

**I.J. Ferreira Montero. Coordinador. Servicio de Cardiología.
Hospital Clínico Lozano Blesa. Zaragoza.**

Las pruebas de esfuerzo

A. del Río, M.C. Ferrer, E. Gutiérrez Ibañez, F. Roncalés y A. San Pedro Feliu

Servicio de Cardiología. Hospital Clínico Lozano Blesa. Zaragoza

Bases fisiopatológicas del esfuerzo físico. Fisiología de las pruebas de esfuerzo

Tipos de ejercicio

Tradicionalmente se diferencian tres tipos fundamentales de ejercicio: isotónico (dinámico o locomotor), isométrico (estático) y de resistencia.

En el ejercicio isotónico o dinámico se produce un cambio en la longitud muscular, con pequeño o nulo cambio en la tensión. Implica varios grupos musculares y se mantiene en el tiempo (ejercicio de resistencia), con incrementos y decrementos de su intensidad. Durante el mismo, el organismo utiliza la vía aeróbica del metabolismo celular, lo que implica que el aporte y la demanda de oxígeno a los tejidos deben estar en equilibrio. Si la demanda tisular de oxígeno supera a la oferta, las células recurrirán a las vías anaeróbicas para obtener la energía complementaria. Tras la activación del músculo esquelético se reduce el tono vagal, la acción de bombeo de los músculos aumenta el retorno venoso (precarga), y de acuerdo con la ley de Frank-Starling aumenta el gasto cardíaco. Conforme el ejercicio se hace más intenso, los mecanismos reflejos aumentan la secreción de catecolaminas, la frecuencia cardíaca aumenta en mayor proporción, y la estimulación de la contractilidad miocárdica hace que el gasto cardíaco siga aumentando a pesar de reducirse el tiempo de llenado diastólico. La respuesta cardiovascular es proporcional a la masa muscular movilizada y a la intensidad del ejercicio¹. El aumento de la frecuencia cardíaca (FC) debido al descenso del tono vagal es

la respuesta inmediata al ejercicio. Este aumento se sigue de un incremento del tono simpático. Durante el ejercicio dinámico la FC aumenta linealmente con el trabajo cardíaco y el consumo de oxígeno (VO_2). La respuesta al ejercicio de la FC se ve afectada por factores como la edad (descenso en la FC máxima media que se debe a influencias neurales), posición corporal, condición física, estado de entrenamiento, volumen sanguíneo y presencia de distintas enfermedades². El ejercicio dinámico es el que más aumenta la FC. La presión arterial (PA) sistólica aumenta como resultado del incremento del gasto cardíaco mientras que la diastólica generalmente se mantiene o puede descender en algunos sujetos normales. Tras el máximo ejercicio las cifras basales suelen recuperarse en unos 6 min. Puede haber aumento inadecuado de la PA sistólica (menos de 20-30 mmHg) en pacientes con estenosis del tracto de salida aórtico, disfunción ventricular izquierda o isquemia miocárdica. La hipotensión durante el ejercicio suele indicar enfermedad cardíaca grave, valvular o miocárdica³.

En el ejercicio isométrico o estático se realiza un pequeño o nulo cambio en la longitud muscular. Implica a pocos músculos, que realizan una contracción rápida y enérgica, incrementando significativamente su tensión. Se utilizan vías anaerobias del metabolismo celular, generándose una deuda de oxígeno que debe compensarse en el período de recuperación. Predomina la potencia muscular (p. ej., *handgrip*), que supone una gran sobrecarga de volumen al ventrículo izquierdo aunque el gasto cardíaco no se incrementa tanto como en el ejercicio isotónico por la gran resistencia que ofrecen los músculos activados, lo que limita el flujo.

Por último, en el ejercicio de resistencia se combinan contracciones musculares con movimiento.

Consumo de oxígeno (VO_2)

Es la cantidad de oxígeno que una persona puede consumir durante la realización de un ejercicio

Palabras clave:

Pruebas diagnósticas. Prueba de esfuerzo. ECG. Gammagrafía cardíaca. Enfermedad coronaria. Hipertensión.

Correspondencia: Prof. A. del Río Ligorit.
P.º M.º Agustín, 4-6, casa 5-3.º A. 50004 Zaragoza.
Correo electrónico: adelrio@ctv.es

dinámico que involucre a gran parte de la masa muscular total⁴. Representa la cantidad de oxígeno transportado y utilizado por las células en su metabolismo. Se mide en múltiplos de los requerimientos de oxígeno basales, es decir, en reposo, y su unidad es el MET (equivalente metabólico de oxígeno). Un MET equivale a 3,5 ml de O₂ por kilo de peso y por minuto, que se considera la media de la necesidad de oxígeno en cada persona en condiciones basales.

El VO₂ se relaciona con la edad (disminuye con la edad), el sexo (menor en mujeres), el entrenamiento físico (lo aumenta), la herencia y el estado clínico cardiovascular.

El consumo miocárdico de oxígeno (MO₂)

El MO₂ viene determinado por: la tensión de la pared intramiocárdica (presión sistólica ventricular izquierda volumen telediastólico/grosor de la pared ventricular izquierda), la contractilidad y la frecuencia cardíaca. La medida exacta requiere cateterización, pero puede ser evaluada durante la prueba de esfuerzo mediante el “doble producto” (frecuencia cardíaca PA sistólica). Existe una relación lineal entre el MO₂ y el flujo coronario y en la estenosis coronaria con frecuencia no puede mantenerse el flujo coronario adecuado durante el ejercicio apareciendo isquemia miocárdica.

Fisiopatología de la respuesta isquémica del miocardio

El corazón es un órgano principalmente aeróbico. Ya en reposo la extracción de oxígeno en la circulación coronaria es máxima y el único mecanismo disponible para aumentar el consumo de oxígeno por el miocardio es aumentar su perfusión mediante el aumento del flujo coronario, que en el ejercicio se consigue disminuyendo las resistencias arteriolas coronarias. En pacientes con arteriosclerosis progresiva de los vasos epicárdicos existe un umbral isquémico más allá del cual durante el ejercicio pueden producirse alteraciones en la función diastólica y sistólica, cambios ECG y dolor torácico. El subendocardio es más susceptible ante la isquemia porque está sometido a mayor tensión, lo que provoca mayor demanda relativa de oxígeno.

Los cambios dinámicos en el tono de las arterias coronarias por la presencia de una placa de aterosclerosis disminuye el flujo coronario durante el esfuerzo, más en el subendocardio, limitando la oferta de oxígeno a estas regiones. Como consecuencia, se acorta la duración del potencial de acción endocárdico, se crean gradientes eléctricos y se originan cambios en el segmento ST³.

Protocolos de las pruebas de esfuerzo Métodos y medidas

Durante la prueba de esfuerzo (PE) el paciente se somete a un estrés físico o farmacológico creciente y, con el fin de que las medidas realizadas durante la prueba tengan suficiente validez y reproducibilidad, se han diseñado diversos protocolos de esfuerzo que se describen a continuación. Aunque el que más se utiliza es el protocolo de Bruce en tapiz rodante (*treadmill*), cada paciente necesita un tipo diferente de esfuerzo, según su condición física y los objetivos de la prueba. La dureza del protocolo debe individualizarse según la resistencia del paciente⁵.

Un esfuerzo inicial excesivo provocará el agotamiento prematuro, impidiendo el cálculo preciso de la capacidad funcional; a la inversa, un protocolo demasiado suave prolongará inútilmente la prueba sin alcanzar sus objetivos. Por ello, estos protocolos deben manejarse con flexibilidad, prolongando u omitiendo determinados estadios según se considere más apropiado. El momento de terminar la prueba depende de los síntomas que presenta el paciente, la frecuencia cardíaca alcanzada, el comportamiento de la PA, el análisis de gases respiratorios o cuando aparezcan datos del ECG que aconsejen suspenderla. Se considera PE máxima la que se suspende cuando el paciente alcanza la capacidad límite de esfuerzo o la FC máxima teórica. (220-edad). Se considera submáxima cuando se detiene al alcanzar el 85% de la FC máxima teórica⁵.

Protocolos de esfuerzo físico

1. Con tapiz rodante. Actualmente son los más utilizados por proporcionar un ejercicio más fisiológico y ser mejor tolerados. El paciente camina sobre un tapiz rodante que va aumentando progresivamente la velocidad, inclinación o ambas.

El protocolo de Bruce es el más utilizado. Se compone de un estadio de calentamiento seguido de estadios de 3 min de duración en los que se aumenta tanto la velocidad como la inclinación del tapiz. En pacientes con una capacidad de esfuerzo muy limitada se utiliza el protocolo de Bruce modificado, que incluye dos fases de calentamiento de 3 min a 2,5 km/h y pendiente de 0 y 5°, respectivamente. El protocolo de Bruce tiene el inconveniente de provocar un incremento de carga discontinuo, lo cual dificulta la adaptación del paciente al esfuerzo y puede subestimar su capacidad física.

El protocolo de Naughton se compone de estadios de 1 a 2 min con incrementos de un MET entre ellos. Se utiliza en pacientes con capacidad de esfuerzo muy limitada por permitir una mejor tolerancia y duración de la prueba.

Tabla 1. Contraindicaciones para la realización de pruebas de esfuerzo

Absolutas
Infarto de miocardio reciente (menor de 2 días de evolución)
Angina inestable no estabilizada con medicación
Estenosis aórtica importante sintomática
Insuficiencia cardíaca no estabilizada
Embolia pulmonar
Arritmias cardíacas incontroladas que causan deterioro hemodinámico
Diseccción aórtica
Pericarditis o miocarditis aguda
Incapacidad física o psíquica para realizar la prueba de esfuerzo
Relativas
Estenosis valvular moderada
Hipertensión arterial grave
Taquiarritmias o bradiarritmias
Anormalidades electrolíticas
Bloqueo auriculoventricular de segundo o tercer grados
Miocardopatía hipertrófica u otras formas de obstrucción al tracto de salida del ventrículo izquierdo

Los protocolos de incremento continuo de carga (ACIP, Blake) provocan un incremento gradual de la carga cada 1 o 2 min, lo cual permite una mejor adaptación al esfuerzo y una estimación más precisa de la capacidad funcional.

2. Con cicloergómetro. El paciente pedalea contra una resistencia controlada y creciente, medida en vatios o kilopondios/min. Normalmente se inicia con una carga de 25 W y se incrementa en otros 25 cada 2 o 3 min. Requiere menos espacio y es más barata que el tapiz rodante, pero muchos pacientes se adaptan peor a este tipo de esfuerzo y se subestima la capacidad funcional máxima.

3. Otros protocolos. Existen otras modalidades que se pueden usar con fines específicos en pacientes con incapacidad para caminar o para estimar la capacidad física en una actividad concreta, como son el cicloergómetro braquial y la ergometría de remo. En general, el esfuerzo braquial produce más artefactos y menor tolerancia.

Medidas durante la prueba de esfuerzo⁶

Durante la PE se evalúan sistemáticamente diversas variables clínicas, electrocardiográficas y en ocasiones metabólicas que permiten, por una parte, estimar de forma objetiva el grado de esfuerzo del paciente y, por otra, determinar la necesidad de suspender la prueba según los objetivos que se hayan fijado.

1. Parámetros clínicos: PA, FC, dolor torácico, signos de insuficiencia circulatoria (hipoperfusión, cianosis, palidez), estado del paciente (disnea, can-

sancio, mareo, percepción de intensidad subjetiva de esfuerzo).

2. Parámetros electrocardiográficos: descenso del segmento ST, elevación del segmento ST, arritmias.

3. Parámetros metabólicos: trabajo realizado en MET, consumo de O₂, eliminación de CO₂, concentración de lactato.

4. Ergometría con medición de parámetros metabólicos^{1,7}: proporciona una estimación más precisa de la capacidad funcional del paciente. Se analizan de forma continua durante la prueba parámetros ventilatorios (volumen corriente, frecuencia respiratoria) y las presiones parciales inspiratorias y espiratorias de O₂ y CO₂. También puede realizarse determinación sanguínea de lactato. Los parámetros estimados más importantes son la captación respiratoria máxima de O₂ y el umbral anaeróbico. En condiciones normales la captación de O₂ es un índice indirecto del gasto cardíaco.

Indicaciones y contraindicaciones de las pruebas de esfuerzo. Guías para su aplicación

Aunque la enfermedad más comúnmente estudiada o valorada mediante una PE es la cardiopatía isquémica (CI), hoy día se emplean también para la valoración de otras enfermedades cardíacas como las valvulopatías, las arritmias, la insuficiencia cardíaca crónica, la valoración funcional deportiva y la hipertensión arterial. Utilizamos la clasificación publicada por los consensos de ACC/AHA (American College of Cardiology/American Heart Association), según los cuales las recomendaciones para someter a un paciente a un estudio ergométrico son las siguientes:

– Clase I. Trastornos en los cuales hay evidencia o acuerdo general de que un procedimiento o tratamiento es útil y eficaz.

– Clase II. Trastornos en los cuales hay diferencias de opinión sobre la utilidad y eficacia de un procedimiento o tratamiento.

– Clase IIa. El peso de la evidencia es favorable para la mayoría.

– Clase IIb. La utilidad está menos establecida.

– Clase III. Trastornos en los cuales hay evidencia de que el procedimiento o tratamiento no es útil y, en algunos casos, puede ser perjudicial.

Contraindicaciones de la prueba de esfuerzo

Aunque las ergometrías son generalmente seguras, se han descrito infarto de miocardio o muerte, con una incidencia de hasta 1 por 2.500 pruebas⁸. Por tanto, debe establecerse un buen criterio clínico para decidir qué pacientes deben someterse a

Tabla 2. Indicaciones para la realización de pruebas de esfuerzo

Clase I
Evaluación inicial de los pacientes con sospecha o seguridad de enfermedad coronaria
Pacientes con angina estable en los que se plantee revascularización percutánea o quirúrgica
Clase IIa
Pacientes con angina vasospástica
Evaluación inicial de pacientes con sospecha de enfermedad coronaria y alteraciones electrocardiográficas de la repolarización poco significativas
Pacientes tanto con baja como con alta probabilidad pretest de cardiopatía isquémica según sus síntomas, edad y sexo
Pacientes con enfermedad coronaria que presenten una evolución clínica desfavorable
Pacientes estables clínicamente para guiar su tratamiento médico
Clase IIb
Pacientes asintomáticos con varios factores de riesgo coronario
Pacientes con enfermedad coronaria y anomalías en el ECG basal
Pacientes estables clínicamente que son evaluados de forma periódica
Clase III
Pacientes sin evidencia de enfermedad coronaria con importantes alteraciones del ECG basal como patrón de preexcitación, ritmo ventricular estimulado por marcapasos, depresión del segmento ST superior a 1 mm o bloqueo de rama izquierda
Pacientes con esperanza de vida limitada por cualquier causa

las PE. Las contraindicaciones tanto absolutas como relativas se exponen en la tabla 1.

Indicaciones de la prueba de esfuerzo (tabla 2)

1. *PE en la cardiopatía isquémica.* El valor de la PE en el estudio de la CI reside en la posibilidad de evidenciar alteraciones electrocardiográficas que, ausentes en reposo, pueden manifestarse con el ejercicio.

Los objetivos del estudio son:

- Valoración diagnóstica. Estudiar la posibilidad de que un individuo determinado presente CI significativa.
- Valoración pronóstica. Estimar la gravedad y probabilidad de complicaciones cardiovasculares posteriores.
- Valoración terapéutica. Documentar los efectos de un tratamiento aplicado.

2. *PE en el postinfarto de miocardio.* El test de esfuerzo se ha considerado útil para la evaluación y la decisión del tratamiento en los pacientes postinfarto agudo de miocardio (IAM)⁹. Por muchas y diferentes razones hay grupos de pacientes con IAM en los cuales no se puede realizar la PE y que constituyen el grupo de peor pronóstico, como revelan los datos del estudio GISSI-2¹⁰. Teniendo en cuenta estas consideraciones, la PE post-IAM tiene como objetivo proporcionar información que permita estratificar el riesgo y establecer un pronóstico, la capacidad funcional para poder prescribir una pauta de actividad física al alta hospitalaria y la adecuación del tratamiento médico, así como la necesidad

de emplear otros medios de diagnóstico y/o opciones terapéuticas.

3. *PE en posrevascularización.* La PE realizada en la fase temprana posrevascularización tiene como objeto determinar el resultado inmediato del procedimiento efectuado. Cuando se realiza en una fase tardía (pasados 6 meses) se encuentra encuadrada en la evaluación de la CI crónica subyacente. Generalmente en pacientes poscirugía de revascularización, la PE tiene importantes limitaciones, ya que son frecuentes las alteraciones basales del electrocardiograma, lo que hace que sean más útiles las PE acompañadas de técnicas de imagen. En pacientes postangioplastia coronaria percutánea el objetivo de la PE es la identificación de reestenosis, debiendo ser estudiados más tardíamente (entre los 3 y 6 meses) postangioplastia o *stent*.

4. *PE en mujeres.* En las mujeres es más difícil realizar el diagnóstico de enfermedad coronaria que en los varones debido a la menor prevalencia de CI (prácticamente la mitad de las mujeres menores de 65 años con clínica de angina en el estudio CASS tenían las coronarias normales)¹¹. La depresión del segmento ST al esfuerzo es menos sensible en mujeres que en varones, lo cual refleja la menor prevalencia de enfermedad coronaria grave en mujeres y la incapacidad de muchas de ellas de alcanzar la máxima capacidad aeróbica¹². No obstante, una PE negativa en mujeres sigue poseyendo un excelente valor predictivo negativo.

5. *PE en adultos asintomáticos.* Aunque diversos estudios han demostrado en adultos asintomáticos la existencia de lesiones coronarias, el empleo de la PE como método de detección poblacional no es de utilidad práctica. La indicación adecuada de la PE

en individuos asintomáticos no está definida y sólo se realizará en varones mayores de 40 años y en mujeres de más de 50 años que presenten múltiples factores de riesgo, así como en sujetos sedentarios que quieran comenzar a realizar ejercicio físico intenso.

6. *PE en la disfunción ventricular.* Los pacientes con insuficiencia cardíaca presentan disminución de la tolerancia al ejercicio físico, por lo que la utilidad de la PE con análisis del intercambio de gases en el proceso de evaluación es manifiesta. Baste recordar que un consumo de oxígeno pico inferior a 10 ml/kg/min es indicación clara de trasplante cardíaco¹³.

7. *PE en las arritmias.* La PE debe tomarse en consideración como exploración complementaria en algunas situaciones específicas en pacientes con sospecha o ya diagnosticados de arritmias.

– Arritmias supraventriculares. Tan sólo estaría indicada la PE en el caso de que los síntomas se desencadenasen preferentemente durante el ejercicio físico, si existe sospecha por otros datos de que su patogenia sea isquémica o en arritmias de esfuerzo tratadas con fármacos.

– Arritmias ventriculares. Pueden clasificarse en dos grupos: las relacionadas con la isquemia miocárdica y las no relacionadas con ella. El ejercicio físico puede desencadenar arritmias ventriculares tanto en pacientes con corazón aparentemente sano como en aquellos que padecen una enfermedad estructural cardíaca.

La prueba de esfuerzo en la cardiopatía isquémica. Pruebas diagnósticas y pruebas pronósticas

Prueba de esfuerzo para el diagnóstico de enfermedad coronaria

La estimación de la probabilidad de padecer CI se basa en datos de la historia clínica (características del dolor, edad, sexo, factores de riesgo coronario), datos de la exploración física y ECG basal. En función de estos datos, cuando un paciente es catalogado clínicamente como angina típica, la probabilidad de tener CI es tan elevada que el resultado de la PE no cambia significativamente esta probabilidad. En la práctica, la PE con fines diagnósticos tiene su mayor utilidad en pacientes con diagnóstico dudoso con probabilidad intermedia de padecer CI (paciente con dolor no típico con factores de riesgo coronario). Además de la valoración de los síntomas durante el esfuerzo, especialmente el dolor torácico, se analizan otras variables para mejorar la utilidad diagnóstica de la prueba, como son

la depresión del segmento ST, el tiempo de comienzo, la magnitud, la extensión y el tiempo de recuperación de dicha alteración. La sensibilidad y especificidad diagnóstica de la prueba varían según las distintas publicaciones. Según diversos metaanálisis^{14,15}, la sensibilidad media es del 68% y la especificidad del 77%. La sensibilidad varía en función de la gravedad de la CI.

Limitaciones de la PE diagnóstica. Una de las principales limitaciones de la PE diagnóstica es la alteración del ECG basal. En presencia de bloqueo de rama izquierda, la depresión del segmento ST no se asocia a isquemia, por lo que la PE convencional no tiene utilidad en este contexto. En presencia de bloqueo de rama derecha, la depresión del segmento ST en precordiales derechas (V₁-V₃) no se asocia a isquemia; sin embargo, la depresión del ST en otras derivaciones aporta información similar a la obtenida en pacientes con ECG normal. Tanto la depresión del ST en ECG basal como la hipertrofia ventricular con alteración de la repolarización condicionan una menor especificidad sin afectar significativamente la sensibilidad¹⁵.

Diversos fármacos pueden condicionar el resultado de la PE: la digoxina puede provocar depresión del ST al esfuerzo en sujetos sanos; los betabloqueadores pueden atenuar la frecuencia máxima al esfuerzo; los nitratos pueden atenuar la angina o la depresión del ST al esfuerzo en sujetos con angina.

Interpretación de la prueba de esfuerzo. La aparición de dolor torácico indicativo de angina de pecho que aparece durante el esfuerzo es altamente significativa de isquemia. La depresión del segmento ST horizontal o descendente es un potente predictor de enfermedad coronaria. La depresión "lentamente" ascendente del ST (menor de 1 mV/s) se ha asociado a una relativa probabilidad de CI. La elevación del ST en derivaciones con ondas Q es relativamente frecuente; algunos autores han señalado que es un marcador de viabilidad residual en el área infartada¹⁶. La elevación del ST en un ECG normal es un hecho infrecuente; representa isquemia transmural (por lesión crítica o por espasmo coronario). Las alteraciones de la onda R con el ejercicio no tienen significación pronóstica.

Prueba de esfuerzo para la evaluación pronóstica de la cardiopatía isquémica

La valoración pronóstica de la CI se debe iniciar con los datos de la historia clínica, exploración física y exploraciones complementarias. Los datos que aporta una PE siempre han de ser valorados en el contexto clínico del paciente. Los datos de la valo-

ración pronóstica de la PE se ha centrado en la probabilidad de supervivencia y, menos frecuentemente, en la probabilidad de supervivencia sin nuevo infarto de miocardio. Puede ser aplicada en diversas situaciones clínicas:

1. PE en cardiopatía isquémica estable. En esta situación, una de las más importantes variables del test es la capacidad máxima de ejercicio, que está en parte condicionada por el grado de disfunción ventricular izquierda (aunque también existen otras variables que la condicionan, como la edad, el estado físico o anímico del paciente). Existen diversos parámetros que permiten valorar la capacidad de ejercicio, como su duración, los equivalentes metabólicos (MET) alcanzados, la máxima frecuencia alcanzada o el doble producto. Un segundo grupo de marcadores pronósticos aportados por la PE son los relacionados con la isquemia inducida por el ejercicio. Estos marcadores incluyen la depresión del segmento ST, el número de derivaciones con dicha depresión, la configuración de la misma (descendente, rectilínea o ascendente); la elevación del ST (en derivaciones sin onda Q) o la angina inducida al esfuerzo.

Según los datos del Duke Cardiovascular Disease Databank¹⁷, la definición de una prueba "positiva temprana" (la que resulta de una depresión igual o superior a 1 mm en los primeros dos estadios del protocolo Bruce) identifica a pacientes de alto riesgo, mientras que aquellos que pueden alcanzar el cuarto estadio (independiente del grado de depresión del ST) son de bajo riesgo. Usando datos del Coronary Artery Surgery Registry¹⁸ se puede identificar como pacientes de alto riesgo a los que tienen una depresión igual o superior a 1 mm del ST y no pueden completar el primer estadio del protocolo Bruce. Estos pacientes tienen una mortalidad anual del 5%. Los que pueden alcanzar el tercer estadio Bruce sin depresión del ST constituyen un grupo de bajo riesgo con mortalidad anual menor del 1%.

Hay que señalar el limitado valor predictivo para infarto de miocardio de una prueba negativa; la mayoría de las placas vulnerables son "angiográficamente no significativas" antes de su rotura; por tanto, la posibilidad de la PE de detectar una placa vulnerable está limitada por su pequeño tamaño y su poca repercusión en la limitación al flujo coronario.

2. PE postinfarto de miocardio. Tiene como objetivo proporcionar información que permita valorar la capacidad funcional para poder aconsejar sobre la actividad física al alta hospitalaria, adecuar el tratamiento y valorar la necesidad de emplear otros medios diagnósticos. Se pueden realizar:

– PE submáxima: generalmente se predetermina la finalización de la prueba al 70% de la FC máxima teórica o un consumo de oxígeno equivalente a 5 MET.

– PE limitada por síntomas: a partir del día 5-7 tras el infarto y en ausencia de otras complicaciones. Tiene la ventaja de detectar más respuestas isquémicas y una mejor estimación de la capacidad funcional.

Los factores pronósticos de la PE en este grupo de pacientes incluye: la depresión isquémica del segmento ST igual o superior a 1 mm, particularmente cuando se acompaña de síntomas a un bajo nivel de ejercicio; capacidad funcional inferior a 5 MET; respuesta inadecuada de la PA con incapacidad para aumentarla de 10 a 30 mmHg, si bien esta variable está condicionada por el tratamiento que lleve el paciente y los síntomas acompañantes.

3. PE después de revascularización (quirúrgica o tras angioplastia más *stent*). En general, la PE tiene importantes limitaciones en este grupo de pacientes. Son frecuentes las anomalías basales del ECG y su interpretación depende más de los síntomas, de la respuesta hemodinámica o de la capacidad de esfuerzo. Si el paciente desarrolla angina típica, en general se recomienda la práctica de coronariografía. Si existen dudas sobre la interpretación de los síntomas, las técnicas de imagen ofrecen mayor ayuda para la toma de decisiones.

Otras indicaciones de la prueba de esfuerzo

Aunque la aplicación fundamental de la PE es en la CI, hay otras enfermedades en las que también aporta información útil:

1. PE en la hipertensión arterial. La utilización habitual de la PE en pacientes hipertensos es para el diagnóstico de enfermedad coronaria. Otras aplicaciones pueden ser la valoración del comportamiento de la PA al esfuerzo, tanto en individuos normotensos como hipertensos, valoración de la eficacia del tratamiento y la valoración previa al inicio de actividad deportiva.

– PE en la valoración de isquemia miocárdica en pacientes hipertensos. Tiene las mismas indicaciones y metodología que en los pacientes normotensos. En estos pacientes, la disminución del segmento ST no siempre indica afectación de arterias coronarias epicárdicas, sino que puede deberse a disfunción microvascular. La presencia de una respuesta hipertensiva en pacientes con sospecha de

enfermedad coronaria es indicador de enfermedad coronaria de menor gravedad y con menor riesgo de mortalidad¹⁹.

– PE para el diagnóstico de hipertensión arterial. Aunque no existen directrices aceptadas sobre las indicaciones de la PE en el diagnóstico de la hipertensión, su realización puede ser de utilidad. Se puede considerar como respuesta hipertensiva la elevación de las cifras en el máximo esfuerzo por encima de 220/105 mmHg²⁰.

En pacientes basalmente normotensos se ha demostrado que la elevación patológica de la PA sistólica es un factor pronóstico para el desarrollo de hipertensión arterial establecida.

En pacientes con PA "límitrofe" la aparición de una respuesta hipertensiva al esfuerzo hace prever que estos individuos van a ser hipertensos establecidos en pocos años y que van a desarrollar mayor hipertrofia ventricular que en los pacientes con respuesta normal de la PA.

En pacientes hipertensos la PE puede aplicarse con la finalidad de analizar la respuesta presora; se pueden diferenciar dos grupos de pacientes. Unos poseen una mejor adaptación de las respuestas periféricas y, conforme aumenta la intensidad del ejercicio, su PA tiende a no aumentar más, de modo que al final del esfuerzo sus cifras son similares a la de los normotensos; estos pacientes se benefician del ejercicio físico para reducir su PA. Por el contrario, otros pacientes presentan resistencias periféricas elevadas y su PA aumenta progresivamente con el esfuerzo e incluso se mantiene después de haberlo terminado; estos pacientes deben iniciar tratamiento antihipertensivo antes de comenzar el ejercicio físico.

2. PE en la insuficiencia cardíaca, miocardiopatías y valvulopatías. La disminución de la tolerancia al ejercicio es uno de los síntomas principales que presentan los pacientes con insuficiencia cardíaca independientemente de su etiología. La PE con el análisis del consumo de oxígeno en el pico del esfuerzo proporciona una información reproducible, objetiva y fisiológica de la capacidad de ejercicio.

Numerosos estudios han demostrado que el consumo máximo de oxígeno es un predictor independiente de mortalidad en pacientes con insuficiencia cardíaca. Mancini et al²¹ observaron en pacientes candidatos a trasplante cardíaco que un valor de consumo de oxígeno en el pico de esfuerzo mayor de 14 ml/kg/min se asociaba a un pronóstico más favorable; sin embargo, un consumo menor al mencionado, en particular en pacientes con disfunción ventricular izquierda, se considera una indicación relativa de trasplante cardíaco, ya que la mor-

talidad al cabo de un año de los pacientes que alcanzan o superan los niveles mencionados es similar a la de los trasplantados. Si el consumo de oxígeno en el pico de esfuerzo es menor de 10 ml/kg/min, la indicación de trasplante es clara¹⁴. También puede emplearse la PE para valorar objetivamente la mejora funcional obtenida con el tratamiento y para optimizar el tratamiento rehabilitador.

3. PE en la miocardiopatía hipertrófica. Aunque se consideraba una contraindicación para la PE, en la actualidad hay autores que encuentran gran utilidad en la realización de una PE para analizar la respuesta de la PA; una respuesta anormal supondría un signo de mal pronóstico de muerte súbita²².

4. PE en valvulopatías. La PE tiene un valor muy limitado en la valoración de las valvulopatías. Está contraindicada en alguna de ellas, como la estenosis aórtica sintomática. La mayor parte de las veces se acompañan de alteraciones basales del ECG que impiden analizar la respuesta del mismo para detectar isquemia miocárdica. Únicamente tiene utilidad la PE con análisis del intercambio de gases en la valoración funcional de algunas valvulopatías.

Pruebas de esfuerzo con isótopos. Pruebas de estrés farmacológico

El desarrollo instrumental de la medicina nuclear, el empleo de nuevos radioisótopos y la utilización de ordenadores han permitido la puesta en marcha de estudios de viabilidad miocárdica, cuantificación de reserva coronaria, pronóstico de la cardiopatía isquémica, que nos ayudan a valorar con mayor precisión al paciente con CI.

Técnicas

En los estudios de perfusión miocárdica se obtienen imágenes en tres situaciones distintas: una imagen en reposo, otra de esfuerzo y la última (no en todas las ocasiones) transcurridas unas horas (reperfusión). La adquisición de imágenes se hace en proyección anterior, oblicua anterior derecha y anterior izquierda. La mayoría de los equipos disponen de sistemas sincronizados con el ECG que permiten valorar secuencias de imágenes representativas del movimiento ventricular durante la adquisición de la tomografía. La reconstrucción de las imágenes genera cortes transaxiales del tórax del paciente. Sobre estos cortes se representan las imágenes de las diferentes proyecciones, lo que facilita su interpretación (fig. 1). Es muy importante que todo el proceso de reconstrucción se repita exactamente en las imágenes de reposo y esfuerzo para su correcta comparación.

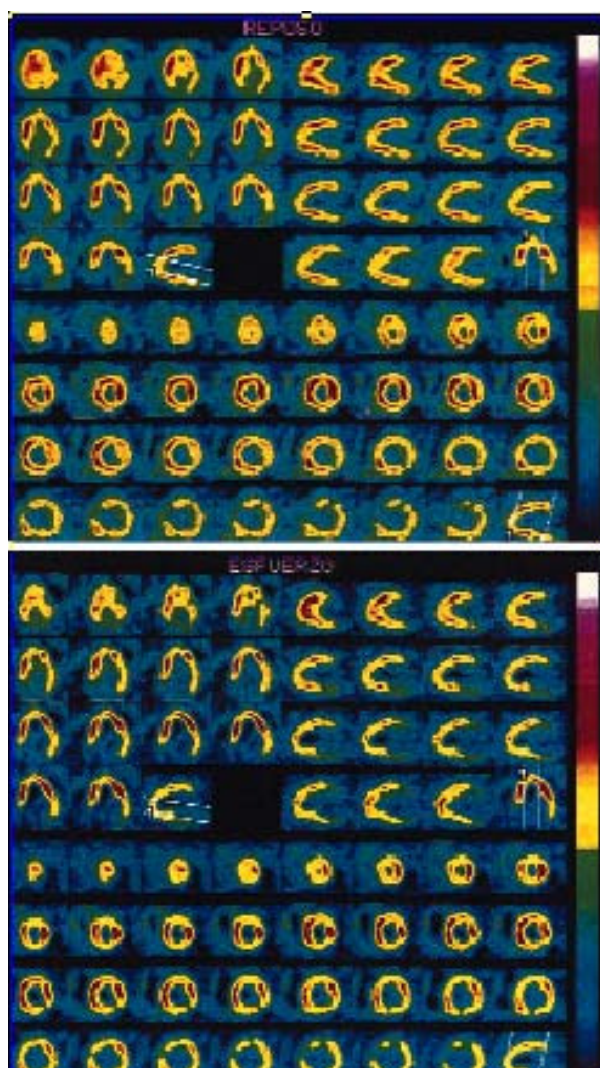


Figura 1. Imagen gammagráfica realizada con tetrofosmín Tc-99m de reposo (panel superior) y postesfuerzo (panel inferior). Defectos de perfusión en cara inferior.

Radioisótopos

El más empleado es el talio marcado isotópicamente, con el inconveniente de que la detección de las imágenes postesfuerzo han de ser inmediatas. La persistencia de defectos importantes suele requerir la reinyección posterior. Los derivados de Tc-99m permiten mayor tiempo para obtener imágenes y además ofrecen las ventajas de una elevada sensibilidad y especificidad por la menor prevalencia de falsos defectos de atenuación²³. Por otra parte, con estos isótopos se pueden realizar estudios de contractilidad y engrosamiento sistólico de forma simultánea, siendo los más usados en la actualidad el Tc-99m sestamibi, el Tc-99m teboroxim y el Tc-99m tetrofosmín.

Utilidad diagnóstica

Las PE con radioisótopos tienen algo más de sensibilidad (83%) que las PE convencionales y especificidad similar (73%). La capacidad pronóstica es semejante y su mayor aportación es el estudio de la "viabilidad miocárdica"²⁴.

Indicaciones

1. Pacientes con ECG basal anormal o con anomalías postesfuerzo de difícil interpretación (clase I).

- Imagen de bloqueo de rama izquierda.
- Imagen de Wolff-Parkinson-White.
- Signos de hipertrofia ventricular izquierda.

2. Mujeres con precordalgia y alteraciones de la repolarización de difícil interpretación en la PE convencional (clase IIa).

3. Signos clínicos de estenosis u oclusión de puentes aortocoronarios (clase IIb).

4. Valoración sistemática de pacientes con angina de pecho (clase III).

Indicaciones de estudios de viabilidad miocárdica

Después de los episodios agudos de isquemia miocárdica, la contractilidad del músculo puede permanecer durante un tiempo alterada por persistencia de la isquemia o por alteración de su metabolismo (hibernación o aturdimiento). Es importante conocer si existe la posibilidad de una recuperación de este miocardio que pudiera restablecer una función sistólica normal. Los estudios con radioisótopos pueden establecer criterios que permitan tomar decisiones de revascularización.

1. Valoración de la posibilidad de revascularización quirúrgica frente al trasplante cardíaco en pacientes isquémicos con disfunción sistólica (clase I).

2. Valoración pronóstica de pacientes postinfarto de miocardio y mala función ventricular (clase II).

3. Valoración pronóstica postinfarto de miocardio con fracción de eyección normal (clase III).

Pruebas de estrés farmacológicas

Son las que emplean la administración de fármacos para la provocación de isquemia. Pueden realizarse con control del ECG o, en una gran mayoría de ocasiones, con la inyección simultánea de radioisótopos.

Los mecanismos de acción de los fármacos empleados se basan en el aumento del consumo de O₂ por el miocardio o produciendo redistribución del flujo co-

ronario hacia territorios irrigados por coronarias sanas mediante vasodilatación máxima microvascular.

Fármacos

La dobutamina aumenta el consumo de O_2 por el miocardio. Se emplea a dosis crecientes, comenzando por 5 $\mu\text{g/kg/min}$ e incrementando la dosis cada 2 o 3 min hasta un máximo de 40 $\mu\text{g/kg/min}$. Hay que hacer controles continuados del ECG y de la presión arterial para prevenir posibles complicaciones.

El dipiridamol es un vasodilatador indirecto que aumenta los valores de adenosina endógena. La administración intravenosa del fármaco produce hiperemia continuada durante más de 30 min, lo que prolonga la duración de los efectos secundarios, sobre todo el broscopismo intenso. Necesita un radiotrazador (talio-dipiridamol).

La adenosina, con una vida media plasmática muy corta (0,6-1,5 s), tiene el mecanismo de acción medido por los receptores específicos A_2 que se encuentran en los vasos coronarios provocando una intensa vasodilatación. Se inyecta por vía intravenosa simultáneamente con un radioisótopo que se deposita en las zonas de mayor vasodilatación, volviéndose "oscuras" las menos perfundidas.

La adenosina trifosfato es un producto presente en el miocardio normal, precursor de la adenosina endógena. Por vía venosa tiene una vida media muy corta (10 s), tiene menos efectos secundarios que la adenosina siendo idéntico su mecanismo de acción y método de empleo (fig. 2)²⁵.

Indicaciones

1. Casos con sospecha clínica de enfermedad coronaria que no pueden realizar prueba de esfuerzo convencional por:

- Enfermedad del aparato locomotor (clase I).
- Enfermedad vascular periférica (clase I).
- Alteraciones del ECG basal (clase IIa).

2. Evaluación del riesgo preoperatorio de cirugía mayor no cardíaca, sobre todo en pacientes con enfermedad vascular periférica incapacitante (clase I).

3. Evaluación pronóstica en pacientes con enfermedad coronaria con o sin infarto de miocardio (clase IIb).

4. Estratificación del riesgo tras infarto de miocardio (clase IIb).

Algunos autores afirman que los estudios de estrés farmacológico realizados a partir del segundo

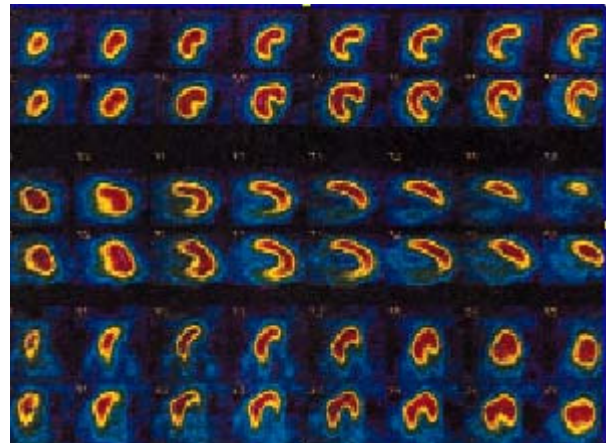


Figura 2. Imagen de perfusión miocárdica tras angioplastia transluminal percutánea con defecto leve en cara inferior. En las dos primeras filas se representa el eje corto, en las del centro el eje largo vertical y en las inferiores el eje largo horizontal²⁶.

día después del ingreso aportan información pronóstica significativa, siendo el predictor más potente el tamaño total del defecto de perfusión²⁶.

Conclusiones

1. Las PE miden la respuesta cardíaca a estímulos que aumentan la FC y el gasto cardíaco.

2. Generalmente se realiza ejercicio isotónico o dinámico que tiene una respuesta muscular más fisiológica.

3. Se recomienda que las pruebas sean submáximas o máximas, interrumpidas por la aparición de síntomas o por alcanzar la FC máxima (220-edad, lat/min).

4. En la mayoría de los protocolos se emplea el tapiz rodante siguiendo el protocolo de Bruce.

5. La PE es el método principal para el diagnóstico de la CI y sus indicaciones y contraindicaciones están razonadas según un estudio clínico cuidadoso de los pacientes.

6. La PE postinfarto de miocardio tiene valor pronóstico y es básica para indicar otras exploraciones invasivas.

7. En la interpretación de la PE intervienen numerosas variables, aunque el comportamiento del espacio ST es el principal.

8. La PE puede ser útil, con las limitaciones que se indican, en el estudio de la hipertensión arterial, en la valoración de la insuficiencia cardíaca, en el diagnóstico de algunas miocardiopatías y en la valoración de las valvulopatías.

9. Las pruebas de estrés con fármacos se indican en aquellos casos en que no pueda realizarse un esfuerzo físico adecuado.

10. En los pacientes con dificultades en la interpretación del ECG y en las mujeres, las pruebas con radioisótopos, con ejercicio o con fármacos (dobutamina, dipiridamol, adenosina o adenosin-trifosfato), tienen valor diagnóstico y pronóstico, con una sensibilidad y especificidad al menos semejante a la PE convencional.

Bibliografía

- Rodríguez FA. Adaptaciones fisiológicas al ejercicio físico y efectos fisiológicos del entrenamiento. En: Bayés de Luna A, Furlanello F, Maron BJ, Serra Grima JR, editores. *Cardiología deportiva*. Barcelona: Doyma Libros, S.A., 1994;1-17.
- Londeree BR, Moeschberger ML. Influence of age and other factors on maximal heart rate. *J Cardiac Rehabil* 1993;13:381-6.
- Chaitman BR. Pruebas de esfuerzo. En: Branwald E, editor. *Tratado de Cardiología*. (5.ª ed.). Philadelphia: McGraw-Hill Interamericana, 1997; 1:165-87.
- Ferrero JA, Fernández Vaquero A. Consumo de oxígeno: concepto, bases fisiológicas y aplicaciones. En: López Chicharro J, Fernández Vaquero A, editores. *Fisiología del ejercicio*. Madrid: Editorial Médica Panamericana, 1995;209-18.
- Fletcher GF, Balady G, Froelicher VF, et al. Exercise standards. A statement for healthcare for professionals from the American Heart Association. *Circulation* 1995;91:364-8.
- Aros F, Boraita A, Alegría E, et al. Pruebas de esfuerzo. En: Guías de práctica clínica de la Sociedad Española de Cardiología. 745-80.
- Gibbons RJ, Balady GJ, Beasley JW, et al. Exercise testing: ACC/AHA practice guidelines. *J Am Coll Cardiol* 1997;30:260-315.
- Stuart RJ Jr, Ellestad MH. National survey of exercise stress testing facilities. *Chest* 1980;77:94-7.
- Azpitarte J, Navarrete A, Sánchez J. ¿Es realmente útil la prueba de esfuerzo realizada después de un infarto de miocardio para mejorar el pronóstico de los pacientes? Argumentos a favor. *Rev Esp Cardiol* 1998;51:533-40.
- Villella A, Maggioni AP, Villella M, Giordano A, Turazza FM, Santoro E, et al. Prognostic significance of maximal exercise testing after myocardial infarction treated with thrombolytic agents: the GISSI-2 DATABASE. Grupo italiano per lo Studio della Sopravvivenza Nell'Infarto. *Lancet* 1995;346:523-9.
- Kennedy H, Killip T, Fischer L, et al. The clinical spectrum of coronary artery disease and its surgical and medical management: 1974-1979. The Coronary Artery Surgery Study (CASS). *Circulation* 1977;56:756-61.
- Hlatky MA, Pryor DB, Harrell FE, Calig RM, Mark DB, Rosati RA. Factors affecting sensitivity and specificity of exercise electrocardiography: multivariable analysis. *Am J Med* 1984;77:64-71.
- Mudge GH, Goldstein S, Addonizio LJ, Caplan A, Mancini D, Levine TB, et al. 24th Bethesda Conference: Cardiac transplantation. Task Force 3: Recipient guidelines/prioritization. *J Am Coll Cardiol* 1993;22:21-31.
- Gianrossi R, Detrano R, Mulvihill D, Lehmann K, Dubach P, Colombo A et al. Exercise-induced ST depression in the diagnosis of coronary artery disease: a metaanalysis. *Circulation*. 1989;80:87-98.
- Detrano R, Gianrossi R, Froelicher V. The diagnostic accuracy of the exercise electrocardiogram: a metaanalysis of 22 years of research. *Prog Cardiovasc Dis* 1989;32:173-206.
- Margonato A, Chierchia SI, Xuereb RG, Xuereb M, Fragasso G, Cappelletti A, et al. Specificity and sensitivity of exercise-induced ST segment elevation for detection of residual viability: comparison with fluoro-deoxyglucose and positron emission tomography. *J Am Coll Cardiol* 1995;25:1032-8.
- Mark DB, Hlatky MA, Harrell FE, Lee KL, Califf RM, Pryor DB. Exercise treadmill score for predicting prognosis in coronary artery disease. *Ann Intern Med* 1987;106:793-800.
- Weiner DA, Ryan TJ, McCabe CH, Chaitman BR, Sheffield LT, Ferguson JC, et al. Prognostic importance of a clinical profile and exercise test in medically treated patients with coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol* 1984;3:772-79.
- Lauer MS, Pashkow FJ, Harvey SA, Marwick TH, Thomas JD. Angiographic and prognostic implications of an exaggerated exercise systolic blood pressure response and rest systolic blood pressure in adults undergoing evaluation for suspected coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol* 1995;26:1630-6.
- Grima A. La ergometría en el diagnóstico y pronóstico de la hipertensión arterial. *Rev Esp Cardiol* 1995;48(Supl 4):40-4.
- Mancini DM, Eisen H, Kussmaul W, Mull R, Edmunds LH Jr, Wilson JR. Value of peak exercise oxygen consumption for optimal timing of cardiac transplantation in ambulatory patients with heart failure. *Circulation* 1991;83:778-86.
- Spirito P, Seldman CE, McKenna WJ, Maron BJ. The management of hypertrophic cardiomyopathy. *N Engl J Med* 1997; 336:775-85.
- Castel Conesa J, Santana Boada C, Candell Riera J, García Burillo A, et al. La tomografía miocárdica de la enfermedad coronaria multivaso. *Rev Esp Cardiol* 1997;50:635-42.
- Iskandrian AS, Heo J, Schellenet HR. Myocardial viability: methods of assessment and clinical relevance. *Am Heart J* 1996;132:1226-35.
- Bravo Delgado MN. Utilidad y aplicación del estudio de perfusión miocárdica con TI-201 tras estrés farmacológico con adenosina trifosfato en el diagnóstico y valoración pronóstica de la enfermedad coronaria [tesis doctoral]. Universidad del País Vasco, 2001.
- Hachamovitch R, Berman DS, Kiat H, Cohen I, Cabico JA, et al. Exercise myocardial perfusion SPECT in patients without known coronary artery disease. *Circulation* 1996;93:905-14.