57	49
VD/VT (reposo-máx.)	0.15-0.05	0.18-0.06	0.29-0.19	0.43-0.26	0.43-0.57	0.44-0.36
PaCO ₂ (mmHg)	32-30	29.1-28	23-21	27.4-30.2	30.1-42	34.1-35.9
PaO ₂ (mmHg) (reposo-máx.)	65-77	64-66	66-60	53.9-50.4	51-43	42.6-39.7
Sat (%) (reposo-máx.)	93-95	92-93	94-90	90-83	86-76	78-75
P(A-a)O ₂ (reposo-máx.)	5.9-4.4	9-13	12.3-27.5	21.1-28	18.8-25	19.8-38.4

Tabla No 7. Casos clínicos. Resumen de los hallazgos de las pruebas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Weisman IM, Zeballos RJ eds. Clinical exercise testing. Clin Chest Med. 1994;15(2).
2. Roca J, Whipp BJ eds. Clinical exercise testing. European Respiratory Monograph. ERS. 1997;2(6).
3. Jones ed. Clinical exercise testing. Fourth edition. Saunders. 1997.
4. Wasserman K, Jansen JE, Sue DY, Whipp BJ, Casaburi R. eds. Principles of exercise testing and interpretation. Second edition. Williams & Wilkins. 1994.
5. Johnson BD, Weisman IM, Zeballos RJ, Beck KC. Emerging concepts in the evaluation of ventilatory limitation during exercise. The exercise tidal flow-volume loop. Chest 1999;166:448-503.
6. Johnson BD, Beck KC, Zeballos RJ, Weisman IM. Advances in pulmonary laboratory testing. Chest 1999;116:1377-87.
7. Weber KT, Janicki JS. Cardiopulmonary exercise testing. Physiologic principles and clinical applications. WB Saunders, Philadelphia, 1986.